

田小波, 徐涛. 2026. 俯冲板片中的玄武岩成分异常主导其深部命运[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 57(1): 126-128. doi: 10.19975/j.dqyx.2025-018.

Tian X B, Xu T. 2026. Basaltic compositional anomalies govern the deep fate of subducted slabs[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 57(1): 126-128 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyx.2025-018.

俯冲板片中的玄武岩成分异常主导其深部命运

田小波^{1*}, 徐涛²

1 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院地质与地球物理研究所 深层油气理论与智能勘探开发重点实验室, 北京 100029

doi: 10.19975/j.dqyx.2025-018

中图分类号: P315

文献标识码: A

近期杨旭松等在 Nature 期刊上发表论文 (Yang et al., 2025), 通过小安的列斯俯冲带下方地幔过渡带的接收函数研究, 发现地幔过渡带中存在玄武岩的局部堆积, 并首次揭示了大洋岩石圈内部成分不均一性地幔过渡带成分非均一性的重要贡献. 低密度的板内玄武岩异常为俯冲板片在地幔过渡带滞留提供了浮力, 该研究对理解俯冲板片的深部运移过程具有重要启示意义.

地幔对流如同地球内部的“循环系统”, 不断将浅表物质输送至深部, 又将深部物质带回地表, 从而实现地球的“散热”. 这一过程对地球长期演化至关重要——它驱动并维持着板块构造的运行, 同时承载着深部挥发物的循环, 在亿万年尺度上稳定了地球的大气、水圈与气候环境, 为生命的孕育与延续提供了基础保障. 在这一过程中, 地幔过渡带被视为“地幔对流的守门员”: 当俯冲板片从上地幔进入地幔过渡带时, 既可能继续下沉至下地幔, 也可能停滞于此 (Goes et al., 2017). 控制这一过程的因素众多, 其中之一便是地幔过渡带物质成分的非均一性 (Goes et al., 2022). 近年来, 地震学研究逐渐揭示出地幔过渡带底部存在广泛的玄武岩富集, 且主要集中在现代俯冲带附近 (Tauzin et al., 2022; Yu et al., 2023). 这些玄武岩通常被认为是俯冲洋壳在与岩石圈板片分离后, 在地幔过渡带中堆积形成的 (Feng et al., 2021; Tauzin et al., 2022). 然而, 海洋地壳与岩石圈板片的分离过程本身并不容易, 且现今俯冲洋壳的规模也难以完全

解释这些广泛的玄武岩异常 (Tauzin et al., 2022), 其来源及与俯冲动力学的关系仍存在诸多未解之处.

尽管传统观点认为海洋板片主要由玄武质洋壳叠置于亏损的大洋岩石圈 (不含玄武岩) 之上, 但实际上, 海洋岩石圈内部同样存在成分异常. 例如, 在胡安·德·富卡板块和太平洋板块内部, 地震成像揭示了冻结的熔融侵位体 (frozen melt sills) (Qin et al., 2020). 此外, 近年来的地震学与大地电磁成像研究也在年轻和老旧海底下方的岩石圈-软流圈边界处观测到了熔融通道 (melt channels) (Naif et al., 2013; Stern et al., 2015). 特别是在大西洋这样的慢速扩张洋脊区域, 岩浆供应与积累在时空上表现出更强的变化性 (Sim et al., 2020). 为了探究板片内部成分异常对地球深部成分结构及俯冲行为的影响, Yang 等 (2025) 利用“小安的列斯群岛挥发分循环过程研究计划” (Project VoiLA: Volatile Recycling in the Lesser Antilles) 部署的大量海底地震仪观测数据, 对大西洋俯冲带下方地幔过渡带的结构进行了系统成像.

Yang 等 (2025) 采用远震接收函数成像技术, 在小安的列斯俯冲带下方识别出异常加深 (>700 km) 的 660 界面 (即地幔过渡带底边界) (图 1a). 通常情况下, 660 界面的深度变化由林伍德石 (Ringwoodite) 的相变主导, 反映不同温度条件下的相变压力 (Ishii et al., 2018). 然而在该区域, 660 界面的深度已超出林伍德石相变所能解释的范围, 更合理的解释是该界面由石榴子石的相变主导 (图 1c).

收稿日期: 2025-04-14; 录用日期: 2025-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42030308)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42030308)

*通信作者: 田小波, 男, 研究员, 主要从事壳幔结构与性质的研究. E-mail: txb@mail.iggcas.ac.cn



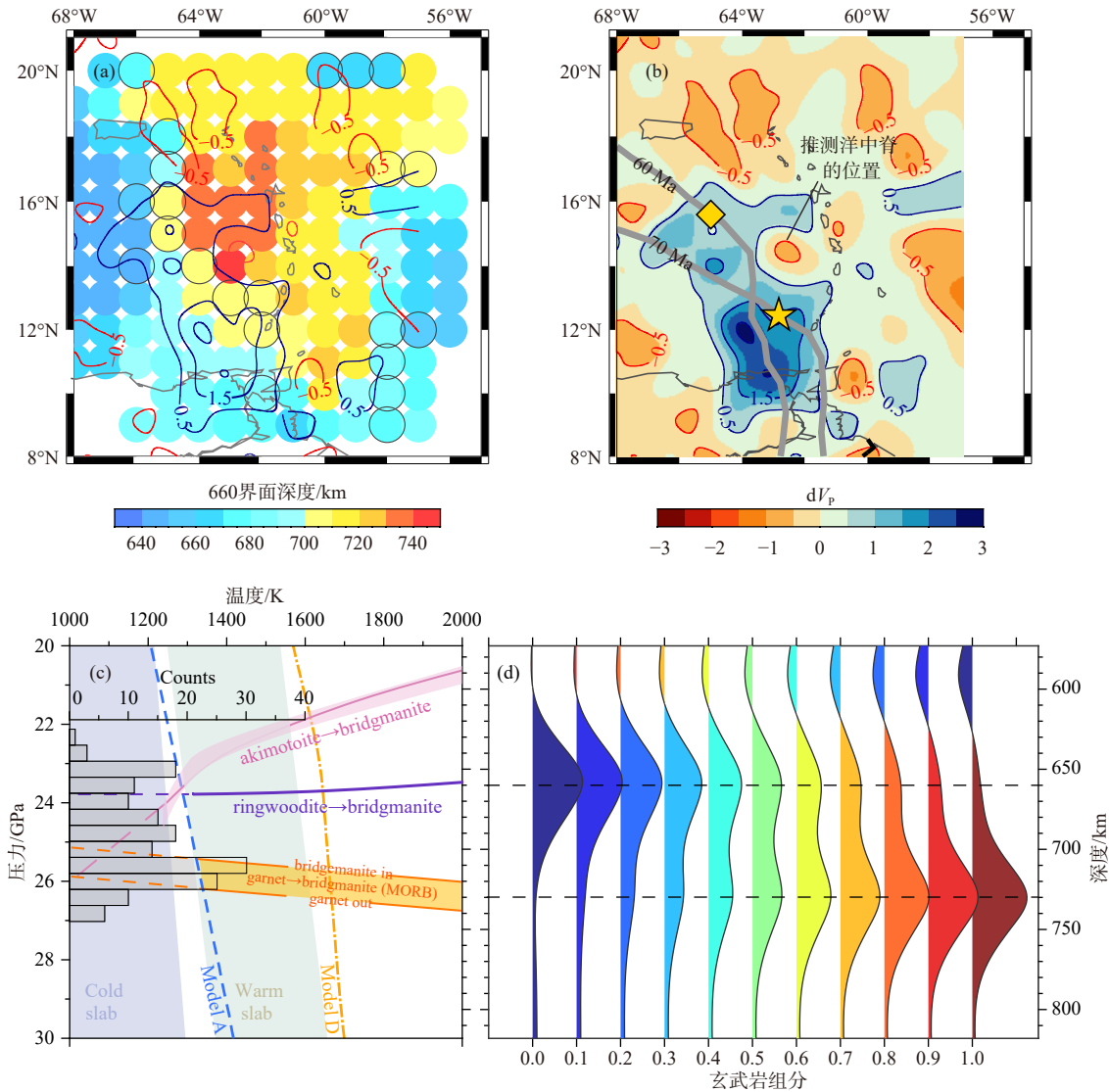


图 1 (a) 小安的列斯俯冲带下方 660 界面深度分布; (b) 地幔过渡带底部速度扰动, 高速体代表俯冲的板片, 夹在其中的低速体被解释为俯冲的洋中脊残留结构 (Braszus et al., 2021); (c) 660 界面深度统计与预测的矿物相变边界对比; (d) 基于不同玄武岩组分的接收函数模拟结果. 图 b 中的灰色等值线表示构造重建的俯冲板片位置, 黄色方块和星号表示构造重建预测的俯冲洋中脊位置 (Braszus et al., 2021). 图 c 中蓝色和橙色虚线分别表示热动力学模拟中小安的列斯俯冲带的冷 (Model A) 与热 (Model D) 地温剖面的上限与下限. 林伍德石 (ringwoodite) 和秋本石 (akimotoite) 的相变边界来自 Chanyshv et al. (2022). 石榴子石 (garnet) 的相变界面数据参考 Hirose (2002)

Fig. 1 (a) Depth variations of the 660 discontinuity beneath the Lesser Antilles subduction zone; (b) Shear velocity anomalies near the base of the mantle transition zone, where high-velocity anomalies represent subducted slabs and intervening low-velocity anomalies are interpreted as remnants of subducted mid-ocean ridges (Braszus et al., 2021); (c) Comparison between observed 660 discontinuity depths and predicted phase boundaries; (d) Receiver function modeling results for different basaltic compositions. In Fig. b, gray contours indicate the reconstructed slab positions, and yellow squares and stars mark the predicted locations of subducted mid-ocean ridges based on tectonic reconstructions (Braszus et al., 2021). In Fig. c, blue and orange dashed lines represent the upper and lower bounds of thermal profiles for the Lesser Antilles slab, based on thermodynamic modeling of cold (Model A) and warm (Model D) subduction geotherms, respectively. The phase boundaries for ringwoodite (Rw) and akimotoite (Ak) are from Chanyshv et al. (2022), and the garnet (Gt) phase boundary is from Hirose (2002)

考虑到在该区域的温度状态下, 由石榴子石相变主导 660 界面需要较高的玄武岩含量 (图 1d), 因此这一异常深度本质上反映了地幔过渡带中存在显著的玄武岩富集.

更为引人注目的是, 这些玄武岩富集的分布位置, 并未如传统“堆积洋壳”模型所预测那样出现

在板片前缘, 而是位于俯冲板片及其后方区域, 与此前研究提出的“俯冲洋中脊”位置高度吻合 (Braszus et al., 2021) (图 1b). 研究推测, 大量玄武质岩浆可能在洋中脊附近冻结并嵌入岩石圈 (Sim et al., 2024), 随后随板块一同俯冲进入地幔过渡带, 导致了局部的玄武岩富集. 此外, 由于

在地幔过渡带底部,玄武岩相较于周围地幔岩密度更低 (Ballmer et al., 2015), 因此当俯冲板块中存在大量玄武岩异常时, 其继续下沉至下地幔的能力将显著受限。而板片在过渡带中的滞留, 会进一步促进玄武岩的局部堆积。

此前, 石榴子石相变控制的 660 界面仅在热点地区有所报道 (Jenkins et al., 2016), 而此次在相对较冷的俯冲带首次观测到该机制, 具有重要意义。研究结果表明, 由洋中脊活动或其他构造过程引发的大洋岩石圈内部成分不均一性, 能够在板片深俯冲过程中持续发挥影响, 不仅影响了地幔过渡带的成分结构, 也深刻影响了俯冲板片的深部运移过程。

致谢

感谢编辑部的约稿以及出版过程中的大力帮助, 感谢杨旭松提供图件并审阅该篇评述。

References

- Ballmer M D, Schmerr N, Nakagawa T, Ritsema J. 2015. Compositional mantle layering revealed by slab stagnation at ~1000-km depth[J]. *Science Advances*, 1: e1500815.
- Braszus B, Goes S, Allen R W, et al. 2021. Subduction history of the Caribbean from upper-mantle seismic imaging and plate reconstruction[J]. *Nature Communications*, 12: 4211.
- Chanyshev A, Ishii T, Bondar D, et al. 2022. Depressed 660-km discontinuity caused by akimotoite–bridgmanite transition[J]. *Nature*, 601: 69-73.
- Feng J, Yao H, Wang Y, et al. 2021. Segregated oceanic crust trapped at the bottom mantle transition zone revealed from ambient noise interferometry[J]. *Nature Communications*, 12: 2531.
- Goes S, Agrusta R, van Hunen J, Garel F. 2017. Subduction-transition zone interaction: A review[J]. *Geosphere*, 13: 644-664.
- Goes S, Cottaar S, Deuss A, Haugland S. 2022. Compositional heterogeneity in the mantle transition zone[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3: 533-550.
- Hirose K. 2002. Phase transitions in pyrolitic mantle around 670-km depth: Implications for upwelling of plumes from the lower mantle[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4): 2078.
- Ishii T, Kojitani H, Akaogi M. 2018. Phase relations and mineral chemistry in pyrolitic mantle at 1600–2200 °C under pressures up to the uppermost lower mantle: Phase transitions around the 660-km discontinuity and dynamics of upwelling hot plumes[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 274: 127-137.
- Jenkins J, Cottaar S, White R, Deuss A. 2016. Depressed mantle discontinuities beneath Iceland: Evidence of a garnet-controlled 660 km discontinuity?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 159-168.
- Naif S, Key K, Constable S, Evans R L. 2013. Melt-rich channel observed at the lithosphere–asthenosphere boundary[J]. *Nature*, 495: 356-359.
- Qin Y, Singh S C, Grevemeyer I, et al. 2020. Discovery of flat seismic reflections in the mantle beneath the young Juan de Fuca Plate[J]. *Nature Communications*, 11: 4122.
- Sim S J, Spiegelman M, Stegman D R, Wilson C. 2020. The influence of spreading rate and permeability on melt focusing beneath mid-ocean ridges[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 304: 106486.
- Sim S J, Yu T Y, Havlin C. 2024. Persistent heterogeneities in the oceanic lithosphere due to differential freezing beneath ridges[J]. *Geophysical Research Letters*, 51: e2024GL109440.
- Stern T A, Henrys S A, Okaya D, et al. 2015. A seismic reflection image for the base of a tectonic plate[J]. *Nature*, 518: 85-88.
- Tauzin B, Waszek L, Ballmer M, et al. 2022. Basaltic reservoirs in the Earth's mantle transition zone[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119: e2209399119.
- Yang X, Xie Y, Rychert C A, et al. 2025. Seismic imaging of a basaltic Lesser Antilles slab from ancient tectonics[J]. *Nature*, 640: 697-701. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08754-0>.
- Yu C, Goes S, Day E A, et al. 2023. Seismic evidence for global basalt accumulation in the mantle transition zone[J]. *Science Advances*, 9: eadg0095.