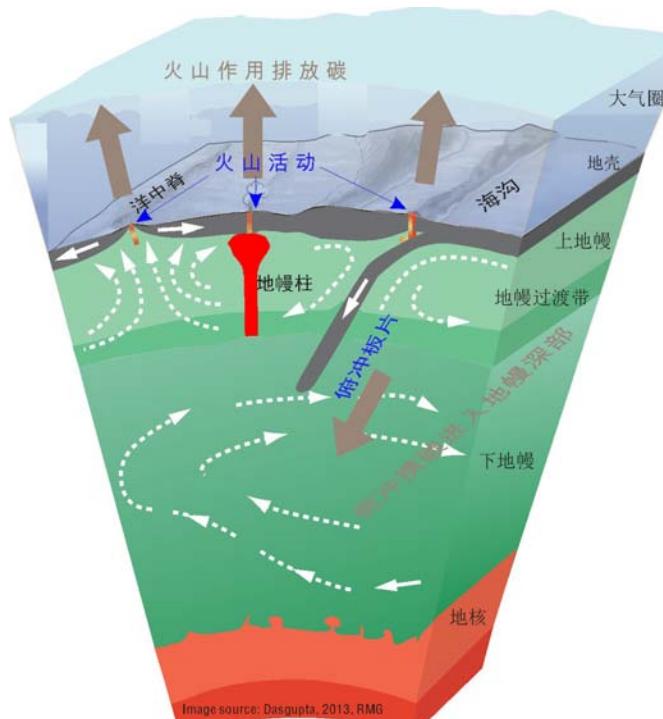


地球科学前沿报道

2019 · 第 2 辑



中国科学院地质与地球物理研究所

目录



1. 地球深部	1
Nature Geoscience: 从埃迪卡拉纪超低地磁场强度推断出年轻的内核形成时间.....	2
PNAS: 地核温压条件下 Fe-Si-O 系统发生不混融的证据.....	6
Nature Geoscience: 下地幔广泛存在各向异性.....	8
Nature: CaSiO ₃ 钙钛矿的地震波速实验测定及其对下地幔 LLSVPs 的启示.....	11
Nature: 立方结构 CaSiO ₃ 钙钛矿的声速原位测量及对下地幔顶部物质成分的启示.....	15
Nature Geoscience: 地幔对流的多尺度地形响应.....	19
Nature: 金伯利岩 Hf-Nd 同位素揭示地球长期存在未去气的原生地幔储库.....	23
Nature: 地幔转换带冷俯冲板块的磁学性质研究.....	28
Science、Nature Geoscience: 冰岛近莫霍面处岩浆存储千年及其快速运移至地表的研究.....	33
Nature: Mohns 超慢速扩张脊的深部电性结构成像.....	37
Nature Geoscience: 大塔穆火山成因新解.....	40
2. 板块构造	44
Nature Geoscience: 太古宙 TTG 的成因——来自硅同位素的证据.....	45
Science: 金刚石中硫化物包裹体的硫同位素组成对板块构造启动时间的限定.....	49
Nature: Nazca 板块 – 构造重建与安第斯边缘演化.....	52



Nature: 从变质作用演化看板块构造体制转型.....	56
Nature: 俯冲的碳.....	60
Science Advances: 利用地震追踪俯冲带流体从源（板片）到汇（地幔楔）的迁移过程.....	65
3. 地震寻踪.....	70
Nature Geoscience: 2018 <i>Mw7.5</i> 级帕卢地震——快速与持续超剪切破裂事件.....	71
Nature: 大地震与小震破裂起始阶段存在相似性的多次观测证据.....	74
Geology: 地震波衰减性改变——气体驱动型火山喷发的前兆.....	77
Nature Geoscience: 通过机器学习用地震波形记录监测俯冲带断层活动.....	80
Science: 寻找隐藏的微地震——应用模板匹配技术建立更完整的地震目录.....	83
Science: 如何管理地下注水诱发的地震风险——来自韩国浦项地震的启示.....	87
PNAS: 多孔弹性应力强化的孔隙压力扩散控制了俄克拉荷马州的诱发地震活动.....	90
Nature Geoscience: 美国俄克拉荷马州深部废水回注诱发的地震机理研究.....	93
4. 表层系统.....	96
Science: 岩浆海的氧化还原环境对地球早期大气组成的影响.....	97
PNAS: 大型不整合面指示冰川活动.....	101
PNAS: 陆生植物繁盛之前地球上已存在类似现今的河流体系.....	105
Nature Communications: 全球构造引发埃迪卡拉纪氧化事件.....	108
Nature Ecology & Evolution: “寒武纪生命大爆发”的再认识.....	111
Science Advances: 中奥陶世生物大辐射的触发机制——来自 L 型球粒陨石的证据.....	117
Geology: 火山作用——晚古生代大冰期重要的驱动力.....	121
Nature Geoscience: 植被对早侏罗世全球变暖的响应.....	124
Science: 地质学和天文学约束下的太阳系混沌及古新世—始新世界线年龄.....	127
Science: 始新世青藏高原海拔不超过 3000 米——重新审视青藏高原同位素古高度研究.....	130
Nature: 新近纪全球变冷驱动因素是陆表风化强度增强而非风化通量增大.....	133

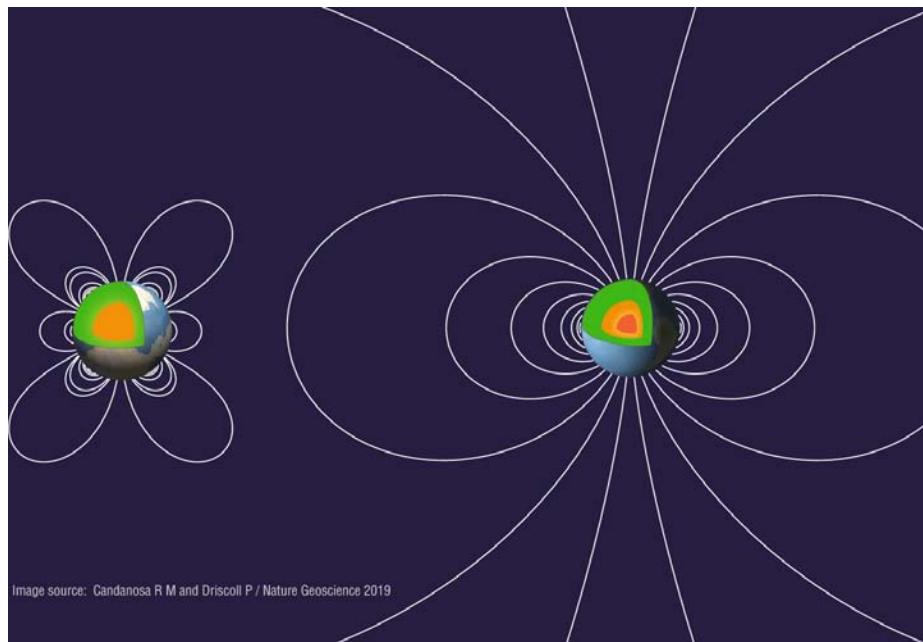


Nature Geoscience: 小冰期最后阶段火山连续喷发的气候效应.....	137
Nature: 全球过去 2000 年年平均温度空间格局多指标集成.....	140
Nature Geoscience: 全球过去 2000 年年平均温度序列多指标集成.....	143
Geology: 重建火山气体喷发历史的新指标——树轮稳定碳、硫同位素.....	146
5. 古今海洋.....	148
Science: 地球早期海洋温度并非想象中那么高.....	149
Nature Geoscience: 27 亿年前的富铵海洋.....	153
Nature Geoscience: 大氧化事件前大陆架之上的完全氧化水体.....	156
PNAS: 成岩作用记录了新元古代海水无机碳库信息.....	160
Nature Geoscience: 侏罗纪海洋生态的成功转变——从非生物控制转变为生物控制.....	164
Science: 新生代海洋氮—硫循环变化及其与构造运动的关系.....	167
Science Advances: 海—气交换不平衡增加冰期海洋碳存储.....	171
Science: 海洋的漫长记忆——历史上的小冰期仍在太平洋深处上演.....	175
Nature Geoscience: 氧化海底环境中持续的有机质沉积.....	180
Nature: 海洋固氮作用新格局.....	182
Nature Communications: 技术带动进步——为时两年的海洋水汽同位素数据集.....	187
Nature Communications: 未来海洋会成为一潭死水吗？.....	190
6. 星际探索.....	192
Science: MMS 星座完美捕捉到电子在磁重联扩散区中的动力学行为.....	193
Science Advances: 地球的 C、N 和 S 来自大撞击.....	196
Nature Geoscience: 月球起源与地球岩浆洋.....	199
Nature Geoscience: Hf-W 体系对月球形成时间的启示.....	202
Nature Geoscience: 月球与水星上浅陨石坑中的厚冰沉积.....	205
Nature: 火卫一轨道演化揭示火星流变学和热历史.....	208
Science、Nature 等: 小行星 Bennu 和 Ryugu 的新发现对小行星起源和演化的新认识.....	211
Nature Geoscience: 冥王星存在海洋源于气体水合物隔热层.....	215



PNAS: 星际环境中的笼形水合物.....	218
7. 前沿——永无止境.....	221
Science Advances: 锶同位素示踪人群和动物的迁移行为——以英国巨石阵为例.....	222
Science Advances: 晶体如何形成——关于成核途径的理论.....	226
Nature Communications: 锌对白云石形成的催化作用.....	229
Nature Communications: 表生条件下真菌对金氧化还原作用的证据.....	232
PNAS: 岩石破裂形成演化动态观测.....	236
PNAS: 利用量子传感器探测从地壳到人脑的未知领域.....	239

1. 地球深部





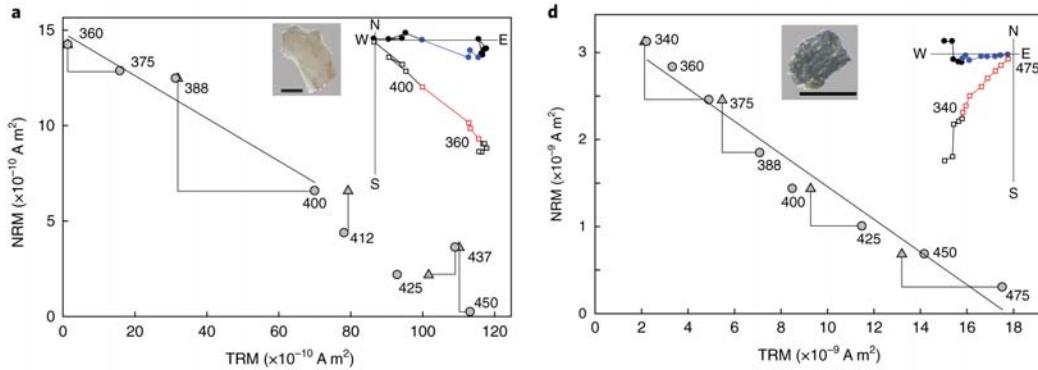
Nature Geoscience : 从埃迪卡拉纪超低地磁场强度推断出年轻的内核形成时间

地球内核的形成是地球演化的重大事件。自 1936 年地震学研究发现地球的固态内核以来，内核的形成时间一直备受关注。内核形成与地球热历史密切相关，数值模拟实验给出了不同的地核热导率，导致通过计算得出内核形成时间为 25–5 亿年前。在内核形成初期，由于地核中流体的对流机制发生了改变，地磁场也相应发生变化，因此地磁场变化是约束内核形成时间的一个有效途径。英国利物浦大学 Biggin et al. (2015) 使用质量标准 QPI 对前寒武纪的地磁场古强度数据进行了严格的筛选，通过对这些高质量数据的时序分析发现，15–10 亿年前地磁场强度和变化范围均明显增大，认为这是内核出现的迹象，是外核冷却的熔铁导致固态铁开始“冻结”的时间。然而，这一研究受到其他学者质疑，他们认为作者所用的部分古强度值高的数据对应的样品包含粘滞性剩磁，可能会高估古地磁场强度，若剔除这一影响，则看不出明显的增高趋势，不能指示固态内核开始形成。

最近，美国罗彻斯特大学 Tarduno 的

研究团队在 *Nature Geoscience* 上发表最新研究成果，他们对加拿大魁北克省东部 5.65 亿年前形成的埃迪卡拉纪镁铁质层状侵入体中的斜长石和斜辉石单晶体进行了古地磁学研究，观测到了超低的地磁场古强度值和较高的倒转频率，结合数值模拟，他们推断在前寒武纪晚期，地球发电机几乎接近崩溃，但由于此时地球内核开始生长，使地核发电机重新获得了能量。

他们用 Thellier-Coe 方法测量了样品中单晶硅酸盐记录的古地磁场强度，经过冷却速率和剩磁各向异性校正，获得古地磁强度平均值为 $3.0 \pm 1.2 \mu\text{T}$ ，对应的偶极矩约为 $0.7 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ ，比现今的地磁场强度小十倍以上。这些数值非常低，与数值模拟预测内核形成初期地磁场偶极子处于弱状态的结果相吻合；数值高于不存在地核发电机时完全由太阳风产生的磁场强度，表明此时地核发电机是存在的，但处于一种异常状态。他们还在 Sept-Îles 长石中亚厘米级范围内观测到了近反向的地磁场方向，暗示着在 5.65 亿年前有较高的地磁极倒转频率（图 1）。



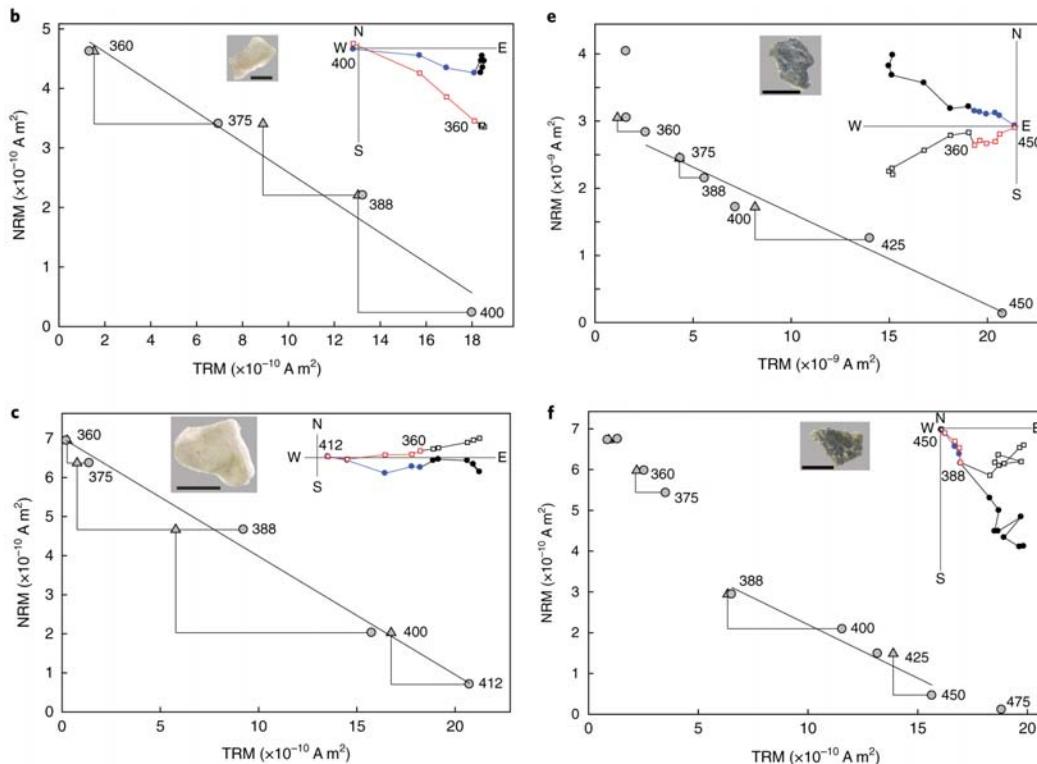


图 1 使用 Thellier-Coe 方法测量 Sept-Îles 斜长石 (a-c)、斜辉石 (d-f) 中的单晶硅酸盐记录的古地磁场强度。其中，NRM 代表天然剩磁，TRM 代表热剩磁，右上角插图为退磁矢量投影图，表示样品记录的古地磁场方向 (Bono et al., 2019)

假如地核发电机在固态内核形成前需要 $0\text{--}100 \text{ MW K}^{-1}$ 的熵增率，其中 0 代表弱发电机状态， 100 MW K^{-1} 代表强发电机状态，那么在 5.65 亿年前的地球成核时期，热导率为 $86\text{--}118 \text{ W mK}^{-1}$ (图 2 黑色竖线与点虚线和短虚线形成的范围)。研究表明，在过去 2 亿年，地磁场强度与其反转频率大致呈反相关。白垩纪超静磁带 (CNS) 期间 (1.25–0.83 亿年)，地磁场强度增强，反转频率变低，长期保持为正极性。而在 1.65–1.55 亿年前，地磁场强度较弱，倒转频繁发生 (Tarduno and Cottrell, 2005; Tarduno, 2009)。因此，5.65 亿年前超低的磁场强度可能标志着与地幔对流相关的地核发电机 2 亿年周期的开始；他们假设随着年轻内核的生长，核幔边界的热

通量将保持恒定，并且与现今通过地震学观测获得的数据一致，那么应有 15 TW 的热对流进入地幔，从而降低了地幔的冷却速率。

有趣的是，埃迪卡拉纪超低的地磁场强度可能与这一特殊时期的地球生命活动有某种联系。如此低的地磁场强度使地球磁层顶的高度长期仅为 4–5 个地球半径大小 (Tarduno et al., 2010), Meert et al. (2016) 认为在埃迪卡拉纪，偶极子场强度减弱导致臭氧层破坏和氧气逃逸，从而使浅海环境中 UV-B 辐射增强，可能与埃迪卡拉纪末期生物灭绝事件有关。也有研究表示寒武纪时期地磁场的增强抵御了太阳风对生命的伤害，可能是促进生命大爆发的重要原因 (Doglioni et al., 2016)。

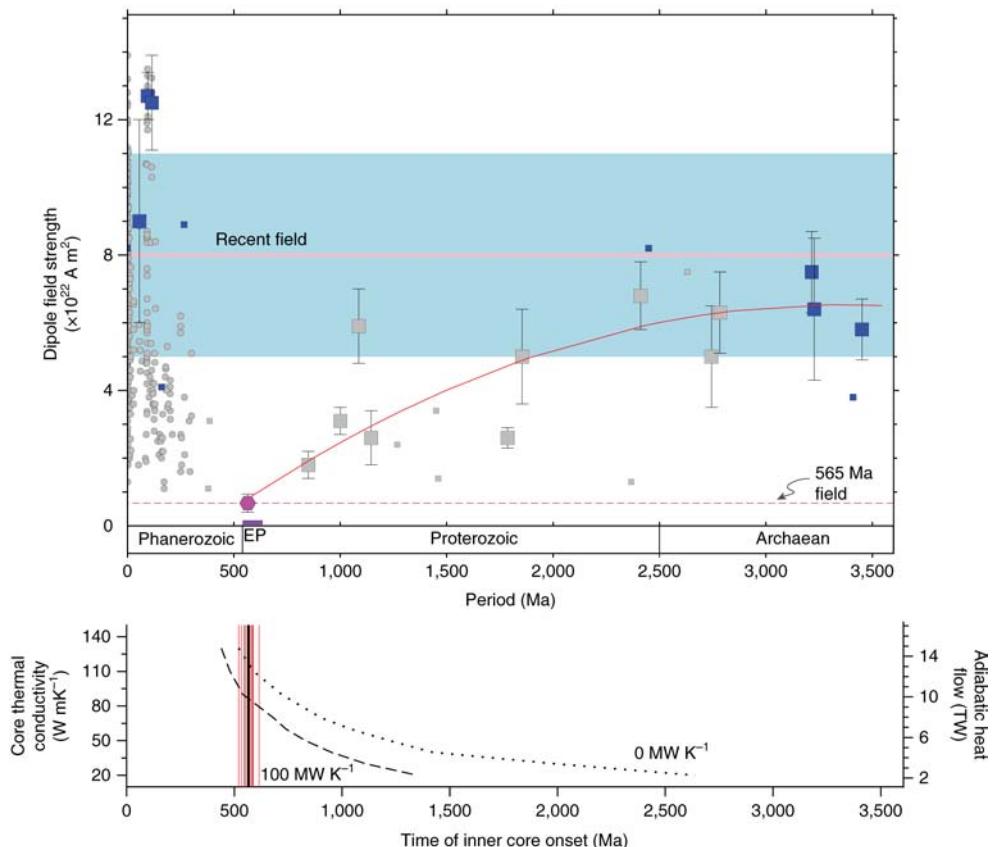


图 2 地磁场强度变化和内核生长。上图中蓝色大方块为单晶古强度，灰色大方块为全岩古强度，灰色小圆圈为显生宙虚偶极矩值，蓝色小方块为从单晶颗粒获得的虚偶极矩，紫色多边形为本研究获得单晶古强度平均值。上图显示 5.65 亿年之前地磁场强度整体为下降趋势，5.65 亿年达到最低，之后开始升高，因此 5.65 亿年左右是地磁场强度开始增强的转折点，指示此时内核开始形成。下图为根据热导率获得内核形成模式年龄，图中点虚线和短虚线分别对应假设核幔边界热流不变条件下弱和强发电机状态。红色和黑色竖线分别代表发电机不稳定时期和 Sept-Îles 侵入体年龄，表明本文观测到的 5.65 亿年地磁场强度超低值与数值模拟预测的地球发电机不稳定时期相吻合 (Bono et al., 2019)

主要参考文献

- Biggin A J, Piispa E J, Pesonen L J, et al. Palaeomagnetic field intensity variations suggest Mesoproterozoic inner-core nucleation[J]. *Nature*, 2015, 526(7572): 245-248. ([链接](#))
- Bono R K, Tarduno J A, Nimmo F, et al. Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(2): 143-147. ([链接](#))
- Doglioni C, Pignatti J, Coleman M. Why did life develop on the surface of the Earth in the Cambrian[J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(6), 865-873. ([链接](#))
- Meert J G, Levashova N M, Bazhenov M L, et al. Rapid changes of magnetic field polarity in the late Ediacaran: linking the Cambrian evolutionary radiation and increased UV-B radiation[J]. *Gondwana Research*, 2016, 34: 149-157. ([链接](#))
- Tarduno J A, Cottrell R D. Dipole strength and variation of the time - averaged reversing and nonrevers-



ing geodynamo based on Thellier analyses of single plagioclase crystals[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B11). ([链接](#))

Tarduno J A. Geodynamo history preserved in single silicate crystals: Origins and long-term mantle control[J]. *Elements*, 2009, 5(4): 217-222. ([链接](#))

Tarduno J A, Cottrell R D, Watkeys M K, et al. Geodynamo, solar wind, and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago[J]. *Science*, 2010, 327(5970): 1238-1240. ([链接](#))

(撰稿：何况 / 地星室，蔡书慧 / 岩石圈室)



PNAS：地核温压条件下 Fe-Si-O 系统发生不混融的证据

大量的地震学证据表明地球液态外核的顶部存在一个稳定层，一般称为 E' 层。该层具有较低的 P 波速度，并且由于是稳定的层，也与整个外核相比具有相对较低的密度，否则就会由于重力的作用而下沉。对于该层的形成机制，前人提出了各种解释。比如，由固态内核结晶排出的轻元素上浮到地核顶部堆积；由地核和地幔相互发生化学反应的产物堆积形成；甚至是在地球形成时，由于小行星撞击地球，小行星的核穿过地幔进入地核，但由于不能与地核融合，从而堆积在地核顶部。

美国耶鲁大学的 Arveson et al. (2019) 近日在 *PNAS* 上发表了他们的最新成果，提出地核顶部的稳定层是由 Fe-Si-O 系统发生不混融造成的，也就是说 Fe-Si-O 在地核温压条件下分成两个能够共存但成分不一致的流体。不混融在日常生活中最常见的就是水和油的不混融，地质学当中常见的不混融也许应该是流体发生不混融，该现象经常是成矿的关键机制。此外，岩浆也能发生不混融现象。

为了获得在地核如此高温高压环境下 Fe-Si-O 系统仍然能够发生不混融的证据，Arveson 等结合使用了高温高压实验和第一原理模拟两种方法。实验是将样品封装在金刚石压腔里实现高压，然后用高能量激光照射样品形成高温，根据淬火后样品的结构特征，判断是否发生了不混融。如果样品结构均匀，就认为是混融；如果样品

呈现条带状，就认为发生了不混融。通过电子探针可以大致确定两个不混融相的成分。结果他们发现不混融相的主要区别在含氧量上面，一个富含氧，一个相对缺失氧。他们还通过第一原理分子动力学方法，巧妙地通过分子动力学模拟过程中原子的行走路径，原子聚集形成的簇的形状，原子之间配位数变化等进一步确认了他们实验的结果，同时将实验温压结果推广到更高的温压条件，即地核温压条件下 Fe-Si-O 系统仍然有可能发生不混融。

这个结果的第一个意义是进一步加深了我们对地核成分的认识。地震学的观测结果是这一层位同时具有较低的密度和 P 波速度。密度和速度是一对矛盾体，轻元素的加入会降低密度，但却会提高波速。因此，为了满足同时低密和低波速，必须在 Si 和 O 这两个轻元素之外，再加入第三个轻元素，并且第三个轻元素在两个不混融相中的成分很不一样，才能满足地震学的观测。这样整个地核成分系统就会变得更加复杂。

第二个重要意义是不混融的出现将改变传统的地核演化路径，从而改变我们对用古地磁学方法测量的地球古磁场强度变化机制的认识。如图 1 所示，由 A 到 B 再到 C，随着地核温度的逐步降低（分别用左侧图中 A 中的红色线，B 中的褐色线，和 C 中的蓝色线逐步降低来表示），地核在 A 首先呈现的是 Fe-Si-O 混融状态。然后在 B 发生不混融。由于不混融发生在地核中心，

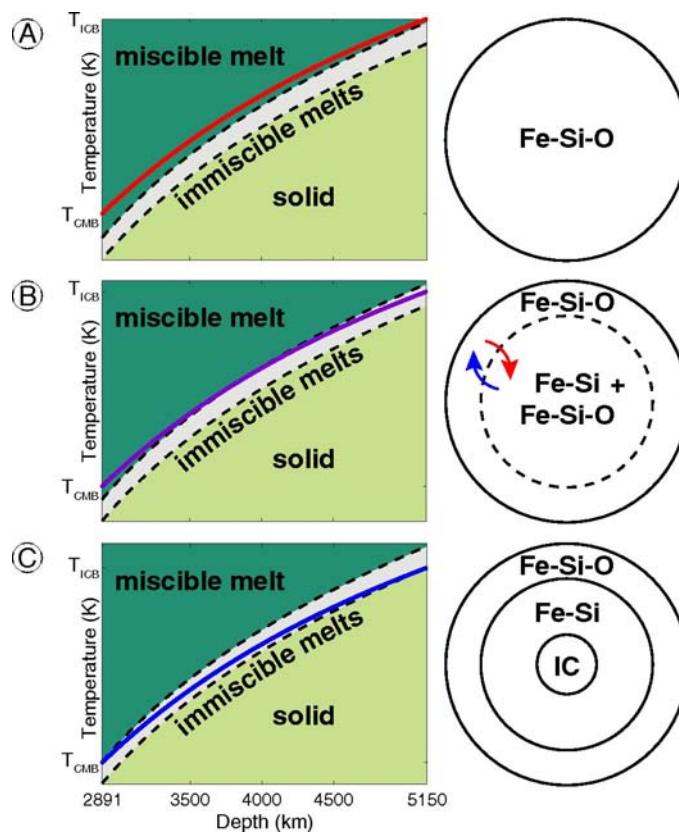


图 1 地核演化路径 (Arveson et al., 2019)。A 中的红色线, B 中的褐色线和 C 中的蓝色线分别代表地核温度分布情况。左侧图中两条虚线中间区域代表不混融发生区间。右侧图为地核结构

同时不混融出来的相由于富含更多氧, 密度较小, 会上浮, 从而推动地核流体运动, 产生磁场。这是推动地核磁场运转的一个新机制。混融和不混融的边界 (B 中右图虚线), 由于两个不混融相成分的改变会不断缩放, 造成液态地核内部复杂的流体运动方式。在未来地核发电机模拟中, 也许应该考虑不混融造成的流体运动所产生的

地磁场特征, 并与古地磁学测量结果进行对比, 深入认识地磁场的运行机制。最后, 随着温度的进一步降低, 地核演化成我们现在看到的状态 C, 外核顶部有一个稳定层, 最内部为固态内核。

显然, 研究 Fe-Si-O 的不混融对我们认识地核和地球磁场的演化具有非常重要意义。

主要参考文献

Arveson S M, Deng J, Karki B B, et al. Evidence for Fe-Si-O liquid immiscibility at deep Earth pressures[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(21): 10238-10243. ([链接](#))

(撰稿: 张毅刚 / 地星室)



Nature Geoscience : 下地幔广泛存在各向异性

构造活动可以导致地球深部物质产生各向异性，因此深部各向异性特征是重建深部动力过程的重要依据。关于地幔的各向异性（见 Savage, 1999；Karato et al., 2008 等综述），存在以下传统观点：

(1) 上地幔存在较强的各向异性，其主要成因是上地幔矿物（主要是橄榄石）在一定应变条件下产生晶格优势排列（lattice-preferred orientation, LPO）。对于上地幔而言，起主导作用的两种变形机制，分别是扩散蠕变（diffusion creep）和位错蠕变（dislocation creep）。扩散蠕变是在晶格边界之间或穿过晶格的一种固态扩散，它并不产生晶格优势方向，因此矿物晶体变形后依然是各向同性的。位错蠕变则是晶格内的结晶错动，它能产生晶格优势方向因此导致矿物具有各向异性，从而能示踪地幔的流动的方向。

(2) 下地幔是各向同性的。尽管在物质成分上相似，下地幔与上地幔具有截然不同的物理性质。下地幔的变形机制通常为超塑性流动（superplastic flow；Karato et al., 1995）或纯攀移蠕变（pure climb creep；Boioli et al., 2017），这两种机制都不产生各向异性。

这意味着，因为下地幔是各向同性的，所以下地幔不能记录构造活动的变形信息。然而近期葡萄牙里斯本大学 Ferreira et al. (2019) 发表在 *Nature Geoscience* 上的论文对此提出了质疑。

基于地震学 (SGLOBE-rani 模型；Chang

et al., 2015) 和地球动力学数值模拟综合研究，Ferreira 等提出板块俯冲导致下地幔产生各向异性的证据。他们发现沿着大洋板块俯冲带，在下地幔顶部深度范围 (700–1300 km)，统计上表现为水平方向横波速度明显高于垂直方向速度，表明在下地幔顶部广泛存在明显的各向异性特征（图 1）。通过簇类分析和三维动力学数值模拟，他们进一步认为 (1) 各向异性介质可能与横向停滞在下地幔顶部俯冲大洋板片有关；(2) 各向异性产生的机制是俯冲板片横向运动导致板片周缘接触的下地幔物质（布里奇曼石）发生位错蠕变，进而在宏观上产生水平方向上的晶格优势排列。

该项研究对下地幔物质变形机制提出了新的证据，因此为利用各向异性测量示踪地幔流动模式，构建下地幔动力过程提供了全新工具。此外，由于传统测横波分裂观测假定下地幔各向异性强度可以忽略，我们在解释俯冲带地区获得的各向异性特征时必须要考虑下地幔的贡献，而不能单纯地归结为上地幔各向异性。

附录：方法简介

测量地球深部物质各向异性的最有效途径目前还是地震波方法。测量地幔各向异性常规的方法包括地震波横波分裂测量和各向异性层析成像两种。Ferreira et al. (2019) 论文基于的是面波各向异性层析成像方法结果 (Chang et al., 2015)。

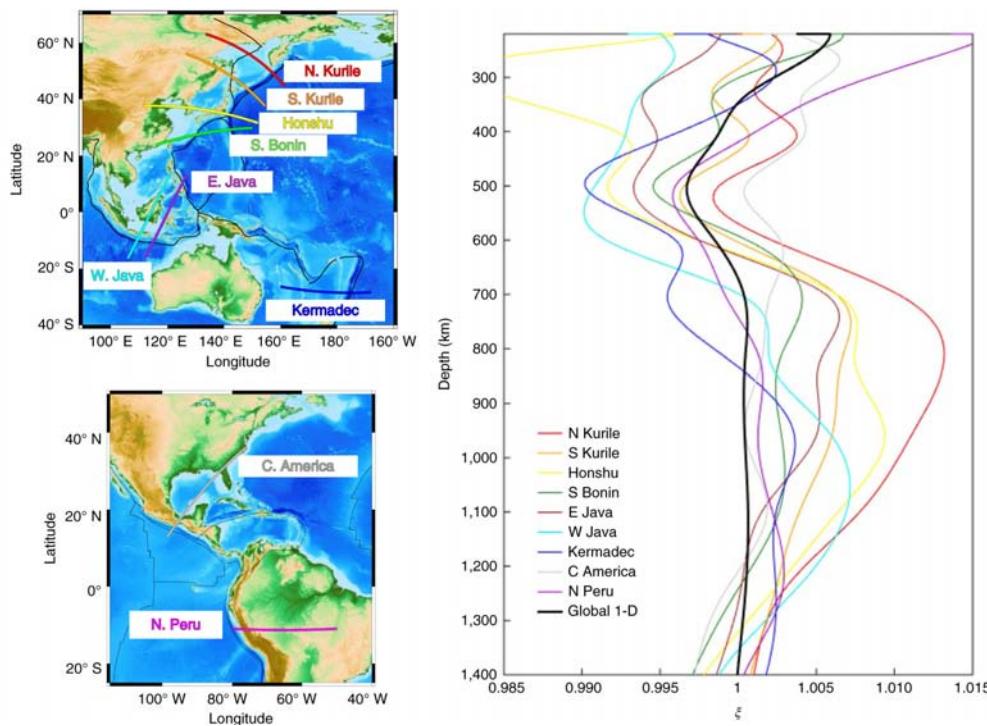


图1 沿着太平洋板块俯冲方向不同剖面下方 V_{SH} 、 V_{SV} 平均速度差异。(左) 剖面位置 ; (右) 不同剖面下

$$\text{方平均 } \xi = \frac{V_{SH}^2}{V_{SV}^2} : > 1 \text{ 表示横波速度水平方向高于垂直方向 ; } < 1 \text{ 则相反 (Ferreira et al., 2019)}$$

(1) 地震波横波分裂测量：地震波横波在各向异性介质中传播时，分解为极化方向相互正交的快、慢两个分量，这种现象类似于光波传播中的双折射现象（optical birefringence）。通过测量快慢分量的方向和时间延迟，可以获得 LPO 方向及强度信息。其优点在于能够准确判断射线路径上的各向异性，具有较高的横向分辨率和径向方位约束，其缺点在于深度分辨率较低。

(2) 各向异性层析成像：在常规的层析成像反演过程中，增加了各向异性参数

自由度。根据使用观测数据的不同，又可分为体波和面波各向异性层析成像方法。

Chang et al. (2015) 所使用的面波各向异性层析成像方法能获得不同深度垂直方向和径向方向的速度差异，用 $\xi = \frac{V_{SH}^2}{V_{SV}^2}$ 表示，其中 V_{SH} 为水平方向横波速度， V_{SV} 为垂直方向横波速度）。其优点在于具有较好的深度分辨率，其缺点是相对于速度结构，各向异性是二阶信息。所以注意的是，也如 Chang et al. (2015) 指出的，现在全球各向异性层析成像还存在较大的争议。

主要参考文献

Boioli F, Carrez P, Cordier P, et al. Pure climb creep mechanism drives flow in Earth's lower mantle[J].

Science Advances, 2017, 3(3): e1601958. ([链接](#))



- Chang S J, Ferreira A M G, Ritsema J, et al. Joint inversion for global isotropic and radially anisotropic mantle structure including crustal thickness perturbations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(6): 4278-4300. ([链接](#))
- Ferreira A M G, Faccenda M, Sturgeon W, et al. Ubiquitous lower-mantle anisotropy beneath subduction zones[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 301-306. ([链接](#))
- Karato S, Zhang S, Wenk H R. Superplasticity in Earth's lower mantle: Evidence from seismic anisotropy and rock physics[J]. *Science*, 1995, 270(5235): 458-461. ([链接](#))
- Karato S, Jung H, Katayama I, et al. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: New insights from laboratory studies[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2008, 36: 59-95. ([链接](#))
- Savage M K. Seismic anisotropy and mantle deformation: what have we learned from shear wave splitting[J]. *Reviews of Geophysics*, 1999, 37(1): 65-106. ([链接](#))

(撰稿：[赵亮](#) / 岩石圈)



Nature : CaSiO₃ 钙钛矿的地震波速实验测定 及其对下地幔 LLSVPs 的启示

从全球一维地震学模型看地球的下地幔，绝大部分似乎是“平淡无奇”的区域。近年来，随着地震观测与反演技术的进步，人们逐渐“看”到下地幔其实有着不同寻常的精彩。其中最吸引人的，是人们通过不同观测均发现核幔边界以上存在厚达上千公里的结构体，它们集中分布于非洲和太平洋以下，横向分布可达数千公里，这些结构体有较为清晰的边界，呈现与周围地幔相比偏低的横波波速（因而被称为大型横波低速带，Large Low Shear Velocity Provinces，简称为 LLSVPs），并且具有较高的横波纵波波速比。显然，研究 LLSVPs 的特征及成因对人们理解地幔对流机制具有十分重要的意义。

什么原因造成 LLSVPs 的横波波速异常？其主因究竟是温度异常还是由于物质成分异常，以及进一步地造成横波波速异常的成分又来自于什么地方？人们对对此有很多解读，也存在很大争议。近日，来自英国伦敦大学学院的 Thomson 等在 *Nature* 上发表了题为“**Seismic velocities of CaSiO₃ perovskite can explain LLSVPs in Earth’s lower mantle**”的最新成果，为解释 LLSVPs 提供了新的约束。

Thomson 等的工作源于矿物学的“传统”思路：利用热力学模型计算矿物组合的波速，并将其与实际地震观测数据相比较，从中推算出造成地震波速异常的矿物学成因。如图 1 所示，用现有的下地幔矿

物数据库计算出的玄武岩波速（图 1 中红色虚线）始终明显大于平均地幔（图 1 中的地幔岩 pyrolite 模型）。他们注意到，该数据库中默认 CaSiO₃ 钙钛矿（以下简称为 CaPv）为立方晶体，并且参数主要来自于对第一原理模拟数据的拟合，但最近的高温高压实验表明，立方结构 CaPv 的实际横波波速也许要远低于理论模拟结果（Gréaux et al., 2019；参见前沿报道《**立方结构 CaSiO₃ 钙钛矿的声速原位测量及对下地幔顶部物质成分的启示**》）。由于 CaPv 在俯冲带玄武岩矿物组合中的占比可达 20% 以上（如图 1），因此现有热力学模型显然高估了洋壳深俯冲物质的横波波速。

和 Gréaux 等的工作类似，Thomson 等利用高温高压实验方法原位测定了 CaPv 随温压变化的结构相变及其波速，不同的是他们在样品中还加入了少量 Ti，并且特别注意了高温下样品的温度梯度控制。如图 1 所示，Thomson 等发现他们在常温常压下测得的 CaPv 波速与 Gréaux 等的结果吻合得很好，但是在高温下存在较大偏差，他们把这些偏差归咎于 Gréaux 等的实验在高温下可能存在较大的温度梯度（样品实际温度可能要低于热电偶测量值约 250 °C – 300 °C）。与此同时，新的实验发现 Ti 的加入将 CaPv 从四方相转变到立方的温度提高了近 800 K，而高压相变会带来波速的较大异常变化（纵波减小 4%–14%，横波减小 8%–20%，如图 3 所示）。

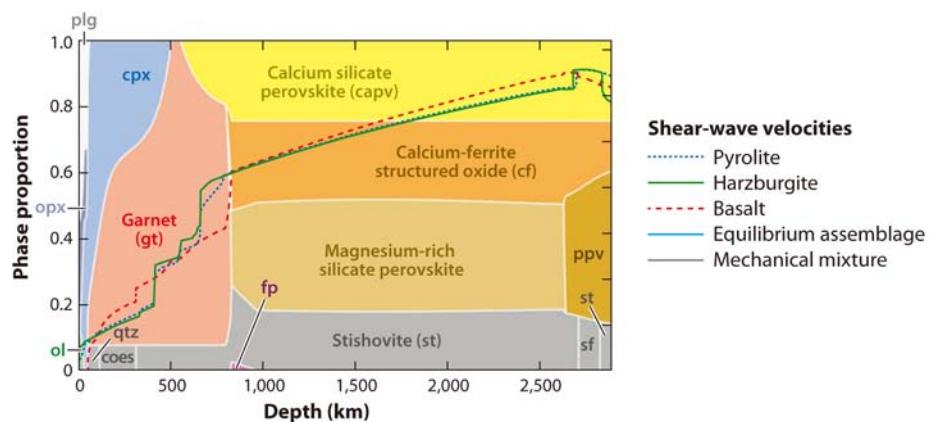


图 1 利用热力学模型计算出的玄武岩模型在地幔条件下的矿物组合与横波波速 (Stixrude and Lithgow-Bertelloni, 2012)

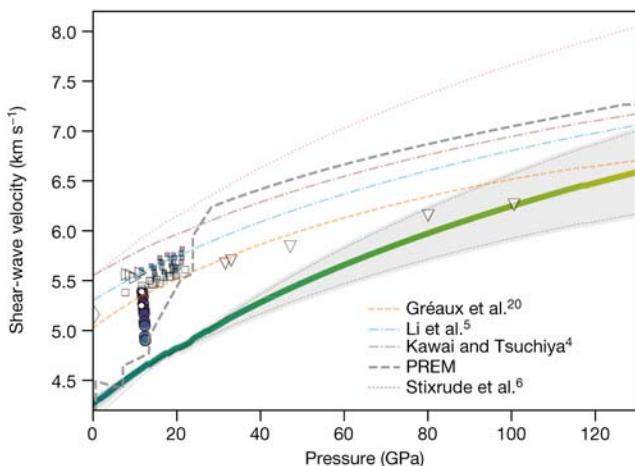


图 2 Thomson 等测得的 CaPv 横波波速与前人研究结果的对比。绿色粗实线为沿 1500K 地幔绝热曲线的立方 CaPv 的横波波速

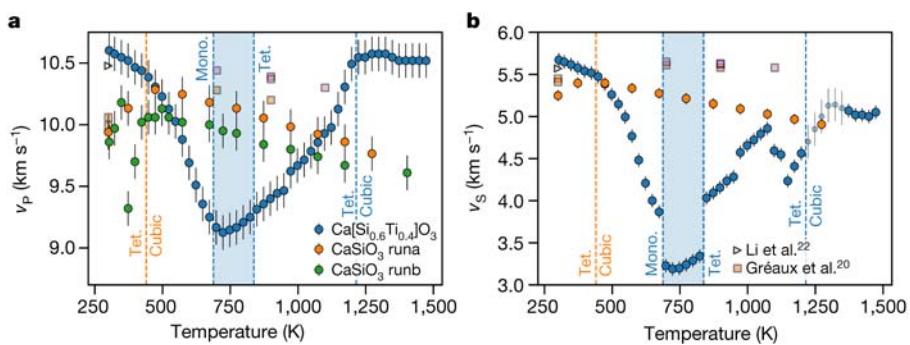


图 3 CaPv 样品在高温高压条件下的波速变化



有了新的实验数据，再精选前人的相关实验数据，Thomson 等重新拟合了立方和四方结构 CaPv 的热力学状态方程参数，然后重新计算了各种矿物学模型的波速。如图 4 所示，沿着 1500 K 的地幔绝热线 MORB 的波速要明显低于平均地幔，考虑到 MORB 的密度要大于平均地幔，因此洋壳俯冲至下地幔堆积成为 LLSVPs 的合理解释。这解决了前人热力学模型预测 MORB 波速高于平均地幔的矛盾（如图 1

所示）。Thomson 等进一步提出，如果 CaPv 已经相转变为立方结构，则 100 GPa 下 64% MORB+36% harzburgite 模型或者 125 GPa 下 48% MORB+52% harzburgite 模型可以较好地解释 LLSVPs 的横波异常以及横波纵波速度比偏大等地震学特征。与此同时，联系图 3 所反映的 CaPv 相变带来的波速异常，Thomson 等提出 1000 公里附近的地幔中部的散射体和异常也许也和 CaPv 密切相关。

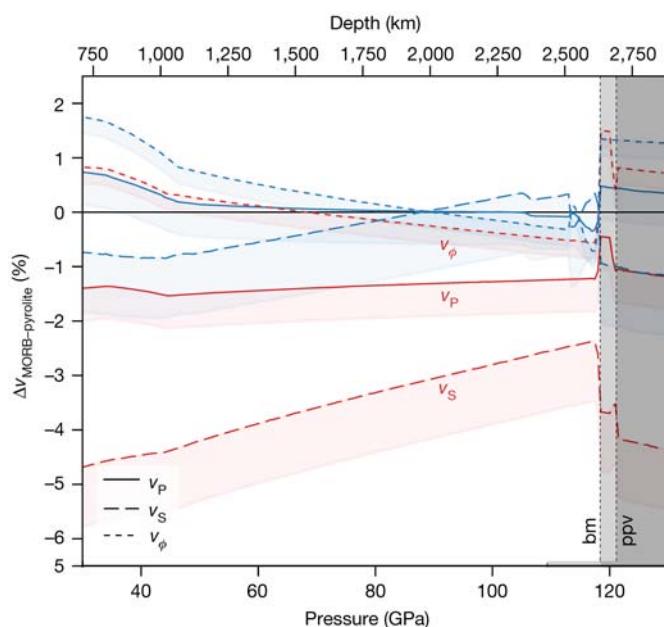


图 4 MORB 模型的波速与平均地幔波速的对比。图中红色为沿着 1500 K 地幔绝热线的波速，而蓝色为沿着 1000 K 俯冲带绝热线的波速

回到 CaPv 矿物本身，Thomson 等的工作是不是就宣告了其弹性波速研究的胜利和终结呢？答案显然是否定的：首先，正如 Thomson 等在其文中述及，他们的实验温压区间还非常有限（大约 12GPa、300–1500 K），从如此有限的数据回归热力学模型推断整个地幔深处（与 LLSVPs 相关的温压可高达 130GPa、3000 K）显然有很大

的不确定性；其次，不同实验之间有差别，Thomson 等虽然做了分析和推断，但评价数据的可靠性显然还有待更多研究的交叉验证；再有，什么原因造成第一原理模拟得到的波速要远高于新的实验结果？这仍然是困扰高温高压领域的热点和难点，同时也是更加深入理解 CaPv 这类具有明显非谐效应矿物的关键。



主要参考文献

Gréaux S, Irfune T, Higo Y, et al. Sound velocity of CaSiO₃ perovskite suggests the presence of basaltic crust in the Earth's lower mantle[J]. *Nature*, 2019, 565: 218-221. ([链接](#))

Stixrude and Lithgow-Bertelloni. Geophysics of chemical heterogeneity in the mantle[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2012, 40: 569-595. ([链接](#))

Thomson A R, et al. Seismic velocities of CaSiO₃ perovskite can explain LLSVPs in Earth's lower mantle[J]. *Nature*, 2019, 572(7771): 643-647. ([链接](#))

(撰稿：张志明，[张志刚](#) / 地星室)



Nature : 立方结构 CaSiO₃ 钙钛矿的声速原位测量及对下地幔顶部物质成分的启示

CaSiO₃ 钙钛矿（以下简称 CaPv）是地幔转换带（MTR, 410–660 km）和下地幔（660–2900 km）中的重要矿物组分。前人的计算模拟与高温高压实验均表明，CaPv 在高压下会随温度的升高而从四方结构转变至立方结构，但对于该相变的温压边界以及立方结构 CaPv 的弹性波速还存在很大争议。从高温高压实验角度，立方结构 CaPv 不能淬火至常温常压，因而常规分析手段不再适用，而在同时高温高压条件下原位测量矿物的热弹性性质一直都是极具挑战的研究。

近日，日本爱媛大学的 Steeve Gréaux

等人在 *Nature* 上发表了实验原位测量 CaPv 声速的最新成果：他们首次在 21 GPa 和 1300 K 条件下原位合成了立方结构的 CaPv 样品，并且通过超声波干涉法和原位 X 射线衍射法测量了样品的波速和密度。一般来说，由于温度降低导致立方结构 CaPv 样品体积缩小，声波在样品上下表面的双向传播时间会随之缩短，但是 Gréaux 等人却发现温度降低到 650 K 以下时，P 波和 S 波的传播时间都明显延长了（图 1），他们将此现象认为作为降温过程中 CaPv 从立方结构转变为四方结构的有力判据。

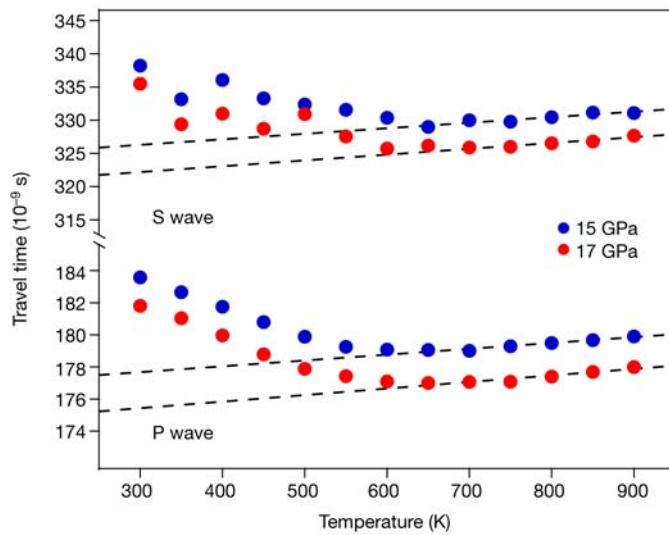


图 1 高温高压下 P 波和 S 波穿过 CaPv 样品的传播时间

Gréaux 等人进而对立方结构的 CaPv 开展了一系列高温声速原位测量工作。他们通过三阶有限应变状态方程来拟合这些数据（图 2），得到了常压下立方结构 CaPv

的体积模量 (K_{s0}) 和剪切模量 (G_0)，对比发现该 K_{s0} 值与理论预测值一致，但是 G_0 远小于所有理论预测值（大约 17%–26%）。虽然前人的一项计算研究中提出立方结构



CaPv 应当有更低的剪切模量 (Kawai and Tsuchiya, 2015), 但他们预测的 G_0 值仍然要明显高于本实验结果 (大约高估了 17%)。

Gréaux 等人进一步地将他们的 CaPv 弹性数据和前人的实验研究结合起来, 沿着地温曲线估算了各种地幔岩石模型的 V_p 和 V_s 值 (图 3)。他们认为 510–600 km 深度范围内方辉橄榄岩的含量逐渐增加, 并且地幔转换带下部 (600–660 km) 以纯的方辉橄榄岩为主要成分, 这能够很好地解释地幔岩 (红线) 的波速与地震观测模型 (黑线) 的偏差。而在下地幔顶部 (660–770 km) 区域, 依据他们新的立方结构 CaPv 波速实验数据, Gréaux 等人发现 MORB 的波速要明显低于地幔岩模型 (图 3), 因此如果在地幔岩中混入 20–30 vol% 的 MORB,

这可以大大降低该区域的波速并使之与地震观测模型相符。

对于 660–770 km 区域地震观测模型明显低于地幔岩模型的解释, 前人还提出过其它推断。例如, Schmandt 等 (2014) 发现俯冲带含水橄榄石相变脱水, 可能引发 660 公里以下的部分熔融, 从而减小该区域的地震波速。这些推断也许并不矛盾, 来自不同地区的样品似乎佐证着不同的可能性。例如, 近期在天然金刚石中发现的 CaPv 包裹体 (Nestola et al., 2018) 可能为 Gréaux 等的推断提供了证据; 而同样在金刚石包裹体中, Pearson 等 (2014) 人发现了高水含量的林伍德石, Tschauner 等 (2018) 甚至发现了高压水冰, 这些发现则似乎为 Schmandt 等人的推断提供了支持。

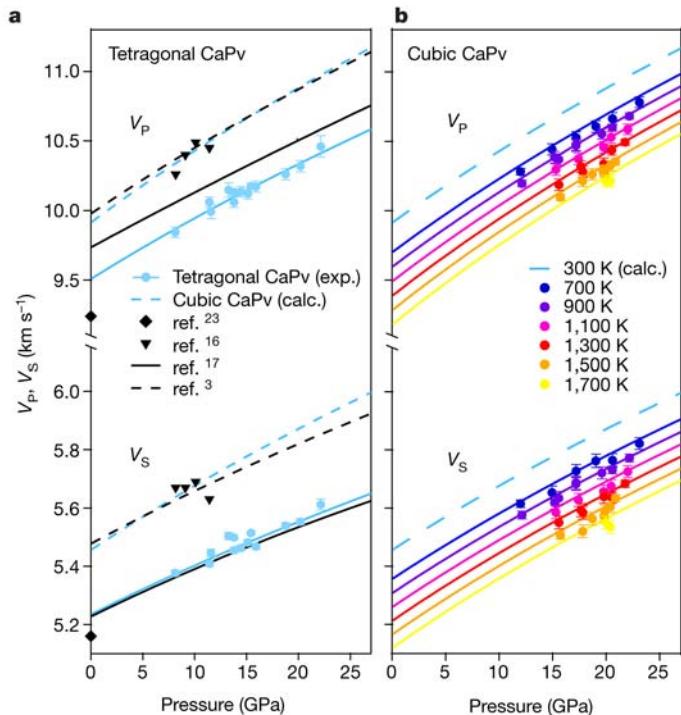


图 2 四方结构 (a) 和立方结构 CaPv (b) 的波速。图中蓝色实线表示四方结构 CaPv 的状态方程, 虚线立方结构 CaPv 状态方程

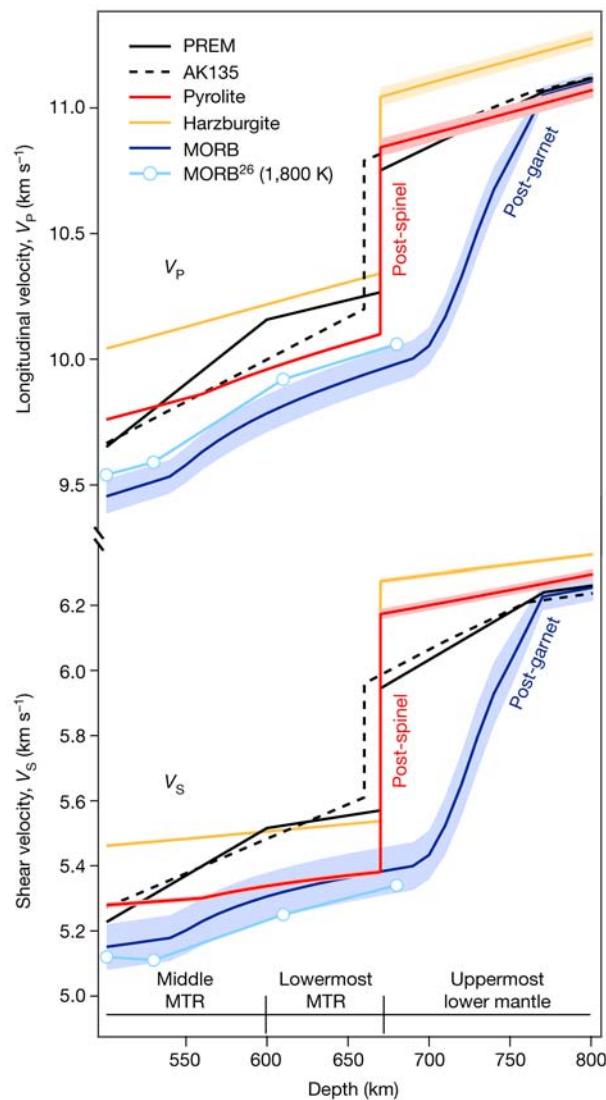


图 3 地幔转换带下部地幔岩、MORB 和方辉橄榄岩成分的声速与代表性地震模型的比较。彩色带阴影实线显示了地幔岩（红色）、MORB（蓝色）和方辉橄榄岩（黄色）的纵向（ V_p ）和剪切（ V_s ）波速，黑色实线和虚线分别代表一维全球地震模型 PREM 和 AK135

主要参考文献

- Gréaux S, Irifune T, Higo Y, et al. Sound velocity of CaSiO₃ perovskite suggests the presence of basaltic crust in the Earth's lower mantle[J]. *Nature*, 2019, 565: 218-221. ([链接](#))
- Kawai K, Tsuchiya T. Small shear modulus of cubic CaSiO₃ perovskite[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8): 2718-2726. ([链接](#))
- Nestola F, Korolev N, Kopylova M, et al. CaSiO₃ perovskite in diamond indicates the recycling of oceanic crust into the lower mantle[J]. *Nature*, 2018, 555(7695): 237-241. ([链接](#))



Pearson D, Brenker F, Nestola F, et al. Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond[J]. *Nature*, 2014, 507: 221-224. ([链接](#))

Schmandt B, Jacobsen S, Becker T, et al. Dehydration melting at the top of the lower mantle[J]. *Science*, 2014, 344: 1265-1268. ([链接](#))

Tschauner O, Huang S, Greenberg E, et al. Ice-VII inclusions in diamonds: Evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle[J]. *Science*, 2018, 359: 1136-1139. ([链接](#))

(撰稿：张志明，张志刚 / 地星室)



Nature Geoscience : 地幔对流的多尺度地形响应

地幔对流是驱动地球各种动力学行为的引擎，直接或间接导致了几乎所有大尺度的构造和地质活动（Davies, 1999）。地幔对流也会对岩石圈施加垂向的应力，使地表产生起伏，这一起伏称为动力地形。地表地形主要受均衡地形——地壳和岩石圈厚度及密度横向不均匀导致的地形——所控制，但动力地形是窥探深部地幔动力学的重要窗口。学者通常用两种方式来约束它的空间分布和振幅。一种是通过从观测地形中去除沉积物、地壳厚度等岩石圈的均衡贡献来估计，结果称作残余地形，它可能只是动力地形的近似；另一种是通过地幔对流模型来预估，也叫预测动力地形。

人们很早就意识到小尺度动力地形的存在，例如 20 世纪 70 年代讨论的夏威夷热点链旁数百至上千公里的隆起。但对于大尺度（5000—10000 km 以上波长）动力地形是否存在，它的振幅和空间分布等问题，两种方法一直存在显著差异。例如根据预测动力地形，全球最低值在东南亚区域（图 1a），其幅度可达 -1 km 甚至更低，但残余地形给出的估计为正或接近于 0 m (Flament et al., 2013)。这种差异导致一些学者对大尺度动力地形的存在乃至地幔对流模型的可靠性提出质疑。

为了更好地约束残余地形，Hoggard et al. (2016) 编制了一个由海洋区域内 2000 多个高精度观测点组成的数据库。对于每

一观测点，先根据地震反射和折射剖面分析，从观测地形中去除沉积层加载和地壳厚度变化所造成的均衡影响，再利用经验模型去除海洋岩石圈随年龄冷却的影响，得到残余地形，后利用正则化的最小二乘法，将残余地形进行球谐展开，最后得到残余地形的波长、空间分布和振幅。由于高精度残余地形数据数量稀少，他们在进行球谐展开时，联合了低精度但分布更为广泛的海洋残余地形和陆地残余地形数据（由于饱受质疑，在其之后的研究中陆地数据已被放弃）。得到的结果（图 1b）和前人的残余地形类似：长波长动力地形振幅不可能超过 500 m，因此大尺度地幔对流对地表构造的影响有限。

杨亭等 (Yang and Gurnis, 2016; Yang et al., 2017) 通过对合成地形及观测重力场的系统分析指出，动力地形长期存在争论很大程度上来自于残余地形估计的不准确性，Hoggard 等使用低精度的残余地形污染了其获得的高精度数据，使用目前稀疏分布的高精度残余地形数据可以有效地推测出长波长动力地形的分布，其结果和长期以来预测动力地形在空间分布和振幅上均一致。

最近澳大利亚国立大学 Davies et al. (2019) 对 Yang et al. (2017) 的工作进行了验证和扩展，认为深部和浅部的地幔对流都对地表地形都有重要影响，研究成果发表在 *Nature Geoscience* 上。

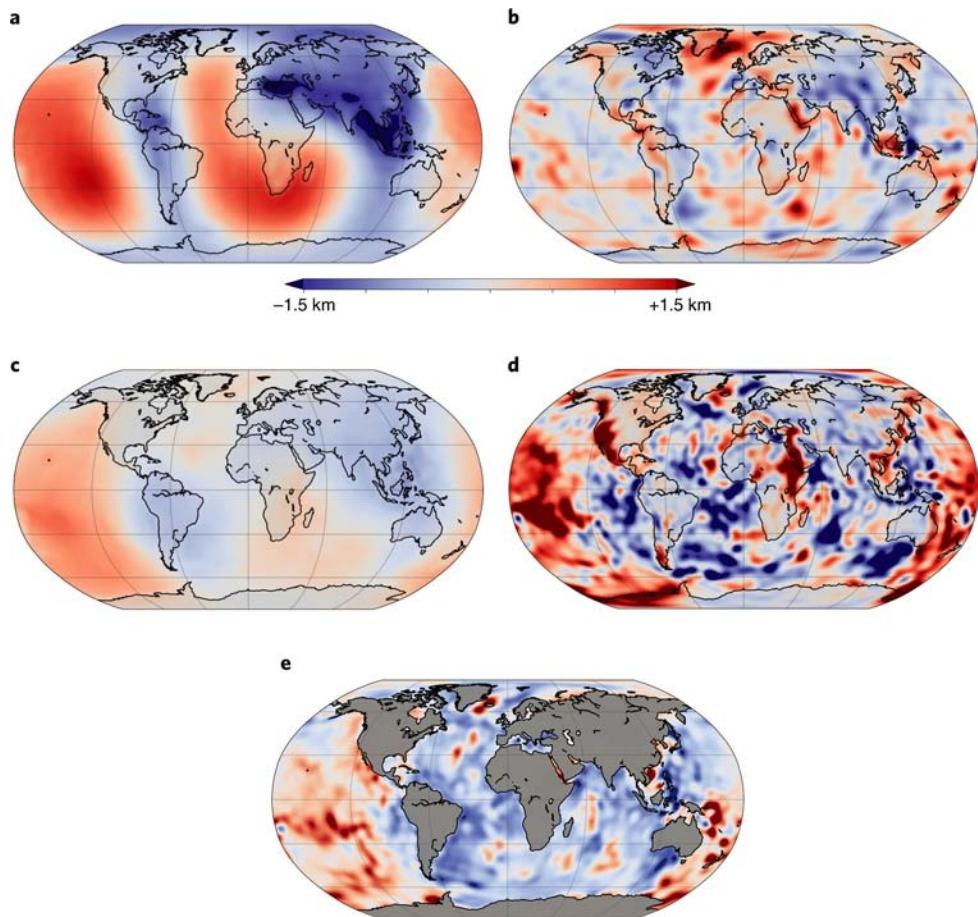


图 1 残余地形与地幔对流模型预测的动力地形对比。(a) 忽略浅层圈层结构的地幔对流模型预测的现今动力地形 (Flatment et al., 2013) ; (b) 根据岩石圈密度结构及重力场等观测数据推断的残余地形 (Hoggard et al., 2016) ; (c-e) Davies 等通过地幔对流模型预测的动力地形, 其中 (c) 中不包含浅部地幔和岩石圈结构的影响, (d) 则包含了两者的作用 (但去除海洋岩石圈随年龄冷却的部分), (e) 为 (d) 去除浅部热均衡后的结果 (最终获得的动力地形) (Davies et al., 2019 及附图)

他们主要进行了以下两方面的工作。

一是计算残余地形功率谱。他们使用了基于贝叶斯估计的自动相关性拾取 (ARD) 的方法来执行正则化反演过程。通过对反演参数的自动拾取, 避免了对地形功率谱施加预设的约束。得到: (a) 长波长残余地形的振幅范围为 $0.8 \pm 0.1 \text{ km}$, 与 Yang et al. (2017) 使用同样阶数得到的数值 (-860 至 900 m) 基本一致; (b) 从 $l=2$ 阶到 $l=30$ 阶, 地形功率谱的变化降了一个数量级 (图 2a)。他们认为这证实了短波长、低振幅残余地形的存在。需要注意的是,

Yang et al. (2017) 在得到相似的功率谱后, 基于对合成数据的分析, 认为目前得到的短波长残余地形功率谱中究竟有多少代表真实而非噪音信号仍存在疑问。

二是进行地幔对流模型对比。为了量化浅部和深部地幔对流对所得地形功率谱的贡献, 他们将自动拾取程序运用到两个端元 (end-member) 地幔对流模型中: (1) 一个模型忽略了地幔上部 300 km 内密度和热的不均匀性 (图 1c); (2) 另一个模型则包含了浅层的地幔对流及其与岩石圈的相互作用 (图 1d)。图 1d 包含岩石圈均衡的



成分，因此并非真正的动力地形。他们将图 1d 减去岩石圈热均衡的影响，得到了最终的动力地形图 1e。虽然该动力地形和残余地形的空间分布差别巨大，他们认为其功率谱（图 2b 绿色）和观测残余地形

的功率谱（图 2a 灰色）基本一致。忽略浅部圈层影响的地幔对流模型虽然能够很好地再现残余地形的长波长成分，但其功率谱和残余地形功率谱在短波长有明显的区别。

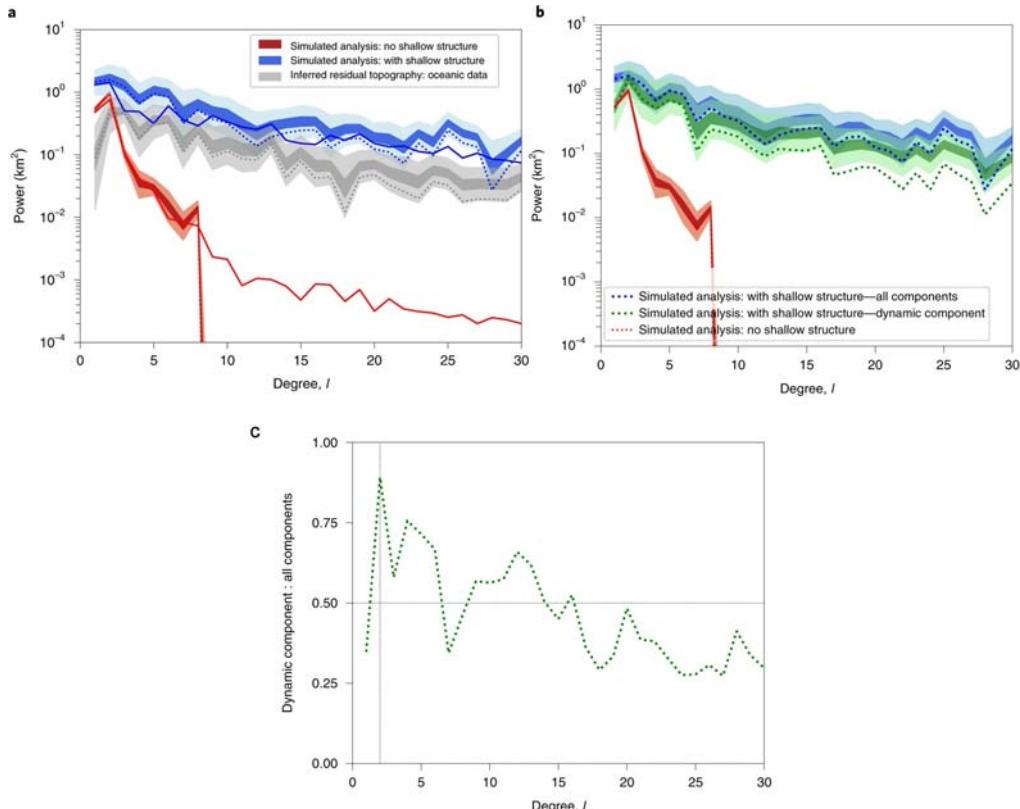


图 2 残余地形及地幔对流模型预测动力地形的功率谱。(a) 蓝线代表图 1d 中地幔对流模型预测地形（具有浅层结构）的功率谱，灰线代表观测残余地形的功率谱，红色代表图 1c 中地幔对流模型（忽略浅层结构）预测的动力地形的功率谱。阴影区域代表了 50% 到 99% 的置信区间。实线代表由全球数据（包含大陆区域）得到的结果，虚线代表只用海洋数据进行观测约束得到的结果；(b) 蓝线和绿线是由包含浅层结构的地幔对流模型结果得到的功率谱，其中蓝色代表图 1d 的地形，绿色代表图 1e 对应的动力地形，红线部分与 (a) 相同；(c) 为 (b) 中绿线和蓝线两个功率谱的均值之间的比值，展现了地幔对流对地表地形的贡献 (Davies et al., 2019)

通过对功率谱的分析（图 2a、图 2b），他们认为观测约束支持深部和浅部的地幔对流都对地表地形有重要影响。残余地形的长波长组分由深部的地幔对流控制，并且在球谐展开的功率谱中占据主要部分。短波长成分主要取决于岩石圈结构和最上层的地幔对流，它在功率谱中所占的比例并不大。对图 1d 及图 1e 功率谱的比较（图

2c）显示：球谐阶数 $l=2$ 时，超过 80% 的合成残余地形信号与地幔对流有关；然而，当 l 较高（特别是 $l > 15$ ）时，超过 50% 的残余地形信号可以归因于岩石圈厚度变化所引起的均衡效应（注：Davies 等对该图解释可能有误，该图是功率谱之比，因此地幔对流对残余地形振幅的贡献在 30 阶应仍大于 50%）。这意味着只有仔细地分离



和消除地球岩石圈厚度和密度变化引起的均衡效应，才能从观测记录中提取与对流有关的动力地形的短波成分。

Davies 等的工作已吹响了向短波长动力地形进军的号角。然而，准确约束短波

长动力地形需要地幔对流模型预测和残余地形估计两方向的共同进步，未来这个方向可能取得的突破有赖于建立更为可靠的地幔密度和粘度结构模型以及更精确的地壳及岩石圈的厚度与密度分布。

主要参考文献

- Davies D R, Valentine A P, Kramer S C, et al. Earth's multi-scale topographic response to global mantle flow[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(10): 845-850. ([链接](#))
- Davies G F. *Dynamic Earth: Plates, Plumes and Mantle Convection*[M]. Cambridge University Press, 1999.
- Flament N, Gurnis M, Müller R D. A review of observations and models of dynamic topography[J]. *Lithosphere*, 2013, 5(2): 189-210. ([链接](#))
- Hoggard M J, White N, Al-Attar D. Global dynamic topography observations reveal limited influence of large-scale mantle flow[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(6): 456-463. ([链接](#))
- Yang T, Gurnis M. Dynamic topography, gravity and the role of lateral viscosity variations from inversion of global mantle flow[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 207(2): 1186-1202. ([链接](#))
- Yang T, Moresi L, Müller R D, et al. Oceanic residual topography agrees with mantle flow predictions at long wavelengths[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(21): 10896-10906. ([链接](#))

(撰稿：邓丽君，周萌，杨亭 / 南方科技大学，陈林 / 岩石圈室)



Nature : 金伯利岩 Hf-Nd 同位素揭示地球长期存在未去气的原生地幔储库

地球是具有圈层结构的星球，其中地幔是体积和质量最大的圈层，其物理状态与化学组成对于理解地球的形成与演化过程至关重要。地球发生圈层分异以后，尤其是自板块构造体制启动以来，地幔的化学组成受到各种过程的影响而发生改变，如熔体的抽取可以导致地幔发生亏损，而俯冲的地壳物质则可以导致地幔在元素和同位素上的重新富集。对于地幔化学组成的制约主要来源于对大洋中脊玄武岩（MORB）和洋岛玄武岩（OIB）的研究（Hofmann, 1997）。大洋中脊玄武岩通过软流圈减压熔融形成，大量的研究表明其具有相对均一的元素与同位素组成，进而表明其来源的幔源区即软流圈具有相对均一的成分。传统观点认为这是由于地幔对流作用可以有效让地幔发生混合，从而消除各种不均一的组分。洋岛玄武岩的形成通常认为与地幔柱活动有关，其成分相对于洋中脊玄武岩而言具有更大的变化范围，通常认为是由于下地幔存在各种不均一的地幔储库，如高 μ 地幔（HIMU）、富集I型地幔(EM-I) 和富集II型地幔(EM-II)等。前人的研究也表明 MORB 和 OIB 之间存在显著 He 同位素差异，MORB 具有相对均一的 $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ 组成，而部分 OIB 则具有显著高的 $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ 比值。由于 ^{3}He 是地球形成时残留下来的，而 ^{4}He 则可以通过放射性的衰变形成，因此具有高 $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ 值的 OIB 被认为是来自于在地球形成后未经历去气作

用的原生地幔（primordial mantle）。由于现今 OIB 都相对年轻（一般不老于 60 Ma），这种未经历去气作用的原生地幔是否在地质历史时期上长期存在尚不清楚。

澳大利亚墨尔本大学 Jon Woodhead 教授及其合作者利用金伯利岩对该问题进行了研究。金伯利岩是目前已知的地球上来源深度最深的岩浆（最大深度可达 800 公里），它贫硅、富含挥发份 (H_2O 、 CO_2 等)，被认为是富集地幔非常低程度部分熔融的产物。金伯利岩也是金刚石的重要赋存岩石，从而也具有非常重要的经济价值。年代学资料显示地球自 20 亿年以来就有金伯利岩喷发记录，使得它能够成为研究地球深部地幔形成与演化的重要载体。Jon Woodhead 教授等对全球范围内不同年龄的金伯利岩进行了系统的 Nd-Hf 同位素研究，结果表明老于 200 Ma 的金伯利岩的 Nd-Hf 同位素都落在同一条线性演化线上（图 1），他们将这种金伯利岩称为原始金伯利岩（primitive kimberlite）。他们认为原始金伯利岩 Nd-Hf 同位素沿线性演化线分布的原因是它们来源于均一的地幔源区，其成分与球粒陨石均一库（CHUR）类似，并通过相关的模拟排除了其均一的地幔源区通过不同组分混合而成的可能性（图 2）。考虑到部分原始金伯利岩具有非常高的 $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ 值，他们因此提出原始金伯利岩是来源于未去气的原生地幔，从而原生地幔自 20 亿年来就长期“孤立地”存在于地球的深部，

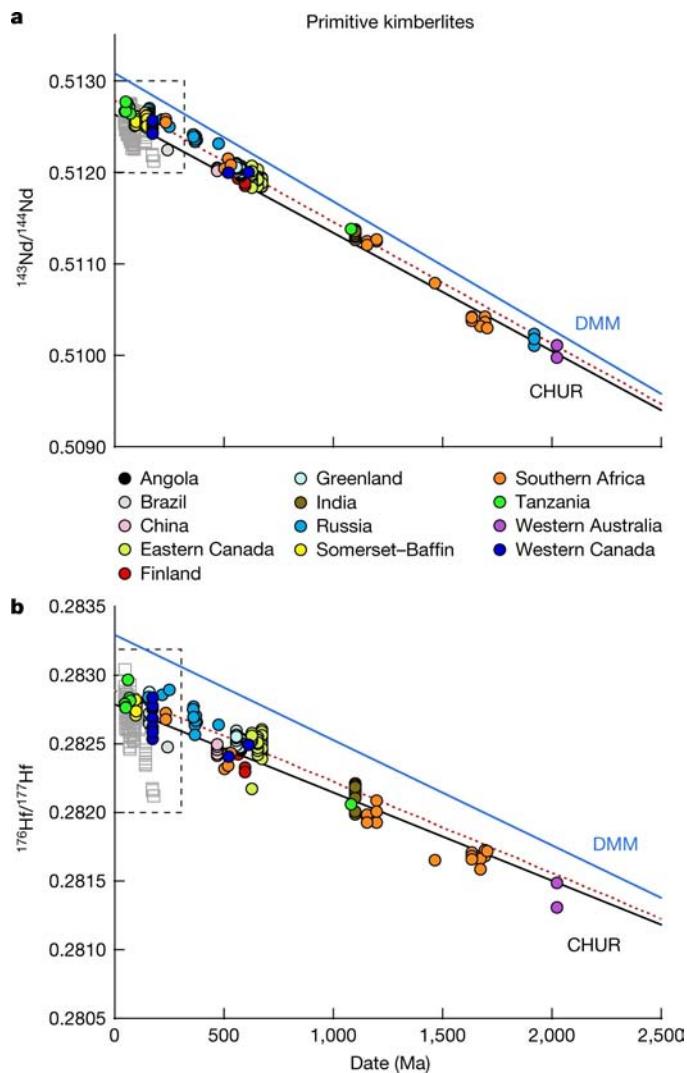


图 1 全球金伯利岩的 Nd (a)、Hf (b) 同位素演化图解。200 Ma 之前喷发的所有金伯利岩都来源于独立的相对均一的源区。从 200 Ma 开始,一部分金伯利岩(灰色方块)开始偏离这条趋势线,表现出不同的同位素特征。蓝色、灰色和红色线分别代表亏损地幔 (DMM), 球粒陨石 (CHUR) 和利用原始金伯利岩模拟出的演化线 (Woodhead et al., 2019)

且未遭受俯冲物质大规模混染作用的影响。

此外,研究结果还表明来自于南非、巴西、加拿大西部等地区小于 200 Ma 的部分金伯利岩出现相对富集的 Nd-Hf 同位素组成,并明显偏离由原始金伯利岩定义的线性演化线(图 1)。这些具有富集 Nd-Hf 同位素组成的金伯利岩被称为“异常金伯利岩 (anomalous kimberlite)”。通

过模拟计算,作者认为这些异常金伯利岩的富集 Nd-Hf 同位素特征可以通过在其源区加入小于 10% 的 5-10 亿年陆壳沉积物来解释。考虑到巴西、南非和加拿大西部在 200 Ma 时均位于 Pangea 超级大陆西部边缘的俯冲带上(图 3),作者从而提出这些异常金伯利岩的源区遭受了俯冲物质的混染与改造。

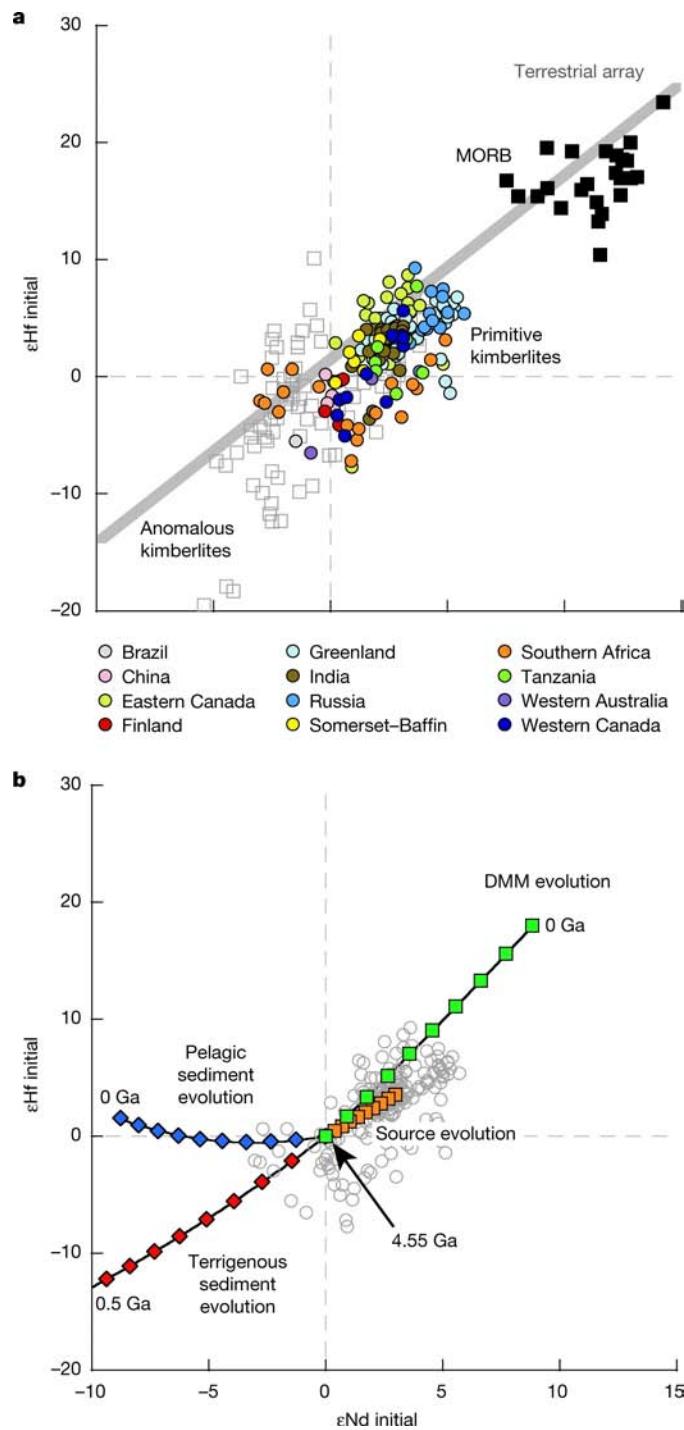


图 2 原始金伯利岩（彩色圆点）与异常金伯利岩（灰色方块）的初始 Nd-Hf 同位素。（a）原始金伯利岩基本上与 MORB 都沿地球阵列（terrestrial array）趋势分布，而异常金伯利岩则偏离该趋势。（b）模拟结果表明原始金伯利岩的 Hf-Nd 同位素与 CHUR 类似的均一源区随时间放射性衰变趋势吻合，但与俯冲陆源沉积物（terrigenous sediment）以及远洋沉积物（pelagic sediment）的加入趋势存在显著差异（Woodhead et al., 2019）

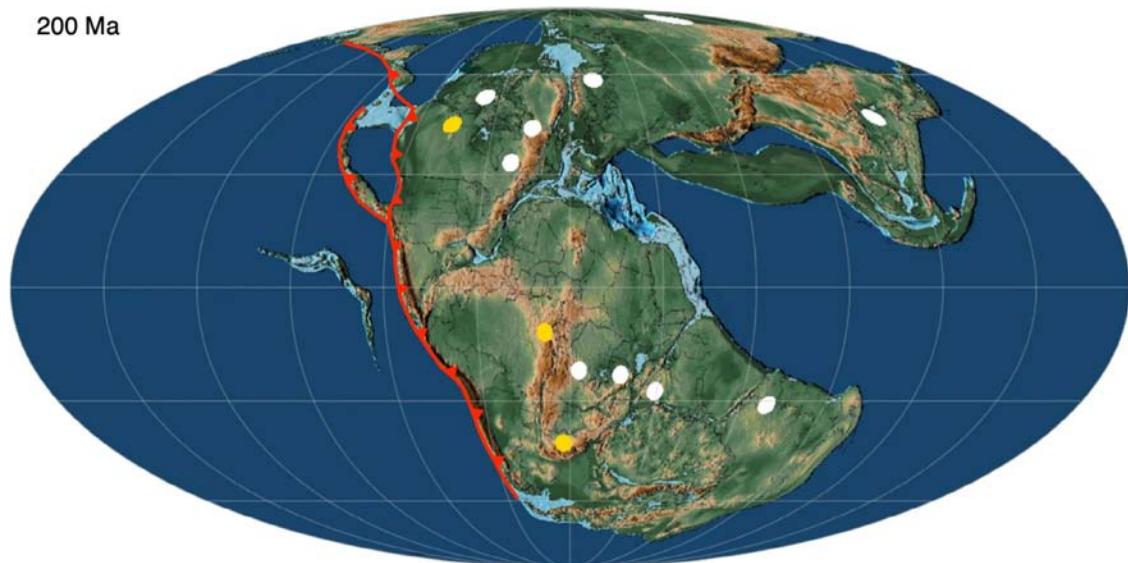


图 3 200 Ma 时期的 Pangea 大陆。其中白色圆圈代表原始金伯利岩的位置，金色圆圈代表异常金伯利岩的位置，红色线代表潘吉亚大陆西部边缘的俯冲带 (Woodhead et al., 2019)

Woodhead 等人的研究结果表明未去气（即高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比）的原生地幔至少从 20 亿年以来就长期“孤立”地存在于地球的深部地幔中，而且未遭受俯冲物质的大规模改造，直到 200 Ma 以后，沿 Pangea 超大陆俯冲作用才使得该原生地幔加入了俯冲的陆壳物质。这一结果对于地幔的化学组成及其形成演化具有非常重要的意义，但存在以下几个方面的问题有待深入研究：

(1) 尽管作者认为金伯利岩浆主要来自于上、下地幔的边界乃至更深 (~ 800 km) 的地幔，但已有的证据也表明许多金伯利岩可能起源更浅部的软流圈与岩石圈

的边界 (Tappe et al., 2013)。如此而言，这是否意味着未去气的原生地幔可以在地幔对流过程中保存下来？这一问题的回答对于区分 MORB 和 OIB 具有直接的意义。

(2) 本研究所利用的金伯利岩 Hf-Nd 同位素来自于全岩分析数据，但考虑金伯利岩浆从深部上升到地表的过程中通常会携带大量的地幔和地壳包体。纵然细心处理样品可以很大程度地减小后期混染作用的影响，但全岩的 Nd-Hf 同位素能否代表金伯利岩浆源区的特征仍有疑义。在这方面，对金伯利岩中的钙钛矿开展 Hf-Nd 同位素分析可以有效地减小后期混染作用的影响 (Sun et al., 2014)，因此值得期待。

主要参考文献

- Hofmann A W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism[J]. *Nature*, 1997, 385(6613): 219-229. ([链接](#))
Sun J, Liu C Z, Tappe S, et al. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Si-



Nature: 金伯利岩 Hf-Nd 同位素揭示地球长期存在未去气的原生地幔储库

berian flood volcanism: Insights from in situ U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 404: 283-295. ([链接](#))

Tappe S, Pearson D G, Kjarsgaard B A, et al. Mantle transition zone input to kimberlite magmatism near a subduction zone: Origin of anomalous Nd-Hf isotope systematics at Lac de Gras, Canada[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 371-372: 235-251. ([链接](#))

Woodhead J, Hergt J, Giuliani A, et al. Kimberlites reveal 2. 5-billion-year evolution of a deep, isolated mantle reservoir[J]. *Nature*, 2019, 573(7775): 578-581. ([链接](#))

(撰稿：孙晶 / 中国石油大学（北京），刘传周 / 岩石圈室)



Nature : 地幔转换带冷俯冲板块的磁学性质研究

莫霍不连续面指地壳和上地幔之间的分界面，由克罗地亚地震学家莫霍洛维奇于1909年发现。传统观点认为，莫霍面同时也是磁性地壳和非磁性地幔之间的磁性不连续分界面。常见的磁性矿物如赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、磁铁矿(Fe_3O_4)等都有一个特殊的转换温度，称为尼尔温度(针对赤铁矿等反铁磁性矿物)或者居里温度(针对磁铁矿等铁磁性矿物)，在该温度之上磁性矿物中的电子自旋变得无序排列，使得磁性矿物失去磁性。常压下赤铁矿的尼尔温度为 ~ 675 °C，而磁铁矿的居里温度为 ~ 580 °C。因此，传统观点认为在地幔的高温环境下磁性矿物是没有磁性的。均一的无磁性地幔是地磁反演的基础，然而这一前提假设近来被多项观测质疑。例如，航磁和卫星磁测结果提供了越来越多的地幔磁异常证据，尤其是在低热流通量的俯冲带和克拉通地区(Blakely et al., 2005; Chiozzi et al., 2005)。同时，地幔捕掳体中剩磁的发现(Ferré et al., 2013)也支持地球的磁性界面可能比之前认为的要深。但是深部磁异常的来源以及他们对磁记录的贡献目前还存在很多未知。

铁氧化物转换温度高，是深部磁异常最可能的物质来源。磁铁矿是浅部(< 300 km)主要磁性矿物，是洋底地幔橄榄岩蛇纹石化和洋中脊玄武岩热液转化的副产物。如果水岩比足够大，磁铁矿将进一步氧化为赤铁矿，形成几千米厚的氧化层，其生

长仅受洋壳海水渗透率影响。该岩相随洋壳的俯冲导致铁氧化物进入地幔。随深度增加，磁铁矿的稳定性取决于 > 10 Gpa 和 > 1000 K 条件下其分解为等摩尔赤铁矿和 Fe_4O_5 的情况，二者只有在 ~ 20 Gpa 条件下才重新结合生成一种新的高压相磁铁矿，使得300–600 km 处赤铁矿是主导磁性矿物。然而，由于实验条件技术限制，对相关温压条件下赤铁矿类质同象间磁性转换的研究目前还很薄弱。

以德国明斯特大学矿物学研究所 I.Kupenko 教授为首的研究团队于2019年6月在 *Nature* 上发表论文，他们对高温高压条件下赤铁矿类质同象间的磁性转换过程开展详细研究，结果发现赤铁矿在冷俯冲地幔温压条件下仍能保持磁性，从而在西太平洋区域形成深部磁化岩石区，且发现该深部磁源分布范围与之前认为的地磁场倒转期间地磁极移动路径吻合，从而对传统认识提出新的解释机制，认为目前观测到的地磁场倒转期间地磁极按特定路径移动的现象可能只是本文新发现的深部磁化岩石造成的假象。

Kupenko 教授等采用同步穆斯堡尔谱分析与激光加热相结合的方法研究不同温压条件下赤铁矿类质同象间的磁性转换，研究温度范围为 300–1300 K，压力高达 90 GPa。根据不同温度和压力条件下赤铁矿各类质同象的穆斯堡尔谱可以获得其超精细参数，通过分析穆斯堡尔超精细参数随温度的变化可以推算赤铁矿各类质同象间



的转换温度 (T_c)。他们采用亚晶格磁化法获得各类质同象超精细磁场随温度的变化，从而推算其尼尔温度 (T_N)。该方法计算得到的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 在 ~ 19.4 和 ~ 25.4 GPa 条件下的尼尔温度分别为 ~ 1190 和 ~ 1215 K (图 1a)。他们的结果同时也可以估算赤铁矿在不同压力条件下的穆林转变温度 (T_M)。已有研究发现 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的穆斯堡尔四极移参数 ϵ 在经过穆林转变温度时会减半并改变符号，根据 ϵ 随温度变化拟合曲线推算出的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的穆林转变温度在 ~ 19.4 和 ~ 25.4 GPa 条件下分别为 ~ 820 和 ~ 940 K (图 1b)。这些结果显示赤铁矿在地幔转换带的压力条

件下，在超过 ~ 1200 K 的温度下仍保持磁性，而这样的低温只有在板块俯冲的冷异常区才会出现。

为了进一步研究深部磁性赤铁矿的赋存状态及其与深部磁源的关系，作者计算了俯冲带 56 条剖面的温度分布，并与磁性赤铁矿的稳定磁场进行对比。结果显示赤铁矿的尼尔温度高于 Salomon 和 Tonga 等冷或非常冷俯冲板块的温度，而且这些板块的温度在 300–600 km 深度时仍高于赤铁矿的穆林转变温度 (图 2)。图 3 中标出 ~ 500 km 深度温度低于赤铁矿尼尔温度的俯冲区域 (绿色五角星)，大部分俯冲区位于西

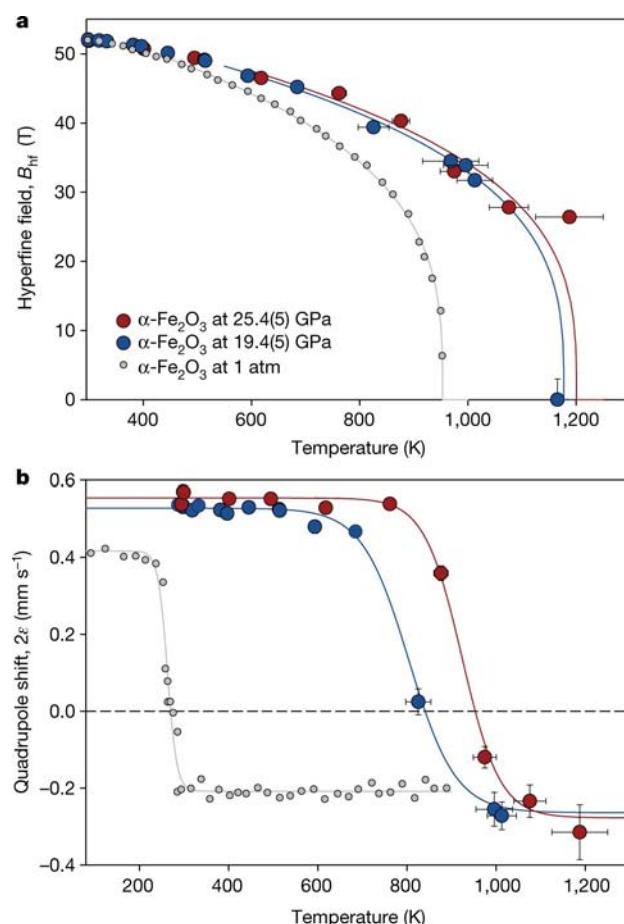


图 1 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的关键温度。a. 特定压力下 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的超精细磁场随温度变化，尼尔温度通过拟合亚晶格磁化法实验中 $0.5T_c$ – $0.99T_c$ 之间数据获得；b. 特定压力下四极移参数 ϵ 随温度变化， $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的 ϵ 在经过穆林转变温度时会减半并改变符号，从而可以推算穆林转变温度 (Kupenko et al., 2019)



太平洋，在地幔转换带有可能形成电磁弧，很可能是该区域观测到的磁异常的深部磁源。赤铁矿的磁信号强度以及它在俯冲岩石中的含量将决定它对观测到的磁异常的贡献以及对古地磁记录的影响。赤铁矿在低场时可以获得近饱和的剩磁， $\sim 0.5 \text{ A m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ，是等量磁铁矿感应磁化强度的 10–15 倍，在低于转换温度 100 K 时仅减少 10%。而且，赤铁矿产生的磁异常可能通过两种过程被加强：一是赤铁矿的霍普金森效应，指的是在 T_c 附近，赤铁矿感应磁化率有一个急剧增强的变化，且外加磁场越弱，霍普金森效应越明显，在地球深部相对弱的

磁场环境下，在 T_c 附近赤铁矿感应磁化率可以增强数个量级。增强的磁化率导致岩石磁导率增加，从而使得地磁场产生的感应磁化强度增强；另外一种方式是赤铁矿–钛铁矿系列层状磁化效应可以产生异常强且稳定的天然剩磁，这种层状物质的饱和磁化强度可达纯赤铁矿的 20 倍，同时还保持赤铁矿的高矫顽力和热稳定性，但地幔转换带处赤铁矿的钛替代程度以及层状磁化程度目前仍不清楚。但不管怎样，这些结果说明，转换带处的赤铁矿含量有可能通过增强天然剩磁和感应磁化强度两种方式来影响地磁场。

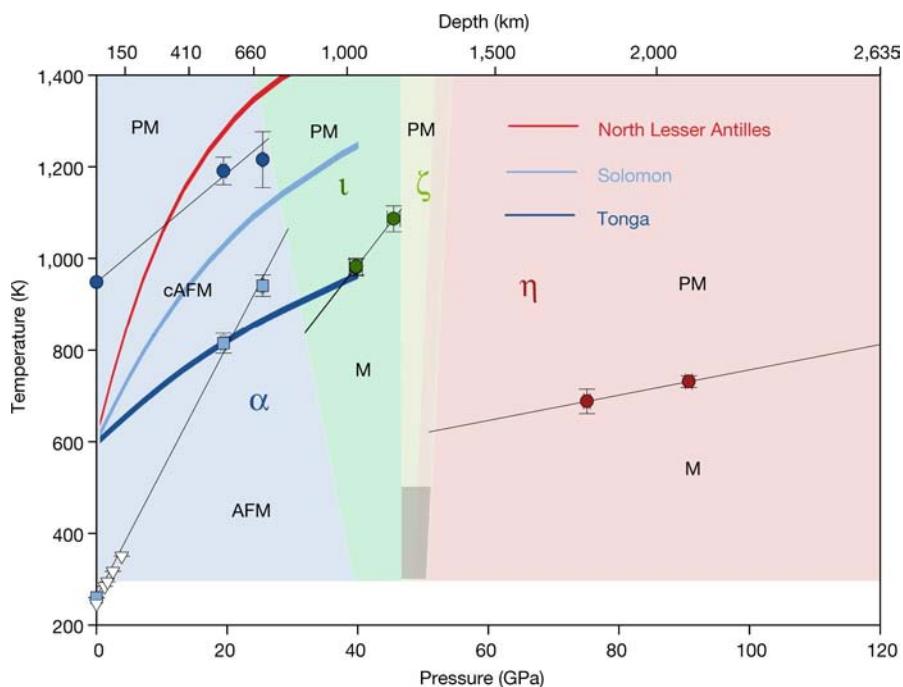


图 2 Fe_2O_3 的磁相图。本文高压下的磁转换温度和 van der Woude (1966) 常压下的尼尔和穆林转换温度用实心符号表示，中子衍射研究得到的低于 4 Gpa 时的穆林转换温度用空心三角形表示，黑色实线代表数据拟合曲线，相界限定义参考 Bykova et al. (2016)。 $\zeta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 稳定区的黑色阴影代表该相可能的转换温度范围，彩色线显示俯冲区压力–温度关系。结果显示 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 在转换带处 Solomon 和 Tonga 等冷或非常冷俯冲板块区仍保持磁性 (Kuperko et al., 2019)



通常我们通过在地表观测到的磁场信号来反演地球深部的磁异常，但大部分时候我们观测到的磁信号不仅受控于来自于地球内核的地磁场偶极分量和内源非偶极场的长波异常，有时还会受部分壳源短波异常的干扰。因此，只有在主磁场非常弱的情况下，这种转换带处含赤铁矿岩石的天然剩磁贡献才最容易被观测到。因此，作者选取了地质时期（11.5–12 ka 至 11 Ma）几次地磁场倒转和一次漂移期间的古地磁极位置与转换带处冷俯冲板块位置进行对比研究。之前对沉积物记录的古地磁研究发现地磁场倒转期间古地磁极位置有两条“优选”路径：一条位

于美洲，另一条跟它对跖，位于欧亚大陆东缘（Laj et al., 1992）。而本文研究结果发现倒转期间西太平洋古地磁极分布区域与地幔转换带处赤铁矿产生的电磁异常区非常吻合（图 3），说明 300–600 km 的磁化岩石层很可能影响了古地磁信号，使得看起来地磁场有“优选”的倒转路径。因此，作者提出之前发现的地磁场倒转“优选”路径很可能不能反映地磁转换场的真实形态，而只是地幔转换带冷俯冲区域被磁化的含赤铁矿岩石造成的假象。本文研究发现的深部磁异常或许对如火星这种目前没有地磁发电机的地外行星的磁学研究非常重要。

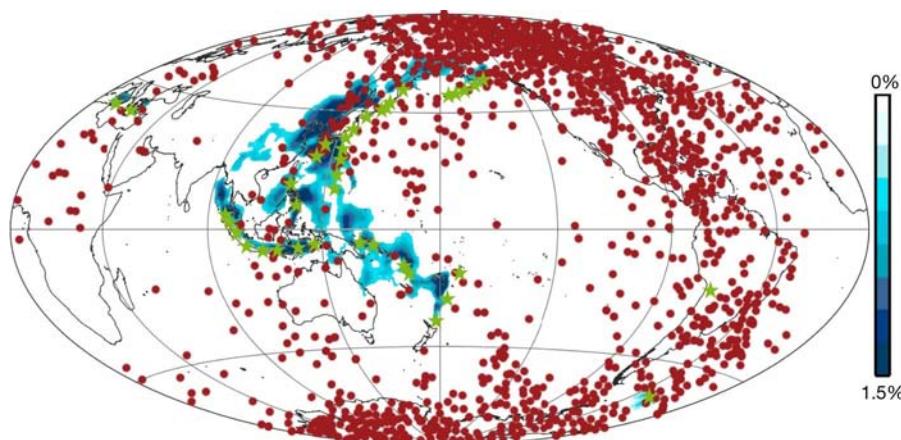


图 3 磁转换期古地磁极位置分布图。 ~ 500 km 深度温度低于赤铁矿尼尔温度的俯冲区域用绿色五角星表示。蓝色区域表示这些俯冲区 500 km 处 P- 波高速异常。红色圆点表示所选磁场倒转期的古地磁极移动路径，包括上奥杜威倒转（1.8 Ma）、6.5 Ma 和 11 Ma 的两次倒转、Blake 事件（11.5–12 Ka）和一次漂移事件（Kupenko et al., 2019）

主要参考文献

- Blakely R J, Brocher T M, Wells R E. Subduction-zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle[J]. *Geology*, 2005, 33(6): 445-448. ([链接](#))
- Bykova E, Dubrovinsky L, Dubrovinskaia N, et al. Structural complexity of simple Fe_2O_3 at high pressures and temperatures[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10661. ([链接](#))
- Chiozzi P, Matsushima J, Okubo Y, et al. Curie-point depth from spectral analysis of magnetic data in central-southern Europe[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, 152(4): 267-276.



([链接](#))

Ferré E C, Friedman S A, Martín - Hernández F, et al. The magnetism of mantle xenoliths and potential implications for sub - Moho magnetic sources[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(1): 105-110. ([链接](#))

Kupenko I, Aprilis G, Vasiukov D M, et al. Magnetism in cold subducting slabs at mantle transition zone depths[J]. *Nature*, 2019, 570(7759): 102-106. ([链接](#))

Laj C, Mazaud A, Weeks R, et al. Geomagnetic reversal paths[J]. *Nature*, 1992, 359(6391): 111-112. ([链接](#))

Van der Woude F. Mössbauer effect in α -Fe₂O₃[J]. *Physica Status Solidi*, 1966, 17: 417-432. ([链接](#))

(撰稿：[蔡书慧 / 岩石圈室](#)，[徐慧茹 / 中国地质大学（武汉）](#))



Science、Nature Geoscience：冰岛近莫霍面处岩浆存储千年及其快速运移至地表的研究

Mutch 等人在矿物温压计研究的基础上，利用贝叶斯反演扩散计时法，深入研究了冰岛北部 Borgarhraun 火山喷发物中橄榄石和尖晶石晶体 Cr-Al 的扩散模式，结果表明，在 Borgarhraun 火山喷发前，储存在莫霍面深度的岩浆已经滞留了数千年，岩浆从 24 公里的莫霍面深度上升至地表，大约需要 10 天。上述认识对开展活动火山的监测与灾害评价研究均具有重要意义。

来自莫霍面附近深度的岩浆注入与岩浆混合通常被认为是火山喷发的重要触发

机制。然而，由于上升的岩浆在中上地壳易于产生成分分异与演化（包括地壳混染和分离结晶等），因此人们很难有效地研究来自莫霍面深度岩浆的上升、运移与演化过程，这也是多年来国际火山学界一直困惑的科学难题，并因此阻碍了有效开展火山喷发机制与监测、预测研究的进程。

剑桥大学的 Mutch 等研究人员，针对上述科学问题，从系统的岩相学研究出发，结合贝叶斯反演扩散计时技术，通过对冰岛北部大约一万年前 Borgarhraun 火山（图 1）喷

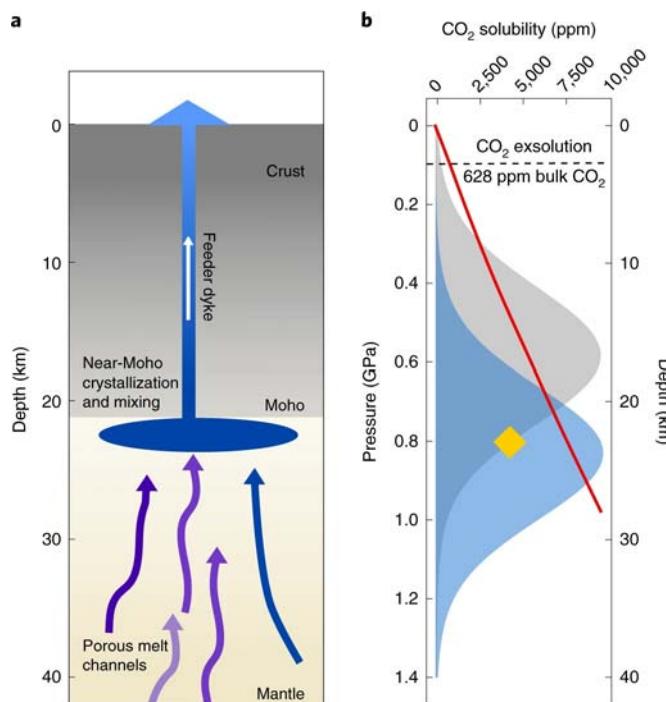


图 1 Theistareykir 火山近莫霍面处岩浆的结晶过程。a.Borgarhraun 火山区的岩浆形成示意图。b.Borgarhraun 火山区的岩浆深度估算结果。不同颜色的核密度估计 (KDE) 分布曲线指示了不同的单斜辉石 - 熔浆平衡压力计的估算结果；蓝色 KDE 和灰色 KDE 分布区域分别对应两组不同压力计的估算结果；黄色的菱形符号代表了 OPAM 压力计的估算结果；红色实线表示 CO_2 溶解度曲线；黑色虚线表示 Borgarhraun 岩浆中 CO_2 出溶的位置 (Mutch et al., 2019a)



出的、结晶于莫霍面附近的早期堆晶体中橄榄石和尖晶石的 Cr-Al 扩散特征研究，有效避开了中上地壳对于火山喷出的岩浆及其斑晶成分的影响，定量刻画了玄武质岩浆上升、运移以及穿过整个地壳等过程的精细特征，从而成功地解决了上述科学难题。该研究成果近期在 *Nature Geoscience* 和 *Science* 刊物相继发表。

(1) 通过对橄榄石矿物的研究，获得冰岛 Borgarhraun 火山岩浆的上升速度。首先根据橄榄石晶体中 Al 元素的特点，将橄榄石划分为两组：第一组称为 Al-decoupled 的橄榄石，第二组称为 growth-dominated 橄榄石。第一组橄榄石晶体中 X_{Fo} 与 Al 呈现明显解耦关系，指示其同时受晶体生长和扩散的控制；第一组橄榄石晶体中 X_{Fo} 与 Al 出现明显的线性相关关系，指示其

主要受晶体生长的影响。在此基础上，利用前人提出的 FEniCS 模式 (Alnæs et al., 2015)，建立了橄榄石中多元素 (Fe-Mg、Ni、Mn) 一维扩散有限元模型，进一步结合嵌套抽样贝叶斯反演技术，成功估算了在火山喷发过程中，岩浆中的晶体从结晶直至上升到地表的时间。最后，利用扩散模型获得岩浆上升的时间尺度 (图 2)，并结合矿物压力计的估算结果 ($\sim 24 \text{ km}$)，计算出冰岛 Borgarhraun 火山的岩浆上升速度为 $0.02 \sim 0.1 \text{ m s}^{-1}$ (Mutch et al., 2019a)。

(2) 通过对尖晶石矿物的研究，获得火山喷发前岩浆的存储时间。在显微岩相学观察和矿物温压估算的基础上，作者提出，具环带结构的尖晶石矿物的边缘成分与晚期温度较低的晶粥体之间存在着平衡关系 (其平衡温度为 1215°C)，尖晶石晶

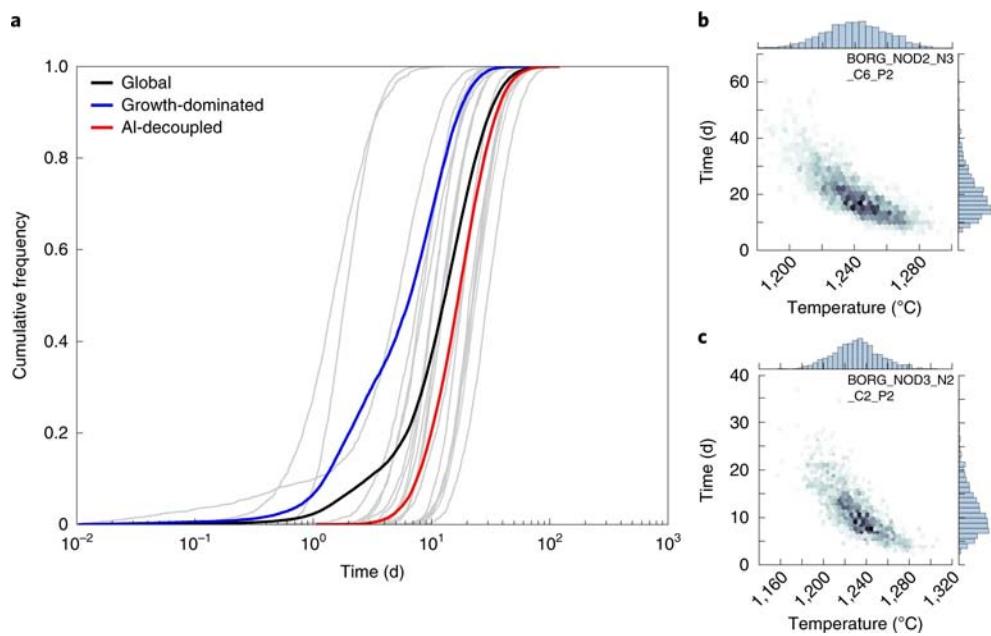


图 2 Theistareykir 火山岩浆运移的时间尺度。a. 累积频率分布图，图中曲线表示了利用贝叶斯反演估算的橄榄石晶体上升与运移的时间，灰线是单个橄榄石晶体模型的分布，全球平均数值（黑线）的中值时间为 12.6 天，growth-dominated 晶体剖面（蓝线）的中值时间为 7.2 天，Al-decoupled 晶体剖面（红线）的中值时间为 16.4 天。b, c. 温度 – 时间密度分布图，显示了文中所述的两个不同晶面的后验概率分布，在坐标轴上显示为蓝色直方图。考虑到扩散速率与温度之间的阿伦尼乌斯关系，温度与时间之间也存在着明显平衡的指数关系 (Mutch et al., 2019a)



体的核心成分 (Cr# 为 0.4) 与早期温度较高的晶粥体之间存在平衡关系。进而利用 FEniCS 模式，建立了尖晶石中 Cr-Al 交换的二维扩散模型，结合嵌套抽样贝叶斯反演技术，最终可以获得岩浆的存储时间尺度。作者通过对冰岛 Borgarhraun 火山喷发物中 3 个堆晶体的 7 件尖晶石矿物晶体（见图 3 中的 7 条灰线）的精细研究发现，该火山区岩浆存储时间的中值为 1400 年；超过 90% 的计算结果显示岩浆的存储时间在 4100 年以内。另外，Mg 在斜长石平衡过程中的时间尺度提供了岩浆存储时间的最小值 (~ 570 年)，这与该研究通过尖晶石模型获得的存储时间（见图 3 中的绿色区域）相吻合 (Mutch et al., 2019b)。因此，作者通过尖晶石中 Cr 和 Al 的扩散规律的研究，最终获得冰岛 Borgarhraun 火山的玄武质岩

浆在壳幔边界储存了约数千年的结论。

本文开展的下地壳玄武质岩浆存储时间的估算，对于理解在不同构造背景下岩浆上升、穿过地壳运移的时间尺度具有重要意义，包括洋中脊和洋岛（如冰岛和夏威夷）以及下地壳由镁铁质、超镁铁质的岩浆作用主导的大陆弧（如巴基斯坦的 Kohistan 弧）等构造背景。目前岛弧下地壳中的岩浆储存时间还未有限制，因此该研究成果对于其它镁铁质岩浆系统在近莫霍面处存储时间的限定具有一定的指导意义。计算岩浆的存储时间也有助于我们理解和确定岩浆从源区运移至地表的机制。Mutch 等人表示，相较于地下深处存在一个大型岩浆房的传统火山机构模型，它更像是一个穿过地壳的火山管道系统，并带有许多小的“喷口”，可以将岩浆迅速转移到地表。

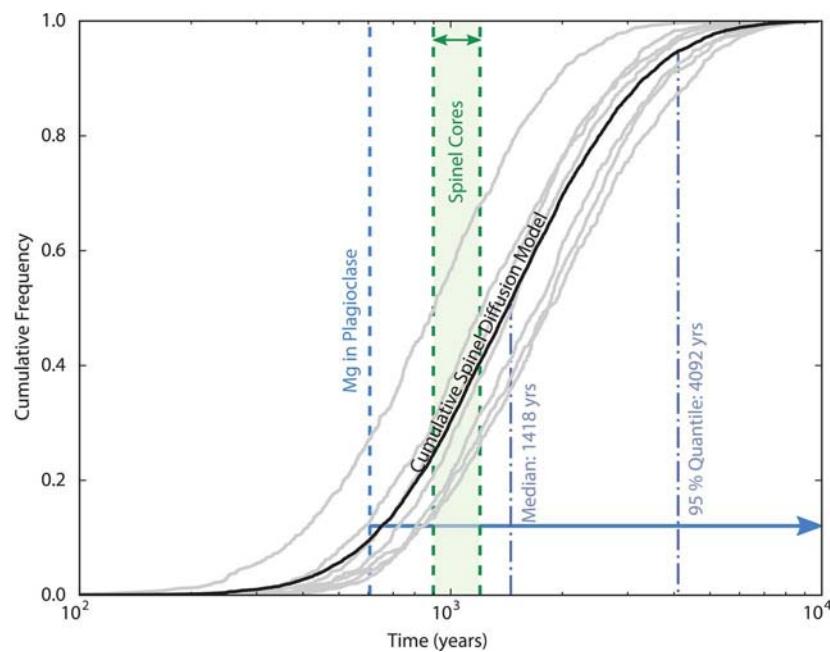


图 3 岩浆在近莫霍面深度存储时间的估算结果。累积频率分布显示了贝叶斯反演估算的岩浆储集时间，灰线是利用单个尖晶石晶体的数据经过模拟计算获得的结果，黑线是利用模型计算获得的所有尖晶石晶体的累积频率分布曲线，蓝色虚线和蓝色箭头分别是利用斜长石中 Mg 的平衡模拟获得的岩浆存储时间的最小值及其变化范围，浅绿色区域是利用三维球面扩散模型获得的存储时间 (Mutch et al., 2019b)



主要参考文献

Alnæs M, Blechta J, Hake J, et al. The FEniCS project version 1. 5[J]. *Archive of Numerical Software*, 2015, 3: 9-23.

Mutch E J F, Maclennan J, Shorttle O, et al. Rapid transcrustal magma movement under Iceland[J]. *Nature Geoscience*, 2019a, 12: 569-574. ([链接](#))

Mutch E J F, Maclennan J, Holland T J B, et al. Millennial storage of near-Moho magma[J]. *Science*, 2019b, 365(6450): 260-264. ([链接](#))

(撰稿：李菊景，马琳 / 新生代室)



Nature : Mohns 超慢速扩张脊的深部电性结构成像

洋脊是地球系统中火山和地震活动极其频繁、岩浆大规模上涌及新生洋壳形成的巨型活动构造带，是大陆漂移和海底扩张的中心，关乎板块构造学说的理论根基，对于研究板块动力、熔体形成和地幔对流等基本地球科学问题具有十分重要的意义。根据扩张速率大小，洋脊可划分为快速、中速、慢速和超慢速扩张脊等四种类型（图 1a）。其中，全扩张速率（full spreading rate，即洋脊两侧板块扩张速率之和）小于 20 mm/a 的洋脊，定义为超慢速扩张脊，其占全球洋脊总长的三分之一以上，主要对应北冰洋和西南印度洋洋脊，近十余年来备受地学界关注（Snow and Edmonds, 2007）。比如，我所刘传周研究员参加的 IODP-SloMo 计划，主要科学目标即为选择西南印度洋超慢速扩张脊“亚特兰蒂斯浅滩”作为理想的构造窗口，研究慢速或超慢速扩张脊的壳 – 带过渡本质。

北冰洋 Mohns 洋脊（见图 1a、图 1b），全扩张速率约为 14–16 mm/a，具有超慢速扩张脊的几乎所有典型特征（如斜向不对称扩张、拆离断层发育、地幔岩石出露、地壳厚度薄等），是研究超慢速扩张脊的理想场所。近日，挪威科技大学（NTNU）地学与石油系 Stale Emil Johansen 等人，在 *Nature* 发表了联合可控源电磁和大地电磁测深（CSEM+MT）数据反演获得的 Mohns 超慢速扩张脊壳幔电性结构图像（图 1b），并利

用电导率对流体和温度敏感的特性，进一步对流体含量和热结构进行了约束。该项研究认为，Mohns 洋脊下方并不存在传统模型预期的热边界盖层，地幔物质被动上涌且抵达 Moho 面，在壳内形成岩浆房，地幔熔融区的形态和规模直接受控于洋脊两侧慢速和非对称板块运动，该成果对于认识和理解超慢速扩张脊的结构和演化具有重要科学意义。

该项研究提供的电性结构模型显示，指示地幔物质上涌的低阻异常聚集在 Mohns 洋脊下方狭长而倾斜的非对称区域内，其向上抵达 Moho 面，并将两侧高阻、干的无熔融岩石圈分隔开来；洋脊东侧的岩石圈更冷更厚，而西侧的岩石圈则更薄更暖（图 1b）。目前普遍认为，超慢速扩张脊的地壳厚度依赖于扩张速率而会呈现地壳很薄，甚至不存在地壳的特征；但由于地幔对流冷却而在洋脊下方会形成或厚（> 30 km）或薄的热边界盖层，厚的盖层会切断熔体的产生，而薄的盖层亦会阻滞熔体向地表的迁移。但该项研究获得的地幔图像，并不支持超慢速扩张脊下方存在热边界盖层的观点，恰恰相反，来自软流层的热物质抵达 Moho 面，即便是很薄的盖层也难以形成。与东太平洋北部快速扩张脊 MT 剖面（图 1c）相比，两者的显著区别不在于洋脊下方是否发育热边界盖层，而是熔融区的形状和尺寸（Mohns 洋脊下方熔融区域相对更窄更小）。

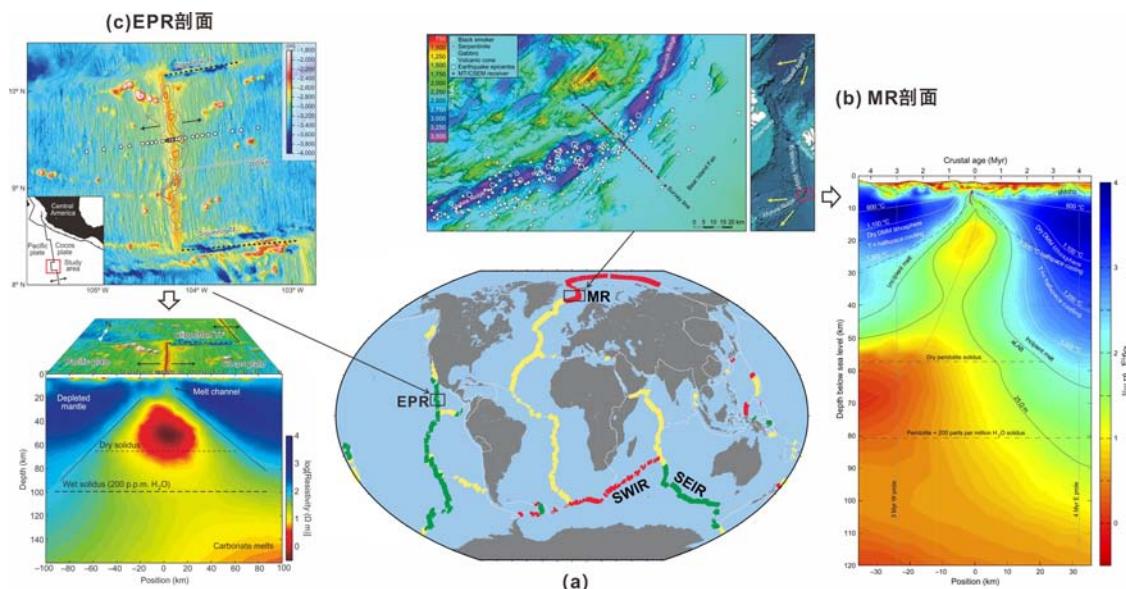


图 1 超慢速和快速扩张脊深部电阻率结构。(a) 全球不同扩张速率洋脊分布, 其中红色线段所示为超慢速扩张脊, 绿色线段为快速扩张脊, 黄色线段为中速或慢速扩张脊; (b) Mohons 洋脊 CSEM+MT 联合探测剖面位置 (MR 剖面) 和电阻率结构; (c) 东太平洋北部洋脊 MT 探测剖面位置 (EPR 剖面) 和电阻率结构。由图可知, 超慢速扩张脊主要对应北冰洋脊和西南印度洋脊 (SWIR); 而快速扩张脊主要对应东太平洋脊 (EPR) 和东南印度洋脊 (SEIR); 无论是地形地貌、构造特征与深部结构等, 相对快速扩张脊而言, 超慢速扩张脊具有明显的非对称性 (修改自 Snow and Edmonds, 2007; Key et al., 2013; Johansen et al., 2019)

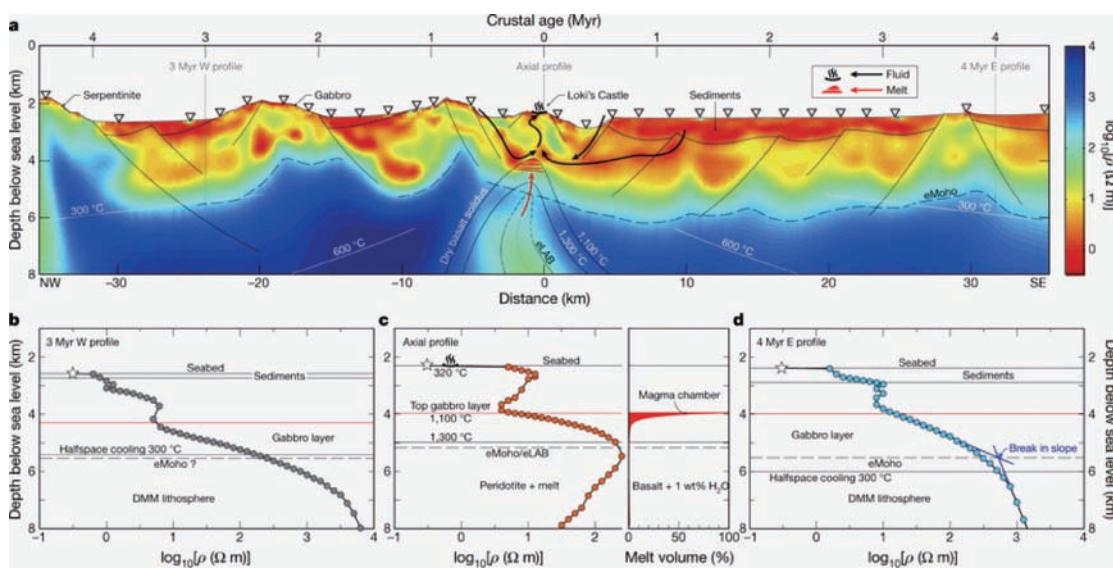


图 2 (a) 利用 CSEM 数据反演获得的电性结构模型; (b-d) 洋脊轴部 (c) 和两侧 (西侧 3 Myr 和东侧 4 Myr 洋壳年龄位置处) 深度 – 电阻率剖面 (Johansen et al., 2019)

得益于采用了 CSEM 和 MT 联合观测手段, 该项研究在提供壳幔深部结构的同时, 还提供了地壳尺度的精细电性结构模

型 (图 2a)。通过电阻率分布特征, 作者认为海水通过沉积层或断裂系统向下渗透, 在洋脊两侧区域形成热液循环系统; 而大



型超壳断裂为地幔橄榄岩的蛇纹石化及出露提供了有利条件，地幔的蛇纹石化可显著降低岩石圈强度而最终导致地震活动性降低，这些可很好地解释洋脊“黑烟囱”，西侧海底出露蛇纹石和辉长岩、地震活动少等地质现象。

综上所述，超慢速扩张脊深部同样存

在地幔被动上涌和壳内岩浆房，地幔熔融区的形态和规模直接受控于板块构造运动；海水通过沉积层或断裂系统向深部渗透，对地幔的蛇纹石化和洋脊两侧区域热液循环系统的形成提供了有利条件，而深部的岩浆活动则为形成和维持高温热液活动提供了不竭的动力和热源。

主要参考文献

- Snow J E and Edmonds H N. Ultraslow-spreading ridges: Rapid paradigm changes[J]. *Oceanography*, 2007, 20(1): 90-101. ([链接](#))
- Johansen S E, Panzner M, Mittet R, et al. Deep electrical imaging of the ultraslow-spreading Mohns Ridge[J]. *Nature*, 2019, 567(7748): 379-383. ([链接](#))
- Key K, Constable S, Liu L, et al. Electrical image of passive mantle upwelling beneath the northern East Pacific Rise[J]. *Nature*, 2013, 495(7442): 499-502. ([链接](#))

(撰稿：李鑫，陈贊 / 岩石圈室)



Nature Geoscience : 大塔穆火山成因新解

大塔穆火山 (Tamu Massif) 是位于西北太平洋 Shatsky 隆起的一个巨大的中生代海底火山。早期，根据该海区地震调查资料认为大塔穆火山的结构类似于盾状火山，可能是地球上最大的单体火山。近年来，随着一批新的地球物理调查数据的深入解释，研究人员对大塔穆火山的成因机制提出了新的解释，认为其与海底扩张有关。

一般认为大多数海洋高原都是巨大的玄武岩火山，Sager et al. (2013) 通过多道地震剖面探测和综合大洋钻探 (IODP) 岩石样品，对位于西北太平洋 Shatsky 隆起的大塔穆地块开展结构研究，认为大塔穆地块是一个巨大的火山，火山中心喷出的巨大熔岩流形成了一个宽阔的盾状形状。这种模式下，巨量的火山喷发与地幔柱的岩浆活动有关，不会在洋底形成线性磁异常条带。然而结合新观测的磁异常数据，Sager et al. (2019) 对 2015 年 (FK51005 航次) 新采集的磁异常数据和早期 53 个航磁的数据进行了重新处理，获得了大塔穆地区更为明确的磁异常特征，通过对不同岩浆喷发模式 (集中式或线性式) 的磁异常特征做进一步对比，提出大塔穆火山的形成与海底扩张紧密相关，为大塔穆火山的形成演化提供了新的解释模型。

大塔穆火山及周边存在正负变化的线型和曲线型磁异常条带 (图 1)，早期研究认为负 - 正 - 负的磁异常特征是一次磁性

反转事件，在一个磁性倒转周期内形成。在新的研究中，Sager 等认为之前的研究忽略了大塔穆火山南北两翼复杂的磁异常模式。基于均匀磁化模型的解释方法虽然能够解释大塔穆火山中心正两翼负的异常特征，但该模型计算的异常与磁异常条带的吻合性差，且该模型反演获得的磁倾角和磁偏角与早白垩世太平洋古地磁场也不一致。他们用傅里叶域的反演方法 (Parker and Huestis, 1974) 来估算地壳磁化强度 (图 2)，结果包含了与磁异常相同的大部分线性异常特征，与岩心等揭示的古地磁数据和岩心磁化强度等也有很好的符合度。

新的数据分析表明大塔穆地区磁异常以磁条带特征为主导，并可以用大洋中脊海底扩张模式来进行解释，即：大塔穆火山的海底扩张成因说。通过该工作，他们重建了磁异常条带的演化 (图 3)，重现了太平洋、Izanagi 和 Farallon 三大板块的运动关系。

新的海底扩张成因模型认为，大塔穆虽然确实是一个巨大的火山，但并不像早期认为的盾状火山。早期地震推断大塔穆浅层长达几十千米的熔岩流层，其解释是类比大陆溢流玄武岩省的模式，二者属于不同的环境，仅从二维地震剖面难以追踪单独的熔岩流。对比两个模型 (图 4)，岩浆喷发模型类似于大陆溢流玄武岩的大量喷发，产生垂向上时间连续的岩浆流；扩张模型认为岩浆的时代展布是横向变化的，



变化的地壳厚度反映了中脊岩浆喷发的变化。此外扩张模型也可以很好的解释大塔穆地区与周围地壳没有明显的不连续性

特征，自由空间重力异常也非常小，是地壳均衡的一种表现，也暗示该地区没有大型的中心质量聚集现象。

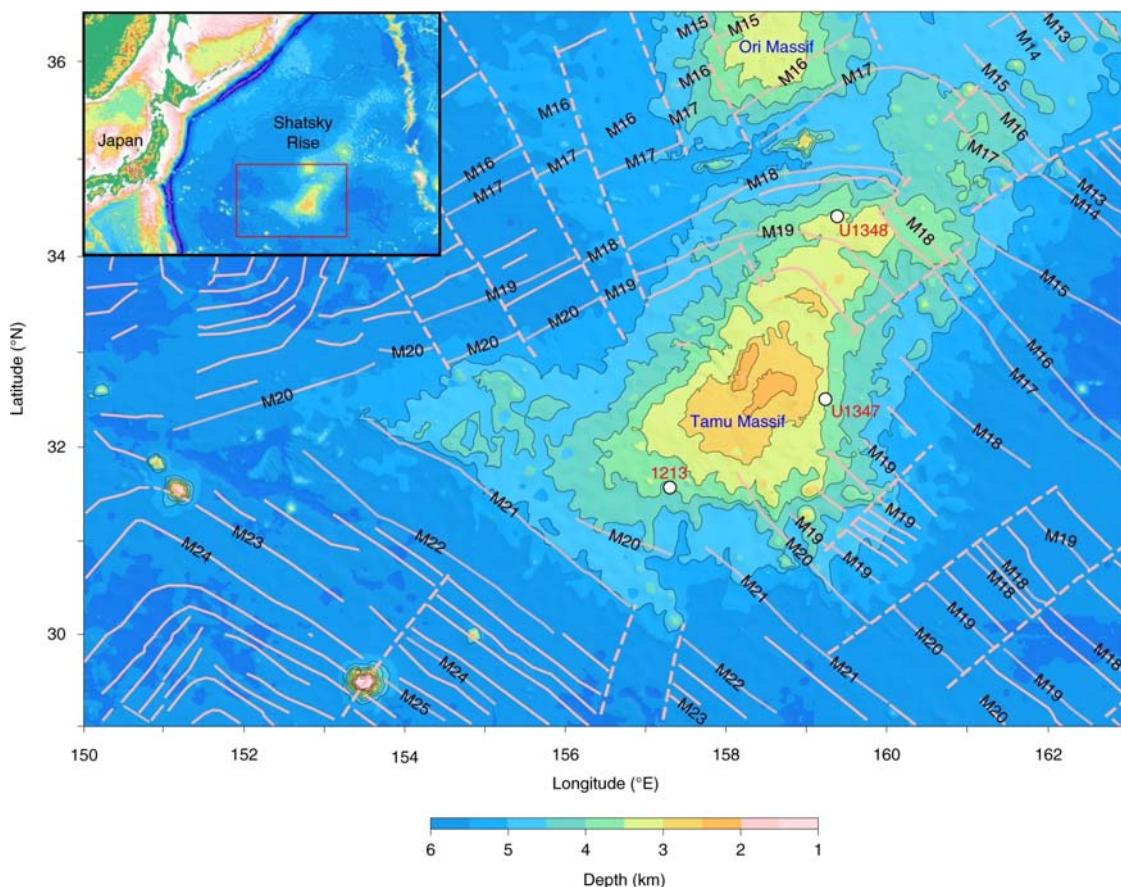


图1 大塔穆地区地形及磁异常条带 (Sager et al., 2019)

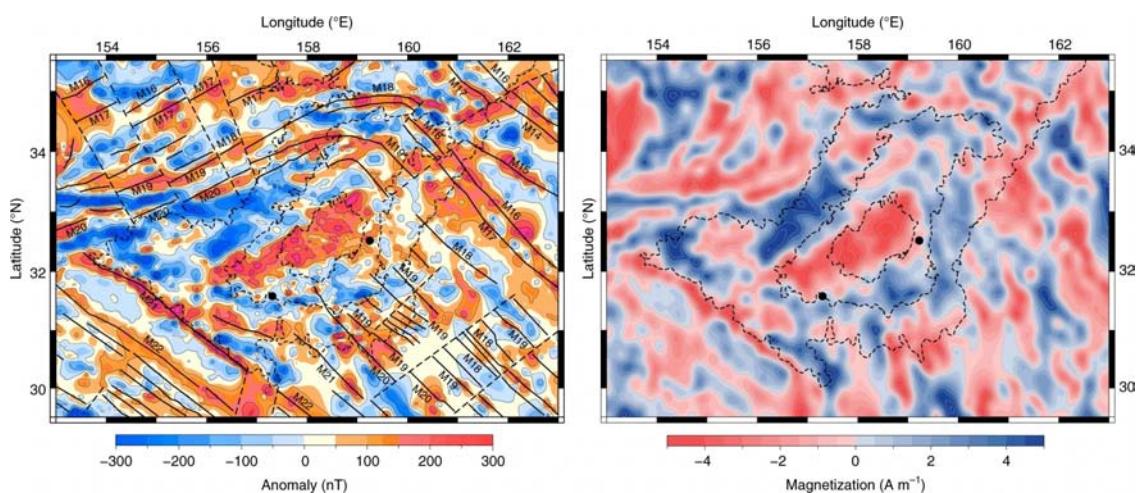


图2 大塔穆地区磁异常及磁化强度模型 (Sager et al., 2019)

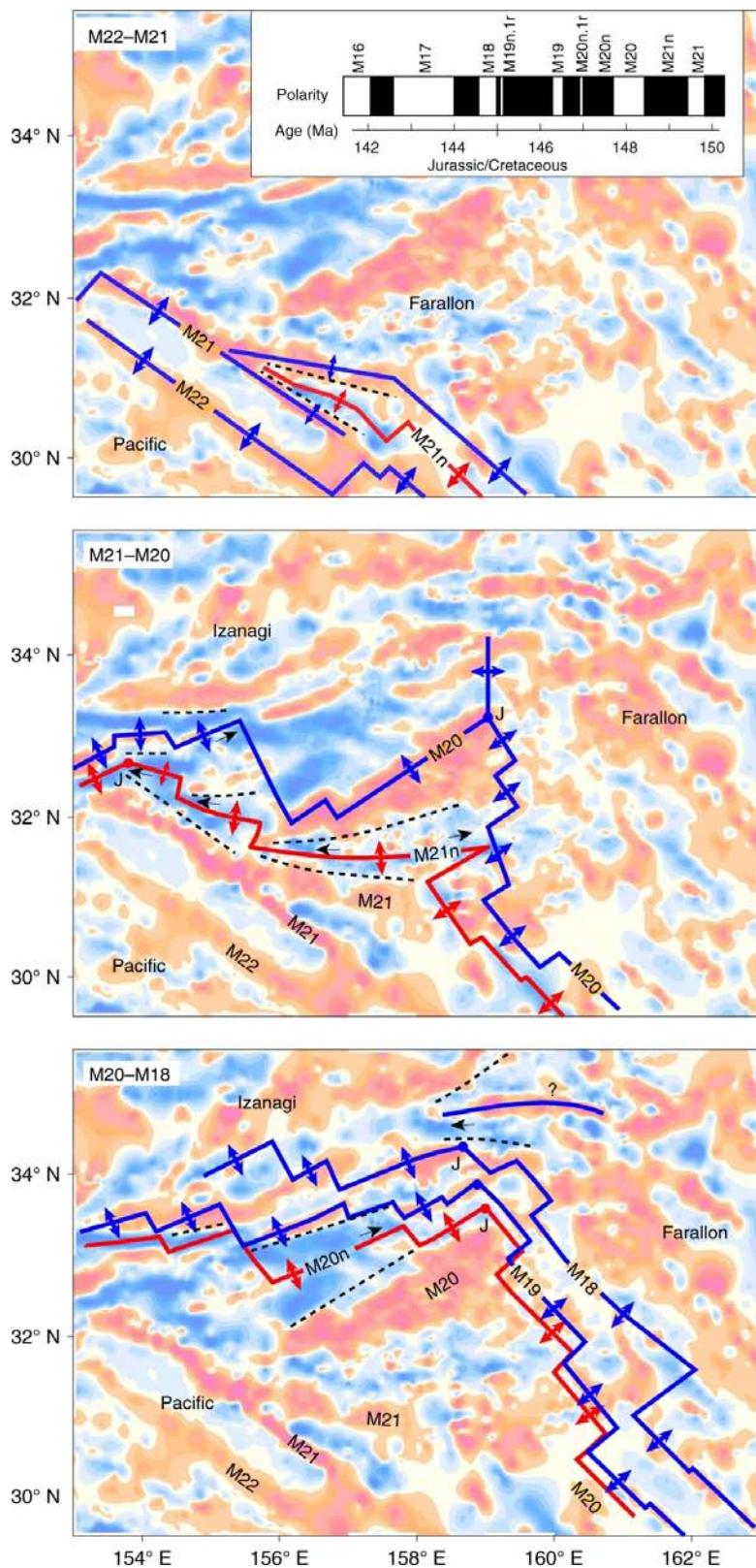


图 3 大塔穆磁异常形成重建, 底图为磁异常图, 自上而下分别说明不同时间磁异常条带的位置及其代表的扩张过程 (Sager et al., 2019)

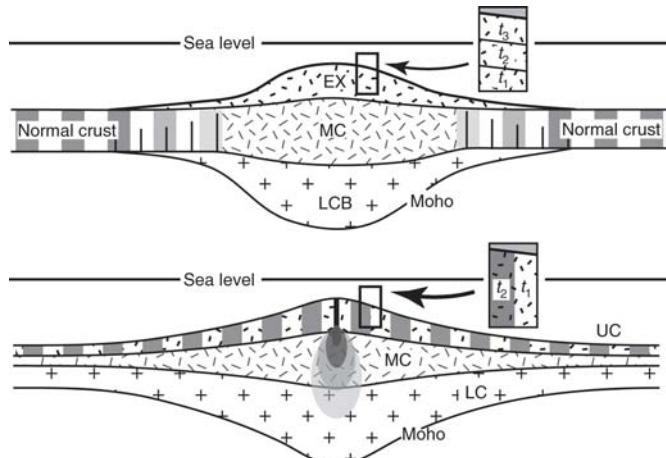


图4 大塔穆火山成因的两种模式图。上：岩浆集中喷发模型，下：洋中脊扩张模型 (Sager et al., 2019)

磁异常的研究揭示 Shatsky 隆起的形成均与海底扩张有关，是伴随地幔熔融在大洋中脊的裂隙性岩浆集中喷发形成的。世界上很多洋底高原也都形成于扩张脊附近，其中一些保留有磁异常条带特征，这也意味洋底扩张可能是洋底高原形成的一种普遍机制。

如果 Shatsky 隆起的岩浆来源于地幔柱，岩浆活动则与海底扩张紧密相关，且受控于海底扩张。与此前将海底高原与大

陆溢流玄武岩的类比研究也需要重新考虑，这也引发了关于地幔柱在大型海底高原形成中的作用以及地幔过程与浅层构造关系等研究的思考 (Whittaker, 2019)。

Sager 教授的团队在大塔穆地区开展了长期的工作，随着海洋地球物理调查的丰富和深入，对该地区的科学认识也在不断修正和深化，该文章也是基于最新地球物理调查资料的研究成果，对全球洋底高原的研究具有重要的意义。

主要参考文献

- Parker R L, Huestis S P. The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(11): 1587-1593. ([链接](#))
- Sager W W, Huang Y, Tominaga M, et al. Oceanic plateau formation by seafloor spreading implied by Tamu Massif magnetic anomalies[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(8): 661-666. ([链接](#))
- Sager W W, Zhang J, Korenaga J, et al. An immense shield volcano within the Shatsky Rise oceanic plateau, northwest Pacific Ocean[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(11): 976-981. ([链接](#))
- Whittaker J M. Plateaus from seafloor spreading[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(8): 587-588. ([链接](#))

(撰稿：徐亚 / 油气室)

2. 板块构造

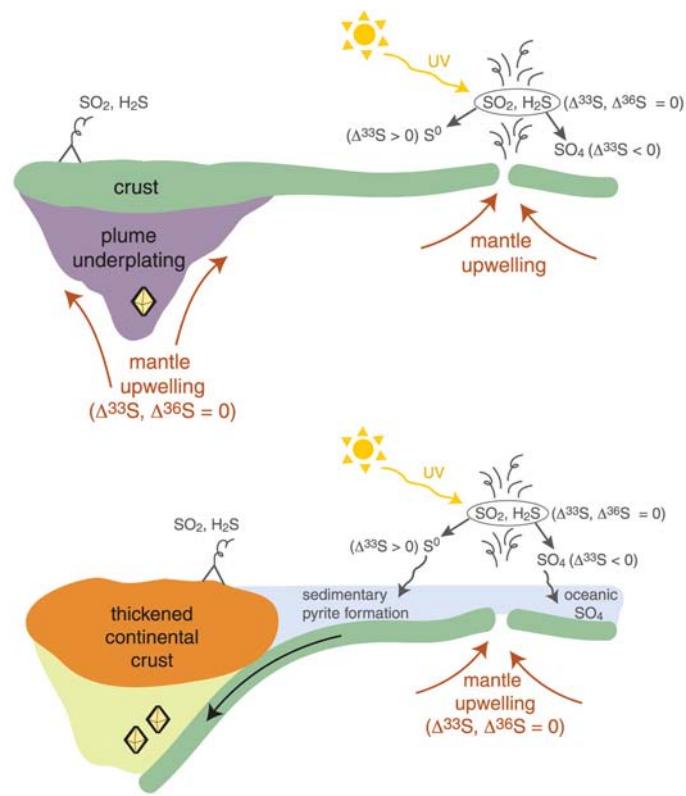


Image source: Smit et al., Science, 2019



Nature Geoscience : 太古宙 TTG 的成因—— 来自硅同位素的证据

太古宙英云闪长岩 – 奥长花岗岩 – 花岗闪长岩 (tonalite-trondhjemite-granodiorite, 即 TTG 岩系) 是大陆地壳的最主要组成部分, 对其成因一直存在很大争议。Nature Geoscience 最近同时发表了两篇文章, 从硅同位素的角度对早期陆壳的形成机制进行了探讨。其中一篇文章根据非洲 Kaapvaal 克拉通具代表性的 35.1–26.9 亿年奥长花岗质和花岗质侵入体具有非常一致的、比现代陆壳岩石重 0.1–0.2‰ 的硅同位素, 认为它们的镁铁质源区受到富硅海水不同程度的硅化。奥长花岗质和花岗质岩石分别来源于 SiO_2 含量 52–57 wt% 和 ≥ 60 wt% 的硅化玄武岩的熔融。另外一篇文章显示来自格陵兰、加拿大、西伯利亚和斯堪的纳维亚等地的 40–28 亿年的 TTG 也具有类似于上述 Kaapvaal 克拉通奥长花岗质和花岗质侵入体的富重 Si 同位素特征, 作者认为这些 TTG 是由于俯冲的玄武质洋壳及少量燧石 (富重 Si 同位素) 的部分熔融而形成, 并由此推断板块俯冲作用在 40 亿前即已开始。

一、早期陆壳形成于被海水不同程度硅化的玄武岩的重熔 (André et al., 2019)

与太阳系内其它类地行星不同, 地球具有厚的长英质大陆地壳, 其主要形成于

地球早期 (Pringle et al., 2016)。太古宙的陆壳主要由富钠的英云闪长岩 – 奥长花岗岩 – 花岗闪长岩 (tonalite-trondhjemite-granodiorite, 即 TTG 岩系) 与富钾的花岗岩 – 二长岩 – 正长岩 (granite-monzonite-syenite, 即 GMS 岩系) 组成, 厘清这些花岗岩类岩石的形成机制对于理解陆壳在早期如何生长以及为何有别于其它行星至关重要。

现今地球中各主要的硅酸盐储库具有近于一致的平均硅同位素组成。其中, 玄武岩质熔体的硅同位素组成 ($\delta^{30}\text{Si} = -0.32 \pm 0.12\text{‰}$) 与其幔源储库 ($-0.29 \pm 0.08\text{‰}$) 没有区别, 但其分异后的熔体具有略重的硅同位素 ($\delta^{30}\text{Si}$ 最高达 -0.14‰ 左右), 这是因为熔体与结晶相间存在低程度的硅同位素分馏 ($\Delta^{30}\text{Si}_{\text{solid-melt}}$ 约为 -0.125‰) (Savage, 2011)。这些岩石共同地限定了硅同位素的“火成岩趋势线”(图 1), 即描述了熔体的硅同位素组成同 SiO_2 含量间的相关关系。

前寒武纪的海水是富硅的, 这些硅主要来自于发生高温热液蚀变的洋壳, 富硅的海水导致大量的条带状铁建造 (BIF) 和燧石以及相关的非晶质硅的沉淀。因为这些沉淀物与海水相比都是富集 ^{28}Si 的, 根据质量平衡原理, 残余的硅饱和海水与之后沉淀的硅随着时间的推移都将具有更高的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值。由于以玄武质岩石为主的太古宙大洋基底与重硅特征的海水反应, 导致它们具有正的硅同位素组成。硅同位素可以

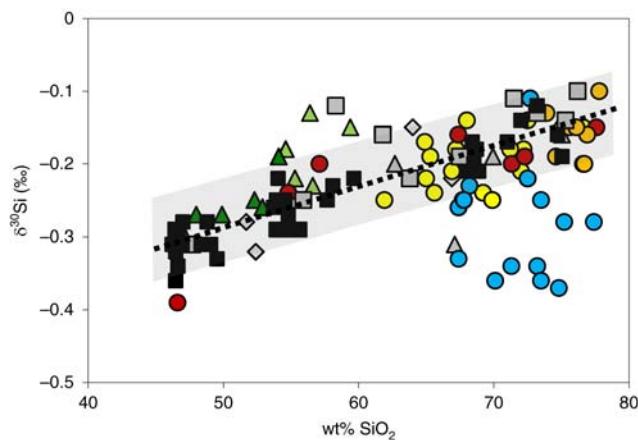


图 1 虚线标记的是由 Afar 和 Iceland 的岩石（黑方形）分异趋势确定的线性“火成岩趋势线”，其等式为 $\delta^{30}\text{Si} (\text{\textperthousand}) = 0.0056\text{SiO}_2 (\text{wt\%}) - 0.567$ 。其中虚线周围灰色的区域是其 $\pm 0.05\text{\textperthousand}$ 的不确定度。图中可见，大多地球上的火成岩落在灰色区域中，各种符号代表了来自不同地区不同类型的岩浆岩，只有过铝质 S 型花岗岩（蓝色圆点）例外，相同 SiO_2 含量情况下这些过铝质花岗岩具有比其它岩浆岩更低的 $\delta^{30}\text{Si}$ (André et al., 2019)

在高温下 ($> 700^\circ\text{C}$) 保持稳定 (André et al., 2006)，这使得表壳岩石在其达到部分熔融条件时仍保持硅同位素组成不受改变 (Savage et al., 2012)。因此，硅同位素可以作为判断太古宙花岗岩类岩石来源的一种有效手段。

Kaapvaal 克拉通 Barberton 绿岩带 (BGB) 的 35.1–26.9 亿年奥长花岗质和花岗质岩石

具有一致的硅同位素特征，均比现今陆壳岩石更富重硅同位素 (高 0.1–0.2‰) (图 2)。这种异常的组成可用其镁铁质源区作解释，其中相当一部分 (15–35 wt%) 为硅化玄武岩，这些岩石在 30 亿年前是常见的表壳岩。在深部发生熔融并产生花岗岩类岩浆前，其相当一部分镁铁质源岩与硅饱和的海水反应而变得富硅。硅的加入使得在相

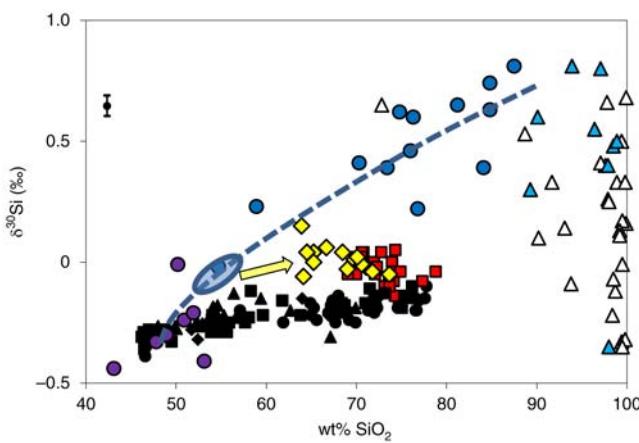


图 2 Kaapvaal 克拉通东部的 TTG 岩（黄菱形）与 GMS 岩（红方形）的全岩硅同位素组成。这些岩石的硅同位素组成比“火成岩趋势线”（小黑色符号代表落在图 1a 中火成系列的所有岩石）更重。TTG 投图在序列（蓝色虚线）右端，这条虚线是由来自 Onverwacht 组的未硅化（紫色圆点）、硅化（蓝色圆点）变玄武岩和夹层燧石（蓝色三角形）限定的。也同时显示了来自 Barberton Buck Reef 的其它燧石（白色三角形）以作比较。 SiO_2 在 52–57 wt% 的椭圆蓝色区域是推定的 TTG 源区成分。与“火成序列”平行的黄色箭头指示了产生 TTG 的硅化源岩在平衡熔融时 $\delta^{30}\text{Si}$ 和 SiO_2 含量同时升高的趋势 (André et al., 2019)



同水分活度下角闪石变得更不稳定，从而允许奥长花岗质（TTG）和花岗质（GMS）的熔体能在低温下从明显不同 SiO_2 含量（分别是 52–57 wt% 和 $\geq 60 \text{ wt\%}$ ）的源岩中形成。这解释为什么花岗岩类能在地球很早期形成，而没有大量出现在别的星球上。

与其它地区的对比揭示出大多数太古宙早期（也可能包括冥古宙）的长英质岩石具有相似的海水起源的硅组成。这说明硅化的海底源岩的重熔作为形成原始长英质陆核的重要机制具有全球性的普遍意义。

二、硅同位素揭示太古宙花岗岩类来源于俯冲洋壳的熔融 (Deng et al., 2019)

该文章获得 35.0–27.0 亿年科马提岩

（慢源超镁铁质火山岩）的 $\delta^{30}\text{Si}$ 为 $-0.29 \pm 0.02\text{\textperthousand}$ ，与通过现今幔源岩石而估计的全硅酸盐地球（Bulk silicate Earth）值 ($-0.29 \pm 0.01\text{\textperthousand}$) 相同，据此作者认为地幔的硅同位素组成自 35 亿年前至今没有明显的变化。而 39.8–27.9 亿年的 TTG 全岩 $\delta^{30}\text{Si}$ 为 $-0.01 \pm 0.02\text{\textperthousand}$ ，不仅明显高于地幔值 ($\delta^{30}\text{Si} = -0.29 \pm 0.01\text{\textperthousand}$)，而且明显高于显生宙 I 型和 A 型花岗岩，稍高于现代埃达克岩（图 3）。

论文进一步论证了在地热梯度为 40°C/kbar （即 $\sim 13^\circ\text{C/km}$ ），拉斑玄武岩的部分熔融发生在压力 $> 20 \text{ kbar}$ 的条件时，残留矿物为石榴石、单斜辉石、角闪石和金红石，所产生熔体的 Si 同位素 ($\delta^{30}\text{Si} = -0.02 \sim -0.12\text{\textperthousand}$) 接近现代埃达克岩 ($\delta^{30}\text{Si} = -0.06 \pm 0.02\text{\textperthousand}$)。而在地热梯度为

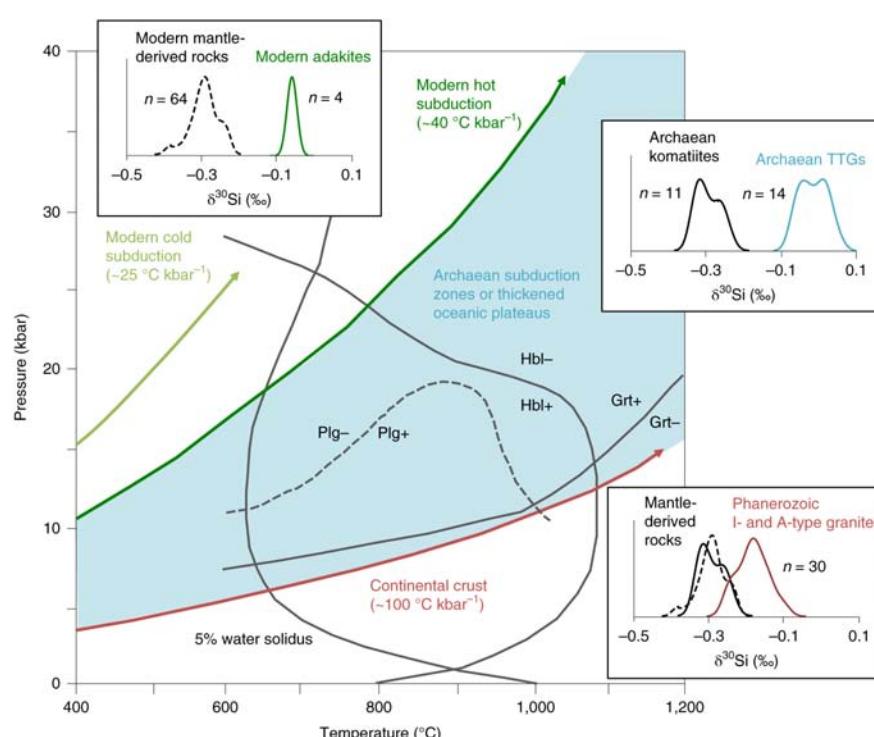


图 3 含水拉斑玄武岩在不同地质背景的地热梯度条件下部分熔融的相平衡关系。幔源岩石包括太古宙的 TTG 和科马提岩、显生宙的 I 型和 A 型花岗岩以及现代玄武岩、橄榄岩和埃达克岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 显示在内嵌的小图中。右下的小图中现代（黑虚线）和太古宙（黑实线）幔源岩石与显生宙花岗岩的 Si 同位素进行了对比。

Plg- 斜长石, Hbl- 角闪石, Grt- 石榴石 (Deng et al., 2019)



100°C /kbar (即 $\sim 33^\circ\text{C}/\text{km}$)，部分熔融发生在压力 $< 8\text{--}10 \text{ kbar}$ 的条件时，残留矿物为单斜辉石、斜长石和角闪石，产生熔体的 Si 同位素 ($\delta^{30}\text{Si} = -0.20 \sim -0.10\text{\%}$) 接近显生宙 I 型和 A 型花岗岩 ($\delta^{30}\text{Si} = -0.18 \pm 0.02\text{\%}$)。尽管太古宙 TTG 的全岩化学组成与上述显生宙埃达克岩和花岗岩近于一致，但是其 $\delta^{30}\text{Si}$ 偏高 +0.1 到 +0.2%，这意味着在其源区存在重 Si 同位素的组分。

太古宙的海洋沉积燧石具有高且变化较大的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值 (0 ~ +4%)，并且还富集 ^{18}O ，因此在 TTG 的源区里存在少量燧石可

以解释 TTG 同时具有富集重 O 和 Si 同位素的特征。这样一个合理的推理是：海底燧石和洋壳一起被俯冲到一定的深度并发生部分熔融产生具有高 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{30}\text{Si}$ 的 TTG，也表明早在 ~ 40 亿年前至少在局部存在岩石圈的侧向运动和沉积物的向下运移，即板块俯冲作用在 40 亿前即已开始，并且大洋俯冲可能是太古宙长英质地壳生长的主要机制。

致谢：感谢纪伟强副研究员、刘小驰副研究员对本文的完善

主要参考文献

- André L, Abraham K, Hofmann A, et al. Early continental crust generated by reworking of basalts variably silicified by seawater[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 769-773. ([链接](#))
- André L, Cardinal D, Alleman L Y, et al. Silicon isotopes in ~ 3.8 Ga West Greenland rocks as clues to the Eoarchean supracrustal Si cycle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245(1-2): 162-173. ([链接](#))
- Deng Z, Chaussidon M, Guitreau M, et al. An oceanic subduction origin for Archaean granitoids revealed by silicon isotopes[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 774-778. ([链接](#))
- Pringle E A, Moynier F, Savage P S, et al. Silicon isotopes reveal recycled altered oceanic crust in the mantle sources of Ocean Island Basalts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 189: 282-295. ([链接](#))
- Savage P S, Georg R B, Williams H M, et al. Silicon isotope fractionation during magmatic differentiation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(20): 6124-6139. ([链接](#))
- Savage P S, Georg R B, Williams H M, et al. The silicon isotope composition of granites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 92: 184-202. ([链接](#))

(撰稿：刘丹青，姜能 / 岩石圈)



Science : 金刚石中硫化物包裹体的硫同位素组成对板块构造启动时间的限定

板块构造的启动时间一直存有争议，是地球科学领域悬而未决的重大问题之一。有两类比较极端的观点：一是很早，认为板块在冥古宙（> 4.2 Ga）就已开始俯冲进入地幔（Hopkins et al., 2008）；二是很晚，认为板块俯冲在新元古代（850–800 Ma）才开始（Hamilton, 2011）。目前的主流观点认为板块构造在太古宙开始启动，其中金刚石及其包裹体的同位素研究在解决这一重大科学问题上起到了关键作用。然而，各同位素体系的研究结果仍存在较大差异，如 Richardson et al. (2001) 根据金刚石中硫化物包裹体的 Re-Os 同位素，将板块俯冲的启动时间限定在中太古代末期（2.9 Ga），但是 Smart et al. (2016) 根据南非 Kaapvaal 克拉通中太古宙金刚石的 N、C 同位素，推测现代板块构造在古太古代（3.5 Ga）已经开始。

要回答板块构造启动的时间问题需要创新性的思维和技术手段。其中，高精度的硫同位素分析是一种新途径。其理论基础是：硫具有四种稳定同位素 ^{32}S 、 ^{33}S 、 ^{34}S 和 ^{36}S 。在火山作用和变质作用过程中，硫同位素组成稳定在 $\Delta^{33}\text{S} = \Delta^{36}\text{S} = 0$ （分别指 $^{33}\text{S}/^{32}\text{S}$ 和 $^{36}\text{S}/^{32}\text{S}$ 相对 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ 的比值）。在太古宙晚期（2.5 Ga）以前，地幔硫通过火山喷发进入大气并受到太阳紫外线辐射和光分解作用而发生非质量分馏（MIF），MIF 硫以异常的 $\Delta^{33}\text{S}$ (> 0.2‰) 和 $\Delta^{36}\text{S}$ 值为特征。此后，由于地球臭氧层出现，屏蔽了

紫外线和光分解作用，MIF 现象消失。因此，硫同位素组成可用来追溯硫的起源，MIF 硫可用来示踪岩石圈地幔中来自古老地表的物质，从而揭示大陆板块的运动方式。

近期，美国宝石协会 (GIA)、卡内基科学研究所联合加拿大阿尔伯塔大学的研究人员，采用二次离子质谱仪对产自西非 Zimmi 冲积平原的六颗金刚石中的硫化物包裹体进行了硫同位素测试，发现其含有 MIF 硫特征，这一现象为限定西非克拉通板块构造启动时间提供了关键约束条件，相关研究成果发表在 *Science* 上。

根据 Re-Os 同位素结果，Zimmi 金刚石形成于新元古代，其六种硫化物包裹体成分均为磁黄铁矿–镍黄铁矿–黄铜矿组合。Zimmi 硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($\delta^{34}\text{S} = -0.93 \sim +1.76\text{‰}$)、较低的 Ni 含量和较高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值指示其硫元素源自地表；同时， $\delta^{33}\text{S}$ 和 $\delta^{36}\text{S}$ 数据表明这些硫元素受到了太古宙大气硫的混染（图 1）。结合 Re-Os 同位素定年信息可知，Zimmi 金刚石形成于两期俯冲事件：(1) 约 3.0 Ga 前，大陆岩石圈开始发生平板俯冲（智利型俯冲），太古宙地表硫通过洋壳俯冲进入岩石圈，此时大气硫同位素分馏可能是不稳定的（即具有可变的 $\Delta^{34}\text{S}$ 值），导致形成的原始硫化物的硫同位素组成不均匀。在此后的 20 亿年间地幔交代作用过程中，大陆地壳形成、岩石圈地幔生长，俯冲下来的太古宙大气硫与地幔硫混染，导致大气 MIF 硫特征减弱。(2) 在



新元古代约 650 Ma 前，在已形成的克拉通之下又发生一期俯冲事件并形成金刚石，这些金刚石将减弱太古宙大气 MIF 硫特征记录下来，之后被金伯利岩岩浆携带到地表。

从全球范围来看，在太古宙俯冲开始之前，大气 MIF 硫没有进入地幔的渠道。在俯冲作用启动后，大气硫才能被吸收进入大陆岩石圈地幔并在金刚石中以硫化物包裹体的形式保存下来。产自加拿大 Slave 克拉通的古太古代（3.5 Ga）金刚石的硫

化物包裹体不含 MIF 硫（Cartigny et al., 2009），表明冥古宙 – 太古宙原始 Slave 克拉通的形成没有地表硫的参与，即没有板块俯冲。随后在中太古代 – 新太古代克拉通生长和稳定期间，岩石圈发生马里亚纳型俯冲，Kaapvaal、津巴布韦和西非大陆岩石圈开始吸收大气硫，MIF 硫特征被保存在年轻的金刚石中。由此可见，MIF 硫是大陆岩石圈形成和改造的有力判别依据之一（图 2）。

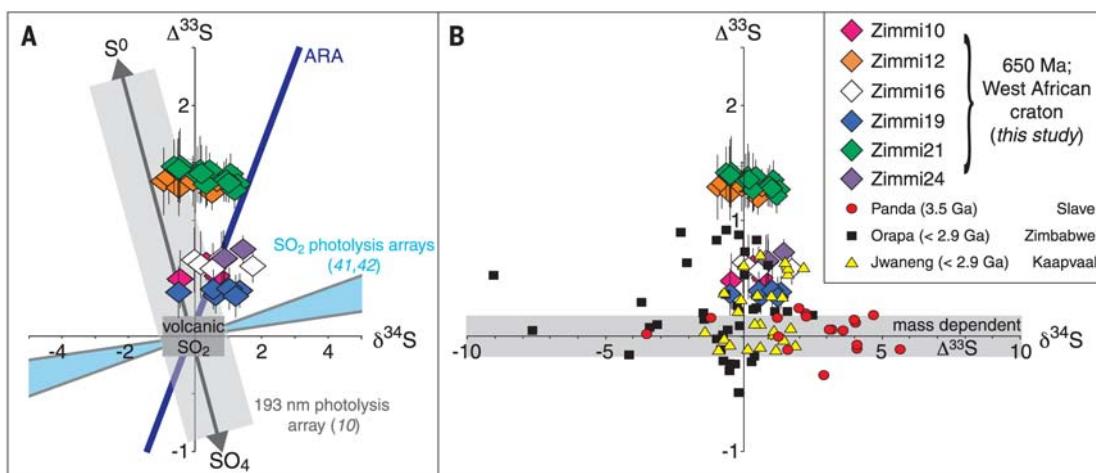


图 1 Zimmi 硫化物包裹体中硫同位素的 $\Delta^{33}\text{S}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (Smit et al., 2019)。A.Zimmi 硫同位素组成与实验值比较。B.Zimmi 硫化物的硫同位素组成与其他产地金刚石中硫化物包裹体的硫同位素组成比较 (Smit et al., 2019)

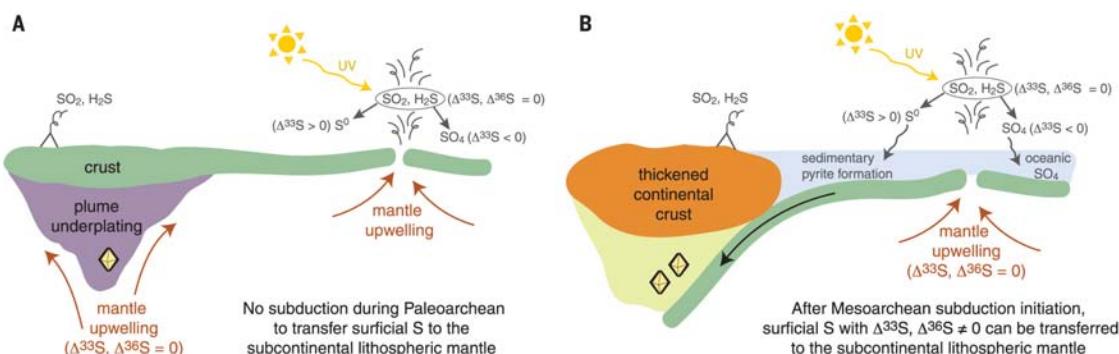


图 2 从硫同位素的角度理解克拉通构造的地球动力学过程 (Smit et al., 2019)



现代地球动力学-热力学研究表明，板块构造是一个典型的、非平衡复杂体系的自组织系统，是行星热散逸的一种有效的方式，需要综合如超高压变质带、转换断层、岩浆岩地球化学和同位素特征等板

块构造判别依据，并从多角度加以分析，讨论这些依据的组合和性质何时首次出现并占据主导地位，为限定板块构造的启动时间提供全面可靠的依据。

主要参考文献

- Cartigny P, Farquhar J, Thomassot E, et al. A mantle origin for Paleoproterozoic peridotitic diamonds from the Panda kimberlite, Slave Craton: Evidence from ^{13}C -, ^{15}N -and $^{33},^{34}\text{S}$ -stable isotope systematics[J]. *Lithos*, 2009, 112(S2): 852-864. ([链接](#))
- Hamilton W B. Plate tectonics began in Neoproterozoic time, and plumes from deep mantle have never operated[J]. *Lithos*, 2011, 123(1-4): 1-20. ([链接](#))
- Hopkins M, Harrison T M, Manning C E. Low heat flow inferred from > 4 Gyr zircons suggests Hadean plate boundary interactions[J]. *Nature*, 2008, 456(7221): 493. ([链接](#))
- Richardson S H, Shirey S B, Harris J W, et al. Archean subduction recorded by Re-Os isotopes in eclogitic sulfide inclusions in Kimberley diamonds[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 191(3-4): 257-266. ([链接](#))
- Smit K V, Shirey S B, Hauri E H, et al. Sulfur isotopes in diamonds reveal differences in continent construction[J]. *Science*, 2019, 364(6438): 383-385. ([链接](#))
- Smart K A, Tappe S, Stern R A, et al. Early Archean tectonics and mantle redox recorded in Witwatersrand diamonds[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(3): 255-259. ([链接](#))

(撰稿：高静，陈意 / 岩石圈室)



Nature : Nazca 板块 – 构造重建与安第斯边缘演化

安第斯边缘纵贯南美西部，全长近 7000 km，平均海拔达 4000 m，是世界上最长的大陆山链，高度仅次于喜马拉雅山脉。

长期以来地学界将安第斯边缘视为板块构造理论中单一、连续洋 – 陆俯冲作用（安第斯模式）的原型（图 1）。

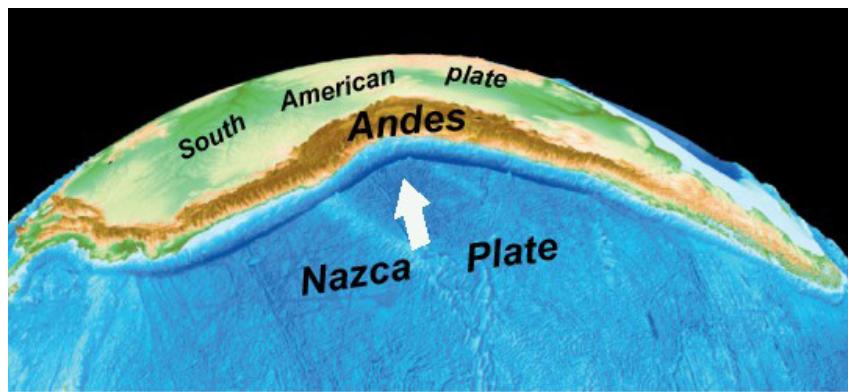


图 1 洋 – 陆俯冲作用导致安第斯边缘的形成（修改自 Müller, 2019）

地震层析成像结果显示，安第斯下方存在向东倾斜的高速异常体，该异常沿贝尼奥夫地震带向深部延伸，一般将其解释为向东俯冲的 Nazca 板块（图 2）。进一步的地球物理与动力学研究表明，地震成像获得的 Nazca 板片尚不足以吸纳新生代以来 Nazca 板块相对南美板块的汇聚量，意味着自早侏罗纪以来该区可能并非始终保持单一、连续的俯冲过程。沉积学研究揭示南安第斯经历了幕式挤压和伸展过程，一般将这些构造相的形成，解释为俯冲过程中板片倾角变化引起的构造响应；然而，动力学模拟研究表明，安第斯挤压的启动，与 Nazca 板片进入下地幔的“锚定”（slab anchoring）作用有关。

因此，Nazca 板块的俯冲历史，以及安第斯边缘演化与板块俯冲之间究竟存在怎

样的关联，是非常值得深入研究的重要科学问题。

近日，美国休斯敦大学地球与大气科学系 Chen Yi-Wei 等人，在 *Nature* 发表了利用地震层析成像模型重建晚中生代以来 Nazca 板块俯冲历史的最新成果。该项研究认为，Nazca 俯冲系统 80 Ma 启动于北安第斯，尔后向南穿时传播，于 55 Ma 到达南安第斯；俯冲启动 10–30 Myr 之后，板片渐次进入下地幔并发生“锚定”，板块俯冲和板片“锚定”的南向传播共同控制了安第斯边缘的一级构造演化。该项研究不仅为认识安第斯边缘的形成与板块俯冲之间的联系提供了新的视角，而且为全球其它板块汇聚边缘的板块 – 构造重建提供了重要的方法借鉴。

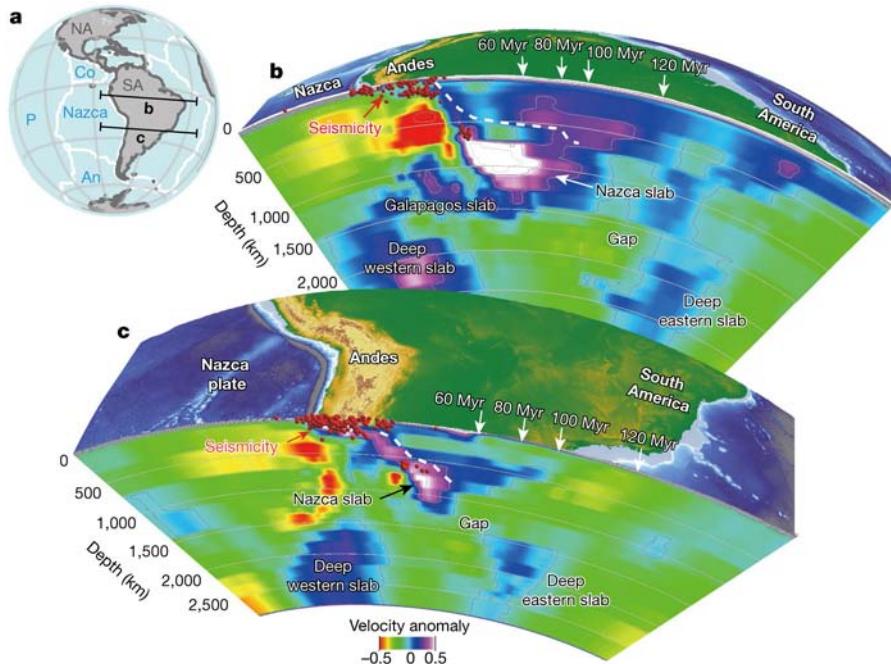


图 2 地震层析成像揭示南美下方存在多个俯冲板片 (Chen et al., 2019)

该项研究在考虑密度 – 深度校正的情况下，将地震层析成像剖面中 (Li et al., 2008) 与目前 Nazca 板块仍保持连续的高速体 (图 2)，进行“板片展平” (slab unfolding ; Wu et al., 2016)，恢复得到未经俯冲变形的 Nazca 板块的面积和形态 (图 3)，并在古地理信息系统 Gplates 模型 (Boyden et al., 2011) 中，沿 83.5 Ma 以来 Nazca 板块相对南美大陆的运动路线，进行 Nazca 板块运动过程重建，结果显示板块

前沿与 80 Ma 安第斯边缘的形状和位置吻合，从而推测层析成像获得的 Nazca 板片是 80 ± 10 Ma 以来板块俯冲的产物。将重构得到的 Nazca 板块输入到全球板块模型 (Müller et al., 2016) 中，进行板块 – 构造历史恢复 (Wu et al., 2016)，获得 80 Ma 以来 Nazca 板块俯冲启动自北安第斯向南安第斯传播与构造作用的演化历史 (图 4)，并基于恢复的板片长度进一步估算了俯冲板片自北向南进入下地幔的时间。

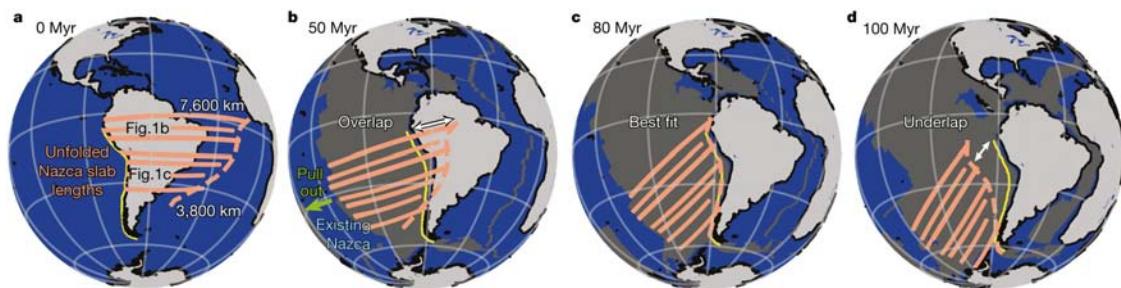


图 3 利用“板片展平”方法重建的 Nazca 板块 (Chen et al., 2019)

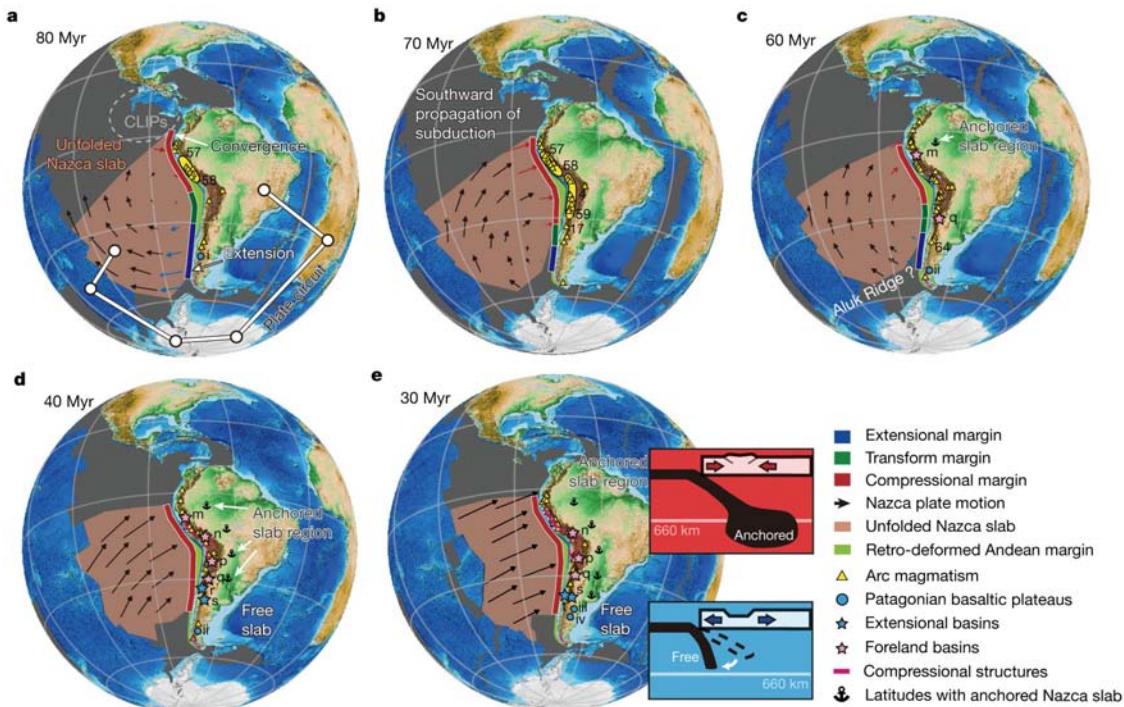


图 4 晚白垩纪以来 Nazca 俯冲自北向南的穿时传播与板块 – 构造演化 (Chen et al., 2019)

板块重构模型预测的 Nazca 板块俯冲自北向南穿时传播，不仅可以很好地解释地震层析成像高速体底部由北往南渐次变浅的空间变化特征，而且得到了同时期安第斯弧岩浆作用的迁移规律、安第斯挤压的启动与前陆盆地的发展等构造事件存在由北向南渐显年轻的时间变化趋势等系列地质观测的有力支持。特别是安第斯挤压的启动与前陆盆地的发展等构造事件，在时间上较模型预测的 Nazca 俯冲启动系统地滞后 20–30 Myr，这一时间恰好与模型预测的俯冲板片到达下地幔的时间一致，这种时间一致性，意味着安第斯挤压的启动与 Nazca 板片在下地幔的“锚定”之间存

在联系。此外，40–20 Ma 北安第斯与南安第斯的构造同步，以及 Neuquén 盆地晚白垩纪以来的构造演化过程，均可通过板片 – 地幔相互作用引起的浅部构造响应而得到合理解释。

综上所述，安第斯边缘自早侏罗纪以来并非始终保持经典“安第斯模式”所认为的单一、连续的俯冲作用；晚白垩纪 – 中新世期间，Nazca 俯冲经历了自北向南穿时传播和板片渐次进入下地幔的“锚定”过程，此后安第斯边缘才实现构造同步，即仅仅自中新世以来才受到单一、连续的平板俯冲作用的控制。



主要参考文献

- Boyden J A, Müller R D, Gurnis M, et al. Next-generation plate-tectonic reconstructions using GPlates// Keller G R, Baru C(Eds.). Geoinformatics: Cyberinfrastructure for the Solid Earth Sciences[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 95-114.
- Chen Y W, Wu J, Suppe J. Southward propagation of Nazca subduction along the Andes[J]. *Nature*, 2019, 565(7740): 441-447. ([链接](#))
- Li C, Van Der Hilst R D, Engdahl E R, et al. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(5): Q05018. ([链接](#))
- Müller D. The art of unsubduction[J]. *Nature*, 2019, 565: 432-433. ([链接](#))
- Müller R D, Seton M, Zahirovic S, et al. Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44: 107-138. ([链接](#))
- Wu J, Suppe J, Lu R, et al. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(6): 4670-4741. ([链接](#))

(撰稿：陈贊 / 岩石圈室)



Nature : 从变质作用演化看板块构造体制转型

变质作用是指岩石在基本保持固态条件下由于温度 (T) 和压力 (P) 的改变，发生矿物转变的地质过程。变质作用发生的 PT 条件和经历的 $P-T$ 轨迹一般反映了当时的构造环境和动力学过程。早在板块构造理论提出之前，变质岩石学家已经在探索变质作用与构造环境的关系，其中最具代表性的成果是都城秋穗提出按照地热梯度把区域变质作用划分为三种压力类型的方案 (Miyashiro, 1961)，即：低地温梯度 ($\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{km}$) 的高压型变质作用、中等地温梯度 ($20\text{--}30^{\circ}\text{C}/\text{km}$) 的中压型变质作用和高地温梯度 ($\geq 40^{\circ}\text{C}/\text{km}$) 的低压型变质作用。在此基础上，都城秋穗进一步提出了双变质带的概念，认为在环太平洋地区高压型和低压型变质带是成对出现的，空间上平行延伸：在大洋侧通常是高压型变质带（具有低 T/P 特点），代表古海沟，在那里洋壳曾俯冲到陆壳之下；而低压型变质带（具有高 T/P 特点）位于花岗岩-火山弧带。因此，在板块构造理论发展的初期，双变质带的识别和建立成为其地质基础的一部分 (Dewey and Bird, 1970)。随后，Ernst (1971, 1972) 的研究进一步明确了高压型变质作用与板块俯冲作用的联系，这方面的研究也迅速成为变质地质学最重要的主题。到 80 年代中期，变质陆壳岩石中柯石英的发现 (Chopin, 1984；

Smith, 1984) 开启了超高压变质作用研究的序章，通过对大陆深俯冲过程的细致刻画，极大地丰富了板块构造动力学过程的科学内涵。

近年来，板块构造在地质历史上何时启动和如何演化，逐渐成为地球科学的重大前沿科学问题。全球范围内陆壳岩石变质条件的变化有可能反映了板块构造长期演化的过程。传统观点认为，“冷俯冲”是现代板块构造体制的典型特征。低温蓝片岩最早广泛出现在新元古代时期 (Stern, 2005)，可能标志着现代板块构造体制的开端；最近，随着一些古老的冷榴辉岩的发现 (Weller and St-Onge, 2017；Xu et al., 2018)，将这一起始时间提前到古元古代。然而，美国马里兰大学的变质岩石学家 Michael Brown 的系列研究成果 (Brown, 2006, 2007, 2008, 2009, 2014；Brown and Johnson, 2018, 2019) 指出，板块汇聚边缘双变质带的出现标志着现代板块构造体制的起始。麻粒岩-超高温变质作用 (高 T/P) 和榴辉岩-高压麻粒岩变质作用 (低 T/P) 在中-新太古代开始广泛出现，因此，他们提出全球规模的板块构造运动可能开始于中-新太古代，主体在古元古代，称之为“元古代型”板块构造，并在新元古代转化为“现代型”、以冷俯冲为代表的板块构造体制。

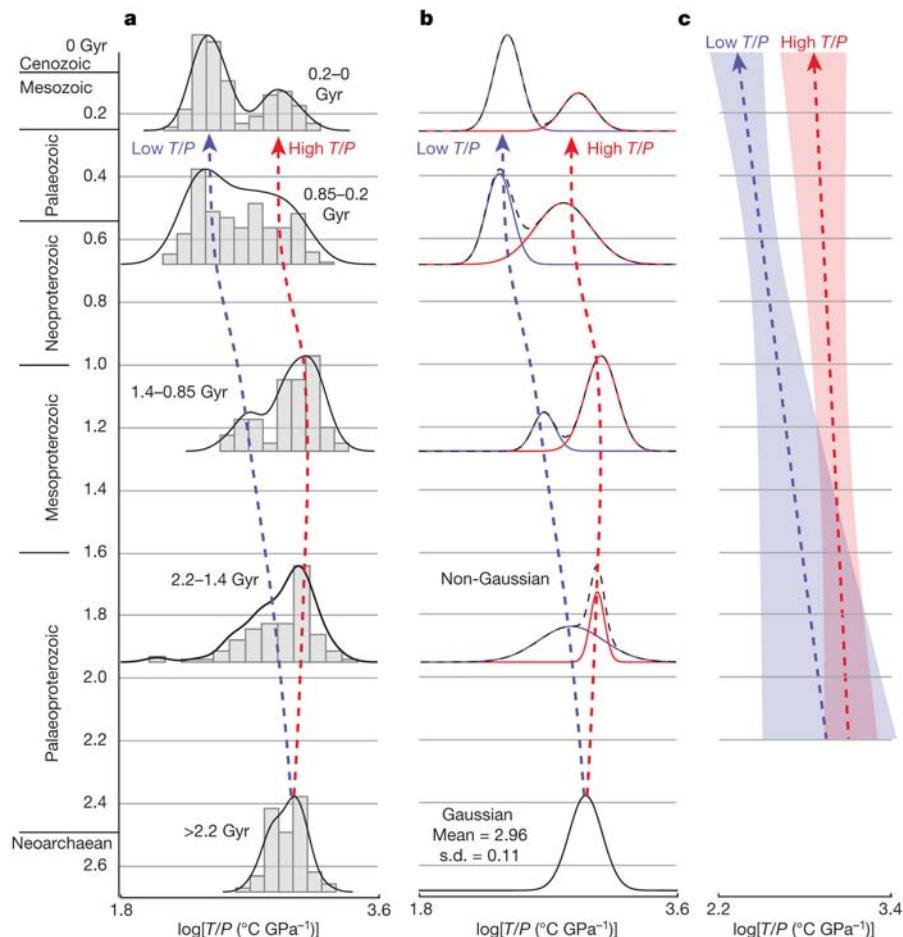


图1 “双峰式”变质作用随时间演化的规律 (Holder et al., 2019)

近日，美国约翰霍普金斯大学和密歇根大学的 Robert M. Holder 博士和其合作者在 *Nature* 上撰文，发表他们对变质作用与板块构造演化的新认识。他们采用统计学方法重新甄选了 Brown and Johnson (2019) 搜集的全球 564 个变质岩露头的 T/P 和年龄数据。他们将这些数据按变质时代分为五组，进行 T/P 核密度估计和柱状投图，对非高斯分布的数据组采用混合 - 高斯分布的方法将其分为两类(高 T/P 和低 T/P ；图 1)。他们发现“双峰式”变质作用的趋势自新太古代开始初现端倪，随后双峰距离变得

更宽、更明显（图 1），因此提出“现代型”板块构造机制自新太古代起始并不断演化的观点。他们认为新太古代开始出现的“双峰式”变质作用和新元古代出现的蓝片岩和超高压变质作用都是地幔长期冷却的结果（图 2）。地幔长期冷却引起了大洋岩石圈厚度、浮力和流变学性质的改变，从而导致了板块俯冲和碰撞样式的改变。该观点与其他学者认为的“现代型”板块构造自新元古代 (Stern, 2005) 或古元古代 (Weller and St-Onge, 2017 ; Xu et al., 2018) 的观点不同。

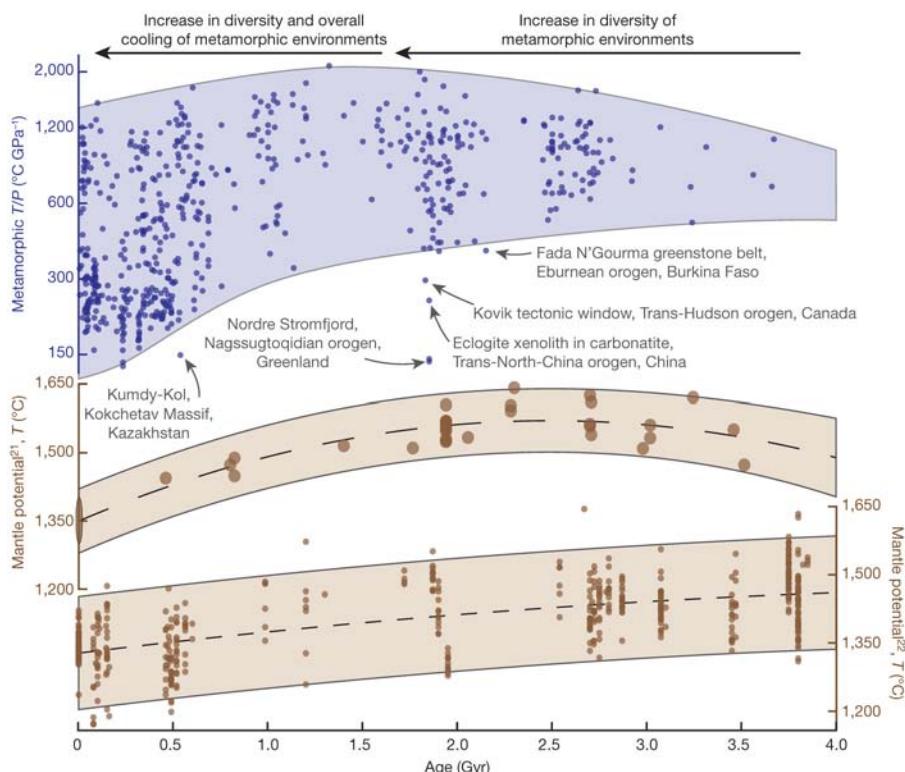


图2 变质作用 T/P 随时间的变化和地幔潜能温度的长期冷却过程 (Holder et al., 2019)

变质地质学在限定地球早期动力学演化过程和完善板块构造理论中发挥了举足轻重的作用。科学家们广泛认同板块构造早在10亿年前的地球已存在并起主导作用，但越来越多的证据表明全球规模的持续性板块俯冲作用最早可以追溯到新太古代或古元古代。尽管如此，科学家们对板块构造起始和转型的具体时间仍未达成共

识。Holder et al. (2019) 的研究仅从时间尺度来看“双峰式”变质作用，但忽略了空间尺度，同一时间尺度的“双峰”可能并不一定是同一俯冲带的产物，并非代表真正意义上的双变质带。深入认识板块构造体制转型，仍需要我们综合多学科的研究成果，其中变质地质学研究的重要作用不可或缺！

主要参考文献

- Brown M. Duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoproterozoic[J]. *Geology*, 2006, 34(11): 961-964. ([链接](#))
- Brown M. Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change[J]. *International Geology Review*, 2007, 49(3): 193-234. ([链接](#))
- Brown M. Characteristic thermal regimes of plate tectonics and their metamorphic imprint throughout Earth history: When did Earth first adopt a plate tectonics mode of behavior[J]. *The Geological Society of America Special Paper*, 2019, 557(1): 1-42. ([链接](#))



- society of America, Special Paper; 2008, 440: 97-128. ([链接](#))
- Brown M. Metamorphic patterns in orogenic systems and the geological record[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2009, 318(1): 37-74. ([链接](#))
- Brown M. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics[J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5(4): 553-569. ([链接](#))
- Brown M and Johnson T. Secular change in metamorphism and the onset of global plate tectonics[J]. *American Mineralogist*, 2018, 103(2): 181-196. ([链接](#))
- Brown M and Johnson T. Time's arrow, time's cycle: Granulite metamorphism and geodynamics[J]. *Mineralogical Magazine*, 2019, 83(3): 323-338. ([链接](#))
- Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps-a 1st record and some consequences[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 86(2): 107-118. ([链接](#))
- Dewey J F and Bird J M. Mountain belts and the new global tectonics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(14): 2625-2647. ([链接](#))
- Ernst W G. Metamorphic zonations on presumably subducted lithospheric plates from Japan, California and the Alps[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1971, 34(1): 43-59. ([链接](#))
- Ernst W G. Possible permian oceanic crust and plate junction in central Shikoku, Japan[J]. *Tectonophysics*, 1972, 15(3): 233-239. ([链接](#))
- Holder R M, Viete D R, Brown M, et al. Metamorphism and the evolution of plate tectonics[J]. *Nature*, 2019, 572(7769): 378-381. ([链接](#))
- Miyashiro A. Evolution of metamorphic belts[J]. *Journal of Petrology*, 1961, 2(3): 277-311. ([链接](#))
- Smith D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics[J]. *Nature*, 1984, 310(5979): 641-644. ([链接](#))
- Stern R J. Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh-pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time[J]. *Geology*, 2005, 33(7): 557-560. ([链接](#))
- Weller O M and St-Onge M R. Record of modern-style plate tectonics in the Palaeoproterozoic Trans-Hudson orogen[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 305-311. ([链接](#))
- Xu C, Kynický J, Song W, et al. Cold deep subduction recorded by remnants of a Paleoproterozoic carbonated slab[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2790. ([链接](#))

(撰稿：焦淑娟，陈意，郭敬辉 / 岩石圈室)



Nature : 倾冲的碳

对于人类而言，碳是地球上最重要的元素之一。碳循环影响着大气—海洋—生物甚至固体地球各圈层以及人类的生命。另一方面，碳是一个容易跨越多圈层迁移的元素。地球上 90% 以上的碳深埋于地球内部，超过 2/3 的碳可能存在于地球内核。大气中的 CO₂ 被海水溶解并沉淀进入沉积物、大洋地壳和橄榄岩地幔中，同时深部地幔的岩浆作用通过岛弧火

山、离散边界等排出巨量的 CO₂ 进入大气（图 1）。作为温室气体，大气中 CO₂ 的增加能导致温室效应并影响全球气候。碳是如此重要，但是碳在地球圈层是如何循环的？这是地球科学交叉领域中最为前沿的问题之一。时值 *Nature* 创刊 150 周年之际，Plank 和 Manning 发表了题为 “**Subducting carbon**” 的综述文章来阐述倾冲带碳循环的动力学过程。

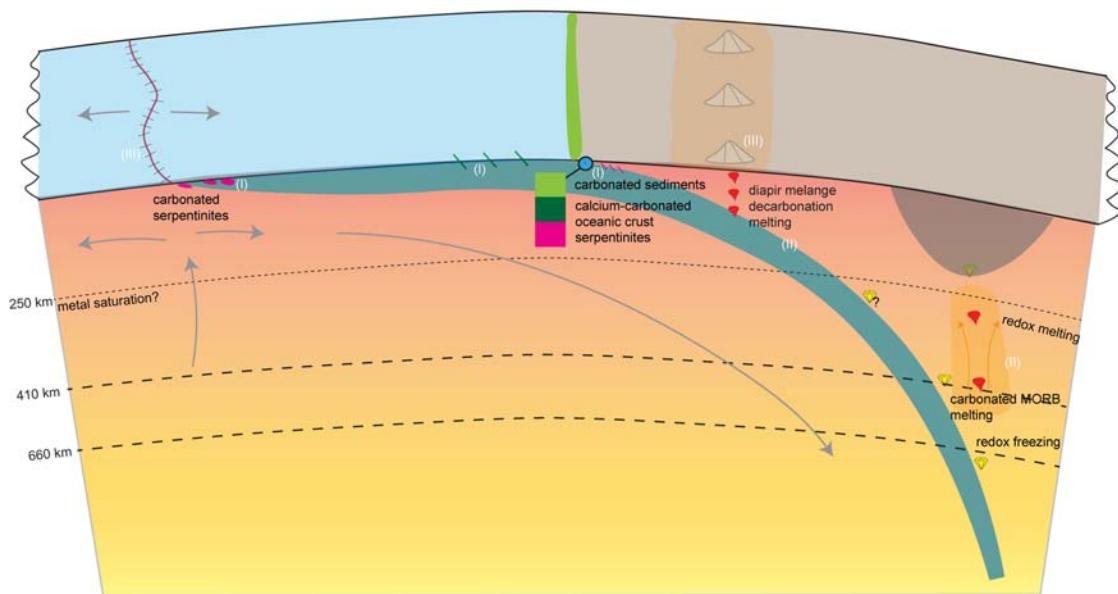


图 1 地球深部碳循环可以主要分为三个阶段：(I) 倾冲带碳的沉淀，包括碳酸盐沉积物、碳酸盐蚀变洋壳、碳酸盐蛇纹岩以及有机碳；(II) 倾冲带碳的运移，包括碳在弧下深度通过混杂岩的底辟作用、变质作用脱碳、板块顶部的熔融作用等，以及剩余碳进入深部地幔；(III) 碳在岛弧、离散边界等将碳排出到地表
(据 Plank and Manning, 2019 修改)

Plank and Manning (2019) 估计了碳循环各个环节的通量，估算火山喷发的碳排放为 79±9 megaton/year，而碳汇量为 82±4 megaton/year，这表明全球碳通量近

乎持平（图 2）。尽管与 Kelemen and Manning (2015) 的结论相近，但他们估计沉积物中的碳是倾冲板块中最主要的成分。100 m 厚的超微化石软泥含有的碳相当于整个洋



壳的含碳量。碳汇量可能取决于方解石补偿深度 (calcite compensation depth, 简称 CCD, 指海洋中方解石生物壳体的沉降速率等于溶解速率时的深度, 通常标志含碳 – 无碳沉积物的分界深度) 和有机碳的补给与埋藏。在 Tonga、Aleutian、Kuriles-Kamchatka 海沟几乎没有沉积碳, 而 Cascadia 和 New Zealand 俯冲带都有大量的沉积碳,

印度 – 亚洲碰撞带则携带大量的有机碳进入海沟。另外, 在白垩纪和古新世 – 始新世暖期, 方解石补偿深度是 3500 m (Pälike et al., 2012), 比现今的 5000 m 深度浅, 并形成碳酸盐洋壳。这些不同俯冲带 / 碰撞带的碳汇量差异性, 是不同俯冲构造环境下多种因素影响的结果。

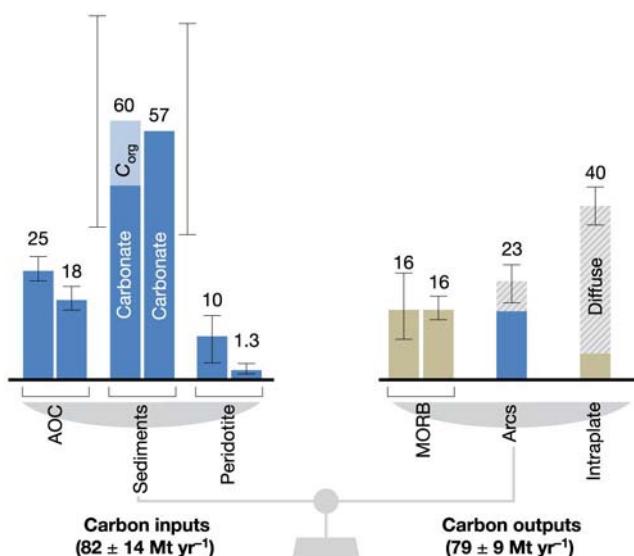


图 2 碳通量平衡：地幔摄取的碳与排出的碳近乎相等 (Plank and Manning, 2019)

俯冲带碳酸盐的物理化学性质是理解碳循环动力学的关键。传统的观点认为只有在板块非常热的情况下, 俯冲板块在弧下深度才能释放碳, 比如 Cascadia 板块。这种观点通常低估了碳循环的效率, 且与俯冲带岛弧岩浆排碳的观测相矛盾。最近的研究发现, 碳 (碳酸盐物质如方解石、文石、白云石、菱镁矿、菱铁矿) 易被流体溶解形成含碳流体、板块顶部的混杂岩形成底辟构造或者板块顶部的脱水熔融 (尤其是沉积物的熔融) 而进入硅酸盐熔体等方式在弧下深度进入上覆地幔楔。这些机制中的一种或更可能的是多种, 因此碳循

环的效率要比传统的观点高很多。变质脱碳过程可能发生于所有俯冲带, 但控制这些脱碳效率的关键则在于板块本身的性质。例如在冷俯冲带 Tonga, 主要俯冲的是碳酸盐蚀变玄武岩, 板块含有少量的碳, 并且脱水作用弱, 使得脱碳效率低; 而与之相对应地, 以碳酸盐沉积物为主的热的 Cascadia 板块的脱碳效率高 (图 3)。

挥发分 (以 C-O-H 为主) 的存在会极大地降低岩石的熔点。在 400 km 深度左右, 碳酸盐蚀变玄武岩的达到发生熔融的温压条件 (Thomson et al., 2016)。但是金伯利岩的橄榄石捕虏体的研究表明: 随着



压力增大，更多的 Fe^{3+} 溶于地幔硅酸盐中，地幔氧逸度也降低 (Frost and McCammon, 2008)。深部还原环境的地幔会将碳还原为石墨、金刚石和碳化物。例如，Rohrbach and Schmidt (2011) 认为在超过 250 km 深度，地幔中 Fe 是饱和的，因此碳会以金刚

石的形式存在，俯冲板块将这些惰性的碳运移到更深的地幔。在转换带深度发生部分熔融的碳酸盐岩熔体像水一样，具有很强的流动性。这些熔体通过高孔隙通道进入周围地幔，可能在岩石圈下方形成含金刚石的金伯利岩 (Sun and Dasgupta, 2019)。

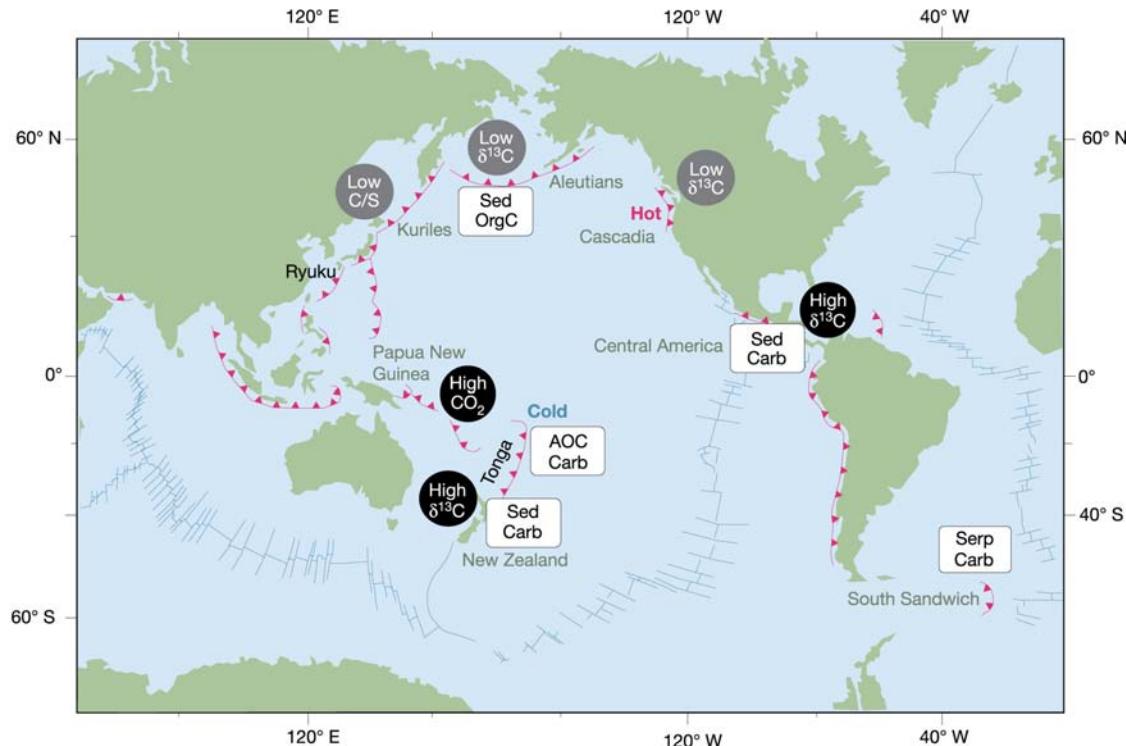


图 3 全球几个俯冲带的碳摄入方式 (Plank and Manning, 2019)

俯冲过程能产生大量的火山作用。CO₂ 通过火山喷出，但目前的技术手段都很难测量原岩中的 CO₂ 含量。大量的碳以碳酸盐溶于熔体中，超过 1 wt% CO₂ 达到了过饱和，因此熔体穿过地壳时可能丢失部分碳，加上大气中的 CO₂ 干扰，使得对原岩中碳含量的估计失准。近来新发展的一种技术是测量 CO₂/S 比值。当岛弧具有高 CO₂/S 比值时，则表明与俯冲的沉积碳相关；反之则没有沉积碳。另一种方法是火山气体中碳同位素比值 $\delta^{13}\text{C}$ (注： $\delta^{13}\text{C}$ 是一个的重 / 轻碳同位素 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) 对比指标，以南卡

罗来纳州 Pee Dee 箭石 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 为 0，表示为相对 Pee Dee 箭石中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的偏差，与俯冲带有机碳的含量呈正相关)。综合 C-S-He 系统计算，Plank and Manning (2019) 认为岩浆原岩中的 CO₂ 达到 1 wt%，这是洋中脊玄武岩的 10 倍。

Plank and Manning (2019) 认为俯冲碳不是一个稳态过程，在不同俯冲带也相差甚远。在这篇综述里，他们提出了 3 个主要观点：(1) 碳俯冲的动力学过程与俯冲带构造背景相关；(2) 碳俯冲的差异性来自于沉积物；(3) 不同碳形式的循环效



率不是单一的。

尽管该文试图定量描述俯冲带碳循环的动力学过程，但我们依然需要清醒地认识到，当前大多研究对俯冲带碳通量的估算过度简化，如果考虑俯冲带的三维结构和非均匀性、考虑碳汇和碳释放通量垂直方向随温压的变化等（图 4），估算的难度将大大增加。Plank and Manning (2019) 指出，由于俯冲带系统的复杂性，导致碳循

环效率存在巨大差异，制约了我们对地质历史气候系统的定量评估，需要迫切开展跨学科的对俯冲碳循环系统中碳汇、运移、释放和深部金刚石的研究，来更好地限定全球环境效应。

可以断定开展俯冲带深部结构 – 成分多学科高分辨率探测、岩石物理实验和地球动力学模拟的综合研究是本领域未来的必然趋势。

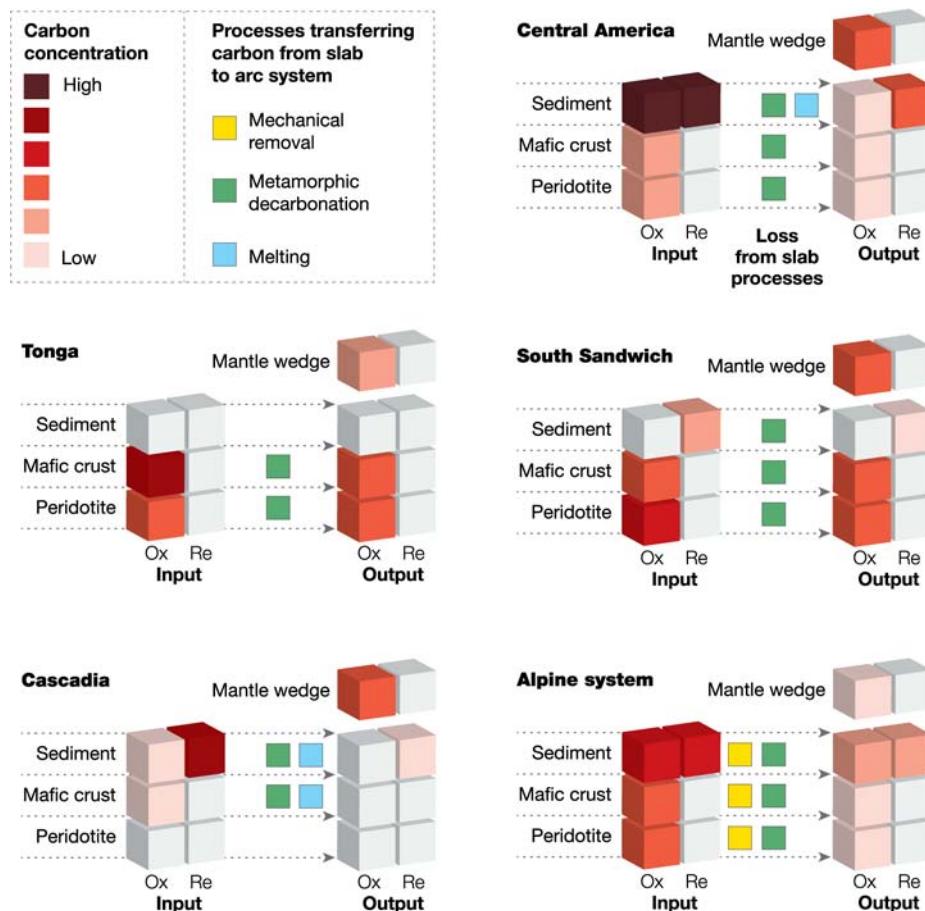


图 4 不同俯冲带碳减少量 (carbon removal) 的估计 (Plank and Manning, 2019)

主要参考文献

Frost D J, McCammon C A. The redox state of Earth's mantle[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2008, 36: 389-420. ([链接](#))



Kelemen P B, Manning C E. Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(30): E3997-E4006.
[\(链接\)](#)

Pälike H, Lyle M W, Nishi H, et al. A Cenozoic record of the equatorial Pacific carbonate compensation depth[J]. *Nature*, 2012, 488(7413): 609-614.
[\(链接\)](#)

Plank T, Manning C E. Subducting carbon[J]. *Nature*, 2019, 574: 343-352.
[\(链接\)](#)

Rohrbach A, Schmidt M W. Redox freezing and melting in the Earth's deep mantle resulting from carbon-iron redox coupling[J]. *Nature*, 2011, 472(7342): 209.
[\(链接\)](#)

Sun C, Dasgupta R. Slab-mantle interaction, carbon transport, and kimberlite generation in the deep upper mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 506: 38-52.
[\(链接\)](#)

Thomson A R, Walter M J, Kohn S C, et al. Slab melting as a barrier to deep carbon subduction[J]. *Nature*, 2016, 529(7584): 76-79.
[\(链接\)](#)

(撰稿：杨建锋，赵亮 / 岩石圈室)



Science Advances : 利用地震追踪俯冲带流体 从源(板片)到汇(地幔楔)的迁移过程

俯冲带是地球系统水循环的关键场所, 水的输入、运移、脱出方式和量级对地球表层环境、深部介质性质和动力过程都具有重要影响, 因此一直是地球科学的研究前沿和热点(相关前沿报道见《马里亚纳俯冲带携水量估计》《西北太平洋地区俯冲板片含水量的控制因素》)。俯冲板块将地表水等流体带入地球深部, 而深部的水又随着岩浆活动回到地表, 在这个循环过程中, 往往伴随有地震发生, 俯冲带因此也是地球上地震活动最频繁的区域。俯冲带地震经常发生在俯冲板片与上覆板块的交界面附近, 在 50–300 km 深度也发育于俯冲板片内部。在这个深度范围, 地震活动与水或流体关系紧密(Green et al., 2010; Shiina et al., 2017), 通过研究这些中源地震, 为认识俯冲带的水循环提供了重要约束。

脱水脆化(dehydration embrittlement)机制是目前俯冲带中源地震成因的主流观点。该观点认为, 在板片俯冲过程中, 洋壳榴辉岩化等变质过程使板片脱水, 这些水通过增大岩石孔隙压力、减小其有效正应力, 从而导致岩石脆性破裂(Kirby et al., 1996)。然而, 在冷俯冲带地区, 俯冲板片变质脱水深度大于 80 km(Abers et al., 2017), 传统的脱水脆化机制难以解释在该深度之上沿弧前板片顶部出现的连续且呈带状分布的中源地震活动。其他假说, 例如自局部化热失控(self-localizing thermal runaway)机制虽可以用来解释岩石在不依

赖流体存在的情况下发生破裂(John et al., 2009), 但其作用的温压范围极为局限, 无法将整个弧前板片环境囊括在内。

那么, 是否可能是在板片发生脱水反应后流体通过某种方式从板片深部迁移到板片浅部, 并弱化了弧前板片, 从而诱发中源地震呢? 近期的地震学研究似乎证实了这种可能性, 科学家在冷俯冲带弧前板片处观测到的间歇性地震与极低波速, 即被视为流体存在的证据(Nakajima and Uchida, 2018; Shiina et al., 2017)。不过还存在问题, 前人地球物理观测与数值模拟研究表明, 在大于 80 km 深度时, 流体离开板片后大都直接垂直向上进入地幔楔, 这些流体是如何从脱水深度处向上倾方向迁移数十千米至弧前板片处的呢?

针对这一问题, 挪威卑尔根大学 Felix Halpaap 及其合作者近期在 *Science Advances* 上发表了他们的研究成果。他们首先基于最新发表的区域三维层析成像波速模型, 利用双差定位法对希腊 Peloponnese 半岛下方 Hellenic 俯冲带地震进行了高精度重定位, 获得了弧前板片处震源的空间精细分布图像(Halpaap et al., 2019; 图 1)。定位结果显示, 弧前板片界面附近 40–80 km 深度范围内, 由下至上存在三个地震簇(subclusters): (1) 位于板内的下部地震簇; (2) 位于板片交界面的中部地震簇; (3) 位于地幔楔内的上部地震簇。同时, 作者通过对比全球其他地幔楔的地震活动分布, 发现



位于地幔楔地震簇上倾方向的俯冲洋壳普遍表现出几乎“无震”的特点（图 2）。

基于以上观测并结合动力学模型估计，作者提出了流体由脱水反应位置向上倾方向迁移的新模式（图 3）：流体离开脱水区后沿着“密封”的板片界面之下向浅部迁移，在板片具有各向异性渗透率或形态发

生变化的局部区域，流体汇聚集中并周期性冲破“密封”环境，沿着破口（vent）逃逸进入地幔楔，诱发地幔楔内地震。同时，该逃逸过程使上倾方向的流体供应减弱，地震活动性降低，形成“无震”区（seismic gap）。这些破口（vent）位置则可能成为破坏性大地震的成核处。

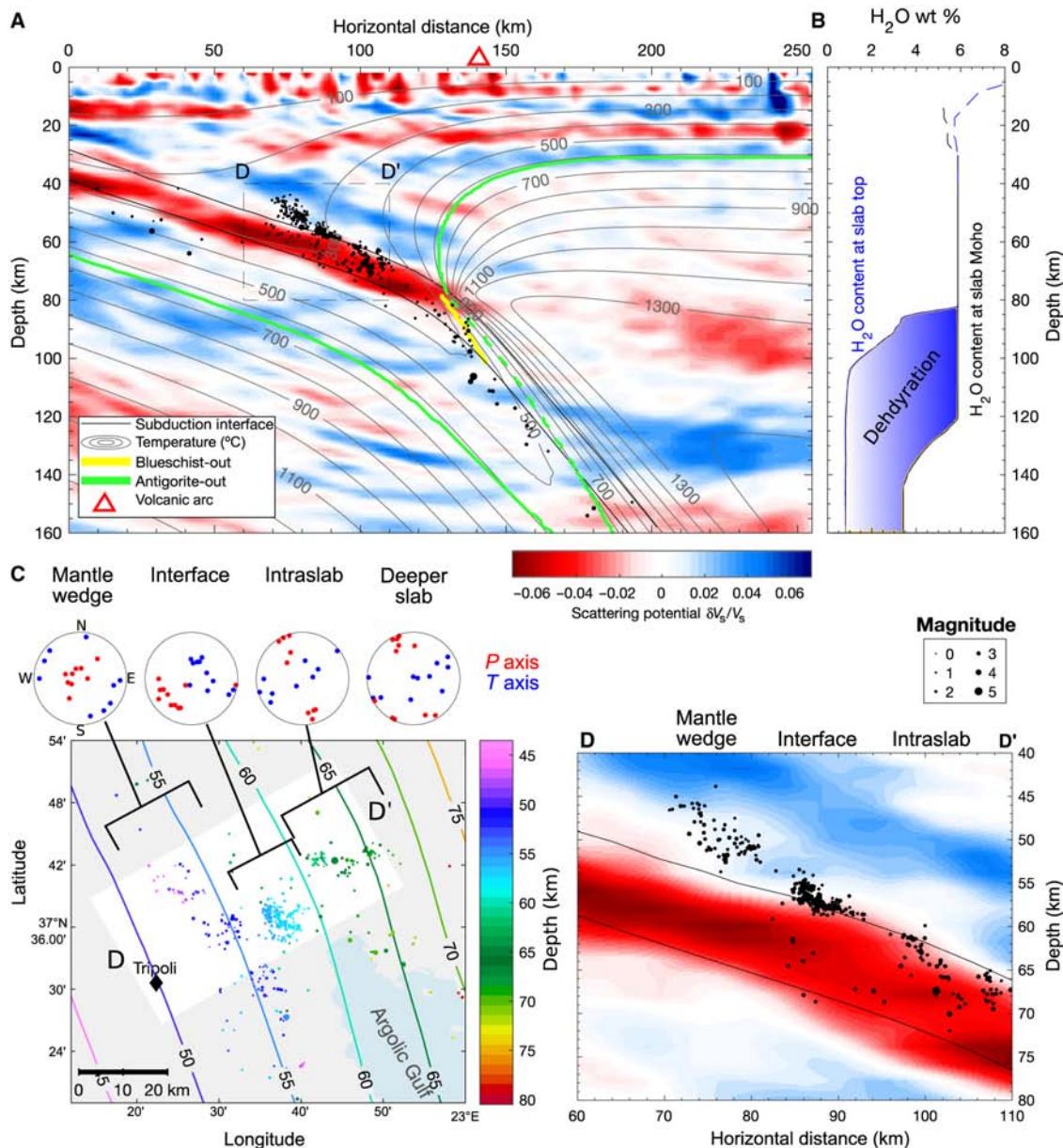


图 1 重定位后的 Hellenic 俯冲带 Tripoli 地区地震分布图像(Halpaap et al., 2019)。a. 地震分布剖面、相应的剪切波 (V_s) 速度扰动、俯冲带热结构（据动力学模型计算），以及主要脱水反应区间；b. 根据热-岩石学模型计算的完全水化 (fully hydrated) 俯冲洋壳顶、底部不同深度处的水含量；c. 地震簇的地表投影及震源机制；d. 地震簇的放大细节，空间定位误差 < 0.25 km

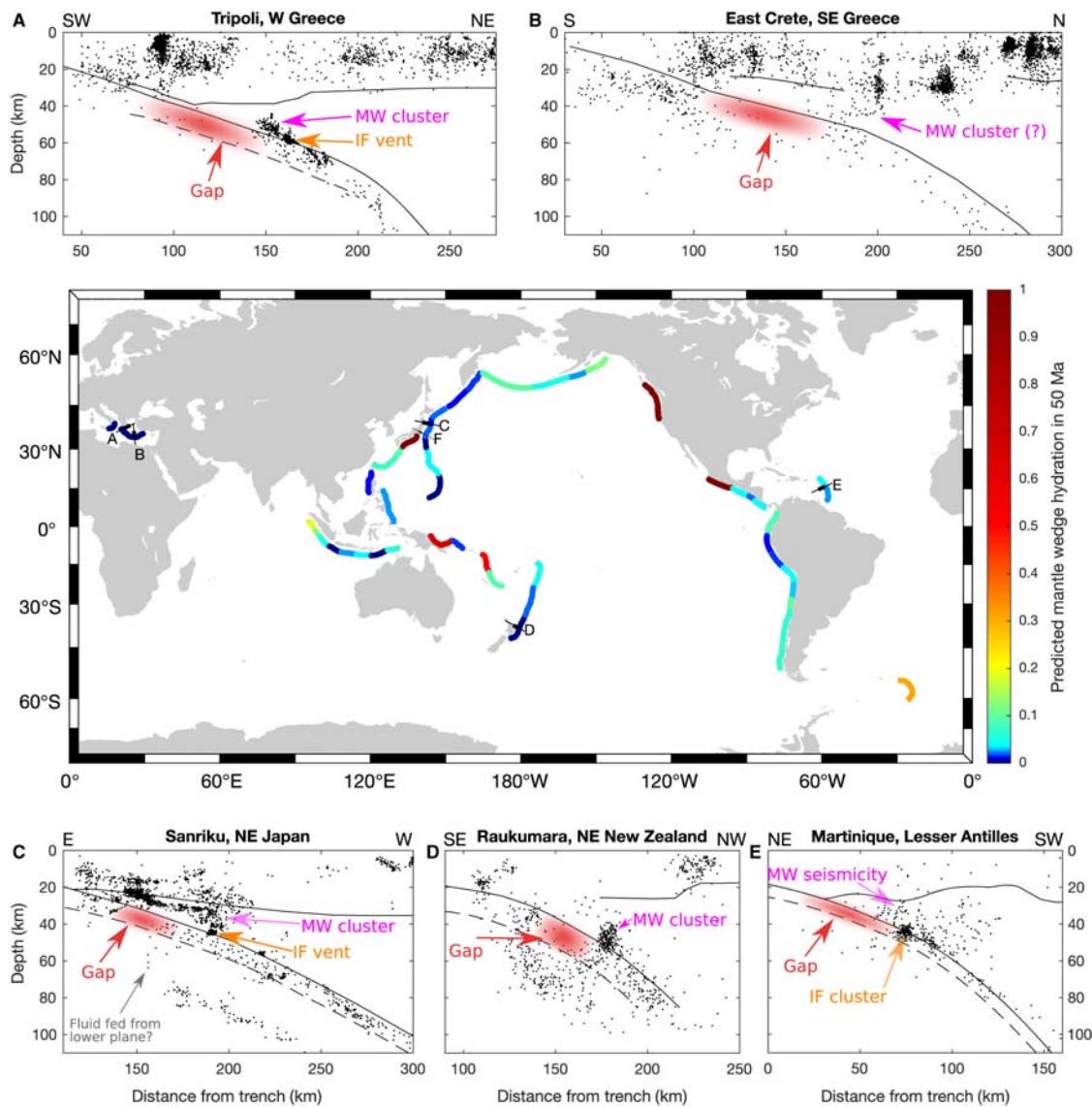


图 2 全球地幔楔地震活动性 (Halpaap et al., 2019)。中图为估算的经过 50 Myrs 板片脱水后的地幔楔水化状态; a-e. 典型地区的地幔楔地震活动分布剖面。IF: 板片界面 (interface); MW: 地幔楔 (mantle wedge)

Halpaap 等通过最新研究提出了冷俯冲带地区板片脱水及其上倾迁移诱发 40–80 km 中源地震的新模式, 获得了对水循环–深部动力过程相互作用模式的新认识。但关于这些流体最终去向的问题目前还没有很好的解答。没有任何证据表明流体抵达了地表, 这说明其必然被上覆地壳和地幔楔所吸收(图 3)。流体进入上覆地壳可能导致

石英沉淀 (quartz precipitation), 从而造成低 V_p/V_s 异常 (Audet and Bürgmann, 2014)。在地幔楔中, 流体则可以通过橄榄岩蛇纹石化被大量吸收, 然而蛇纹石含量过高 (> 10%) 反而不利于岩石的脆性破裂。地震学证据表明, Hellenic 俯冲带板片界面之上蛇纹石化其实是非常有限的。Halpaap 等通过估算认为, 流体并非长时间稳定持续地沿板片



表面破口排出，破口本身以及流体释放过程更可能是瞬时或间歇性特征，因此不会导致上覆地幔楔发生过高程度的蛇纹石化。关于板片表面破口性质和相应的流体释放

过程还需要更进一步深入研究，这将有助于系统认识俯冲带的水循环并提高对这些区域地震灾害的评估能力。

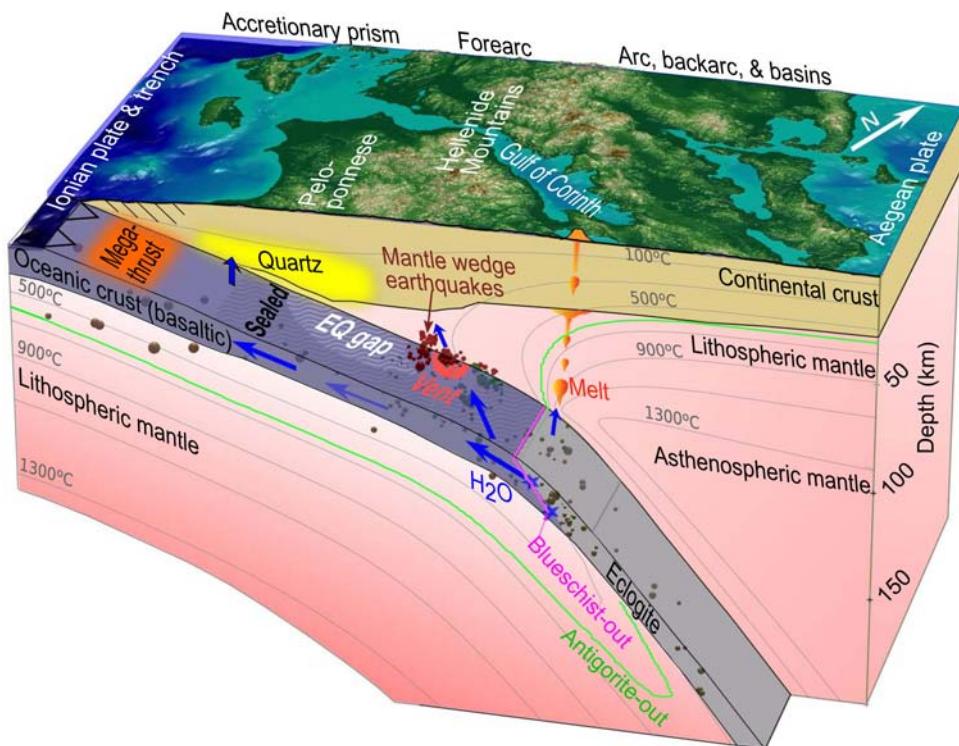


图3 Hellenic 俯冲带流体上倾迁移模式图 (Halpaap et al., 2019)

主要参考文献

- Abers G A, Van Keeken P E, Hacker B R. The cold and relatively dry nature of mantle forearcs in subduction zones[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(5):333-337.([链接](#))
- Audet P, Bürgmann R. Possible control of subduction zone slow-earthquake periodicity by silica enrichment[J]. *Nature*, 2014, 510(7505):389-392.([链接](#))
- Green II H W, Chen W P, Brudzinski M R. Seismic evidence of negligible water carried below 400-km depth in subducting lithosphere[J]. *Nature*, 2010, 467(7317):828-831.([链接](#))
- Halpaap F, Rondenay S, Perrin A, et al. Earthquakes track subduction fluids from slab source to mantle wedge sink[J]. *Science Advances*, 2019, 5(4):eaav7369.([链接](#))
- John T, Medvedev S, Rüpke L H, et al. Generation of intermediate-depth earthquakes by self-localizing thermal runaway[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(2):137-140.([链接](#))
- Kirby S, Engdahl R E, Denlinger R. Intermediate-depth intraslab earthquakes and arc volcanism as physical expressions of crustal and uppermost mantle metamorphism in subducting slabs//Be-



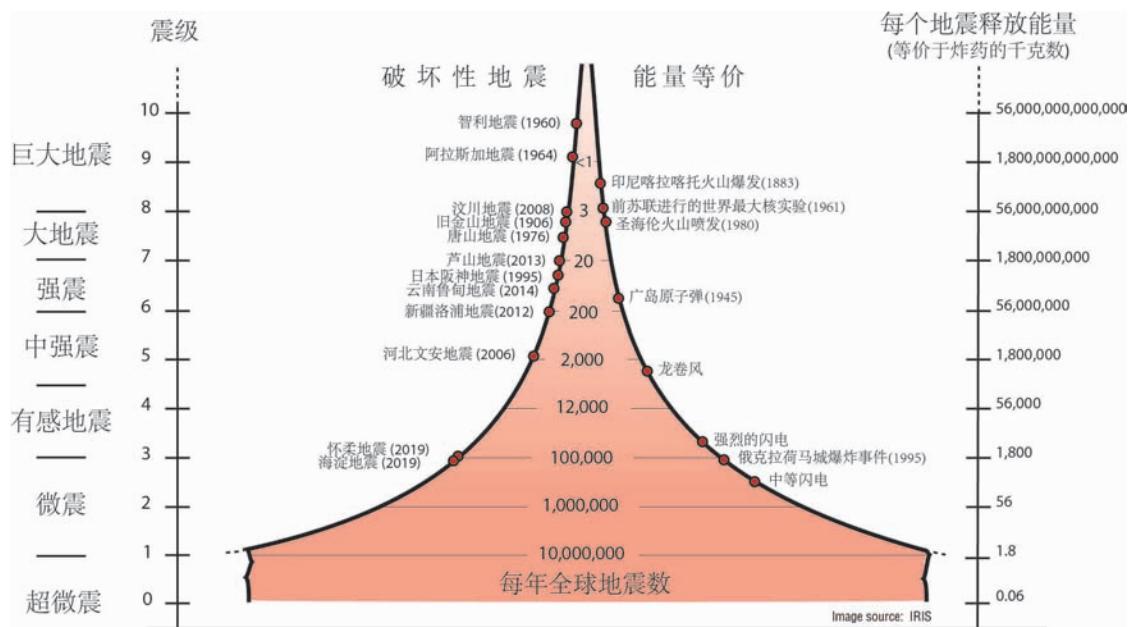
bout G D, Scholl D, Kirby S, et al. Eds. Geophysical Monograph No(96):Subduction from Top to Bottom[M]. American Geophysical Union, 1996:195-214.([链接](#))

Nakajima J, Uchida N. Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(5):351-356.([链接](#))

Shiina T, Nakajima J, Matsuzawa T, et al. Depth variations in seismic velocity in the subducting crust:Evidence for fluid-related embrittlement for intermediate-depth earthquakes: V_p and V_s in the subducting crust[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(2):810-817.([链接](#))

(撰稿：吴子木，陈凌 / 岩石圈室)

3. 地震寻踪





Nature Geoscience : 2018 Mw7.5 级帕卢地震——快速与持续超剪切破裂事件

与先前的超剪切地震不同，2018年 M_w 7.5 帕卢地震快速达到超剪切速度，并以约 4.1 km/s 的速度持续稳定破裂，这可能与震中区的断层特征有关。

地震时断层的破裂速度是研究震源物理和地震灾害的重要参数，通常破裂速度小于剪切波的传播速度 (V_s)，如果破裂速度超过 V_s ，则被称为超剪切破裂。超剪切破裂导致地震波在马赫锥上同时到达，类似于超音速飞行的飞机产生的压力波，因此放大了地震的破坏力，相关研究对地震灾害评估有重要意义。

数值模拟以及大量实验都证实，超剪切破裂地震是存在的，它发生在 II 型破裂上，II 型破裂是指扩展方向与断层滑动方向一致的破裂，目前所有报道的超剪切破裂地震全部为走滑地震，包括 1979 年美国 Imperial Valley M_s 6.9 级地震 (Archuleta, 1984)，1999 年土耳其 Izmit M_w 7.4 级地震和 Düzce M_w 7.2 级地震 (Bouchon et al., 2001)，2001 年中国昆仑山 M_w 7.8 级地震 (Vallée and Dunham, 2012) 等，其数量非常稀少。

2018 年 9 月 28 日，印尼帕卢发生了一次 M_w 7.5 级走滑地震，地震引发的滑坡、液化和海啸造成了非常严重的人员伤亡。帕卢地震是不是超剪切地震，其破裂特征如何？加州大学洛杉矶分校的 Bao et al. (2019) 在 *Nature Geoscience* 上公布了他们的研究成果。澳大利亚台站的反投影结果（图 1c- 图 1e）显示，不同于其他超剪

切破裂事件，这次地震的初始阶段没有长时间的亚剪切破裂，破裂速度快速超越了剪切波速度，且自始自终都是持续的超剪切破裂，平均破裂速度约为 4.1 ± 0.15 km/s，介于 V_s 与 Eshelby 速度 ($\sqrt{2} V_s$ ，称为“亚 Eshelby 速度”）之间，通常认为均匀介质条件下，断层不能以亚 Eshelby 速度持续破裂。

利用瑞利波马赫锥可以确定地震是否存在超剪切。当破裂速度低于瑞利波波速时，断层不同破裂位置的瑞利波到达远场台站的时间不同，但对于超剪切破裂，断层不同破裂位置的瑞利波将同时到达远场台站，使得主震波形与具有类似震源机制的较小地震事件的波形相似，只有振幅存在差异，振幅的比值等于主震与小震地震矩的比值（图 2，图 3）。Vallée and Dunham (2012) 曾在研究 2001 年昆仑山地震中，首次观测到了远场瑞利面波的马赫锥。帕卢地震同样观测到了远场瑞利面波的马赫锥，从而确认超剪切破裂存在。

震源动力学研究通常认为，在均匀介质中，断层不能以亚 Eshelby 速度持续地破裂，但 Huang et al. (2016) 认为存在断层破裂区时，与地震波的相互作用可以使破裂以亚 Eshelby 速度持续稳定地传播，帕卢地震印证了这一观点。同时，帕卢地震的破裂速度之所以能快速达到超剪切速度，意味着较高的初始应力状态，这可能与震中附近断层较为粗糙有关。

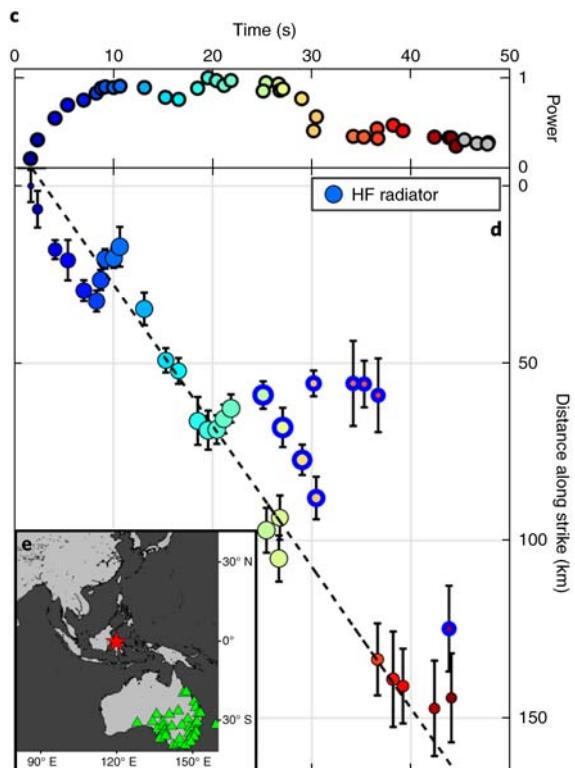


图 1 帕卢地震的地表破裂轨迹和超剪切破裂速度。(c) Beam Power 随时间的变化。(d) 反投影获得的能量源沿走向的时间与位置。时间表示相对于起始破裂的时间，距离是相对于震中的水平位置沿走向 (174°) 的投影。(e) 所用到的澳大利亚台站分布

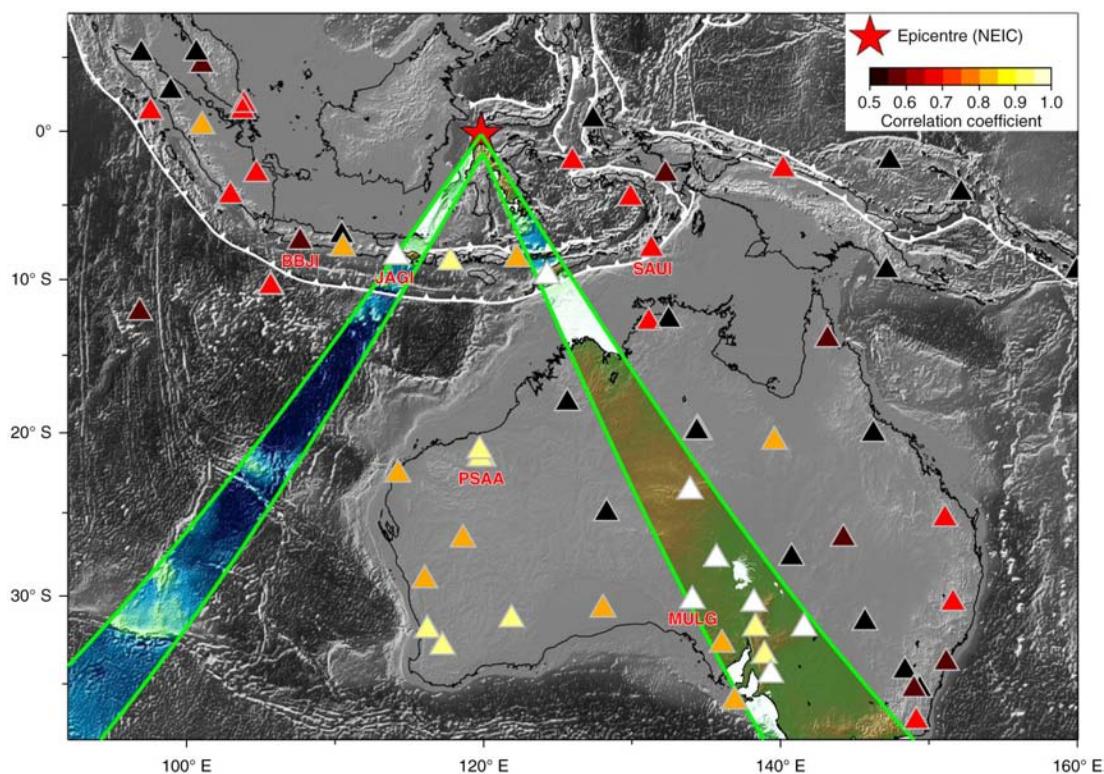


图 2 远场瑞利波马赫锥的证据。绿线内的彩色区域是马赫锥，马赫锥根据观测的破裂速度 (4.1 km/s)，并考虑到瑞利波相速度的不确定性，以最大可能的马赫角扫描获得

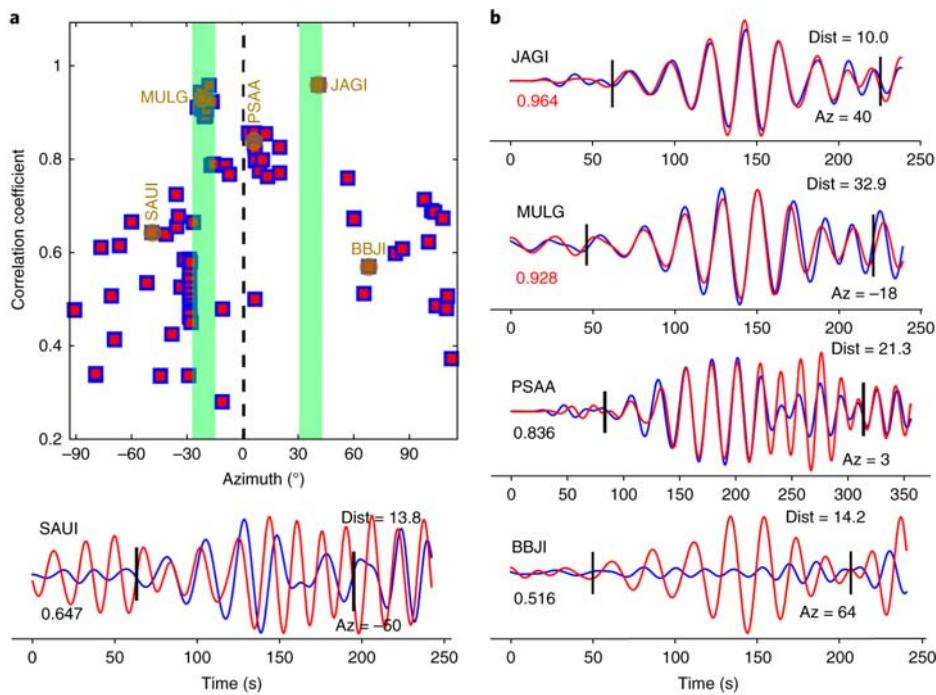


图3 瑞利马赫波的证据。(a) 主震 15-25 s 瑞利波与其 $M = 6.1$ 前震波形的相关系数随相对于破裂走向的方位角变化图，两个绿色条带表示估计的马赫锥方位角的可能范围。(b) 15-25 s 周期的主要 (蓝色) 和前震 (红色) 的瑞利波垂直位移记录。前震信号通过主震 / 前震地震矩比 (大小为 125) 进行缩放

破裂速度与地震灾害严重程度直接相关，提前建立地震破裂速度与断层结构性质之间的关系，对于预测地震的影响非常

重要。为什么只有部分走滑地震是超剪切地震，控制超剪切破裂的断层有什么特性？这些问题还有待深入研究。

主要参考文献

- Archuleta R J. A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4559-4585. ([链接](#))
- Bao H, Ampuero J P, Meng L, et al. Early and persistent supershear rupture of the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 200-205. ([链接](#))
- Bouchon M, Bouin M P, Karabulut H, et al. How fast is rupture during an earthquake? New insights from the 1999 Turkey earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(14): 2723-2726. ([链接](#))
- Huang Y, Ampuero J P, Helmberger D V. The potential for supershear earthquakes in damaged fault zones-theory and observations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 433: 109-115. ([链接](#))
- Rosakis A J, Samudrala O, Coker D. Cracks faster than the shear wave speed[J]. *Science*, 1999, 284(5418): 1337-1340. ([链接](#))
- Vallée M, Dunham E M. Observation of far-field Mach waves generated by the 2001 Kokoxili supershear earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(5). ([链接](#))

(撰稿：郝金来 / 地星室)



Nature : 大地震与小震破裂起始阶段存在相似性的多次观测证据

型地震通常始于几乎一个点的微小岩石破裂，随后是复杂断层系统的连续滑移，延伸数百公里的巨大破裂区域向外辐射巨大能量，引发强烈震动。大地震破裂扩展过程是否可预测？大地震是否产生了与小地震不同的可观测特征？地震最终震级是否与破裂起始有关？此类问题是关乎地震预测与预警的基础性问题。

不同学者对此持有的观点并不一致。

部分学者研究认为，地震最终震级与破裂起始前百分之几秒或更长的时间无关（Mori and Kanamori, 1996），但这类分析仅限于少数地震样本。另有研究表明，地震最终规模与破裂起始可能有关（Olson and Allen, 2005），但他们并未准确考虑地震波穿过地球时的能量损失。

近期，日本东京大学地球与行星科学系 Satoshi Ide 在 *Nature* 上发表题为“大地

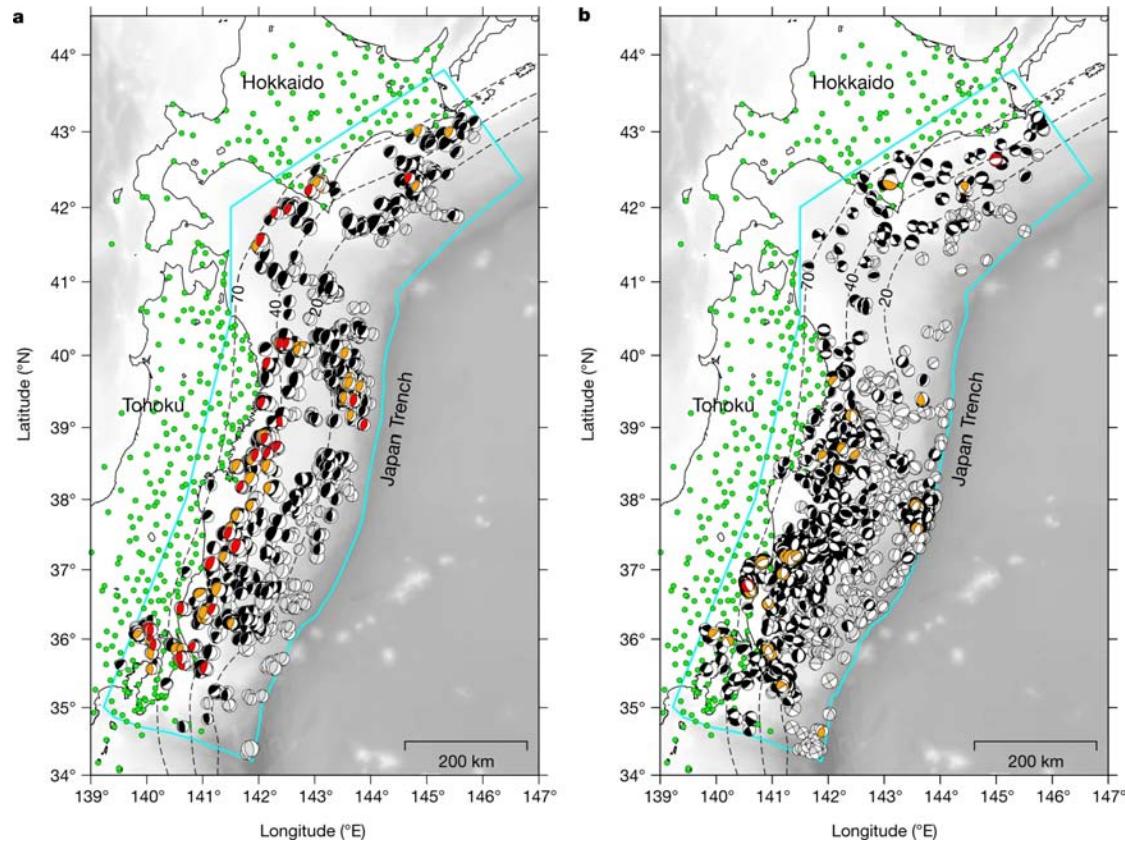


图1 研究区大地震 ($M_w > 4.5$) 震源机制分布。(a) 俯冲型地震；(b) 其它型地震。研究覆盖区和地震台站分别用蓝绿线和绿色圆圈表示。震源球颜色根据相关系数 (CC_{max}) 大小表示, $CC_{max} > 0.9$ (红色), $0.8 < CC_{max} < 0.9$ (橙色), $CC_{max} < 0.8$ (黑色), 波形互相关计算中没有足够数量台站的事件 (灰色) (Ide, 2019)



震与小震破裂起始阶段存在相似性的多次观测证据”的文章 (Ide, 2019)。作者系统比较了位置相近但震级不同地震的波形记录，通过改进的波形互相关技术分析地震破裂起始波形相似性，从而去回答地震最终震级是否与破裂起始有关等有关问题。

作者选取日本海沟附近 2002 年 6 月至 2018 年 4 月期间 2518 个大地震 (矩震级 $M_w > 4.5$)。将它们分类为俯冲型和其他型地震 (见图 1)，分别同位置相近小震

($M_w < 4.0$) 进行比较，通过计算大地震和小震垂直向波形信号前 0.2 秒的相关系数 (CC_{max})，确定两者间的相似度，最终发现了 80 个异常相似和 390 个非常相似的地震对 (见图 2)。这些地震对位置间距非常小，在大约 100 米范围内。据此，作者认为在研究区内这些大地震和小震破裂起始至少在观测数据使用频段范围内是相似的，并推断地震最终震级与其破裂起始并不相关。

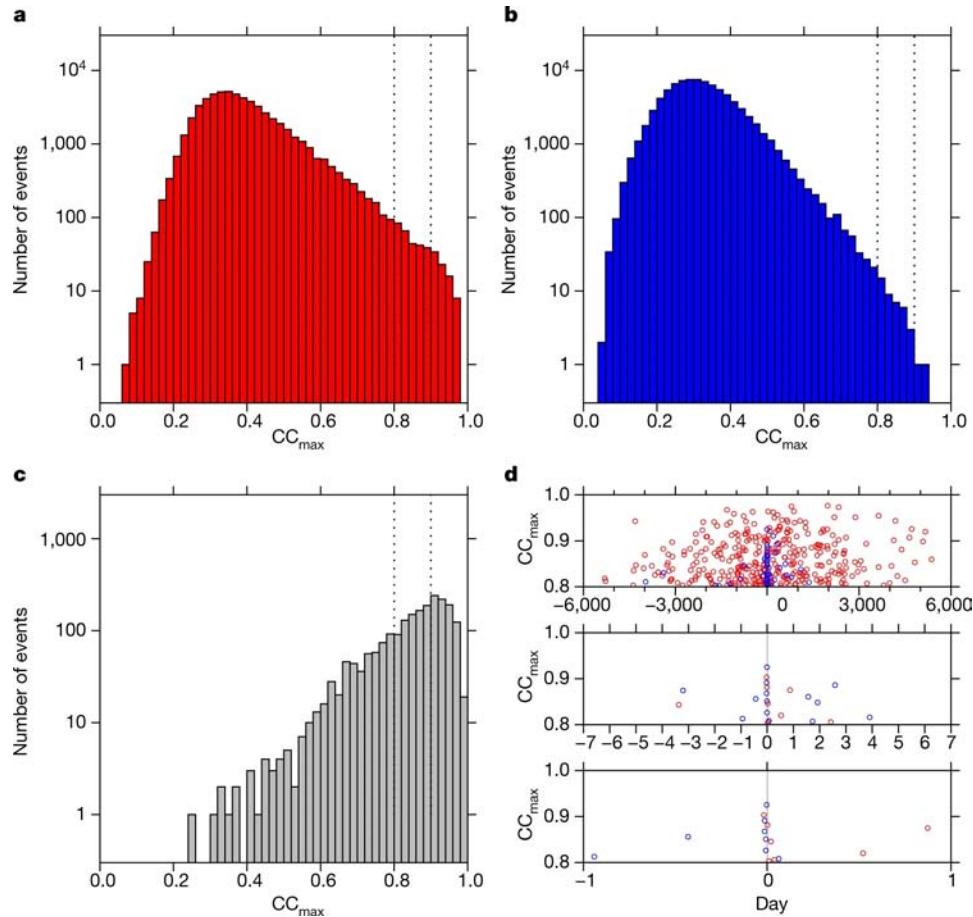


图 2 不同类型事件对相关系数 CC_{max} 直方图。(a) 俯冲型地震，图中虚线分别表示， $CC_{max} = 0.8$ 和 $CC_{max} = 0.9$ ；(b) 其它型地震；(c) 重复型地震；(d) 三种不同的地震对时间间隔：整个周期（上），1 周（中），1 天（下）(Ide, 2019)

另外，作者还发现：相比于其它型地震，俯冲型地震更容易匹配组合成相似地震对，而且相似度更高。推断其原因，可

能是因为其它型地震空间位置分散且震源机制多样。组成相似地震对的部分俯冲型大地震和小震时间间隔超过 10 年，可能与



所处断层加载条件和发育程度有关。他们的研究结果有助于进一步认识地震破裂起

始过程，并有可能改进地震预警的时间和精度（Abercrombie, 2019）。

主要参考文献

- Mori J, Kanamori H. Initial rupture of earthquakes in the 1995 Ridgecrest, California sequence[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(18): 2437-2440. ([链接](#))
- Olson E L, Allen R M. The deterministic nature of earthquake rupture[J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 212-215. ([链接](#))
- Ide S. Frequent observations of identical onsets of large and small earthquakes[J]. *Nature*, 2019, 573: 112-116. ([链接](#))
- Abercrombie R E. Small and large earthquakes can have similar starts[J]. *Nature*, 2019, 573: 42-43. ([链接](#))

(撰稿：赵旭 / 地星室)



Geology : 地震波衰减性改变——气体驱动型火山喷发的前兆

气体驱动型火山虽然不及岩浆喷发型火山引人关注，但是它活动时产生的岩石碎块、火山气体和水汽具有很强的破坏力，近年来全球发生的几次灾难性气体驱动型火山爆发事件，就凸显了人们目前对这类火山喷发所做的监测预警工作的不足，例如 2014 年日本的 Ontake 火山因为仅仅在喷发前约 10 分钟才被监测到有活动迹象，结果造成了日本自 1926 年 Tokachidake 火山喷发以来最大的人员伤亡 (Yamaoka et al., 2016)。对这类火山喷发预测一直是火山学和灾害评估研究中最具挑战的课题之一。

区域应力变化是火山活动性的关键指

标，传统火山监测主要是基于火山口附近的地震数据，分析地震波衰减情况来进一步获得应力变化 (Fehler et al., 1988)，但这种方法的不足之处是气体驱动型火山喷发前产生的地震数量往往很有限，因此缺乏足够的数据源开展这样的分析工作。以法国格勒诺布尔 - 阿尔卑斯大学 Corentin Caudron 教授为首的国际研究团队在 *Geology* 期刊上发文，报道了两个频带地震波位移记录振幅比值 (DSAR, Displacement Seismic Amplitude Ratio) 与气体驱动型火山的活动性存在很强的相关性：气体驱动型火山的喷发时刻恰好对应 DSAR 曲线在长时间（数月至数年）持续升高之后的峰值。

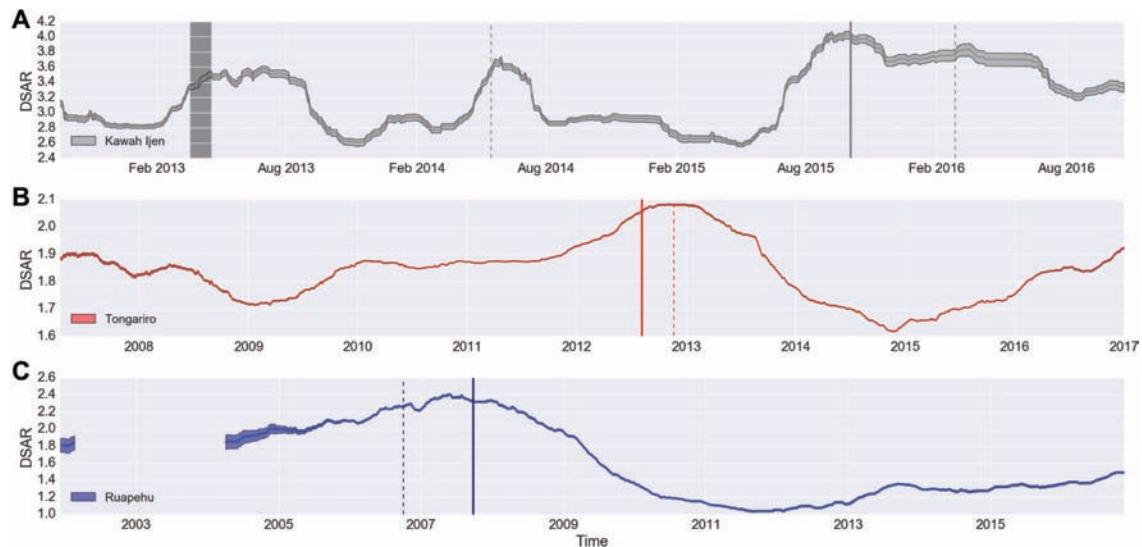


图 1 三座气体驱动型火山 DSAR 值随时间的变化情况。从 A 到 C 依次是印尼的 Kawah Ijen 火山、新西兰的 Tongariro 火山和 Ruapehu 火山。竖实线和虚线分别对应大规模和小规模的火山喷发，灰色矩形框表示持续喷发时间超过一天的火山事件。对于新西兰的 Tongariro 火山和 Ruapehu 火山选取两年的窗长计算滑动中值，对于印尼的 Kawah Ijen 火山选取 90 天的窗长计算滑动中值。DSAR 曲线的宽度（阴影区域）反映了 DSAR 值的计算误差，宽度越大说明误差越大，宽度越小说明误差越小，阴影区域对应了 bootstrap 统计方法得到的 95% 置信区间范围 (Caudron et al., 2019)



DSAR 是一种常规的数据处理方式，本文的创新点在于为了消除海洋噪声源的影响，作者首先将每天的垂向地震波位移记录去线性趋势并进行高通滤波 (> 0.5 Hz)；然后在低频段 (4.5 ~ 8 Hz) 和高频段 (8 ~ 16 Hz) 分别对波形进行带通滤波并将每天的连续波形截取成 10 分钟的片段；接着计算两个频带内的绝对振幅比（单频段无法有效反映地下介质衰减性的微弱变化，由于两个频段对衰减性敏感度不一样，故采取振幅比法可以放大微弱变化），选取中值 (median) 作为一天的最终结果，而不确定度则是通过对 1000 个样本进行 bootstrap 统计分析计算 95% 的置信区间而获得。

作者发现，DSAR 值变化与其他物理观测量，如区域地震 / 地震群活动、火山构造地震、海浪、潮汐、大气压力、降雨量以及应变等没有明显的关系，他们认为 DSAR 值的变化主要受到火山活动的控制。如图 2 所示，作者将气体驱动型火山喷发前 DSAR 值的增大主要归因于火山口下方岩体介质孔隙压力的增大，认为这也是浅层地壳地震波衰减机制的主导因素。同时，作者通过理论正演发现，对于固定的震源 - 台站间距而言，只有当品质因子 Q_f (描述地震波衰减性的无量纲物理量) 的值小于某一阈值时，随着 Q_f 的减小，DSAR 的值才会明显增大 (图 2C)。

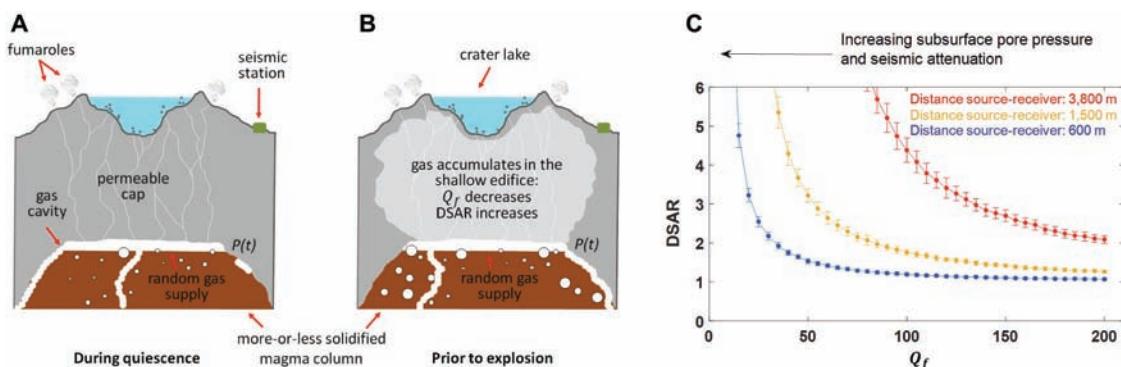


图 2 DSAR 值变化的物理模型解释。(A) 气体驱动型火山平静期对应的物理模型卡通示意图；(B) 气体驱动型火山即将喷发前的物理模型卡通示意图，主要特征是火山喷发前浅部位置的气体大量聚集，导致岩体孔隙压力增大和地震波衰减性增强（品质因子 Q_f 值降低）；(C) 在不同震源 - 台站间距的情况下，DSAR 的值随品质因子 Q_f 的变化情况，主要特征是对于固定的震源 - 台站间距，只有当品质因子 Q_f 的值小于某一阈值时，随着 Q_f 的减小，DSAR 的值才会明显增大 (Caudron et al., 2019)

通过对距离火山口不同位置台站的 DSAR 值曲线进行对比 (图 3)，作者发现

越靠近火山口的地震台站计算得到的 DSAR 值随时间变化的特征愈明显。

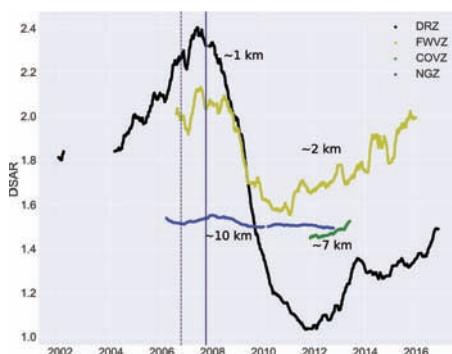


图 3 新西兰 Ruapehu 火山不同震源 - 台站间距情况下 DSAR 值随时间的变化。图中 DRZ 台站 (黑色曲线) 坐落于火山口正上方；FWVZ 台站 (黄色曲线)、COVZ 台站 (绿色曲线) 和 NGZ 台站 (蓝色曲线) 台站距离火山口分别大约是 2 km、7 km 和 10 km；竖实线和虚线分别对应大规模和小规模的火山喷发事件 (Caudron et al., 2019)



DSAR 方法并不能用来预测精确到“天”量级的火山喷发，但是它长时间尺度的变化趋势却可以反映一座火山是否处于活跃的状态，同时该方法对火山活跃周期

中的起始和终止时间进行了很好的约束，因此能够为火山监测机构的预警工作提供重要的科学依据和参考。

主要参考文献

- Caudron C, Girona T, Taisne B, et al. Change in seismic attenuation as a long-term precursor of gas-driven eruptions[J]. *Geology*, 2019.([链接](#))
- Caudron C, Syahbana D K, Lecocq T, et al. Kawah Ijen volcanic activity: a review[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2015, 77(3): 16.([链接](#))
- Fehler M, Roberts P, Fairbanks T. A temporal change in coda wave attenuation observed during an eruption of Mount St. Helens[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1988, 93(B5): 4367-4373.([链接](#))
- Kilgour G, Manville V, Della Pasqua F, et al. The 25 September 2007 eruption of Mount Ruapehu, New Zealand: directed ballistics, surtseyan jets, and ice-slurry lahars[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2010, 191(1-2): 1-14.([链接](#))
- Yamaoka K, Geshi N, Hashimoto T, et al. Special issue “The phreatic eruption of Mt. Ontake volcano in 2014” [J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(1): 175.([链接](#))

(撰稿：范兴利 / 地星室，马琳 / 新生代室)



Nature Geoscience : 通过机器学习用地震波形 记录监测俯冲带断层活动

俯冲带按照断层的活动方式可划分为以常规地震为主要活动方式的孕震区和以慢滑移（slow slip）为主要活动方式的区域。研究人员发现在俯冲带浅层地壳地区发生破坏性大地震之前有时会发生慢滑移事件，因此对慢滑移事件的研究有可能有助于预测俯冲带未来可能发生的大地震（Araki et al., 2017；Wallace et al., 2016）。虽然研究人员能较清晰地刻画常规地震的破裂过程，但是对于慢滑移及其伴生震颤（tremor）的物理性质还知之甚少。Gao and Wang (2017) 利用数值模拟探讨了板块边界带断层流变特征与慢滑移之间的联系，他们认为可能是地幔楔角（断层面与大陆莫霍面交界）附近高压流体的存在导致了板块交界处的震颤和慢滑移事件。

在卡斯凯迪亚（Cascadia）俯冲带，慢滑移位于孕震区下方（图 1）。在该区域的慢滑移研究中存在着一个困扰研究人员的问题：根据地震学计算得到的慢滑移位移及累积震颤的能量比用 GPS 数据推算的能量相差几个数量级，这表明在慢滑移过程中可能存在未发现并释放了大量能量的活动。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 Rouet-Leduc et al. (2019) 近期在 *Nature Geoscience* 上发表了最新研究成果，他们利用机器学习方法发现在慢滑移事件周期中一直存在着类震颤（tremor-like）信号，这一信号可以解释之前计算中大部分的能量差异。

该团队此前发现实验室条件下的断层

活动会产生连续的弱信号（Rouet-Leduc et al., 2017），并在之后的研究中利用该信号的统计特征完成了实验室条件下断层活动的预测（Rouet-Leduc et al., 2018）。该团队认为实际记录中的类震颤信号与实验室观测到的弱信号产生机制可能相似，并利用随机森林算法从地震台站记录的类震颤信号中估算出了卡斯凯迪亚俯冲带区域的对应的 GPS 台站位移速率数据（图 2），实现了利用地震数据对该区域大断层活动的间接实时监测。该研究表明类震颤信号数年来一直存在于该区域，可以精确指示慢滑移的位移速率，有助于研究慢滑移事件和实时监测断层的物理状态，为研究慢滑移与大地震之间的作用关系提供新的视角。

该研究使用随机森林（random forest）算法，以弱信号一段时间内的统计特征作为输入，进行对应 GPS 信号的估算。随机森林是一种经典的机器学习算法，它由多个回归树组成，可以避免决策树方法容易发生过拟合的问题。虽然与深度学习等方法表现性能差，但其可解释性强，有助于分析不同统计特征的重要性及它们代表的物理意义。作者使用的地震数据统计特征包括（以天统计）：地震记录的动态范围（最大值减最小值）、均方根（root mean square）、第二、三、四阶非中心矩（n 阶非中心矩的密度方程为 $\int (t)^n f(t) dt$ ）、第二、三、四阶中心矩（n 阶中心矩的密度方程为 $\int (t-\mu)^n f(t) dt$ ，其中 μ 为平均值）、1%



与 99%，5% 与 95%，10% 与 90%，25% 与 75%，40% 与 60% 的分位距以及自定义的特征。自定义的特征是指前面十三个特征各自在每个二分之时窗内的平滑值减去

第一个二分之时窗的值。这些统计特征的选取参照了先前实验室断层活动的研究中使用的特征。

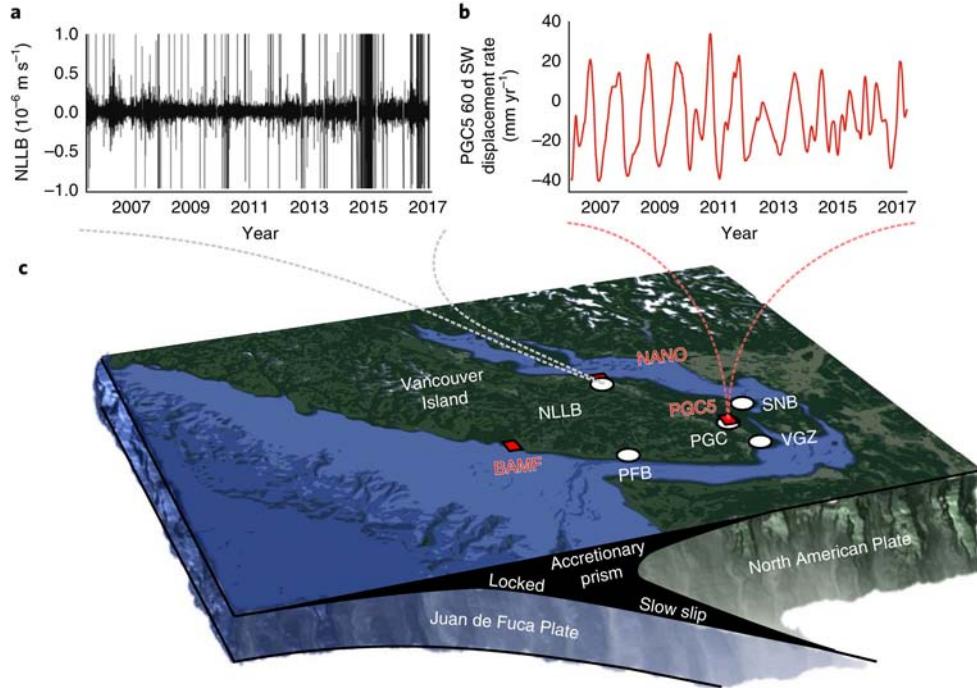


图 1 研究区域示意图

图 a 为地震台站连续波形记录；图 b 为 GPS 台站观测记录，作者通过从地震信号中估算出 GPS 信号，建立了地震信号与断层位移速率的联系；图 c 为研究区域概况三维图示（Rouet-Leduc et al., 2019）

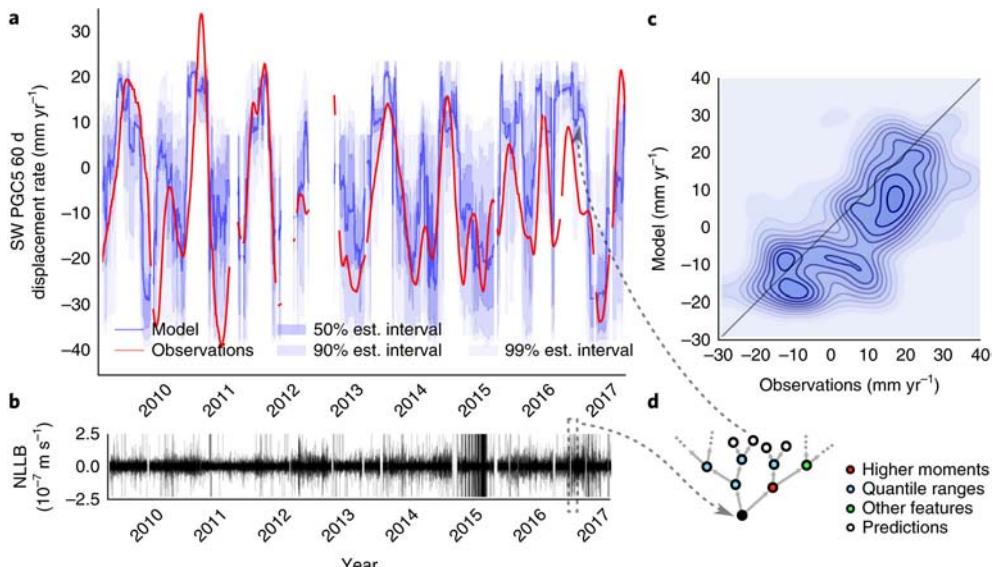


图 2 从地震信号估算 GPS 信号的图示

图 a 中红色线为实际的（经过平滑处理的）GPS 数据，蓝色线为随机森林方法给出的回归值，蓝色阴影为预测给出的区间；图 b 为对应的 NLLB 台站的连续波形记录；图 c 为预测值与实际值的分布，其皮尔森相关系数（Pearson correlation coefficient）为 0.66，说明波形记录中包含了大量的位移速率信息；图 d 为随机森林的示意图（Rouet-Leduc et al., 2019）



该研究从地震波形连续记录中发现了一直存在于慢滑移周期中的类震颤信号，并从该信号中估算出了俯冲带区域断层位移速率信息，实现了对慢滑移活动状态的实时监测，为断层物理状态的研究提供了新的方向。相比 GPS 台网，地震台站可以相对容易布设在水下来监测俯冲带区域的断层活动。通过对该类震颤信号做进一步的分析和研究，有助于评估和预防卡斯凯迪亚俯冲带区域的未来大地震灾害。此外，该团队发现俯冲带区域慢滑移产生的类震颤信号与之前在实验室断层观测到的信号相近，表明实验室岩石破裂实验中得出的结论可能适用于实际的地球内部断层活动。

过程。因此，可以利用机器学习去分析岩石破裂的实验室大量观测数据并提取可用的地震前兆信息，例如先前该团队利用机器学习方法来预测实验室条件下的地震发生 (Rouet-Leduc et al., 2017)，以及该团队在 *Nature Geoscience* 上同期发表的利用机器学习分析和提取实验室条件下常规地震和慢地震发生前的相似信号特征 (Hulbert et al., 2019)，为大地震的研究及预测提供了新思路和新方法。

致谢：感谢岩石圈室陈凌研究员、赵亮研究员的修改建议。

主要参考文献

- Araki E, Saffer D M, Kopf A J, et al. Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1157-1160.([链接](#))
- Gao X, Wang K. Rheological separation of the megathrust seismogenic zone and episodic tremor and slip[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 416.([链接](#))
- Hulbert C, Rouet-Leduc B, Johnson P A, et al. Similarity of fast and slow earthquakes illuminated by machine learning[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 69-74.([链接](#))
- Rouet-Leduc B, Hulbert C, Johnson P A. Continuous chatter of the Cascadia subduction zone revealed by machine learning[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 75-79.([链接](#))
- Rouet-Leduc B, Hulbert C, Bolton D C, et al. Estimating fault friction from seismic signals in the laboratory[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(3): 1321-1329.([链接](#))
- Rouet-Leduc B, Hulbert C, Lubbers N, et al. Machine learning predicts laboratory earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(18): 9276-9282.([链接](#))
- Wallace L M, Webb S C, Ito Y, et al. Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand[J]. *Science*, 2016, 352(6286): 701-704.([链接](#))

(撰稿：肖卓伟，王建 / 地星室)



Science : 寻找隐藏的微地震——应用模板匹配技术建立更完整的地震目录

通 过模板匹配技术获得的地震数量通常能达到模板地震数量十倍以上，其丰富的时空分布特征，可以直接反映断层的深部结构及物理性质、触发地震的不同机制及地震的破裂过程等地震发育的重要问题。

要研究某一地区的地震发生规律，需要该地区的完整地震目录，尤其是小于一级以下的微地震目录。因为微地震时空分

布特征能直接反映发震断层深部几何形态、前震和震群发生过程、地震触发机制和成核过程等地震发育关键问题。经过多年观测，地震学家发现地震活动存在一个重要统计特征：地震的震级降低一级，它的发生频度会增加约十倍，这个震级 - 发生频度的幂次经验规律称为古登堡 - 里克特定律（Gutenberg-Richter Law）（图 1）。

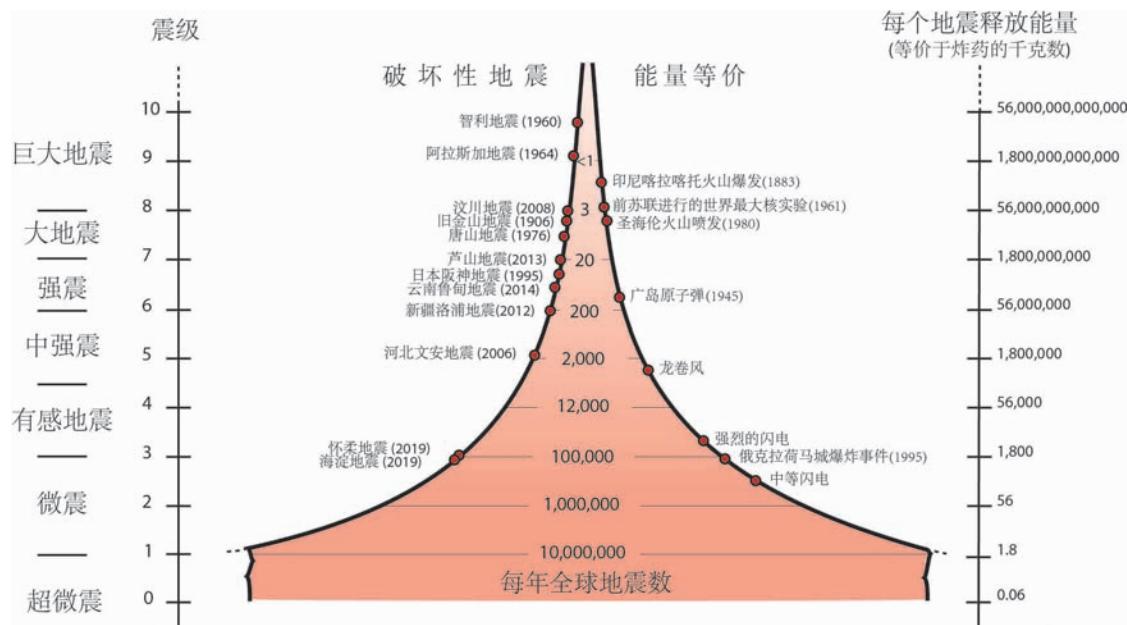


图 1 地震震级、地震发生频度及能量释放关系图（修改自 IRIS）

震级大的地震，产生的地震波能量强，在地震台站记录的信号清晰，研究人员容易识别和定位。而震级小的微震和超微震（以下简称微地震），产生的地震波能量弱，在地震波记录上经常被噪声掩盖，较难被

辨认。完备震级 (M_c) 可以用来表示一个地震目录的完整程度，它是指在某一地区，该震级以上的所有地震都被地震台完整记录并列入地震目录；完备震级越低，缺失的微地震越少，地震目录越完整。常



规处理获得的地震目录，完备震级一般比较大，会缺失大量微地震。比如，北京周边首都圈台网的密集台网，常规监测能力 Mc 约为 1.0，即 1.0 级以上地震基本不存在漏报。要获得更完整可靠的地震目录，只能通过两种途径：(1) 增加台站密度以提高地震台网对微地震的监测能力；(2) 提高微地震弱信号的检测水平。

在某一地区台站分布确定情况下，将已知地震波形做为模板，同连续数据进行互相关是一种检测微地震的有效方法，这种方法被称为模板匹配 (template matching)、匹配滤波 (matched filter)、或者匹配信号探测 (matched signal detector) 技术 (Gibbons and Ringdal, 2006)。模板匹配技术因为其对弱信号的优秀检测能力，最近被广泛应用于慢地震识别（如 Shelly et al., 2007）、动态触发地震识别（如 Han et al., 2017）及余震和前震识别（如 Peng and Zhao, 2009；Wu et al., 2017）等诸多地震学研究。将双差定位同模板匹配结合起来，可以同时获得所检测地震的震源位置参数 (Zhang et al., 2015)。但是，模板匹配技术存在一些缺陷：(1) 仅能同震源距离几百米内地震建立较好的互相关，因为不同地震的震源位置距离增大后，波形相似度会降低；(2) 要求检测到的地震间保持一定的时间间隔（如 2 秒），以降低不同模板事件被重复检测的可能性。针对低信噪比的地震波形，同时考察整个台网多个台站不同分量连续波形同模板地震波的平均相关系数，可以显著提高地震信号探测能力，检测到的地震数量通常能达到模板地震数量十倍以上 (Peng and Zhao, 2009)。但是互相关运算量与所使用的模板数量、模板

波形长度、待检索的连续地震波形数量为平方关系，增加模板数量、模板长度、台站数量、连续记录时长，都会显著增加计算量。随着高性能图形处理芯片 (GPU) 的成熟应用，计算能力相比使用中央处理器 (CPU) 提高了几十到几百倍，针对数百个台站的大规模台阵几十年连续波形进行海量模板地震匹配运算成为可能。

在最近出版的 *Science* 杂志上，刊载了在美国加州南部开展模板匹配识别微地震的最新成果 (Ross et al., 2019)。这项研究应用 2000–2017 年发生的 284, 000 个地震（其中 2008–2017 年共约 180, 000 个地震）做为模板，使用 200 块英伟达 P100 GPU 对南加州地震台网 400 多个宽频带地震台 2008–2017 年十年的连续波形进行了模板匹配运算，共检测出约 1, 810, 000 个地震，平均每天约 495 个地震，将常规目录的完备震级 Mc 从 1.7 级降低到了模板匹配目录的 Mc 0.3 级（图 2）。通过分析重定位后的地震模板匹配目录，有多项观测被确认：微地震空间分布将断层区内部结构勾勒得更清晰；发现了某些地震的前震序列，显示震群起始时间相比从南加州台网常规目录分析的时间早，发展过程也更连续平缓；此外在 2010 年墨西哥北部一个 7.2 级地震激发的地震波也引起南加州广泛的动态地震触发现象（图 3）。

我所岩石圈演化国家重点实验室吴晶副研究员利用模板匹配技术检测 2013 年在四川发生的 6.7 级芦山地震的余震时空分布特征 (Wu et al., 2017)，发现在震后一小时内余震仍围绕主震破裂发生，之后就开始扩散到更大区域，因此猜想早期余震可能主要由震后余滑控制；也有多位国内



同行将该技术应用到动态触发地震的研究中（如 Wang et al., 2015; Han et al., 2017; Li et al., 2019），发现全球大地震后在我国多地存在动态应力触发现象。模板匹配获得

的新目录中会增加大量微地震，其丰富的时空分布特征，直接反映了断层的深部结构及物理性质、触发地震的不同机制及地震的破裂过程等地震发育的重要问题。

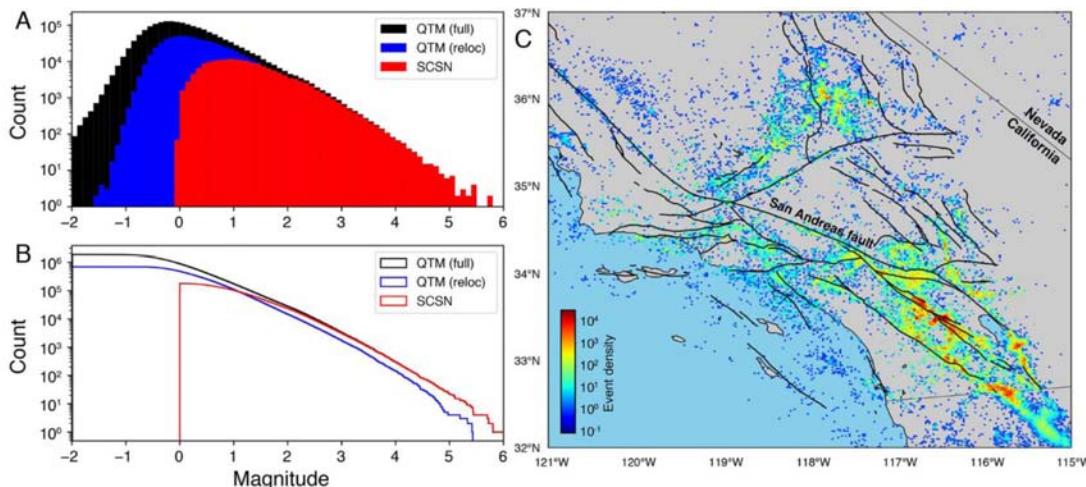


图2 南加州地震模板匹配目录的基本情况 (Ross et al., 2019)。(A) 南加州地震台网常规目录、地震模板匹配目录 (QTM)、及重定位后模板匹配目录这三者的震级 - 频度图 ; (B) 相应的频度 - 震级累计曲线 ; (C) 模板匹配目录的地震分布密度图 ($2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$)

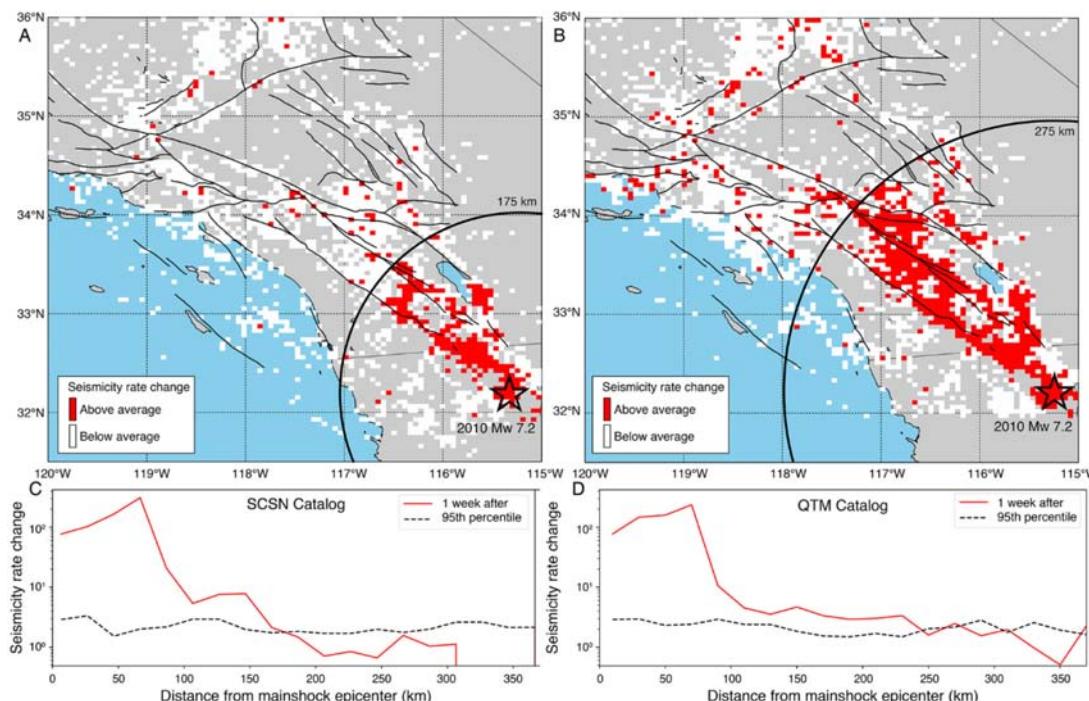


图3 2010年墨西哥 $Mw 7.2$ El Mayor-Cucapah 地震后南加州的地震触发情况分析图 (Ross et al., 2019)。(A) 南加州地震台网常规目录显示在 175 km 内发生了地震触发。(B) 地震模板匹配目录显示在 275 km 内发生了地震触发，这很可能是由主震地震波传播时的动态应力引起的。(C 和 D) 红线表示地震活动性随到主震震中距离的变化，黑色虚线表示在 2008-2009 年之间计算得到的第 95 百分位数的周地震发生率



由于模板匹配技术识别出来的新事件必须和已有的模板事件有比较好的波形相关性，因此这种方法并不能直接应用到没有模板事件的地区，或者识别出和模板事件完全不同的地震。当前应用人工智能技术，对连续地震波形开展地震自动识别已成为新的研究热点（Kong et al., 2019）。对震级较大地震进行人工智能识别，将识别出的地震做为模板进行模板匹配，充分利

用人工智能对高信噪比信号的可靠辨识，搭建深度的神经网络，及模板匹配对弱信号的有效甄别，可以大大提高连续地震数据的处理速度，进一步降低地震目录的完备震级，为后续研究提供可靠的数据基础。

致谢：本文得到美国乔治亚理工学院彭志刚教授、岩石圈演化国家重点实验室吴晶副研究员的帮助。

主要参考文献

- Gibbons S J, Ringdal F. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 165(1): 149-166. ([链接](#))
- Han L, Peng Z, Johnson C W, et al. Shallow microearthquakes near Chongqing, China triggered by the Rayleigh waves of the 2015 M7.8 Gorkha, Nepal earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 479: 231-240. ([链接](#))
- Kong Q, Trugman D T, Ross Z E, et al. Machine learning in seismology: Turning data into insights[J]. *Seismological Research Letters*, 2018, 90(1): 3-14. ([链接](#))
- Li L, Wang B, Peng Z, et al. Dynamic triggering of microseismicity in Southwest China following the 2004 Sumatra and 2012 Indian Ocean earthquakes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 176: 129-140. ([链接](#))
- Peng Z, Zhao P. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 877-881. ([链接](#))
- Ross Z E, Trugman D T, Hauksson E, et al. Searching for hidden earthquakes in Southern California[J]. *Science*, 2019, eaaw6888. ([链接](#))
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms[J]. *Nature*, 2007, 446(7133): 305-307. ([链接](#))
- Wang W, Meng X, Peng Z, et al. Increasing background seismicity and dynamic triggering behaviors with nearby mining activities around Fangshan Pluton in Beijing, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(8): 5624-5638. ([链接](#))
- Wu J, Yao D, Meng X, et al. Spatial - temporal evolutions of early aftershocks following the 2013 Mw 6.6 Lushan earthquake in Sichuan, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(4): 2873-2889. ([链接](#))
- Zhang M, Wen L. An effective method for small event detection: match and locate(M&L)[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 200(3): 1523-1537. ([链接](#))

(撰稿：梁晓峰 / 岩石圈室)



Science : 如何管理地下注水诱发的地震风险——来自韩国浦项地震的启示

2017年11月15日，韩国浦项发生了 $M_{\text{w}}5.5$ 地震，造成约7500万美元的直接经济损失和至少3亿美元的间接经济损失。浦项地震是韩国地震记录以来最大的破坏性地震，研究认为它与当地增强型地热系统的开发直接相关。

增强型地热系统是目前开发地球深部热能的常用技术，以浦项为例，通过向两口注水井PX-1和PX-2注水，可以使两口井之间的岩体产生新裂隙，或者使旧裂隙

扩张，从而形成流体循环通道（图1），并在低渗透结晶基底区域形成人工地热田，预计的电力产能达1.2 MW。但是，PX-2井的高压注水活动诱发了一系列小地震，并最终激活了断层，引发地震。与浦项地热增强项目类似，在欧洲、加拿大、美国、中国、其他国家和地区，也都发生过地下注水诱发地震事件，同样造成了巨大的经济损失（Lei et al., 2017；van der Baan and Calixto, 2017）。

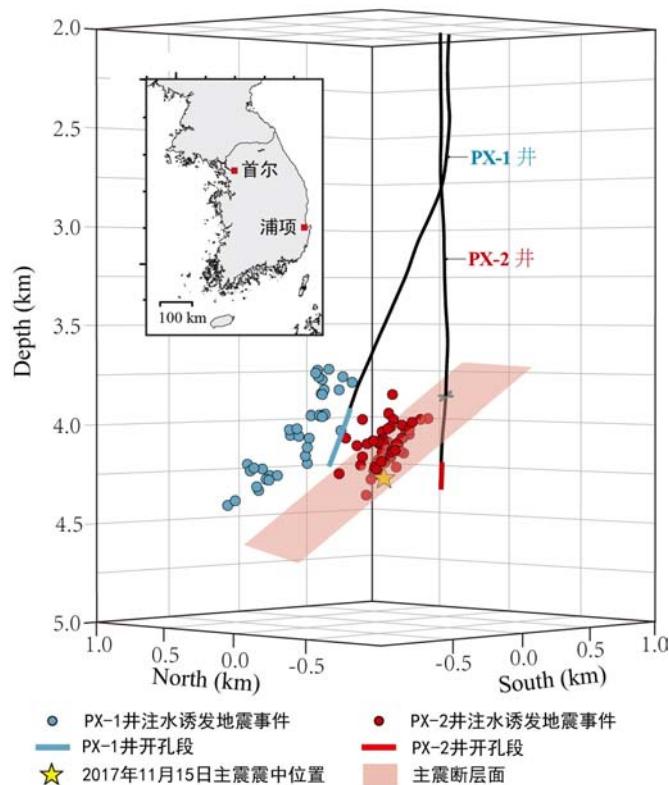


图1 浦项注水后的地震活动性（改自 Lee et al., 2019）



最近，韩国首尔国立大学地球与环境科学学院 Kang-Kun Lee 等在 *Science* 上发表了题为“地下注水诱发地震的风险管理”的报告（Lee et al., 2019）。

文章称，在大城市、港口和工业区附近安置地热增强型系统，必须考虑地下注水诱发地震的潜在风险。首先，在钻探施工之前，需要弄清楚项目工区是否存在可能发生错动的大型断裂；其次，在钻探过程中应该进行实时监测。例如当浦项 PX-2 井掘进到 3.8 km 深处时碰到未知断层，至少 160 m^3 钻井泥浆流入地层，产生了不少于 20 MPa 的额外压力，触发了多次微震，可能意味着钻井穿过的这条断层已经达到了应力临界状态。然而，这些微震活动并未引起重视，施工过程中没有意识到这条新断层的严重危害性，也未调整工程进度。假如有实时监测，就可以及时发现断层活化，进而调整施工方案，就有可能规避地震风险。

一旦向地下注水，就存在诱发地震的潜在风险。诱发地震的大小并非简单地受控于注水量、压力、速度和注水位置，而且与现存的构造条件，以及能够诱发的地震数量有关。诱发地震数量越多，出现强震的几率就越高（van der Elst et al., 2016）。深部隐伏构造活化可能诱发较大的地震，所以仅根据注水量与震级的统计关系设定

安全阀值也过于简单，例如浦项地震就是由于水力压裂激活了一条隐伏断层，最终触发了 $M_{\text{W}} 5.5$ 的主震。因此，诱发地震震级不受注水量的限制，地震破裂尺度也可能超出注水岩体的范围（van der Elst et al., 2016）。已有的几种地震成核模型都无法充分预测主震前断层上的应力变化或压力扰动引发超出压裂范围断层滑动的可能性，因此，进一步发展诱发和触发地震活动的物理和统计模型对评估地震风险非常必要。

对于靠近大型城市、港口和工业中心的地下注水项目，一旦诱发地震可能造成巨大损失。因此，诱发地震的风险管理与控制的重要性尤为突出。文章呼吁通过制定地震风险预案、推演评估、筹措减灾方案等，建立积极有效的诱发地震监测、减灾和信息发布机制。针对未来的地下注水项目，项目团队、地震监测部门和相关科学机构应该致力于全面和持续的地震监测分析，合理评估随注水活动变化的地震灾害风险；相关数据和结果向公众开放，明确沟通渠道，让公众及时了解所面对的地震灾害风险和对应的减灾措施。浦项注水诱发地震事件的教训警示政府主管部门需要和独立监管审查部门协同建立一套标准的流程，对潜在的诱发地震风险进行持续的评估和审查（McGarr et al., 2015；Lee et al., 2019）。

主要参考文献

- Lee K K, Ellsworth W L, Giardini D, et al. Managing injection-induced seismic risks[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 730-732. ([链接](#))
- Lei X, Huang D, Su J, et al. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to $M_{\text{w}} 4.7$ induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7971.



([链接](#))

McGarr A, Bekins B, Burkardt N, et al. Coping with earthquakes induced by fluid injection[J]. *Science*, 2015, 347(6224): 830-831. ([链接](#))

van der Baan M, Calixto F J. Human-induced seismicity and large - scale hydrocarbon production in the USA and Canada[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(7): 2467-2485. ([链接](#))

van der Elst N J, Page M T, Weiser D A, et al. Induced earthquake magnitudes are as large as(statistical-ly)expected[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(6): 4575-4590. ([链接](#))

(撰稿：赵连锋 / 地星室)



PNAS：多孔弹性应力强化的孔隙压力扩散控制了俄克拉荷马州的诱发地震活动

由于世界各国能源需求的增加，地热资源开发、水力压裂及废水地下灌注诱发的地震活动正成为全球性的问题（Ellsworth, 2013）。2008年以来，美国中部和东部地震活动数量的增加就与大量废水注入深部地层有关。尽管在地震活动监测和流体注入诱发地震潜在机制方面已取得了一些进展，但要成功量化和预测这种地震危害还需要更多研究工作（Frohlich, 2012；Shirzaei et al., 2016, Goebel et al., 2018）。

以美国俄克拉荷马州为例，自2008年以来地震频度增加了900倍（图1），其中包括4次5级以上重大地震事件。在俄克拉荷马州中部地区，从1995年就开始高盐废水注入，之后注入量逐年增加，但地震频度却从2008年才开始增大并于2015年达到峰值（图1B）。在俄克拉荷马州西部地区，自2005年开始废水地下注入，地震频度的急剧增加始于2013年，之后地震频度的飙升才与流体注入速率的迅速上升相吻合（图1C）。为应对2015年激增的地震活动并

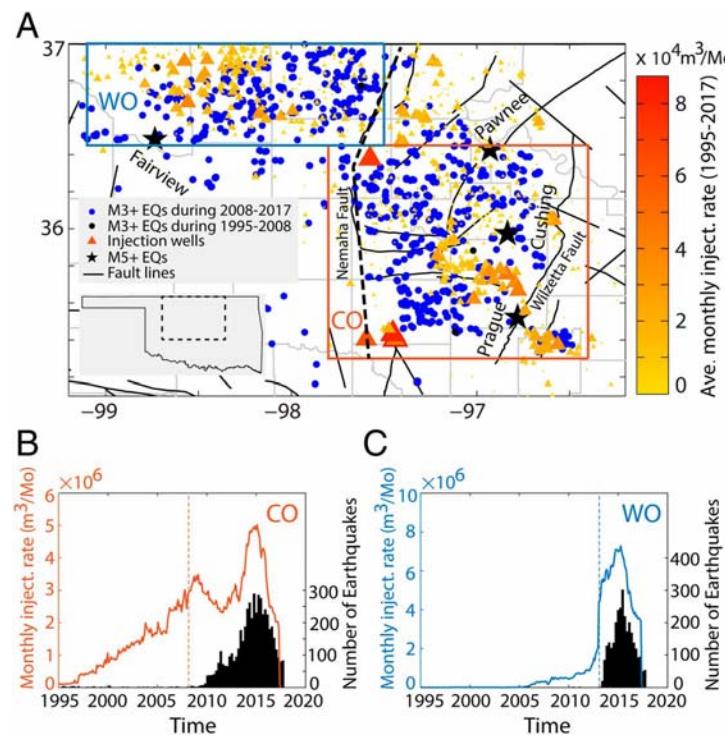


图1 1995年至2017年美国俄克拉荷马州流体注入和地震活动。A.3级以上地震及废水注入井位置。蓝色圆圈表示2008-2017年期间地震，黑色圆圈表示2008年之前地震，三角形代表注入井（根据平均月注入率进行着色和缩放），黑星表示5级以上地震，黑实线是断裂位置，黑色虚线是Nemaha断层带和隆起区，其将俄克拉荷马分为中部(CO, 红色框)和西部(WO, 蓝色框)；B.俄克拉荷马中部地区每月总注入量(红线)与地震活动(黑色直方图)；C.俄克拉荷马西部地区每月总注入量(蓝线)与地震活动(黑色直方图) (Zhai et al., 2019)



减轻地震灾害风险，地方监管机构将 2016 年地震活跃度较高地区的废水注入总量减少到 2014 年总量的 40%，之后地震活动相对减弱，但在注入区内地震矩释放速率仍在飙升，并在 2016 年底发生了几个大地震。

俄克拉荷马州的例子表明，流体注入与其诱发地震活动之间的关系是非常复杂的。总体而言，地壳应力变化决定了地震活动性，而地震灾害的发生与地震活动性成正比。当流体被注入目标地层后，孔隙压力发生扩散，地应力场就会受到扰动，从而降低了断层的抗剪强度并促进了它们的滑动 (Shirzaei et al., 2016)。此外，注入诱发地震的最大震级受总注入量、区域构造状态和局部水文地质条件控制，总地震矩主要与注入量和基底深度相关，而中到大等级的诱发地震受背景构造应力和基底断层构造决定。以上证据和研究表明，一

个成功的诱发地震预测模型需要全面整合控制多孔弹性介质中流体扩散过程和诱发地震成核过程的物理学机制，而当前预测模型中对此考虑不足 (Zhai et al., 2018)。

针对此问题，美国亚利桑那州立大学 Zhai 及其合作者通过对俄克拉荷马州诱发地震区的地质地层、水文地质、地震层析成像、地震活动性迁移、和潮汐应变等分析，构建了同时考虑孔隙压力和多孔弹性应力的注入流体诱发地震预测模型，相关成果近期发表在 *PNAS* 上 (Zhai et al., 2019)。研究人员利用该模型求解了地壳中孔隙压力和多孔弹性应力的时空演化，并计算了总库仑破坏应力 (CFS) (图 2)。在模拟情景中假设全部流体注入于 2017 年 4 月关闭，模拟的孔隙压力、多孔弹性应力和 CFS 在此之前都增加了，而关闭之后则逐渐衰减。

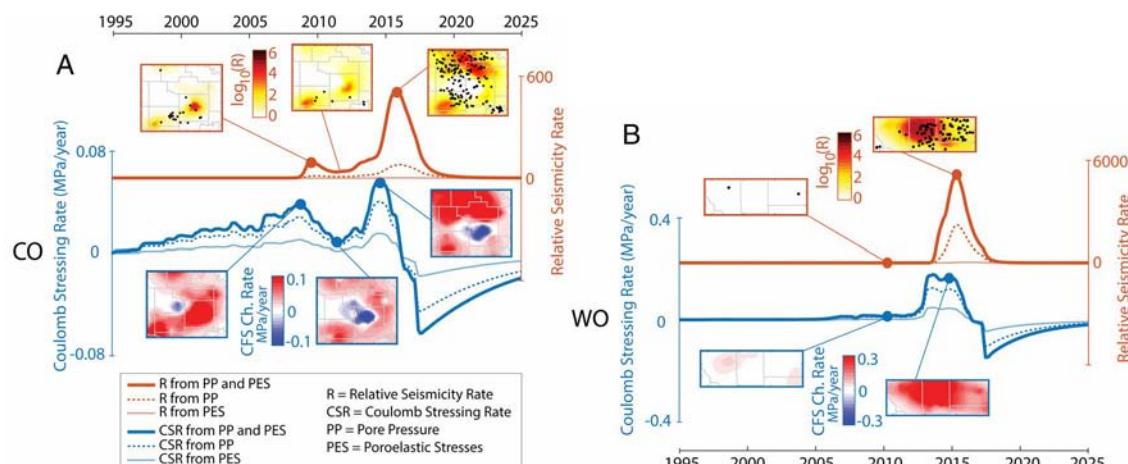


图 2 通过数值模拟得到的平均库仑应力变化率 (CSR) 和地震频度随时间的变化，A 为俄克拉荷马中部地区，B 为俄克拉荷马西部地区。实心蓝色和红色曲线分别是平均 CSR 和相对地震频度随时间的变化序列，蓝色和红色虚线表示孔隙压力和多孔弹性应力分别对 CSR 和相对地震频度的影响，黑色实心圆是 3 级以上地震活动增量分布 (Zhai et al., 2019)

由图 2 可见，平均库仑应力变化率(CSR, Coulomb Stressing Rate) 随时间的变化主要受孔隙压力扩散的影响，且为非线性模式。模拟得到的 CSR 与注入量一致性较

好 (图 1 B、图 1C)，通过敏感性分析还发现孔隙压力的变化主导着 CFS 的时空变化。研究人员应用基于速度 - 状态定律的地震成核模型 (Segall and Lu, 2015) 对 CFS 变



化导致的地震次数进行模拟分析。该模型仅适于流体注入之前断层系统已经受到了较强压力的情况，而研究区流体注入最多的地层在自然条件下是欠压状态的。因此，在流体注入的早期阶段，流体被用来补偿地层压力缺欠，只有当流体压力足够高以传播到基底时，它才能触发地震作用。这就解释了为什么俄克拉荷马中部和西部的地震活动性分别是在流体注入后 13 年和 8

年后才开始剧增的（图 1B、图 1C）。

该研究认为孔隙压力扩散引起的断层带应力扰动是俄克拉荷马州诱发地震的主要驱动力，而孔隙压力扩散作用又因多孔弹性应力被强化。研究突出了在多孔弹性介质中流体扩散对诱发地震灾害时空演变的关键作用，因此将流体扩散机制与地震成核机制相结合对诱发地震预报具有重要意义。

主要参考文献

- Ellsworth W L. Injection-induced earthquakes[J]. *Science*, 2013, 341(6142): 1225942. ([链接](#))
- Frohlich C. Two-year survey comparing earthquake activity and injection-well locations in the Barnett Shale, Texas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(35): 13934-13938. ([链接](#))
- Goebel T H W, Brodsky E E. The spatial footprint of injection wells in a global compilation of induced earthquake sequences[J]. *Science*, 2018, 361(6405): 899-904. ([链接](#))
- Segall P, Lu S. Injection - induced seismicity: Poroelastic and earthquake nucleation effects[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(7): 5082-5103. ([链接](#))
- Shirzaei M, Ellsworth W L, Tiampo K F, et al. Surface uplift and time-dependent seismic hazard due to fluid injection in eastern Texas[J]. *Science*, 2016, 353(6306): 1416-1419. ([链接](#))
- Zhai G, Shirzaei M. Fluid injection and time-dependent seismic hazard in the Barnett Shale, Texas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(10): 4743-4753. ([链接](#))
- Zhai G, Shirzaei M, Manga M, et al. Pore-pressure diffusion, enhanced by poroelastic stresses, controls induced seismicity in Oklahoma[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(33): 16228-16233. ([链接](#))

(撰稿：董艳辉 / 页岩气与工程室)



Nature Geoscience : 美国俄克拉荷马州深部废水回注诱发的地震机理研究

自 2009 年以来，美国中部和东部大部分地区中小地震数量显著增加，尤其是以非常规油气高产量著称的俄克拉荷马州的地震活动在大范围内急剧增加，引起广泛关注，这直接影响了正常的油气开发和地区生存环境的安全。针对上述地区的地震问题，2014 年康纳尔大学的 Keranen 等在 *Science* 上撰文，建立了地震活动性和水文地质模型，研究了深部注入流体的压力传播范围及其触发地震的阈值压力，建立了深部废水回注与诱发地震理论上的联系；2015 年，斯坦福大学的 Walsh 和 Zoback 在 *Science Advances* 上撰文，将俄克拉荷马州深部废水回注作业与地震发生的时间和空间上的关联性进行了统计分析。目前普遍认为，深部流体注入导致断层带内孔隙压力增大与（或）流体注入产生的孔隙弹性应力传递是导致断层失稳滑动的主要机制，但是断层以稳定的无震蠕滑形式发生，还是以非稳定破裂的地震形式发生，很大程度上取决于断层带的物质组成和加载条件。尽管人们对流体注入诱发地震的机理有了定性认识，但是对于俄克拉何马州废水注入引起的地震问题，由于缺乏地区基底岩石结构方面的研究，很难明确该地区地震发生的过程和机理。

为了研究这一问题，美国俄克拉荷马大学的 Kolawole 等研究了俄克拉荷马南

部前寒武纪基底岩石出露区的断层和裂缝体系，以及地震活动区地下基底的断层结构特征，并通过实验确定了基岩的地震稳定性。研究结果首次证明了基底岩石结构与当前地震之间的联系，揭示了废水注入与更深的前寒武纪基底岩石之间的联系和地震震源深度的分布规律，从而解释了为什么俄克拉荷马州的基底断层很容易被废水注入激活，并导致广泛而强烈的地震活动，研究成果发表在近期的 *Nature Geoscience* 上。

他们采用 5 种独立方法（断层和裂隙网络现场测绘、断裂系统卫星尺度制图、地下断层结构探测与制图、地震群线性构造划定及地震震源机制解节点面汇编），发现俄克拉何马州主要的基底构造和最近的地震特征存在显著的关系，在前寒武纪基底内存在一个以不连续带为主的构造组，其走向为北东 - 南西和北西 - 南东（图 2d），这些已经存在的断层处于临界应力状态，当应力或孔隙压力扰动达到 2 MPa 或更小时，可能被重新激活。

通过基岩断层结构地震三维地震结构的研究，他们发现基岩断层切入了上部的 Arbuckle 地层（俄克拉荷马州废水处理的主要地层）和浅部地层（图 2c），这个流体运移通道的存在是注水快速触发地震的重要组成部分。

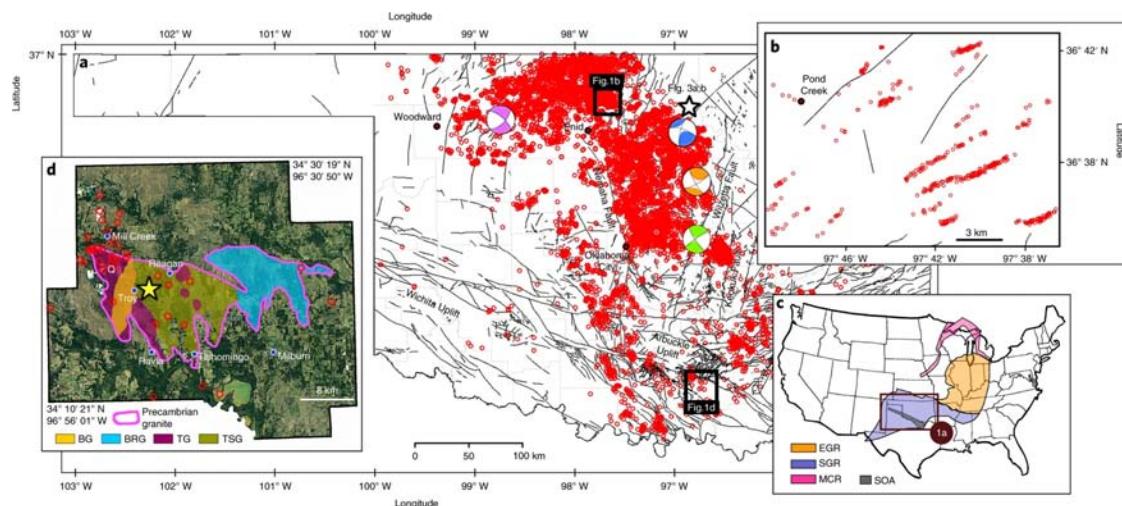


图 1 俄克拉荷马州地震与基底岩性。a. 2010–2017 年俄克拉荷马州地震；红色圆圈代表地震震中；黑色细线代表断层； $M_w > 5.0$ 事件震源机制解，绿色为 2011 年 $M_w 5.7$ Prague 地震，紫色为 2016 年 $M_w 5.1$ Fairview 地震，蓝色为 2016 年 $M_w 5.8$ Pawnee 地震，橙色为 2016 年 $M_w 5.0$ Cushing 地震，黑色方块和白色星号表示指定图形的位置；b. 图 a 中标识的图 1b 区域特写，显示了重新定位的地震（红圈）的断层构造与之前所绘制的断层之间的差异；c. 美国大陆中部前寒武纪地层；d. 前寒武纪基底出露的近距离卫星图像 (Kolawole et al., 2019)

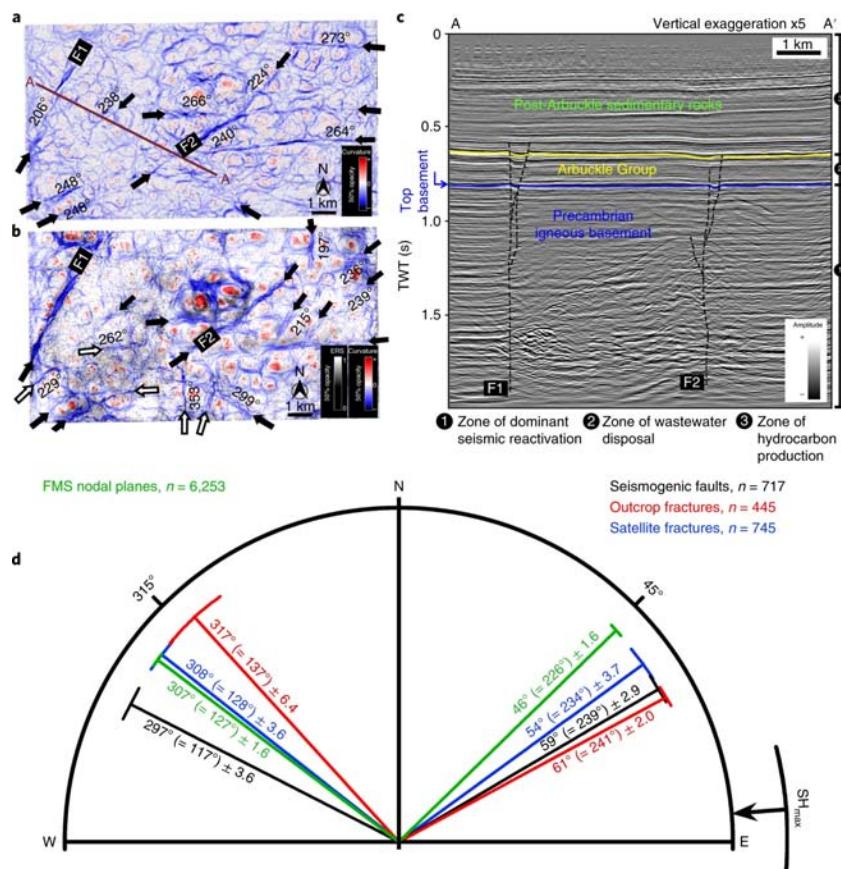


图 2 三维地震数据及结构数据。a、b. 基于三维地震测量的地下结构地震探测结果，在图 1a (白星) 所示的位置，显示了顶部基底 (a) 和顶部 Arbuckle (b) 的时间结构图相似，曲率和能量比值也相似，黑色箭头表示在 a 和 b 中检测到的线性构造特征；白色箭头表示仅在 b 中检测到线性构造(断层带)；c. 地震剖面沿 A - A' (在 a 中) 叠加解释；d. 卫星尺度裂缝、露头尺度裂缝、地震断层的频率 – 方位玫瑰图叠加图和焦平面机制解节点平面，箭头表示俄克拉荷马州估计的最大水平应力 (SH_{max}) 方向 (Kolawole et al., 2019)

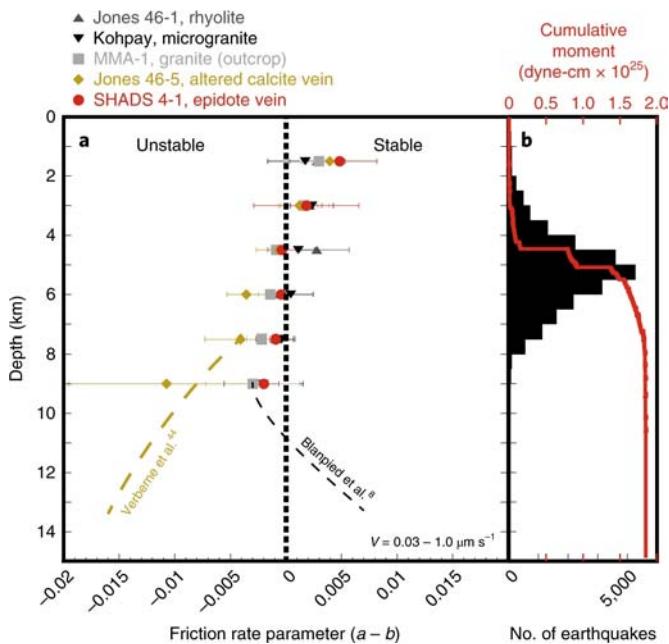


图3 俄克拉荷马州地震稳定性和地震的深度分布。a. 俄克拉荷马州基底岩石样品的地震稳定性，用速率-状态-摩擦参数($a-b$)表示，符号表示速度步长平均值，误差条表示各实验样品的取值范围和深度。金色和黑色虚线分别表示纯方解石和Westerly花岗岩的数据；b. 2010年至2017年期间俄克拉荷马州不同深度地震(本研究)数量的直方图和累积矩(Kolawole et al., 2019)

此外，该研究通过俄克拉荷马基底岩石和热液蚀变产物的岩石力学研究发现，这些岩石在3–6 km的深度条件（温度、压力和饱和度）下变得不稳定（图3），由这些岩石组成的断层带，可能在>3 km深处

形成地震破裂而非蠕变滑动。这种向不稳定滑移的过渡很好地解释了震中和地震矩集中在3–6 km处的原因（图3），也解释了注水较少诱发3 km以内地震的原因。

主要参考文献

- Kolawole F, Johnston C S, Morgan C B, et al. The susceptibility of Oklahoma's basement to seismic reactivation[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(10): 839-844.([链接](#))
- Keranen K M, Weingarten M, Abers G A, et al. Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection[J]. *Science*, 2014, 345(6195): 448-451.([链接](#))
- Walsh F R, Zoback M D. Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal[J]. *Science Advances*, 2015, 1(5): e1500195.([链接](#))

(撰稿：赵海军 / 页岩气与工程室)

4. 表层系统

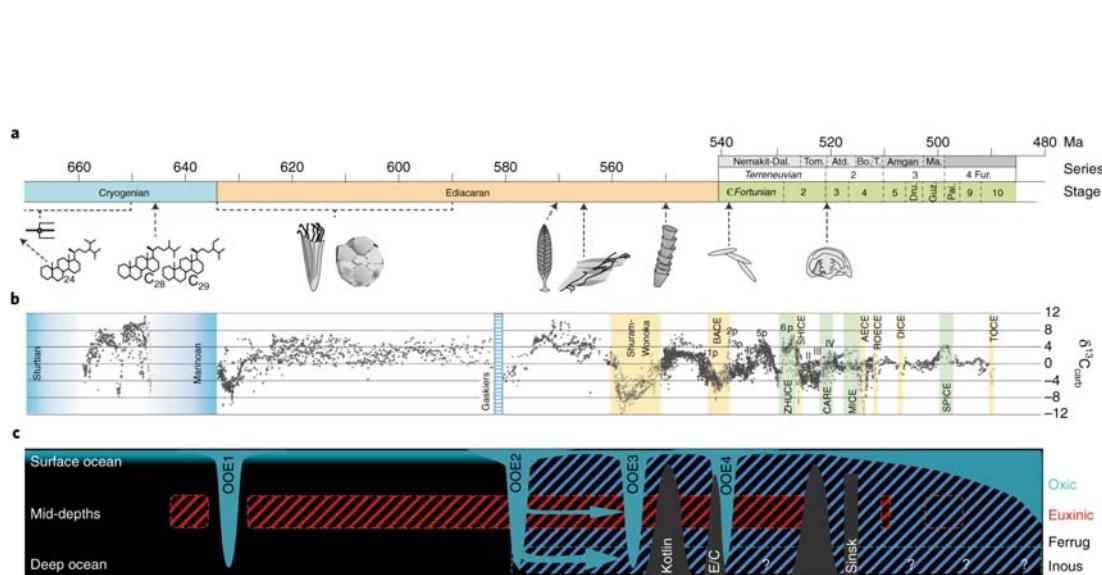


Image source: Wood et al., Nature Ecology & Evolution, 2019



Science : 岩浆海的氧化还原环境对地球早期大气组成的影响

众所周知，地球的演化始于 4567 Ma 之前太阳系行星物质的凝聚和固结，之后，小星子吸积凝聚形成了地球。在吸积凝聚过程中，由于势能向动能的转化、高放射性生热以及星体的频繁撞击，地球会间歇性的出现大规模的熔融外层，即岩浆海。岩浆海的深度并不均一，通常最深可以达到压力 28 GPa 的位置（如 Wood et al., 2006）。早期岩浆海的持续脱气作用形成了地球早期大气，如果岩浆海较为还原，脱气形成的大气成分将以 CO、CH₄ 和 H₂ 为主；反之，氧化的岩浆海则产生 CO₂ 和 H₂O 等更氧化的气体。早期岩浆海的氧化还原环境对制约地球早期大气组成至关重要，因而一直是科学界关注的焦点。

变价元素（如 Fe 和 V）是研究硅酸盐熔体氧化还原状态的重要工具，比如 Fe³⁺/Σ Fe 是指示岩浆氧逸度的重要参数，也与岩浆化学成分、温度和压力密切相关（如 O' Neill et al., 2006）。对于通过动力对流而达到成分均一混合的早期岩浆海而言，厘清 Fe³⁺/Σ Fe 相对于压力的变化以及氧逸度和压力之间的关系是研究岩浆海氧化还原环境的重要前提。高压实验研究建立的 Fe³⁺/Σ Fe 与氧逸度和压力的热力学模型表明，在氧逸度和温度不变的情况下，Fe³⁺/Σ Fe 随着压力的升高而降低（Zhang et al., 2017；图 1a）。对于 Fe³⁺/Σ Fe 比值基本不变的早期岩浆海而言，其氧逸度变

化和压力呈正相关关系，即表明岩浆海浅部比深部具有更还原的特征（如 O' Neill et al., 2006；Zhang et al., 2017），而岩浆海上部覆盖的早期大气也很有可能由 CO、CH₄ 和 H₂ 等还原性气体组成。德国拜罗伊特大学的 Armstrong 教授与合作者在 *Science* 上发表了最新的高压实验结果和模型，指出硅酸盐熔体中的 Fe³⁺/Σ Fe 并非总是和压力呈负相关，而岩浆海中氧逸度随压力的正相关关系在更高的压力之下由于 FeO 的歧化反应（3FeO = Fe⁰ + 2FeO_{1.5}）则会出现反转的趋势。

Armstrong 等选择安山质熔体进行研究，在 Ru-RuO₂ 缓冲剂下控制合成安山质玻璃，将前人高压实验研究中的压力上限由 7 GPa 提高到 23 GPa。结果表明，Fe³⁺/Σ Fe 比值和压力在 7 GPa 之前呈负相关趋势，与前人研究一致；当压力大于 10 GPa 时，二者的关系由负相关变成正相关（图 1b）。这可能与更高压力下 Fe³⁺ 配位数的增加有关，Fe³⁺ 配位数的增加使得熔体中 Fe₂O₃ 和 FeO 的压缩性差异减小，意味着 Fe₂O₃ 稳定性的提高。作者由此推断，即使含少量 Fe₂O₃ 的硅酸盐熔体在压力大于 10 GPa 时，也会通过 FeO 的歧化反应产生金属 Fe 和 Fe₂O₃。此外，为了排除熔体成分和初始条件氧逸度的影响，作者同时分别对大洋中脊玄武岩质熔体和铁金属作为缓冲剂的安山质熔体进行实验，得出的结果和 Ru-RuO₂ 缓冲剂下合成的安山质玻璃一



致（图 1b）。

作者将新建立的模型应用到早期岩浆海氧化还原状态的研究中，揭示出对于浅部氧逸度为 $\Delta\text{IW}-2$ 的岩浆海，最初岩浆海的氧逸度随着深度的增加而缓慢增加；在 200 km 处，由于 Fe_2O_3 压缩性的升高，趋势开始反转，直到 400 km 处岩浆海的氧逸度再次降低到金属 Fe 稳定的范围。在 400 km 处，岩浆海中 FeO 发生歧化反应，沉淀金属 Fe。如果沉淀的金属 Fe 聚集到地核，则会导致岩浆海中的硅酸盐熔体的 Fe_2O_3 升

高，进而提高岩浆海中的 $\text{Fe}^{3+}/\sum\text{Fe}$ 和氧逸度。假使仅 0.1% 的金属分离进入地核，都会将岩浆海中的 $\text{Fe}^{3+}/\sum\text{Fe}$ 提高到 0.03（图 2），而这一值接近现今地幔的估计值。因此，作者认为，在地球吸积的后期阶段中，一旦撞击星体的铁金属核完全分离，每一个产生的岩浆海中 FeO 的歧化反应都会提高地幔中的 $\text{Fe}^{3+}/\sum\text{Fe}$ 比值进而氧逸度升高，而对于较深的岩浆海这一效应更为显著，所以 H_2O 和 CO_2 为主的大气可能是通过吸积的最后阶段得以维持稳定的。

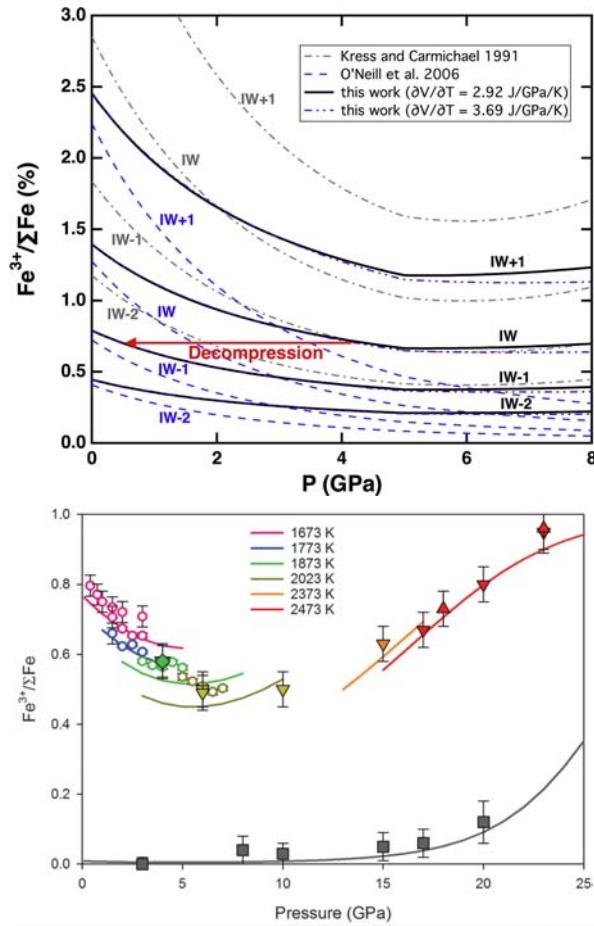


图 1 不同氧逸度下平衡的冷却硅酸盐熔体中的 Fe^{3+} 含量 (Zhang et al., 2017; Armstrong et al., 2019)

左：可以看出，对于固定 $\text{Fe}^{3+}/\sum\text{Fe}$ 的硅酸盐熔体，在 0-7 GPa 的压力条件下，随着压力的降低（红色箭头代表减压过程），硅酸盐熔体的氧逸度升高；右：彩色实心部分代表通过 $\text{Ru} + \text{O}_2 = \text{RuO}_2$ 达到的氧逸度为 $\Delta\text{IW}+8$ 的实验条件，灰色方块部分代表和 Fe 金属平衡达到的 $\Delta\text{IW}-2$ 实验条件；向上和向下的三角分别代表最初完全氧化和最初完全还原的起始物质；空心部分代表前人的研究成果 (O'Neill et al., 2006; Zhang et al., 2017)；除了 4 GPa 下起始熔体成分为 MORB 熔体（绿色金刚石符号），其他所有的起始熔体成分均为安山质熔体；图中曲线代表了模型和实验数据的拟合；灰色曲线为液相 Fe 饱和曲线，温度为 2373 K



此外，作者还用建立的模型解释了地球内部富集碳的特征（图3）。岩浆海可通过“碳泵”机制溶解少量大气中的CO₂（Hirschmann et al., 2012），即使仅含10 ppm

CO₂的熔体，在500 km处也可以沉淀金刚石。因此，随着时间的变化，地幔中的金刚石含量逐渐增加，形成碳富集的特征。

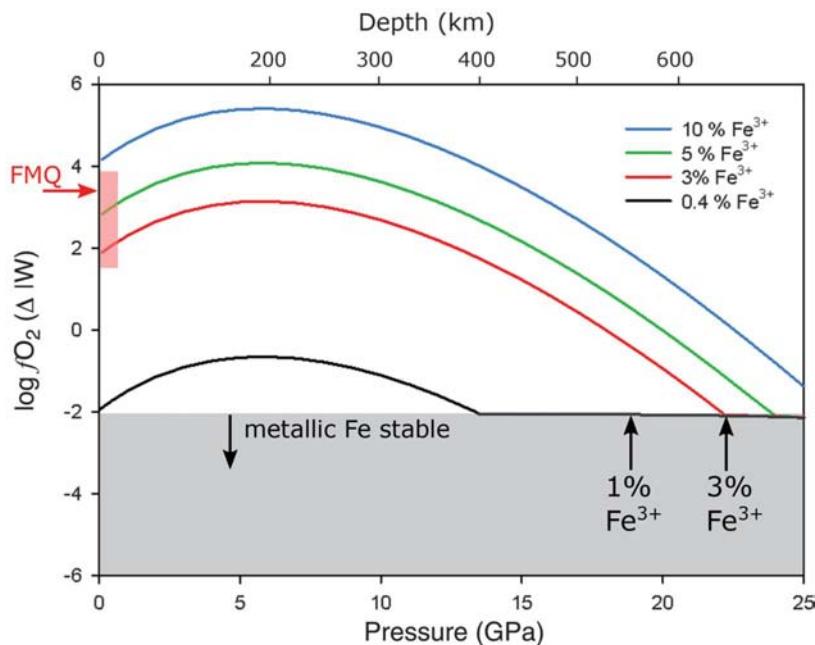


图2 不同Fe³⁺/Σ Fe岩浆海的氧逸度随深度和压力的变化 (Armstrong et al., 2019)。垂直的红色短柱代表现今上地幔氧逸度的大致变化范围；灰色阴影区域代表金属Fe沉淀的范围

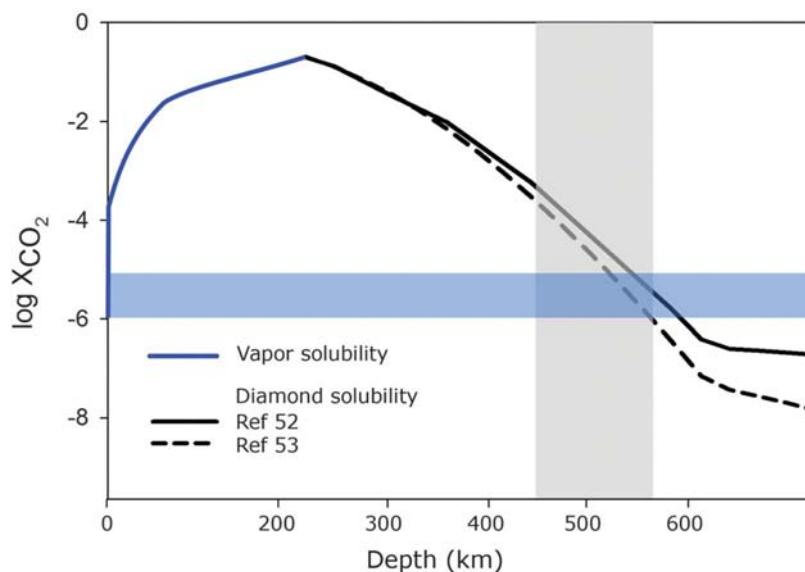


图3 与金刚石平衡的岩浆海的CO₂含量 (Armstrong et al., 2019)。蓝色曲线代表CO₂饱和熔体的CO₂含量；黑色曲线代表金刚石饱和的CO₂含量，通过两种不同的方法计算 (Guillot and Sator, 2011; Duncan and Tsuno, 2017)；蓝色阴影部分代表岩浆中CO₂含量的变化范围 (1-10 ppm)；灰色阴影部分代表金刚石在超镁铁质熔体中上浮的环境 (Ohtani and Maeda, 2001; Suzuki et al., 1995)



主要参考文献

- Armstrong K, Frost D J, McCammon C A, et al. Deep magma ocean formation set the oxidation state of Earth's mantle[J]. *Science*, 2019, 365(6456): 903-906.([链接](#))
- Duncan M S, Dasgupta R. Rise of Earth's atmospheric oxygen controlled by efficient subduction of organic carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(5): 387.([链接](#))
- Guillot B, Sator N. Carbon dioxide in silicate melts: A molecular dynamics simulation study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(7): 1829-1857.([链接](#))
- Hirschmann M M. Magma ocean influence on early atmosphere mass and composition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 341: 48-57.([链接](#))
- Ohtani E, Maeda M. Density of basaltic melt at high pressure and stability of the melt at the base of the lower mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193(1-2): 69-75.([链接](#))
- O'Neill H S C, Berry A J, McCammon C C, et al. An experimental determination of the effect of pressure on the $\text{Fe}^{3+}/\sum \text{Fe}$ ratio of an anhydrous silicate melt to 3.0 GPa[J]. *American Mineralogist*, 2006, 91(2-3): 404-412.([链接](#))
- Suzuki A, Ohtani E, Kato T. Flotation of diamond in mantle melt at high pressure[J]. *Science*, 1995, 269(5221): 216-218.([链接](#))
- Wood B J, Walter M J, Wade J. Accretion of the Earth and segregation of its core[J]. *Nature*, 2006, 441(7095): 825-833.([链接](#))
- Zhang H L, Hirschmann M M, Cottrell E, et al. Effect of pressure on $\text{Fe}^{3+}/\Sigma \text{Fe}$ ratio in a mafic magma and consequences for magma ocean redox gradients[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 204: 83-103.([链接](#))

(撰稿：刘霞，苏本勋 / 矿产室)



PNAS : 大型不整合面指示冰川活动

不整合现象在地质历史时期比较常见，其中比较典型的是寒武系底部的沉积岩常常突兀地覆盖在古老的火成岩或变质岩基底之上，例如美国科罗拉多尼德尔山（Needle Mountain）地区寒武纪 Ignacio 石英岩不整合地覆盖在中元古代（ca. 1.35 Ga）Eolus 花岗岩之上，其间丢失了将近 9 亿年的地质历史信息（图 1），地质学家将之称为大

型不整合面。Ronov et al. (1980) 首次对全球元古宙 – 显生宙边界保存下来的沉积物进行了量化分析，发现大陆沉积物的堆积速率从元古宙的 $0.2 \text{ km}^3/\text{yr}$ 急剧变化到显生宙的 $1 \text{ km}^3/\text{yr}$ （图 1），原因可能是显生宙沉积物发生快速堆积（大约 5 倍）或元古宙地层遭受侵蚀（约 14 km 厚的沉积盖层，占盖层厚度的 80%）。

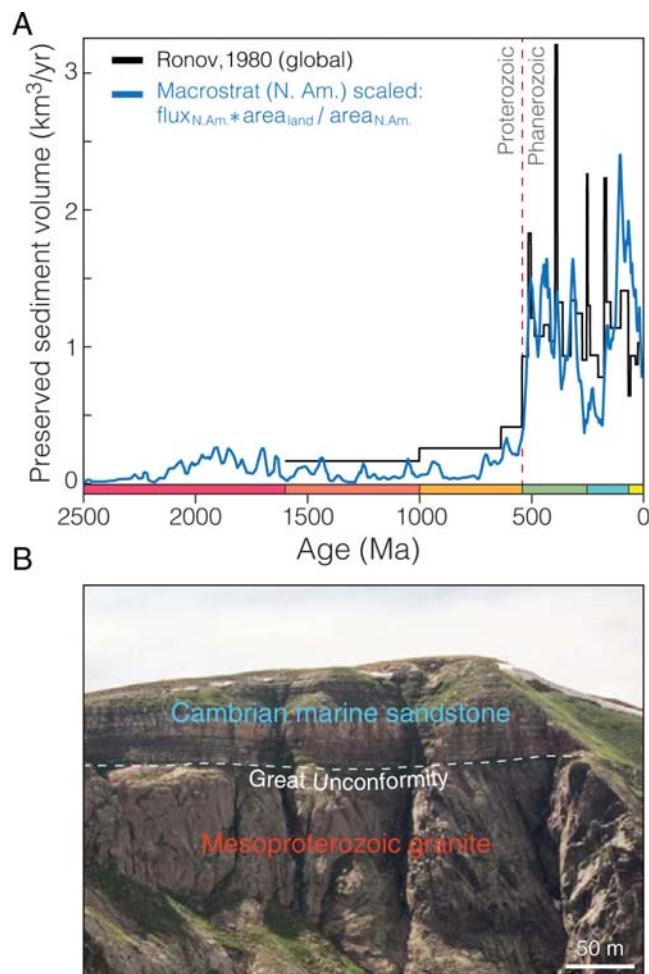


图 1 (a) 全球和北美地区的沉积岩在元古宙 – 显生宙边界急剧增加；(b) 尼德尔山地区寒武纪 Ignacio 石英岩不整合地覆盖在中元古代 Eolus 花岗岩之上，两者之间为一大型不整合面 (Keller et al., 2019)



大型不整合面代表地层记录的显著沉积间断，对其形成机制还没有达成共识。最近，美国加州大学伯克利分校等机构在 PNAS 上联合发表的研究表明，这类大型不整合面可能记录了新元古代“雪球地球”事件发生时的冰川侵蚀过程，即陆壳物质经过冰川作用剥蚀到深海盆地之后由于板块俯冲消减掉了。冰川作用不但导致了大

陆地壳剥蚀及随后的沉积俯冲，造成岩浆锆石的 Hf-O 同位素漂移，而且还降低了侵蚀基准面，形成浅水相大陆海域，为“寒武纪大爆发”时多细胞动物的涌现和分异提供了“舞台”。此外，冰川作用还会抹去地外天体的撞击记录（Keller et al., 2019）。

作者通过统计发现（图 2），43.5 亿年前至今通过弧相岩浆作用产生的锆石 εHf 值

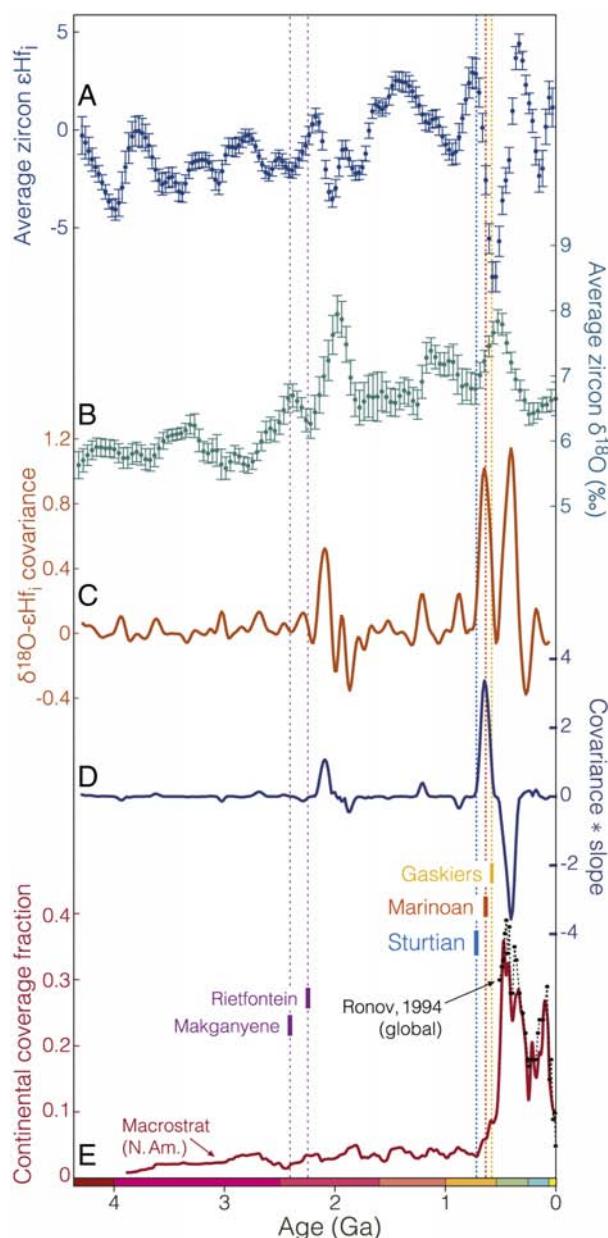


图 2 地质历史时期锆石 Hf-O 同位素变化和大陆沉积物覆盖变化趋势。（A）锆石平均 εHf ；（B）锆石平均 $\delta^{18}\text{O}$ ；（C）锆石 εHf - $\delta^{18}\text{O}$ 协方差，正值指示地壳改造程度的增强；（D）锆石 εHf - $\delta^{18}\text{O}$ 协方差与斜率的乘积，正值和负值分别指示地壳改造程度的强弱；（E）不同地质时期北美和全球地表被海相沉积物覆盖的范围（Keller et al., 2019）



一直在 -5 至 5 之间波动，直到成冰纪(750–635 Ma)至古生代时才出现显著的负漂移。与此同时，这段期间锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著升高，在 6.5–8 之间波动，指示有古老的地壳物质参与。海槽内沉积物厚度和锆石 εHf 之间表现的强烈相关性，以及成冰纪至古生代时地表沉积物覆盖量减少等现象，都说明这段时期强烈的地壳侵蚀作用是导致古老地壳物质再循环的主要因素。地壳沉积物被侵蚀运移到深海盆地，然后随着板块俯冲消减到深部，经过脱水熔融以岛弧岩浆的形式返回到地表。巨量的地壳物质剥蚀很难通过常规的地质过程实现，因此

剥蚀的原动力最可能来自于成冰纪的冰川作用，作者通过模拟计算表明，2 km 厚的冰席可以侵蚀约 12 km 厚的大陆地壳。

地外天体的撞击坑也可以证实曾发生冰川侵蚀作用。撞击坑作为地表特征，很容易受到剥蚀和侵蚀作用的破坏。作者通过统计发现，各种撞击坑出现的高峰期都集中在成冰纪冰川事件之后（图 3），直径小于 100 km 和小于 10 km 的撞击坑在 700 Ma 之前和 600 Ma 之前都有明显的侵蚀截断，时间上和成冰纪冰川事件相吻合，表明大规模的成冰纪冰川侵蚀作用抹去了撞击坑的保存记录。

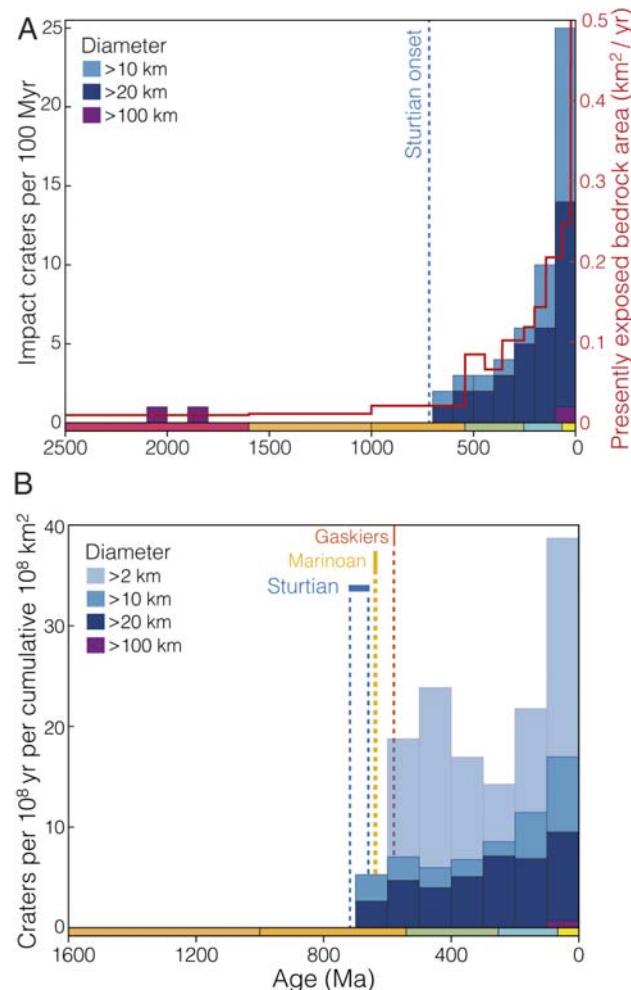


图 3 大陆地壳内撞击坑的记录，年龄误差在 $\pm 75 \text{ Myr}$ ($1-\sigma$) (源自 PASSC 数据库, 2001)。(A) 过去 2.5 Ga 时间内撞击坑数 (左轴, 以 100 Myr 为分割单位) 和全球出露的岩床面积 (右轴, km^2/yr) (Geological Survey of Canada, 1995)。(B) 单位岩床面积内撞击坑数, 撞击坑大小为 2 ~ > 100 km (Keller et al., 2019)



尽管冰川侵蚀作用可以很好地解释锆石 Hf-O 同位素漂移和地外天体撞击坑的保存记录变化等地质现象，但有一个科学问题尚存争议，即成冰纪冰川事件结束之后为什么直到古生代早期沉积物才显著增加。原因可能有三种：(1) 除了成冰纪，埃迪卡拉纪也发生了冰川事件 (ca. 580 Ma)，这次冰川作用很可能导致至少 ca. 55 Myr (635–580 Ma) 沉积的地层被侵蚀掉了，只有剩

下的 ca. 39 Myr (580–541 Ma) 的地层被零星地保存下来；(2) 冰川作用导致地形准平原化，这时构造沉降速率明显超过沉积物的供给速率，造成“沉积饥饿”，直到后期有造山作用发生时才会有新的沉积供应；(3) 原本是埃迪卡拉纪的沉积物，由于沉积时代不明确而被错误地划归为寒武纪地层。随着研究工作的不断推进，以上三种假说会逐渐得到验证。

主要参考文献

- Geological Survey of Canada. Generalized geological map of the world and linked databases[M]. Ottawa: Geological Survey of Canada, 1995.
- Keller C B, Husson J M, Mitchell R N, et al. Neoproterozoic glacial origin of the Great Unconformity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(4): 1136-1145. ([链接](#))
- Ronov A B, Khain V E, Balukhovsky A N, et al. Quantitative analysis of Phanerozoic sedimentation[J]. *Sedimentary Geology*, 1980, 25(4): 311-325. ([链接](#))

(撰稿：兰中伍 / 岩石圈室)



PNAS : 陆生植物繁盛之前地球上已存在类似现今的河流体系

通 过对苏格兰地区中 - 新元古界河流相砂岩进行实验、数值模拟以及现代沉积观察，发现其所代表的古河流具有较低的坡降和较深的河道，类似于现代平原的稳定河流。运用相同方法对地球上其它十处前寒武系河流相砂岩进行计算，获得类似的结果，这一发现表明在志留纪陆生植物繁盛之前，地球上已广泛存在类似现今的河流体系。

陆生植物的光合作用深刻影响着地表圈层并导致了碎屑沉积作用的根本性变革。比如，志留纪以来，陆生植物生长导致风化作用增强，陆相沉积物中的泥质组分显著增加 (McMahon et al., 2018)。同样，植物登陆也可能导致了大型河流几何形态的根本性改变。部分学者认为在志留纪之前，由于缺少植被固定土壤，河岸不稳定，导致河流具有坡降 (River gradient) 大、河道宽、流水浅、分支多的特征，呈现宽展辫状河 (sheet-braided) 的几何形态。然而，在新元古代 Rodinia 超大陆聚合时期，部分河流的长度大于 3000 km。为了吻合河流坡降大的特点，将要求流域的海拔高差大于 12 km，这显然与当时的岩石圈厚度相悖。因此，有学者根据河道沉积物的规模提出，至少部分前志留纪河流具有较深的河道，并可能具有较小坡降。

针对前志留纪大型河流几何形态的争论，美国加州大学地理系 Ganti et al. (2019) 以苏格兰地区元古宇河流相砂

岩 (Torridonian Group) 为研究对象，对其所代表的古河流的水深、坡降和形态进行了半定量的恢复。研究认为在地球植被形成之前，具有低坡降、稳定河道的大型河流已广泛存在。相关的研究成果发表在 PNAS 上。

在河流系统中，河床地貌、沉积物和流水相互作用，导致河床形成不同的砂体 (砂脊、沙丘、沙坝等)。砂体的迁移形成交错层理，并保存在沉积物中。因此，理论上讲，通过砂岩的沉积结构和构造可以反演古水流方向和沉积物搬运的动力学条件。本项工作的研究对象 (Torridonian Group) 位于苏格兰西北部，为一套近连续的中 - 新元古界河流相碎屑沉积岩系，主要由板状或槽状交错层理砂岩组成，整体厚度大于 6 km，几乎未发生变质和变形。研究对中上部地层 [Applecross 组下段 (LAF, 500–100 m); Applecross 组 上 段 (UAF, 2000–3000 m) 和上覆 Aultbea 组 (> 2000 m)] 进行了系统的层系厚度、砂岩粒度和古水流方向测量。

根据实验、数值模拟以及现代沉积观察所获得的层系厚度与床砂形态、河流古水深之间的相关关系，计算获得 LAF、UAF 和 Aultbea 组的古水深分别为 4.1 ± 1 m、 11 ± 2.7 m 和 12.8 ± 3.1 m (图 1A)。同时，根据河砂粒度与沉积物搬运水动力条件 (由河流的坡降决定)，计算获得的河流坡降分别为 3.9×10^{-4} 、 9.7×10^{-5} 和 4.5×10^{-5} (图



1B)。研究结果反映较深的古河道和较小的坡降，不支持“宽展辫状河”模型（河流坡降为 10^{-3} 至 10^{-2} ），反而与现今稳定大陆内部、海岸平原和前陆盆地中河流的特

征一致。作者运用相同方法，对地球上其它十处典型的元古宇河流相砂岩进行计算，获得了相似的古水深（4–15 m）和河流坡降（ 10^{-4} 量级）（图 2）。

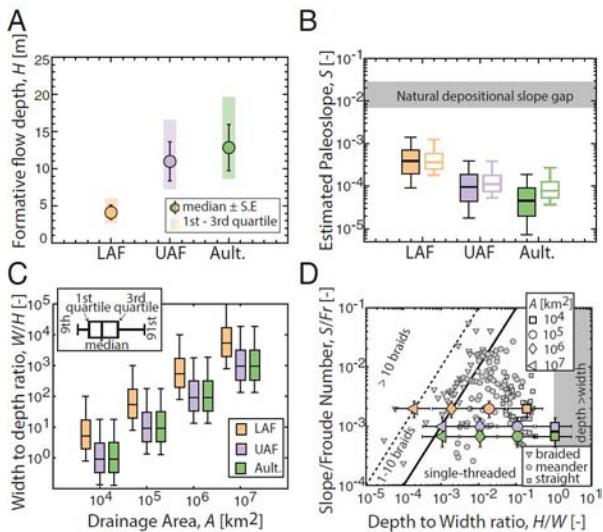


图 1 古水动力条件恢复显示 Torridonian Group 所记录的河流具有低坡降、单一河道的特征。(A) 河流水深计算结果；(B) 河流坡降计算结果；(C) 假定不同流域面积获得的河流宽深比；(D) 基于现代观察的河流几何形态稳定性图解

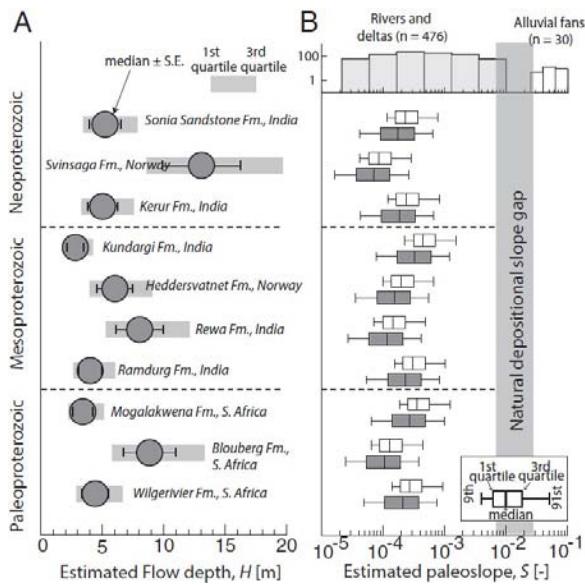


图 2 地球上十处典型的元古宇河流相砂岩的古水深和河流坡降计算结果

另外，作者还根据总水量平衡理论（降雨量 × 流域面积 = 河道宽度 × 河道深度 × 河水流速 × 时间），计算获得了河道的宽深比（宽度 / 深度）。在正常的流域面积

估算情况下 (10^4 – 10^6 km²)，河流的宽深比位于单一河道稳定区域（宽深比为 10–100）（图 1C、图 1D）。只有在流域面积大于 10^8 km²（河流长度将超过地球周长）或降水量大于



10 m/y（超过热带低压带）的情况下，宽深比才符合宽展辫状河模型。因此，Torridonian 群砂岩所记录的河流更类似于现今的曲流河。

曲流河的河道主要受控于洪泛平原沉积物形成的堤岸。最近的研究显示，元古宙河流也发育成熟的洪泛平原系统。如在 Applecross 组中，洪泛沉积由纹层状的砂岩组成，且随着离河道距离的增加厚度逐渐变薄。尽管这些沉积物相对于现代洪泛沉积明显较粗，但它们的存在有利于河道的

稳定。由于前志留纪缺少陆生植物和泥质沉积物等固定堤岸的因素，作者推断微生物粘结力可能是砂质河岸稳定的关键。

该研究通过半定量计算的方法获得元古宙河流的几何特征，发现低坡度、单一河道的河流在陆生植物繁盛之前已广泛存在。研究结果表明，尽管陆生植物繁盛对地表圈层造成了革命性的影响，但稳定河流的发育却是地球早已有之的特征。该研究对于了解前寒武纪地球和地外行星的沉积作用具有重要意义。

主要参考文献

- Ganti V, Whittaker A C, Lamb M P, et al. Low-gradient, single-threaded rivers prior to greening of the continents[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(24): 11652-11657.
([链接](#))
- McMahon W J, Davies N S. Evolution of alluvial mudrock forced by early land plants[J]. Science, 2018, 359(6379): 1022-1024. ([链接](#))

(撰稿：王建刚 / 岩石圈室)



Nature Communications : 全球构造引发埃迪卡拉纪氧化事件

地球历史上的大气氧含量经历两次快速增氧事件才基本达到现今的水平，其中第二次大氧化事件（NOE）发生在埃迪卡拉纪 – 寒武纪早期，致使寒武纪复杂生物多样性出现。新元古代地球大气和海洋氧化过程一直以来是地学研究的前沿热点。

古老沉积岩中保存的生物地球化学特征表明，新元古代晚期 – 早古生代时期存在氧

化事件（NOE），当时的氧气浓度可能积累到了足以维持生物生命和深海氧化所需的水平（Lyons et al., 2014）。如 Mo、V、Re 的富集和 $\delta^{82}\text{Se}/\delta^{76}\text{Se}$ 的降低均表明海洋环境趋于氧化，Ce 异常则表明 551 Ma 之后至少浅海是氧化环境（图 1）。大量的地球化学数据表明，在埃迪卡拉纪和早 – 中寒武世存在一系列短暂但频繁的氧化事件（图 1c），然而，大气氧含量变化的时间和幅度仍不确定。

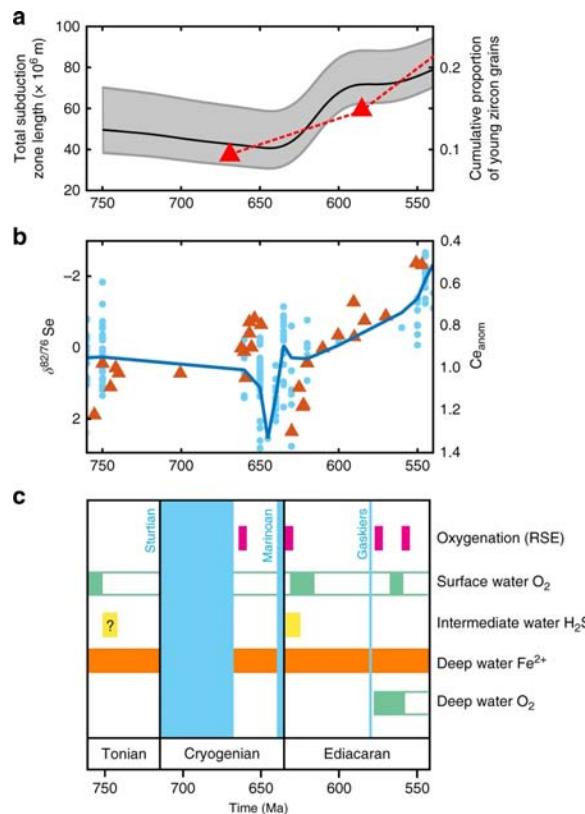


图 1 埃迪卡拉纪氧化事件的大地构造和地球化学证据。a. 二氧化碳输入速率的变化（由全球俯冲带总长度表示）。同时显示了年轻锆石的累积比例的变化（红色三角形），年轻锆石指示大陆弧环境。b. c. 新元古代海洋氧化还原指标汇编：b. 海洋页岩中硒同位素比值 ($\delta^{82}\text{Se}/\delta^{76}\text{Se}$, 红色三角形) 的变化指示全球海洋不断氧化的趋势，海洋胶结物中明显的铈负异常 (Ce_{anom} , 蓝色圆点) 指示同样的氧化趋势。c. 黑色页岩氧化还原敏感元素 (RSE、Mo、U、Re、V、Cr；红色) 富集数据指示海洋广泛氧化的阶段。下方的铁组分指标指示了不同深度海洋水体氧化 – 还原状态。上述指标指示了成冰纪 – 埃迪卡拉纪一系列短暂的氧化事件（Williams et al., 2019）



对于新元古代的氧化作用的受控因素，有多种假说。一种解释认为，雪球地球事件之后，营养物质进入了海洋，提高了初级生产和有机质的埋藏，进而释放氧气到大气。问题是这只会暂时性的增加氧气含量，一旦营养物质的供给中断，大气氧就会恢复到曾经的水平。也有学者认为，通过早期陆地生态系统对磷的选择性风化和富含磷的大火成岩省，陆地的化学风化作用进一步扩大且持续增加，从而增加了大气氧浓度。还有假说认为，早期陆地生物圈的扩张可能限制了地壳岩石的氧化风化作用，减少了氧气的吸收。这些机制虽然

能够解释大气中的氧气浓度的增加，但是科学家并没有观察到预测应当出现的碳酸盐岩平均碳同位素比值 ($\delta^{13}\text{C}$) 的升高。

针对上述问题，英国埃克塞特大学全球系统研究所和爱丁堡大学地球科学学院的 Joshua J. Williams 等科学家提出另一种氧化机制，同时，他们运用生物地球化学模型方法模拟出该时期大气氧含量。根据年轻锆石比例的增加和大陆火山弧范围变化，他们发现新元古代和古生代之间的构造去气 (CO_2) 的速率显著高于相邻时期。基于这一观察，他们提出新的氧化机制：新元古代晚期，板块构造的变化导致大气氧含

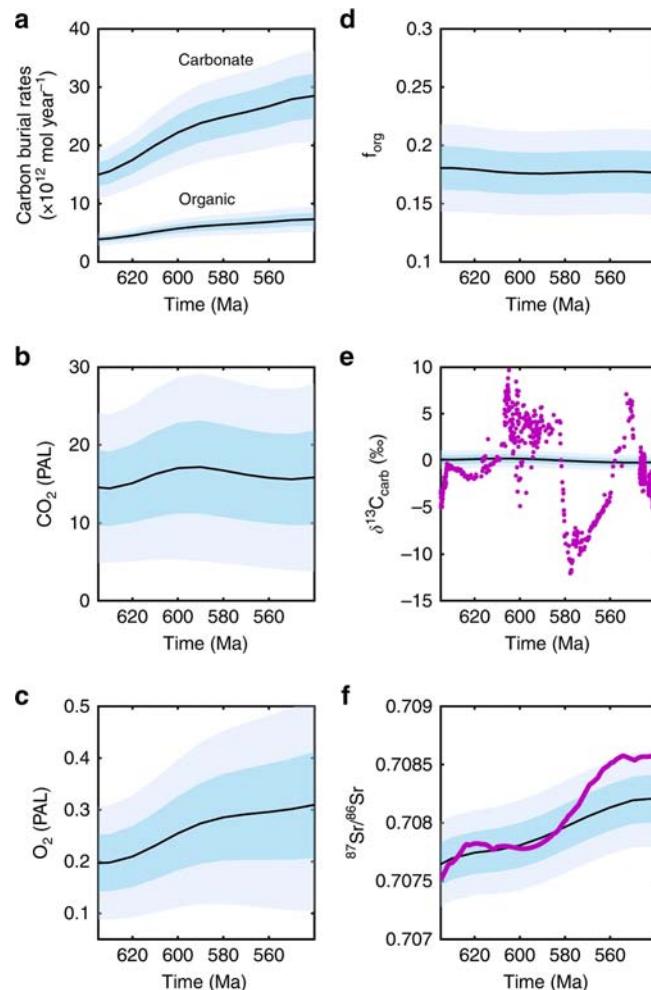


图2 通过运行 COPSE 模型输出的氧、碳循环和锶同位素数值。深、浅蓝色阴影区域分别对应相对误差 ± 0.5 和 ± 1 标准偏差。紫色为地质数据。a. 碳埋藏率；b. 二氧化碳 (PAL)；c. 氧气 (PAL)；d. 有机碳埋藏分数；e. 碳酸盐碳同位素比值；f. 锶同位素比值 (Williams et al., 2019)



量的升高。他们修改了 Lenton et al. (2018) 提出的 COPSE Reloaded 生物地球化学模型，首次将其应用到埃迪卡拉纪，并通过这一模型来估算板块构造活动导致的 CO₂ 增加对大气中氧气浓度的影响（图 2）。模拟计算表明，构造去气的显著增加会导致地球系统中总碳和总硫量的升高，进而增加有机碳和黄铁矿硫的埋藏率，最终导致大气中氧气的含量不断累计升高。模拟结果还

显示，埃迪卡拉纪（635–541 Ma）大气氧含量增加了约 50%，达到现今大气氧气水平的 1/4，在大氧化事件晚期甚至达到 30% 水平。相关预测符合寒武纪生命大爆发期间大型、移动和掠食性动物的需氧量，即大于现今大气氧气水平的 10%–25%。

该文给出了埃迪卡拉纪大氧化事件的第一个定量预测结果，该预测结果与现有的地球化学观测数据一致。

主要参考文献

- Lenton T M, Daines S J, Mills B J W. COPSE reloaded: an improved model of biogeochemical cycling over Phanerozoic time[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 178: 1-28. ([链接](#))
- Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 307. ([链接](#))
- McKenzie N R, Horton B K, Loomis S E, et al. Continental arc volcanism as the principal driver of icehouse-greenhouse variability[J]. *Science*, 2016, 352(6284): 444-447. ([链接](#))
- Och L M, Shields-Zhou G A. The Neoproterozoic oxygenation event: environmental perturbations and biogeochemical cycling[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 110(1-4): 26-57. ([链接](#))
- Williams J J, Mills B J W, Lenton T M. A tectonically driven Ediacaran oxygenation event[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2690. ([链接](#))

(撰稿：张志越 / 岩石圈室)

(修订：彭澎 / 岩石圈室，冯连君 / 科技平台)



Nature Ecology & Evolution：“寒武纪生命大爆发”的再认识

如果你是一个古生物化石爱好者，通过勤奋与幸运，可能在寒武系下部地层（约 541–518 Ma）里收获丰富而似曾相识的各类古生物化石（图 1），如节肢、腕足、软舌螺、蠕形、海绵、脊索生物等。然而，当你继续往下伏更老的埃迪卡拉系地层（约 635–541 Ma）找寻古生物化石时，即便更加勤奋与幸运，或许也仅能找到零星而形态特异的化石（图 2），如印模保存的大型软体宏体生物。事实上，从约 635–518 Ma 期间，地球经历了一段波澜壮阔的生命演化进程，集中体现于埃迪卡拉纪生物群及众所周知的“寒武纪生命大爆发”。埃迪卡拉纪生物群以圆盘状、叶片状、球状等宏体软体生物为特征，以 Avalon 生物群（~571–566 Ma）、White Sea 生

物群（~560–550 Ma）、灯影组石板滩 / 高家山段生物群（< 551–540 Ma）、及 Nama 生物群（~542–538 Ma）等为代表，被认为一定程度代表了“寒武纪生命大爆发”的前奏（舒德干，2009）。“寒武纪生命大爆发”的序幕则以寒武纪初期（~540 ~ 518 Ma）具骨骼后生动物的突然出现、及动物遗迹分异度和复杂性显著增加为特征，主幕则以澄江生物群和清江生物群等两侧对称动物门类“爆发式”出现为特征（舒德干，2009；Fu et al., 2019）。因此，寒武纪早期约 20 Ma 内，绝大多数无脊椎动物门类近似“同时”“突然”出现，长期困扰着达尔文的进化论，并被认为是古生物学和地质学的重大悬案（可参考前沿论坛：《舒德干：幕式寒武纪大爆发与广义人类由来》）。



图 1 寒武纪清江生物群面貌概览 (Fu et al., 2019)

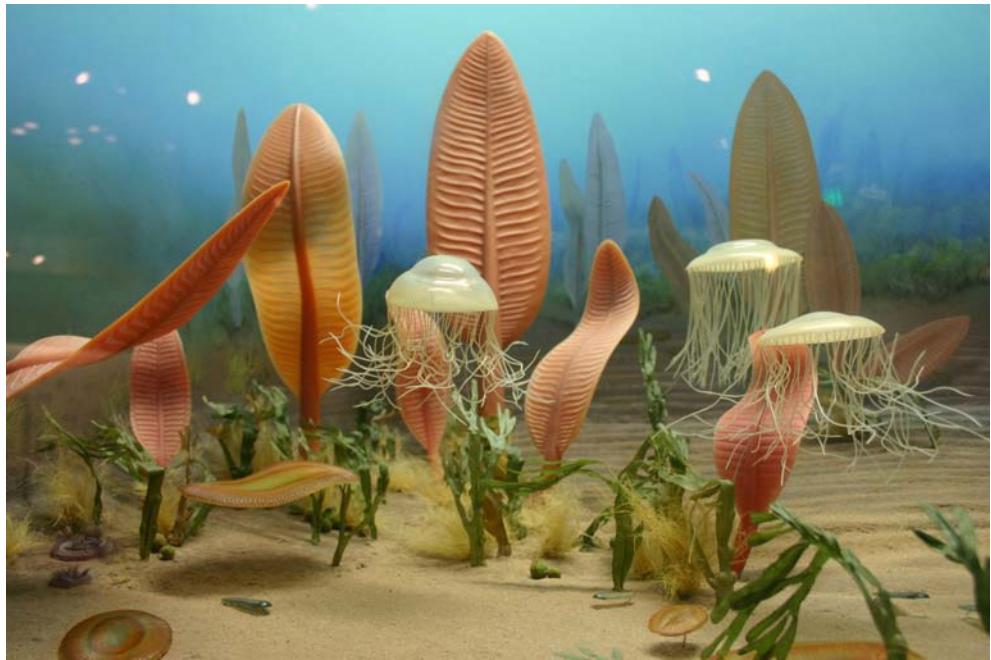


图 2 埃迪卡拉纪生物群面貌概览 (<https://sciencline.org/2014/03/creatures-of-the-ediacaran/>)

学术界围绕“寒武纪生命大爆发”的起源、过程、效应及成因，开展了一系列探讨与争论。关于“寒武纪生命大爆发”是否是一次真实的生物演化事件，已得到大量古生物化石证据的积极支持。关于“寒武纪生命大爆发”的效应，被认为形成了以后生动物为主导的海洋生态系统。关于“寒武纪生命大爆发”的成因，目前已提出了环境变化、生态效应和基因演化等假说（张兴亮和舒德干，2014）。其中，“寒武纪生命大爆发”呈现了前奏—序幕—主幕三阶段生物演化过程（舒德干，2009）；但是关于前奏与序幕之间的演化关系，却存在不同的认识。部分研究认为，埃迪卡拉纪生物群与寒武纪生物群在生物特征和生态系统方面存在显著差异，前者可能只是生物进化史上一次失败的试验品，二者之间经历了彻底的生物大绝灭和生态更替事件，导致二者不具有明确的演化关系。其他研

究认为，后生动物的起源和分异时间明显早于寒武纪，“寒武纪生命大爆发”与埃迪卡拉纪生物群可能存在一定的过渡和演化关系。因此，“寒武纪生命大爆发”与埃迪卡拉纪生物群到底有何关联？二者之间是否为彻底的绝灭—取代亦或渐变演化关系？同时期环境是否及如何影响生物群的演化？

围绕上述问题，为克服古生物化石产出局地性和古环境重建多解性，英国爱丁堡大学地球科学学院 Rachel Wood 教授及其合作者通过系统综合埃迪卡拉纪—寒武纪时期的化石记录、环境指标及年代格架，从更长的地质时间尺度对“寒武纪生命大爆发”的来龙去脉进行梳理，探讨后生动物演化的环境驱动因素，**相关成果**近期发表于 *Nature Ecology & Evolution* (Wood et al., 2019)。

Wood 等以出现新的生物学特征和生



态策略为依据，提出了不同生物类群及其演替序列（图 3，图 4）。Avalon 生物群（~571–555 Ma）以圆盘或叶片状、非两侧对称的宏体软体生物为主，疑似后生动物；其后转变为 White Sea (~560–551 Ma) 生物群，软体生物多样性和分异度显著增加，并首次出现了可移动的两侧对称生物和遗迹化石；其后转变至埃迪卡拉纪末期的 Nama 生物群 (~555–541 Ma)，虽然软体生物多样性较低，但是在浅水碎屑岩和碳酸盐岩沉积环境里分别出现了具有有机质管壁和生物矿化的管状生物；其后转变至寒武纪生物群，干群和冠群两侧对称动物快速辐射，迎来了众所周知的“寒武纪生命大爆发”；其后冠群后生动物进一步演化，并在奥陶纪再次形成“生物大辐射”事件（Great Ordovician Biodiversification Event）。

值得注意的是，越来越多的研究揭示，埃迪卡拉纪生物群与寒武纪生物群具有一定的共存时段（图 3）。例如，俄罗斯西伯利亚地区埃迪卡拉系上部地层里，前寒武纪晚期典型的弱矿化动物骨骼化石与寒武纪典型的动物骨骼化石共生（Zhu et al., 2017）；中国陕西南部灯影组为埃迪卡拉系上部地层，但已产出寒武纪早期代表性的壳化石动物群及管状化石（Cai et al., 2019）。因此，埃迪卡拉纪至寒武纪（E-C）转折时期的生物群落演替呈现一定的继承和渐变演化特征（图 3）。传统认为埃迪卡拉纪生物群和寒武纪生物群之间的生物大绝灭和彻底替换，一定程度源于地质和化石记录不完整和取样偏差（图 4），以及有限的地质年代约束，导致对生物更替速率和样式缺乏精准认识。

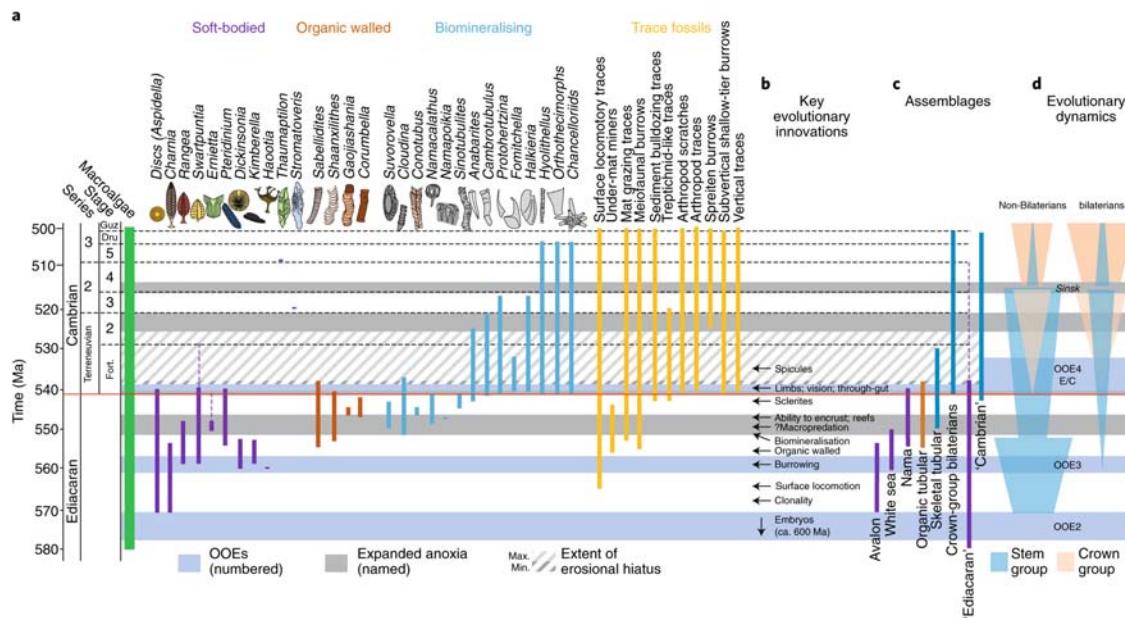


图 3 埃迪卡拉纪 – 寒武纪时期生物演化进程。埃迪卡拉纪中晚期出现了一系列生物革新，包括迁移能力、生物矿化、冠群两侧对称动物和捕食行为等。注意，埃迪卡拉纪生物群与寒武纪生物群具有一定的共存时段（Wood et al., 2019）

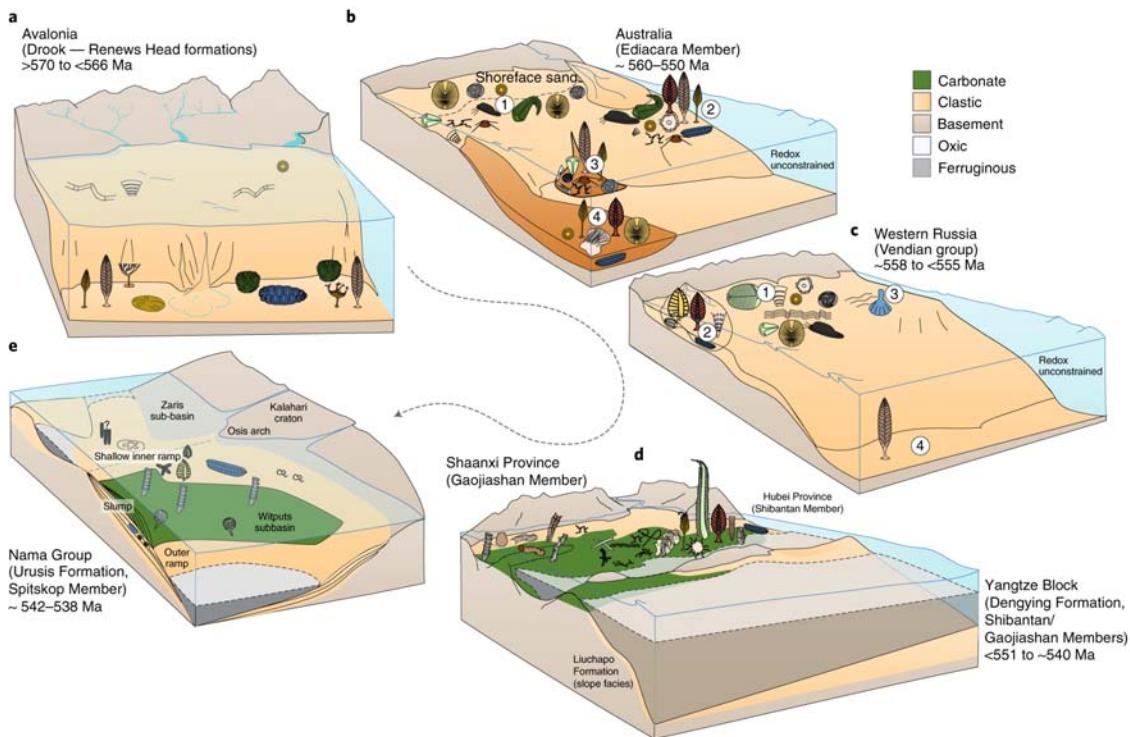


图 4 埃迪卡拉纪生物群的产出、分布和演替模式。埃迪卡拉纪生物群的产出与沉积相有一定的关联性，并通常分布在总体缺氧背景下的局部（或间歇式）氧化海域（Wood et al., 2019）

同时，Wood et al. (2019) 进一步指出，埃迪卡拉纪至寒武纪时期大气和海洋氧气含量及其动态波动，是同时期生物演化的重要控制因素。毫无疑问，氧气是绝大多数动物生存并维持一定多样性的必要条件。埃迪卡拉纪至早古生代，海洋氧化还原状态总体呈现空间结构不均一、且动态变化特征，并经历了多期次、间歇式海洋氧化-缺氧事件，促成了从元古宙低氧海洋向显生宙氧化海洋的转变，并深刻影响着生物演化（图 5）。一方面，Gaskiers 冰期之后的海洋氧化事件可对应 Avalon 宏体生物群；Shuram 碳同位素负偏时期的海洋氧化事件可对应可移动的两侧对称动物的首次出现；E-C 界线附近潜在的海洋氧化事件可对应两侧对称动物的加快辐射；寒武纪第二世时期及之后，海洋氧化程度逐渐增加，可对应后生动物爆发式辐射及生态系统的建立。

另一方面，寒武纪初期碳同位素负偏事件（BACE）所暗示的全球浅海广泛缺氧事件，可对应埃迪卡拉纪软体生物群的消亡；早寒武世 Sinsk 缺氧事件（~513 Ma）可对应海绵动物、软体动物和腕足动物多样性的衰减。海洋环境动态波动背景下，一旦海洋从缺氧状态恢复为持续而稳定的氧化状态，生物演化创新又将迎来宝贵的机会。因此，E-C 时期海洋氧化还原状态的非稳定性、非均一性演变，可能驱动了同时期生物间歇式演化革新（图 5）。需要强调的是，E-C 时期海洋氧气含量何时达到何等后生动物生理需求阈值，以及达到阈值之后是否仍是其演化的主要驱动因素，存在大量争论。事实上，E-C 时期海洋氧化程度和生物演化的响应，绝非简单的线性因果关系，在叠加生物生态和基因因素，以及生命与地球系统之间的相互反馈效应之后，显得十分复杂。

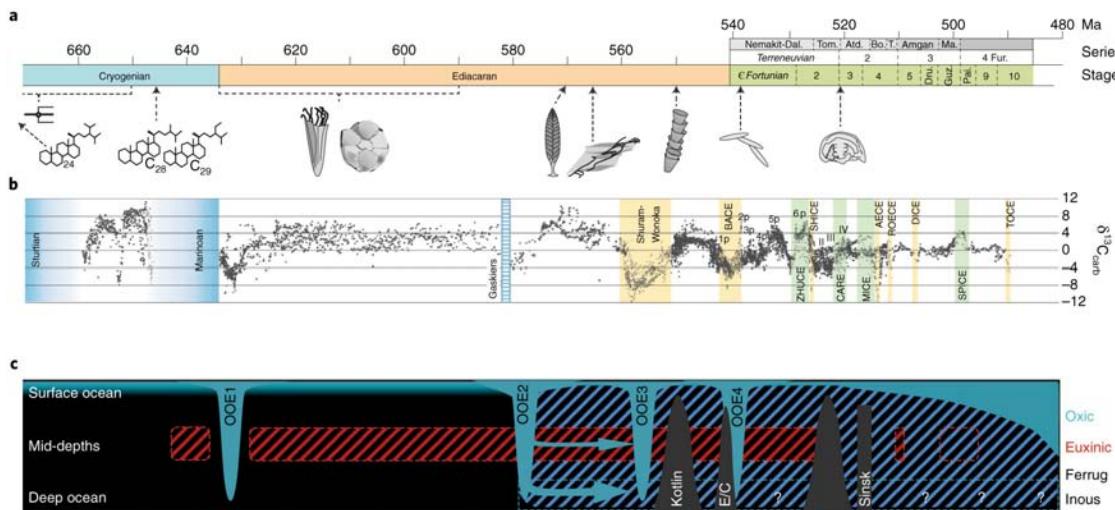


图 5 670-480 Ma 期间, 生物类群、碳同位素及海水氧化还原状态的演化模式。海洋氧化还原状态具有非均一、非稳定的时空演化特征, 并经历了多期次、间歇式氧化和缺氧事件, 最终完成了从元古宙低氧海洋向显生宙氧化海洋的转变, 深刻影响着生物演化 (Wood et al., 2019)

总之, 古生物学和地球化学综合记录揭示, “寒武纪生命大爆发”不是一个孤立的生物演化事件, 寒武纪冠群后生动物生态系建立在埃迪卡拉纪一系列生物辐射与革新、及环境 - 生物相互反馈的基础之上, 具有渐进演化的特征。对于“寒武纪生命大爆发”之谜, 未来需要从更广的地质时间和空间尺度, 建立更加连续而全面的化石记录, 深化分子生物学、地球化学、同位素年代学等研究内容, 从生物与环境

相互作用的角度, 揭秘后生动物的起源、发展与繁盛。中国新元古界至寒武系海相地层发育和保存较好, 古生物化石和古环境记录十分丰富, 相关研究已取得了丰硕成果和国际领先优势, 并成长出一批人才队伍, 未来可期。

致谢:感谢中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室杨浩博士的图件推荐。

主要参考文献

- Cai Y, Xiao S, Li G, et al. Diverse biomineralizing animals in the terminal Ediacaran Period herald the Cambrian explosion[J]. *Geology*, 2019, 47(4): 380-384.([链接](#))
- Fu D, Tong G, Dai T, et al. The Qingjiang biota—A Burgess Shale-type fossil Lagerstätte from the early Cambrian of South China[J]. *Science*, 2019, 363(6433): 1338-1342.([链接](#))
- Wood R, Liu A G, Bowyer F, et al. Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian Explosion[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3: 528–538.([链接](#))
- Zhu M, Zhuravlev A Y, Wood R A, et al. A deep root for the Cambrian explosion: Implications of new bio-and chemostratigraphy from the Siberian Platform[J]. *Geology*, 2017, 45(5): 459-462.([链接](#))



舒德干. 寒武纪大爆发与动物树的成型 [J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(2): 111-134.

张兴亮, 舒德干. 寒武纪大爆发的因果关系 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(6): 1155-1170.

(撰稿: 张恭境, 周锡强 / 油气室)



Science Advances : 中奥陶世生物大辐射的触发机制——来自 L 型球粒陨石的证据

于奥陶纪生物大辐射事件(GOBE)的成因，目前存在两种观点。一种观点认为中奥陶世动物群落和气候的变化与一颗直径约 150 km 的 L 型球粒陨石母体(LCPB)的裂解有关。而且，这次裂解也是地球过去 30 亿年来所记录的最大一次陨石裂解事件。中奥陶世沉积物中普遍存在的陨石颗粒(直径 1–20 cm)就是这次陨石母体裂解的证据。另一种观点是从牙形石氧同位素古温度计的推算来揭示奥陶纪全球气候表现为一个不断趋冷的过程，并以此来解释这次生物大辐射事件(Trotter et al., 2008)。

目前，支持宇宙因素触发 GOBE 的证据有：已有的铬尖晶石数据支持这次裂解发生的时间为~466 Ma。在瑞典 Hällekis-Thorsberg 剖面中存在一套厚约 5 m 的地层(当地居民称作 Arkeologen 层)，在其中发现了超过 130 颗陨石，且均为 L 型球粒陨石。通过测量这些陨石中的铬铁矿颗粒的²¹Ne 数据，将这一裂解事件发生的时间约束在距离 Arkeologen 层底界之下~0.4–1.2 m 之间。关于 LCPB 裂解和 GOBE 事件是否存在因果关系的争论的原因在于缺少高分辨率的证据来限定这次裂解事件发生的精确时间。

为了解决这一问题，来自瑞典隆德大学的 Schmitz 教授及其合作者近期在 *Science Advances* 上发表了他们的研究成果，他们选取位于瑞典南部 Kinnekulle 的 Hällekis-Thorsberg 剖面(图 1)和俄罗斯圣彼得

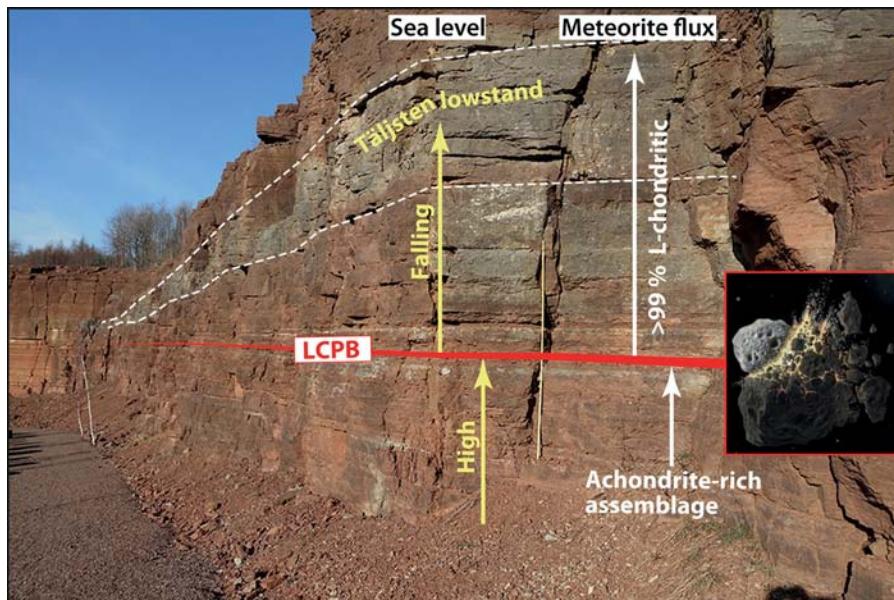


图 1 瑞典南部中奥陶世 Hällekis 剖面。红线代表了 LCPB 裂解的时间(文中所指的~1 m)。在该界面之上，球粒陨石的种类全为 L 型球粒陨石，该界面之上生物碎屑的颗粒大小变粗，指示全球海平面下降。Täljsten 层为一套低位沉积，全球可追踪对比(Schmitz et al., 2019)



堡附近的 Lynna River 剖面，利用高分辨率、多指标（铬尖晶石、 ^3He 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ）的证据来限定地层序列中与这一裂解事件相对应的确切位置。

他们的研究结果表明：Hällekis 剖面的各种分析指标均指示 LCPB 裂解事件发生的时间对应于距离 Arkeologen 层底界之下 1 m（即 -1 m）处。该界面之上，来自宇宙中的铬铁矿颗粒数量显著增加，这种

增加可至少向上延伸 8 m，时间相当于 2-4 Ma。此外，陨石的类型也由界面之下不同种类的陨石变为界面之上单一的 L 型球粒陨石（图 2）。 ^3He 在该界面处发生剧增，指示 LCPB 裂解产生的尘埃首次到达地球（时间误差 ± 50 ka）。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的证据也表明从这一层位处开始地外物质进入海底的数量增加（图 3）。作者又对现今南极陨石中的铬铁矿颗粒进行分析，结果表明该界面之上地层

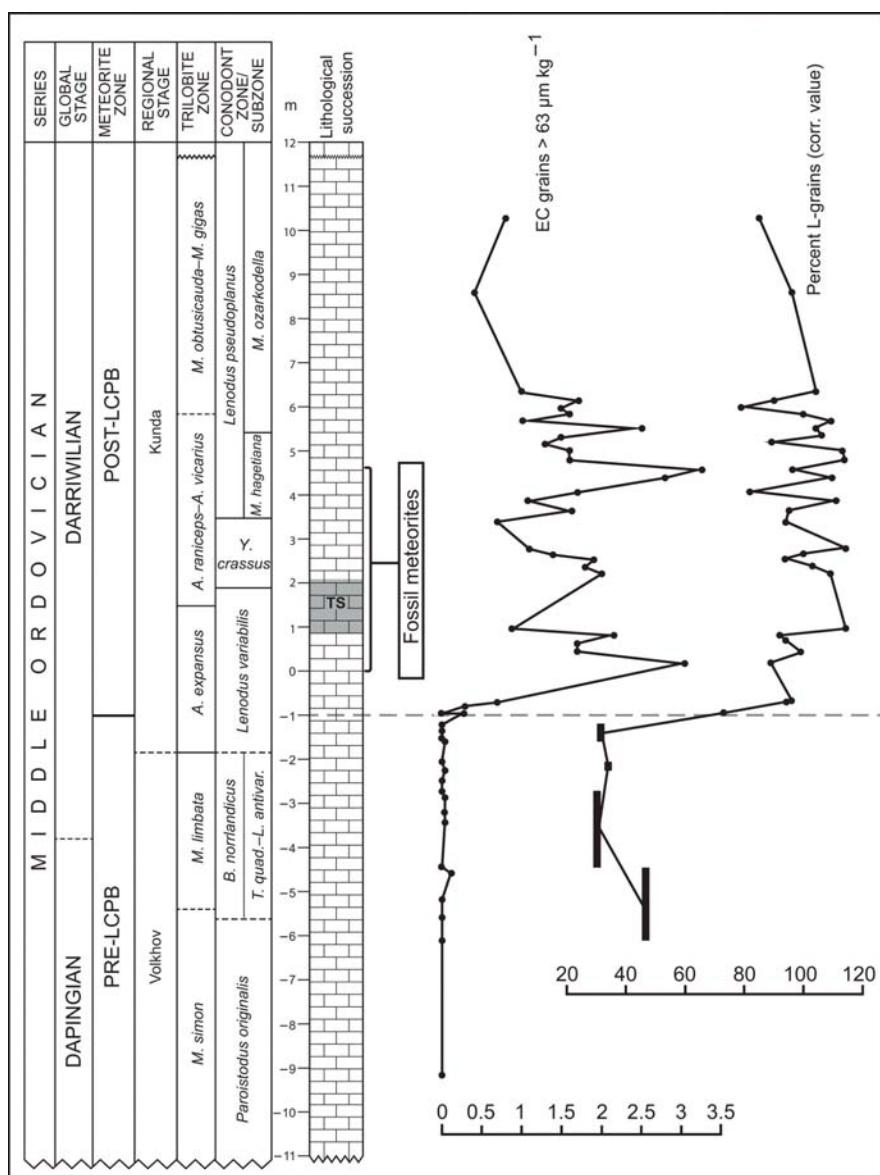


图 2 Hällekis-Thorsberg 剖面中平衡态普通球粒铬铁矿颗粒 (EC) 的分布特征。TS : Täljsten 低位沉积 (Schmitz et al., 2019)



所含有的粒径 $> 32 \mu\text{m}$ 的铬铁矿颗粒就是从这次LCPB裂解事件产生的。此外，作者发现这次裂解事件产生的铬尖晶石通量要比显生宙其他时期高出2-3个数量级。

基于以上证据，作者认为中奥陶世的这次冰期是由LCPB的裂解所触发（或加强）的。在今天地球的大气层中，来自宇宙空间的尘埃只占据了平流层中尘埃总量的1%，不足以对地球的气候产生显著的影响。相反，如果在大气层中尘埃的数量增加了2个数量级以上，且持续了数十万年，必然会导致全球降温。LCPB的裂解不仅影响地球的大气圈，也使得整个太阳系空间变得充满尘埃，这也会遮蔽照向地球的阳光。与此同时，LCPB裂解产生的尘埃会将生物必需的营养元素带入海洋，提高古海洋生物的初级生产力，从而导致大气中 CO_2 浓度降低。

从沉积学角度来看，证明这次冰期存在的沉积记录是“Täljsten层”，它一直被解

释为Kunda沉积旋回的低位体系域。这套低位体系域在波罗的海、劳伦大陆、西伯利亚、冈瓦纳大陆和中国扬子台地均可追踪。在Hällekis剖面，构成“Täljsten低位沉积”的灰岩中生物碎屑在整个剖面中是最粗的，指示很强的水动力条件。此外，该突变界面之上的灰岩 Al_2O_3 的含量较低，说明灰岩中粘土含量低，质地干净，这也从侧面反映了这次裂解事件的存在。基于对Lynna River Valley剖面腕足动物群的研究，古生物学家发现LCPB裂解产生的尘埃在剖面中的首现层位对应着浅水腕足群落对深水腕足群落的替换（Rasmussen et al., 2016）。我国华南宜昌普溪河剖面也存在这种变浅的沉积学证据（Heck et al., 2010）。除此之外，证明这套浅水沉积的古生物学证据还包括：浅水腹足、棘皮和介形虫化石等。因此，作者认为困扰地质学家达一个多世纪的“Täljsten低位沉积”是在中奥陶世冰川作用导致的全球海平面下降时期沉积的。

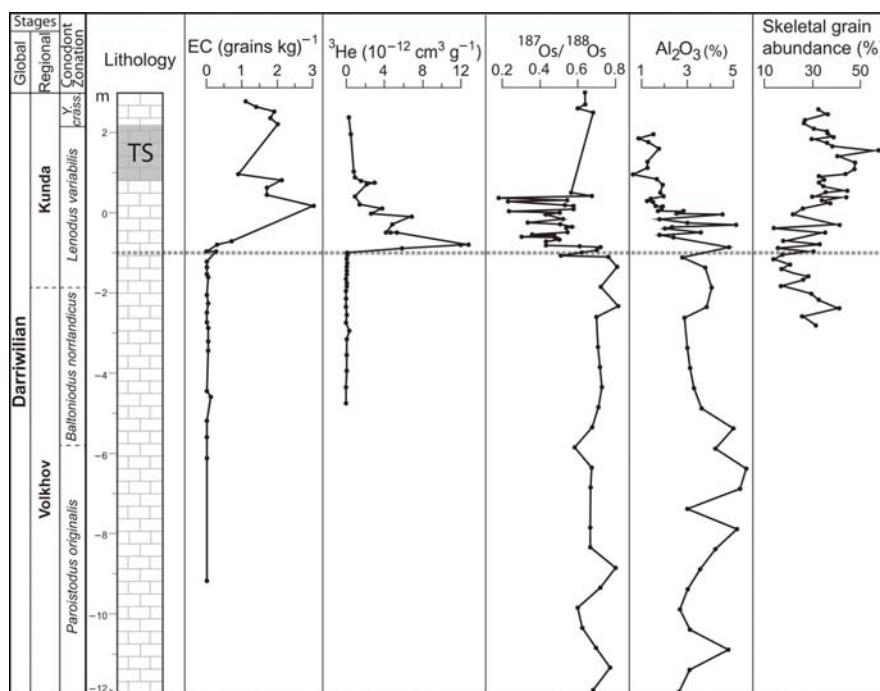


图3 Hällekis剖面下部平衡态普通球粒铬铁矿颗粒(EC)全岩丰度、 ${}^3\text{He}$ 、 Al_2O_3 含量以及 ${}^{187}\text{Os}/{}^{188}\text{Os}$ 比值、生物骨骼碎屑颗粒的丰度(Schmitz et al., 2019)



本研究通过解释上述 LCPB 裂解与中奥陶世冰期、生物大辐射等事件存在的因果关系，解释了为何在一个温室条件下会

存在冰期，这也为我们今天如何应对温室效应提供了一定的参考价值和指导意义。

主要参考文献

- Heck P R, Ushikubo T, Schmitz B, et al. A single asteroidal source for extraterrestrial Ordovician chromite grains from Sweden and China: High-precision oxygen three-isotope SIMS analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(2): 497-509. ([链接](#))
- Rasmussen C M Ø, Ullmann C V, Jakobsen K G, et al. Onset of main Phanerozoic marine radiation sparked by emerging Mid Ordovician icehouse[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(18884): 18884. ([链接](#))
- Schmitz B, Farley K A, Goderis S, et al. An extraterrestrial trigger for the mid-Ordovician ice age: Dust from the breakup of the L-chondrite parent body[J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaax4184. ([链接](#))
- Trotter J A, Williams I S, Barnes C R, Christophe L, et al., Did cooling oceans trigger Ordovician biodiversity? Evidence from conodont thermometry[J]. *Science*, 2008, 321(5888): 550-554. ([链接](#))

(撰稿：刘康，江茂生 / 油气室)



Geology : 火山作用——晚古生代大冰期重要的驱动力

火山喷发产生的硫酸盐气溶胶可以有效降低地球表面接收到的太阳辐射，从而引发晚古生代大冰期的出现。

晚古生代大冰期 (LPIA, 约 360-260 Ma) 是显生宙以来规模最大的冰期事件。一般认为，冰期和间冰期与大气中 CO₂ 浓度的高低有着密切的联系，当其含量较低时，气候往往较寒冷，地球处于冰期；当其浓度较大时，气候则较温暖，地球处于间冰期。以往的研究 (Martin, 1990; Archer, 2000) 也认为大气中的 CO₂ 浓度变化与地球冰期 - 间冰期的转换具有一定的相

关性。照此推论，在 360–260 Ma 晚古生代大冰期最为发育的时候，地球大气中的 CO₂ 含量应该最低，但是恢复出来的古大气 CO₂ 浓度分布 (Foster et al., 2017) 与冰期沉积物的年龄分布并没有很好的一致性 (图 1B)。在约 300 Ma 冰期沉积物数量最多、冰期最为发育的时候，对应的大气 CO₂ 浓度并不是最低，冰期的出现明显滞后于 CO₂ 浓度最低的时候 (338–334 Ma)，这表明大气中 CO₂ 的含量并不是决定冰期形成的唯一因素，仅靠低的 CO₂ 浓度并不足以触发 LPIA 的形成。

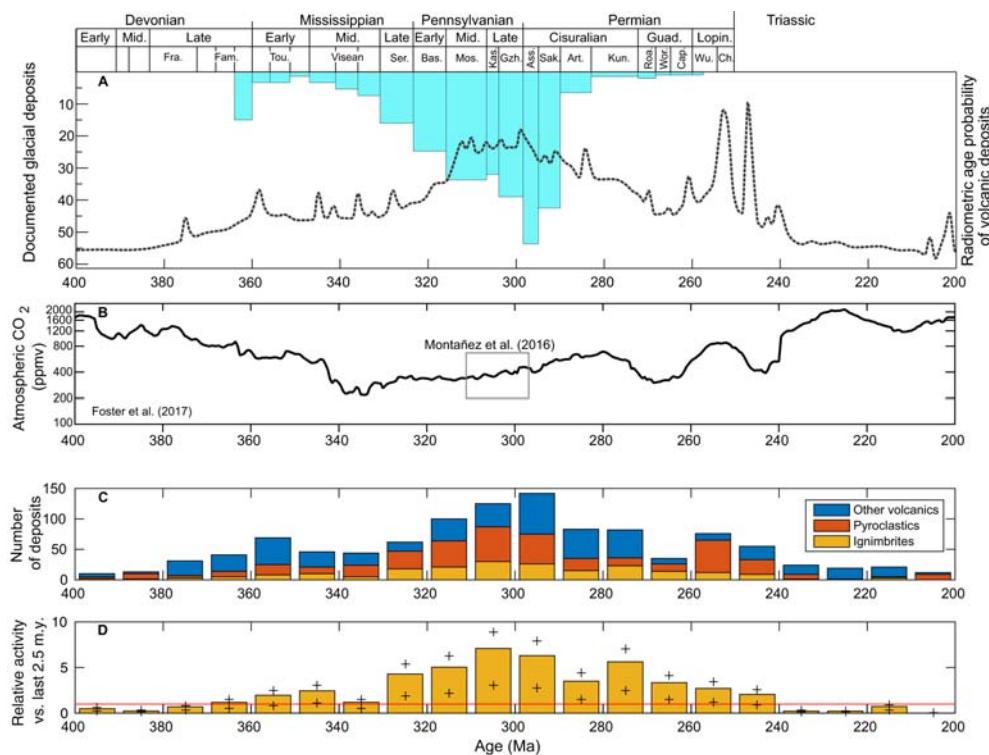


图 1 (A) 晚古生代冰川沉积物年龄与火山建造年龄的对应关系图；(B) 晚古生代大气 CO₂ 浓度演化图；(C) 晚古生代火山建造数量分布图；(D) 晚古生代火山活动规模与 2.5 Ma 以来火山活动规模的对比



Crowley and Baum (1992) 指出假设太阳辐射强度不变，要使地球表面获得的太阳辐射能降低，就需要地球–大气系统的净辐射强迫为负值（辐射强迫 radiative forcing 是指某一因子变化，如大气中 CO_2 浓度的增加，对地球–大气系统能量平衡的影响程度。净辐射强迫为正值时，会驱动地球表面变暖，反之则驱动地球表面变冷）。Zhuang et al. (2014) 认为具有正辐射强迫效应的温室气体会使地球表面的冰融化成具有负辐射强迫效应的水，这样能使地球表面温度降低，从而维持较长时间的冰期。但通过冰川消融来维持冰期是一个难以让人信服的悖论。除了水，还有哪些具有负辐射强迫效应的物质呢？

近日，美国俄克拉荷马大学的 Gerilyn S. Soreghan 和其合作者在 *Geology* 上发文，报道了晚古生代不同纬度的火山建造的年龄分布峰值与同时期的冰期沉积物的年龄分布峰值具有较好的一致性（图 1A），他

们认为大规模的火山喷发注入平流层的具有负辐射强迫效应的硫酸盐气溶胶能有效降低地球表面接收到的太阳辐射能，从而启动并维持近 100 Myr 的晚古生代大冰期。

大气中硫酸盐气溶胶主要来源于火山，其浓度与火山喷发的规模成正比，火山数量越多，规模越大，大气中硫酸盐气溶胶的浓度就越高。Soreghan 及其合作者整合了大量前人发表的晚古生代不同纬度的火山喷发沉积物的放射性同位素年龄数据并分析了这些年龄的频数分布，结果发现火山喷发沉积物的频数在 300 Ma 左右达到最大，这表明这个时期火山活动最强烈，且这个时间正好跟冰期沉积物最为发育的时间基本一致。考虑到火山喷发物中硫酸盐气溶胶的负辐射强迫效应，经过校正，LPIA 大气中的 CO_2 浓度可降低至 560 ppmv 以下，并使得净辐射强迫在 340–260 Ma 之间一直保持负值，从而促使大冰期的形成并长期保持稳定（图 2）。

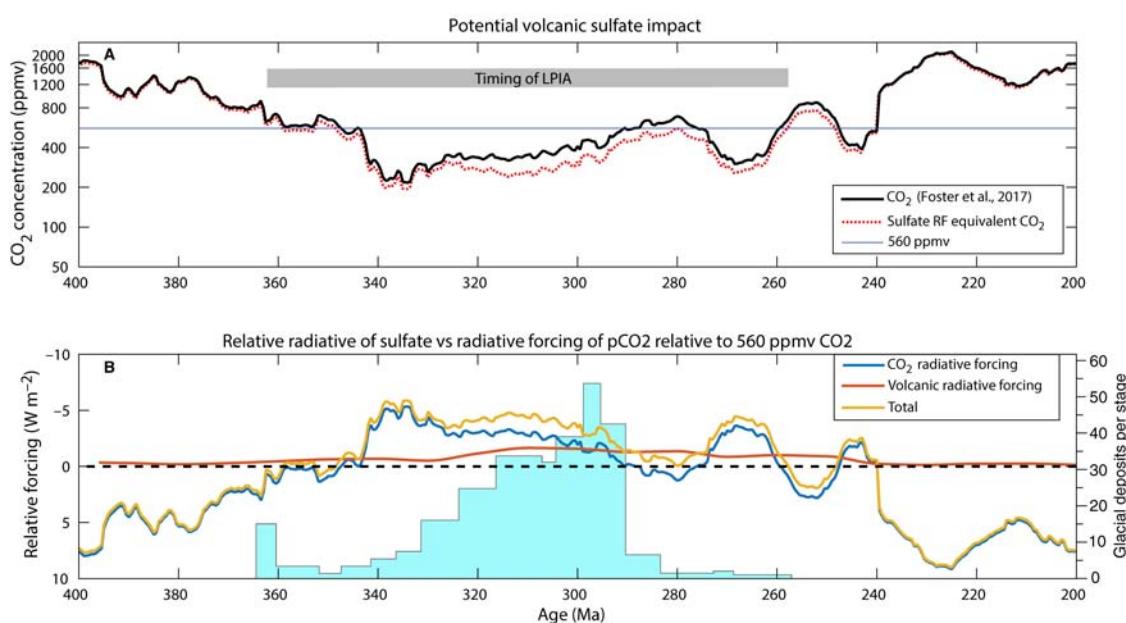


图 2 (A) 经负辐射强迫硫酸盐气溶胶校正前的 CO_2 浓度（黑线）与校正后的实际 CO_2 浓度（红虚线）对比图；(B) CO_2 和火山的辐射强迫与冰期发育时间的对比图，校正后的净辐射强迫（黄线）在 340–260 Ma 期间一直保持负值，使得冰期得以长期保持稳定



值得注意的是，Soreghan 等总结的晚古生代的火山建造年龄并不只有约 300 Ma 这一个峰，260–240 Ma 期间也出现了峰值，但那时冰期并不发育。这表明火山喷发与冰期并不是简单的、一一对应的关系。火山作用与气候演化的相互关系仍然需要更多的研究工作进一步去论证，这也是火山

学研究的重要任务之一。因此，火山学的研究依然任重而道远。

文章数据来源：作者从近 500 篇文章中提炼出了全球晚古生代火山沉积物以及冰川沉积物的年龄等信息，本文用到的数据可以通过[这个网址](#)获取。

主要参考文献

- Archer D, Winguth A, Lea D, et al. What caused the glacial/interglacial atmospheric $p\text{CO}_2$ cycles [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 159-189. ([链接](#))
- Crowley T J, Baum S K. Modeling late Paleozoic glaciation [J]. *Geology*, 1992, 20(6): 507-510. ([链接](#))
- Foster G L, Royer D L, Lunt D J. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14845. ([链接](#))
- Martin J H. Glacial-interglacial CO_2 change: The iron hypothesis [J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 1-13. ([链接](#))
- Montañez I P, McElwain J C, Poulsen C J, et al. Climate, $p\text{CO}_2$ and terrestrial carbon cycle linkages during late Palaeozoic glacial–interglacial cycles [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(11): 824-828. ([链接](#))
- Soreghan G S, Soreghan M J, Heavens N G. Explosive volcanism as a key driver of the late Paleozoic ice age [J]. *Geology*, 2019. ([链接](#))
- Zhuang K, North G R, Giardino J R. Hysteresis of glaciations in the Permo-Carboniferous[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(5): 2147-2155. ([链接](#))

(撰稿：马琳，郭正府 / 新生代室)



Nature Geoscience : 植被对早侏罗世全球变暖的响应

基于陆生植物孢粉及海洋浮游生物微体化石的研究显示，早侏罗世全球变暖事件（图阿尔期大洋缺氧事件）不仅破坏了海洋生态系统，也对陆地生态系统带来重大影响，且对陆地生态系统的影响明显早于海洋。

近年来，温室气体排放导致全球变暖，从而引发了国际社会的强烈关注。一些学者预测全球变暖会对地球系统带来灾难性后果，如极端气候事件频发、生物多样性减少、物种灭绝等。地质历史上的增温事件是评估全球变暖生态效应的重要相似型。早侏罗世图阿尔期（Toarcian）（距今1.83亿年前）发生了持续30–50万年、升温 $\sim 6.5^{\circ}\text{C}$ 的快速全球变暖事件。事件发生期间，大洋缺氧，海洋生物灭绝，并伴随着明显的地球系统碳库的同位素负漂（carbon isotope excursion, CIE），被称为图阿尔期大洋缺氧事件（Toarcian Oceanic Anoxic Event, T-OAE）。大多数学者认为，此次全球变暖由南非及南极洲的卡鲁–费拉大火成岩省释放的巨量CO₂所引发（Pálfy and Smith, 2000）。但是，由于该时期陆相沉积鲜有保存，有关该事件对生态系统影响的研究主要集中于海洋，获取该时期陆地生态系统演化的信息成为研究难题。

近期，瑞典自然历史博物馆古生物学系Slater等通过孢粉研究为回答上述问题提供了重要证据，成果发表于*Nature Geoscience*期刊（Slater et al., 2019）。孢粉是

植物产生的孢子和花粉，因其数量大、抗腐蚀能力强，可以在古老地层中较好地保存下来。因此，沉积物中的孢粉组合已被广泛用于重建古植被演化及气候环境状况。Slater等在英国早侏罗世普林斯巴赫期及图阿尔期（Pliensbachian-Toarcian）浅海陆架沉积的页岩中获取了丰富的陆生植物孢粉和海洋浮游生物化石。结合沉积学及同位素研究，Slater与合作者重建了陆地生态系统对图阿尔期变暖事件的完整响应过程，发现此次变暖事件引发了陆地植物群的巨大转变。

在变暖事件初期，即普林斯巴赫期–图阿尔期界线至CIE之前（图1），陆地植物群即开始发生较大改变，由松柏类、种子蕨（产生双气囊花粉）及喜湿的蕨类和石松类为主的植物组合（图2a）转变为适应暖干环境的松柏类（主要为掌鳞杉科）和苏铁类（产生克拉梭粉及宽沟粉）为主的植物组合（图2b），孢粉丰度及多样性明显降低。相比而言，海洋中虽然发生了浮游生物组合的改变，但变化较小。

在变暖达到鼎盛的时候，即CIE期间，植物的丰度和多样性大幅度降低，植物组合以少量适应干热气候的松柏类（主要为掌鳞杉科）为主（图2c），并出现大量高温环境标志性花粉——脑形粉。同时，海洋生态系统也发生剧烈变化，鞭毛藻和多刺疑源类显著减少，球形亚类及青绿藻等藻类大量增加，并伴随着大量无定型有机物



出现(图2c),指示了海水的富营养化。以上变化伴随着微球粒黄铁矿的出现,揭示了还原性的海洋环境。

变暖事件结束后,植物的丰度和多样性快速增加,恢复到事件之前的水平,但

植物组合却发生了明显变化,掌鳞杉科、柏科及喜湿树种(产生周壁粉)占据主导地位(图2d、图2e)。海洋生态系统则基本恢复至事件前的面貌(图2e)。

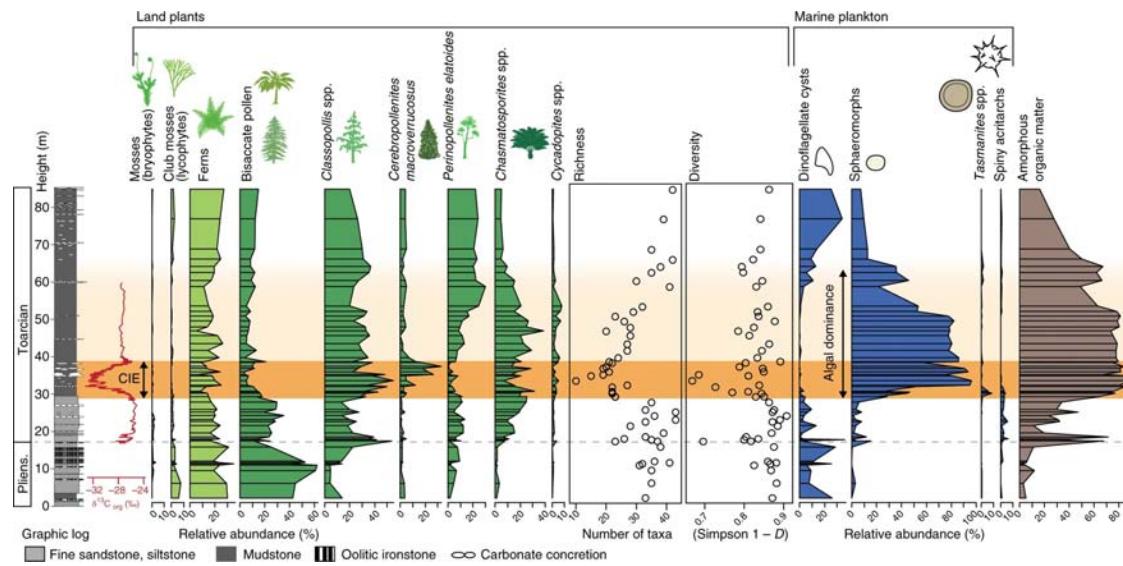


图1 英国约克郡T-OAE期陆地植物和海洋生物记录。橘色条带为气候极热期;浅绿色及深绿色图谱分别为各类孢子和花粉丰度变化;蓝色及棕色图谱分别为各类海洋浮游生物及无定型有机物丰度变化;Mosses:苔藓;Club mosses:石松类;Ferns:蕨类;Bisaccate pollen:双气囊花粉;Classopollis:克拉梭粉;Cerebropollenites macroverrucosus:脑形粉;Perinopollenites:周壁粉;Chasmatosporites:宽沟粉;Cycadopites:苏铁粉;Dinoflagellate cysts:鞭毛藻囊泡;Sphaeromorphs:球形亚类;Tasmanites:一种青绿藻;Spiny acritarchs:多刺疑源类;Amorphous organic matter:无定型有机物

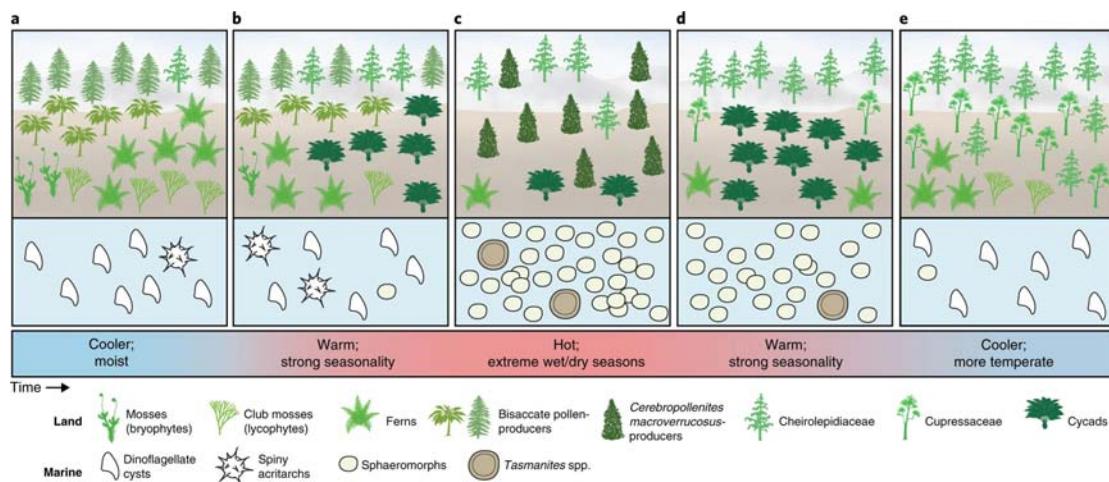


图2 T-OAE期海陆环境演变示意图,图例同图1。(a)普林斯巴赫期,气候湿润;(b)普林斯巴赫期/图阿尔期界线至CIE前,气候变暖具强季节性,陆地植被发生较大转变;(c)图阿尔期CIE时段,气候极暖具极端干/湿季,海陆生态系统发生剧烈变化;(d)图阿尔期CIE结束后藻类爆发阶段,陆地生态系统开始恢复,海洋生态系统恢复滞后;(e)图阿尔期藻类爆发后,海陆生态系统恢复,陆地植被组合已不同于事件前



该研究依据直观的孢粉证据重建的T-OAE时期气候暖干，并且具极端干/湿季（图2），与前人依据沉积特征推断的暖湿气候结论不同。海陆生态系统对比显示，全球变暖初期陆地植物群落即发生较大改变，而海洋生态系统变化较小；全球变暖鼎盛期海陆生态系统均发生剧烈变化。据此，作者认为由于海洋具有较高的热缓冲能力，全球变暖初期陆地生态系统受到的影响更为严重。该现象在地球更早的历史中也曾出现，如近期研究发现，由火山活动引发的二叠纪-三叠纪界线全球变暖使陆地植物先于海洋生物发生灭绝（Fielding et al., 2019）。

该论文作者接受了已有的“火山活动释放温室气体造成全球变暖进而引发生物灭绝”的观点，但亦有学者表示质疑。*Nature Geoscience* 同时刊发针对该文章的评论，强调火山活动释放的汞对陆地植被的破坏不可忽视（Mander and McElwain, 2019）。目前，与二叠纪末生物灭绝（Wang et al., 2018）、白垩纪大洋缺氧事件（OAE 2）、白垩纪末生物灭绝（Percival et al., 2018）等事件相关的火山活动期均已获得汞同位素异常的证据。该研究虽获取了早侏罗世陆地生态系统演化的信息，但还需进一步研究全球范围内陆地生态系统演化过程及其机制。

主要参考文献

- Fielding C R, Frank T D, McLoughlin S, et al. Age and pattern of the southern high-latitude continental end-Permian extinction constrained by multiproxy analysis[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 385.([链接](#))
- Mander L, McElwain J C. Toarcian land vegetation loss[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 405-406.([链接](#))
- Pálfy J, Smith P L. Synchrony between Early Jurassic extinction, oceanic anoxic event, and the Karoo-Ferrar flood basalt volcanism[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 747-750.([链接](#))
- Percival L M E, Jenkyns H C, Mather T A, et al. Does large igneous province volcanism always perturb the mercury cycle? Comparing the records of Oceanic Anoxic Event 2 and the end-Cretaceous to other Mesozoic events[J]. *American Journal of Science*, 2018, 318(8): 799-860.([链接](#))
- Slater S M, Twitchett R J, Danise S, et al. Substantial vegetation response to Early Jurassic global warming with impacts on oceanic anoxia[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 462-467.([链接](#))
- Wang X, Cawood P A, Zhao H, et al. Mercury anomalies across the end Permian mass extinction in South China from shallow and deep water depositional environments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 496: 159-167.([链接](#))

(撰稿：王永达，杨石岭 / 新生代室)



Science : 地质学和天文学约束下的太阳系混沌及古新世—始新世界线年龄

古气候研究的一个难点是年代框架的构建。精准的时间标尺是厘清古气候事件的开始、发展和结束这一全过程，进行不同区域环境效应对比，以及探讨事件发生机理的前提。古气候学家通常基于旋回地层学和天文年代学来构建精细时间标尺。该方法的可靠性依赖于太阳系轨道运动数值解的准确度。目前，学术界通过轨道参数计算，已获得过去 50 Ma 以来完全校正的绝对年龄天文时间标尺。超过 50 Ma，由于太阳系的混沌性，初始条件和参数的微小变化均会导致数值解的巨大差异 (Laskar et al., 2004 ; Ma et al., 2017)，很难获得唯一的天文年代标尺。从古气候角度而言，50-60 Ma 是一个特殊时

期，该时期发生了多次由 CO_2 快速注入到海气系统诱发的增温事件，其中一个典型是古新世 – 始新世极热事件 (PETM)。但到目前为止，由于缺少精细时间标尺，有关 PETM 事件持续时长以及驱动机制仍然存在较大争议。因此，结合地质数据和太阳系轨道运动数值解，构建 50-60 Ma 天文校正的时间标尺显得尤为重要。

最近，夏威夷大学海洋和地球科学学院 Richard E. Zeebe 教授及其合作者基于地质数据和天文学约束，构建了 50-58 Ma 绝对年龄天文时间标尺，研究成果发表于 *Science*。他们通过对 ODP1262 钻孔早新生代颜色数据 (a^*) 的谱分析发现 (图 1)，在深度域上存在 5.10m 和 1.25m 的周期信号，

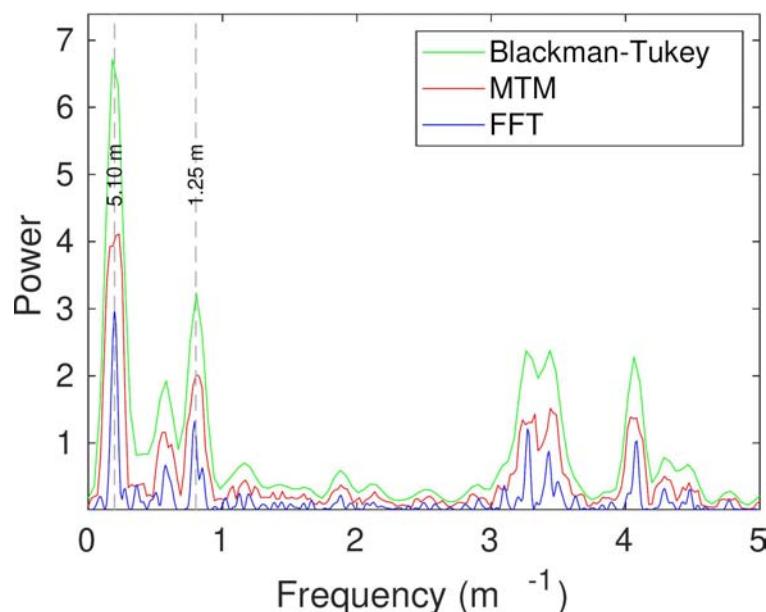


图 1 ODP1262 钻孔色度数据 (a^*) 谱分析结果 (Zeebe and Lourens, 2019, Supplementary materials)



分别对应于偏心率的长周期 (405 kyr) 和短周期 (100 kyr)。根据谱分析结果, 对颜色数据进行高斯滤波, 提取出低频组分并进行加和构建出靶数据 (a^{**})。进一步通过计算靶数据 (a^{**}) 同太阳系轨道运动数值解之间的均方根偏差 (RMSD), 获得了最优天文数值解——ZB18a (图 2)。

新的天文年代标尺 (ZB18a) 为 PETM 事件提供了三点新认识:(1) 古新世–始新世界线年龄为 56.01 ± 0.05 Ma, 明显区别于以往的研究结果 (55.5-55.9 Ma) (Weterhold et al., 2007; Charles et al., 2011), 为进行全球性生物环境效应对比研究提供了更为准确的时间锚点;(2) PETM 事件主体持

续时间为 170 ± 30 kyr;(3) 以往研究认为 PETM 事件的触发同地球轨道参数的配置没有必然的联系 (Weterhold et al., 2007), 然而根据新的年代标尺, PETM 事件的发生与偏心率最大值时期在时间上是一致的, 表明该事件具有天文驱动机制。此外, 研究者还发现地球轨道偏心率在 ~ 50 Ma 呈现出明显的共振转变 (图 3), 进一步证实了该时期太阳系的混沌性特征。

该研究通过地质数据和天文学的约束, 构建了早新生代绝对天文时间标尺 (ZB18a), 为进一步系统研究早新生代极热事件发生、发展过程及进行全球气候环境效应的对比奠定了坚实的年代学基础。

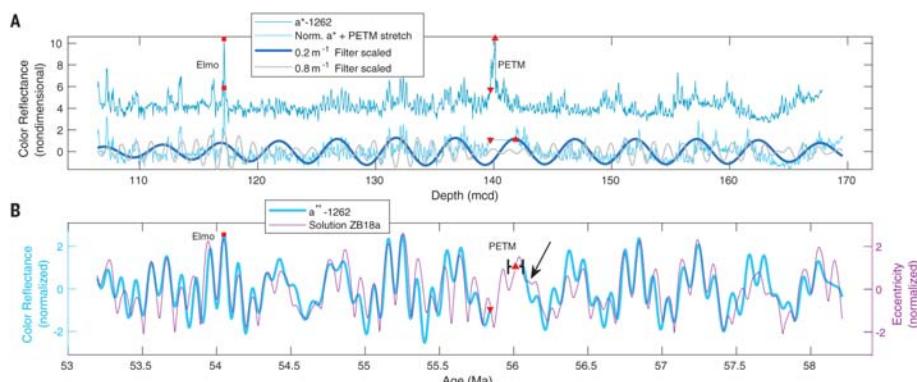


图 2 ODP1262 钻孔颜色反照率 a^* 的数据分析及其同天文数值解 ZB18a 的对比
(Zeebe and Lourens, 2019)

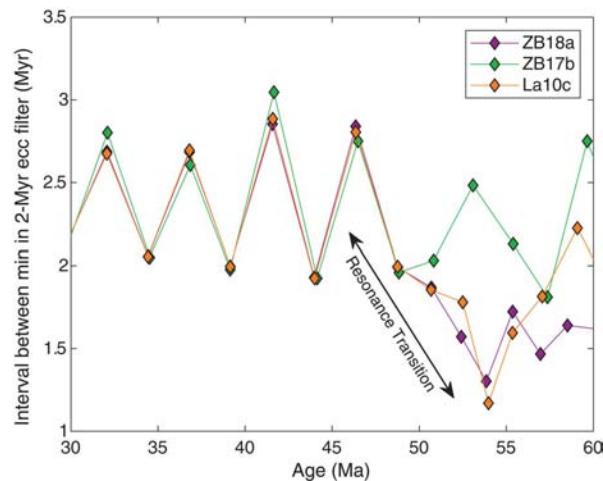


图 3 天文数值解共振转化



主要参考文献

- Charles A J, Condon D J, Harding I C, et al. Constraints on the numerical age of the Paleocene - Eocene boundary[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(6).([链接](#))
- Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.([链接](#))
- Ma C, Meyers S R, Sageman B B. Theory of chaotic orbital variations confirmed by Cretaceous geological evidence[J]. *Nature*, 2017, 542(7642): 468-470.([链接](#))
- Westerhold T, Röhl U, Laskar J, et al. On the duration of magnetochrons C24r and C25n and the timing of early Eocene global warming events: Implications from the Ocean Drilling Program Leg 208 Walvis Ridge depth transect[J]. *Paleoceanography*, 2007, 22(2).([链接](#))
- Zeebe R E, Lourens L J. Solar System chaos and the Paleocene-Eocene boundary age constrained by geology and astronomy[J]. *Science*, 2019, 365(6456): 926-929.([链接](#))

(撰稿：陈祚伶 / 新生代室)



Science : 始新世青藏高原海拔不超过 3000 米——重新审视青藏高原同位素古高度研究

新 生代以来，地球上最为显著的地貌变化就是印度与亚洲板块碰撞导致的青藏高原的隆升。长期以来，关于碰撞的起始时间、碰撞方式与过程以及古高度等均有较大的争议。青藏高原古高度是板块碰撞过程的表征和计量，更是联系深部岩石圈与浅表层圈演化的纽带，研究高原不同地区、不同时间的古高度，是非常重要的科学问题，只有准确重建古高度，才能正确评价高原隆升机制与扩展过程及其对区域与全球气候的影响。

近十年来，青藏高原的稳定同位素古高度重建成为了热点方法之一，其代表性的研究工作是 Rowley and Currie (2006) 发表在 *Nature* 的文章，他们通过对青藏高原中部伦坡拉盆地的牛堡组、丁青组的湖泊与古土壤钙结核碳酸盐氧同位素组成的研究，利用瑞利 (Rayleigh) 分馏模型的氧同位素高度效应，提出了早在晚始新世的 35 Ma，高原中部已经达到与现今类似的 4600 米，甚至 4800 米高度的观点。但是，来自伦坡拉盆地的后续研究发现，无论是古脊椎动物古生态重建 (Deng et al., 2012)，还是孢粉的古高度重建 (Sun et al., 2014) 均认为其渐新世晚期 – 早中新世的高度不超过 3000 米左右。来自伦坡拉盆地的最新植物化石（常绿阔叶植物的棕榈叶子化石）的证据，更是将伦坡拉盆地的古高度限定在 2300 米以下 (Su et al., 2019)。动植物化石与稳定同位素古高度重建的巨大差异，

无疑加剧了古高度的纷争，急需新的视角重新审视高原古高度问题。

最近以法国 Svetlana Botsyun 为首的科学家，在 *Science* 以“Research Article”形式发表了他们基于氧同位素的大气环流模型和地质记录的交叉检验，重新审视青藏高原同位素古高度的研究结果，并提出青藏高原的始新世海拔高度不超过 3000 米，这与此前的动植物化石结果相一致。

该文的模型充分考虑了始新世时的边界条件，包括始新世的古地理分布（更南的喜马拉雅造山带以及喜马拉雅北侧宽阔的副特提斯海）、不同的海拔高度、始新世的大气 CO₂ 浓度 (1120ppm，现今的 3 倍左右)、海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 等，他们的模拟结果清楚地显示：始新世时（图 1C）印度季风已经形成，季风北缘限定在北纬 20 度以南的印度板块前陆地区 (India Foreland)，高原内部及亚洲腹地为比现今更强的西风环流控制，因而与现今的大气环流模式完全不同。更重要的是，他们的降水氧同位素模拟结果与现今更是大相径庭，甚至出现了反高度效应（图 1D）。

通过不同海拔的模拟结果与地质记录的交叉检验，他们发现在海拔 3000 米以下时，二者的相关性最好，因此提出了青藏高原在始新世的海拔高度不超过 3000 米的观点。

他们对当前流行的稳定同位素古高度

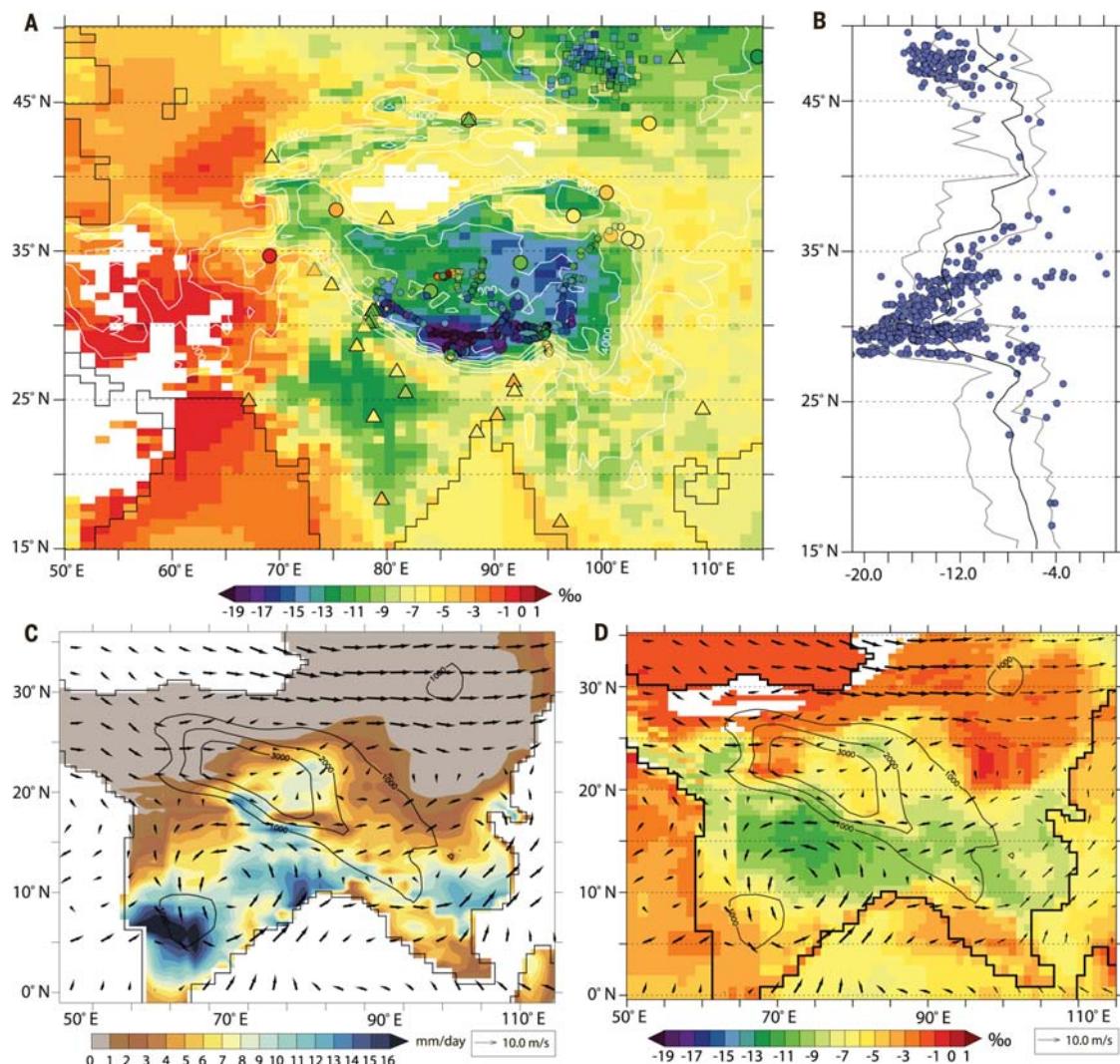


图 1 青藏高原现今与始新世的气候模拟。(A) 现今青藏高原及其周边地区夏季大气降水氧同位素分布；(B) 现今大气降水氧同位素的纬度效应；(C) 模型模拟的始新世大气降水分布模式；(D) 模型模拟的始新世大气降水氧同位素分布模式 (Botsy whole et al., 2019)

方法提出了质疑，认为这一方法并不适合进行古高度重建：(1) 瑞利模型只适合单一水汽来源，然而始新世的青藏高原既受印度洋和孟加拉湾的水汽，也受来自副热带斯海的水汽影响；(2) 环流格局大不相同，印度季风在始新世影响范围有限，但

西风环流比现今强劲的多，干旱带也比现今宽阔的多；(3) 造山带位置与高度差异大；(4) CO_2 浓度、海表温度 (SST) 差异巨大。

他们最后建议：气候模拟与地质记录相结合，是研究高原古高度的有效手段。



主要参考文献

- Botsyun S, Sepulchre P, Donnadieu Y, et al. Revised paleoaltimetry data show low Tibetan Plateau elevation during the Eocene[J]. *Science*, 2019, 363(6430): eaaq1436.([链接](#))
- Deng T, Wang S Q, Xie G P, et al. A mammalian fossil from the Dingqing Formation in the Lunpola Basin, northern Tibet, and its relevance to age and paleo-altimetry[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(2-3): 261-269.([链接](#))
- Rowley D B, Currie B S. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet[J]. *Nature*, 2006, 439(7077): 6777-681.([链接](#))
- Su T, Farnsworth A, Spicer R A, et al. No high Tibetan Plateau until the Neogene[J]. *Science Advances*, 2019, 5(3): eaav2189.([链接](#))
- Sun J M, Xu Q H, Liu W M, et al. Palynological evidence for the latest Oligocene-early Miocene paleo-elevation estimate in the Lunpola Basin, central Tibet[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014; 399: 21-30.([链接](#))

(撰稿：[孙继敏](#) / 新生代室)



Nature : 新近纪全球变冷驱动因素是陆表风化强度增强而非风化通量增大

工业革命以来大气 CO₂ 浓度持续增加，全球气候变暖问题受到世界各国政府、科学界和社会的广泛关注。然而，如果从人类尺度延伸至构造尺度（百万年），全球气候变化的显著特点是自新生代尤其是新近纪以来呈现出长期变冷的趋势，同时伴随着构造运动、大气 CO₂ 浓度的降低、南北两极冰盖的出现和发展（Zachos et al., 2001）。究竟什么因素驱动了新生代以来全球气候的长期变冷，是科学家们自 19 世纪初期以来一直在寻找并试图解决的重大科学问题。

随着研究工作的深入，“构造隆升驱动气候变化”假说（Raymo and Ruddiman, 1992）成为解释新生代全球变冷的重要观

点。该假说认为构造隆升可通过两种途径影响全球气候变化：(1) 高原隆升导致的大气 – 海洋环流格局变化直接影响气候变化；(2) 构造隆升导致地表硅酸盐岩化学风化作用增强，使大气 CO₂ 浓度下降，从而间接引起全球温度变化（Ruddiman, 1997）（图 1）。以 Raymo 和 Ruddiman 为代表的很多学者，通过将新生代全球构造抬升与大陆化学风化、全球气候变化等联系在一起，认为由于构造隆升运动的加剧，引起大陆化学风化速率增强，导致大气 CO₂ 浓度的下降，对全球气候变冷具有重要且深远的影响。

大陆化学风化主要包括碳酸盐岩风化和硅酸盐岩风化。由于碳酸盐岩风化主要

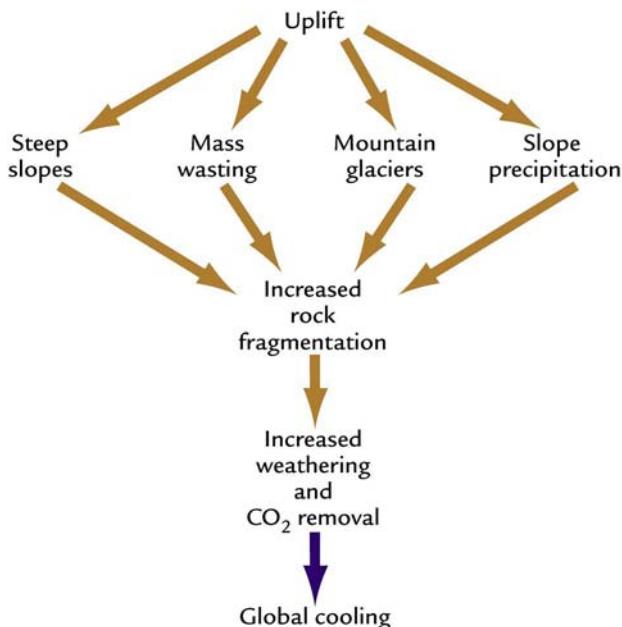


图 1 构造隆升驱动气候变化假说模型 (Raymo and Ruddiman, 1992)



是岩石中白云石或方解石的酸解作用，在这一化学反应过程中，1个陆地碳酸盐分子溶解，产生了1个大气CO₂分子，因此对于陆地碳酸盐岩风化而言，不影响大气中的CO₂浓度；而硅酸盐岩的风化作用则主要是将大气CO₂分子转变成为碳酸盐沉积下来，在长时间尺度上对大气中的CO₂浓度下降具有显著影响。因此，对全球气候变化具有深远影响的大陆化学风化通常指硅酸盐岩风化。在探讨风化过程时，需要特别强调风化强度和风化速率（或风化通量）的差别。风化强度是沉积物受风化改造的程度。风化速率，一般换算成硅酸盐岩风化速率，即单位时间（单位面积）陆表硅酸盐岩化学剥蚀量（或厚度）。如何示踪大陆化学风化速率（或风化通量）？

海洋Sr同位素组成主要是为幔源和壳源。整个新生代时期全球海底扩张等地球内部运动的平均速率变化较小，早在1948年Wickman就已经提出海洋Sr同位素在全球范围内是均一的；而陆地来源的Sr同位素则主要由陆地风化作用控制，且多数为放射性成因的Sr。由于高原隆升等构造活动可引起大规模的构造热事件，使岩石发生变质和部分熔融等作用，从而扰动和破坏矿物的Rb-Sr体系，使放射性成因的Sr同位素迁移到易风化矿物中，导致风化产物中放射性成因Sr同位素增加，并借由河流作用进入海洋。通过对比Sr同位素与地质历史时期中发生的构造事件，Raymo and Ruddiman（1992）认为海水Sr同位素变化可作为全球地表化学风化的替代性指标，⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值高，即指示硅酸盐岩风化速率高。

沉积盆地记录等显示全球侵蚀速率

自中新世以来增加2-10倍（Zhang et al., 2001），基于热年代学推断的剥蚀速率显示在过去的8 Ma期间山体侵蚀增加了2-4倍（Herman et al., 2013）。剥蚀通量越大，则意味着风化通量越高。海洋⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值的增高，一直以来被认为是大陆硅酸盐风化通量增大从而导致新近纪以来全球变冷的证据。然而，有研究显示海洋⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值与未风化全岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值相近（Bataille et al., 2017），由于受剥蚀方式、源区母岩同位素组成等的影响，海洋⁸⁷Sr/⁸⁶Sr能否用于示踪大陆硅酸盐岩风化通量非常值得质疑。

亥姆霍兹波茨坦中心德国地学中心的von Blanckenburg研究团队，建议用来源于大陆剥蚀的海水溶解的稳定同位素⁹Be与海水溶解的恒定的大气稳定同位素¹⁰Be的比值作为替代性指标。他们相关的研究表明，海水和海洋Fe-Mn壳的¹⁰Be/⁹Be比值均显示12 Ma以来全球大陆硅酸盐岩风化通量基本没有发生变化（Willenbring and von Blanckenburg, 2010），说明全球变冷在时间、空间上对平均风化速率的影响不大。因此，他们认为晚中新世以来的脉冲式山体隆升既不是全球气候变化的直接因素也不是必然结果。然而，只有恒定的化学风化通量，并无法解释同时期的大气CO₂浓度降低以及化学风化通量稳定的情况下为什么全球气候依然在变冷。

经典假设认为硅酸盐风化通量是对气候的负反馈，CO₂浓度的变化导致大气温度和径流的变化，进而改变化学风化通量；与上述依靠改变风化通量来解释全球变冷的假设相反，增加硅酸盐风化有效性可以更有效地去除碳，从而降低CO₂浓度，整



个过程中风化通量无变化 (Berner and Caldeira, 1997)。然而, 尚无直接的数据来约束这种效率变化的精确机制。

通过浮游有孔虫重建的古近纪以来的海水锂同位素记录显示 $\delta^7\text{Li}$ 浓度的快速增加, 与构造抬升加快及大陆剥蚀速率增加相一致 (Misra and Froelich, 2012)。由于 Li 同位素可指示陆地风化过程中形成的粘土的相对数量以及硅酸盐风化强度, Be 同位素可指示进入洋盆的硅酸盐风化通量。在此研究背景下, 为了鉴定上述机制, 苏黎世联邦理工学院 Rugenstein 与亥姆霍兹波茨坦中心德国地学中心的 von Blanckenburg 合作将这两个对风化敏感同位素 (${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$,

${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$) 的风化带过程嵌入到碳循环的长期模型中, 建立了 CLiBeSO-W 模型, 用这个模型来确定与新近纪海洋 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ 记录和大气 CO_2 浓度记录相匹配所需的地质驱动力 (Rugenstein et al., 2019), 相关成果发表于 *Nature*。

模拟结果显示过去 16 Ma 以来, 要同时降低大气 CO_2 浓度、增加海水 ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ 比值和保持恒定的海水 ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ 比值, 则必须增加陆地表面的反应性 (即陆表风化强度)。他们发现在剥蚀增加的情况下, 即使全球硅酸盐岩风化强度降低, 但是全球硅酸盐岩风化通量依然保持稳定 (图 2)。因此, 新近纪的长期全球变冷反映了剥蚀、风化

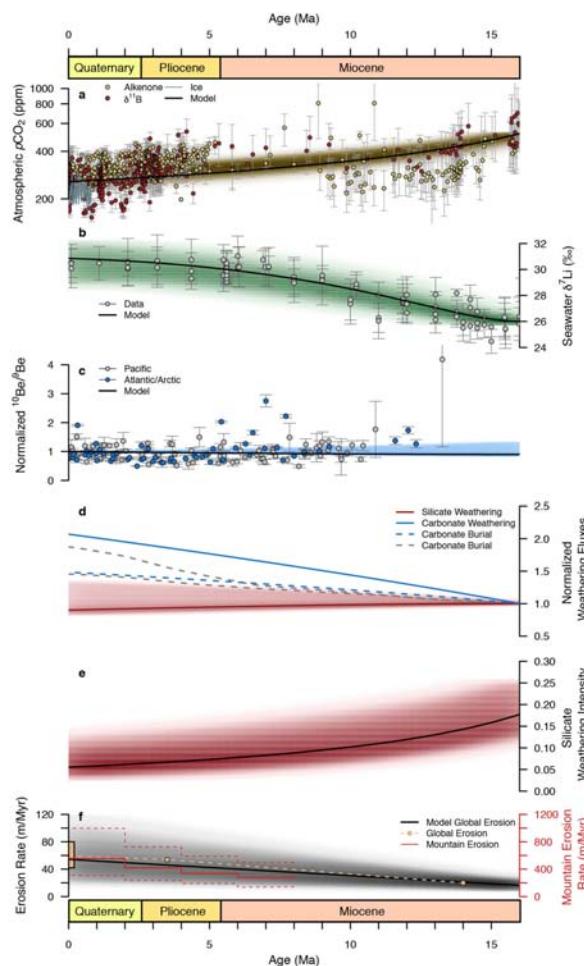


图 2 基于 CLiBeSO-W 模型重建的 16Myr-0Myr 期间风化和碳循环结果 (Rugenstein et al., 2019)



和侵蚀分区的变化。剥蚀分区变化和随之而来的硅酸盐风化强度变化，使海洋同位素、侵蚀记录与碳循环中质量平衡的需要保持一致，而整个过程并不需要增加硅酸盐风化通量。因此，他们认为新近纪以来的全球变冷驱动因素是陆表反应性（风化强度）的增强而非风化通量的增大。

综上可知，风化强度与风化速率变化可能并不同步，如长期稳定的风化物风化强度可能很高，但其平均风化速率可能不大。经典认识是化学风化速率与物理剥蚀速率几乎线性相关，近期的研究则显示物

理剥蚀速率超过一定界限，化学风化速率（或风化通量）会降低，这使得构造隆升驱动气候变化假说的核心受到质疑。

因此，要想进一步理解新近纪全球变冷的驱动因素，首先需要厘清构造抬升历史、 CO_2 变化历史、风化剥蚀历史等，尤其是直接通过陆相沉积指标所重建的风化剥蚀历史，将上述变化进行综合，通过模拟手段来探讨构造运动 - 风化 - CO_2 - 气候变化历史之间的关联，进而揭示新近纪全球变冷的驱动因素。

主要参考文献

- Bataille C P, Willis A, Yang X, et al. Continental igneous rock composition: A major control of past global chemical weathering[J]. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1602183. ([链接](#))
- Berner R A, Caldeira K. The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle[J]. *Geology*, 1997, 25(10): 955-956. ([链接](#))
- Rugenstein J K C, Ibarra D E, von Blanckenburg F. Neogene cooling driven by land surface reactivity rather than increased weathering fluxes[J]. *Nature*, 2019, 571(7763): 99-102. ([链接](#))
- Herman F, Seward D, Valla P G, et al. Worldwide acceleration of mountain erosion under a cooling climate[J]. *Nature*, 2013, 504(7480): 423-426. ([链接](#))
- Misra S, Froelich P N. Lithium isotope history of Cenozoic seawater: changes in silicate weathering and reverse weathering[J]. *Science*, 2012, 335(6070): 818-823. ([链接](#))
- Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate[J]. *Nature*, 1992, 359(6391): 117-122. ([链接](#))
- Ruddiman W F. Tectonic Uplift and Climate Change[M]. Springer Science & Business Media, 1997.
- Willenbring J K, von Blanckenburg F. Long-term stability of global erosion rates and weathering during late-Cenozoic cooling[J]. *Nature*, 2010, 465(7295): 211-214. ([链接](#))
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693. ([链接](#))
- Zhang P Z, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates[J]. *Nature*, 2001, 410(6831): 891-897. ([链接](#))

(撰稿：张春霞 / 新生代室)



Nature Geoscience : 小冰期最后阶段火山连续喷发的气候效应

小冰期最后阶段（19世纪初）发生了5次大型火山喷发事件，喷发的火山灰和硫酸气溶胶会反射和吸收太阳辐射，从而引起全球降温，触发的气候效应还包括非洲和印度季风区季风降水减少和阿尔卑斯山脉冰川生长等。

火山活动如何影响古气候变化？具体物理过程是什么？由于缺少系统的气象要素观测资料，以往回答这一问题往往依赖于古气候模拟，但由于气候系统的混沌效应会引起误差非线性增长等，导致气候模式模拟很难与“观测”事实相一致。

从相对独立的数据观测和数值模拟研究转向以新数据获取和大数据支撑的“数据-模式驱使科学（data/model-enabled science）”是未来地球科学研究方向（郭正堂，2019），古气候数据同化研究正是古气候研究领域在2000年以后出现的新方向之一（Von Storch et al., 2000）。利用观测数据（重建结果）约束气候模式模拟的轨迹，可以获取既符合气候变化物理规律，又服从重建变化事实的气候系统的最优状态估计（Widmann et al., 2010）。

近日，Brönnimann et al. (2019) 在 Nature Geoscience 上发表研究成果，他们基于 Franke et al. (2017) 达月分辨率的1600-2005年古气候再分析同化资料，结合 HadCM3 和 FUPSOL 气候模式，分析了小冰期最后阶段（19世纪初）5次赤道大型火山喷发事件的气候效应。

通过分析火山喷发对全球温度和降水空间格局变化影响，他们发现北半球中高纬度大陆地区在19世纪5次火山爆发后的3年内出现了不同程度的大范围降温，非洲季风区和印度季风区的降水量也随之下降（图1）。这种由一系列的火山喷发引起的全球降温、季风区降水异常偏少等可能会对气候系统产生年际至多年代际的持续性影响。

具体物理过程是：每次火山喷发后，大气层顶净短波辐射通量和向下净地表热通量立即下降，上层海洋（0-700 m）热含量也随之减少，大约3年后，大气层顶净短波辐射通量会恢复到火山喷发前的水平，而向下净地表热通量也会恢复到与火山喷发前相当或者略微偏高的水平。但由于海洋具有较大的热容量，火山的连续喷发会对海洋产生持续性影响。

一方面，火山连续喷发导致上层海洋热含量发生多年代际变化。因为辐射通量的改变对于混合层海洋的影响可能会滞后2-3年，而与深层海洋的混合会导致海洋对于短波辐射通量的滞后响应在多个火山喷发连续发生时进一步延迟。FUPSOL 模式结果显示上层海洋热含量直到19世纪60年代才恢复到1779-1808的平均水平，而 HadCM3 模式模拟的上层海洋热含量直到20世纪30年代才恢复到19世纪初火山喷发前的水平。

另一方面，火山连续喷发会改变海洋表面温度的空间结构。全球海洋在火山喷

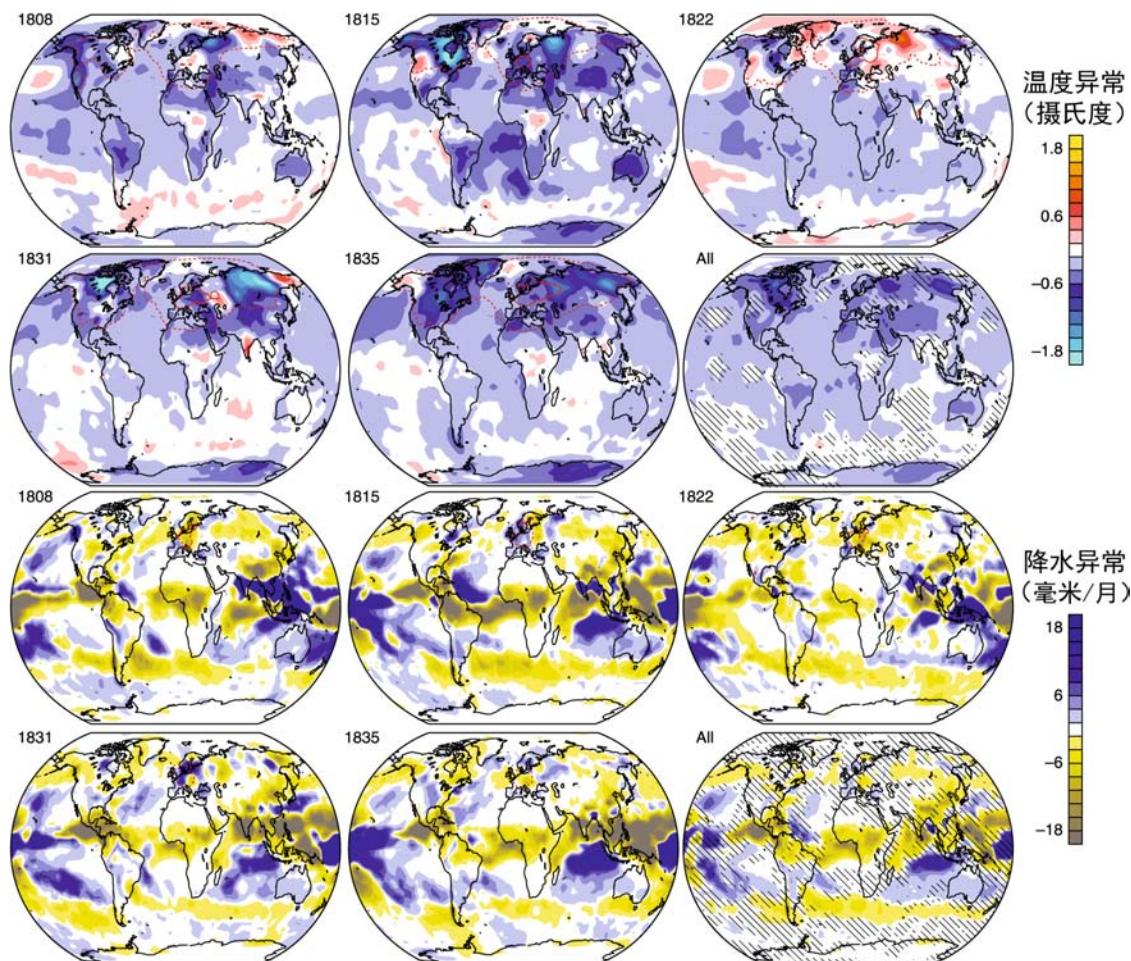


图 1 火山喷发后古气候再分析资料全球暖季（4 月至 9 月）温度和降水异常分布图（上面两行是火山喷发后 3 年的平均温度，下面两行是平均降水；异常值的相对时段是 1779-1808；左上角的年份是火山喷发的年份；‘All’ 是五次火山的平均值）(Brönnimann et al., 2019)

发后的温度变化过程并不一致，火山喷发后的前两年，上层海洋变冷，全球大部分海域的海表面温度下降，但赤道太平洋的降温幅度轻微低于其他海域。之后的五年，当全球大部分海域升温时，赤道太平洋中部仍持续降温。

基于上述证据，作者进一步推测可能的影响机制是：19 世纪初 5 次大型火山喷发对气候系统产生持续性影响，可能引起北大西洋多年代际涛动（AMO）在 19 世纪 30-50 年代转为负位相，从而引起一系列气候效应，包括非洲和印度季风减弱和赤道

热带辐合带南移等。但导致 AMO 相位转变是否也与道尔顿极小期减弱的太阳活动有关，仍需要进一步研究。

相信不久的将来会有更多的古气候同化资料公布，例如在古全球变化（PAGES）支持下比利时法语鲁汶大学 Hugues Goosse 教授牵头组织的国际古气候再分析、数据同化和代用记录系统模型工作组，将会公布基于 PAGES2k 古温度数据集的多组过去 2000 年古气候同化资料，为火山喷发引起全球古气候时空变化的定量化研究带来新的机遇。



主要参考文献

Brönnimann S, Franke J, Nussbaumer S U, et al. Last phase of the Little Ice Age forced by volcanic eruptions[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 650-656. ([链接](#))

Franke J, Brönnimann S, Bhend J, et al. A monthly global paleo-reanalysis of the atmosphere from 1600 to 2005 for studying past climatic variations[J]. *Scientific Data*, 2017, 4: 170076. ([链接](#))

Von Storch H, Cubasch U, Gonzalez-Rouco J F, et al. Combining paleoclimatic evidence and GCMs by means of data assimilation through upscaling and nudging (Datun) [C]. Proceedings of the 11th Symposium on Global Climate Change Studies, American Meteorological Society Long Beach, CA, USA, 2000.

Widmann M, Goosse H, Schrier G, et al. Using data assimilation to study extratropical Northern Hemisphere climate over the last millennium[J]. *Climate of the Past*, 2010, 6 (5) : 627-644. ([链接](#))

郭正堂.《地球系统与演变》:未来地球科学的脉络 [J]. 科学通报, 2019, 64 (9) : 883-884. ([链接](#))

(撰稿: 刘威, 史锋 / 新生代室)



Nature : 全球过去 2000 年年平均温度空间格局多指标集成

基于多种类型的气候代用记录，利用数理统计方法格点化重建古气候变化空间格局，已成为阐明古气候变化的空间特征和区域差异，捕获重大古气候环境事件区域协同变化规律，探究区域生态环境历史空间演变过程不可或缺的重要手段和研究方向。

然而，由于气候代用记录信噪比较小，不同类型的代用记录对温度响应的季节性、区域代表性和时间分辨率等均有明显差异，导致古气候重建结果中包含了非气候本身所引起的变化信息的非均一性问题，限制了古气候格点数据分析结论的可靠性和准确性。早在 1998 年，美国学者 Mann、Bradley 和 Hughes 在 *Nature* 发表了过去 600 年的全球年平均温度格点化空间格局 (Mann et al. 1998)，第一次展示了历史时期全球年平均温度的空间均一化结果。但由于其所用代用记录的空间分布较为稀疏，空间代表性不足，所以更多的是讨论其半球的温度平均序列变化的特征及可能机理，而非空间格局变化本身。随后基于 10 年新公开的记录，Mann 等再次集成了过去 1500 年全球年平均温度的空间格局 (Mann et al. 2009)，给出了中世纪暖期（公元 950-1250）和小冰期（公元 1400-1700）的全球温度异常分布，并指出中世纪暖期赤道太平洋呈现类似拉尼娜的海温型，然而学界对其重建方法假定过去气候变化遵循仪器观测时段的空间结构仍有不同评价。

为了避免重建方法对空间格局重建的影响，瑞士古气候科学家 Raphael Neukom 与合作者基于古全球变化 (PAGES) 过去 2000 年古全球变化研究网络 (PAGES2k network) 公开的过去 2000 年古温度代用记录数据集 (PAGES2k Consortium, 2017)，利用六种统计方法，重建了过去 2000 年全球年平均温度的空格格局 (Neukom et al., 2019)，指出过去 2000 年工业革命前并不存在全球各地一致的温暖和寒冷时期（如图 1a, 1b, 1d 和 1e 所示），相关成果近日发布于 *Nature*。

Raphael Neukom 博士指出：“在小冰期全球均经历了较为寒冷的时期，但并不是在同一时间。”如图 1e 所示，在小冰期，中东太平洋的大部分地区可能是 15 世纪最冷，在西北欧和北美东南部最冷时期发生在 17 世纪，而其余大部分地区出现最冷期概率最大的时期是在 19 世纪中期。该研究揭示由欧洲和北美历史气候所定义的全球可能同时出现的两个温暖期和两个寒冷期的假设是不成立的。理由是工业革命前过去 2000 年区域气候主要受气候系统内部随机波动的影响，而火山爆发或太阳活动等外部因素不足以在几十年甚至几个世纪的时间内在全世界引起明显的一致的温暖或寒冷。“不同地区的最低和最高温度发生时间不同，因此，从区域尺度的增温现象中（如欧洲和北美经常提到的“中世纪暖期”）不能得到全球一致增温的推论。”Raphael

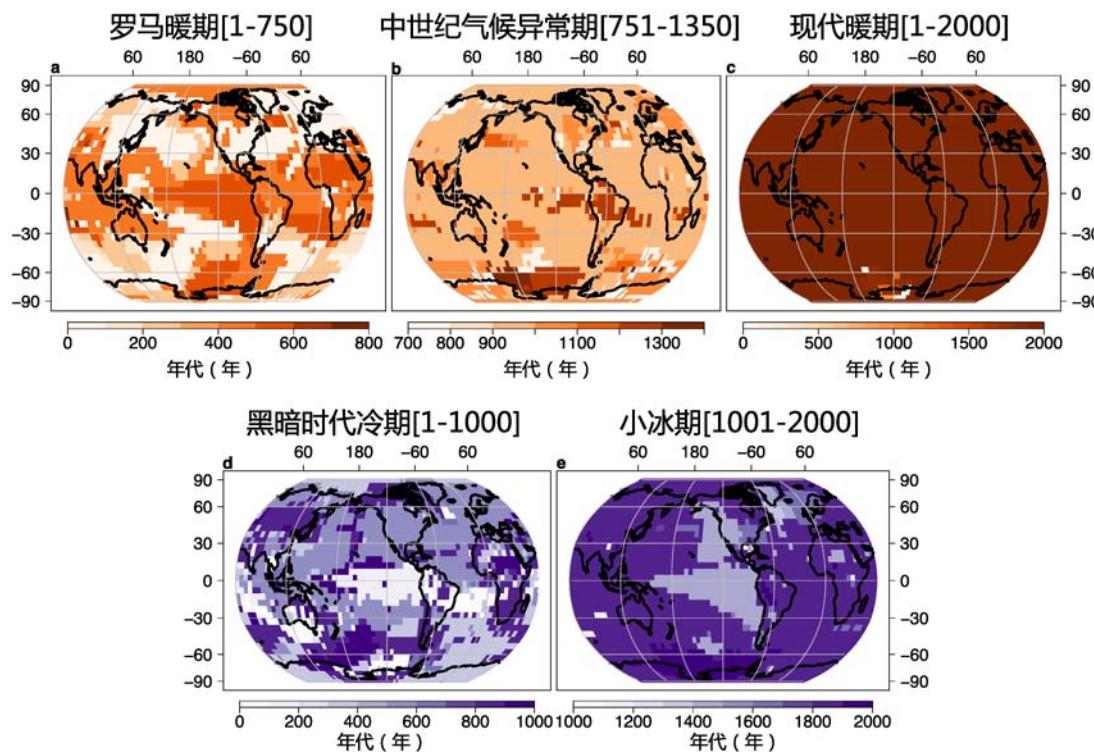


图 1 过去 2000 年三个暖期和二个冷期出现概率最高的最暖和最冷世纪时限图。时期标题括号中的数字指示了每个时期执行搜索最高集合概率的 51 年温度平均最暖或最冷世纪的时间范围（改自 Neukom et al., 2019）

Neukom 博士说。而从过去 2000 年来看现代暖期则非常不同，全球超过 98% 的地区过去 2000 年中最温暖的时期最有可能发生在 20 世纪（如图 1c 所示）。这再次表明，现代暖期不能通过随机波动来解释，而更有可能是由于人为排放的二氧化碳和其他温室气体所导致的。

现代气候格点数据集已被广泛用于描述气候变化的时空特征，检验和同化气候

模式，提高模式对未来气候变化的预估能力。相信随着古气候学界对代用记录响应气象要素机理研究的不断深入，以及不同类型代用记录的融合和同化方法不断涌现，古气候格点资料也会成为揭示古气候时空演变规律的关键证据。

附：文章重建结果的数据下载以及进一步的信息，可参考古全球变化（PAGES）网页。

主要参考文献

- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries[J]. Nature, 1998, 392(6678): 779-787.([链接](#))
- Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly[J]. Science, 2009, 326(5957): 1256-1260.([链接](#))



Neukom R, Steiger N, Gómez-Navarro J J, et al. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the pre-industrial Common Era[J]. *Nature*, 2019, 571(7766): 550–554.([链接](#))

PAGES2k Consortium. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era[J]. *Scientific Data*, 2017, 4: 170088.([链接](#))

(撰稿：[史锋](#) / 新生代室)



Nature Geoscience : 全球过去 2000 年年平均温度序列多指标集成

过去百年增温（现代暖期）是历史的重复还是前所未有的？这个问题一直以来是古气候定量研究的重点和难点。回答该问题的可能途径是：利用气候代用记录定量重建古温度变化序列，厘定现代暖期的位置。早在 1999 年，美国学者 Mann、Bradley 和 Hughes 在 *Geophysical Research Letters* 发表了过去千年的北半球温度序列（Mann et al., 1999），显示 20 世纪可能是过去千年最暖的时期，其序列形状是 19 世纪之前平坦，20 世纪突然跃升，故称为“曲棍球杆”（Hockey Stick）曲线。该序列被 2001 年联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第三次报告引用和广泛传播，用于证明 20 世纪全球增温幅度是过去千年以来前所未有的，但这也遭到气候怀疑论者的猛烈抨击，引发了美国国会和美国国家科学院的调查。有些批评是合理的，例如该工作过度依赖于少数树木年轮标准化宽度年表，导致温度集成序列低估了温度的低频变化；另一方面，由于代用记录本身响应气候变化的信噪比较小，导致不同统计集成方法所得结果的差异明显。

在随后的 20 年里，古气候学界从数据和方法两个方面努力提高过去 2000 年全球气候重建的可信度，其中一个特别活跃的科学家群体是古全球变化（PAGES）的过去 2000 年古全球变化研究网络（PAGES2k network）。该组织成立了 9 个区域工作组，目的是收集和整理最新的区域气候代用记

录，进行过去 2000 年温度和降水集成，并与气候模拟结果对比分析，揭示其机理过程。以亚洲工作组（Asia2k）第一阶段（2008-2014）为例，国内学者中科院地理资源与环境研究所邵雪梅研究员、中科院地质与地球物理研究所储国强研究员、许晨曦副研究员、中科院西双版纳热带植物园范泽鑫研究员等和亚洲其他国家的学者贡献了各自珍贵的原始代用记录，在此基础上成立了两个气候集成小组，分别完成了基于单一树轮年表的温度空间格局集成和多指标温度空间格局集成工作。通过 9 个区域工作组的共同努力，2013 年 PAGES2k 联盟集成了七个大陆区域温度变化序列（PAGES2k Consortium, 2013）。在此基础上，PAGES2k 开展了区域温度数据和模拟对比分析工作，随后公开了过去 2000 年最大的古温度代用记录数据集（PAGES2k Consortium, 2017）。基于此数据集，由瑞士古气候科学家 Raphael Neukom 牵头，来自 8 个国家 19 位古气候学家共同参与重建了过去 2000 年全球平均温度变化（PAGES2k Consortium, 2019；图 1）。相关成果近日发布于 *Nature Geoscience*，其中正则最大期望法和最优信号提取法的重建结果由中科院地质与地球物理研究所史锋副研究员提供。

文章通过使用同一气候代用记录数据集，利用 7 种不同的统计方法进行重建，发现 7 个重建结果的多年代际温度变化一致，说明这一多年代际年平均温度变化并

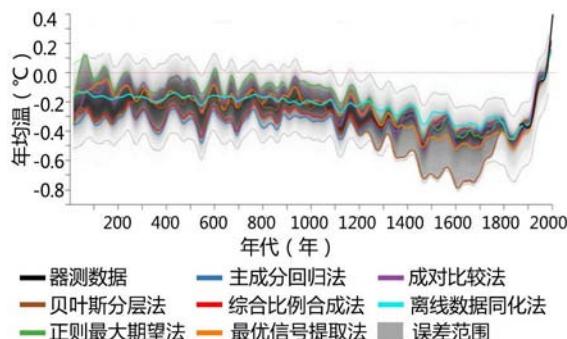


图1 过去 2000 年全球年平均温度序列（改自 PAGES2k Consortium, 2019）

不依赖于方法的选择。同时与国际耦合模式比较计划第 5 阶段 (CMIP5) 多个气候模式模拟温度对比发现，两者的多年代际变化也非常类似 (图 2)，指出现在模式在相同外强迫的作用下，可以得到与“观测”温度相一致的多年代际变化特征，增强了利用模式进行未来气候预估的可信度。进一步分析其变化机理，揭示出过去 2000 年

全球年平均温度多年代际变化的主导因子可能是火山活动。而这种从重建和模拟结果中提取共同信号，并解释信号的物理意义和机理，可能是过去 2000 年气候变化研究中新的增长点。

附：文章重建结果的数据下载以及进一步的信息，可参考古全球变化 (PAGES) 网页。

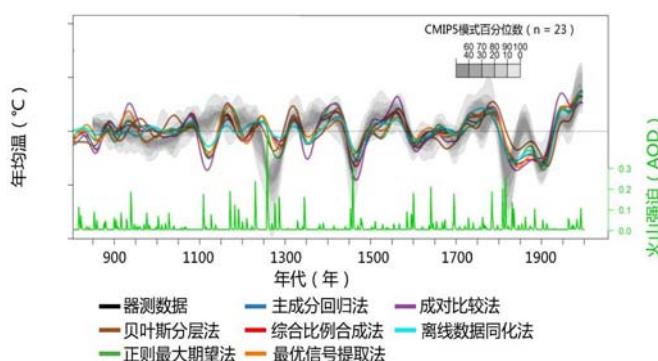


图2 过去 2000 年全球多年代际温度变化重建和模拟以及与火山活动的对比图（改自 PAGES2k Consortium, 2019）

主要参考文献

Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(6): 759-762.
(链接)

PAGES2k Consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia[J]. *Nature*



Geoscience, 2013, 6: 339-346.([链接](#))

PAGES2k Consortium. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era[J]. *Scientific Data*, 2017, 4: 170088.([链接](#))

PAGES2k Consortium.Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era[J]. *Nature Geoscience*, 2019.([链接](#))

(撰稿：[史锋](#) / 新生代室)



Geology：重建火山气体喷发历史的新指标——树轮稳定碳、硫同位素

火山活动喷发的大量 H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 等气体对地球气候和环境有重要影响，研究火山气体喷发历史对了解火山活动规律及预测未来火山活动具有重要意义。当前，由于历史观测记录缺乏，火山喷发历史主要依赖地层学证据，但是地层学方法无法获得连续的火山喷发历史的时间序列，也很难研究平静期或喷发前期的火山喷出气体（Martí et al., 2018）。因此，需要找到一种分辨率高且能重建连续火山气体喷发历史的指标。

最近，加拿大麦吉尔大学（McGill University）地球与行星科学院的 Fiona D’ Arcy 团队在 *Geology* 上发表研究成果，他们利用树木年轮中的稳定碳（ $\delta^{13}\text{C}$ ）和硫（ $\delta^{34}\text{S}$ ）同位素的连续时间变化序列来研究火山喷发气体历史。

树木年轮分辨率高、定年准确，已被广泛应用于过去气候和环境变化历史的研究。该研究团队的思路是：火山喷发的 CO_2 和 SO_2 气体中的碳和硫元素可以被树木快速吸收（McCarroll and Loader, 2004）。其中，碳元素通过叶片光合作用被树木吸收，储存到当年形成的树轮中。硫元素则以 SO_2 和硫酸盐两种形式分别通过叶片和根部被树木吸收，最后固定于树轮细胞壁中。因此在火山喷发口附近采集树木年轮，通过测量每年的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ ，就可以重建火山气体的喷发历史。

他们以哥斯达黎加卡塔戈省的图里亚瓦尔（Turrialba）活火山为研究对象。火山曾于 1863 年喷发气体和火山灰，此后处于休眠状态。自 1996 年起，火山进入活跃期，尤其是 2010 年、2012 年、2014 年，均有大规模喷发。2016 年 4-5 月，研究人员在火山喷发口附近采集并分析了树轮样芯 1994-2015 年 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 的时间变化。结果显示， $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 序列与观测到的火山 SO_2 喷发量序列之间存在显著正相关。2009 年的强火山喷发后，距离火山喷发口最近的下风向树木中的 $\delta^{34}\text{S}$ 急剧下降，变化幅度达到 -5.2\% ，而 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化则较小 ($+1.3\text{\%}$)。通过与背景值的对比，研究人员认为， $\delta^{34}\text{S}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化是火山喷发的 SO_2 和 CO_2 造成的。同时，火山喷发的 SO_2 会损伤造成树木叶片，影响树木的光合作用，可能导致 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化幅度较小。

火山活动会造成附近树轮 $\delta^{34}\text{S}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的显著变化，这为建立火山喷发历史的时间序列提供了一个新的思路。该研究方法的成功在于科学家在火山喷发口附近找到了直接受到火山喷发气体影响的存活的树木。但是，强火山喷发通常会焚毁附近的树木，从而很难找到合适的树木，而距离稍远的树木因为受到火山喷发气体的影响则较弱，比如文中距离火山喷发口较远的树木中的 $\delta^{34}\text{S}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值就无法记录到火山气体喷发造成的同位素变化。

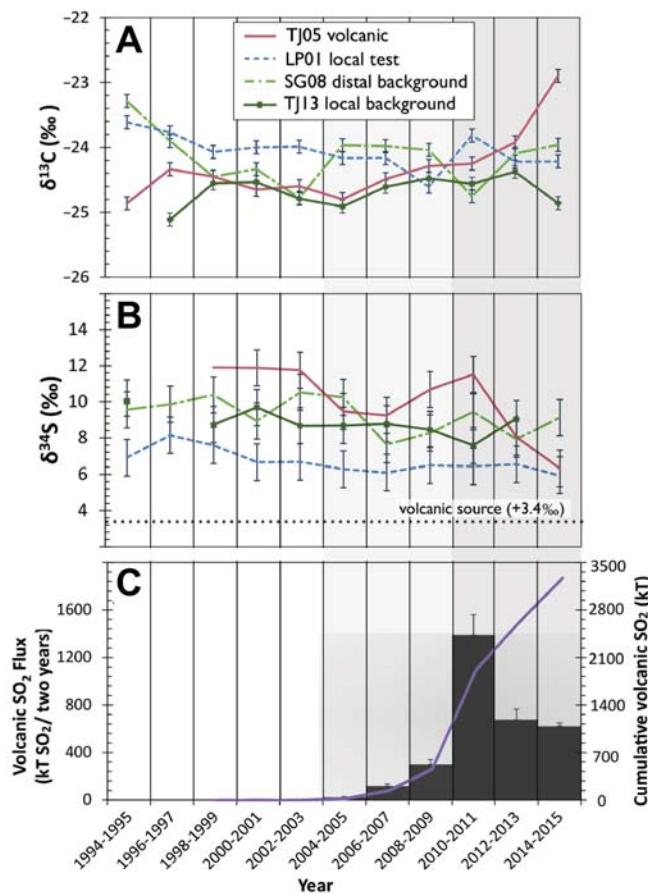


图 1 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ (A)、 $\delta^{34}\text{S}$ (B) 和 Turrialba 火山 SO_2 喷发量 (C) 变化序列。其中树轮 TJ05、LP01、SG08、TJ13 为文中所分析 4 棵树轮样芯的代号，与火山口的距离分别为 1.5 km、2.5 km、50 km、3.5 km。TJ05 位于火山喷发口下风向，直接受到火山喷发影响；LP01 则偶尔受到火山喷发影响；TJ13 和 SG08 距离火山较远，在文章中作为背景值 (D' Arcy et al., 2019)

主要参考文献

- D' Arcy F, Boucher É, De Moor J M, et al. Carbon and sulfur isotopes in tree rings as a proxy for volcanic degassing[J]. *Geology*, 2019.([链接](#))
- Martí J, Grappelli G, da Silveira A B. Volcanic stratigraphy: A review[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2018, 357: 68-91.([链接](#))
- McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7-8): 771-801.([链接](#))

(撰稿：安文玲 / 新生代室)

5. 古今海洋

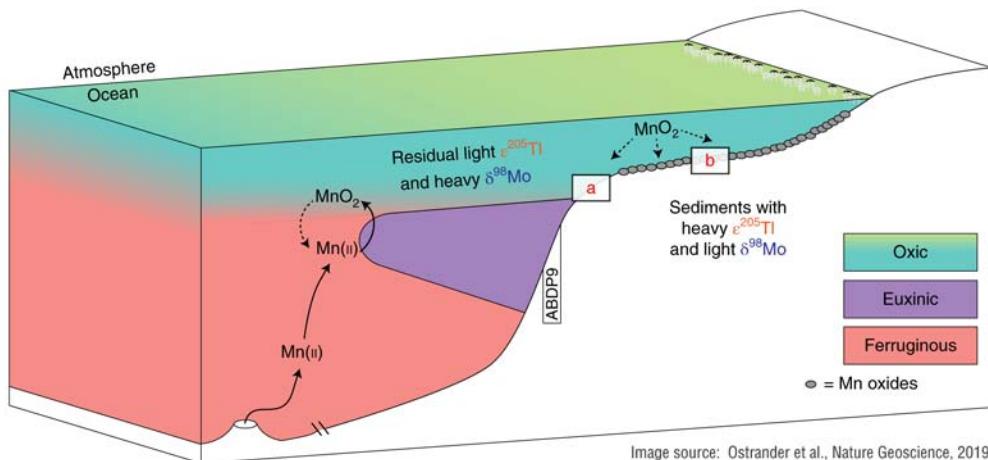


Image source: Ostrander et al., Nature Geoscience, 2019





Science : 地球早期海洋温度并非想象中那么高

据地球表面积 70% 以上的海洋，是生命起源、繁衍与生息之地，同时也是决定地表温度，即气候的最重要因素。它的冷热状态，即温度变化影响着地表环境及表生地球化学作用，也影响着地球的生命演化。一般来讲，现代海洋的水温变化在 -2℃ 到 30℃ 之间，平均约为 20℃。而对于古海洋，特别是寒武纪之前 (> 5.4 Ga) 的地球早期海洋，它的温度却一直存在争议，估计从 10℃ 到 85℃ 不等，这在一定程度上影响了对早期生命孕育条件的认识。

地质时期海相燧石的硅与氧同位素、蚀变洋壳的氧同位素记录，以及遗传蛋白

质重建等众多证据表明地球早期海洋的温度会较高，可达 85℃。但是，这些证据均存在各自的不确定性。例如，燧石自沉积之后会经受后期成岩和变质作用的改造，影响其硅和氧同位素组成的保存。此外，前寒武纪海洋富铁，铁质的沉淀可能也会造成燧石中硅同位素的变化 (Zheng et al., 2016)。尽管如此，较多学者目前仍倾向认为早期海洋的温度远高于现在，因为沉积的各种矿物和岩石（碳酸盐岩、燧石和海绿石等）的氧同位素组成（即 $\delta^{18}\text{O}$ 值）一致显示出太古代以来持续增加的变化趋势（图 1）。然而，对于这种全球普遍趋势还存在另一种解释，即海洋沉积物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值长

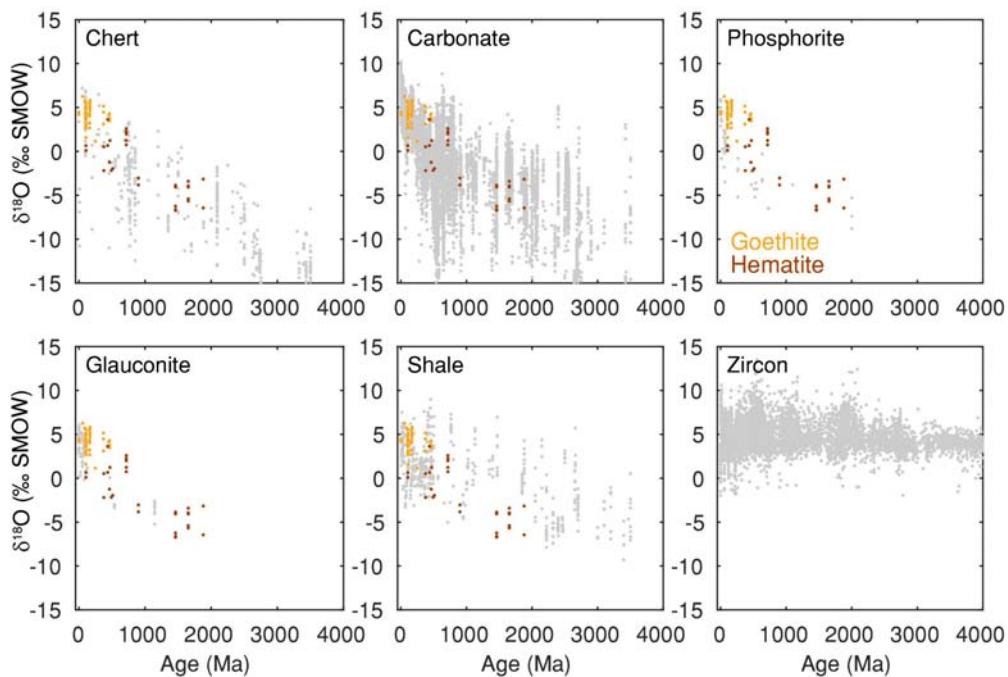


图 1 不同沉积岩和矿物的氧同位素随时间的变化趋势，自左至右分别为燧石、碳酸盐岩、磷块岩、海绿石、页岩和锆石（见 Galili et al., 2019 补充材料）



期升高可能与海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的增加有关，而并非与海水温度有关。让人疑惑的是，由于这些沉积岩和矿物的矿物 - 水氧同位素分馏机制很相似，都与温度相关，因而无法区分何种解释更为准确。

在此背景下，以色列雷霍沃特魏茨曼科学研究所 Nir Galili 博士和其合作者最近在 *Science* 上撰文认为，氧同位素变化的这种趋势应与海水的氧同位素变化有关，而与海洋温度无关；进而推测，地球早期海洋温度并非像传统认为的会那么高。他们创新性地使用了铁氧化物的氧同位素地质

记录来破解这一科学难题，铁氧化物的氧同位素对温度变化不敏感，因此铁氧化物的同位素变化的原因可能为破解各类沉积物和矿物的变化趋势提供正确的解释。尽管前人的研究已经表明温度对铁氧化物和水之间的氧同位素分馏影响是较弱的，沉积后的作用也影响甚微，作者仍开展合成实验，以期证实真实性。他们采用不同的 pH 值和温度来合成针铁矿和赤铁矿，发现其氧同位素分馏与温度的相关性确实较弱，每 20°C 仅有 ~1‰ 的变化（图 2）。

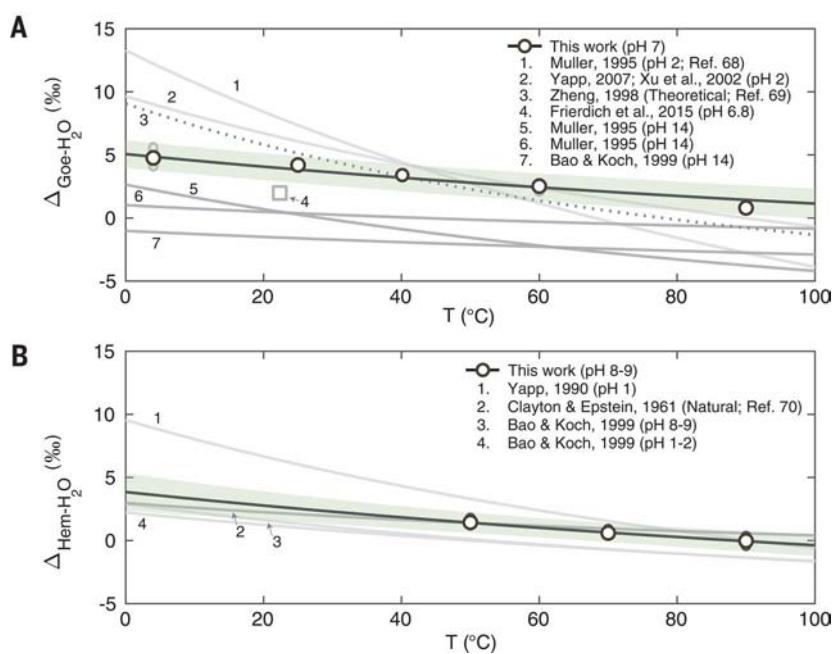


图 2 铁氧化物 - 水的氧同位素分馏与温度的关系。A. 针铁矿 - 水 ;B. 赤铁矿 - 水 (Galili et al., 2019)

考虑到后期成岩作用会产生二价铁离子和含二价铁的矿物，作者对样品进行了严格筛选，排除了再结晶或蚀变形成的氧化铁，也排除了含有机质含量较高（1%）和含较多二价铁矿物的样品，进而对过去近 20 亿年的海相鲕粒状铁矿石中铁氧化物的氧同位素特征进行了分析，发现氧同位素同样具有与燧石和碳酸盐岩相似的时

间变化趋势，即在前寒武纪逐步上升，进入到显生宙趋于稳定（图 3）。由于铁氧化物的氧同位素分馏与温度相关性较弱，因而其变化趋势应该反映的是相对应流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化而非海洋温度变化。无论该流体是否为海水，或是早期成岩孔隙水和近海岸的大气降水，其趋势应可代表整个水圈的 $\delta^{18}\text{O}$ 演化。

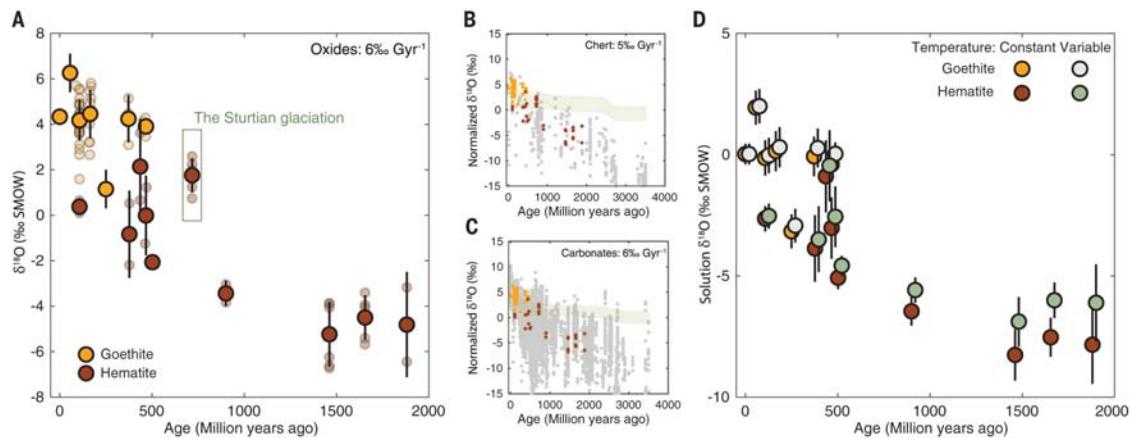


图3 铁氧化物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值特征。A. 针铁矿（橙色圆圈）和赤铁矿（红色圆圈）所代表年代的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值（ $\pm 1\sigma$ ）；B、C. 将铁氧化物的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录分别叠加在燧石和碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录上；D. 铁氧化物相对应流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值，是在(i) 恒温($15 \pm 10^\circ\text{C}$) 或(ii) 温度随时间降低的假设条件下计算获得(Galili et al., 2019)

在两种假定前提下（地表平均温度 $(15 \pm 10^\circ\text{C})$ 不变，自太古代的 85°C 开始下降），作者进一步计算了与铁氧化物相对应流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值，发现流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值在两种情况下均显示出相似的趋势，即前寒武纪增加和显生宙不变（图3），说明与铁氧化物对应的母液氧同位素值的确发生了变化。另外，两种条件下得到的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差别与样品年龄呈正相关，但差距不会超过 $\sim 2\%$ ，进一步反映铁氧化物–水的氧同位素分馏相对于温度是不灵敏的。此外，作者还发现与赤铁矿共生的碳酸盐矿物同样呈现出与赤铁矿相似的氧同位素变化趋势，表明该趋势与赤铁矿的不同沉淀机制无关。这点结论非常重要，因为关于前寒武纪的赤铁矿的原始成因一直存在争议，当前已形成两种对立的观点：(1) 赤铁矿是原始沉淀的铁硅酸盐颗粒在后期发生氧化所致(Rasmussen et al., 2013)，该观点强调硅酸盐矿物为原始沉积产物而非赤铁矿，直接

挑战了传统思想；(2) 认为三价铁的氢氧化物应为原始沉积产物，赤铁矿是其直接脱水的产物(Konhauser et al., 2017)。最近，Robbins et al. (2019) 在Nature Geoscience上发表文章，应用水文地质模型反驳了原始硅酸盐沉淀的观点，但他们并未对前人所看到的岩相学现象进行解释，而是仅仅利用模型否定了赤铁矿为硅盐酸氧化所致，并强调原始硅酸盐矿物的形成与经典的稀土元素以及铁同位素特征不相符。

最后作者分析了导致海水 $\delta^{18}\text{O}$ 升高的原因，可能是由于陆相沉积物盖层的增加、高低温地壳蚀变比例的变化，或者是这些和其他因素综合的结果。针对全球氧同位素变化趋势，不难发现，整个前寒武纪的海水氧同位素值均较低，如果该趋势确实与温度无关，那么我们有理由相信，地球在过去整个35亿年期间气候应该是温和且稳定的。



主要参考文献

- Galili N, Shemesh A, Yam R, et al. The geologic history of seawater oxygen isotopes from marine iron oxides [J]. *Science*, 2019, 365: 469-473.([链接](#))
- Konhauser K O, Planavsky N J, Hardisty D S, et al. Iron formations: A global record of Neoarchaean to Palaeoproterozoic environmental history[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 172: 140-177..([链接](#))
- Rasmussen B, Muhling J R, Fischer W W. Evidence from laminated chert in banded iron formations for deposition by gravitational settling of iron-silicate muds[J]. *Geology*, 2019, 47(2): 167-170.([链接](#))
- Robbins L J, Funk S P, Flynn S L, et al. Hydrogeological constraints on the formation of Palaeoproterozoic banded iron formations[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 558-563.([链接](#))
- Zheng X Y, Beard B L, Reddy T R, et al. Abiologic silicon isotope fractionation between aqueous Si and Fe (III)-Si gel in simulated Archean seawater: Implications for Si isotope records in Precambrian sedimentary rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 187: 102-122. ([链接](#))

(撰稿：储雪蕾，王长乐 / 矿产室)



Nature Geoscience : 27亿年前的富铵海洋

地球表面化学环境在地质历史时期发生了重大的变化，其中 24-22 亿年前的早元古代大氧化事件（Great Oxidation Event, GOE）和 8-5 亿年前新元古代大氧化事件（Neoproterozoic oxidation Event, NOE），使地球从完全缺氧的状态逐渐过渡到现代的氧化水平（Lyons et al., 2014）。这些氧化事件也深刻地影响着其他元素的地球化学循环过程，比如氧化还原敏感元素和生命元素氮的地球化学循环。在早中太古代，海洋可能以缺氧氮循环为

特征，其氮循环主要包括固氮作用、铵化作用和铵的吸收作用（图 1；Stu~~o~~eeken et al., 2016）。早元古代大氧化事件以后，全球海洋含氧氮循环开始广泛出现（Kipp et al., 2018），即出现了富 NO_3^- 的海洋，其代谢过程包括硝化作用、反硝化作用、铵的厌氧氧化作用、异养硝酸盐还原作用以及硝酸盐的吸收同化作用（图 1）。氧气含量的增加普遍被认为跟海洋产氧光合作用有关，那么在大氧化事件发生的前夕，海洋氮循环是何时以及如何响应产氧光合作用的呢？

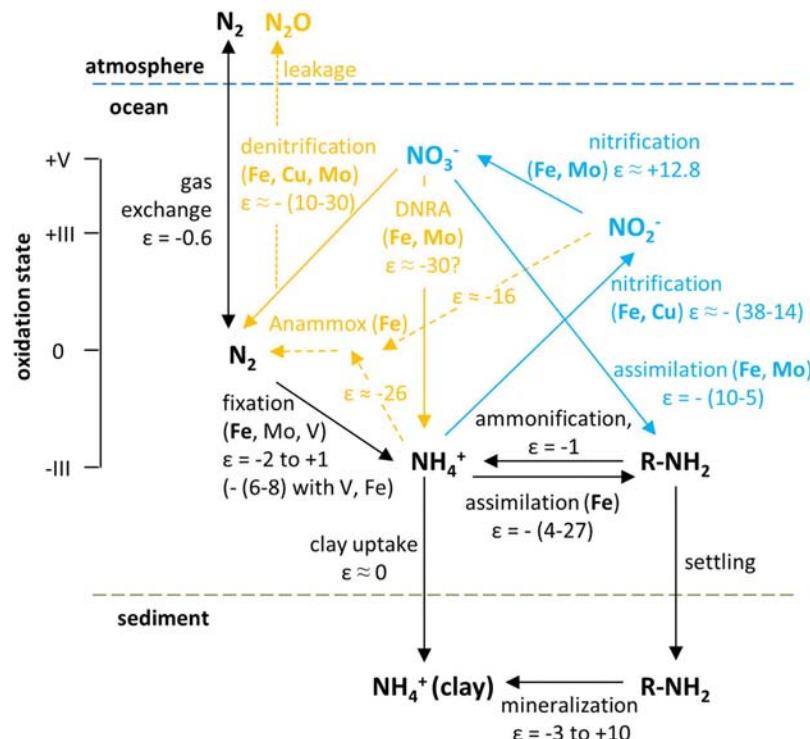


图 1 海洋氮循环示意图。不同氮循环所需要的辅酶因子以及引起的氮同位素分馏已标注在图上，其中黑色路径代表了缺氧氮循环，黄色路径代表了次氧化的氮循环，蓝色路径代表了含氧氮循环；次氧化的和含氧氮循环可能直到晚太古代才出现（Stu~~o~~eeken et al., 2016）



在此背景下，英国圣安德鲁斯大学的研究人员 Yang Jie 及其合作者在 *Nature Geoscience* 发表了最新成果 (Yang et al., 2019)，他们选择了津巴布韦 Belingwe Greenstone 地带约 27 亿年前的 Manjeri 组沉积岩，地层从下到上分别是 Spring Valley 段、Shavi 段和 Jimmy 段，含有叠层石和藻席（图 2），能够直接提供产氧光合作用的证据。由于不同的氮代谢方式对应着不同

的氮同位素分馏 (Stueken et al., 2016)，他们分析了地层中的氮同位素和其他氧化还原指标，包括铁组分、硫同位素和碳同位素，来评估太古代晚期海洋的氮循环过程及氧化还原状态，以揭示氮循环对产氧光合作用的响应过程以及对生产力和生物圈的指示意义。

Manjeri 组的铁组分、硫同位素数据指示（图 2），下部 Spring Valley 和 Shavi 段

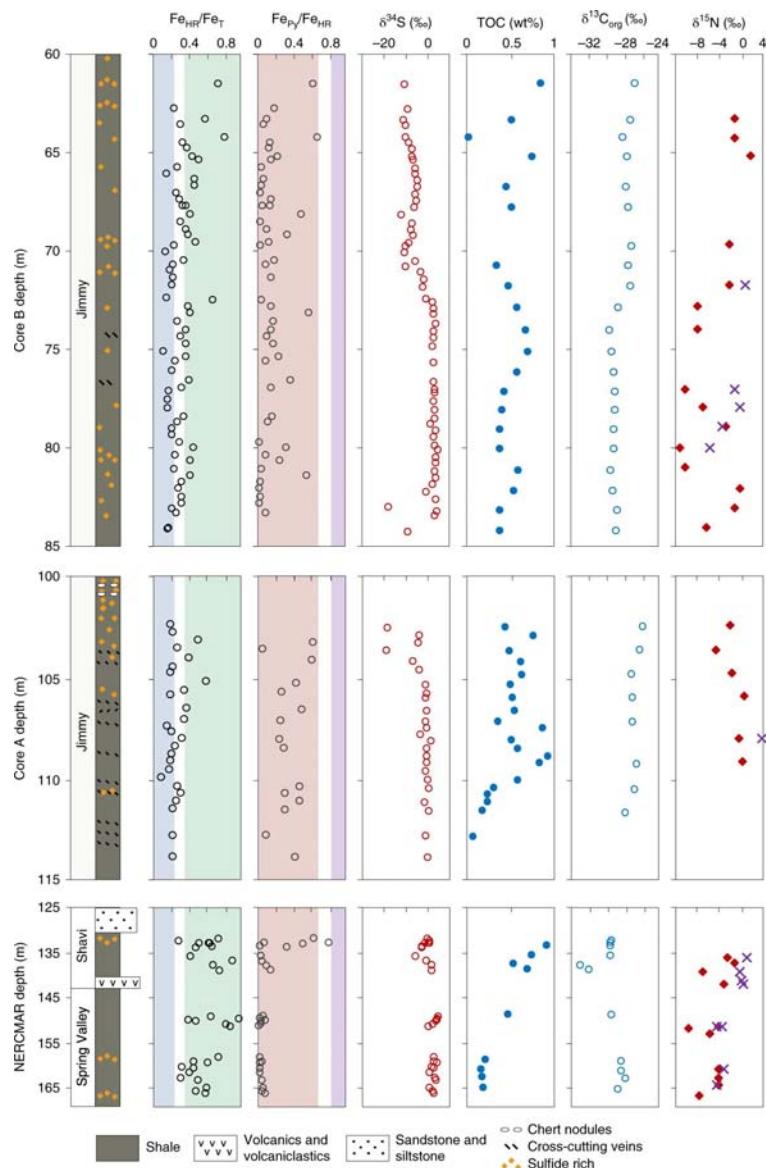


图 2 津巴布韦 27 亿年前 Manjeri 组的岩性和地球化学数据，数据包括铁组分、硫同位素、碳同位素和氮同位素，其中 $\text{Fe}_{\text{HR}}/\text{Fe}_{\text{T}}$ 的蓝色和绿色方块分别代表着氧化和缺氧条件， $\text{Fe}_{\text{Py}}/\text{Fe}_{\text{HR}}$ 的红色和紫色方块分别代表着缺氧富铁和缺氧硫化环境 (Yang et al., 2019)



的沉积水体为持续的缺氧富铁条件，而上部 Jimmy 段在氧化和还原条件之间摆动。由于其碳同位素数据和叠层石指示了其沉积环境跟产氧光合作用有关，Jimmy 段可能位于间歇性“氧气绿洲”的氧化还原界面附近 (Abell et al., 1985)。Manjeri 组的氮同位素数据显示，海洋氮循环以生物固氮作用和铵的不完全吸收作用的缺氧氮循环为主，没有明显的含氧氮循环的信号 (图 2)。因此，即使局部浅水由于产氧光合作用出现氧化还原变动，晚太古代的海洋还是以缺氧氮循环为主，生物可利用氮主要来源于铵的吸收作用和固氮作用。研究人员利用铵的不完全吸收作用分馏系数和沉积物的氮同位素值建立了瑞利模型，得到当时沉积水体 70%-90% 的铵库被生物吸收利用。因此，在晚太古代的海洋，产氧光合作用的出现使初级生产力和输出生产力增强，有机质在缺氧水柱中的降解会使铵富集在

深水中，即使在局部浅水出现“氧气绿洲”，硝化作用（在氧化条件下，铵氧化成硝酸盐的过程；图 1）产生的硝酸盐，在晚太古代广泛分布的缺氧条件下，通过反硝化作用（在次氧化条件下，硝酸盐还原成分子氮的过程；图 1）快速转变成 N_2 而丢失，不能被生物利用。深水中的铵通过上升流被带到透光带，为初级生产者提供营养物质。这种独特的氮循环模式可能只出现在产氧光合作用出现以后和 GOE 之前的晚太古代海洋。

这项研究工作结合了多种地球化学手段和古生物证据，证实了 27 亿年前产氧光合作用下的“氧气绿洲”海洋，是以缺氧氮循环为主，铵可能是生物圈重要的氮营养元素。

致谢：感谢冯连君高级工程师和王旭副研究员的宝贵修改意见。

主要参考文献

- Abell P I, McClory J, Martin A, et al. Archaean stromatolites from the Ngesi Group, Belingwe greenstone belt, Zimbabwe; preservation and stable isotopes-preliminary results[J]. *Precambrian Research*, 1985, 27(4): 357-383. ([链接](#))
- Kipp M A, Stüeken E E, Yun M, et al. Pervasive aerobic nitrogen cycling in the surface ocean across the Paleoproterozoic Era[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 500: 117-126. ([链接](#))
- Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 307-315. ([链接](#))
- Stüeken E E, Kipp M A, Koehler M C, et al. The evolution of Earth's biogeochemical nitrogen cycle[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 160: 220-239. ([链接](#))
- Yang J, Junium C K, Grassineau N V, et al. Ammonium availability in the Late Archaean nitrogen cycle[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 553-557. ([链接](#))

(撰稿：陈妍 / 地星室)



Nature Geoscience : 大氧化事件前大陆架之上 的完全氧化水体

氧的出现改变了生物的生存环境，最终主宰了地球上复杂生物的诞生与演变。早期地球缺乏自由氧，在经历元古代早期（Great Oxidation Event, GOE, 2.4-2.2 Ga）和晚期（Neoproterozoic Oxidation Event, NOE, 0.8-0.5 Ga）这两个阶段后，大气中的氧才开始接近现代水平。当前众多学者热衷于在 GOE 之前寻找所谓的“氧气绿洲”，运用不同手段发现晚太古代甚至于中太古代表层海洋中部分存在自由氧，说明产氧光合作用确实在 GOE 之前已经产生，其演化可能最终导致了 GOE 的形成。大气中氧的出现常归因于海洋中出现产

氧光合生物，但是，O₂是何时在地球的哪个地方开始产生并积聚，其规模如何？

亚利桑那州立大学 Ariel D. Anbar 的研究小组于 2 月 25 日在 *Nature Geoscience* 发表了最新成果，他们创新性地利用金属铊 (Tl)、钼 (Mo) 同位素与 Mn 氧化物的关系，对澳大利亚西部 25 亿年前的 Mount McRae 黑色页岩进行了研究，发现当时 Mn 氧化物在海洋的浅水大陆架上已经形成埋藏，进一步利用同位素质量平衡模型，认为 Mn 氧化物在大陆架的沉积规模较大，从而说明大氧化事件之前的浅水环境已经完全氧化（图 1），其规模与深度超出了之前的认识。

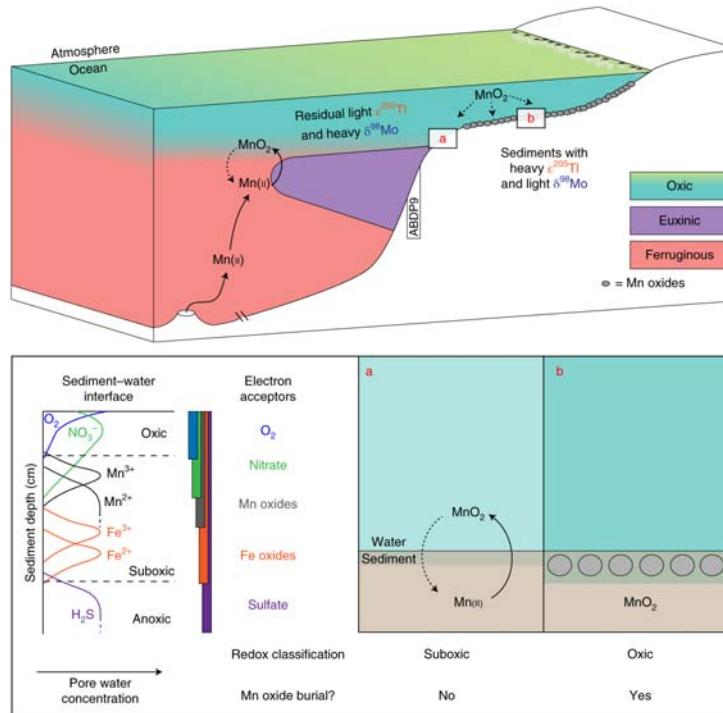


图 1 GOE 前可能存在一个氧化海洋边缘 (~2.5 Ga Hamersley 盆地)。浅部大陆架上部水体氧化，深部水体还原。如果浅部大陆架出现大量的 Mn 氧化物沉淀，那么海水的 Tl 和 Mo 同位素组成会发生相应变化。图中左下角概括了沉积物中氧化还原条件下不同的电子受体 (Ostrander et al., 2019)



锰氧化物对环境中的自由氧非常敏感，在完全氧化的水体或沉积物孔隙水环境中，Mn 以氧化物形式存在，当环境无氧时，Mn 氧化物发生还原分解。因此在古老的沉积物中找寻和示踪 Mn 氧化物，可以用来判定自由氧出现和聚集状态。研究者将铊 (Tl) 和钼 (Mo) 同位素作为海水中 Mn 氧化物沉积的指标，因为当 Mn 氧化物形成

时，会优先吸附 Tl 的重同位素和 Mo 的轻同位素，从而导致海水富集轻 Tl 和重 Mo 同位素，此特征会被同时期形成的黑色页岩记录，因为上部黑色页岩序列沉积于厌氧硫化的环境中（经前人铁组分研究工作证实）（图 2），会较为准确地记录同时期海水的同位素特征。

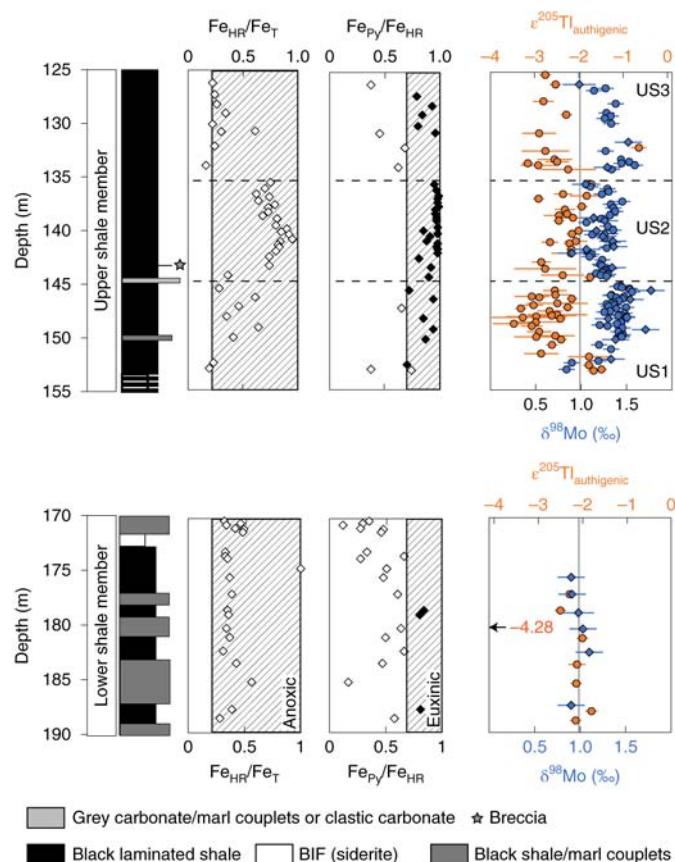


图 2 Mount McRae 页岩的地球化学剖面。斜线区域表示厌氧 ($\text{Fe}_{\text{HR}}/\text{Fe}_T > 0.22$, 一般为 0.38, $\text{Fe}_{\text{py}}/\text{Fe}_{\text{HR}} > 0.7$) 硫化沉积 (Ostrander et al., 2019)。页岩上部的铊 (Tl) 和钼 (Mo) 两种同位素呈反相关性，而在较古老的下部没有观察到这种关系

这是第一次在同一组页岩样品中测量两种同位素系统，正如预期的那样，他们发现页岩上部的较轻的铊 (Tl) 和较重的钼 (Mo) 两种同位素呈反相关关系（图 2 上），表明当时 Mn 氧化物已埋在了大片区域的海底，也就是说，25 亿年前的浅水大陆架上

已经存在充足的 O_2 。

本文的创新点在于：(1) 前人虽然从不同角度均阐释了太古代海洋有自由氧，但并未准确说明上部水体的氧化程度与自由氧的累积范围，本文几乎完美说明 25 亿年前大陆架之上浅部海水完全氧化，且规



模超过了以往的认识；(2) 已有的类似研究均是利用 Mn 氧化物的还原性分解产物，间接地反推 Mn 氧化物的存在 (Planavsky et al., 2014; Kurzweil et al., 2016)，而本文通过 Tl 和 Mo 同位素，明确了浅部大陆架上存在大量的 Mn 氧化物沉积。

本文仍存在一些不足，如上部页岩 US2 序列中两种同位素缺乏一定的相关性，原因不明；在同一套地层中，两种同位素振荡变化，也未能解释，是与 Mn 氧化物的还原分解有关，还是海水自生的变化；并未准确约束氧化海水的范围，到底是区域性还是全球性，虽然本文暗示大量的 Mn 氧化物沉淀在浅水大陆架上，但是迄今为止在 GOE 前夕并未发现大量富 Mn ($MnO > 0.5 \text{ wt.\%}$) 的地层，仅在南非~2.9 Ga Pongola 和~2.47 Ga Koegas 群中可见。此外，本文研究主要局限于单一大陆边缘，仍需选择其他古老大陆不同时代的大陆边缘沉积物开展工作，一方面证实该表层氧化海水存在的普遍性，另一方面诠释海水氧化的时间演化规律。

纵观地球的充氧历史，当前较为清晰的画面是，地球的初始氧化来自海洋，海洋和大气的氧化历史均比较复杂，本质形成原因尚存诸多争议，应是地球内部机制和大陆与生物演化综合作用耦合的结果。氧气在地球表层海水中出现的时间最早可追溯至中太古代，太古代海洋中充氧究竟为短暂性的事件 (a whiff of oxygen)，还是自光合产氧生物出现时就是一个持续性事件 (oxygen oasis)，抑或二者共存，不同

时代具有不同的体现形式。可以较为肯定的是，海洋表层海水完全氧化的现象，自 GOE 开始之时应该较为普遍，典型实例为~2.4 Ga 左右出现世界上规模最大的沉积型锰矿—南非 Kalahari。虽说表层海水与大气相通，但在太古代大气整体缺氧的背景之下（经沉积硫的非质量分馏特征等证实），依然可能存在氧化的海水 (Eickmann et al., 2018)。部分学者通过研究（如 Cr 同位素）发现在中-晚太古代大气氧水平有所升高，而最新研究却提出了质疑 (Albut et al., 2018; Babechuk et al., 2019)，认为太古代确实应存在缺氧大气和氧化海水的不平衡态。当然，该结论仍需大量研究工作支持，确立不平衡态的存在和意义以及维持的原因，可以想象的是，不平衡态的打破之时可能意味着 GOE 的开始。

综上可看出，在约束古海洋和大气的氧化状态时，最为重要的手段是利用不同的元素和同位素循环体系。然而，需强调的是，不同手段对于氧化还原状态的敏感度应该是不同的，如化学沉积岩条带状铁建造 (BIF) 和碳酸盐岩中的负 Ce 异常在太古代普遍缺乏，说明古海洋应为缺氧状态；然而其他的一些指标如 Fe、Mo 和本文提及的 Tl 同位素却说明一些大陆边缘的浅层海洋是氧化的。因而，在谈及海洋氧化时，需重点提及相对什么而言是氧化的。如何将多种手段有效的耦合起来可能是地球化学家未来急需解决的问题。然而，很明显的是，地球的氧化进程可能是一个异常曲折复杂的故事。



主要参考文献

- Albut G,Babechuk M G,Kleinhanns I C,et al. Modern rather than Mesoarchaean oxidative weathering responsible for the heavy stable Cr isotopic signatures of the 2.95 Ga old Ijzermijn iron formation (South Africa)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,2018,228: 157-189.([链接](#))
- Babechuk M G,Weimar N E,Kleinhanns I C,et al. Pervasively anoxic surface conditions at the onset of the Great Oxidation Event: new multi-proxy constraints from the Cooper Lake paleosol[J]. *Pre-cambrian Research*,2019,23: 126-163.([链接](#))
- Eickmann B,Hofmann A,Wille M,et al. Isotopic evidence for oxygenated Mesoarchaean shallow oceans[J]. *Nature Geoscience*,2018,11(2): 133-138.([链接](#))
- Kurzweil F,Wille M,Gantert N,et al. Manganese oxide shuttling in pre-GOE oceans-evidence from molybdenum and iron isotopes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,2016,452: 69-78.([链接](#))
- Ostrander C M,Nielsen S G,Owens J D,et al. Fully oxygenated water columns over continental shelves before the Great Oxidation Event[J]. *Nature Geoscience*,2019,12: 186-191.([链接](#))
- Planavsky N J,Asael D,Hofmann A,et al. Evidence for oxygenic photosynthesis half a billion years before the Great Oxidation Event[J]. *Nature Geoscience*,2014,7(4): 283-286.([链接](#))

(撰稿: 王长乐 / 矿产室)



PNAS：成岩作用记录了新元古代海水无机碳库信息

作为地球上储量最丰富的元素之一，碳广泛分布于大气、海洋、生物体和地壳中。地质历史时期海水的碳同位素组成受控于有机碳库与无机碳库的平衡，并可以被沉积的碳酸盐岩所记录。因此，海相碳酸盐岩的碳同位素被广泛应用于地球环境与生物演化研究，特别是重大地质转折期的环境变化等。

地球历史上最大规模的碳同位素漂移事件（CIEs：carbon isotope excursions，图1）发生在新元古代（~870-550 Ma），碳酸盐岩地层记录了这些事件，其碳同位

素组成介于-12‰和+9‰之间，远离现代海水无机碳库（ $\delta^{13}\text{C} = 0.8 \pm 1.5\text{\textperthousand}$ ）及新生代底栖有孔虫碳同位素值（ $\delta^{13}\text{C} = 0.9 \pm 1.7\text{\textperthousand}$ ）。该时期的CIEs不仅在区域上可以重现，部分相距很远的剖面也能对比。前人通常认为这代表当时海水溶解无机碳库（DIC）的剧烈波动。然而，亦有一些学者认为这很可能是成岩作用的产物，自生碳酸盐岩假说是其中的代表（Schrag et al., 2013）。探究CIEs的成因解释对新元古时期大气和海洋环境、氧化还原状态及生物演化具有重要意义。

碳酸盐岩台地的前缘斜坡带由于受热

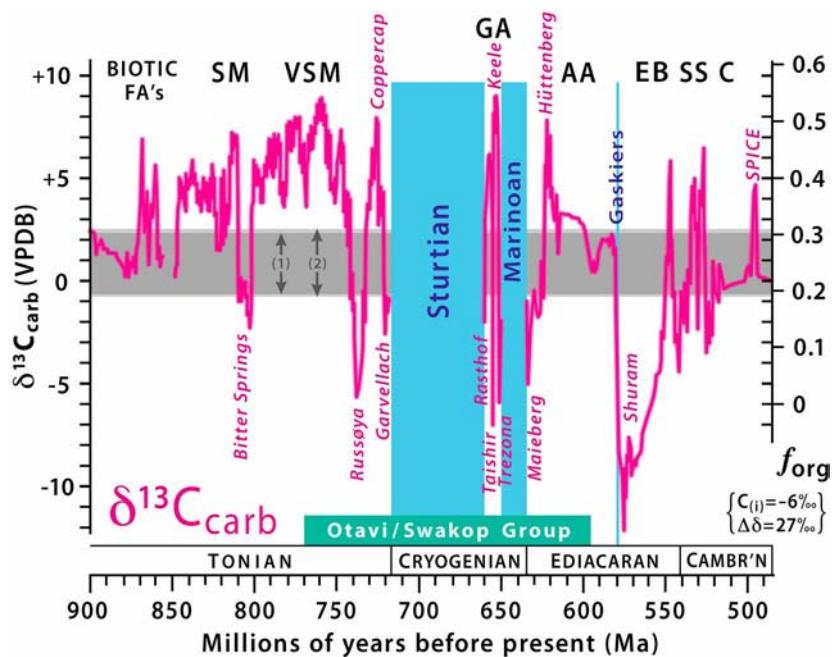


图1 900-485 Ma期间海相碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 变化图。灰色方框分别代表现代海水 DIC (1) 和新生代底栖有孔虫 CaCO_3 (2) 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值。垂向蓝色方框代表冰期。有机碳埋藏通量 (f_{org}) 假定碳的输入 $C_{(i)} = -6\text{\textperthousand}$ (VPDB) 且 $\Delta\delta = \delta^{13}\text{C}_{\text{carb}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = 27\text{\textperthousand}$ (Hoffman and Lamothe, 2019)



对流的驱使，海水持续地流过松散的沉积物然后返回到广海（图 2B、图 2C），即所谓的海水主控的成岩作用；而没有循环海水作用的区域成岩作用受控于沉积物，即所谓的沉积物主控的成岩作用。上述成岩作用分类近期由普林斯顿大学的学者提出并通过钙镁同位素研究得到很好的印证（Higgins et al., 2018）。受此启发，来自加拿大维多利亚大学和哈佛大学的前寒武地质学家 Paul F. Hoffman 教授以及麦吉尔大学的 Kelsey G. Lamothe 博士以纳米比亚北部的新元古代成冰纪间冰期（659-649 Ma）和埃迪卡拉纪早期（635-590 Ma）的 Otavi/Swakop 碳酸盐岩台地为对象，通过对比

不同沉积环境的碳酸盐岩剖面的碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$)（图 2A），发现台地前缘斜坡带受海水热对流影响的区域未记录任何 CIE，其碳同位素值与现代海水值接近。因此，这些受海水主控的成岩作用影响的碳酸盐岩很可能记录了当时广海的 DIC 信息，相关成果发表于 *PNAS*。

研究者选取了碳酸盐岩台地不同相带的剖面：台地内部相带，台地的前缘斜坡相带，及下斜坡 - 盆地相带，进行了详细碳同位素对比研究。结果显示，成冰纪的台内相白云岩碳同位素剖面出现三次 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 负漂移（Cn1, Cn3, Cn5）和两次 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 正漂移（Cn2, Cn4）；埃迪卡拉纪早期台内

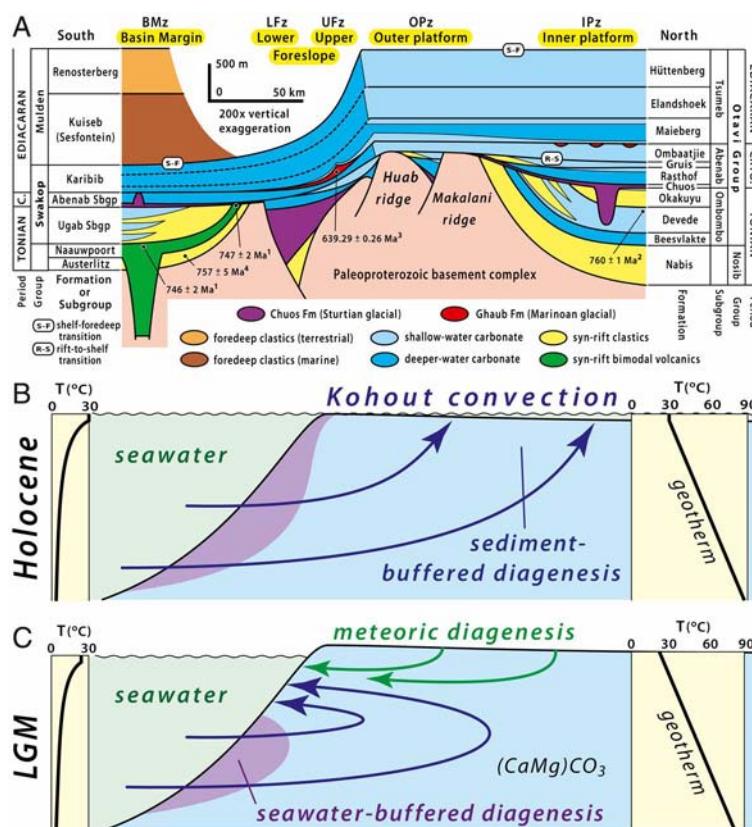


图 2 (A) 0.59-0.77 Ga 期间，纳米比亚 Kunene 地区 Otavi/Swakop 群碳酸盐岩台地构造沉积图（垂向放大 200 倍）。(B) 海平面高位期（例如全新世）理想的孔隙水对流模式图。流体主要受台地内部海水与孔隙水的温度（密度）梯度驱动。海水主控成岩作用主要发生在斜坡地区，而沉积物主控成岩作用主要发生在台地内部。(C) 海平面低位时期（例如末次冰期鼎盛期）成岩作用模式图。上斜坡受海水与大气淡水的协同影响（Hoffman and Lamothe, 2019）



相剖面有四次 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 波动 (En1 到 En4) (图 3)。有意思的是碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 总体表现为台地内部相剖面与台地前缘斜坡相剖面解耦, 与盆地相剖面有较好的耦合; 台地前缘斜坡相 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值大体与现代海水 DIC 一致, 而台内相与盆地相剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值相对亏损且变化较大。

研究认为下斜坡 - 盆地相碳同位素剖面能够较好地追踪台内相剖面碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) 记录是因为盆地浊积扇的物源主要来自碳酸盐岩台地垮塌。Cn1, Cn2 阶段, 上斜坡与台地内部碳酸盐岩剖面能较好地吻合是因为早期裂谷到陆棚的过渡还未完成, 斜坡相与台地相还未区分; Cn3, Cn4 阶段, 由于碳酸盐岩斜坡逐渐形成, 处于浅埋藏的上斜坡沉积物受海水热对流的影响 (图 2B), $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值趋于稳定。Cn5 后

期开始进入马林诺冰期, 海平面下降, 在不同地方发生差异性冰蚀作用, 部分地区没有沉积记录, 且上斜坡和台地外部受海水主控的成岩作用和大气淡水成岩作用双重影响 (图 2C)。En1 阶段, 马林诺冰期之后, 海水温度升高, 沉积和成岩速率迅速增加, 各剖面间碳同位素差异不大。其后 En2, En3 阶段, 上斜坡又恢复海水主控成岩作用影响, 逐渐稳定, 且呈现和现代海水 DIC 库相似的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 组成。因此, 本文提出上斜坡碳酸盐岩受广海海水热对流的影响改变了其原有的 CIE 信号, 并记录了与现代海水碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) 相似的广海的 DIC 信息。如果情况属实, 那么如何解释全球多个碳酸盐岩台地同时发生与广海 DIC 解耦的 CIE 呢?

作者推测当时全球范围内普遍发育的

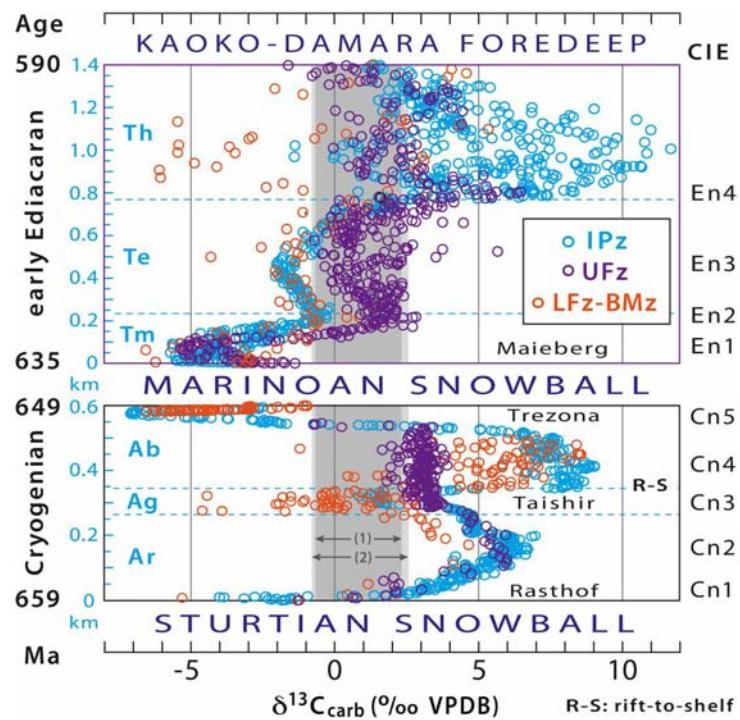


图 3 新元古代成冰纪间冰期 (Nonglacial Cryogenian, 659 to 649 Ma) 和埃迪卡拉纪早期 (early Ediacaran, 635 to 590 Ma) 纳米比亚 Otavi/Swakop 群不同沉积环境的碳同位素剖面对比图。Cn1-Cn5; En1-En4 代表 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 漂移 (Hoffman and Lamothe, 2019)



CIE 受浅海强烈的光合作用或蒸发作用造成的成核作用的同位素效应影响，而非混合海洋中的碳库发生了改变。最后，作者提出对全球其它地区发育并保存完好的新元古—寒武系碳酸盐岩台地相与斜坡相地层，如澳大利亚南方的 Cryogenian Balcoonoon 组和中国南方埃迪卡拉纪早期的陡山沱组和蓝田组进一步研究（如：碳、镁、钙同位素），或将有效验证本文的核心观点：新元古代碳酸盐岩台地广泛发育 CIE 的同时，其广海的 DIC 碳同位素组成与现代海洋相似。

最近，Jiang et al. (2019) 在四川盆地

三叠系局限蒸发泻湖相地层发现了类似新元古代的 CIE，并提出其可能是当时特殊沉积环境（水体缺氧，生物扰动作用弱，碳酸盐饱和度高）中的厌氧孔隙水主导、微生物硫酸盐还原促使、自生碳酸盐矿物沉淀的产物。众所周知，新元古代海水氧含量较低且宏体生物缺乏，因此浅海海底很可能长期“缺氧”甚至“厌氧”，适合微生物硫酸盐还原反应及自生碳酸盐岩作用发生，从而产生大量的 CIEs。而碳酸盐岩台地边缘由于存在海水的热对流作用，使得孔隙水与广海海水交换频繁而相对“富氧”，破坏了 CIE 的形成条件。

主要参考文献

- Hoffman P F,Lamothe K G. Seawater-buffered diagenesis,destruction of carbon isotope excursions,and the composition of DIC in Neoproterozoic oceans[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,2019,116(38): 18874-18879.([链接](#))
- Higgins J A,Blättler C L,Lundstrom E A,et al. Mineralogy,early marine diagenesis,and the chemistry of shallow-water carbonate sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,2018,220: 512-534. ([链接](#))
- Jiang L,Planavsky N,Zhao M,et al. Authigenic origin for a massive negative carbon isotope excursion[J]. *Geology*,2019,47(2): 115-118. ([链接](#))
- Schrag D P,Higgins J A,Macdonald F A,et al. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle[J]. *Science*,2013,339(6119): 540-543. ([链接](#))

(撰稿：张力钰，姜磊 / 油气室)



Nature Geoscience : 侏罗纪海洋生态的成功转变——从非生物控制转变为生物控制

本研究通过大量数据建立模型，用两个指标 ASI 和 SCOR_{ara} 分别表示环境的变化和生物的演化，借助两者关系发现非生物因素和生物因素对生物圈的重要性在 1.7 亿年前的侏罗纪发生转变，侏罗纪之后环境变化等非生物因素对于生物圈的影响降低，而生物间相互作用越来越重要，这种转变与中生代中期钙质浮游生物的兴起有密切关系。

在漫长的地球历史中，环境的变化控制着生物的形成和演化，生物也不断进化从而适应并改造环境。例如，在显生宙，海洋化学和气候的变化导致“文石质海”（高 Mg/Ca 比）和“方解石质海”（低 Mg/Ca 比）交替出现，许多钙质海洋生物的初始生物矿物获取、骨骼组成、骨骼生成和生长速度就受到海水 Mg / Ca 比和温度的影响。化石记录表明，显生宙主要生物类群的体型、代谢水平和生理缓冲能力等特征呈现提升的趋势，生物对环境的缓冲作用提高，特别是自中生代以来，生物灭绝率下降 (Bachan et al., 2017)。不同于生物的进化，环境如气候和海水成分表现出了一种周期性变化 (Heim et al., 2015)，这是否说明，随着地质时间的推进，相对于生物相互作用，环境变化对于生物圈演化的影响是否已经下降？

最近，英国普利茅斯大学地理与环境科学学院、计算机电子与数学学院的学者与挪威卑尔根大学和德国埃朗根 - 纽伦堡大

学的科学家合作，在 *Nature Geoscience* 上发表研究成果，讨论了生物和环境两者对于生物圈演化的重要性 (Eichenseer et al., 2019)。

研究者用两个指标分别表示海洋环境的变化和钙质生物的演化：(1) 文石质海强度 (Aragonite Sea Intensity, ASI)，由于文石和方解石的沉淀受到 Mg / Ca 比和温度的影响，该指标表示文石相对于方解石沉淀的优先程度，能在一定程度反应当时的一些海洋环境参数；(2) 文石质钙质生物的环境占有率 (Species Occurrence Rate of aragonitic genera, SCOR_{ara})，该指标表示文石质生物在所有钙质生物中所占百分比，反映了生物的演化。由于文石质生物更容易在文石质海洋中生存，因此这两个指标的协同关系能够反映环境变化对生物演化的控制程度。通过建立 SCOR_{ara} 对 ASI 的线性模型，并利用收敛交叉映射 CCM (用以检测非线性条件下的因果关系)，可以评估非生物因素对海洋钙质生物的控制强度。

结果表明：SCOR_{ara} 关于 ASI 的线性模型在古生代具有显著性，但在中生代 - 新生代没有显著性 (图 1, 图 2a、图 2b)，利用 CCM 发现在奥陶纪 - 侏罗纪 ASI 对 SCOR_{ara} 的显著动态影响，表明文石 - 方解石质海环境与 SCOR_{ara} 之间存在因果关系。CCM 在侏罗纪初期 (Sinemurian 阶) 达到最大值之后逐渐下降，直至早白垩世，并在此后

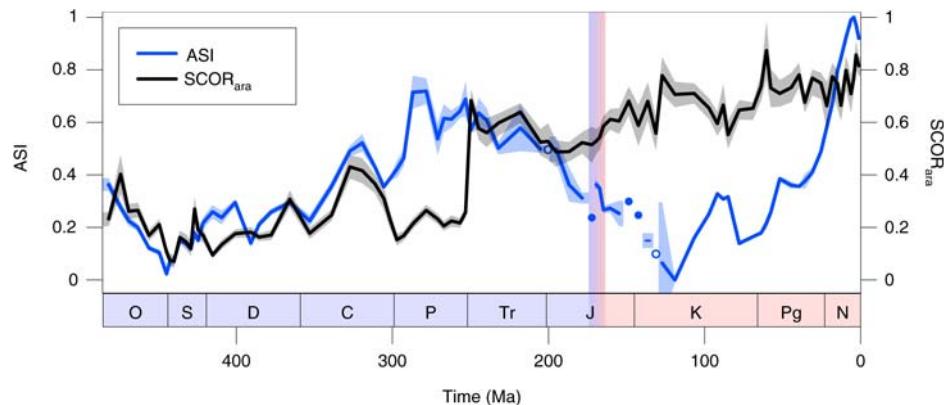


图1 奥陶纪 - 更新世的85个阶中 ASI 与 $SCOR_{ara}$ 的关系。阴影区域代表误差范围。实心点表示仅有一个数据的阶，空心圆表示数据是从相邻阶平均而来的。蓝红色过渡和垂直条标记 ASI 和 $SCOR_{ara}$ 之间关系下降最强烈的时间 (Eichenseer et al., 2019)

保持低水平（图2c），这种下降表明侏罗纪后环境变化对海洋钙质生物生态成功的影响逐渐减弱。

这些研究结果证实了环境对钙质海洋生物演化影响变弱的假说，并给出了明确的时间转折点。文石 - 方解石质海与文石质钙质生物演替的相关性的下降主要分为两幕：第一幕在石炭纪 - 二叠纪边界附近，第二幕以中侏罗世为中心（图2）。二叠纪海水具有异常高的 $CaCO_3$ 饱和度，有助于方解石形成。因此，当二叠纪 $CaCO_3$ 饱和程度升高时，具有方解石质骨骼的钙质生物比 ASI 预测的表现更好，方解石质的生物群，特别是腕足动物，在石炭 - 二叠纪边界变得更加成功。尽管二叠纪的文石质海环境对文石质生物的影响减少了，但它们之间仍保持着同步的增减趋势（图2b）。 $CaCO_3$ 饱和程度在三叠纪期间可能仍处于高位，文石质海环境继续影响着中生代早期文石质生物的形成，之后却并未如此。

中生代中期，由于钙质浮游生物的兴起，地球生命系统发生了革命性的变化 (Ridgwell, 2005)。在钙质浮游生物广泛出现之前， $CaCO_3$ 的沉淀主要发生在大陆架，主要是底栖钙质生物，如珊瑚和腕足动物。钙质浮游生物的进化成功，如浮游有孔虫、颗粒藻和鞭毛藻，使得碳酸盐工厂从大陆架延伸到了开阔大洋，由于钙质浮游生物具有更快的下沉速率，使得深海 $CaCO_3$ 沉淀增加，生物有机碳埋藏深度增加。有机碳更难以被氧化，使得耗氧量降低，导致中生代和新生代大陆架上更加富氧，大陆架生物群具有更高的代谢率和更活跃的生命模式。自钙质浮游生物大发展以来，大气和海洋二氧化碳含量的变化通过深海 $CaCO_3$ 沉淀或溶解得到了快速补偿，使得生物体不像以前那样容易受到海洋酸化等事件的影响，地球的生物化学循环从此也更加稳定，体现了生物作用对海洋生物群演化的重要影响。

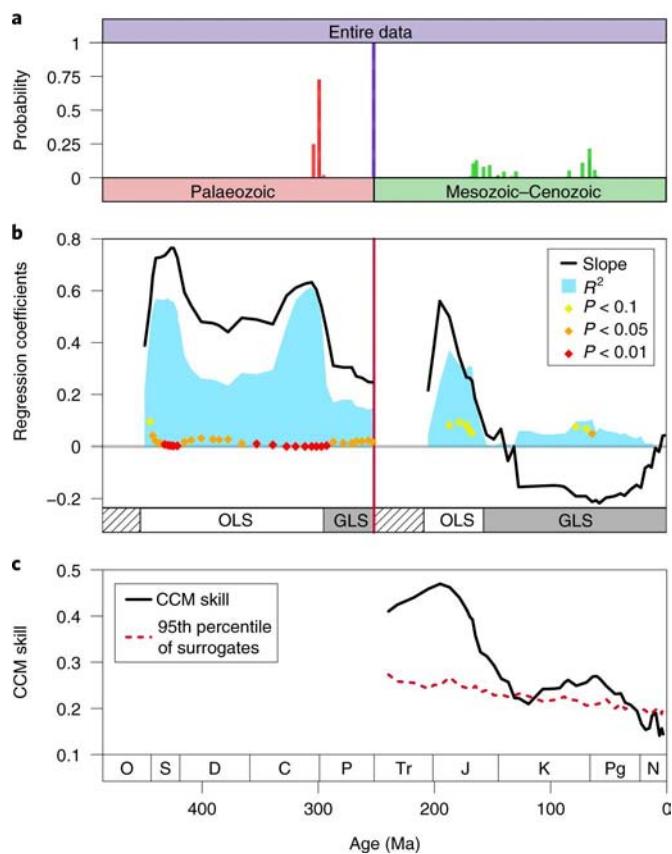


图2 SCOR_{ara} 和 ASI 之间的变化关系。a. SCOR_{ara} 和 ASI 之间的相关性强度在 C-P 边界和 P-T 边界附近发生明显变化，而在 M-C 时间中没有发现明显的变化点。b. 使用 OLS 和 GLS 得到的线性模型表明古生代中 SCOR_{ara} 和 ASI 之间存在强烈的正相关，而在早中生代正相关性变得不那么强烈，并且在侏罗世后变弱。c. 使用 CCM 检测 SCOR_{ara} 与 ASI 非线性条件下的因果关系。黑实线表示 ASI 对 SCOR_{ara} 的动态影响力，侏罗纪 CCM 持续下降，这意味着 ASI 对 SCOR_{ara} 的动态影响不断减弱 (Eichenseer et al., 2019)

主要参考文献

- Bachan A, Lau K V, Saltzman M R, et al. A model for the decrease in amplitude of carbon isotope excursions across the Phanerozoic[J]. *American Journal of Science*, 2017, 317(6): 641-676. ([链接](#))
- Eichenseer K, Balthasar U, Smart C W, et al. Jurassic shift from abiotic to biotic control on marine ecological success[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 638-642. ([链接](#))
- Heim N A, Knipe M L, Schaal E K, et al. Cope's rule in the evolution of marine animals[J]. *Science*, 2015, 347(6224): 867-870. ([链接](#))
- Ridgwell A. A Mid Mesozoic Revolution in the regulation of ocean chemistry[J]. *Marine Geology*, 2005, 217(3-4): 339-357. ([链接](#))

(撰稿：蒋子文，吴亚生 / 油气室)



Science : 新生代海洋氮—硫循环变化及其与构造运动的关系

海 洋的氧化—还原状态决定着碳、氮、硫等元素的生物地球化学循环，与生命过程息息相关，是国际地学界长久以来的研究热点。目前，相关研究多集中在通过同位素手段来重建氮、硫循环过程的变化，并反演海洋的氧化和还原状态，进而探讨其与生命演替的关系。如埃迪卡拉纪（约 6.35 ~ 5.42 亿年）海洋氧化（Fike et al., 2006）与真核生物的起源演化、二叠纪末（约 2.514 亿年）海洋缺氧与生物灭绝（Schobben et al., 2015）等。然而，将氮、硫循环与构造运动相关联的研究尚属少见。实际上，构造运动会在更大尺度上决定着海洋格局变化，进而影响海水氧化还原和氮 - 硫循环过程，值得我们去关注。在这里以新生代早期构造运动对海洋氮、硫循环的作用为例，作以简要介绍。

海洋氮、硫循环过程主要表现为这两种元素的氧化态和还原态在水体中相对比例的变化。该比例变化取决于海水中氮和硫元素不同价态化合物的输入和输出情况。海洋中硝酸盐和硫酸盐的还原是影响两元素氧化态和还原态收支的关键过程，海水中氧气的多寡决定了海洋硝酸盐和硫酸盐被还原的程度。在次氧或贫氧环境的水体中，通常硝酸盐与硫酸盐还原菌较为活跃，致使反硝化（将 NO_3^- 还原成 N_2 ）和硫酸盐还原（将 SO_4^{2-} 还原成 H_2S ）过程增强。由于细菌优先利用轻同位素 (^{14}N 和 ^{32}S)，这两个过程均伴随着重同位素 (^{15}N 和 ^{34}S) 富

集在海水中剩余的硝酸盐和硫酸盐当中。但是，同位素变化最终是否能够被记录到还取决于还原反应中剩余的硝酸盐与硫酸盐的量。例如，在沉积物孔隙水中发生的反硝化过程，由于会将其中的硝酸盐消耗殆尽而不产生明显同位素分馏。

目前，氮、硫同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$) 分析是研究海洋氧化或缺氧状态的有效手段。在众多研究载体中，有孔虫壳体碳酸盐中的有机质被认为是分析氮同位素的可靠对象，而重晶石 (BaSO_4) 和有孔虫碳酸盐晶格中的硫酸盐则是分析硫同位素的理想材料，主要是因为它们代表海洋来源且较少受到成岩作用的影响。本文讨论的研究成果均来自这两类物质的氮、硫同位素数据。

近期，美国普林斯顿大学地球科学系的 Kast 等在 Science 上首次报道了来自北太平洋 (ODP 1209)、北大西洋 (IODP U1409) 和南大西洋 (ODP 1263) 新生代以来有孔虫壳体碳酸盐中有机质氮同位素 (foraminifera-bound $\delta^{15}\text{N}$, FB- $\delta^{15}\text{N}$) 记录，并讨论了与海洋 O_2 含量相关的氮循环变化。在这里，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 被认为反映了海洋浅部亚表层 (100-300 m 深) 水体中硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 变化。他们的结果显示：古新世时，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 值要比现在高出约 5‰ - 10‰；古新世到早始新世 (57-50 Ma) 时，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 出现最大 13‰ 的显著降低；随后，在中始新世以来，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 总体维持在较低水



平，尽管在渐新世时又有所增加（图 1）。古新世时的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 值处于新生代来的最高水平，表明当时海洋硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 高，可能反映了水体中反硝化过程与沉积物内部反硝化过程发生速率的相对变化，即具有较高的全球海洋水体反硝化速率，或者较低的沉积反硝化速率。然而，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 表现出的空间差异（ODP 1209 的 $\delta^{15}\text{N}$ 要高于 ODP 1263 和 IODP U1409）更支持水体反硝化过程的增强，暗示古新世时海洋出现广泛的贫氧（suboxia）状态。此后，FB- $\delta^{15}\text{N}$ 表现出显著降低，说明反硝化减弱和海水中氧气含量增加。由于始新世以来海水温度的下降（海水中氧的溶解度会随之增加）在步调上与此时 $\delta^{15}\text{N}$ 的降低不一致（图 2），不能对其作以解释，作者将其归因于构造运动。在距今 59 Ma 时，印度和非洲板块向亚欧大陆的汇聚导致了特提斯洋的关闭，从此，温暖贫氧的特提斯

洋水不再是太平洋中温跃层和中层水的来源，转而被寒冷富氧的高纬度表层海洋水所替代，从而导致水体贫氧状况缓解，反硝化强度减弱， $\delta^{15}\text{N}$ 降低。

与此同时，海水中硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 在古新世 – 始新世时段也经历了较大的变化。例如，Paytan 等人早期在 *Science* 杂志上发表的重晶石 $\delta^{34}\text{S}$ 结果和 Rennie 等人在 *Nature Geoscience* 杂志上发表的有孔虫碳酸盐晶格硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 结果均记录了海洋硫同位素从 53-40 Ma 的显著升高，而且之后一直维持在相对高的水平（图 3C）（Paytan et al., 1998; Rennie et al., 2018）。Rennie et al. (2018) 认为构造运动所导致的硫化物埋藏海域的变化是上述硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 变化的主要原因。在新生代早期（约 50.2±1.5 Ma），印度 – 洋内科希斯坦 – 拉达克岛弧发生碰撞，导致新特提斯洋的关闭和变窄，环特提斯洋边缘区域海平面快速下降，从而会

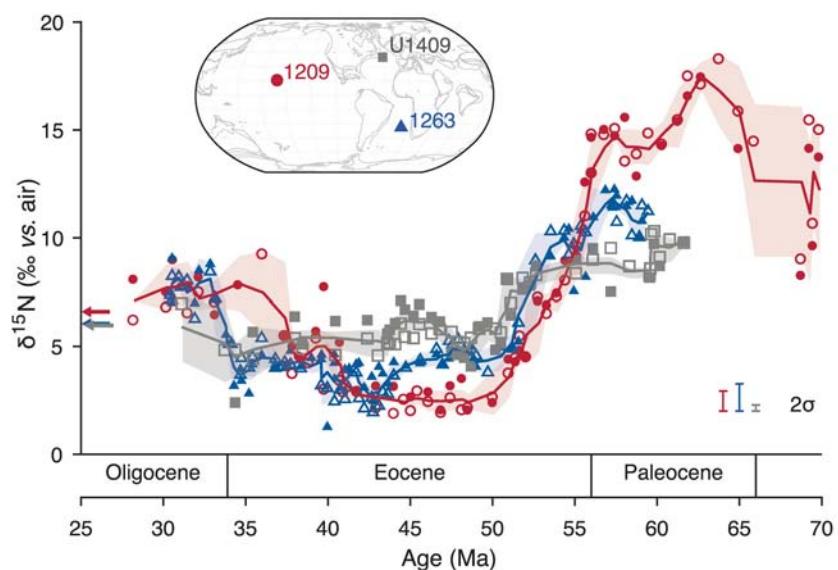


图 1 70-30 Ma 期间有孔虫壳体碳酸盐中有机质氮同位素变化。数据来自两种不同颗粒级有孔虫（颗粒 $> 250 \mu\text{m}$ 为实心， $125-250 \mu\text{m}$ 为空心）。实心线代表两种粒级数据的三点滑动平均，彩色背景区域为 1σ 不确定性区间。图中左侧箭头指示岩芯顶部的 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 值：来自南大西洋 516 钻孔（蓝色）、U1409 钻孔（灰色）和 1209 钻孔（红色）。插图为 55 Ma 前全球板块重建格局，表明本研究中 ODP 和 IODP 钻孔在当时的位置（Kast et al., 2019）

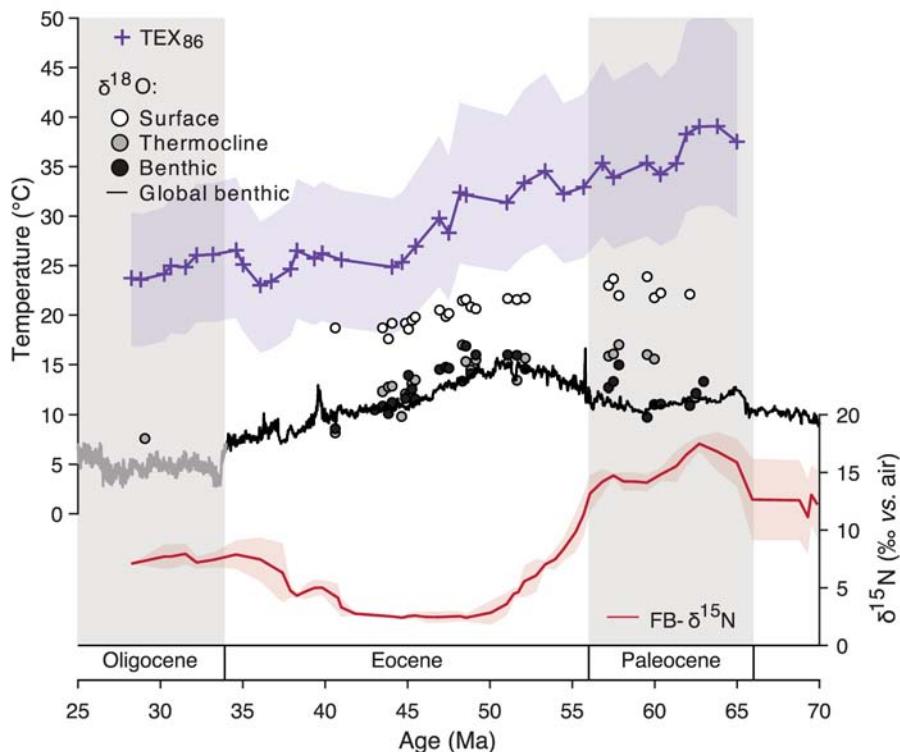


图2 北太平洋ODP 1209钻孔FB- $\delta^{15}\text{N}$ 记录与温度替代性指标(TEX₈₆和有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$)的对比。底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线的灰色段指示冰量变化可能对温度计算有影响
(Kast et al., 2019)

导致浅海沉积环境的大规模减少。浅海沉积物中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值通常要高于深海沉积物中的硫化物(因为浅层沉积环境中硫酸盐微生物还原速率较快,同位素分馏较小),所以如果全球的硫化物更多地在深海环境中埋藏,势必会使硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 普遍降低,相应地海水中硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 则会升高。

这两篇文章均提出了新生代早期构造运动导致海洋环境格局的变化,从而分别改变了海洋氮、硫循环。但是,为了解释氮、硫同位素的各自特定变化,二者对构造变动时间和海洋格局变化的着眼点却不同,尚不能用一个统一的因素来解释氮、硫循环的变化。这体现了海洋中氮、硫地球化学循环影响因素的复杂性以及同位素研究的多解性,需要多指标综合分析研究。

然而,Kast et al. (2019)提出的自59 Ma随着板块的汇聚海洋温跃层和中层水变得富氧,与Rennie et al. (2018)提出的构造变动导致硫化物埋藏至更深的海洋环境的观点并不是矛盾的。因为温跃层和中层水体的富氧会导致海洋硫酸盐还原界面向更深处移动,从而有利于更多的硫化物在深海环境中埋藏。值得注意的是海洋中溶解硫酸盐的滞留时间(~ 20 Ma)要远大于硝酸盐(<3千年),这至少是海洋硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 变化滞后于硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 约4 Ma的原因之一。今后的研究要综合多种替代性指标(如 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 和 $\delta^{53}\text{Cr}$ 等),同时注意各指标对驱动因素响应的时间尺度,采用模型分析获得更为确切的新生代海洋氧化-还原变化历史。

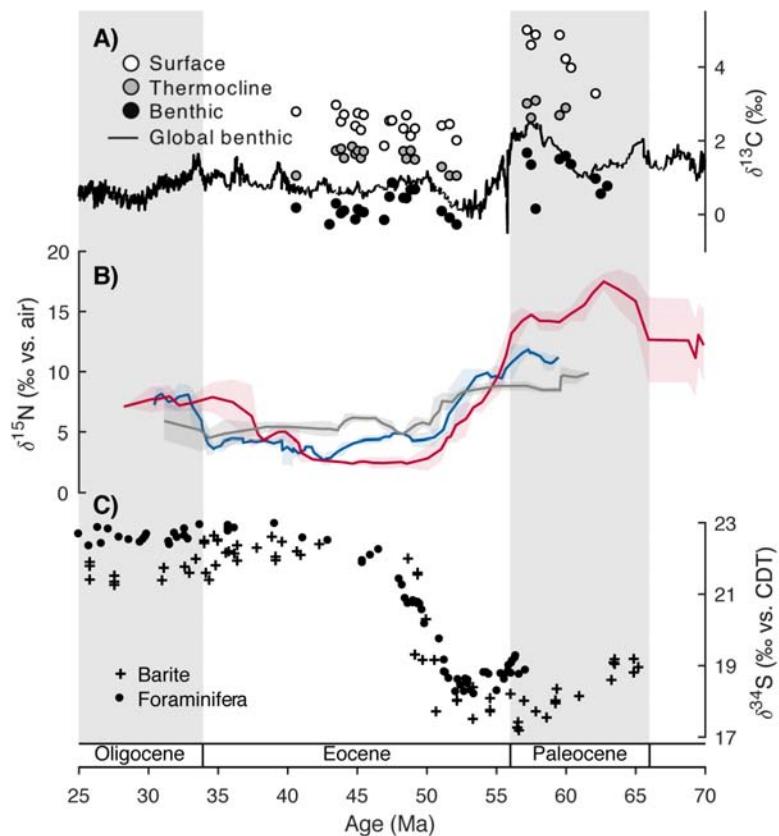


图3 新生代早期孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (A) 与 FB- $\delta^{15}\text{N}$ 记录 (B) 和重晶石、有孔虫碳酸盐晶格硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 记录 (Paytan et al., 1998; Rennie et al., 2018) (C) 的对比。从古新世到始新世, 底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值的总体下降可能表明有机质埋藏速率的降低, 与大陆坡上方水体中较高的氧浓度是一致的 (Kast et al., 2019, supplementary materials)

主要参考文献

- Fike D A ,Grotzinger J P ,Pratt L M ,et al. Oxidation of the Ediacaran Ocean[J]. *Nature*,2006,444(7120): 744-747.([链接](#))
- Kast E R,Stolper D A,Auderset A,et al. Nitrogen isotope evidence for expanded ocean suboxia in the early Cenozoic[J]. *Science*,2019,364(6438): 386-389.([链接](#))
- Paytan A,Kastner M,Campbell D,et al. Sulfur isotopic composition of Cenozoic seawater sulfate [J]. *Science*,1998,282: 1459-1462.([链接](#))
- Rennie V C F,Paris G,Sessions A L,et al. Cenozoic record of $\delta^{34}\text{S}$ in foraminiferal calcite implies an early Eocene shift to deep-ocean sulfide burial[J]. *Nature Geoscience*,2018,11(10): 761-765.([链接](#))
- Schobben M,Stebbins A,Ghaderi A,et al. Flourishing ocean drives the end-Permian marine mass extinction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,2015,112(33): 10298-10303.([链接](#))

(撰稿: 王旭 / 新生代室)



Science Advances : 海—气交换不平衡增加冰期海洋碳存储

南极冰芯记录显示，冰期大气 CO_2 浓度比间冰期平均低 $\sim 90\text{ppm}$ (相当于 $\sim 200\text{Pg C}$)，且 CO_2 的变化与温度变化具有很好的一致性 (Lüthi et al., 2008) (图 1)。冰期消失的大气 CO_2 去向何处？受哪些机制控制？这些问题一直是古气候学界亟需解决的重大科学问题。海洋碳库储量约为 38000 Pg C ($3.8 \times 10^{19}\text{ g C}$)，相当于大气碳库的 60 多倍，通过海气交换，海洋生物量的变化以及海洋物理 / 化学状态的变化，是调控冰期 - 间冰期大气 CO_2 变化的主要碳库。海洋无机碳库 (DIC) 的变化主要涉及到两个方面的碳循环过程：溶解泵和生物泵。温度决定 CO_2 在海水中的溶解度，温度越低， CO_2 溶解度越大。当表层洋流将热带地区海水输送到高纬度地区时，海水冷却，通过海气交换吸收大气中 CO_2 ，

导致表层海水较高的即时溶解无机碳浓度 (C_{pref})，并在高纬地区注入到深海，这一过程即为溶解泵 (图 2A)。生物泵 (C_{reg}) 则指海洋浮游生物通过光合作用固定大气 CO_2 ，以颗粒有机物 (软组织泵： C_{soft}) 和无机碳 (无机碳泵： C_{CaCO_3}) 的形式下沉并矿化分解向深海输送溶解无机碳的过程 (图 2A)。

基于碳泵的变化，许多假说被提出来解释冰期大气 CO_2 浓度的降低。这些假说大体上可分为两类。其一是冰期温度降低增强溶解泵。理论计算表明冰期全球平均海表温度降低 $\sim 2.5^\circ\text{C}$ 将导致大气 CO_2 浓度降低 25ppm ，只能解释大约 $1/4$ 冰期 CO_2 变化量 (Williams and Follows, 2011)。其二是增加冰期生物泵效率。可通过三种方式来实现：(1) 海洋环流重组，大约能解释 $\sim 40\text{ppm}$ 冰期 CO_2 变化 (Brovkin et

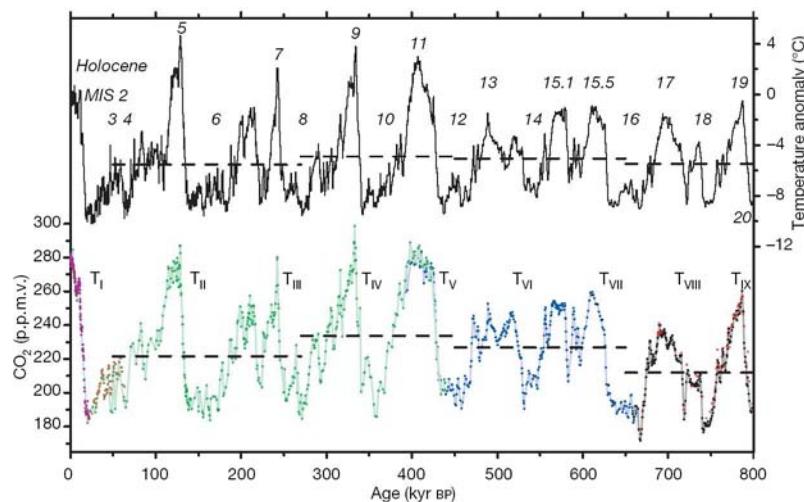


图 1 冰期 - 间冰期大气 CO_2 浓度和温度记录 (Lüthi et al., 2008)

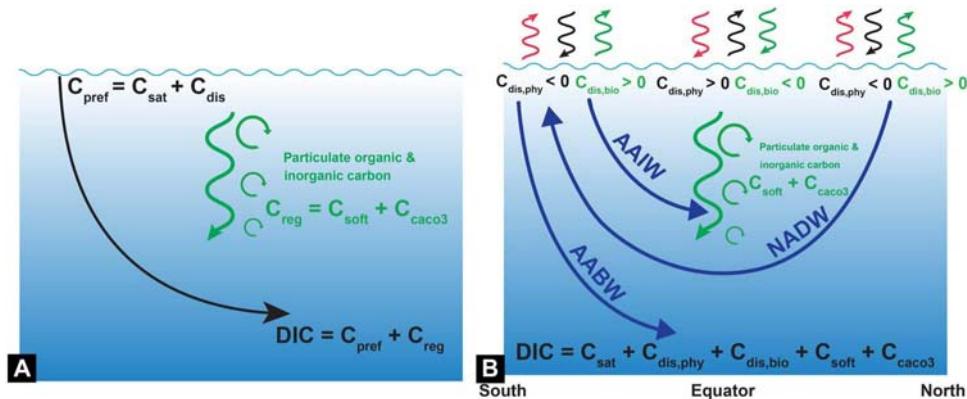


图 2 海洋碳组分分解示意图 (Khatiwala et al., 2019)

al., 2007); (2) 海冰范围扩张, 大约能解释 $\sim 67\text{ppm}$ 冰期 CO_2 变化; (3) Fe 施肥, 仅能解释 $\sim 5\text{-}28\text{ppm}$ 的 CO_2 变化量(Martin, 1990)。这些假说均隐含一个前提, 即海 - 气交换平衡。然而, 海水碳酸盐系统由溶解 CO_2 、碳酸根和碳酸氢根组成, 对海水 CO_2 分压变化具有较强的缓冲效应, 导致海表水同大气的平衡交换非常慢 (~ 1 年)。因此, 大部分表层海水同大气并未达到交换平衡。比如, 在高纬地区, 海水变冷吸收大气 CO_2 , 由于平衡交换时间较慢, 使得这些水体在下沉时实际含有的 CO_2 量比理论上能够从大气中吸收的要少的多。而在上升流区域, 洋流将生物矿化产生的 CO_2 带到表层, 由于缓慢的气体交换过程, 海水脱气并不完全, 使得这些水体下沉时实际含有的 CO_2 量比理论上能够从大气中吸收的要多。类似的不平衡过程使得准确定量海洋 DIC 分布、评估各种过程对冰期 CO_2 的贡献变得异常困难。

近期, 英国牛津大学 Khatiwala 教授及合作者在 *Science Advances* 上发表文章, 巧妙地将溶解泵 (C_{pref}) 分解为溶解平衡组分 (C_{sat})、物理过程不平衡组分 ($C_{\text{dis, phy}}$) 和生物过程不平衡组分 ($C_{\text{dis, bio}}$) (图 2B),

试图定量海 - 气交换不平衡对冰期 CO_2 变化的贡献。Khatiwala 教授等将这一分解应用到海洋生物地球化学模型, 模拟了冰期海洋各组分碳的变化情况, 发现热带海洋和南大洋表层海水表现为正的海 - 气交换不平衡 ($C_{\text{dis}} > 0$), 即为过饱和水体, 当这些水体输送到深海, 将增加海洋的碳储存; 在副热带、北大西洋绕极区和北冰洋表层海水表现为负的海气交换不平衡 ($C_{\text{dis}} < 0$), 即为不饱和水体, 当这些水体输送到深海, 将减少海洋的碳储存(图 3)。模拟的各组分碳储库结果显示(图 3A), 同工业革命相比, 冰期溶解平衡组分 (C_{sat}) 和生物软组织 (C_{soft}) 碳库分别减小 $\sim 800\text{Pg C}$ 和 $\sim 200\text{Pg C}$; 而海 - 气交换不平衡组分 (C_{dis}) 增加了 $\sim 800\text{Pg C}$ 。这些结果说明海 - 气交换不平衡会显著影响深海溶解无机碳储库, 而以往的研究均为考虑这一效应。

为了弄清海洋各组分碳储库变化和冰期 CO_2 变化的原因, Khatiwala 等开展了一系列敏感性实验(图 4)。结果表明:(1) 由于海 - 气不平衡效应, 冰期海洋环流的重组(即相对浅、弱的大西洋经向环流)和海冰范围的增加均导致大气 CO_2 浓度增加, 与解释冰期大气 CO_2 降低背道而驰。该结果

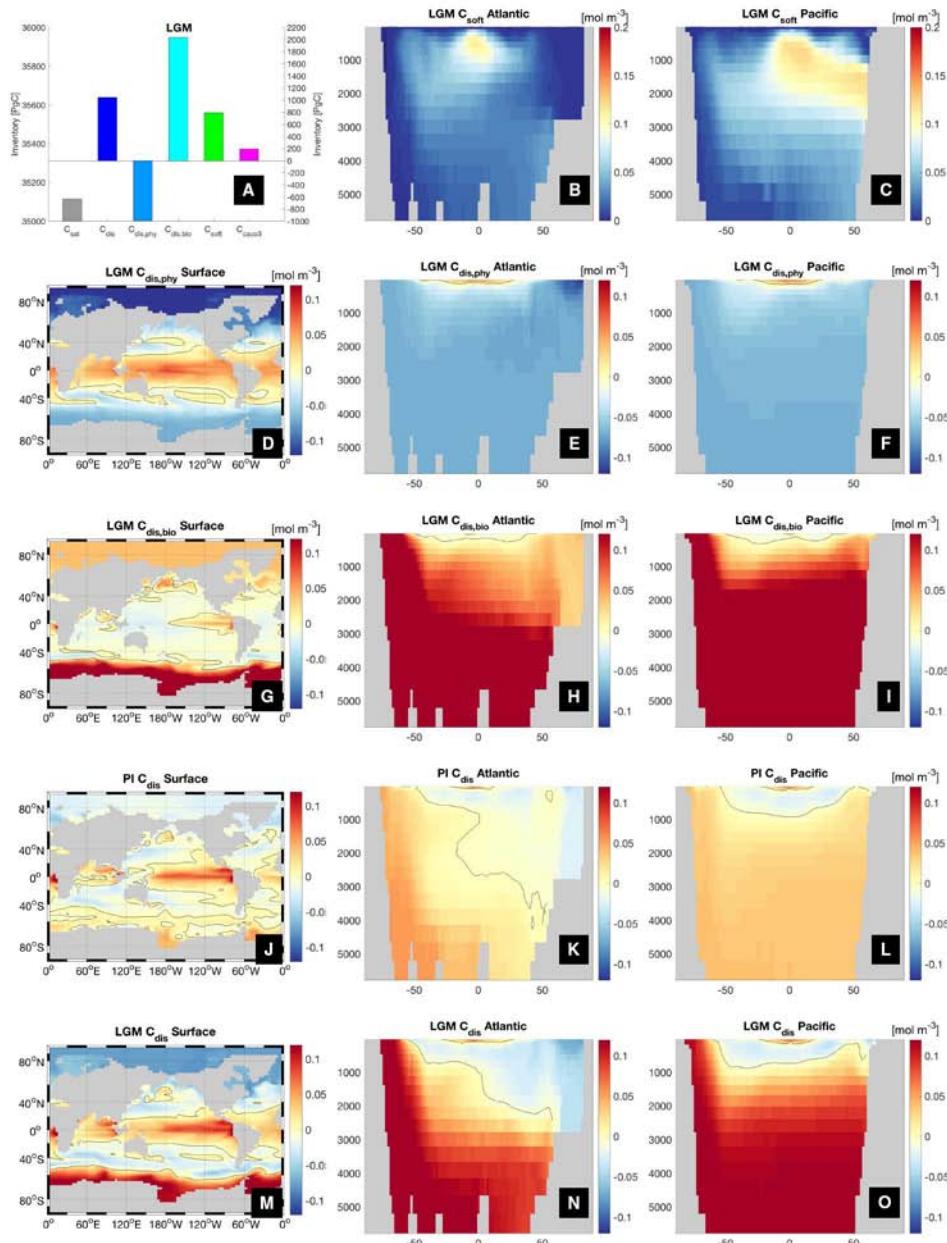


图3 末次冰盛期（LGM）平衡模拟海洋碳组分。（A）溶解平衡组分（ C_{sat} ）碳库（左纵坐标）及其他组分碳库（右纵坐标）；（B-O）LGM 及工业革命前（PI）表层海洋、大西洋和太平洋各组分碳组成（Khatiwala et al., 2019, supplementary materials）

说明目前流行的解释冰期 CO_2 变化的“环流重组”和“海冰”假说尚待商榷。（2）海—气交换不平衡显著提高了冰期降温及 Fe 施肥对 CO_2 降低的贡献，大致能解释 $\sim 3/4$ 以上冰期 CO_2 变化量。冰期海表温度变化的空间不均一性减弱了海表水不饱和状态，

通过增加物理过程不平衡组分（ $C_{\text{dis, phy}}$ ），导致更多的碳被输送到深海，该过程大致能解释冰期大气 CO_2 变化的一半。这些结果与冰芯记录的大气 CO_2 与温度的紧密耦合是一致的。

该研究通过引入海气交换不平衡的概



率到海洋生物地球化学模型中，发现不平衡过程在解释冰期 – 间冰期大气 CO_2 浓度变化

中起关键作用，这为今后进一步探讨冰期海洋碳循环过程提供了新的视野和约束。

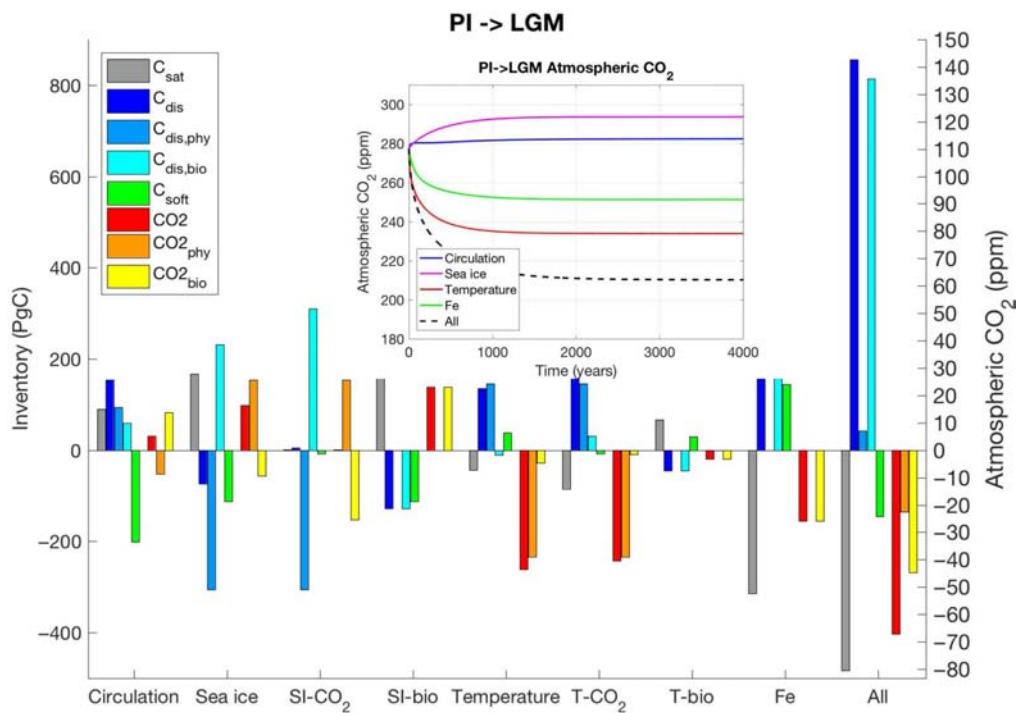


图 4 工业革命前海洋碳循环对末次冰盛期扰动的敏感性实验结果。SI-CO₂ (T-CO₂) 和 SI-bio (T-bio) 指海冰 (温度) 仅影响海气 CO₂ 交换或生物过程的敏感性实验 (Katiwala et al., 2019)

主要参考文献

- Brovkin V,Ganopolski A,Archer D,et al. Lowering of glacial atmospheric CO₂ in response to changes in oceanic circulation and marine biogeochemistry[J]. *Paleoceanography*,2007,22(4).([链接](#))
- Katiwala S,Schmittner A,Muglia J. Air-sea disequilibrium enhances ocean carbon storage during glacial periods[J]. *Science Advances*,2019,5(6): eaaw4981.([链接](#))
- Lüthi D,Le Floch M,Bereiter B,et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present[J]. *Nature*,2008,453(7193): 379-382.([链接](#))
- Martin J H. Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis[J]. *Paleoceanography*,1990,5(1): 1–13. ([链接](#))
- Stephens B B,Keeling R F. The influence of Antarctic sea ice on glacial-interglacial CO₂ variations[J]. *Nature*,2000,404: 171-174.([链接](#))
- Williams R G,Follows M J. Ocean Dynamics and the Carbon Cycle: Principles and Mechanisms[M]. Cambridge University Press,2011.

(撰稿：陈祚伶 / 新生代室)



Science : 海洋的漫长记忆——历史上的小冰期仍在太平洋深处上演

已有的大量古气候记录显示，地球地表系统发生了一系列千年-百年尺度的气候变化 (Dahl-Jensen et al., 1998)，比如近一千年，全球经历了中世纪暖期（公元 1000-1500 年），随后进入全球小冰期（公元 1500-1850 年），之后再次进入 20 世纪全球增温期。受地表温度变化影响，海洋也应响应全球的变化，但是由于海洋巨大的热容量和漫长的海洋环流热输送过程，整个海洋完成一次增温或降温的过程需要经历 1000 多年的时间 (Primeau, 2005 ; Gebbie and Huybers, 2012)。这就意味着海洋可能会承载过去某个时期地表温度变化的相关信号，但是这些信号是否能检测出来？海洋的温度滞后效应是否会影响当前的全球变暖过程？这些问题目前还不清楚。

为了研究 2000 年来海洋内部如何响应地表温度的变化，伍兹霍尔海洋研究所 (WHOI) 和哈佛大学的研究人员将模拟结果 EQ-0015 与先前海洋不同区域不同深度系统的温度观测数据，以及世界海洋环流实验结果相结合，探讨了上述问题，成果发表于 *Science*。

他们首先利用总矩阵相互比较法 (TMI) (Gebbie and Huybers, 2010) 反演了现代海洋环流示踪观测值，在对经验环流模型进行初始化后，进行了 2000 年的模拟，估算出各地海洋对地表温度响应的差异。结果显示：虽然大部分海洋已经随全

球变暖而升温，但太平洋深处的海水温度变化滞后了几个世纪，为响应小冰期的变化，目前反而正在降温（图 1）。

由于 EQ-0015 模拟实际上是简化模型，研究者需要通过观测数据来进一步验证。他们找到了 19 世纪 70 年代英国皇家海军“挑战者”号 (H.M.S. Challenger) 上的海洋温度测量数据和 90 年代世界海洋环流实验 (WOCE) 的现代观测结果。在对 HMS 的历史数据进行异常值筛选，并校正压力以及麻绳伸展（悬挂温度测量仪器的麻绳具有伸展性）对温度计数值的影响后，进一步通过对分析 WOCE-HMS 的数据（差值）(图 2) 发现，全球海洋的大部分地区的上层海水 (1000 m 以上) 都在变暖，这些区域的变暖是 20 世纪地球变暖的结果。但是 WOCE-HMS 数据 (图 2) 同时显示，大西洋的整体都在变暖，而太平洋深部 (在大约 1000 米以下) 却正在变冷，模型的预测与实测数据是吻合的。这再次证明：太平洋深处的温度变化落后了地球表层气候变化几个世纪，太平洋仍然“记得”数百年前全球经历的小冰期。

将大西洋和太平洋全流域温度趋势平均得到的 OPT-0015 与观测到的冷却趋势进行比较后发现，OPT-0015 的结果和观察值的变化趋势之间显示了很好的对应关系，只是 OPT-0015 太平洋深部冷却趋势更强。这证明太平洋深处仍在变冷这一特征是一个真实的现象。温度趋势平均观测值 OPT-

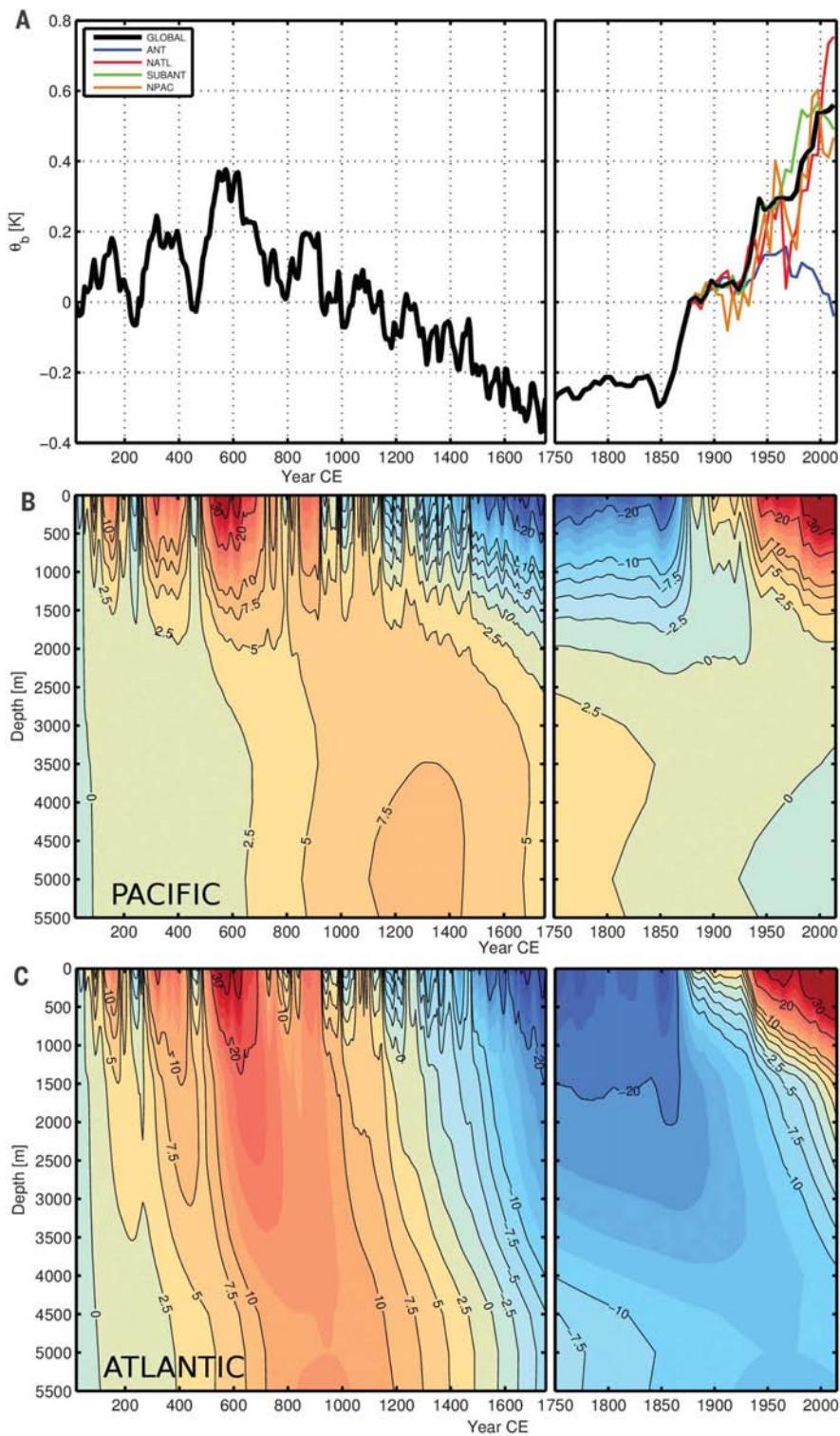


图 1 海洋内部 2000 年对地表温度变化响应的异常值图 (Gebbie and Huybers, 2019)。(A) 2000 年来全球平均 (黑线) 和区域平均 (彩色线) 表面温度异常值 ; 1870 之前的数据来自古气候指标的估算值 , 1870 之后为仪器观测值 ; (B) EQ-0015 的太平洋平均温度异常值随时间演化的分布图 ; (C) EQ-0015 的大西洋平均温度异常值随时间演化的分布图

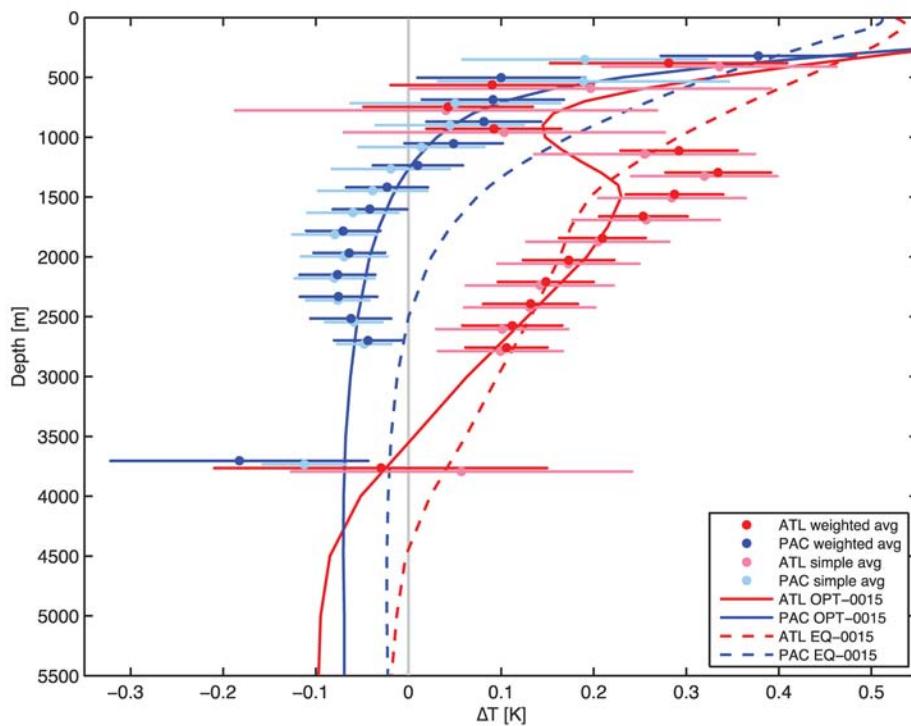


图 2 WOCE-Challenger 温差随深度的变化 (Gebbie and Huybers, 2019)。红线：ATL，大西洋；蓝线：PAC，太平洋；虚线：模型 EQ-0015；实线：观测 OPT-0015

0015 可给出更详细的历史时期整个海洋热量变化结果，例如太平洋热异常变化趋势（图 3）认为太平洋深处的冷却趋势可能导致 20 世纪吸收的热量下降了大约 30%，意味着几百年前的小冰期寒冷期仍然通过太平洋底部正在冷却的海水来影响着现代气候的变化。

上述研究预示太平洋深海的降温可能对当前全球增温会起到减缓的作用。目前大气中含有的大量温室气体将引起的增温，

可以通过与太平洋海底的正在进入小冰期的冷却海水进行热交换达到平衡，从而可能减缓温室气候造成的地表大幅度增温。但是太平洋深部小冰期降温过程结束后，全球的增温幅度是否会增加可能将是一个我们亟待思考的问题。全新世 10000 年来发生了一系列千年尺度的气候变化，深部海洋的滞后效应在多大幅度上影响着地表气候的变化？这可能是一个将来需要进一步深入研究的前沿课题。

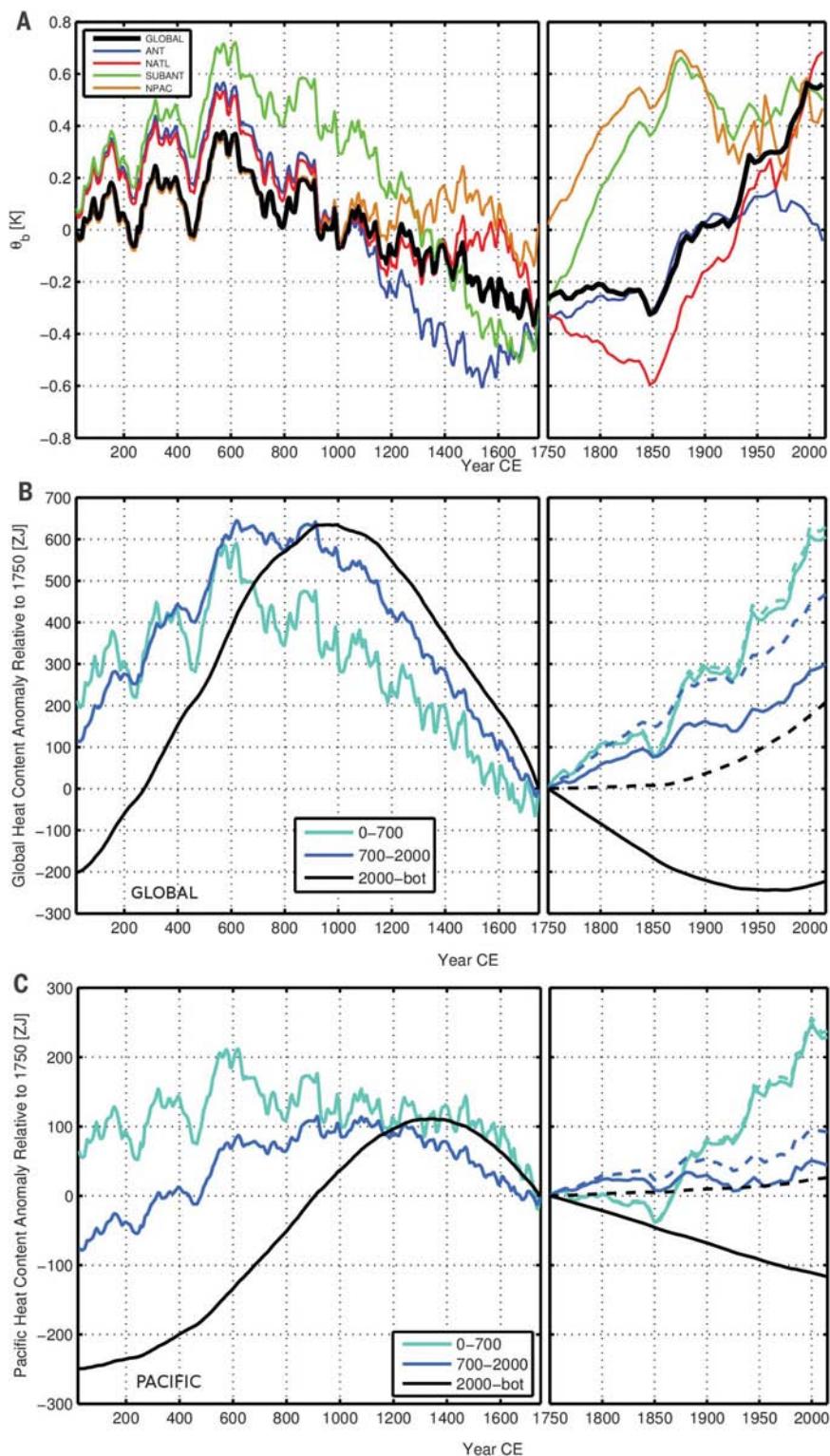


图 3 2000 年来区域地表温度变化和海洋热量变化图 (Gebbie and Huybers, 2019)。
(A) 地表温度变化历史。包括四个主要海表层区域（彩色线）和全球加权平均值（黑线）。
(B) OPT-0015 模型再现的相对于公元 1750 全球海洋热含量异常的变化历史。
(C) OPT-0015 模型再现的相对于公元 1750 年太平洋热含量异常的变化历史。青色：上层，0-700 米；蓝色：中层，700-2000 米；黑色：深层，2000 米以下；ANT：南极；NATL：北大西洋；SUBANT：亚南极；NPAC：北太平洋



主要参考文献

- Dahl-Jensen D,Mosegaard K,Gundestrup N,et al. Past temperatures directly from the Greenland ice sheet[J]. *Science*,1998,282(5387): 268-271..([链接](#))
- Gebbie G,Huybers P. Total matrix intercomparison: A method for determining the geometry of water-mass pathways[J]. *Journal of Physical Oceanography*,2010,40(8): 1710-1728.([链接](#))
- Gebbie G,Huybers P. The mean age of ocean waters inferred from radiocarbon observations: Sensitivity to surface sources and accounting for mixing histories[J]. *Journal of Physical Oceanography*,2012,42(2): 291-305.([链接](#))
- Gebbie G,Huybers P. The Little Ice Age and 20th-century deep Pacific cooling[J]. *Science*,2019,363(6422): 70-74.([链接](#))
- Primeau F. Characterizing transport between the surface mixed layer and the ocean interior with a forward and adjoint global ocean transport model[J]. *Journal of Physical Oceanography*,2005,35(4): 545-564.([链接](#))

(撰稿：王静康，旺罗 / 新生代室)



Nature Geoscience : 氧化海底环境中持续的有机质沉积

海 底深部沉积物中富含僵尸般的奇特微生物：虽然是活的，但生长缓慢，需要几十年才能完成单细胞分裂，同样的过程在海洋表面只需几分钟。通过对这些微生物赖以生存的食物——有机碳的研究，有望增进我们对地球甚至是宇宙中生命生存极限的认识。美国 Woods Hole 海洋中心的 Emily R. Estes 等，通过对北大西洋和南太平洋寡营养区的氧化型海底沉积物剖面的研究，揭示其有机碳的化学组成特征与富集机制，并估算了其全球范围的总量，相关成果发表在 *Nature Geoscience* 上。

他们在北大西洋（R/V 克诺尔）和南太平洋（R/V 雷维尔）中部海域四口钻探井的深海沉积物中，发现了低含量的有机碳分子。沉积物主要由沉积速率低的远洋粘土矿物组成，含氧量为 160-200 μm ，形成于 11.2-24.0 Ma 之间，有机碳含量非常低（< 0.3%）且随埋深增加迅速降低（< 0.05%），C/N 比值低且亦随深度增加而降低。通过近边 X 射线吸收精细结构光谱分析（NEXAFS）发现，有机碳的化学组成基本一致：表现为脂族（脂环族）和 O- 烷基碳的支架中，富含酰胺和羧酸（图 1），且与深度无明显相关性。通过对比采集样品与生

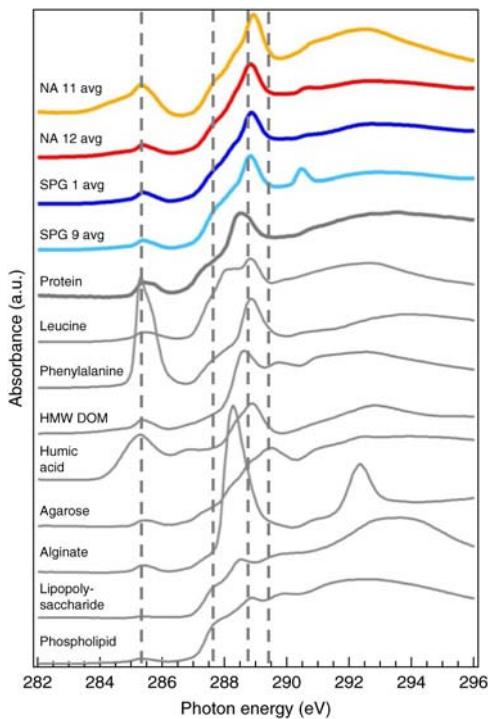


图 1 四口研究井的平均 NEXAFS 光谱与标样的比较图。为了做对比把谱图摆放在一起，其中蛋白质谱图标准为牛血清蛋白，垂直虚线从左到右分别标出了芳香碳（285.4 eV）、脂肪族碳（287.6 eV）、酰胺和羧酸碳（288.7 eV）和 O- 烷基碳（289.4 eV）近似的峰值位置。a.u. 为任意单位



物分子-环境化合物标准的光谱图，他们认为这些有机碳很可能来自蛋白质降解。

通常，在氧化环境中微生物以氧气为新代谢的燃料，通过降解有机碳来生成细胞并重建自己的结构和细胞器。大西洋和太平洋的深海寡营养区沉积物富氧，有机碳含量很低。有机碳理应是稀缺资源，会成为微生物争抢的“美餐”，但不知何故研究区存在过量的有机碳剩余。前人研究认为微生物之所以没有“吃掉”多余的碳，是因为有机碳以一种无法代谢的形式出现。但研究区这些有机物是可以被微生物降解的。因此，该论文提出了一个更合理的解释：有机碳与沉积物中的矿物融合，导致其无法被微生物直接利用，因此幸存至今。

文章进一步提出在海底深部沉积物中，由于有机碳分布稀疏，微生物运动迟缓，无法获取足够量的碳来维持快速的新陈代谢活动。当微生物的活动、扩散能力低，而其赖以生存的营养物质（有机碳）以物理隔绝的“孤岛”形式存在时，微生物将无法有效利用这些营养物质，因此生长停滞。

通过远洋基底年龄、沉积物厚度、全球氧化远洋沉积物面积等参数，结合本次研究中有机碳丰度剖面，本研究计算出该类型有机碳含量大致在 6.4×10^{21} - 1.6×10^{22} g 之间，占现代海洋有机碳总量的 ~50%-120%（图 2）。因此，氧化的海底沉积物中的碳库比我们想象的要多得多，其含量此前被大大低估了。

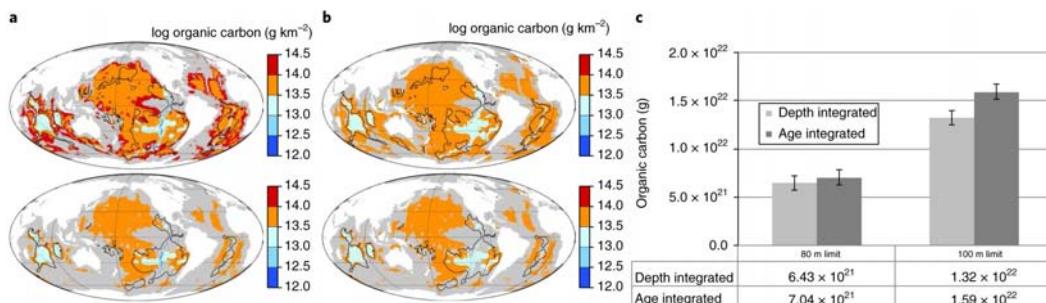


图 2 全球氧化远洋沉积物中有机碳含量估算。a、b. 分别通过有机碳丰度剖面与氧化远洋沉积物年龄 (a) 和深度 (b) 的关系计算得出的有机碳含量，据 D' Hondt et al. (2015) 报道的相关沉积物的等厚线图，氧化沉积物最大厚度分别假定为 100 m (顶部图) 和 80 m (底部图)；c. 计算得到有机碳总量的范围为 6.4×10^{21} - 1.6×10^{22} g

主要参考文献

- D' Hondt S, Inagaki F, Zarikian C A, et al. Presence of oxygen and aerobic communities from sea floor to basement in deep-sea sediments [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(4): 299. ([链接](#))
- Estes E R, Pockalny R, D' Hondt S, et al. Persistent organic matter in oxic subseafloor sediment [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 126-131. ([链接](#))

(撰稿：姜磊 / 油气室)



Nature : 海洋固氮作用新格局

氮是生物的关键营养元素之一。1934年，美国海洋学家 Alfred C. Redfield 发现大洋海水 N/P 比值表现出显著的一致性，后续进一步揭示海水和浮游生物均具有相近的 C : N : P = 106 : 16 : 1 的关系，即著名的 Redfield Ratio。Redfield Ratio 极大地推动了我们对海洋生物地球化学循环的理解，Nature Geoscience 期刊 2014 年建立了专题网页，对相关的最新研究成果和观点进行了汇集。

Redfield Ratio 常作为判别海洋生产力的限制性营养元素的依据。N/P 比值高于该值则认为是 P 为限制性元素，低于此值则认为是 N 为限制性元素。目前，海洋大部

分海域呈现出 N 为限制元素特征，并制约着表层初级生产力 (Tyrrell, 1999)。因此，海洋氮循环强烈控制着初级生产力，进而影响碳循环和气候 (e.g. Gruber and Gallo- way, 2008)，受到生物地球化学研究者的广泛重视。然而，除少数原核生物可以直接利用氮气外，植物只能吸收利用铵盐和硝酸盐。因此，海洋一方面通过微生物（如部分细菌、放线菌和蓝细菌等）固氮作用将海水里溶解的氮气转化为生物可利用的铵盐和硝酸盐，另一方面则通过反硝化作用将硝酸盐还原为氮气，构成海洋氮循环主要路径，并共同调节海水硝酸盐含量，总体维持着海水 N/P 比值稳定（图 1）。

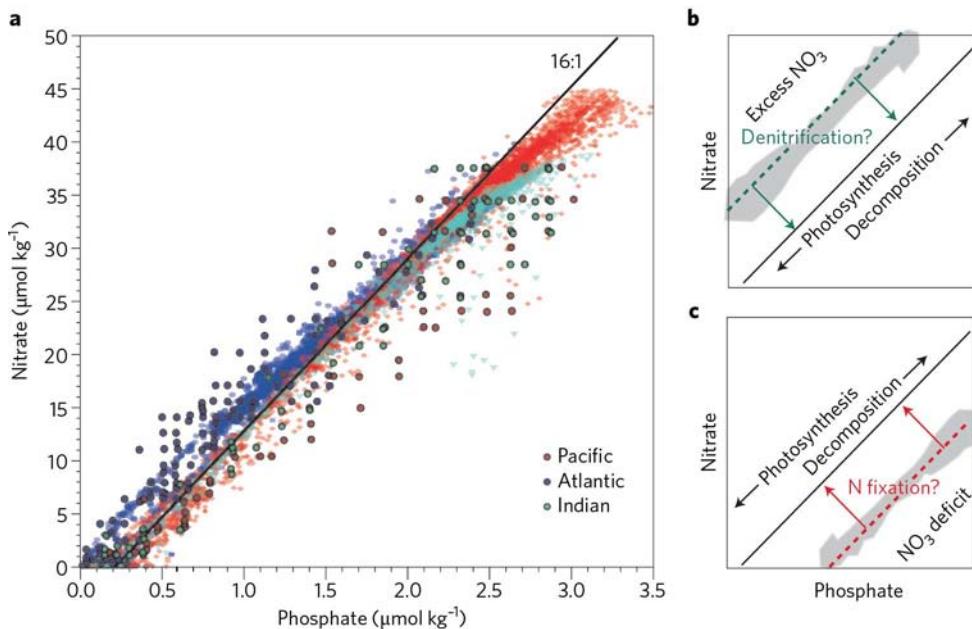


图 1 (a) 海洋硝酸盐和磷酸盐浓度总体呈现较稳定一致的 16 : 1 比值关系；(b) 反硝化作用 (Denitrification) 消除过量硝酸盐；(c) 固氮作用 (N fixation) 补充硝酸盐，二者动态维持着海洋 N/P 比值稳定 (Gruber and Deutsch, 2014)



尽管海洋氮循环研究已取得了诸多进展，但是受限于海洋现场观测空间覆盖率及时空变化的影响，海洋固氮作用的空间格局、速率及控制因素仍不甚明了。2007年，华盛顿大学的Curtis Deutsch副教授及其合作者结合海洋环流模式（Ocean General Circulation Model）、海洋表层水体营养元素丰度数据，以及恒定的浮游植物N/P比值，通过建立地球化学模型P*方法，分析海水硝酸盐和磷酸盐的源-汇及相对丰度，对比评估海水与有机质之间的N/P比值，诊断识别出海洋固氮作用主要发育于热带东太平洋海域，与反硝化作用海域相重叠，揭示出海洋固氮作用的空间格局，相关成果发表于*Nature* (Deutsch et al., 2007)。然而，近年部分海域现场观测结果显示，固氮作用和反硝化作用分别盛行于不同海域 (e.g. Knapp et al., 2017)，显著不同于Deutsch的结论。因此，关于海洋固氮作用的空间格局存在显著争议，影响对海洋氮循环的合理认识。

在此背景下，加州大学欧文分校王为磊博士及其合作者通过建立生物地球化学-生态学模型，综合研究了海洋固氮作用及其控制因素，重新揭示了海洋固氮作用的空间格局，修正了Deutsch et al. (2007)的观点，调和了与实际观测数据之间的矛盾；相关成果发表于*Nature* (Wang et al., 2019)，并在同期刊发评述文章 (Gruber, et al., 2019)。

在该研究中，Wang et al. (2019) 对P*方法进行了借鉴和优化，改进并采用了受实际观测数据约束的海洋年平均环流、完整水柱的营养元素丰度数据，以及非恒定的浮游植物N/P比值，建立了生物地球

化学反演模型。同时，他们也对通用地球系统模型（Community Earth System Model, CESM）进行了改进和模拟，以揭示海洋固氮作用的控制因素，并对比验证了两种模型模拟结果的可靠性。

他们的生物地球化学-生态学模型揭示（图2a）：海洋亚热带环流海域固氮作用强烈，并为表层生产力提供了至少30%的氮需求量；热带东太平洋和阿拉伯海地区的反硝化作用强烈，但固氮作用程度却极低。因此，海洋固氮作用主战场从反硝化作用海域（基于P*方法的认识）转移至亚热带环流海域（基于该研究的认识）（图3），与海洋实际观测数据（如热带东太平洋实测低速率和西太平洋实测高速率）更为一致。此外，他们进一步揭示海洋固氮生物及固氮作用受到多种因素的共同制约：(1) 大西洋和东太平洋大部分地区固氮作用分别受制于营养元素P或Fe的供给（图2b）；(2) 水柱营养盐N:P比值变化对固氮作用影响有限；(3) 浮游动物捕食固氮微生物，将显著影响其丰度和活动，进而抑制固氮作用（图2c）。因此，亚热带环流海域虽然总体贫乏营养元素，但是具有足量的Fe和P，可支持固氮微生物与其他浮游植物的竞争，呈现强烈的固氮作用。同时，该研究认为，海洋氮的年度输入量（固氮作用、及河流和大气氮输入）和损失量（反硝化作用）总体处于平衡状态。

王为磊等的研究揭示了海洋固氮作用的新空间格局（图3）及其控制因素（图2），并认为海洋固氮和反硝化作用之间的负反馈效应弱于传统估计，预示海洋氮储库具有失稳的潜力，对传统认识具有明显的改进，是海洋氮循环的重要进展。值得强调

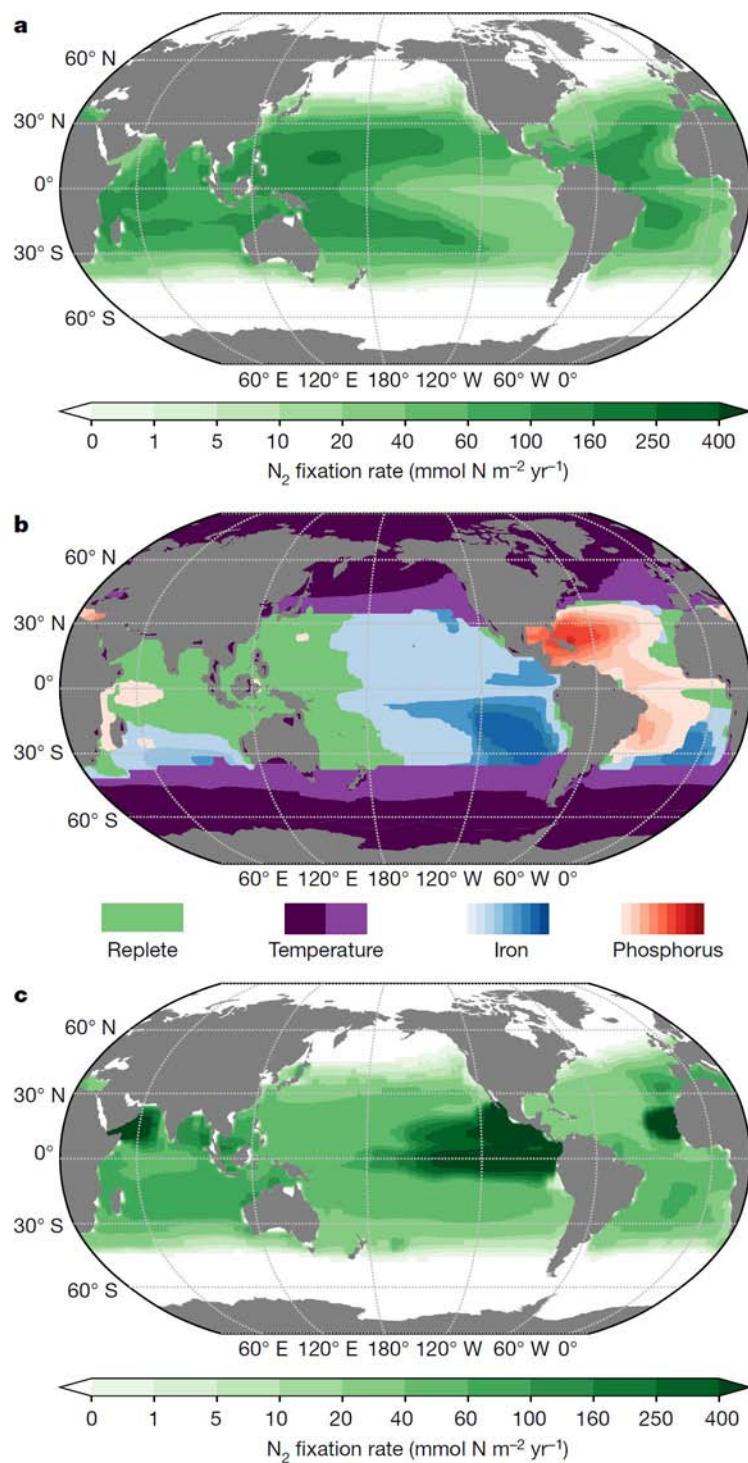


图2 海洋固氮细菌和固氮作用的模型模拟结果 (Wang et al., 2019)。(a) CESM 模拟得到的固氮作用速率特征；(b) 固氮细菌生长限制因素及空间格局；(c) 降低固氮微生物受浮游动物的捕食压力后, CESM 模拟得到的固氮作用速率特征



的是，新模型充分考虑了浮游植物和输出有机质具有变化而非恒定的 N/P 比值，是促进固氮作用空间格局认识转变的重要因素（图 3），相关研究值得借鉴。

该研究仍有优化空间，比如应进一步探索海洋状态的季节和年度变化、人类活动对海洋氮循环的扰动程度，以及固氮生

物多样性和差异性等对模型结论的影响。总之，Wang et al. (2019) 合理重建了海洋固氮作用的空间格局，弥合了过去十年在固氮作用的模型解释与实际观测之间长期悬而未决的矛盾。海洋氮循环已掀起部分面纱，值得进一步深入探索。

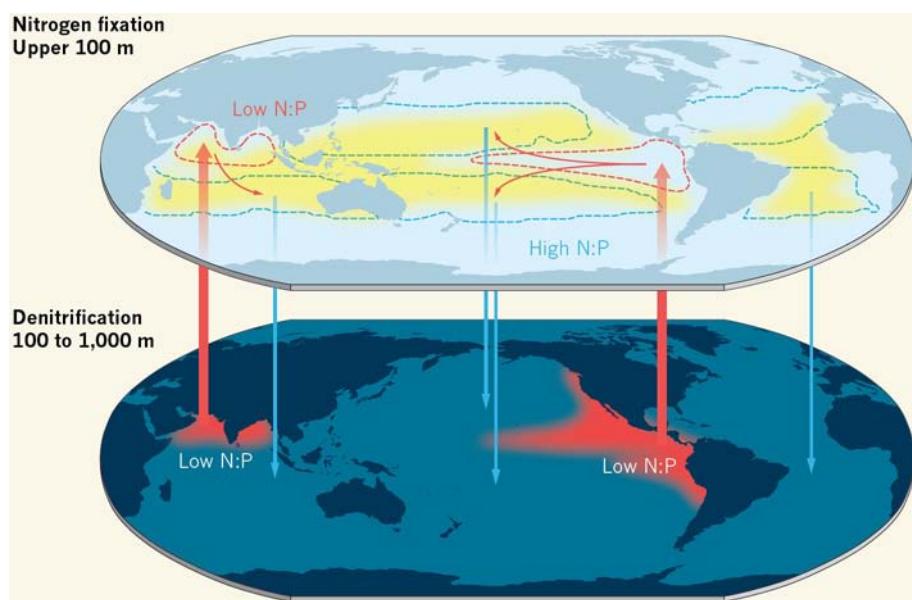


图 3 海洋固氮作用和反硝化作用的联系 (Gruber, 2019)。在表层海水 (< 100 米)，固氮微生物将海水里溶解的 N_2 转化为其他生物可利用的氮化合物。在印度洋和热带东太平洋 100 - 1000 米深度海水里 (红色区域)，反硝化作用则将氮化合物还原为 N_2 。反硝化作用海域的上升流水体具有非常低的 N/P 比值。Deutsch et al. (2007) 通过地球化学 P* 方法模型推测海洋固氮作用主要发育于反硝化作用强烈的热带东太平洋和阿拉伯海等海域 (即红色区域)，但是 Wang et al. (2019) 的最新研究认为固氮作用主要发育于亚热带环流海域 (黄色区域)。在该环流海域，强烈的固氮作用促进生成高 N/P 比值的生物质，随后向下沉降至海洋深处 (蓝色箭头)，循环补充经反硝化作用丢失的 N，维持着海洋 N 循环的稳定。

主要参考文献

- Deutsch C, Sarmiento J L, Sigman D M, et al. Spatial coupling of nitrogen inputs and losses in the ocean[J]. *Nature*, 2007, 445(7124): 163-167. ([链接](#))
- Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 293-296. ([链接](#))
- Gruber N, Deutsch C A. Redfield's evolving legacy[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(12): 853-855. ([链接](#))
- Gruber N. A diagnosis for marine nitrogen fixation[J]. *Nature*, 2019, 566(7743): 191-193.



Knapp A N, Casciotti K L, Berelson W M, et al. Low rates of nitrogen fixation in eastern tropical South Pacific surface waters[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(16): 4398-4403.([链接](#))

Tyrrell T. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production[J]. Nature, 1999, 400(6744): 525-531.([链接](#))

Wang W L, Moore J K, Martiny A C, et al. Convergent estimates of marine nitrogen fixation[J]. *Nature*, 2019, 566(7743): 205-211.([链接](#))

(撰稿：周锡强 / 油气室)



Nature Communications : 技术带动进步—— 为时两年的海洋水汽同位素数据集

水同位素 (^2H 和 ^{18}O) 以及由其派生出的参数氘盈余 ($\text{d-excess} = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$) 是研究现代水文过程和恢复古气候的重要示踪剂，其分析测试的传统手段为同位素质谱分析技术 (IRMS)。在 2000 年前后，水同位素红外光谱分析技术 (IRIS) 的诞生，大幅降低了测试成本，在保障较高精度的同时显著提高了测试效率 (Lis et al., 2008)。最重要的是，它使得连续原位测量成为可能。

在 IRIS 技术推动之下，水汽同位素的研究如雨后春笋般增长，在全球不同区域如美国、欧洲和中国等地，均有水汽同位素连续观测的报道，并对开放水体蒸发和植被蒸腾乃至降水形成等机理有了新的认识。然而，受测量条件限制，一直未见有全球尺度的连续测量结果，对控制水汽同位素分馏尤其是氘盈余的主导因素除相对湿度和海水表面温度外，是否包括风速争议不断。

近期，*Nature Communications* 发表了德国亥姆霍兹极地海洋研究中心、挪威卑尔根大学和丹麦哥本哈根大学研究人员为时两年(2015年6月29日–2017年6月30日)的海洋水汽同位素数据集研究成果 (Bonne et al., 2019)。研究人员在科考船上安装了 IRIS 水汽同位素连续测量装置，考察路径从北极到南极、穿越大西洋和北冰洋。在测量水汽同位素数据的同时，测试了海水同位素，并沿途观测了海水温度、风速、

气温与相对湿度等数据，获得了全球尺度下第一批连续原位测量数据。全部数据可以到 **PANGAEA** 数据库下载。

研究人员采用解析模型和数值模型 (IsoGCM) 指出控制水汽氘盈余变化的主导因素是相对湿度和海水表面温度，并不包括备受争议的因素——风速。他们进一步指出，在海冰覆盖的区域，采用 IsoGCM 模拟水汽同位素值时，若不考虑海冰表面的沉积雪发生升华的过程，模拟得到的数据与实际观测结果相差较大；但若考虑这一升华过程，则两者吻合较好。说明升华过程中的同位素分馏，对水汽同位素影响显著。这一结果要求在利用冰芯和石笋的氘盈余恢复古气候时，要将氘盈余作为相对湿度和海水表面温度的综合指标，在有海冰存在的区域，须考虑升华过程的影响。

基于 IRIS 技术进行连续原位测量，对应用水同位素开展全球尺度研究提供了强大的技术支持。值得一提的是，独立于水汽同位素测量的 IRIS 技术，另一支持全球尺度研究的水同位素分析手段——遥感反演技术也于近年来受到了广泛关注，其优点是可以同时获得全球不同位置的水汽同位素数据 (Worden et al., 2007)；其缺点一是仅能获得氘同位素数据 (^2H)，无法获得氧同位素数据 (^{18}O)；二是精度相对较差。总之，在新技术的推动之下，利用水同位素开展全球尺度下的水循环研究，成为了现代水文科学的显著特征。

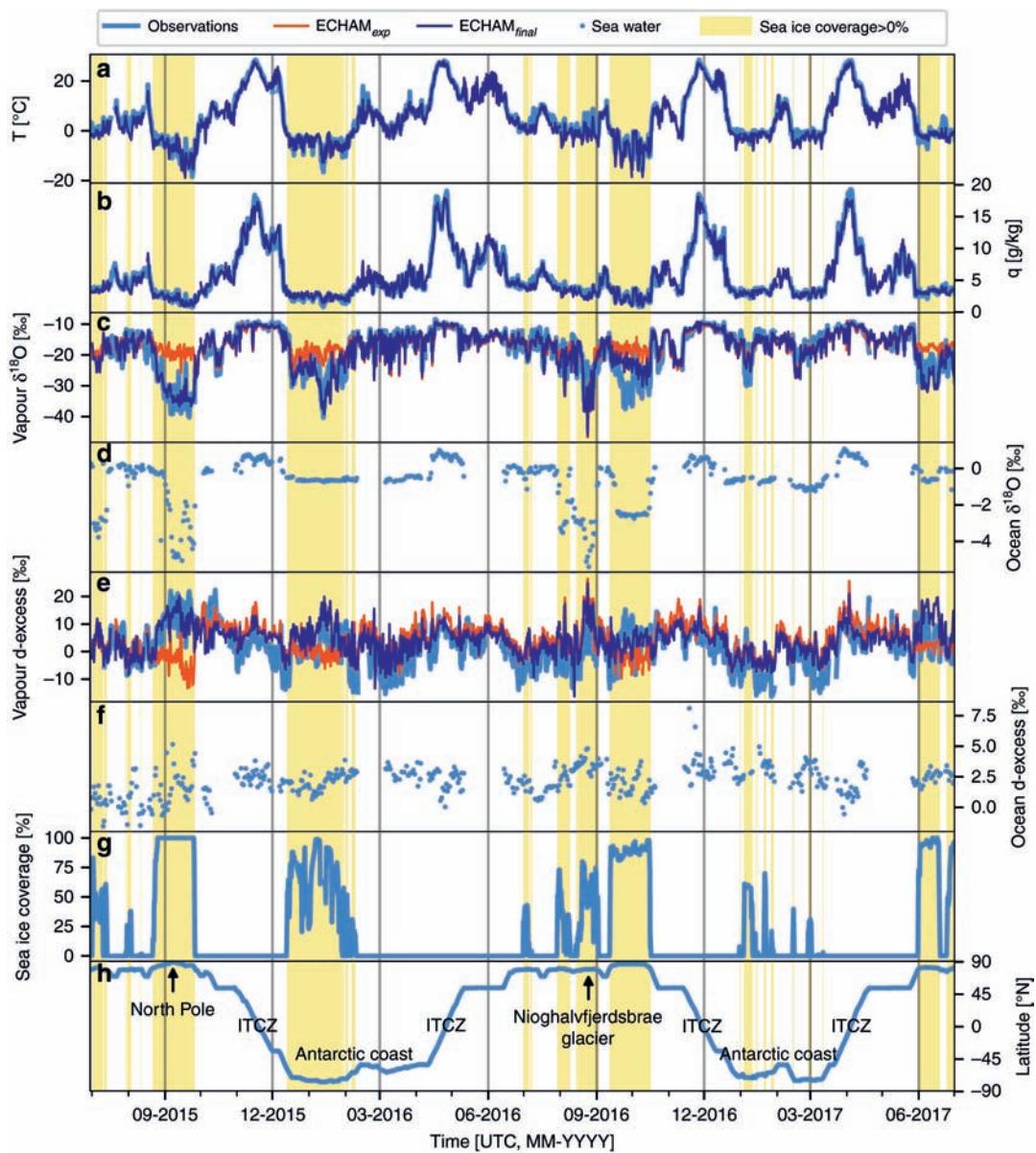


图 1 全球不同纬度下的水汽同位素与氘盈余以及海冰覆盖比例、海水表面温度、海水同位素与氘盈余的连续变化 (Bonne et al., 2019)



主要参考文献

Lis G, Wassenaar L I, Hendry M J. High-precision laser spectroscopy D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements of microliter natural water samples[J]. *Analytical Chemistry*, 2008, 80(1): 287-293. ([链接](#))

Bonne J L, Behrens M, Meyer H, et al. Resolving the controls of water vapour isotopes in the Atlantic sector[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1632. ([链接](#))

Worden J, Noone D, Bowman K, et al. Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle[J]. *Nature*, 2007, 445(7127): 528. ([链接](#))

(撰稿：孔彦龙 / 页岩气与工程室)



Nature Communications : 未来海洋会成为一潭死水吗?

工业革命以来，大气 CO_2 的浓度不断的攀升，造成了全球变暖的趋势。在这个背景下，温度的升高造成海洋中水体中含氧量（氧逸度）不断降低，缺氧的海洋面积不断的扩大，也威胁到了海洋生物的生存。人们不禁要问，未来的海洋最后是否会变为一潭缺氧的死水？

现今的海洋氧气遍布其中，只是在赤道附近的一些上升洋流区域，才存在一些缺氧的水体。因为它缺氧的特殊性，这些区域吸引了地球科学家和海洋科学家的眼光。德国 Helmholtz 海洋研究中心 Oschlies 博士等人，近期在 *Nature Communications* 发表了研究成果。他们通过维多利亚大学开发的地球系统气候模型 UVic (Weaver et al., 2001) 对未来 6000 年的海洋进行了模型推演。相比过去的模型只注重洋流对海洋氧气变化的影响，该模型重点考虑了生物地球化学循环中的氮循环在其中起到的重要作用。氮循环是海洋生物化学循环的重要一环，因为氮元素是海洋生物发育必

需的营养物质，它既参与了海洋生物的光合作用（产氧），也参与了海洋生物的矿化降解作用（耗氧）。

在海洋中，光合作用的氧气一产生，就会快速与海水中的还原性物质发生氧化还原反应而消耗掉，如对光合作用产生的有机物质进行氧化降解，这是氧气消耗的重要组成。一旦这个区域的海水中的氧气消耗殆尽，海水中另一重要的离子 NO_3^- 就会参与到有机质矿化降解过程，而且只要 NO_3^- 的量足够多，这个作用会一直持续下去，直至 NO_3^- 也消耗殆尽。在这个有机物降解过程中， NO_3^- 会被转变为 N_2 并释放到大气中，这就是所谓的反硝化作用。通过估算，含 1 摩尔含氮有机物因为反硝化作用会消耗了 7.48 摩尔的 NO_3^- ，同时减少 10.6 摩尔的氧气的消耗。这相当于消耗 1 摩尔的 NO_3^- 会减少了 1.4 摩尔氧气的消耗 (Paulmier et al., 2009)。这样 NO_3^- 代替氧气参与有机质的降解，反而变相地造成了氧气在海洋中的净增长。因此，温

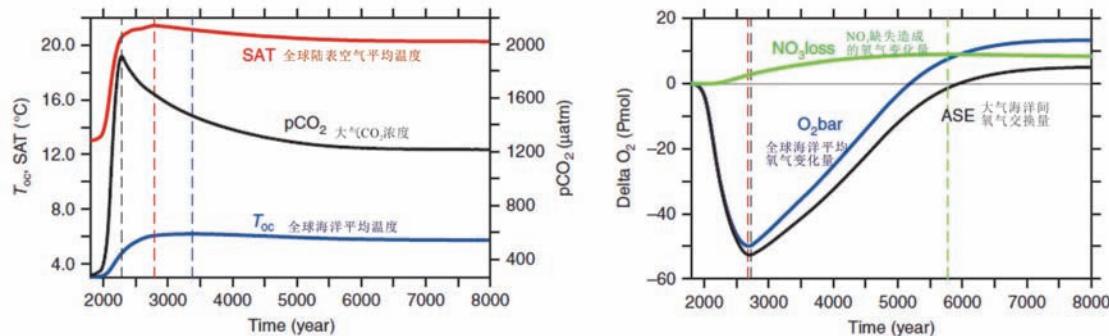


图 1 基于 UVic 模型模拟得到的未来 6000 年间地球海洋重要参数演化曲线（修改自 Oschlies et al., 2019）



度的升高虽然导致了海洋缺氧水体的不断扩 大，但却加强了以反硝化作用为主的有机物的降解作用，导致氧气消耗减少，进而造成了海洋水体中氧气的净增长（图 1）。

通过这项研究，可以预测随着 CO₂ 浓度的升高，海洋的一个显著变化是温度不

断升高，溶解氧气量在经历初期会减少，但经历数千年左右时间后，会恢复甚至超过现在的氧气水平（图 1，图 2），海洋至少不会成为一潭缺氧的死水。该研究增加了反硝化和固氮作用的视角，为地球历史时期普遍存在的缺氧海洋研究提供了一个很好的启示。

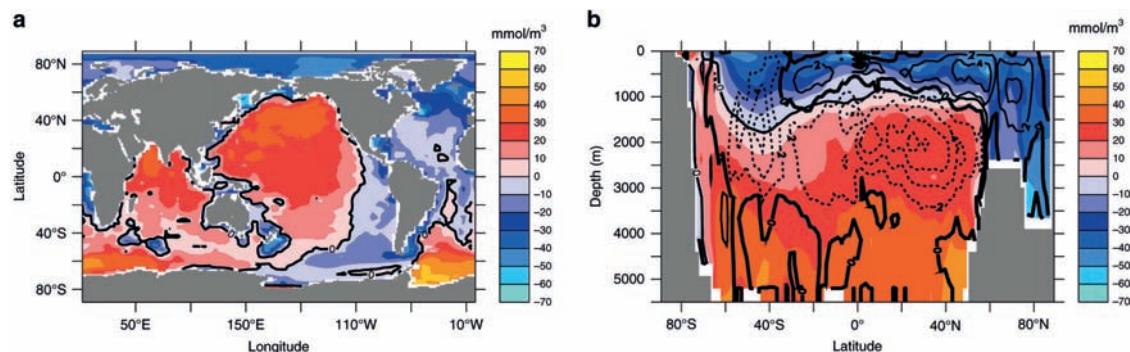


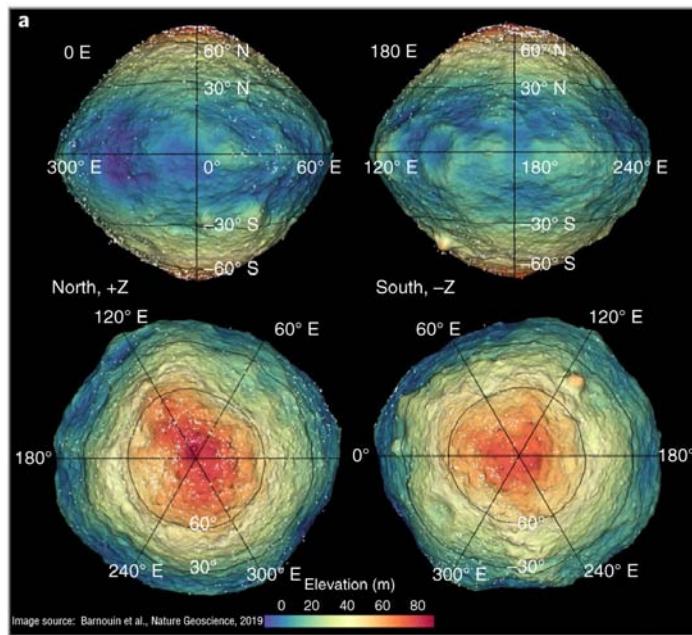
图 2 基于 UVic 模型模拟得到的公元 8000 年时期的海洋与现今海洋含氧量的对比图 (Oschlies et al., 2019)

主要参考文献

- Oschlies A, Koeve W, Landolfi A, et al. Loss of fixed nitrogen causes net oxygen gain in a warmer future ocean[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2805. ([链接](#))
- Paulmier A, Kriest I, Oschlies A. Stoichiometries of remineralisation and denitrification in global biogeochemical ocean models[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6: 923-935. ([链接](#))
- Weaver A J, Eby M, Wiebe E C, et al. The UVic Earth System Climate Model: Model description, climatology, and applications to past, present and future climates[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2001, 39(4): 361-428. ([链接](#))

(撰稿：冯连君 / 科技平台)

6. 星际探索





Science : MMS 星座完美捕捉到电子在磁重联扩散区中的动力学行为

广袤的宇宙空间并非想象中那么空旷，除了尚待证实的暗物质与暗能量外，等离子体占据了宇宙有形物质的99%。当磁场极性相反的等离子体相互靠近时，磁力线会突然“断开”并重新联结，这就是等离子体中的一种基本物理过程——磁重联（图1）。磁重联使磁自由能快速转化为等离子体的动能和热能，最早用于解释太阳耀斑爆发中的电子加速（Giovanelli, 1946），

因为它也是高能带电粒子进入地球磁层的一种重要触发机制，所以备受研究者关注。

磁重联概念被提出后，科学家们通过理论模型、数值模拟、卫星观测、实验室等离子体装置等方式对其进行了大量系统的研究。随着计算机性能和卫星数据分辨率的提升，人们对磁重联的认识也越来越深入：当研究尺度大于离子尺度时，离子、电子都“冻结”在磁力线上；介于离子与

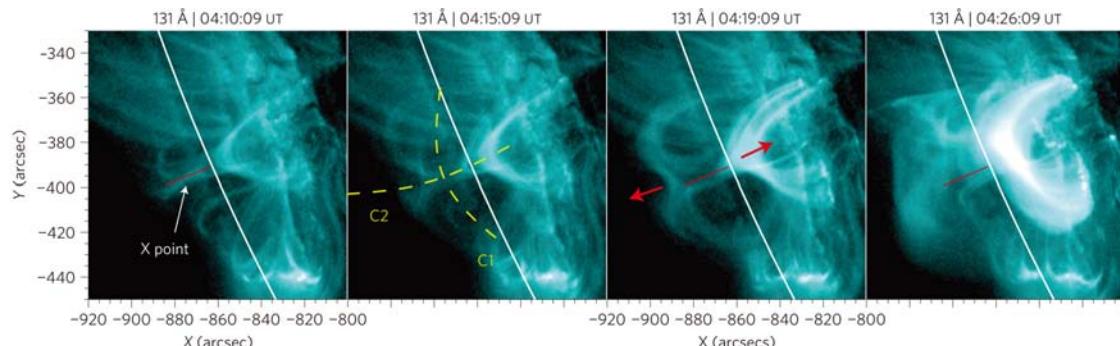


图1 NASA 太阳动力学天文台 (SDO) 在 2011 年 8 月 17 日观测到的一起在太阳表面的典型磁重联事件 (Su et al., 2013)，在此过程中，磁场的拓扑发生了显著的变化。AIA 成像仪在 131Å 波段观测到被加热到 10MK 的等离子体结构。分开的红色箭头表示正处在磁重联出流区的热化磁环

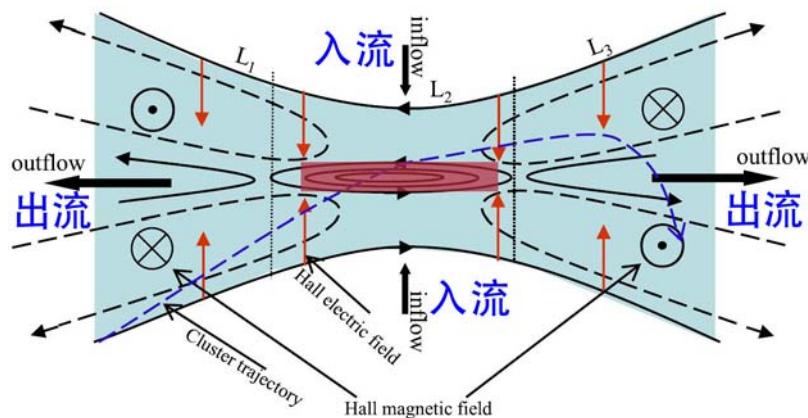


图2 磁重联扩散区示意图 (Wang et al., 2010)。浅蓝色部分为离子扩散区，红色部分为电子扩散区



电子尺度之间时，离子与磁力线解耦；在电子尺度时，电子与磁力线解耦（图2）。很容易推理，磁力线最终是在电子尺度完成“断开”和“重联”的。因此，研究扩散区中电子尺度的动力学过程，成为近年来磁重联研究的重要方向。

2015年，NASA发射了由四颗卫星构成的MMS星座，用于收集有关磁重联现象的粒子信息，MMS超高的时空分辨率为重联扩散区电子尺度动力学的研究提供了契机。在任务的第一阶段（2015–2016年），MMS反复穿越日侧磁层顶，对非对称磁重联进行研究。在第二阶段（2017年），卫星轨道穿越了对称度极高的磁尾，这种最简单的对称位形，可以排除其他复杂因素的干扰，有利于纯粹从基本物理角度出发来探索磁重联的核心问题。

近日，美国新罕布什尔大学等机构的研究人员在 *Science* 上发表的最新研究成果

显示，2017年7月11日，MMS在磁重联扩散区中首次完整地捕捉到了电子的动力学过程，完美地重现了电子在微小尺度时的行为。据估算，扩散区的横纵比为0.1–0.2，是一起典型的快速磁重联事件。在扩散区里，还观测到了速度高达15000 km/s的超阿尔文速电子喷流。

以往的观测和理论研究发现，电子速度空间的新月形分布是电子扩散区的典型特征。在这起事件中，电子速度呈现多新月形分布，通过数值模拟可以对这种分布进行验证（图3）。这种平整的多层次成分电子分布的存在，表明在重联点附近，电子的动力学行为更接近层流状态而不是湍流，这不同于我所之前发表在 *Nature Physics* 上与湍流相关的磁通量绳合并的观测结果（Wang et al., 2016）。这些结果使人们对磁重联扩散区中的电子动力学有了一个全新的认识。

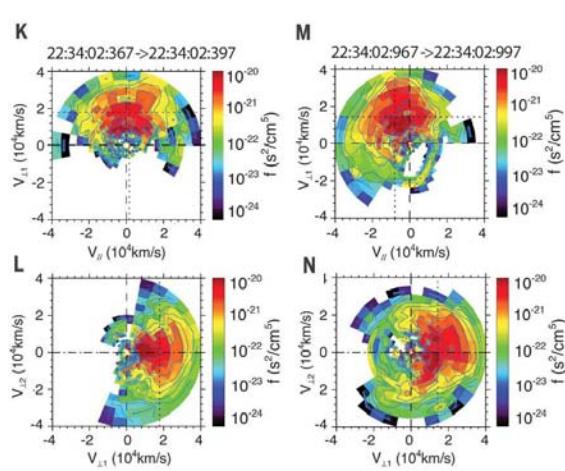


图3 K-N：MMS星座在磁重联电子扩散区里观测到的电子速度分布存在多新月形分布。P-S：数值模拟在此区域内重现的电子速度分布（Torbert et al., 2018）



主要参考文献

- Giovanelli R G. A theory of chromospheric flares[J]. *Nature*, 1946, 158: 81-82. ([链接](#))
- Su Y, Veronig A M, Holman G D, et al. Imaging coronal magnetic-field reconnection in a solar flare[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(8): 489-493. ([链接](#))
- Torbet R B, Burch J L, Phan T D, et al. Electron-scale dynamics of the diffusion region during symmetric magnetic reconnection in space [J]. *Science*, 2018, 362: 1391-1395. ([链接](#))
- Wang R S, Lu Q M, Du A M, et al. In situ observations of a secondary magnetic island in an ion diffusion region and associated energetic electrons [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(17): 175003. ([链接](#))
- Wang R S, Lu Q M, Nakamura R, et al. Coalescence of magnetic flux ropes in the ion diffusion region of magnetic reconnection [J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 263-267. ([链接](#))

(撰稿：[黄灿](#) / 地星室)



Science Advances : 地球的 C、N 和 S 来自大撞击

地球挥发分和生命的起源一直是地球科学的研究热点。C、N、S 和 H（水）是典型的挥发性元素，也是组成地球生命最重要的元素。但是，原始地球形成时因其形成位置在雪线（约 3 AU）以里，理应亏损这些挥发性元素，现在的地球是从何处获得的挥发分？从地球演化模型看（图 1），主要有三种可能：(1) 构建原始地球的初始物质富含挥发分；(2) 大撞击带入；(3) 后增生加入。现有的实验结果和理论预测最有可能的是大撞击带入，但缺少更多的证据。美国莱斯大学 Grewal 及其合作者借助高温高压模拟实验和计算机模拟技术，认为地球挥发性元素来自大

撞击，从而解释了硅酸盐地球异常的 C/N 比值，相关成果于 1 月 23 日发表在 *Science Advances* 上。

硅酸盐地球的 N、H 同位素组成 CI 型碳质球粒陨石相似，说明 CI 型碳质球粒陨石可能是 N、H 挥发分的主要来源。前人设计的含 C-N（无 S）和 C-S（无 N）的金属硅酸盐体系高温高压配分实验表明，C 在金属和硅酸盐的分配系数大于 N 和 S，在地球核幔分异时 C 相对于 N 和 S 更多地进入地核，硅酸盐地球的 C/N 比值应该低于碳质球粒陨石 (Li et al., 2016)，但实际情况相反，硅酸盐地球的 C/N 比值约为 40±8，明显高于碳质球粒陨石的 C/N 比值(16–24)，

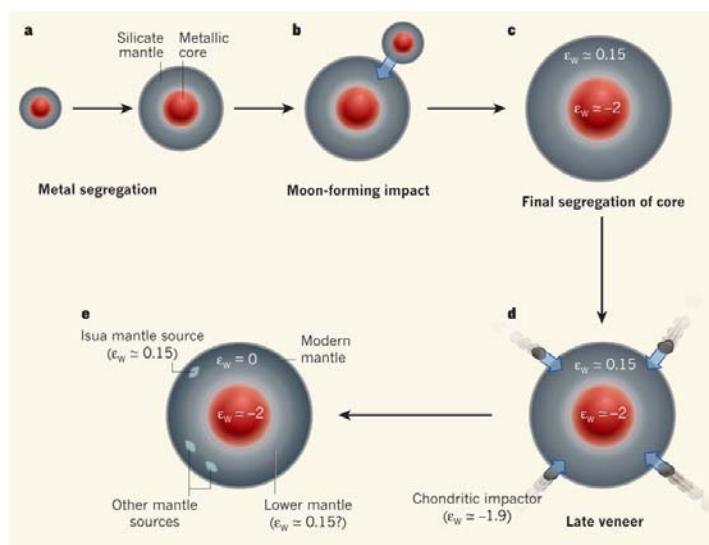


图 1 地球早期演化示意图。(a) 原始地球是一个足够大的天体，其核幔分异的时间可早至 4500 Ma 前；(b) ~4500 Ma 在地球核幔还未完成分异时，一个火星大小的天体撞击了地球，形成了现在的地月体系，该事件称为大撞击 (Giant impact)；(c) 在较短的时间内地球核幔完成分异，地核的 ε_w 约为 -2，地幔的 ε_w 约为 0.15；(d) ~4500–3800 Ma，有不断的小行星撞击早期的地球，加入大量球粒陨石，该事件称为后增生 (Late veneer)，其主要证据是地壳样品的铂族元素异常；(e) 后增生加入的物质导致地幔的 ε_w 降低至 0，同时可能还存在未充分混匀的原始地幔 (如格陵兰 Isua 的岩石) (Kleine, 2011)



这该如何解释？

与前人不同，本文设计了更符合实际情况的含 C-N-S 的金属硅酸盐高温高压配分实验，研究发现：当金属和硅酸盐分异时，在相同温压条件下，随 S 在金属熔体的含量增加，N 在金属和硅酸盐熔体的分配系数的降低程度明显小于 C（图 2），说明通过含 S（大于 20 wt%）金属的核幔分异作用，硅酸盐地球的 C/N 比值可以升高，即硅酸盐地球 C/N 比值偏高是因为富 S 的

核幔分异所致。

使用新的分配系数，文章对撞击体的性质和混合过程进行了计算机模拟，表明撞击体的大小与火星相当（图 3）。此外，文章还对挥发分加入的时间进行了制约，弥补了此前最新的 Grand Track 模型（Walsh et al., 2011）在时间制约上的缺陷。综合以上证据表明，地球的 C、N 和 S 来自于火星大小的天体撞击原始地球、形成月球的大撞击事件。

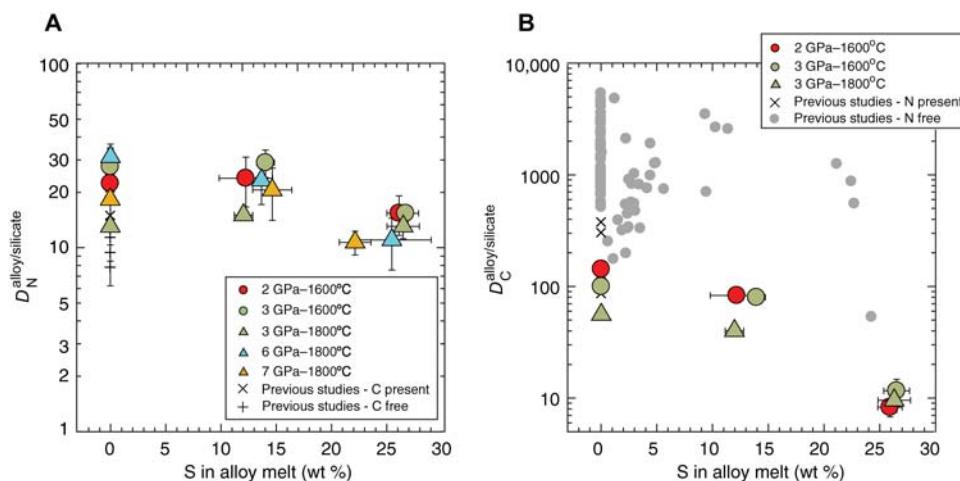
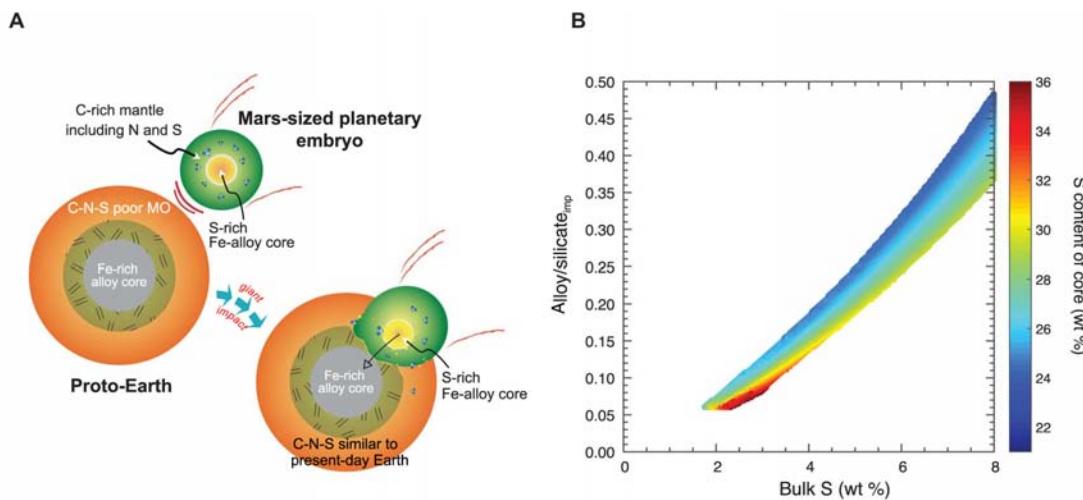


图 2 N 和 C 在金属和硅酸盐熔体的分配系数与金属熔体中 S 含量的相关性。(A) 在相同温压条件下，N 在金属和硅酸盐熔体的分配系数随 S 在金属熔体的含量无显著变化。(B) 当金属熔体含 N 时，C 在金属和硅酸盐熔体的分配系数随 S 在金属熔体的含量增加，存在一个数量级的降低 (Grewal et al., 2019)



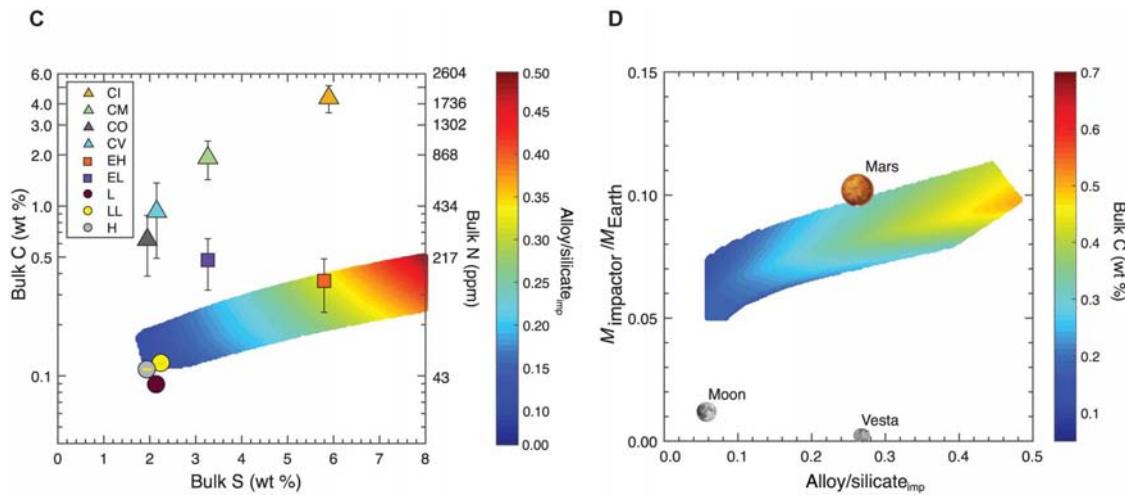


图 3 C-N-S 通过大撞击加入原始地球的示意图与撞击体化学成分和大小的计算机模拟。(A) 一个 C 饱和与富 S 核部的撞击体加入贫挥发分的原始地球的示意图；(B) 撞击体金属与硅酸盐比值与全岩 S 含量与撞击体金属核 S 含量的相关性；(C) 撞击体全岩 C 含量与全岩 S 含量及撞击体金属与硅酸盐比值的相关性，其他球粒陨石也投在图中作为对比；(D) 撞击体的质量与火星大小相当 (Grewal et al., 2019)

主要参考文献

- Grewal D S, Dasgupta R, Sun C, et al. Delivery of carbon, nitrogen, and sulfur to the silicate Earth by a giant impact[J]. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau3669. ([链接](#))
- Li Y, Dasgupta R, Tsuno K, et al. Carbon and sulfur budget of the silicate Earth explained by accretion of differentiated planetary embryos[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 781-785. ([链接](#))
- Kleine T. Geoscience: Earth's patchy late veneer[J]. *Nature*, 2011, 477(7363): 168-169. ([链接](#))
- Walsh K J, Morbidelli A, Raymond S N, et al. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration[J]. *Nature*, 2011, 475(7355): 206. ([链接](#))

(撰稿：胡森 / 地星室)



Nature Geoscience : 月球起源与地球岩浆洋

新 的模拟结果显示，在遭受巨大撞击形成月球时，地球表面覆盖着岩浆洋。月球组成中包含的地球物质较之前推测的要更多。

千百年来，人类对月球的起源充满了好奇。目前学界广泛接受的理论是“大碰撞”(Giant Impact)假说，即一个火星大小的星体碰撞地球产生的碎屑物形成了月球。近日，日本横滨地球科学研究所的 Natsuki Hosono 及其合作者在 *Nature Geoscience* 上发文，报道了他们利用计算机模拟计算大碰撞过程的相关结果，认为月球起源于地球早期的某次碰撞过程，当时地球外层尚未固结，而是处于大规模的熔融状态，即所谓的岩浆洋，相关结果更好地解释了地球和月球同位素组成上的相似性。

要想追溯月球的起源，我们能够倚仗的证据主要有两方面，一方面是物理学上的证据，包括但不限于月球的质量、地月的距离和轨道、地月系统的角动量等条件，另一方面是化学组成上的证据，如地球和月球上不同元素的含量、各种同位素的比例等 (Canup, 2014)。通过计算模型分析不同形成条件下地月系统的相关参数情况，并与现有的观测数据进行对比，可以有效地判断月球的可能起源。

传统的大碰撞假说认为，地球与一颗火星大小的撞击体发生碰撞，月球的物质组成主要来自于该撞击体的硅酸岩部分

(Melosh, 2019)。但随着对地月系统样品分析的不断深入，尤其是同位素分析精度的不断提高，科学家发现地球和月球的绝大多数同位素组成几乎完全相同。要知道，同位素组成相当于星体的指纹，对星体的形成条件，早期过程等极为敏感。地月之间同位素组成的高度一致要求这两天体具有相同的组成物质来源或在形成过程中经历了充分的混合，这是传统的大碰撞模型难以完美解释的。

与前人的研究不同，Hosono 等人认为，在大碰撞发生的时刻，地球表面仍处于大规模熔融的岩浆洋状态。他们利用特别处理后的光滑粒子法 (SPH, Smoothed Particle Hydrodynamics Method) 来对大碰撞过程进行模拟 (图 1)。一方面，他们改进了高密度梯度情况下的模拟可靠性以更好的处理行星表面、核幔边界等密度不连续界面的变化情况；另一方面，为了适应大量处于熔融状态的撞击过程，他们在模拟过程采用了更符合熔体特征的状态方程。模拟结果显示，在地表仍处于岩浆洋状态的情况下，由于硅酸盐熔体具有更高的可压缩性，在撞击后具有更高的温度，更容易脱离地球表面，因此撞击产生的碎屑盘中具有更高比例的地球物质 (图 2)，从而有助于解释地球和月球之间同位素组成的高度一致性。此外，岩浆洋中较高的 FeO 含量也有助于解释月球样品中更高的 FeO 含量。

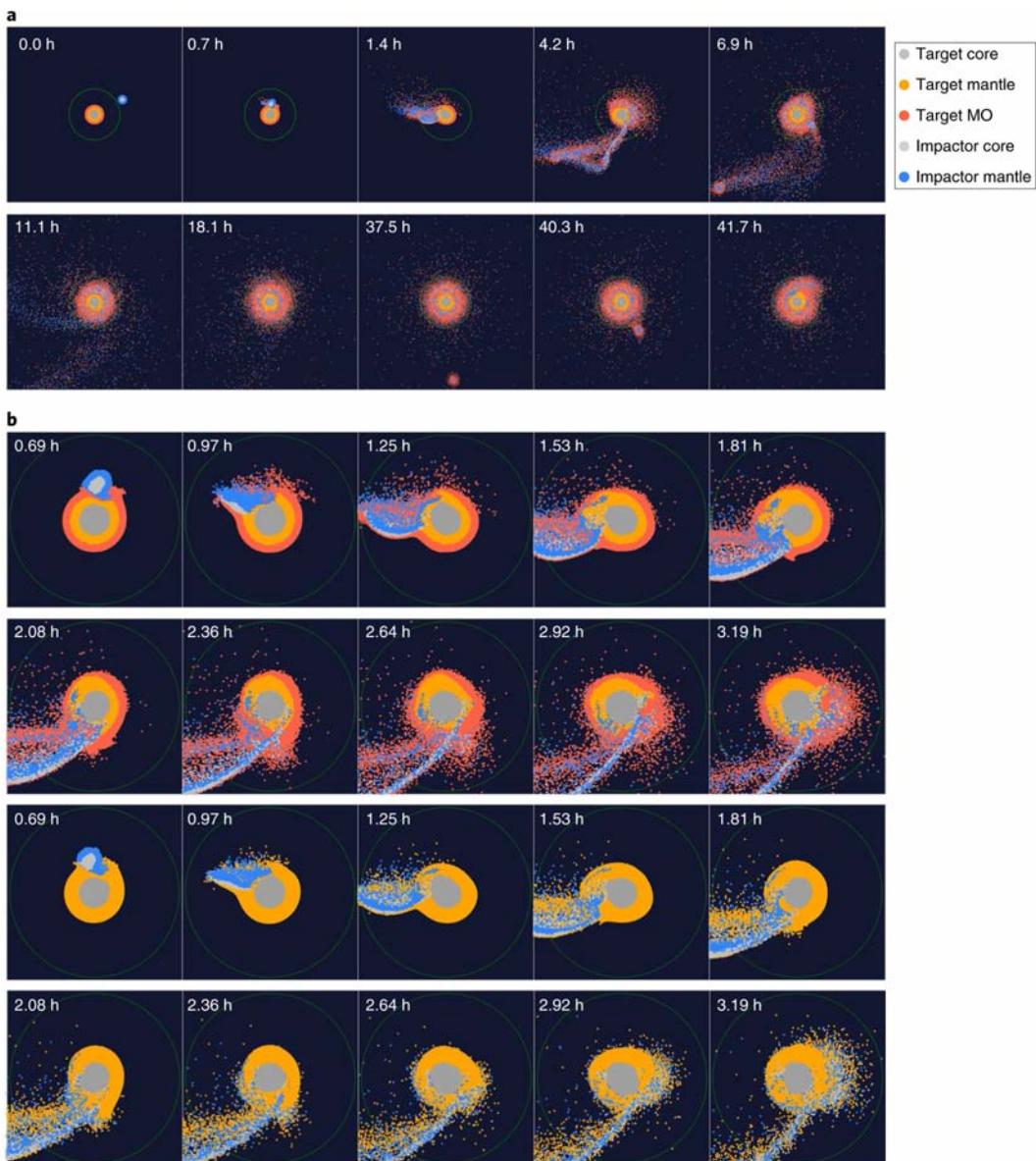


图 1 (a) 利用光滑粒子法模拟大撞击过程 ; (b) 具有岩浆洋的原始地球撞击模拟 (上两行) 与固结地球撞击模拟 (下两行) 的对比 (Hosono et al., 2019)。图中不同颜色的粒子代表了不同的来源，在撞击产生的碎屑盘中，包含岩浆洋的原始地球撞击模型指示了更高的地球物质比例

值得注意的是，尽管 Hosono 等人的工作作为解释地月体系具有相似的同位素组成提供了重要支持，但月球大碰撞假说还需要进一步得到样品的验证。特别是当前我们倚仗的月球成分信息主要来自于月球浅表样品的分析，真正深部来源的信息还很匮乏，从而制约了对全月球的化学组成和同位素比值的可靠约束和对模型结果的准

确判断。月球表面的一些撞击坑，如月球南极深达 13 公里的艾特肯撞击盆地，可以暴露出月球深部的物质，从而为探索月球深部的元素含量和同位素组成提供了绝佳的机会。当前，嫦娥四号和玉兔二号正在那里工作，未来我国还将执行月球南极的采样返回任务，这些工作将对月球的起源提供重要制约。

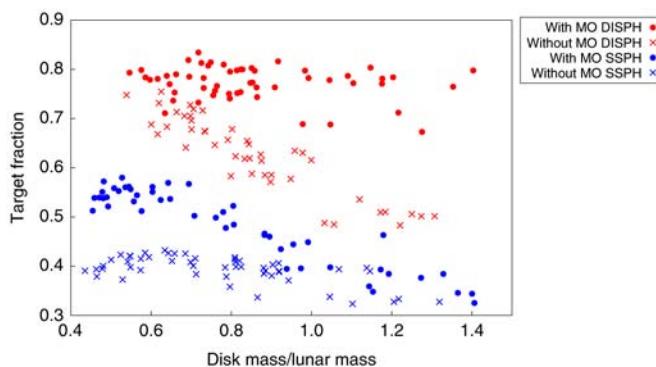


图2 不同模型条件下地球物质的比例 (Hosono et al., 2019)。圆点代表包含岩浆洋的原始地球撞击，十字叉代表固结地球的撞击模拟，不同颜色则代表了改变了高密度梯度处理模式的模型 (DISPH) 和原有模型 (SSPH) 的对比。总的来说，包含岩浆洋的模型预测了更高的地球物质比例，而改变高密度梯度情况下的处理模式可以进一步提高地球物质的比例

主要参考文献

- Canup R M. Dynamics of lunar formation[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2004, 42: 441-475. ([链接](#))
- Hosono N, Karato S I, Makino J et al. Terrestrial magma ocean origin of the Moon[J]. *Nature Geoscience*, 2019. ([链接](#))
- Melosh H J. 2019. Why the Moon is so like the Earth[J]. *Nature Geoscience*, 2019. ([链接](#))

(撰稿：张驰 / 地星室)



Nature Geoscience : Hf-W 体系对月球形成时间的启示

硅酸盐月球 Hf/W 比值的确定对月球 W 同位素数据解读至关重要。新的实验数据显示硅酸盐月球具有高于硅酸盐地球的 Hf/W 比值。结合月球 W 同位素组成推算，月球可能形成于太阳系形成后约 50 Myr。

近年来，在关于月球起源的解释中，广为学界所接受的是大碰撞（Giant Impact）假说。大碰撞假说认为：一个火星大小的星体撞击原始地球后，抛射出的外围物质最终聚合形成了月球。然而，月球形成的时间却存在争议。一些学者认为月球形成的时间很早，大约在太阳系形成后的 30 至 100 Myr 之间；另一些学者则认为直到太阳系形成以后的 200 Myr，月球才形成。 ^{182}Hf - ^{182}W 放射性衰变体系半衰期较短，仅 8.9 Myr，能够为太阳系早期事件的时间和过程提供制约。在 ^{182}Hf 未完全灭绝时，随着 ^{182}Hf 衰变产生 ^{182}W ，具有不同 Hf/W 比值的源区将获得不同的 W 同位素组成。因此，硅酸盐月球（BSM）Hf/W 比值的确定对于利用 Hf-W 体系限定月球形成时间至关重要。

德国科隆大学 Maxwell M.Thiemens 及其合作者近期在 *Nature Geoscience* 上发文，报道了他们对月球主要岩石单元（低 Ti 玄武岩、高 Ti 玄武岩、斜长岩和克里普岩）的 W、Th、U 及其它高场强元素（HFSEs）含量的测量结果。其中，低 Ti 玄武岩的 Hf/W 和 U/W 比值较为集中。低 Ti 玄武岩 U/W 比值变化范围为 1.5–2.5，Hf/W 比值变

化范围为 30–50。文章认为低 Ti 玄武岩的 Hf/W 和 U/W 比值能够代表其源区特征。原因是：首先，低 Ti 玄武岩的源区没有 KREEP 组分的加入，基本不含有富 Ti 氧化物及金属。从而避免了 W 与 U、Th 及其它 HFSEs 的分馏。其次，相对于高 Ti 玄武岩，低 Ti 玄武岩岩浆形成时的部分熔融程度更高，因而 Hf/W 和 U/W 比值更接近于其源区。由于在还原条件下的月球岩浆洋洋结晶过程中，W 相较于 Hf 和 U 更容易被保留在低 Ti 玄武岩的源区中。低 Ti 玄武岩源区的 Hf/W 比值因而被认为能够代表月球岩浆洋洋乃至硅酸盐月球 Hf/W 比值的最小估算。低 Ti 玄武岩的 Hf/W 比值范围为 30.2–48.5。这一值比之前对硅酸盐月球 Hf/W 比值的估算值要高，亦高于硅酸盐地球的 Hf/W 比值。

作者将硅酸盐地球与硅酸盐月球 Hf/W 比值的差别归因于月核的形成，认为大碰撞后月球具有与硅酸盐地球相同的 Hf/W 比值，此后月核（根据月震研究，月核质量占全月 1–3%；Weber et al., 2011）的形成带走了大量亲铁元素 W，使得硅酸盐月球中的 Hf/W 比值上升。文章对此做了质量平衡计算（图 1），计算结果表明这一解释是可行的。当 W 的金属相 – 硅酸盐相分配系数为 60 时，1.5% 月球质量大小的月核的形成就能产生所测得的硅酸盐月球的 Hf/W 比值（30 至 50）。当月核质量为 3% 月球质量时，所需要的 W 的金属相 – 硅酸盐相分配



系数可以低至 30。

如果硅酸盐月球与硅酸盐地球 Hf/W 比值的差异来源于月核的形成，且硅酸盐月球与硅酸盐地球 W 同位素组成差异是由具有相对高 Hf/W 比值的硅酸盐月球经 ^{182}Hf 衰变形成的。则根据硅酸盐月球 Hf/W 比值

及其 W 同位素组成可以推算出月球的形成时间为太阳系形成后的 40–60 Myr (图 2)。硅酸盐月球 Hf/W 比值越高，计算得到的月球形成时间越晚。这一年龄范围与前人通过锆石 Lu-Hf 体系获得的模式年龄一致 (4.51 Ga ; Barboni et al., 2017)。

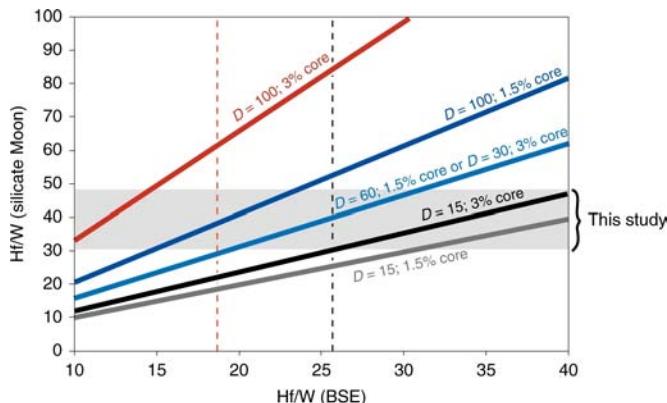


图 1 月核形成对硅酸盐月球 Hf/W 比值的影响。假设月球整体具有与整体硅酸盐地球 (BSE) 相同的 Hf/W 比值。灰色阴影部分为本研究获得的对硅酸盐月球 Hf/W 比值的最小估计值。虚线为对硅酸盐地球 Hf/W 比值的两种估算值 (König et al., 2011 ; Newsom et al., 1996)

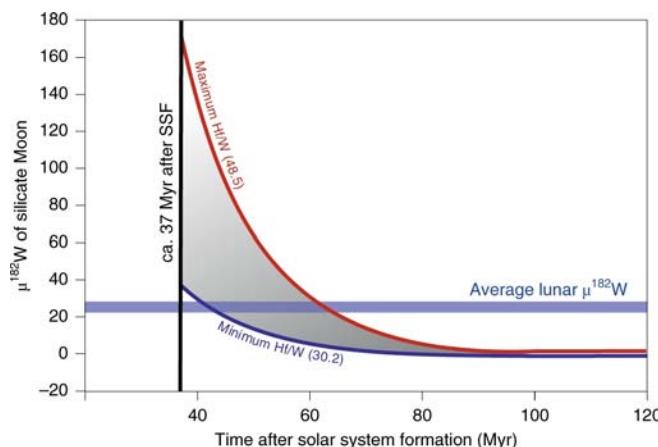


图 2 月球形成时间和硅酸盐月球 Hf/W 比值与月球 W 同位素组成的关系。月球 W 同位素组成数据 (校正宇宙射线效应后的 $\mu^{182}\text{W}$ 值) 来自 Kruijer and Kleine (2017)。演化曲线起始时间为 37 Myr, 是地球成核的两阶段 W 模式年龄 (König et al., 2011)

值得注意的是，此前也有学者将月球岩石高于 BSE 的 $\mu^{182}\text{W}$ 值解释为月球遭受到的后增生作用与地球不成比例，即后期添加的低 $\mu^{182}\text{W}$ 物质对月球 W 同位素组成改变较小，而硅酸盐地球 $\mu^{182}\text{W}$ 值则因更

多地外物质的添加而降低 (Kruijer et al., 2015 ; Touboul et al., 2015)。如果后增生作用是地月 W 同位素组成差异的主要原因，则月球可以在 ^{182}Hf 完全灭绝之后形成。



主要参考文献

- Barboni M, Boehnke P, Keller B, et al. Early formation of the Moon 4.51 billion years ago[J]. *Science Advances*, 2017, 3(1); e1602365. ([链接](#))
- König S, Münker C, Hohl S, et al. The Earth's tungsten budget during mantle melting and crust formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(8); 2119-2136. ([链接](#))
- Kruijer T S, Kleine T, Fischer-Godde M, et al. Lunar tungsten isotopic evidence for the late veneer[J]. *Nature*, 2015, 520(7548); 534-537. ([链接](#))
- Kruijer T S, Kleine T. Tungsten isotopes and the origin of the Moon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 475; 15-24. ([链接](#))
- Newsom H E, Sims K W W, Noll Jr P D, et al. The depletion of tungsten in the bulk silicate earth; constraints on core formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(7); 1155-1169. ([链接](#))
- Thiemens M M, Sprung P, Fonseca R O C, et al. Early Moon formation inferred from hafnium-tungsten systematics[J]. *Nature Geoscience*, 2019; 1. ([链接](#))
- Touboul M, Puchtel I S, Walker R J. Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the Earth and Moon[J]. *Nature*, 2015, 520(7548); 530-533. ([链接](#))
- Weber R C, Lin P Y, Garnero E J, et al. Seismic detection of the lunar core[J]. *Science*, 2011, 331(6015); 309-312. ([链接](#))

(撰稿：梅清风 / 佛罗里达州立大学，王浩 / 岩石圈室)



Nature Geoscience : 月球与水星上浅陨石坑中的厚冰沉积

月球与水星这类天体由于有着较小的自转轴倾角，在它们的极地低洼地区会存在永久阴影区。如果足够冷，这种永久阴影区就可以像冷阱一样将挥发分捕获并保存数十亿年，其中一种挥发分就是水冰。利用阿雷西博（Arecibo）射电望远镜和信使号（MESSENGER）探测器收集的数据表明，在水星上的这些冷阱中存在着数米厚的冰沉积物。然而，利用有着相似观测方法的月球勘测轨道器（LRO）收集的数据，最近的研究仅在月球极地冷阱中发现了一些分散的表层和浅表层冰沉积物。考虑到水星和月球的极地区域在温

度环境和挥发分净沉积速率上并没有巨大的差别，这种冰沉积物含量上的差别令科学家感到费解。

为研究这一问题，美国加州大学洛杉矶分校的 Rubanenko, Venkatraman 和 Paige 三位研究人员首先分析了 2069 个水星简单陨石坑的形貌，发现这些陨石坑在高纬地区明显变浅，与高纬地区的冰沉积相吻合。随后，他们又用相同的方法分析了 11228 个月球简单陨石坑的形貌，发现在月球南极地区——与水星相似——陨石坑在高纬地区变浅，并认为这也是由冰的沉积所导致的。他们的研究结果发表在 *Nature Geoscience* 上。

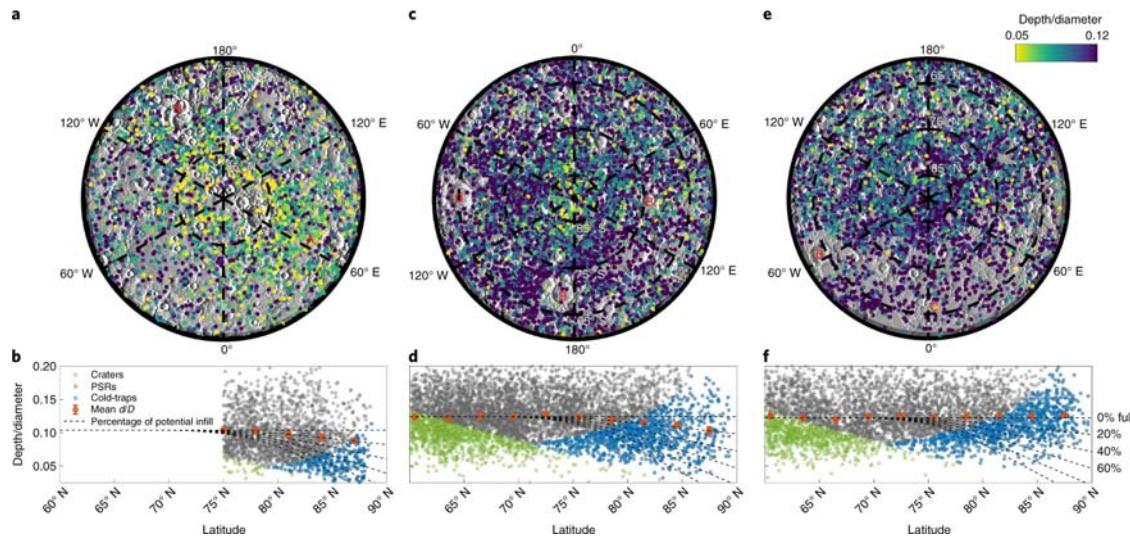


图 1 水星和月球极地区域陨石坑。a、c、e 水星北极、月球南极、月球北极地区的陨石坑地图。颜色代表其 d/D 。b、d、f 水星北极、月球南极、月球北极地区的陨石坑的 d/D 随纬度的分布。注意，d 中 N 应为 S，原文笔误。绿色点代表没有永久阴影区的陨石坑，灰色点代表有永久阴影区的陨石坑，蓝色点代表永久阴影区中可以形成冷阱的陨石坑。红点是某一给定纬度上所有陨石坑 d/D 的平均值 (Rubanenko et al., 2019)



对水星的陨石坑，Rubanenko 等人测量了每个陨石坑的深度 / 直径之比 (d/D)，并将它们按照纬度绘制在图中（图 1 b）。在北纬 75° 以上，平均 d/D 开始下降。至北纬 86° ，平均 d/D 相比低纬地区大约减小了 10%。如果将数据外推至北极点 90° ，那么平均 d/D 大约减小 20%。我们通常认为简单陨石坑具有相似性，深度越大的陨石坑直径越大， d/D 变化很小。Rubanenko 等人认为陨石坑随纬度升高而变浅（此处浅指 d/D 比例减小）的这一现象是由陨石坑永久阴影区中沉积的冰所造成的，并给出了 5 点原因：(1) d/D 减小与冷阱形成在相同纬度；(2) 小直径陨石坑变浅更多，这与冰的沉积作用相符；(3) 较冷的面向极地的坡更浅；(4) 平均变浅程度与估算的冰沉积厚度相符；(5) 较冷经度的陨石坑更浅。基于以上的分析，水星平均冰沉积约 15 米，而最厚区域可达 50 米。

随后，Rubanenko 等人将相同的方法应

用在了月球上。在月球南极，他们发现了与水星相同的趋势——陨石坑随纬度升高而变浅（图 1d）；而在月球北极，他们没有发现这一趋势（图 1f）。与已发现的表面冰沉积进行的对比显示，在南极 d/D 与冰含量成负相关，即，冰沉积越多，陨石坑越浅；而在北极，则没有发现这一相关性（图 2）。他们认为南极的负相关正是表明陨石坑变浅是由冰沉积所导致的，而北极的陨石坑中也许曾经也有冰沉积物，但是被后续的撞击破坏了。

Rubanenko 等人的研究表示，月球永久阴影区应当是存在很厚的冰沉积物的，而这些存在了数十亿年的冰，可能为我们揭示太阳系中水的起源问题。当然，我们仍要注意，Rubanenko 等人的研究没有将陨石坑的粘性松弛过程考虑进去。如果月球不同区域的下表面岩石存在着粘度差异，那么陨石坑的粘性松弛过程也会存在差异，也可能引起 d/D 的变化。

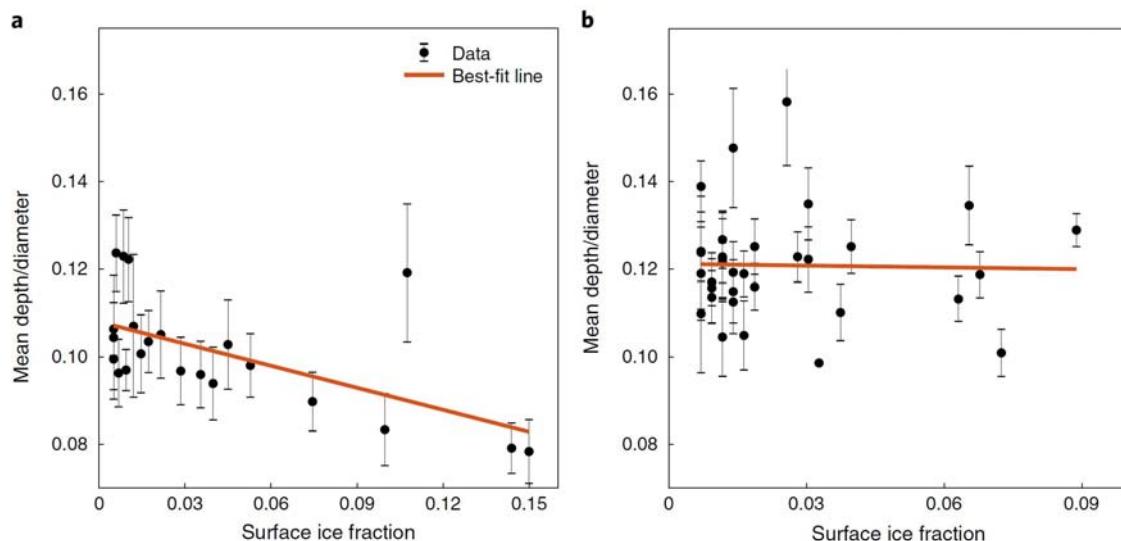


图 2 过去发现的存在冰沉积的陨石坑的 d/D 与冰含量关系。a 月球南极。b 月球北极
(Rubanenko et al., 2019)



主要参考文献

Rubanenko L, Venkatraman J, Paige D A. Thick ice deposits in shallow simple craters on the Moon and Mercury[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(8): 597-601. ([链接](#))

(撰稿: 梁超 / 地星室)



Nature：火卫一轨道演化揭示火星流变学和热历史

热 – 轨道耦合是火星与其卫星间潮汐相互作用的结果，最新研究提出利用围绕火星运行的火卫一（福波斯）的轨道演化数据来约束火星的流变性质与热演化历史。

相比火星表面，人类对火星内部结构及演化知之甚少。近期的火山活动证据表明，火星深部仍保持高温和对流冷却状态。以往的研究一般通过参量化对流模型来模拟计算火星热演化历史（如 Hauck and Phillips, 2002）。然而，火星的冷却速度同时受其初始热状态和流变学（粘度）控制：初始热状态代表了行星必须疏散的能量，而流变学控制着热量从行星内部传递并最终散失到太空的效率。由于地球上冰川，通过对冰川后反弹研究来估计地幔的粘度。但火星上没有这些记录，无法进行类似的研究。虽然高温高压实验能推断出地幔的粘度，但这些实验是在非常小的样品上进行的，需要大量的外推，从而导致不确定性。而且，温度与粘度这两个控制参数并不相互独立，粘度是依赖于温度的函数，它们之间的相互依赖性导致即使采用不同的地幔流变学，仍可以得到相同的现今热状态。由于数值模拟结果缺乏有效的约束，严重制约了火星内部的动力学历史重建及其结构研究。

法国巴黎地球物理学院（IPGP）Samuel et al. (2019) 近日在 *Nature* 上发表了他们的最新成果，提出利用火卫一（福波

斯）的轨道演化来约束火星流变学和热历史（图 1）。

火卫一是火星最近的卫星，呈土豆形状，在万有引力作用下围绕火星运行，其飞行轨迹称为卫星轨道。潮汐力正不断地使它的轨道越变越小（最近的统计数字表明，它正以每百年 1.8 米的速度在减小）。另外，关于火卫一起源也是未解之谜，大多认为是捕捉到的小行星，也有一些人认为它们是起源于太阳系外的，而不是来自于小行星带。

卫星会施加变形引力，使得轨道物体表面产生一个潮汐凸起。如果行星不是纯粹的弹性介质而是粘性衰减，那么凸起部分不会与行星和卫星的方向对齐而形成一个角度，卫星轨道会发生变化。在地球上，潮汐是由月球和太阳的引力场对地球造成的畸变引起，海水在月球和太阳引潮力作用下产生的周期性涨落。由于地球的古海水深尚不清楚，利用月球的长期轨道演化来约束地球的历史是不可能的。然而，对于火星 – 卫星，这种潮汐相互作用反映在粘性变形，主要受火星的二次爱数（degree-two Love number）(k_2) 与其潮汐品质因子的比值控制。其轨道演化模型对火星的热参数和流变参数非常敏感，轨道的变化主要受火星热化学演变的控制。因此，轨道演化将成为一个强有力的工具，结合其他约束条件，可以推断火星的流变学和热历史。

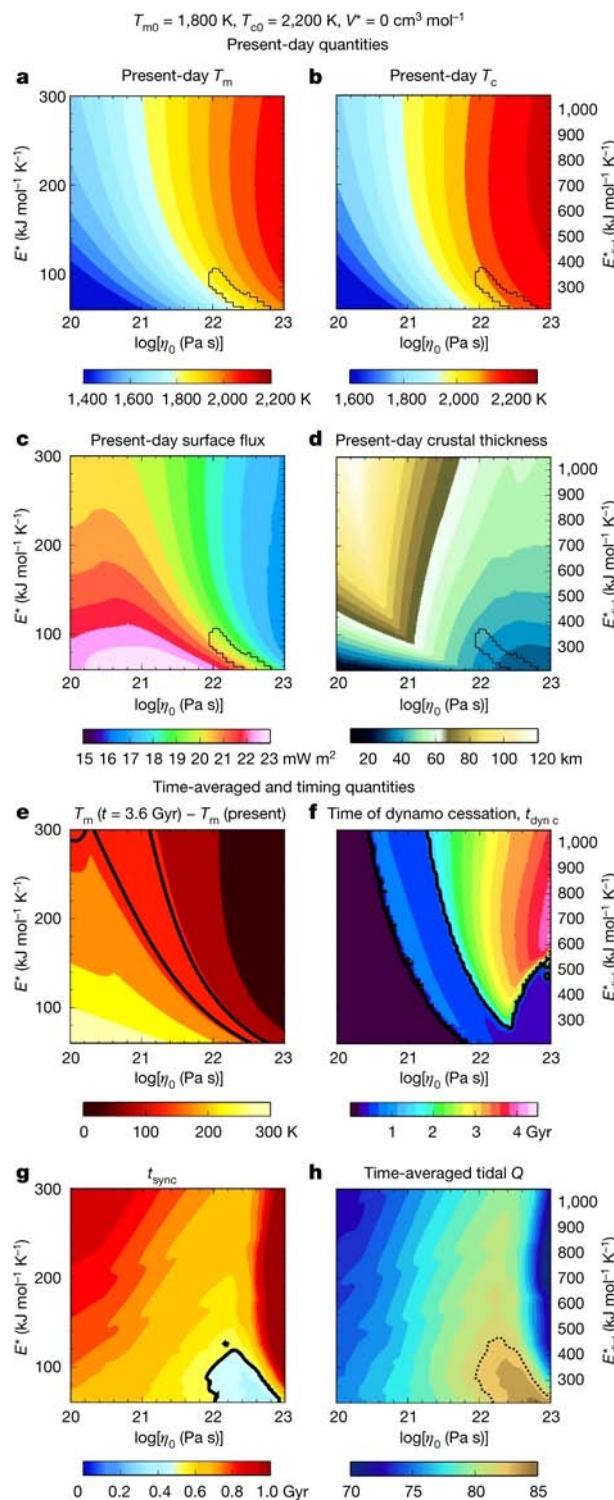


图 1 探索火星与火卫一的热 – 轨道演化。初始地幔温度 $T_{m0} = 1800 \text{ K}$ ，初始地核温度 $T_{c0} = 2200 \text{ K}$ ，活化体积 $V^* = 0 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ 。（a - d）. 现今值；（e - h）. 时间平均和定时值。每个图板代表在不同地幔参考粘度 (η_0)、有效 (E^*) 或位错蠕变 ($E_{\text{dis}} = E/3.5$) 活化能情况下 4096 个热化学和轨道演化。e、f 和 h 中的黑色曲线分别描绘的是 Amazonian - Hesperian 长期冷却的临界值 (100 - 140 K)、早期火星热发动机的解以及火卫一到达同步轨道的（反向）时间。h 中的虚线代表时间平均的 $Q = 82$ 。a - d 中的黑色等值线代表满足热、磁和轨道约束的解



火星主要圈层包括液态金属核，均匀硅酸盐成分的对流地幔和不断演化的非均匀岩石圈。岩石圈包括富含放射性元素的地壳。基于火星卫星早期起源的假设以及火星和火卫一之间的关系，Samuel et al. (2019) 研究发现最初的火星比现在的温度要高 $100 \sim 200\text{K}$ ，而且它的地幔以位错蠕变机制缓慢变形。这相当于 $10^{22.2 \pm 0.5}\text{Pa s}$ 的参考

粘度，以及粘度对温压中等到偏弱的本证灵敏度。目前的方法预测火星现今地壳平均厚度为 $40 \pm 25\text{ km}$ ，地表热流值为 $20 \pm 1\text{ mW/m}^2$ 。如果将这些预测结果与未来的以及正在进行的太空任务（如“InSight”）获得的数据相结合，可以进一步减少火星热-流变历史的不确定性，并有助于发现火卫一的起源。

主要参考文献

- Hauck S A, Phillips R J. Thermal and crustal evolution of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research; Planets*, 2002, 107(E7); 6-1-6-19. ([链接](#))
- Samuel H, Lognonné P, Panning M, et al. The rheology and thermal history of Mars revealed by the orbital evolution of Phobos[J]. *Nature*, 2019, 569(7757); 523-527. ([链接](#))

(撰稿：何丽娟 / 岩石圈室)



Science、Nature 等：小行星 Bennu 和 Ryugu 的新发现对小行星起源和演化的新认识

小行星等小天体被认为是构建地球等类地行星的建筑材料，也是太阳系演化早期的“化石”，还可能是地球生命的主要来源。以小行星和彗星为目标的小天体探测是深空探测的重要方向。日本于2003年首次开展了近地小行星25143 Itokawa（S型）采样返回任务，成功采集了上千颗微米大小的颗粒，通过对采集颗粒的精细分析，取得了重要科学成果。有鉴于第一次采样返回任务的巨大成功，日本和美国分别启动了新一轮的小行星采样返回任务Hayabusa2和OSIRIS-REx，旨在采集小行星25143 Itokawa和101955 Bennu这两个C型小行星的样品带回地球，开展生命起源、小行星演化、小行星资源等方面的科学探索。目前，这两个探测计划均已到达目标小行星，分别对Ryugu和Bennu开展了近距离的探测，相关研究成果在*Science*、*Nature*、*Nature Geoscience*、*Nature Communications*和*Nature Astronomy*等国际知名期刊发表，为揭示小行星的起源和演化提供了新认识。

Ryugu呈扁圆形（图1），密度仅为 1.19 ± 0.02 克/厘米³，表明其具有高孔隙度特征，与Cb型小行星相符；此外，Ryugu表面分布大量的岩石碎块，具有碎石堆结构的明显特征。根据Ryugu表面坡度在经度和纬度方向的差异，推测Ryugu早期的自转速率可能曾达到过现今的两倍，导致有些岩石向赤道迁移，同时有些石块可能还被甩离Ryugu（Watanabe et al., 2019）。

Ryugu存在普遍性的2.7 μm吸收峰，说明其表面广泛分布含羟基的矿物（Kitazato et al., 2019）。此外，Ryugu的可见-近红外光谱与经历过热变质的CI1型碳质球粒陨石和遭受一定程度撞击发生脱水反应的CM2型碳质球粒陨石比较相似，暗示

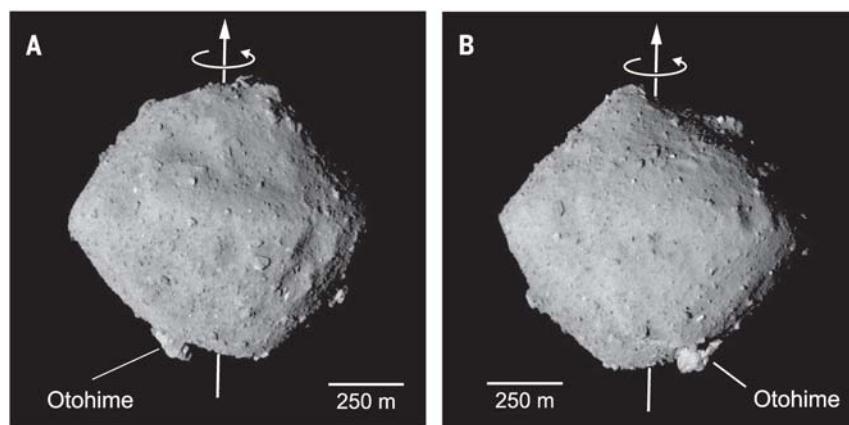


图1 导航相机拍摄 Ryugu 的正面（A）和反面（B）照片（Watanabe et al., 2019）



Ryugu 可能经历过一定程度热变质或较强烈的撞击 (Kitazato et al., 2019)。综合目前对 Ryugu 地形地貌、物性和成分等方面的探测结果, 认为 Ryugu 的母体曾经历过

水蚀变、热变质和多次撞击, 最终由撞击形成的碎块重新吸积形成了现在的 Ryugu (图 2), 从而说明 Ryugu 并不是理想中最原始的行星 (Sugita et al., 2019)。

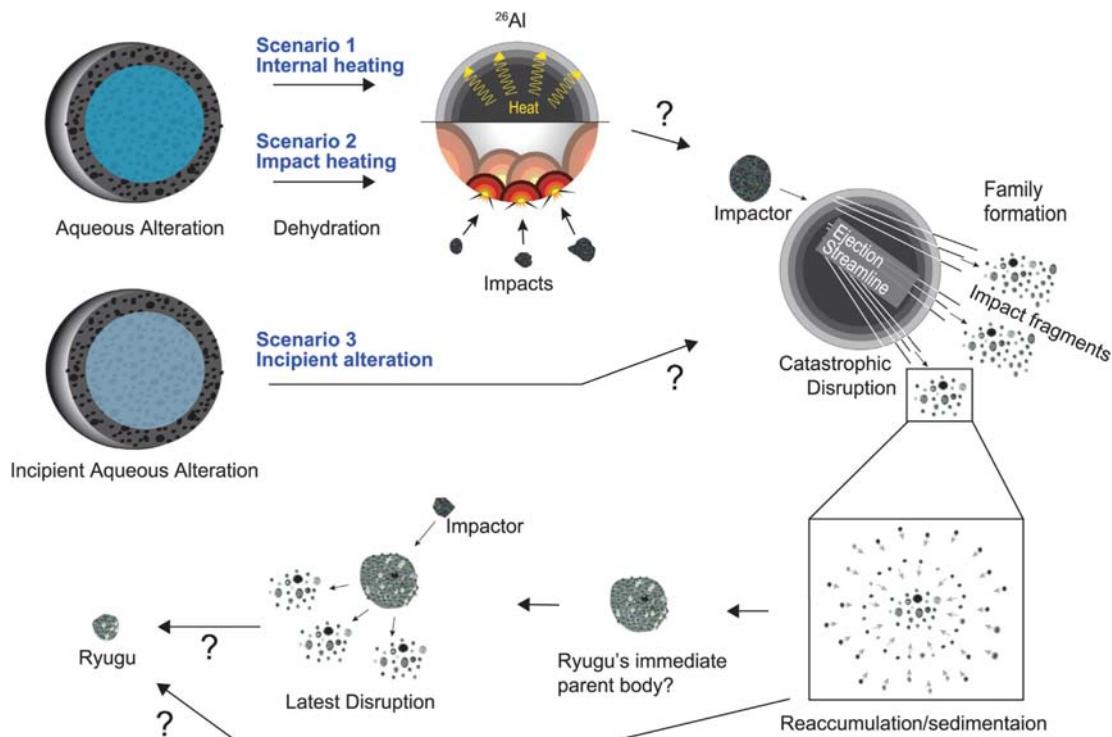


图 2 Ryugu 形成的示意图 (Sugita et al., 2019)。最初吸积形成的 Ryugu 母体发生过强烈的水蚀变, 由于 ^{26}Al 衰变和撞击加热, 导致该母体发生脱水, 同时导致母体破碎。撞击形成的碎块重新吸积形成小行星, 可能后期还经历过较强的撞击从而形成现在的 Ryugu

Bennu 形态与 Ryugu 接近 (图 3), 密度与 Ryugu 相当, 也为碎石堆结构 (DellaGiustina et al., 2019), 推测 Bennu 内部同样主要由岩石碎块和孔隙组成 (Scheeres et al., 2019), 除此之外 Bennu 的低纬度区域还具有低高程和低坡度特征 (Barnouin et al., 2019; Hergenrother et al., 2019; Scheeres et al., 2019)。Bennu 撞击坑年代学统计表明 Bennu 表面的年龄为 1-10 亿年, 早于 Bennu 成为近地小行星的时间 (Walsh et al., 2019)。Bennu 的表面可见大量米级大小的岩石 (如图 4), 然而, 热红外光谱、雷达和热惯量探测结果则支持 Bennu 表面

可能覆盖了一层表土 (DellaGiustina et al., 2019; Lauretta et al., 2019)。

Bennu 具有含水矿物的 2.7 μm 吸收峰 (图 4c), 该吸收峰明显强于 Ryugu, 说明 Bennu 上的含水矿物比 Ryugu 丰富 (Hamilton et al., 2019)。根据可见光—热红外波段的光谱特征, Bennu 与 CM 型碳质球粒陨石最相似 (Hamilton et al., 2019)。Bennu 现在的大小并不能维持液态水, 说明这些水可能来自更大的母体, 该母体经过多期次的演化形成了 Bennu (Hamilton et al., 2019), 这与 Bennu 现在的表面特征、物性等观测结果相符。目前认为, Bennu 的早期的自

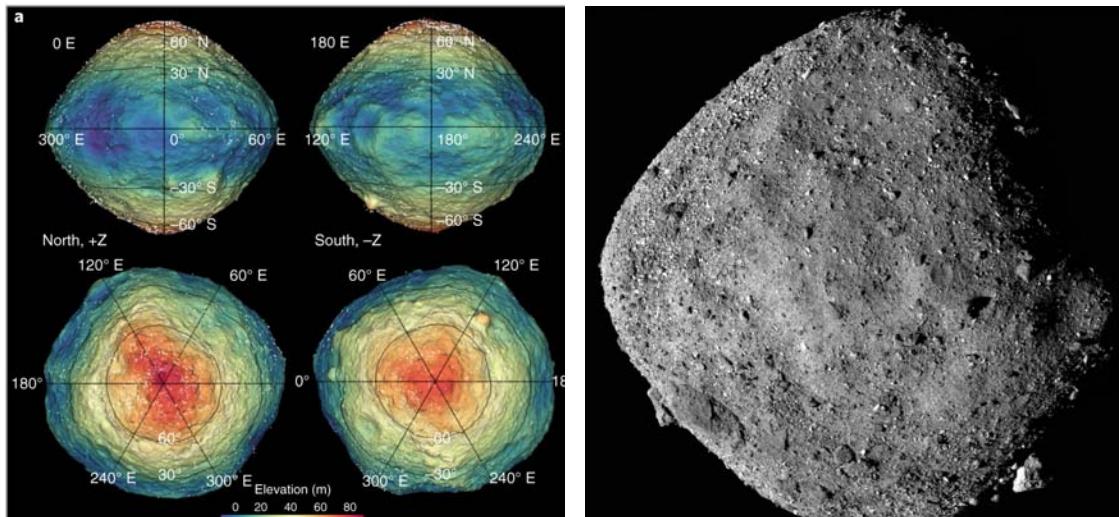


图 3 (a) 小行星 Bennu 的全球数字地形模型 (Barnouin et al., 2019) ; (b) 小行星 Bennu 拼接图像 (图片来源：NASA)

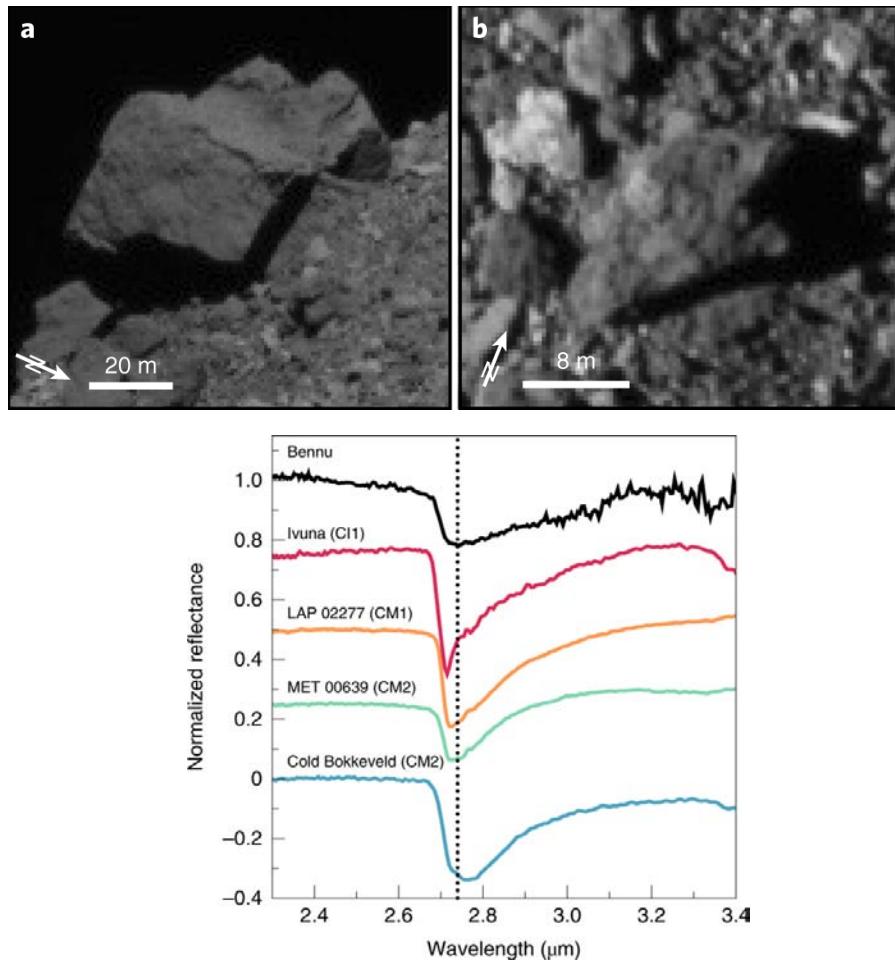


图 4 (a,b) Bennu 表面不同大小的岩石 (Walsh et al., 2019); (c) Bennu 与不同碳质球粒陨石的光谱。2.74 μm 处为 Bennu 吸收峰位置 (Hamilton et al., 2019)



转速度比现在快很多，而且其自转速度和表面的物质会随时间不断演化（Barnouin et al., 2019；Scheeres et al., 2019；Walsh et al., 2019）。最近还发现 Bennu 表面持续喷射出碎块，通量可达 150 克 / 秒，这些喷射出的碎块还会被 Bennu 重新捕获成为它的卫星（Hergenrother et al., 2019），具体原因仍有待进一步观测和研究。

Ryugu 和 Bennu 最新的探测结果表明，

小行星虽然体型小，但仍然存在复杂的地质活动和演化历史，更精细地认识还需返回样品的实验室分析来进一步厘定，这对我国小行星探测规划具有重要参考价值。我国首次小行星采样返回探测器将于 2023 年发射，计划对地球准卫星 2016 HO3 进行采样，探测器将返回舱送回地球后，将奔赴小行星带开展主带彗星和小行星探测，实现一次探测完成多目标、多技术、多手段的目标。

主要参考文献

- Barnouin O S, Daly M G, Palmer E E, et al. Shape of(101955)Bennu indicative of a rubble pile with internal stiffness[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 247-252. ([链接](#))
- DellaGiustina D N, Emery J P, Golish D R, et al. Properties of rubble-pile asteroid(101955)Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(4): 341-351. ([链接](#))
- Hamilton V E, Simon A A, Christensen P R, et al. Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid(101955)Bennu[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(4): 332-340. ([链接](#))
- Hergenrother C W, Maleszewski C K, Nolan M C, et al. The operational environment and rotational acceleration of asteroid(101955)Bennu from OSIRIS-REx observations[J]. *Nature communications*, 2019, 10: 1291. ([链接](#))
- Kitazato K, Milliken R E, Iwata T, et al. The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy[J]. *Science*, 2019, 364(6437): 272-275. ([链接](#))
- Lauretta D S, DellaGiustina D N, Bennett C A, et al. The unexpected surface of asteroid(101955)Bennu[J]. *Nature*, 2019, 568: 55-60. ([链接](#))
- Scheeres D J, McMahon J W, French A S, et al. The dynamic geophysical environment of(101955)Bennu based on OSIRIS-REx measurements[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(4): 352-361. ([链接](#))
- Sugita S, Honda R, Morota T, et al. The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes[J]. *Science*, 2019, 364(6437): eaaw0422. ([链接](#))
- Walsh K J, Jawin E R, Ballouz R L, et al. Craters, boulders and regolith of(101955)Bennu indicative of an old and dynamic surface[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 242-246. ([链接](#))
- Watanabe S, Hirabayashi M, Hirata N, et al. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile[J]. *Science*, 2019, 364(6437): 268-272. ([链接](#))

(撰稿：王帅，胡森 / 地星室)



Nature Geoscience : 冥王星存在海洋源于气体水合物隔热层

很多含冰的太阳系天体内部可能存在液态水海洋，其中包括冥王星。在冥王星的表面存在一个由氮冰组成、约 1000 km 宽的斯普特尼克平原 (Sputnik Planitia) (图 1)，其与冥王星的潮汐轴对齐并在此区域存在正重力异常。学者认为斯普特尼克平原积聚的氮冰以及地下液态水海洋是造成冥王星潮汐轴朝向和重力异常的原因 (Nimmo et al., 2016)。

为了保持地下液态水海洋 (subsurface ocean)，冥王星内部必须有足够的热能或者高浓度的抗冻分子来维持。对此问题，学者展开研究。Robuchon and Nimmo (2011) 发现潮汐力和放射性辐射均不足以提供所需的热量。Robuchon et al. (2016) 提出冥王星内部可能存在一个由高孔隙度高浓度氮冰组成的隔热层。但是，这个猜测无法成立，因为氮冰的粘度太低，粘性流动会

使得隔热层厚度大大降低，从而失去隔热作用。另外，存在高浓度的氨 (>30 wt%) 以及高粘度物质 (盐或者硅酸盐) 的可能性亦被排除 (Kamata et al., 2019)。

近日，日本北海道大学 Shunichi Kamata et al. (2019) 在 *Nature Geoscience* 上发表研究成果，提出了一种新的解释。他们认为冥王星的冰壳下方存在一个由气体水合物构成的隔热层。气体水合物是由气体和水构成的冰状固体，其中气体分子被禁锢在分子水的笼子中。气体水合物在冥王星内部压力条件下，能够在高于冰点的温度下形成，并且其热导率比水冰小 5–10 倍，其粘度比水冰高约一个数量级。正因为气体水合物层能够在形成水冰之前先形成，同时其高粘度和低热导率隔绝了热量的进一步损失，从而能够保证液态海洋的存在 (图 2)。

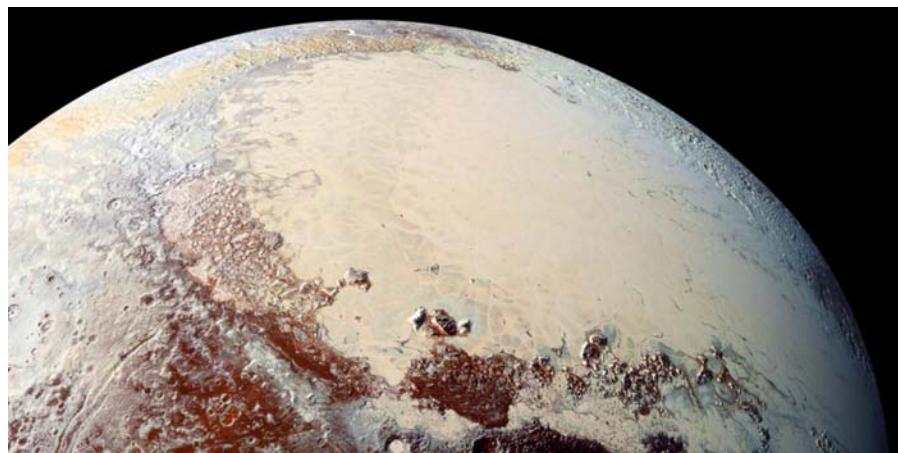


图 1 冥王星的斯普特尼克平原 (Sputnik Planitia)，由 NASA 的“新地平线”号飞船于 2015 年 7 月拍摄

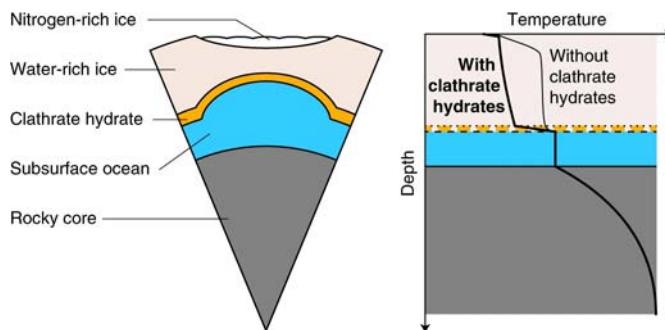


图2 冥王星内部结构简图

同时, Kamata 等也开展了冥王星内部热演化的计算模拟,他们指出如果没有气体水合物,冥王星的地下海洋在几亿年前就已经冻结了(图3a),而添加这个隔热层后,这个液态海洋可以一直存在到今天(图3b)。

许多气体分子,如甲烷、氮气、一氧化碳、二氧化碳、氢气等都会形成气体水合物。在这些分子中甲烷和二氧化碳更容易进入水合物相(Sloan, 2003)。冥王星大气中甲烷和一氧化碳的含量都很低,可能是因为在星体形成初期,这些气体分子在

液态海洋、冰壳和大气之间已经完成分配,进入了水合物相并存在于冥王星内部。虽然二氧化碳在星体形成初期可能大量存在,但是由于二氧化碳水合物的密度大,很难漂浮于水表面,因此不应该是冥王星水合物中主要的气体分子。这些原生的二氧化碳也可能通过化学反应转化为甲烷(如在Fe-Ni存在时的催化反应)。同时,冥王星内部也可能存在有机物,在演化的过程中这些有机物会分解生成甲烷和氮气等来补充液态海洋中的气体物质,从而使得水合物层不断生长。

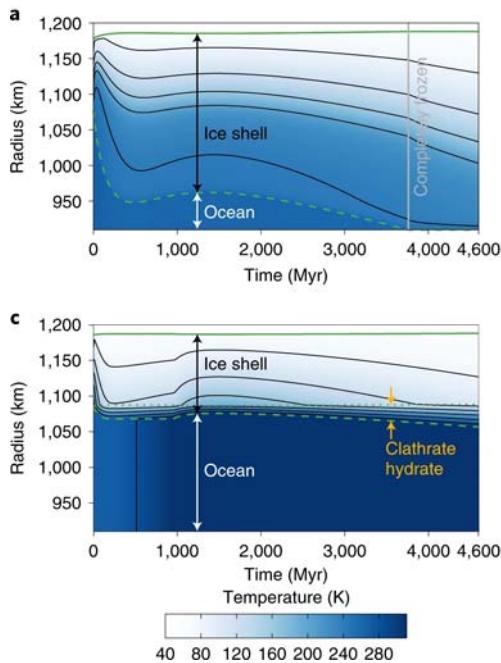


图3 冥王星内部热演化的模拟结果



冥王星内部可能存在水合物层，而前文中的这些气体不仅在冥王星，在许多其他天体上都有广泛分布。所以，这会不会造成很多其他星球内部存在液态海洋呢？

主要参考文献

- Hammond N P, Barr A C, Parmentier E M. Recent tectonic activity on Pluto driven by phase changes in the ice shell[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 6775-6782. ([链接](#))
- Kamata S, Nimmo F, Sekine Y, et al. Pluto's ocean is capped and insulated by gas hydrates[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 407-410. ([链接](#))
- Le Roy L, Altweig K, Balsiger H, et al. Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/ROSINA[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 583: A1.
- Nimmo F, Hamilton D P, Mckinnon W B, et al. Reorientation of Sputnik Planitia implies a subsurface ocean on Pluto [J]. *Nature*, 2016, 540(7631): 94-96. ([链接](#))
- Robuchon G, Nimmo F . Thermal evolution of Pluto and implications for surface tectonics and a subsurface ocean[J]. *Icarus*, 2011, 216(2): 426-439. ([链接](#))
- Sloan E D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 353-359. ([链接](#))

(撰稿：张正财 / 油气室，郭光军 / 地星室)



PNAS：星际环境中的笼形水合物

笼形水合物是一种包含化合物，由水分子通过氢键形成笼子，并在其中包含不同的客体分子（如 CH₄、CO₂、N₂、H₂ 等）而形成。人们熟知的甲烷水合物是一种丰富的潜在能源，CO₂ 水合物则可用于封存二氧化碳。这两种水合物通常在低温(<300 K) 和高压(>6 atm) 下稳定存在。由于这样的温压条件并不苛刻，因此在地球上这些水合物分布较为广泛，比如在大陆边缘的海底沉积物中，以及永久冻土带中(Sloan, 2003)。类似地，水合物在太阳系的其它天体上也可能存在，例如火星冻土带、泰坦(Titan 土卫六) 表面、及其它能够达到上述温压条件的冰卫星(Mousis et al., 2010)。

按常理来说，根据水合物的低温高压稳定条件，可以推知它们在星际空间无法存在。因为星际空间是超高真空，压力不高于10⁻³ mbar；另外，过低的星际温度也会使水分子的扩散速率接近零，从而阻止水分子形成笼子结构。然而，最近 PNAS 上所发表的印度学者 **Ghosh 等 (2019)** 的一项实验研究改变了人们的常规认识，表明甲烷水合物和 CO₂ 水合物可以分别在 30K 和 10K 温度下的超高真空中形成(压力仅有 10⁻¹⁰ mbar)。这意味着水合物能够在星际空间的极端低压环境中存在，这可用于解释冷星云或彗星中的一些甲烷、CO₂ 等挥发性气体的异常喷发(Blake et al., 1991；Luspay-Kuti et al., 2016)。另外，空间辐射也有可能引起星际环境中的水合物发生化学变化，或可形成生

命起源分子(Allamandola et al., 1999)。

Ghosh 等 (2019) 采用了对气体和水的混合冰进行退火的方法来获得水合物。他们把水和气体喷射到真空腔中由液氦循环冷却(8K) 的金属 Ru 表面，通过共同冷沉淀获得混合冰。然后逐渐升温，分别在 10K、20K、30K 条件下退火，用红外反射吸收光谱(RAIR) 持续观察样品 25 小时，得到如图 1 所示的结果。可以清楚地看到，在 30K 温度下形成了甲烷水合物。作者认为较长的时间尺度和尽可能高的温度(30K，已经接近甲烷脱附冰的温度) 是实验成功的关键因素。把实验中的甲烷气体换成 CO₂ 气体的情况类似，发现在 10K 温度下，CO₂ 水合物就可以形成(图 2A)；而且，CO₂+H₂O 混合的不同比例起到十分关键的作用，例如当比例为 1 : 90 时，混合冰中的 CO₂ 可以全部转化为水合物(图 2B)。样品制备的沉淀方式也很重要，按比例共同沉淀就能获得水合物，而顺序交叠沉淀则不能。

Ghosh 等 (2019) 的这项研究工作把人们对水合物存在范围的认识拓展到了星际空间的极端条件，温度可低至 10K，压力可低至 10⁻¹⁰ mbar。这不但在天文学领域有重要意义(涉及星际气体异常喷发、生命分子起源等)，而且在化学领域也有重要影响(涉及笼形水合物成核机制和结构转变，超低温非晶态固体水不寻常的分子活动性等)。

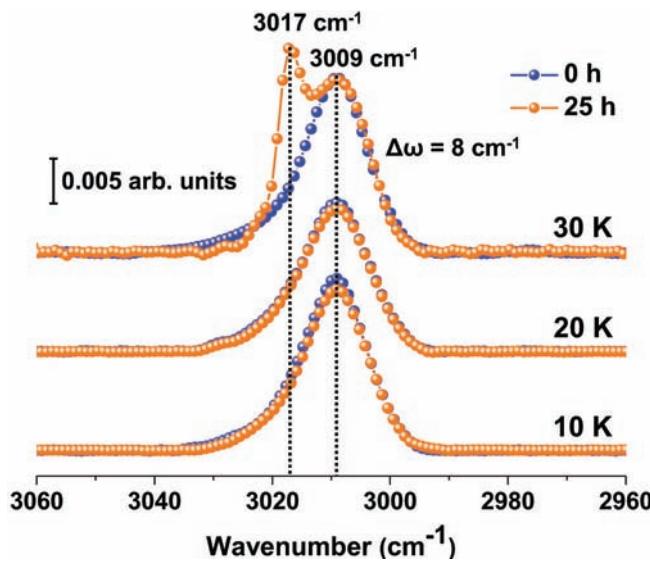


图1 300个单层的 $\text{CH}_4\text{+H}_2\text{O}$ (1:1)混合冰在不同温度下, C-H反对称伸缩振动的RAIR光谱。
3009 cm^{-1} 峰代表固体甲烷, 3017 cm^{-1} 峰代表甲烷水合物

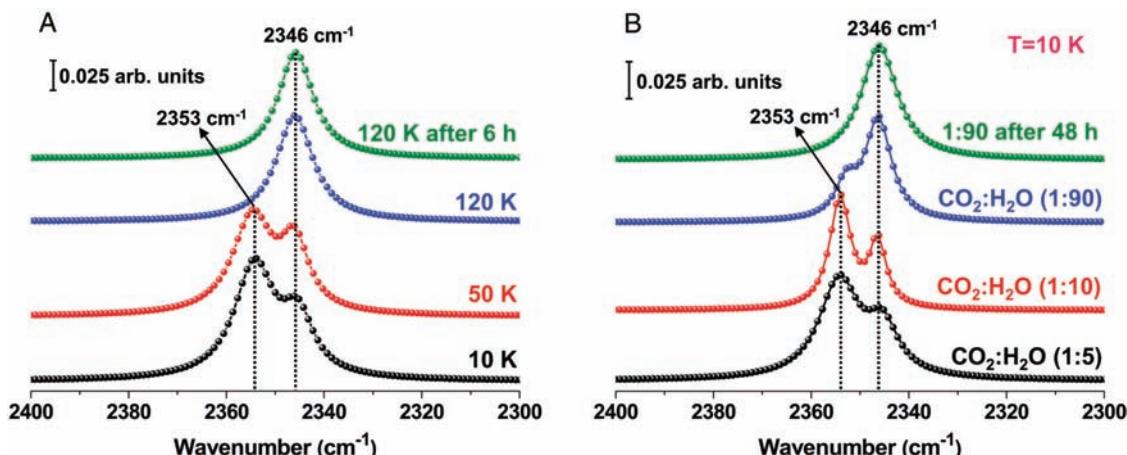


图2 (A) 300个单层的 $\text{CO}_2\text{+H}_2\text{O}$ (1:5)混合冰在不同温度下, C=O反对称伸缩振动的RAIR光谱;
(B) $\text{CO}_2\text{+H}_2\text{O}$ 混合冰在10K温度下, 不同比例的情况。2353 cm^{-1} 峰代表自由 CO_2 , 2346 cm^{-1} 峰代表 CO_2 水合物

主要参考文献

- Allamandola L J, Bernstein M P, Sandford S A, et al. Evolution of interstellar ices[M]//Composition and Origin of Cometary Materials. Springer, Dordrecht, 1999: 219-232. ([链接](#))
- Blake D, Allamandola L, Sandford S, et al. Clathrate hydrate formation in amorphous cometary ice analogs in vacuo[J]. *Science*, 1991, 254(5031): 548-551. ([链接](#))
- Ghosh J, Methikkalam R R J, Bhuiyan R G, et al. Clathrate hydrates in interstellar environment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(5): 1526-1531. ([链接](#))



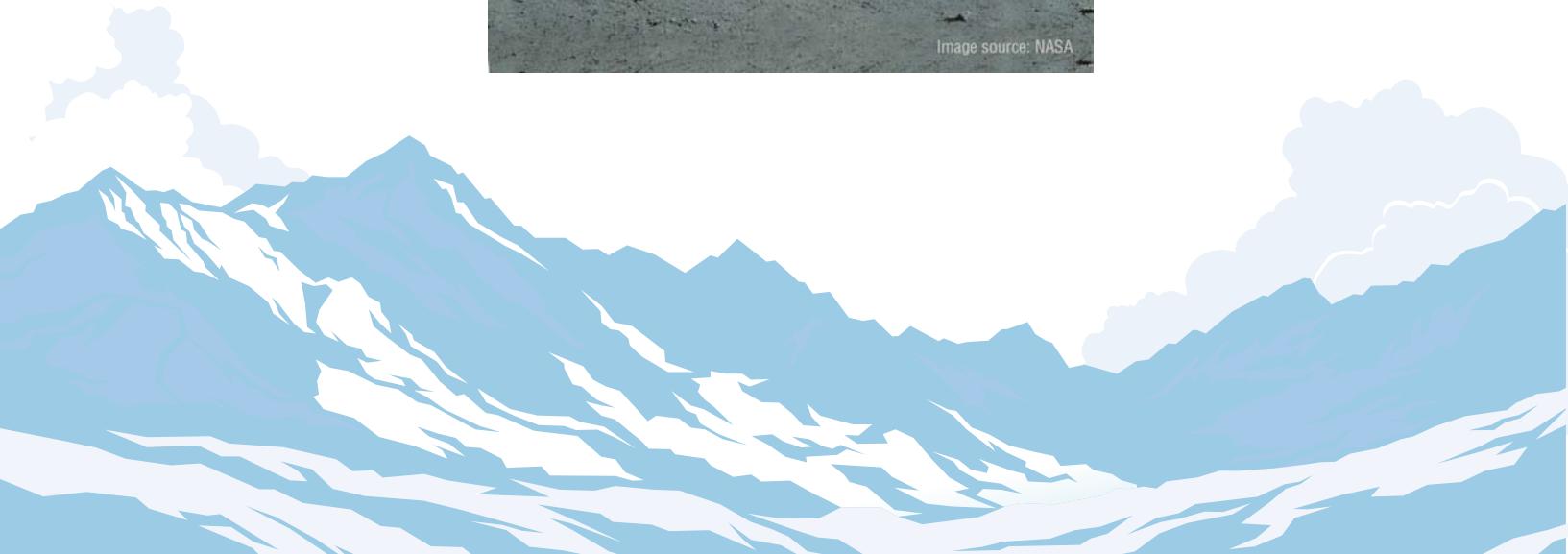
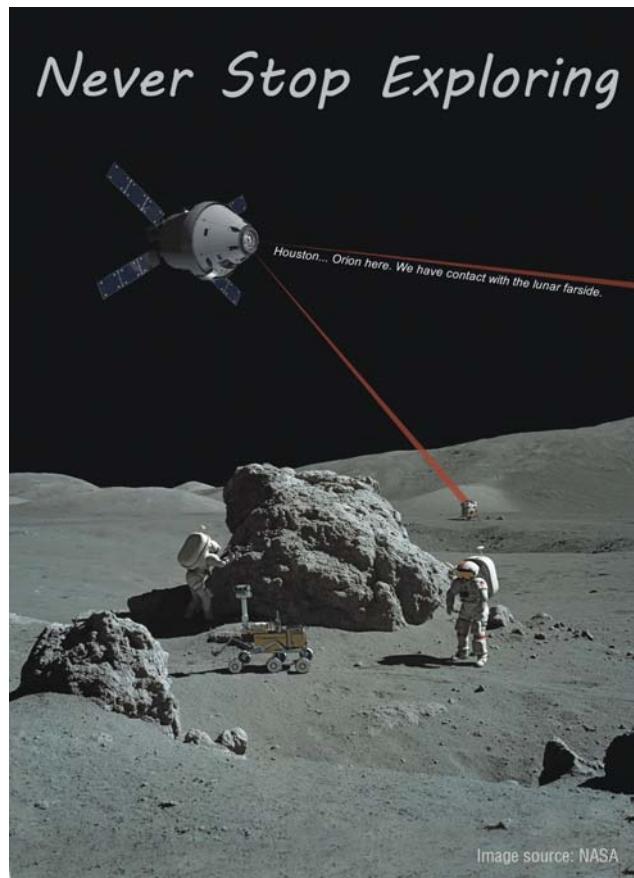
Lupay-Kuti A, Mousis O, Hässig M, et al. The presence of clathrates in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko[J]. *Science Advances*, 2016, 2(4): e1501781. ([链接](#))

Mousis O, Lunine J I, Picaud S, et al. Volatile inventories in clathrate hydrates formed in the primordial nebula[J]. *Faraday Discussions*, 2010, 147: 509-525. ([链接](#))

Sloan Jr E D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 353-363. ([链接](#))

(撰稿：郭光军 / 地星室)

7. 前沿——永无止境





Science Advances : 长同位素示踪人群和动物的迁移行为——以英国巨石阵为例

考古学的重要主题之一是对古人类与动物迁移行为的探讨。传统考古学者主要借助器物、建筑和文化景观等证据间接反映迁移现象。近三十年来，随着地球化学分析手段的发展，锶同位素 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 逐渐成为研究迁移行为的有力工具，为探索古人类与动物迁移行为及与之相关的社会文化现象提供了直接证据 (Bentley, 2006)。

^{87}Sr 由 ^{87}Rb 衰变形成，矿物和岩石的锶同位素比值取决于初始 Rb/Sr 比值和基岩的年龄。由于质量数大，锶在表生环境中分馏非常小，在风化、成壤过程和生物循环中， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值基本保持不变。锶通过摄食和饮水进入生物体内，牙齿和骨骼形成时，锶以类质同象形式替换羟磷灰石中的钙，得以长期保存。牙齿萌出后，牙釉质成分不再发生变化。对比个体牙釉质 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与当地背景值的差异，可以揭示个体迁移行为的信息。

1985 年，Ericson 提出人类牙釉质和骨骼锶同位素能示踪古人类迁移活动。近年，关注焦点转向人类与动物迁移来源以及动因研究，探讨迁移行为指示的社会文化问题。

英国南部大量的圆形石结构建筑是欧洲史前时期的标志性古迹，其中以巨石阵和埃夫伯利遗址最为著名。陶器组合和动物考古证据显示，这些建筑及其周边通常举行规模盛大的宴会活动，而猪是宴会上食用的主要动物。有研究认为，宴会的举

行可能促进遗址附近人群的迁入，但关于迁移规模以及宴请覆盖范围的深入研究却鲜有报道。近日，英国卡迪夫大学 Madgwick et al. (2019) 分析了巨石阵附近 4 个新石器时代晚期 (2800–2400 BC) 圆形石结构遗址出土的 131 头猪的牙釉质和下颌骨骨胶原的 5 种同位素 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{15}\text{N}$)，详细探讨了猪的迁移规模及来源问题。该成果近日在 *Science Advances* 上发表。

结果显示，所有遗址猪的 5 种同位素极差和 IQR 值（四分位距）均较大。以 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为例，尽管这些遗址所在的白垩纪碳酸盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低，但猪牙釉质 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值几乎包含了整个不列颠岛内的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。对同位素结果的聚类分析显示，131 头猪至少来自于 24 个不同的同位素地理单元，进而表明宴会中猪的来源相当复杂，且宴会的覆盖范围较为广泛。

作者进一步集成了英国境内其它不同时期遗址的动物同位素数据（图 1）。相比于新石器时代中期 (MN) 和早期铁器时代 (EI) 遗址，本研究中 4 个遗址点地质背景较为单一，但是锶同位素比值呈现较大的极差和 IQR 值。此外，8 个猪牙 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高于 0.7130，所占比例远高于英国南部其它遗址。以上均表明新石器时代晚期巨石阵周围中存在大量外来猪的迁入，揭示了宴会活动的举行促进了大规模的动物与人群迁移行为。

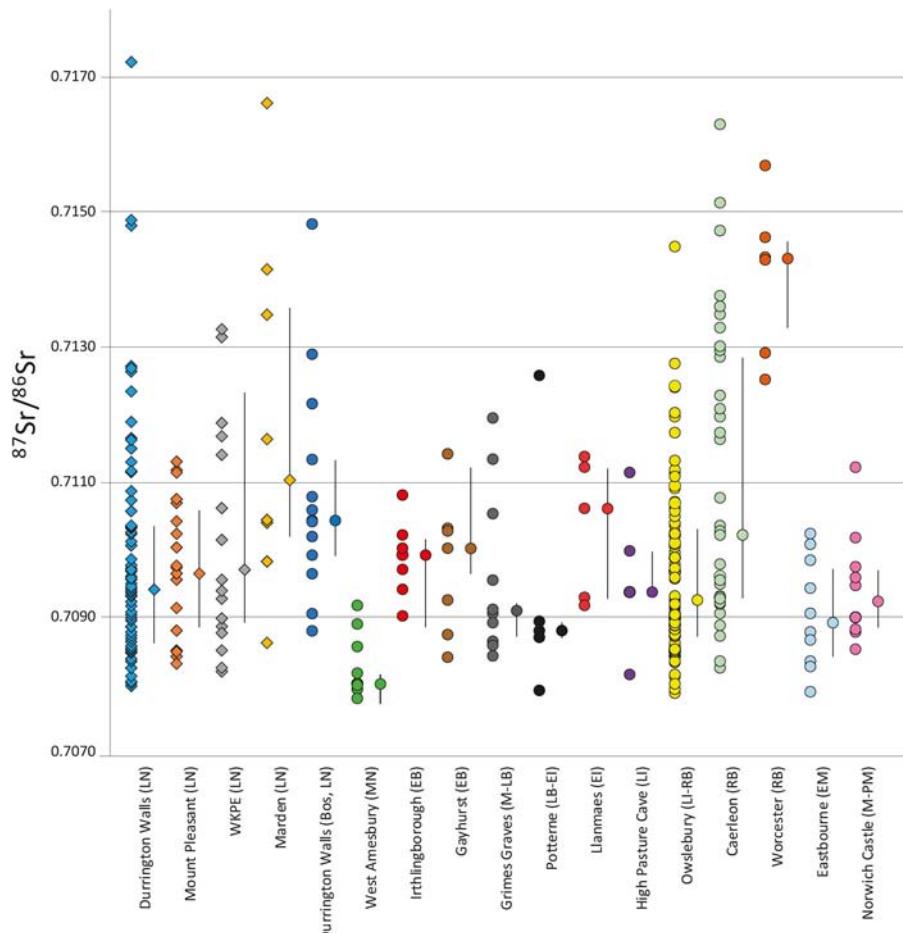


图1 四个研究遗址点与英国境内其它不同时期遗址点动物锶同位素对比（4个遗址点分别为Durrington Walls, Mount Pleasant, West Kennet Palisade Enclosures 和 Marden 遗址, LN 为新石器时代晚期, MN 为新石器时代中期, EI 为早期铁器时代, RB 为罗马 - 不列颠时期, EM 为中世纪早期）

作者还进一步对这些外来猪的规模与来源问题进行探讨。对比 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 值发现(Evans et al., 2010; Nehlich, 2015)，4个遗址中仅有少量的猪来自于本地。结合英国 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 背景值(图2)，作者推测3个高值可能来自于英格兰和威尔士，其它5个高值很有可能来自于苏格兰，此外 $\delta^{34}\text{S}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 则显示遗址中部分猪来自于英国东部沿海区域，由此表明这些外来猪存在长距离的迁移行为。基于本研究，作者认为新石器时代早期的圆形石结构建筑不仅仅是区域的聚集中心，与之相关的宴会活动明显促使了英国境内大规模的人群和动物

的迁移，由此加强了新石器时代晚期英国不同区域之间的联系与交流。

尽管锶同位素是探讨迁移行为的强有力证据，作者也承认，即使用5种同位素共同约束，仍然无法准确判断这些猪的具体来源。目前，判断动物与人类来源的有效方法是建立高分辨率的锶同位素背景值，主要载体为生物可利用的地表水、地下水、植物及迁移能力较弱的动物(Evans et al., 2010)。然而，丹麦奥胡斯大学Thomsen and Andreasen (2019)最近发现，丹麦西部不受污染的地表水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值(0.7124)相对于其农田附近值(0.7097)明显偏高，

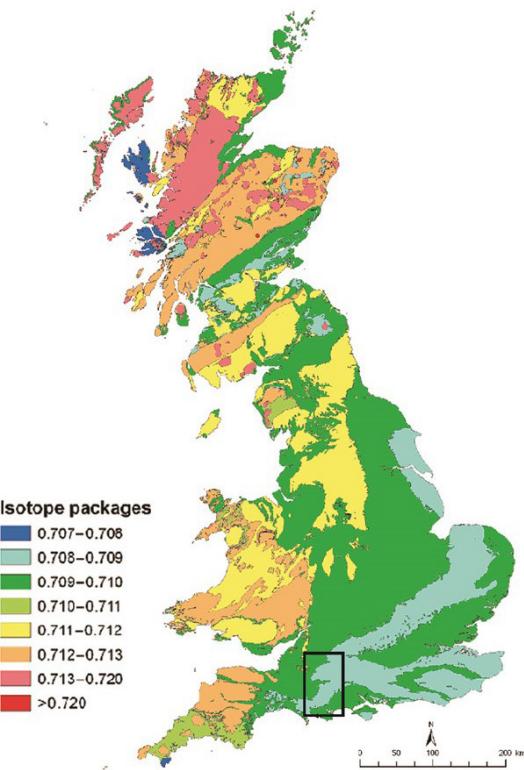
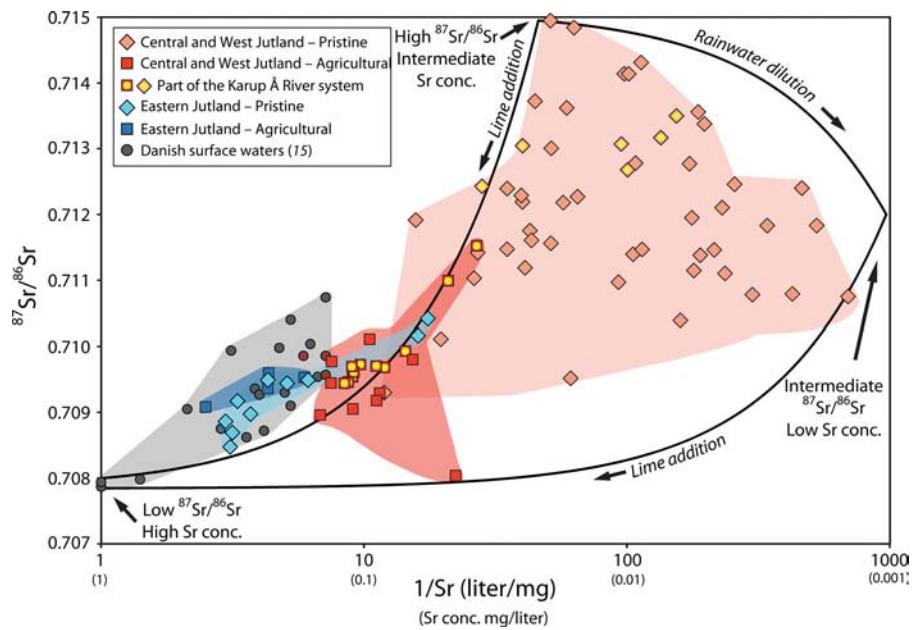


图 2 英国 Sr 同位素比值背景图

图 3 丹麦地表水 Sr 浓度和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值



而 Sr 浓度明显偏小（图 3）。作者认为，这可能与农业中非钙质土中施撒石灰有关，该行为导致地表水的 Sr 浓度升高和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值降低。因此，在建立 Sr 同位素背景值时，农业活动的影响不能忽视。该成果同一天在 *Science Advances* 上发表。此外，存在的问题还包括：锶同位素难以区分地质背景相似地区的人口迁移、牙釉质和骨骼样品

可能受到后期污染等。

总体而言，锶同位素在人类迁移研究中有重要优势和广泛应用。更重要的是，它与个体的丧葬行为结合，提供了更多的文化交流细节，帮助我们认识古代人群的生业方式和组织结构，甚至包括国家管理、区域间贸易与交换等更宏观的社会文化问题。

主要参考文献

- Bentley R A. Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: a review[J]. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 2006, 13(3): 135-187. ([链接](#))
- Evans J A, Montgomery J, Wildman G, et al. Spatial variations in biosphere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Britain[J]. *Journal of the Geological Society*, 2010, 167(1): 1-4. ([链接](#))
- Madgwick R, Lamb A L, Sloane H, et al. Multi-isotope analysis reveals that feasts in the Stonehenge environs and across Wessex drew people and animals from throughout Britain[J]. *Science Advances*, 2019, 5(3): eaau6078. ([链接](#))
- Nehlich O. The application of sulphur isotope analyses in archaeological research: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 142: 1-17. ([链接](#))
- Thomsen E, Andreasen R. Agricultural lime disturbs natural strontium isotope variations: Implications for provenance and migration studies[J]. *Science Advances*, 2019, 5(3): eaav8083. ([链接](#))

(撰稿：王学烨，唐自华 / 新生代室)



Science Advances : 晶体如何形成——关于成核途径的理论

结晶是自然界中的常见过程，如水结晶为冰，天然气和水在海底形成天然气水合物，岩浆冷却形成矿物或宝石，珍珠在贝壳中形成。结晶也是自然界最神秘的过程之一，例如，在没有规则结构的液体中如何出现具有周期性结构的规则固体。结晶过程由于其在生物、现代科技以及矿物结晶顺序等方面的应用而受到广泛关注，例如，纤维状类淀粉蛋白质凝聚结晶会导致阿兹海默症（俗称老年痴呆）的发生（Harper et al., 1997）。

经典成核理论自20世纪初期提出以来，得到了广泛认可，认为结晶过程是一些分子或原子偶然聚集在一起，碰巧以结晶形式排列，然后其他分子（原子）逐个附着，形成更大的结晶相。也就是说，经典成核理论认为结晶过程直接形成稳定的结晶相。近些年，学者通过透射电子显微镜（cryo-TEM）（Van Driessche et al., 2018）、原子的电子成像（atomic electron tomography）（Zhou et al., 2018）以及分子模拟（Sosso et al., 2016）等技术，发现结晶过程并不像经典成核理论描述得那么简单，很多时候结晶过程会经过一个性质介于原始态和结晶态之间的中间态，例如：二步成核机制——结晶过程首先形成一个介于结晶相和非晶相的中间态（例如，非晶态固体），这个中间态最终会转化为结晶态（Galkin et al., 2000）。值得注意的是，上述非经典结晶过程已经被广泛的实验和模拟研究证实，但

是至今还处于定性观察阶段，没有一个理论对此过程进行解释。

基于上述背景，比利时布鲁塞尔自由大学 Lutsko (2019) 通过结合基于密度场的经典密度泛函理论（classical density functional theory）以及随机过程理论（stochastic process theory）在理论上对液滴凝结以及晶体的形成过程进行了研究，**研究成果近期发表在 *Science Advances* 上**。密度泛函理论常被用于研究多电子体系的电子结构，是一种用密度来表征体系结构的方法，而随机过程理论则包含了研究随机过程的各种方法，如高斯随机过程。

Lutsko 的研究发现，液滴凝结过程中自由能的变化并不符合经典成核理论（CNT）的预测，如图1所示，理论计算值与经典成核理论的预测并不一致。而对晶体结晶过程的研究则发现，随着结晶核不断的变大，体系需要克服一个初始的自由能垒，然后在自由能曲线上出现一个浅的极小值（鞍点）（图2蓝星处）。这个鞍点的存在意味着体系从液体变化为晶体的过程中经历了一个中间态，这个中间态需要进一步克服一个能垒才能转变为最终的结晶态。可以看出此结晶过程符合二步成核机制的描述。

他们在仅提供粒子之间相互作用的情况下成功预测了二步成核机制，其理论可以解释前人在实验和模拟研究中观察到的非经典成核现象。例如，Jacobson et



al. (2010) 通过分子动力学模拟研究发现，天然气水合物成核结晶时，溶液中首先出现非晶相的甲烷水合物；然后，这些非晶相的水合物可以通过结构转变，最后成为

晶体相（图 3）。另外，Lutsko 的方法也可以用于研究其他各类结晶过程，这对于提出完备的成核结晶理论非常有意义。

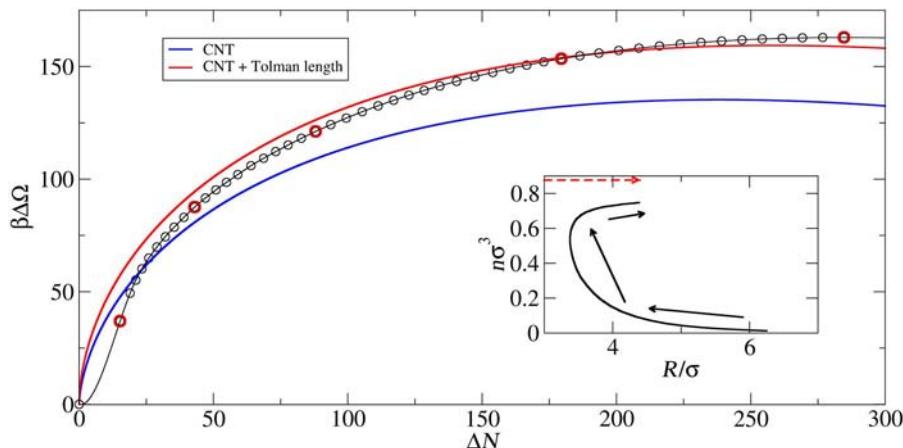


图 1 体系自由能随液滴大小的变化。其中黑色圆圈为 Lutsko 的理论计算结果，红色和蓝色实线为经典结晶理论 (CNT) 预测结果 (Lutsko, 2019)

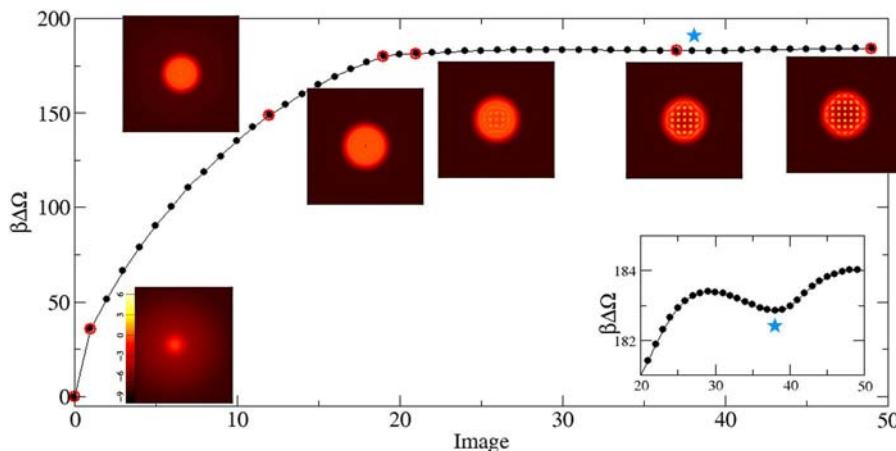


图 2 体系自由能随结晶核大小的变化。系列照片展示了结晶核随大小变化的图像。右侧插图为自由能曲线的放大图 (Lutsko, 2019)

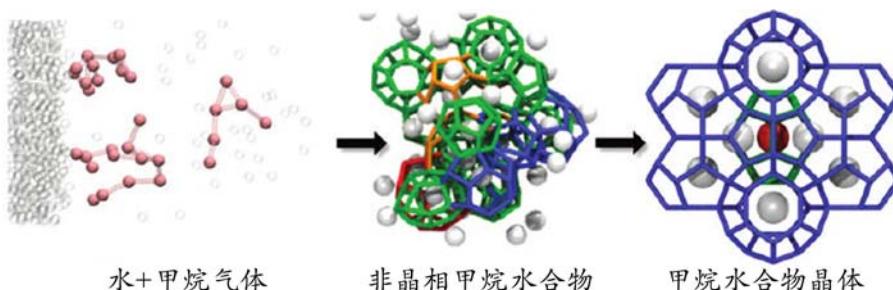


图 3 甲烷水溶液在低温高压下 (250 K 和 50 MPa)，首先成核结晶为非晶相水合物，然后这些非晶相水合物生长或者转化为结晶相水合物 (Jacobson et al., 2010)



主要参考文献

- Galkin O, Vekilov P G. Control of protein crystal nucleation around the metastable liquid–liquid phase boundary[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(12): 6277-6281. ([链接](#))
- Harper J D, Lieber C M, Lansbury Jr P T. Atomic force microscopic imaging of seeded fibril formation and fibril branching by the Alzheimer’s disease amyloid- β protein[J]. *Chemistry & Biology*, 1997, 4(12): 951-959. ([链接](#))
- Jacobson L C, Hujo W, Molinero V. Nucleation pathways of clathrate hydrates: effect of guest size and solubility[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2010, 114(43): 13796-13807. ([链接](#))
- Lutsko J F. How crystals form: A theory of nucleation pathways[J]. *Science Advances*, 2019, 5(4): eaav7399. ([链接](#))
- Sosso G C, Chen J, Cox S J, et al. Crystal nucleation in liquids: Open questions and future challenges in molecular dynamics simulations[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(12): 7078-7116. ([链接](#))
- Van Driessche A E S, Van Gerven N, Bomans P H H, et al. Molecular nucleation mechanisms and control strategies for crystal polymorph selection[J]. *Nature*, 2018, 556(7699): 89-94. ([链接](#))
- Zhou J, Yang Y, Yang Y, et al. Capturing Nucleation at 4D Atomic Resolution[J]. arXiv preprint arXiv: 1807.10709(27 July 2018). ([链接](#))

(撰稿：张正财 / 油气室，郭光军 / 地星室)



Nature Communications : 锌对白云石形成的催化作用

白云岩是由白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 组成的沉积岩，是碳酸盐岩中分布非常广泛的一种岩石，而且年代越老，分布越多，在其被发现的二百多年时间里，其成因一直是“谜”一样的存在：在常温常压条件下，由于镁离子的水合作用，会造成白云石形成的动力学障碍，所以很难在常温常压条件的正常地表环境里大规模形成白云石（岩），即所谓的“白云石（岩）问题”。虽然现在一些研究证实在地表某些特殊条件下（如高盐度、硫酸盐还原菌介导、胞外聚合物和有机物脱羧等）可以克服这种动力学障碍，形成白云石前驱物——原白云石（protodolomite），但对促进这些白云石化作用发生的化学反应过程仍知之甚少。

之前，白云石成因动力学的研究通常建立在与盐湖和泻湖密切相关的基础之上，至今仍没有对溶解性锌的反应路径和及其在白云石化作用中的动力学机制开展过研究。基于上述情况，诺丁汉大学的 Vandeginste et al. (2019) 首次通过间隙式反应实验对锌离子催化白云石化反应路径及反应速率进行了研究，相关成果近期发表在 *Nature Communications* 上。

该研究发现白云石化作用的反应路径可分为 3 个阶段：最初的诱导期，紧随的转变期（方解石向原生白云石转变），以及最终的重结晶阶段（原生白云石 - 高度有序白云石）。这些反应物的转变可分别由 104 峰和 105 峰的位移加以识别（图 1）。溶解 -

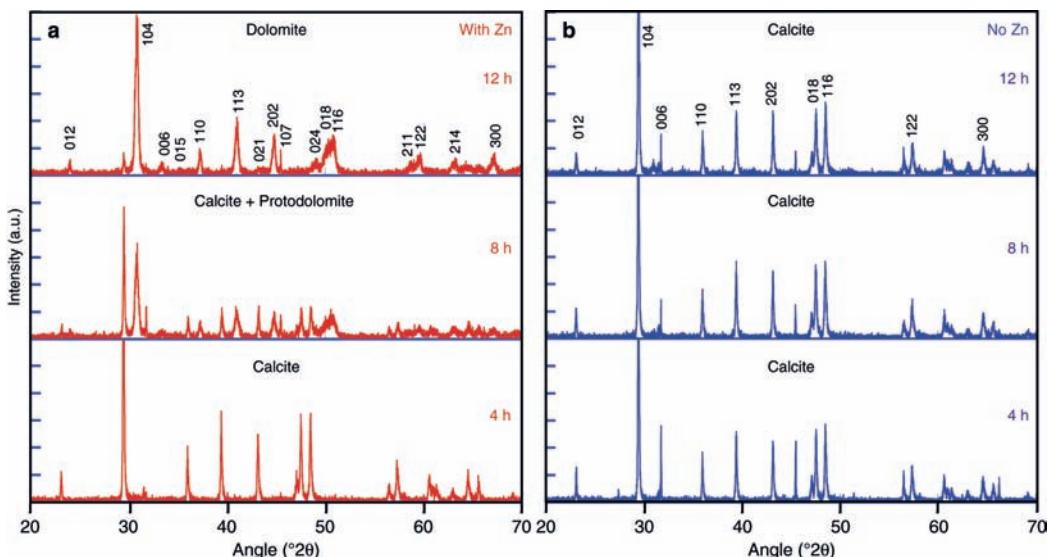


图 1 间隔 4, 8 和 12 小时的反应产物 X- 衍射图样 ($20\text{--}70^\circ 2\theta$)。(a)：白云石特征反射峰；(b)：方解石特征反射峰。部分峰值 ($31.7^\circ 2\theta$) 由反应产物清洗过程中未完全溶解或样品干燥过程结晶的微量石膏所致



沉淀这一耦合作用是白云石化反应路径的关键，原生白云石的沉淀通常发生在流体-矿物的接触面上，并外延至溶解的方解石表面；最后熟化形成菱形、亚微米级大小(0.3-0.8 μm)的化学计量白云石，与原始椭圆形的方解石颗粒形成显著差异。而对形成矿物的研究则发现，除方解石、原生白云石和白云石外，还发现有微量的水镁石 $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ 和氯水锌矿 $[\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})]$ 产生。若以红锌矿(ZnO)代替 ZnCl_2 溶液，则红锌矿在反应最初的3小时内已完全溶解，形成的氯水锌矿含量更为显著。

他们的研究认为白云石化反应速率与溶液中溶解的锌的浓度密切相关，而与锌的来源(ZnCl_2 抑或 ZnO)无关。而在锌促进白云石化反应速率研究中发现，溶液中

加入 ZnCl_2 形成的正二价锌水合物，能显著缩短诱导期的时间，提高原生白云石形成的反应速率(图2)。这是因为锌离子具有比镁离子更高的水合焓，能促使镁离子脱水作用的发生；同时有利于镁离子进入原生白云石的矿物晶格。当溶液中锌离子的浓度越高时，白云石化作用的反应速率越快。用Avrami方程模拟的结果也支持这一假设，指示锌离子的加入可促进白云石化作用。更有意思的是，无论是向溶液中加入 ZnCl_2 还是 ZnO ，两者的反应速率非常类似(图3)，指示反应速率与锌的来源(ZnCl_2 或 ZnO)无关。进一步实验模拟发现当溶液中含有硫酸盐时，溶解锌的加入仍能极大地促进白云石化作用的反应效率，降低硫酸盐对白云石化作用的抑制效应。

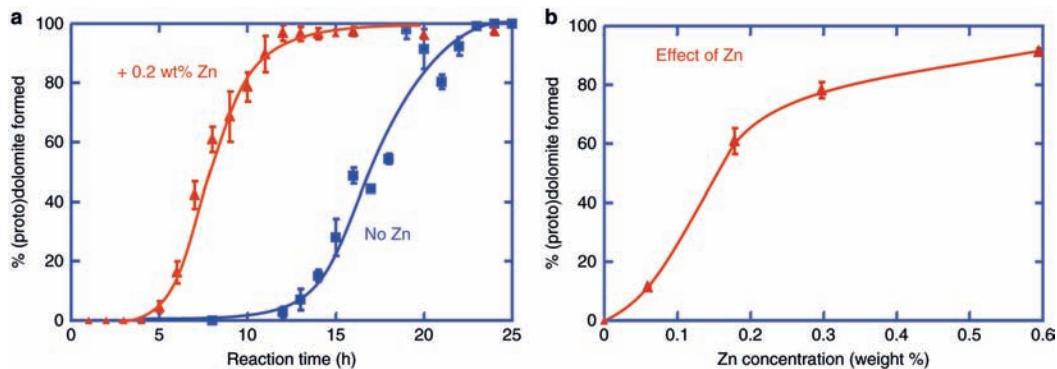


图2 白云石交代方解石反应速率曲线。(a) : 200 °C条件下，溶液中加入0.2 wt% 锌可使方解石白云石化的时间减少一半；(b) : 溶液中加入少量的锌离子在8小时内可急剧增加(原生)白云石的数量

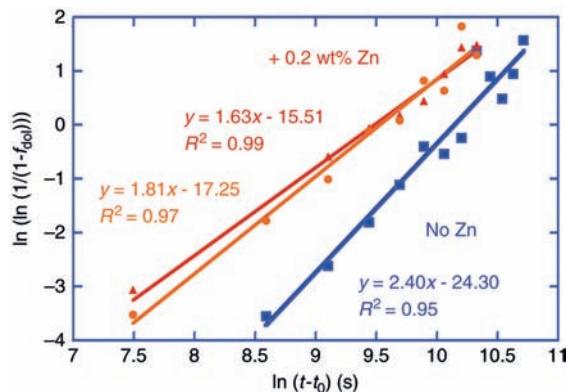


图3 200 °C条件下白云化作用 Avrami 模拟实验结果交汇图，线性趋势线指示白云石化作用反应速率与时间指数的最佳拟合结果。蓝色：不含锌溶液；红色：含 ZnCl_2 溶液；橙色：含 ZnO 溶液



Vandeginste 等人的研究结果对于解决白云石化作用与密西西比河谷型铅锌矿床的成因联系具有非常重要的理论意义。由

于这一成果是在较高温度条件下获得的，能否外推至低温白云石的成因仍然存在不确定性，需要后续研究予以证实。

主要参考文献

Vandeginste V, Snell O, Hall M R, et al. Acceleration of dolomitization by zinc in saline waters[J]. Nature communications, 2019, 10: 1851. ([链接](#))

(撰稿：陈代钊 / 油气室)



Nature Communications : 表生条件下真菌对金氧化还原作用的证据

普遍认为，金是自然界中最不活泼的金属元素。其实，金的活动性与其存在形式密切相关。金可以在地表各种介质中（例如富盐水体，土壤铁结核，以及地表钙沉积）以固体金（bulk gold）、纳米金以及金有机复合物等形式广泛存在，固体金的化学反应活性低，纳米金及金的各种复合物却展现出突出的催化性能（Eustis and El-Sayed, 2006）。

近十几年来，研究发现微生物（主要是细菌与古菌）有可能参与了金的地球化学循环（Southam et al., 2009），它们通过分泌氰化物、硫代化合物以及有机酸等溶解含金矿物。Reith et al. (2006) 在细菌形成的菌膜上发现了次生金颗粒，这些颗粒被认为是由细菌的还原与富集作用形成。细菌通过还原作用还降低了离子金的生物

毒性（Reith et al., 2009）。作为地球表面环境中主要的降解者，真菌在有机质分解及矿物风化中具有重要的作用，参与地表多种元素的地球化学循环。在三种可能影响了金从二级沉积矿体到地表的转化与迁移的机制（毛细管效应、气体负载及生物扰动）（Anand et al., 2016）中，真菌亦有可能参与了这些过程。然而除了细菌与古菌，人们对真菌与金是否有相互作用所知甚少。

澳大利亚科学与工业研究组织矿产资源中心（CSIRO Mineral Resources）呼庆博士（Tsing Bohu）研究组，近日在 *Nature Communications* 上发表了金与真菌相互作用的最新成果，发现金以纳米颗粒形式富集在真菌菌丝的表面（图1）并首次提出在地表条件下真菌可以氧化并溶解环境中的金。他们利用微宇宙试验比较了富金地



图1 *Fusarium oxysporum* TA-pink1 与金微粒的扫描电镜照片（呼庆未发表资料）



区与对照地区土壤中真菌群落对金氧化的潜势，表明只有富金地区的真菌群落表现出明显的金氧化能力，显示金有可能对环境微生物施予了进化压力或具有选择性优势。通过热力学模型解析，超氧化物被认为是真菌氧化溶解金的主要电子受体。这与真菌通过活性氧氧化其他过渡金属元素例如锰的机制也许是相似的（Hansel et al., 2012）。他们随后从富金地区的土壤中分离纯化出一株具有金氧化能力的真菌菌株 *Fusarium oxysporum* TA-pink1。通过 X 射线光电子能谱以及电感耦合等离子体质谱，发现金在真菌的作用下可以发生迁移，推测一种富酮的配体参与了金的氧化溶解。

基于以上发现与分析结果，该研究组提出了真菌氧化金的初步模型：真菌分泌超氧化物氧化溶解金，并通过一种富酮的分子与金离子形成复合体，该复合体随后被环境中的有机质还原为金纳米颗粒并沉积到真菌菌丝的表面（图 2）。令人惊讶的是，通过环境宏基因组测序与生物信息学分析，他们发现这种金氧化真菌在富金地区土壤的真菌群落中具有重要作用，是真

菌群体网络的中心（图 3）。这一现象提示金氧化能力也许赋予了这种真菌某种生理优势。进一步的菌丝延伸实验证明，金确实可以帮助 *Fusarium oxysporum* TA-pink1 缩短利用非偏好碳源的调适期，从而使得金氧化真菌具有环境生存优势。

该研究结果的重要意义在于：真菌主导地表矿物生物风化并有很强大的菌丝扩展与生长的能力，该现象有可能对地球浅表层金的迁移与分布，以及自然界中金纳米颗粒的形成给出地质真菌学（Geomycology）的解释。研究成果引起了多个领域科学家的关注。澳大利亚莫纳什大学的地质化学家 Joel Brugger 认为这项研究提出了一个关键的机制解释了金从地下高温（500 摄氏度）深部富集到形成次生矿床再扩散到地表过程中生物扰动的重要作用。瑞士 Neuchatel 大学的微生物学家 Saskia Bind-schedler 认为这项研究综合利用地质学、化学以及生物学提出了一个全新的金生物地球化学循环途径。关于真菌影响金以及其他金属元素迁移与富集的研究，在未来的工矿业界也具有潜在的应用价值。

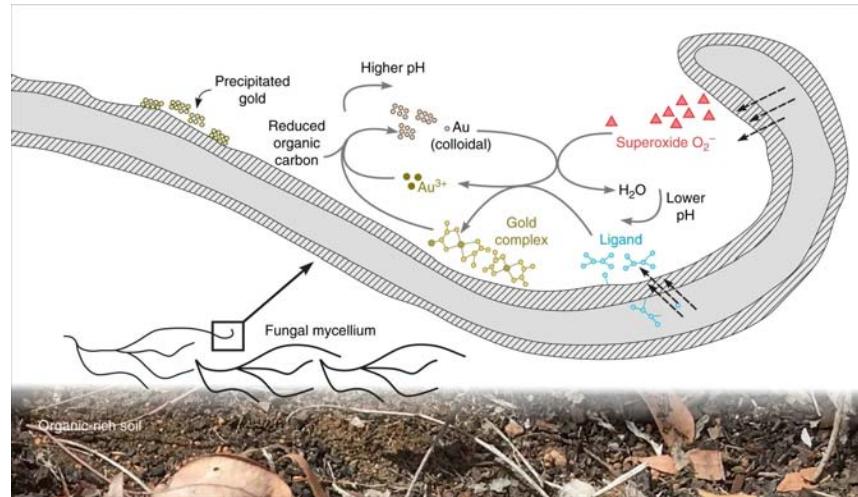


图 2 真菌富集金的氧化还原作用模型 (Bohu et al., 2019)

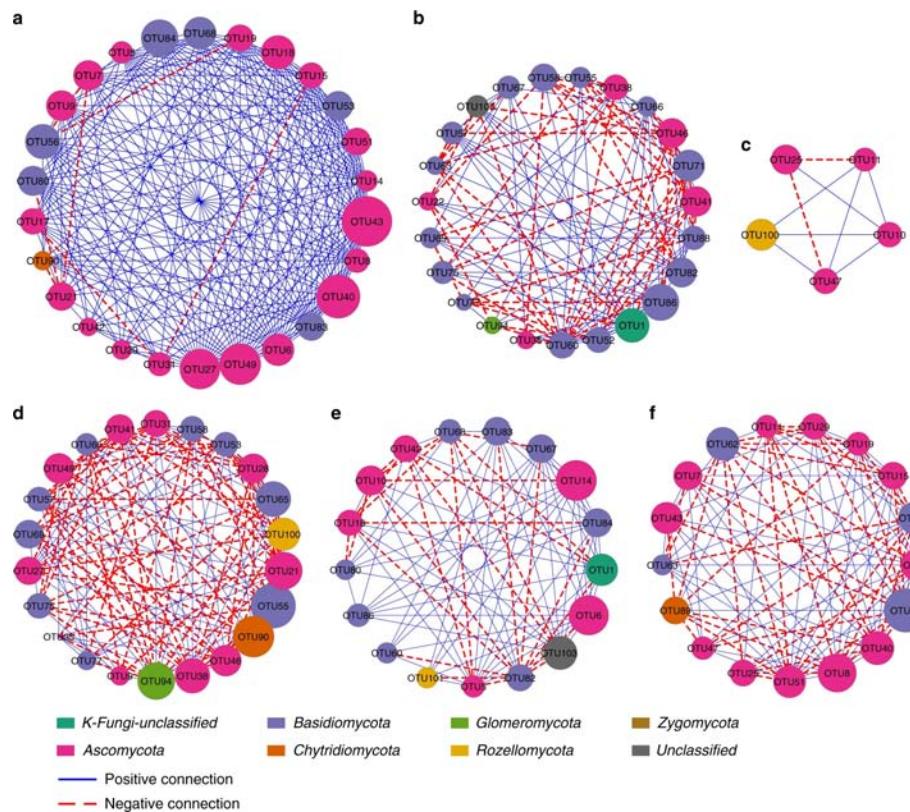


图3 真菌网络。a-c. 富金地区；d-f. 对照地区 (Bohu et al., 2019)

致谢：感谢澳大利亚科学与工业组织矿产资源中心（CSIRO Mineral Resources，

Perth, Western Australia）呼庆博士对本文的完善。

主要参考文献

- Anand R R, Aspandiar M F, Noble R R P. A review of metal transfer mechanisms through transported cover with emphasis on the vadose zone within the Australian regolith[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 73: 394-416. ([链接](#))
- Bohu T, Anand R, Noble R, et al. Evidence for fungi and gold redox interaction under Earth surface conditions[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2290. ([链接](#))
- Eustis S, El-Sayed M A. Why gold nanoparticles are more precious than pretty gold: noble metal surface plasmon resonance and its enhancement of the radiative and nonradiative properties of nanocrystals of different shapes[J]. *Chemical Society Reviews*, 2006, 35(3): 209-217. ([链接](#))
- Hansel C M, Zeiner C A, Santelli C M, et al. Mn(II)oxidation by an ascomycete fungus is linked to superoxide production during asexual reproduction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(31): 12621-12625. ([链接](#))



Reith F, Etschmann B, Grosse C, et al. Mechanisms of gold biomimetic mineralization in the bacterium *Cupriavidus metallidurans*[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(42): 17757-17762. ([链接](#))

Reith F, Rogers S L, McPhail D C, et al. Biomimetic mineralization of gold: biofilms on bacterioform gold[J]. *Science*, 2006, 313(5784): 233-236. ([链接](#))

Southam G, Lengke M F, Fairbrother L, et al. The biogeochemistry of gold[J]. *Elements*, 2009, 5(5): 303-307. ([链接](#))

(撰稿: 毛亚晶 / 矿产室)



PNAS：岩石破裂形成演化动态观测

小 到微观尺度晶粒，大到数百公里尺度的地质断层，岩石的破裂行为无处不在。研究人员通过对微震活动监测发现，在岩石宏观尺寸断裂之前往往有一些前兆破坏：主裂缝形成过程中，其周围岩体会产生大量微震事件，主裂缝与周围岩体相互作用具有明显的时空演化特征（Ben-Zion and Zaliapin, 2019）。研究岩石在地质条件下的破裂演化规律对于评价和预测地球深部断层活动具有重要意义。前人研究主要通过开展室内岩石力学试验并采用扫描电镜（SEM）（Brace et al., 1972）、声发射监测（Lockner et al., 1991）、高清摄影（Tal et al., 2016）等方法对岩石破裂过程进行观测。这些方法对于岩石破裂过程中的信息获取能力有限：声发射法无法捕捉无震应变能释放并且对于破裂位置的定位存在不确定性，扫描电镜、高清摄影则无法得到三维裂缝信息。近年来兴起的在位 CT 扫描试验技术是该研究在试验手段上取得的重大突破，可以动态地观测岩石破裂过程中的裂纹起裂、扩展、连通等行为，从而使得该问题的研究可视化精细化。

挪威奥斯陆大学的 Francois Renard 等人近期在 *PNAS* 上发表了直径 4mm 高 10mm 的二长岩试件在三向应力状态下的在位 CT 扫描**试验成果**：该团队利用欧洲同步辐射光源对 25MPa 围压下三轴压缩试验过程中二长岩试件从加载初始到峰值强度进行了

77 次扫描，并且采用数字体积相关（以下简称 DVC）方法对扫描重构的立体图像进行分析，定量计算裂缝演化过程的散度和旋度指标，弥补了前人研究中对于岩石破裂过程精细化定量描述不足的缺陷。该研究通过定量分析不同加载阶段微裂缝开启、闭合、剪切、聚集贯穿，得出在破裂初始超过 70% 的损伤体积聚集成一个大的裂纹簇并形成断裂带。文中提出非弹性应变通过扩容破裂、收缩破裂、左旋剪切事件和右旋剪切事件进行累积，当轴向应力超过岩石弹性极限后，上述 4 种相互作用类型遍布试样内部，并且不断相互转化，新裂缝的产生伴随着既有裂缝的扩展、开启和闭合。

二长岩试件破裂演化过程及定量分析如图 1 所示。图 1A 中的应力变曲线可分为线弹性、屈服、体积破裂、破坏 4 个阶段。在临近破坏之前，当轴向荷载达到极限荷载 99.23%、99.62%、99.99%，分别进行 CT 扫描，并提取最大的微裂纹簇形貌（图 1A 左下角）。图 1B 为应力达到 99.99% 峰值强度破坏初始时的裂纹形貌，绿色代表最大的微裂纹簇，在其周围环绕着红色的体积较小的微裂纹。文中采用散度来表征微裂缝张开（正值）和闭合（负值），采用旋度来表征微裂缝右旋剪切（正值）和左旋剪切（负值）。4 个指标在不同变形阶段的变化规律如图 1C 所示。此外，对旋度和散度绝对值大于 0.5 的体积微元个数进行

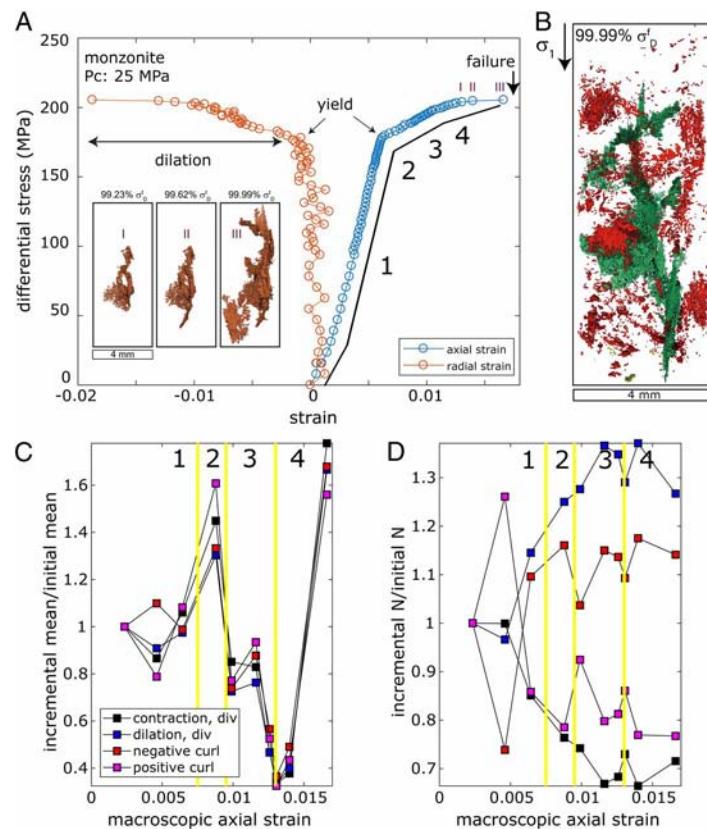


图 1 二长岩试件破裂演化过程及定量分析 (Renard et al., 2019)

统计, 其在 4 个阶段的变化规律如图 1D 所示。由图可知进入屈服阶段后, 岩石内部微裂纹张开、闭合增加近 30%, 当轴向应力由 178MPa 增长至 190MPa 时, 散度和旋度指标均增长 10%, 当轴向应力增长至 205.5MPa 时, 试样发生破坏, 散度和左旋剪切增加 400%。

不同加载阶段微裂纹体积变化及统计特征如图 2 所示, 其中裂纹张开、闭合及总体增长曲线如图 2A 所示, 在主破裂发生前服从幂函数分布, 指数为 0.5。微裂纹体积增量的互补累积分布曲线如图 2B 所示, 其服从指数为 1.7 的幂函数分布。图 2C 为破坏发生前裂纹张开和闭合的空间关系三维图, 蓝色代表散度小于 -0.5 的体积, 红色代表散度大于 0.5 的体积。

该研究成果通过对实验室三轴试验破裂过程中微裂纹动态演化和变形场进行直接高精度 CT 扫描观测和量化的体积相关分析, 显示了张开、闭合、剪切各种微裂纹行为 (产生和不产生微震信号) 对于大型脆性剪切断裂形成的重要性, 并指出了在岩石破坏的数值和力学模型中考虑宏观破坏前损伤发展的必要性。文中采用的试件尺度较小, 只在一定程度上反应原位岩石的动态破裂过程。

在国家自然基金委国家重大科研仪器研制项目的资助下, 中国科学院地质与地球物理研究所于 2018 年成功研制了第一台高能直线加速器 CT 岩石破裂过程试验装置 (见新华网报道), 其允许的试件尺寸可达直径 100 mm、高度 200 mm, 可以在更大

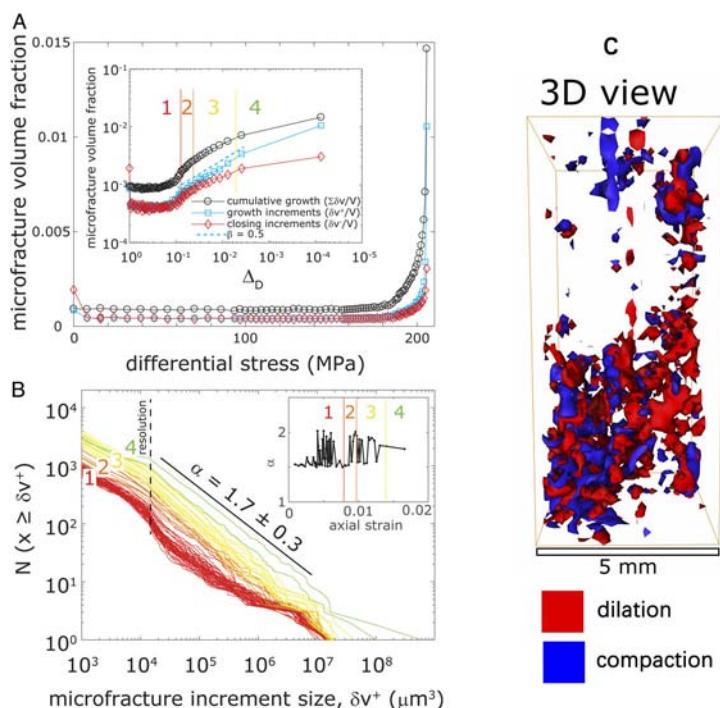


图2 微裂纹增长和分布特征 (改自 Renard et al., 2019)

尺度上对岩石的动态破裂过程进行观测和定量化研究，在页岩油气、煤层气、地热能、可燃冰开发、高放射性核废料地质处

置、二氧化碳封存与利用等新型地质工程，以及军工、航天、材料、机械、无损检测等领域中具有广阔的应用前景。

主要参考文献

- Ben-Zion Y, Zaliapin I. Spatial variations of rock damage production by earthquakes in southern California[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 512: 184-193. ([链接](#))
- Brace W F, Silver E, Hadley K, et al. Cracks and pores: A closer look[J]. *Science*, 1972, 178(4057): 162-164. ([链接](#))
- Lockner D A, Byerlee J D, Kuksenko V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. *Nature*, 1991, 350(6313): 39-42. ([链接](#))
- Renard F, McBeck J, Kandula N, et al. Volumetric and shear processes in crystalline rock approaching faulting[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(33): 16234-16239. ([链接](#))
- Tal Y, Evans B, Mok U. Direct observations of damage during unconfined brittle failure of Carrara marble[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(3): 1584-1609. ([链接](#))

(撰稿：何鹏飞，郭鹏，李晓 / 页岩气与工程室)



PNAS：利用量子传感器探测从地壳到人脑的未知领域

前

沿探索永无止境，对于大到宏观宇宙小到微观原子的未知领域，人类探索的脚步从未停止。19世纪末，正当英国著名物理学家威廉·汤姆生宣告物理学大厦已然全部建成，所剩只是一些修饰工作之时，量子物理学悄然诞生，并在不同学派的争论声中不断发展完善。尽管时至今日其理论体系仍不完备，但随着研究的不断深入，并喷式发展的实用化量子产品，正让人们生活发生着翻天覆地的变化。其中，量子传感器就是一种依据量子力学规律，利用量子效应、量子相干或量子纠缠性质，实现高精度测量的新兴物理装置。量子化无处不在，大到行星，小到细胞，甚至是人类的意识都是可以量子化的，而且量子态具有独特的精度。因此，量子传感器为检测物理场的微小变化开辟了新途径，足以让

我们更清楚地看清脚下的世界，或更深入地洞察人体自身（Battersby, 2019）。

与经典传感器一样，量子传感器由转换信号的敏感元件和处理信号的读出设备两部分组成。不同的是，量子系统状态即量子态的直接测量一般不易实现，需要通过量子控制将被测量按一定的规律转变为便于测量的物理量，进而实现量子态的间接测量。因此，量子控制在量子传感技术领域拥有毋庸置疑的核心地位。如何通过量子控制完成被测量的转换？如何控制量子系统在实验室外不受控制的复杂环境中工作？能否实现量子控制组件的小型化和实用化？针对以上问题，发表在 *Proceedings of the National Academy of Sciences* 杂志上的文章（Battersby, 2019）给出了答案。

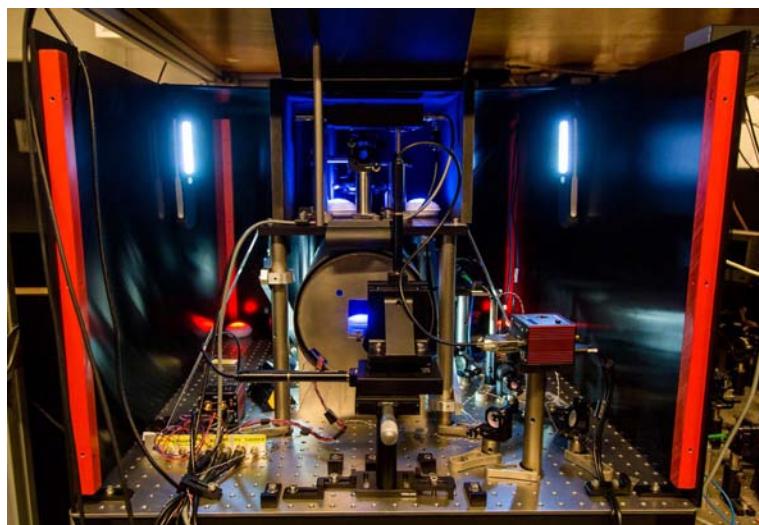


图1 量子铯光泵磁力仪（Battersby, 2019）



英国以伯明翰大学为中心，联合学术界和工业界的相关研究人员，共同成立了量子传感器和计量中心。负责该中心的 Kai Bongs 指出“早期的量子控制系统比较笨重，但量子控制系统正向着小型化、低成本和实用化的方向不断发展”，而且他认为：“目前我们正处在充分控制量子系统的最佳节点”。随着量子控制手段的发展，激光、冷却和磁场等用于执行量子控制的相关组件不断进步。例如，研究人员正在开发紧凑型低功率激光器，用于保存冷原子的大型真空系统与磁阱已被芯片级器件所取代。

因此，研究人员得以更方便地操纵量子态，并观测它们受环境影响的情况，进而进一步促进量子传感器的实用化。其中，用于测量磁场和重力场的量子传感技术得到了长足发展。

(1) 量子磁场传感器

主流量子磁传感器包括超导量子干涉磁力仪 (SQUID)，氮空位 (NV) 金刚石原子磁力计，冷原子磁力计和光泵磁力仪等。如表 1 所示，此类磁传感器按工作机理可划分为量子效应类 (I 类)、量子相干类 (II 类) 和量子纠缠类 (III 类)。

表 1 主流量子磁力仪分类

序号	传感器名称	类型	频带
1	SQUID	量子效应类	DC ~ 10GHz
2	NV 金刚石原子磁力计	量子相干类	DC ~ GHz
3	冷原子磁力计	量子纠缠类	DC ~ 10GHz
4	光泵磁力仪	量子纠缠类	DC ~ 10GHz

SQUID 磁传感器基于磁通量子化和约瑟夫森效应实现磁场测量，属于 I 类量子磁传感器，具有高达地磁场 50 亿分之一的极强磁场检测能力。德国 Yena 研究中心和中国科学院上海微系统与应用技术研究所经过多年研发和技术攻关，先后研制出低温和高温超导量子干涉仪并成功应用于地学探测领域。

氮空位金刚石磁力计的实现来自于固态量子计算领域中的单电子自旋比特的相干操控概念，属于 II 类量子磁传感器。该磁力计可采用纳米晶体作为感应探头，即与被测样品间距可达纳米量级。因此，该磁力计具有较高的空间分辨率，可分辨出少量甚至单个电子自旋以及核自旋产生的微弱磁场，有望实现单分子探测。

冷原子磁力计基于原子自旋实现磁场测量，属于 III 类量子磁传感器。该磁力仪能够突破散粒噪声限制，能够提升磁测精度并增大磁测带宽。

光泵磁力仪 (OPM) 的工作原理是塞曼效应，也属于 III 类量子磁传感器，被广泛应用于航空磁测、海洋监测、地质勘探 (矿产资源开发、考古)、地震预报等领域。此外，OPM 还可以应用于人体生物学检测。2018 年，英国诺丁汉大学尝试将 13 个 OPM 放入一个 3D 打印的头盔中，研发了 MEG 扫描仪样机。扫描仪显示当受试者伸出手指时，大脑运动皮层中存在明显的活动，揭示了大脑运动区在毫秒时间尺度上产生毫米位置变化的全过程。传统的低分辨率脑电图 (EEG) 或核磁成像 (MRI) 只



能观测秒级或更长时间尺度上的大脑活动，因此无法匹敌这种新型组合式量子扫描仪。英国伦敦大学的研究人员计划使用该扫描仪取代脑电图来研究儿童癫痫病。在哥本哈根，Polzik 领导的研究团队最新研发了一款低噪声、高灵敏度量子磁力仪，将磁力仪推向了下一个量子水平。诺丁汉大学的 Kasper Jensen 计划通过量子磁力仪 (Jensen et al., 2018) 观测心跳调节电信号所产生的磁场来监测胎儿心跳。

(2) 量子重力传感器

真空环境中利用激光和磁场捕获、控制冷铷原子的量子态，并测量不同能级位置处的原子比率，即可测得重力场的强度，通过两组处于不同能级的独立原子云分别进行测量即可获取重力梯度。据此，伯明翰大学率先开发了名为 Wee_G 的量子重力仪样机，并于 2018 年成功实现了量子重力梯度仪样机 Gravity-Imager 的测试。2019 年团队进一步将 Wee_G 的重力场测量精度提升至 10^{-9}mGal 数量级。该量子重力仪可用

于探测水下管道，且探测深度有望突破现有技术的数倍以上。目前研究团队正在研发搭载在无人机上的适用于空中测量的小型化重力梯度仪。

在国内，华中科技大学研究团队通过定制先进悬架设计的光学位移传感器，研发了新型量子重力 MEMS 芯片 (Tang et al., 2019)，该芯片的灵敏度高达 $8\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、动态范围高达 8000 mGal 。可知，量子重力 / 重力梯度仪具有高灵敏度和高实时性的优势，有望击败现有传统方法，用于考古遗址扫描、矿产资源探测、火山活动监测、二氧化碳地下安全储存层探寻以及含水层调查等领域。

与传统传感器相比，量子传感器具有非破坏性、实时性、高灵敏性、稳定性和多功能性等优势。未来，随着量子理论及其控制技术的不断发展，量子传感器有望在建设工程、矿产资源、自然灾害探测、引力场测量以及医疗健康等领域取得突出应用，具有广阔的发展空间和应用前景。

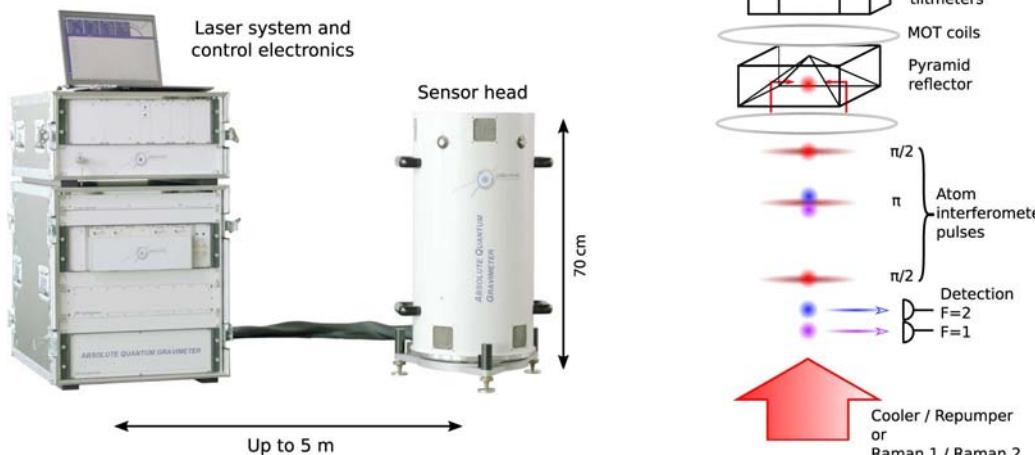


图 2 量子重力仪：左图为 AQG-A01 系统实物图，右图为传感器测量原理图 (Ménoret et al., 2018)



主要参考文献

- Battersby S. Quantum sensors probe uncharted territories, from Earth's crust to the human brain[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(34): 16663-16665. ([链接](#))
- Jensen K, Skarsfeldt M A, Stærkind H, et al. Magnetocardiography on an isolated animal heart with a room-temperature optically pumped magnetometer[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16218. ([链接](#))
- Ménoret V, Vermeulen P, Le Moigne N, et al. Gravity measurements below 10^{-9} g with a transportable absolute quantum gravimeter[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12300. ([链接](#))
- Tang S, Liu H, Yan S, et al. A high-sensitivity MEMS gravimeter with a large dynamic range[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2019, 5: 45. ([链接](#))

(撰稿：王中兴，康利利 / 研发中心)