

侯爵,潘佳铁,李永华等. 2023. 华北克拉通中西部地壳 S 波速度结构及其地质意义. 地球物理学报, 66(5):1960-1975, doi: 10. 6038/cjg2022Q0287.

Hou J, Pan J T, Li Y H, et al. 2023. Crustal S-wave velocity structure in the western and central North China Craton and its geological significance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 66(5):1960-1975, doi:10. 6038/cjg2022Q0287.

华北克拉通中西部地壳 S 波速度结构及其地质意义

侯爵^{1,2,3}, 潘佳铁¹, 李永华^{1*}, 武振波⁴, 俞贵平⁵, 徐涛^{2,6}

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 成都理工大学地球物理学院, 成都 610059

5 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004

6 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

摘要 华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一. 我们利用布设于华北中部的 ChinArray 计划 461 个宽频带地震台阵的连续波形资料, 基于背景噪声成像技术, 获得了克拉通中西部 5~45 s 的 Rayleigh 波群速度频散曲线, 并利用线性反演方法获得了研究区地壳上地幔顶部的 S 波速度结构. 密集流动地震台阵使我们能够揭示研究区精细的地壳上地幔顶部速度变化, 以深入探讨华北克拉通中西部深部结构及其对岩浆和地震的控制作用. 8 km 深度的 S 波速度切片显示低速与高速异常分别与地表的盆地和山脉对应良好. 不同经度和纬度方向的 S 波速度剖面均表明, 西部克拉通地壳大致可以分为上、中、下地壳三层. 克拉通西部鄂尔多斯块体的下地壳 S 波速度介于 3.7~3.8 km·s⁻¹, 暗示其下地壳以长英质岩石为主. 大同火山区下方的 S 波低速异常从中地壳延伸至上地幔顶部, 推测源自软流圈的地幔热流提供了近垂直的主干上涌通道, 并控制了该区新生代岩浆活动. 强震集中分布在上地壳高速体内部或高低速相间区, 其下地壳乃至上地幔顶部都呈现明显的低速异常, 推测源自上地幔/下地壳的深部热流沿地壳尺度的陡深断裂上侵, 诱发上覆高应力刚性块体发生蠕动破裂与应力释放, 进而诱发大震.

关键词 华北克拉通; 地壳结构; 中部造山带; 背景噪声; 孕震背景

doi:10. 6038/cjg2022Q0287

中图分类号 P315

收稿日期 2022-04-25, 2022-11-01 收修定稿

Crustal S-wave velocity structure in the western and central North China Craton and its geological significance

HOU Jue^{1,2,3}, PAN JiaTie¹, LI YongHua^{1*}, WU ZhenBo⁴, YU GuiPing⁵, XU Tao^{2,6}

1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2 State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

5 College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

6 Innovation Academy for Earth Science, CAS, Beijing 100029, China

Abstract The North China Craton (NCC) is one of the oldest cratons in the world. In order to study the deep structure in the central and western parts of the NCC and its control on magma

基金项目 国家自然科学基金(U1839210, 91755215, 42174077, 41874065)和王宽城教育基金(GJTD-2019-04)联合资助.

第一作者简介 侯爵,男,1989年生,副研究员,主要研究方向为地震学. E-mail: houjue@cea-igp.ac.cn

*** 通讯作者** 李永华,男,1975年生,研究员,主要研究方向为地震学. E-mail: lyhgeomag@sina.com

and earthquakes, we derive a new high-resolution 3-D shear wave velocity model of the central and western NCC crust and uppermost mantle using ambient noise tomography. The cross-correlation of vertical-component continuous noise recordings from 461 temporary seismic stations belonging to the ChinArray project provides Rayleigh wave group velocity dispersions in the period range 5~45 s. These dispersion data at each model grid are inverted to obtain 1D shear-wave velocity models, and then construct a pseudo-3-D model of crustal and uppermost mantle. The dense path coverage allows us to examine lateral variations of shear wave velocity structure in unprecedented detail, shedding new light on the deep structure and its impacts on magma activities and earthquakes. Our velocity model at depth of 8 km show that surface basins and mountains are characterized with low-velocity and high-velocity anomalies, respectively. The S-wave velocity profiles in different longitude and latitude directions show that the crust of the western craton can be roughly divided into upper, middle and lower crust. The S-wave velocity in the lower crust of the Ordos block ranges between 3.7 and 3.8 km · s⁻¹, suggesting that the lower crust is dominated by felsic rocks. The low S wave velocity anomaly below the Datong volcanic area extends from the middle crust to the uppermost mantle, implying that the upwelling mantle provides a near-vertical channel and controls the formation and development of Cenozoic magmatism in this area. The strong earthquakes are concentrated in the interior of the high-velocity bodies, or alternating regions of high and low velocities in the upper crust, and the middle-to-lower crust is characterized with low velocity, implying that creep rupture and stress release of stressed rigid blocks associated with the deep heat flow of the uppermost mantle/lower crust are the deep causes of large earthquakes.

Keywords North China Craton; Crustal structure; Central orogenic belt; Ambient noise; Seismogenic background

0 引言

克拉通是形成于前寒武纪的大陆块体,通常具有巨厚的低温、低密度且难熔的岩石圈根,在地质史上长期保持稳定(Carlson et al., 2005). 华北克拉通是世界上最古老的克拉通,中生代以来该克拉通岩石圈遭受了强烈的改造与破坏(朱日祥等, 2011). 华北克拉通破坏的空间范围、深部过程和发育机制研究已取得重大进展,但尚存争议(Chen et al., 2008, 2009; Chen, 2010; 朱日祥等, 2012; 朱日祥和徐义刚, 2019). 与华北东部克拉通相比,其西部克拉通研究相对薄弱. 业已发现,华北克拉通西部比东部有着较弱的改造程度,目前仍残留较厚的岩石圈,同时具有较低的大地热流值(Hu et al., 2000). 以鄂尔多斯地块为核心,其深部保留 200 km 厚的岩石圈根,周缘的银川—河套和陕西—山西裂陷区岩石圈已显著减薄(<100 km),并伴有强烈的新生代岩浆活动(Xu et al., 2004; Chen et al., 2008, 2009; Chen, 2010),发育环鄂尔多斯活动地震带(王

椿镛等, 2016, 2017). 这些观测结果反映:华北克拉通东部与西部具有不尽相同的构造发育历史、较大的深部结构差异和不同的岩石圈减薄机制. 然而,目前对西部陆块的深部结构探测资料还相对有限,制约了对上述问题的深入认识和理解.

环鄂尔多斯地震带是中国大陆地震带之一,多数 $M > 7$ 的大地震主要发育在银川—河套和汾渭地堑(王椿镛等, 2017),受张性和张扭性断裂控制(Ren et al., 2002). 以大同火山群为代表的新生代火山活动主要集中于上述两个断陷带交汇部位,部分向南沿太行山脉断续发育(汤艳杰等, 2006). 增进对这些地震与火山的孕育背景和发育机制的理解,探索大震孕震环境和深部过程,迫切需要更系统、更清晰地揭示鄂尔多斯地块及其周缘地区的深部结构特征.

李清河等(1999)较早研究了鄂尔多斯西缘和西南缘地区的深部结构特征,并探讨了区内大震孕震环境和深部动力学过程. 近年来,前人又利用远震体波成像(Zhao et al., 2009)、背景噪声和地震面波成像(Bao et al., 2013; Li S L et al., 2018; Ai et al.,

2019a, b; Xu et al., 2020; 窦立婷等, 2021; 刘靖等, 2021; 黄翔等, 2021, 2022; Li M K et al., 2022)、接收函数(Chen et al., 2008, 2009; Shi et al., 2014; Wang et al., 2017; Li et al., 2021)和人工地震反射(赵金仁等, 2006; 李松林等, 2011; 阮小敏等, 2011; 张永谦等, 2011; Tian and Zhao, 2011; Jia et al., 2014; 许林斌等, 2017; Yin et al., 2017; Wang et al., 2019)等手段, 进一步揭示了该区深部结构的总体特征或一些局部区域的高分辨率结构。

本文针对西部克拉通深部结构及新生代火山地震的深部环境问题, 开展了基于背景噪声的面波群速度层析成像研究, 期望对认识和理解上述问题

有所启迪。

1 地质背景

图 1 展示了华北克拉通简要构造格架。克拉通基底由三个太古宙微陆块(即, 东部陆块、阴山地块和鄂尔多斯地块)和两个早元古宙碰撞造山带或构造活动带(即, 孔兹岩带和华北中部带)构成。阴山碰撞带(孔兹岩带)位于鄂尔多斯地块北缘, 是一条近东西向展布、长达 1000 km 的早元古宙碰撞型造山带(Wilde and Zhao, 2005), 其变质作用显示等温降压型顺时针演化特征, 反映阴山地块与鄂尔多斯地

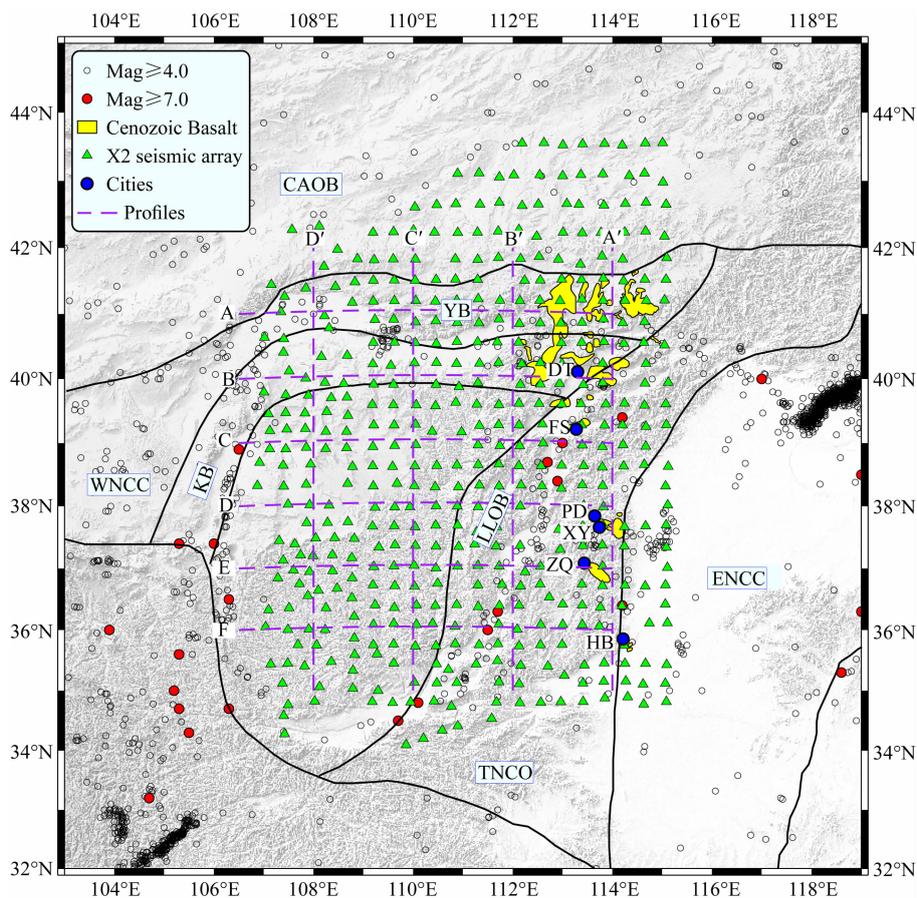


图 1 研究区简要构造格架与地震台站分布图

绿色三角形表示宽频带地震台站; 黑色实线表示华北克拉通边界及内部块体分界; 紫色虚线表示本文所截取的速度剖面位置; 红色圆点表示历史上发生的 7 级以上地震; 黑色圆圈表示 4 级以上地震, 时间范围为 1977—2012 年; 淡黄色区域代表新生代玄武岩(汤艳杰等, 2006); 蓝色圆点代表分布有玄武岩的地名。LLOB: 吕梁造山带; WNCC: 华北克拉通西部块体; TNCO: 华北克拉通中部造山带; ENCC: 华北克拉通东部块体; CAOB: 中亚造山带; KB: 孔兹岩带; YB: 阴山块体; DT: 大同; FS: 繁峙; PD: 平定; XY: 昔阳; ZQ: 左权; HB: 鹤壁。

Fig. 1 Sketch of tectonic background and distribution map of seismic stations in the study area

Green triangles represent broad-band seismic stations; Black solid lines represent the boundaries of the North China Craton and internal block boundaries; Purple dashed lines represent the location of the velocity slices; Red circles represent historical earthquakes of magnitude 7 or above; Black circles represent earthquakes above $M4$ in the time range of 1977—2012; Yellow areas represent Cenozoic basalts (Tang et al., 2006); Blue circles represent the cities with basalt distribution. LLOB: Lüliang Orogenic Belt; WNCC: Western North China Craton Block; TNCO: Central North China Craton Orogenic Belt; ENCC: Eastern North China Craton Block; CAOB: Central Asian Orogenic Belt; KB: Kunzite Belt; YB: Yinshan Block; DT: Datong; FS: Fanzhi; PD: Pingding; XY: Xiyang; ZQ: Zuoquan; HB: Hebi.

块于 1.95 Ga 发生陆-陆碰撞拼合形成克拉通西部陆块的构造演化过程(赵国春, 2009). 中部造山带(Trans-North China Orogen, TNCO)位于鄂尔多斯地块东缘, 是一条介于东部陆块与西部陆块之间的早元古宙活动带, 其变质岩系演化均以顺时针 $P-T$ 轨迹为特征, 并且多具有等温降压演化过程, 反映西部陆块与东部陆块于 1.85 Ga 发生陆-陆碰撞拼合, 形成华北克拉通统一基底(赵国春, 2009).

鄂尔多斯地块是克拉通西部陆块的主体和核心, 被上述两条早元古宙造山带及叠加其上的新生代银川—河套和山西—陕西断陷系围限. 鄂尔多斯地块具有太古代变质基底, 中生代发育内陆河湖相沉积盆地, 并显示西部坳陷东部斜坡构造格局(陈刚等, 2007). 银川—河套断陷系发育在太古界的乌拉山群及下元古界阿拉善群变质基底之上, 主要由一系列新生代箕状断陷盆地构成, 该断陷系是我国西部地震活动区之一. 除公元前 7 年河套大地震和公元 849 年包头西 6 级地震外, 1976 年以来发生 5 级以上地震 7 次, 集中在阿拉善左旗、包头、丰镇、五原和林格尔等地(杨彦明等, 2016). 山西—陕西断陷系形成于上新世, 由一系列新生代断陷盆地组成, 自北东向南西依次为延庆—怀来、蔚县、大同一阳原、灵丘、忻州—定襄、太原、临汾、运城、灵宝、渭河等十个盆地, 受北东向雁行式剪切拉张破裂断陷带所控制(李树德, 1997; 张世民等, 2000). 山西—陕西断陷系也是我国大陆强震活动带之一. 有史记载以来共发生 8 级地震 2 次, 7~7.9 级地震 6 次, 6~6.9 级地震 26 次. 其中, 7 级以上大震重复发生在忻定盆地、灵丘盆地、临汾盆地和渭河—运城—灵宝三盆地的结合部位(张世民等, 2000).

2 数据与方法

本文利用中国地震科学台阵探测项目(ChinArray)第二期部分台站和第三期一阶段在华北中西部布置的宽频流动台阵(图 1)连续波形数据(黄翔等, 2021; 刘靖等, 2021), 开展了基于背景噪声的面波群速度层析成像. 该台阵布设于 2016 年 11 月至 2019 年 1 月, 统一采用 CMG-3T 地震计(频带: 50 Hz~120 s)和 Reftek 数据采集器, 平均台间距~30 km. 该台阵主要覆盖了华北克拉通西部陆块(鄂尔多斯块体)东部(WNCC)、东部陆块西部(ENCC)、中部造山带(TNCO)以及中亚造山带南部(CAOB), 大致在 34°N—44°N 和 109°E—115°E 之间.

2.1 数据预处理

本文基于图 1 中宽频带地震台站的垂向连续波形记录, 采用互相关算法提取 Rayleigh 面波信号. 在进行互相关之前, 参照 Bensen 等(2007)提出的处理流程对台站资料进行了预处理, 主要包括: 连续波形重采样至 1 Hz、去均值、去线性趋势、去仪器响应、Butterworth 带通滤波(5~50 s)、基于滑动平均的时间域归一化和频谱白噪化等处理. 经上述预处理后, 将每个台站的垂向连续记录截取为一天的数据段, 然后不同台站的记录之间进行互相关计算, 再将同一台站对不同天的互相关结果在时域叠加, 获得该台站对的高信噪比叠加互相关波形. 最后, 为进一步提高波形数据信噪比, 将每个台站对的叠加互相关函数进行倒序后再与其本身叠加, 从而实现互相关波形中“正负分支”相加, 获得关于延迟时刻为零处左右对称的互相关波形. 图 2 展示了部分 5~50 s 带通滤波后的 NCFs(背景噪声互相关函数), 可见清晰的地震面波信号.

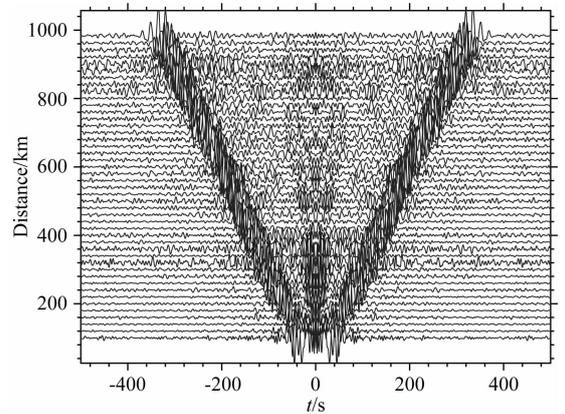


图 2 对称叠加后的背景噪声互相关函数波形(5~50 s)
Fig. 2 NCFs symmetrically stacked based on ambient noise cross-correlations with frequency band 5~50 s

2.2 提取群速度频散曲线

以上述过程获得的不同台站对的高信噪比叠加互相关波形为基础, 采用基于连续小波变换的时频分析方法(Wu et al., 2009)提取了群速度频散曲线. 为了保障此过程中提取出可靠的频散曲线, 要求台站对间距大于 2 倍波长且波形信噪比大于 5, 最终获得了周期 5~45 s 的 Rayleigh 波群速度频散曲线, 如图 3a 所示, 灰线为全部的混合路径频散曲线, 黑色实线为平均频散曲线. 图 3b 展示了不同周期对应的测量数目, 周期 16 s 的频散曲线数量最多, 近 4 万条; 周期 45 s 的频散曲线数量最少, 约 3000 条.

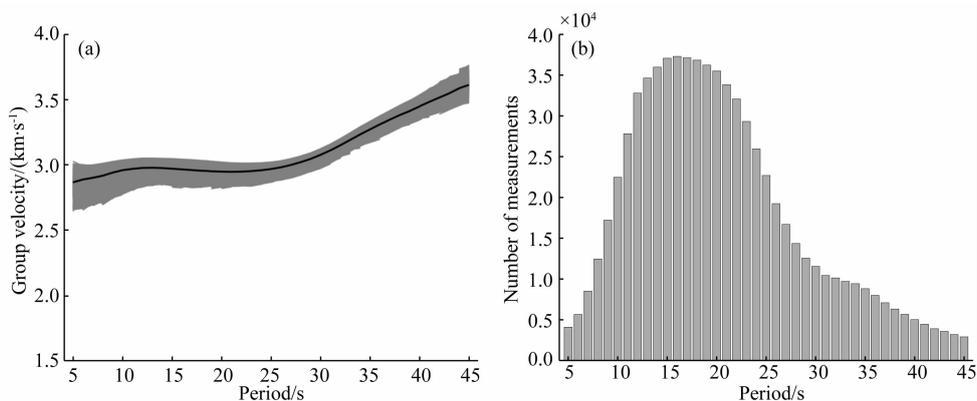


图3 (a) 周期 5~45 s 的 Rayleigh 波群速度频散曲线; (b) 不同周期的频散曲线数量统计

Fig. 3 (a) Rayleigh wave group velocity dispersion curves with period 5~45 s;

(b) The number of dispersion curves for different periods

2.3 2D 群速度层析成像

由上述过程提取的频散曲线,是台站对之间面波传播路径上介质速度结构的平均响应,因此称之为混合路径频散曲线.接下来,将研究区域进行网格化划分,网格间距设为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,进一步利用 Barmin 等(2001)提出的线性反演方法将混合路径频散曲线反演到每个网格点上,获得不同网格点处反映其深度方向介质结构的纯路径频散曲线.群速度成像结果主要受阻尼系数(α)、路径密度(β)和空间平滑因子(σ)等因素控制,其中参数 α 和 σ 决定着模型的平滑程度,增大 α 或减小 σ 都会使图像变得平滑.模型越光滑,误差越小,但分辨率越低.反之,模型分辨率越高,误差也越大. β 控制初始模型比重,其值取决于研究区射线密度和方位分布.本研究通过反复测试,最终确定了合适的阻尼系数值($\alpha=500, \beta=1, \sigma=100$)来获得最终的 2D 群速度分布图(图 5).

2D 群速度反演的同时,我们对成像结果的分辨率也进行了测试.图 4 显示了 8 s 和 30 s 周期的 Rayleigh 波群速度图的相应分辨率,由图可以看出本研究不同周期群速度频散分辨尺度都在 50~100 km 范围内.成像分辨率一般依赖于射线密度和方位,不同周期的射线路径分布特征大致相同,射线在研究区中央覆盖密集,交叉充分,边缘区域射线较少,成像分辨率也低,相应的分辨尺度也变大.

图 5 展示了反演获得的 Rayleigh 波群速度不同周期水平切片图.一般而言,面波周期越小,穿透地下介质越浅.本研究获得的 Rayleigh 波群速度频散与黄翔等(2021)采用同一台阵数据获得的相速度频散具有很好的对应性.周期 5 s 的群速度分布特征与研究区域内的地表构造单元对应吻合,山西断

陷带内阳原盆地、忻县盆地、太原盆地、运城盆地以及陕西渭河盆地均呈现明显的低速特征,而其两侧吕梁造山带和太行造山带则表现为高速;鄂尔多斯块体东部(WNCC,即华北克拉通西部块体)也表现为低速,而其北部阴山造山带呈现为高速.随着周期增大,面波穿透深部介质越多,更多反映了地壳一定厚度范围内介质结构的平均效应.周期 30 s 的群速度一定程度上反映了中下地壳的介质结构特征.周期 45 s 的群速度在大同火山区下方表现为低速异常.

2.4 S 波速度结构反演

经群速度反演后,已获得了每个网格点下方的纯路径群速度频散曲线.本文基于 CPS330 程序包(Herrmann, 2013),采用迭代阻尼最小二乘反演方法,把每个网格点的纯路径频散信息反演为 1D 横波速度结构.正如前面图 3 所示,受台站间距和数据信噪比影响,长周期群速度频散值数量明显偏少,造成对下地壳和莫霍面附近介质结构的分辨能力有限.为了克服该问题,本文综合 Shen 等(2016)获得的该研究区域内的相速度频散曲线进行联合反演,以更好约束地壳深度的速度结构.基于地震面波频散反演 S 波速度是典型的非线性问题,因此合适的初始模型将大大降低反演的非唯一性.本文研究中以 Shen 等(2016)的反演结果作为初始模型,0~20 km 深度范围内的层厚设为 2 km,20~60 km 深度范围内的层厚设为 5 km.由于面波频散主要对 S 波速度敏感,我们仅通过使用恒定波速比(地壳波速比为 1.73)根据 V_s 和波速比折算 V_p ,密度则根据 P 波速度与密度的经验关系(Brocher, 2005)转换给出.研究中使用了差分反演,该方案抑制了相邻层间速度的差异.在反演过程中,我们首先在最初的两次迭代中使用稍高的阻尼值 10,然后在接下来的 20

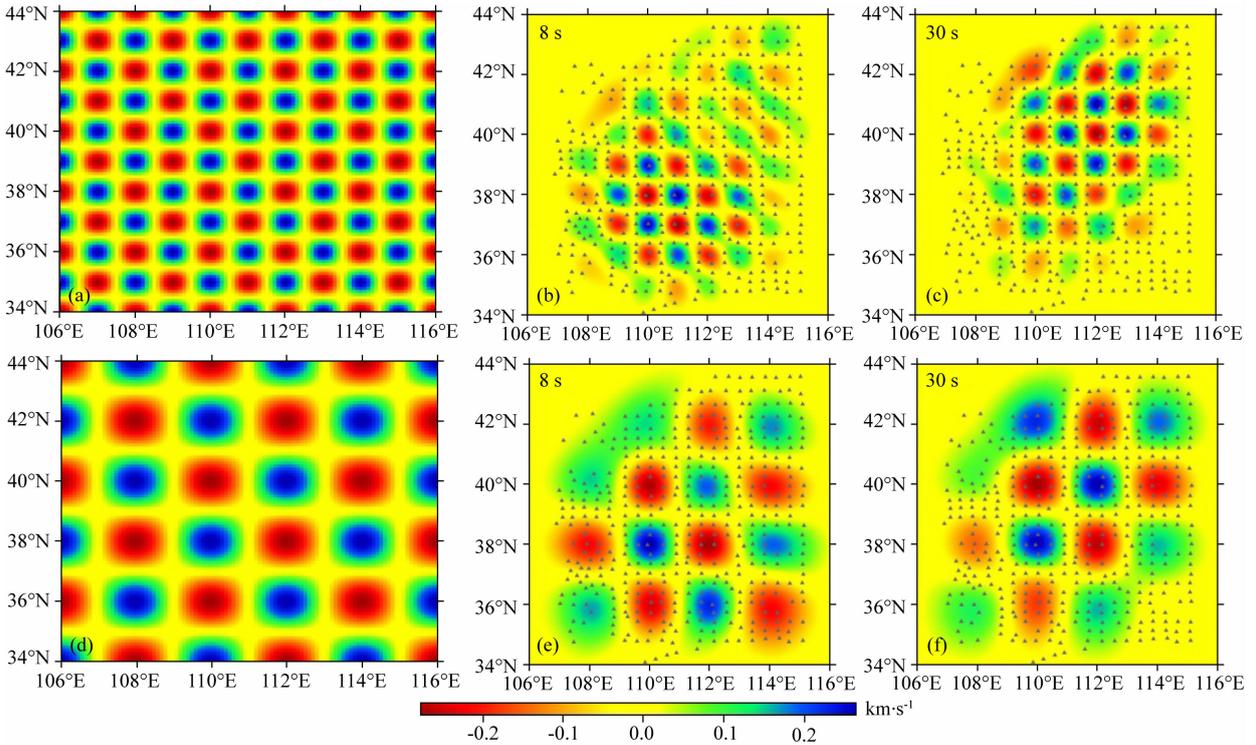


图 4 周期 8 s 和 30 s 的检测板分辨率

(a) 网格 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的初始模型; (b) 和 (c) 分别对应 8 s 和 30 s 周期的恢复模型; (d) 网格 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的初始模型;
(e) 和 (f) 分别对应 8 s 和 30 s 周期的恢复模型。

Fig. 4 Checkboard resolution images for the period 8 s and 30 s

(a) The initial model with grid size $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$; (b) and (c) The corresponding restored model respectively for the period 8 s and 30 s;
(d) The initial model with grid size $1^{\circ} \times 1^{\circ}$; (e) and (f) The corresponding restored model for the period 8 s and 30 s.

次迭代中采用较低的阻尼值 1。

图 6 展示了 $110.5^{\circ}\text{E}, 37.5^{\circ}\text{N}$ 和 $113^{\circ}\text{E}, 39.5^{\circ}\text{N}$ 两个网格点处的反演结果,可以看出根据反演结果合成的群速度频散曲线和相速度频散曲线都与测量值吻合良好,说明反演结果的可靠性。

3 结果

利用前述基于每个网格点面波相速度和群速度频散反演获得的 1D 速度模型,构建了研究区 3D S 波速度模型。图 7 为不同深度的 S 波速度切片。8 km 深度的 S 波速度切片显示低速与高速异常分别与地表的盆地和造山带对应良好。沿中部碰撞带表现为明显的南北向条带状;山西断陷带各个盆地由于覆盖较厚的沉积层,均表现为低速异常,盆地间的灵石隆起(图 7a 中 A)和石岭关隆起(图 7a 中 B)表现为高速异常。两侧的吕梁山脉和太行山脉由于基岩露头 and 较薄的风化层表现为条带状高速异常。在鄂尔多斯地块北缘,沿河套断陷带由于较厚的沉积层,表现为低速特征。

从图 7 来看,山西断陷带内的低速异常一直持续到深度 16 km,然后随着深度增加盆地下方的低速异常逐渐收缩,在其他学者的研究结果中也观测到类似特征(窦立婷等,2021)。在深度 16 km 展示的水平速度切片中,吕梁造山带的高速异常往西迁移,鄂尔多斯块体整体表现为高速异常,而其北侧河套断陷带仍显示为低速,且该低速度异常一直延伸到上地幔顶部。

在 25 km 深度处的横波速度上,大同、张家口汉诺坝等玄武岩地幔包体出露位置(Tang et al., 2006)附近区域均表现为明显的低速异常。自 25 km 至壳幔界面附近,大同火山群下方出现显著的低速异常。图 7h 为 30 km 深度处的速度基本持续了 25 km 的结构特征,但大同火山区附近的低速异常范围更大一些。为了进一步讨论华北克拉通东西向和南北向碰撞拼合的构造特征,我们沿图 1 中紫色虚线所示位置截取了相应的纬向和经向横波速度垂直剖面,分别展示在图 8 和图 9 中,其中黑色圆点代表垂直剖面方向横向宽度 0.2° 范围内的地震投影, Moho 深度参考远震接收函数的结果(Li et al.,

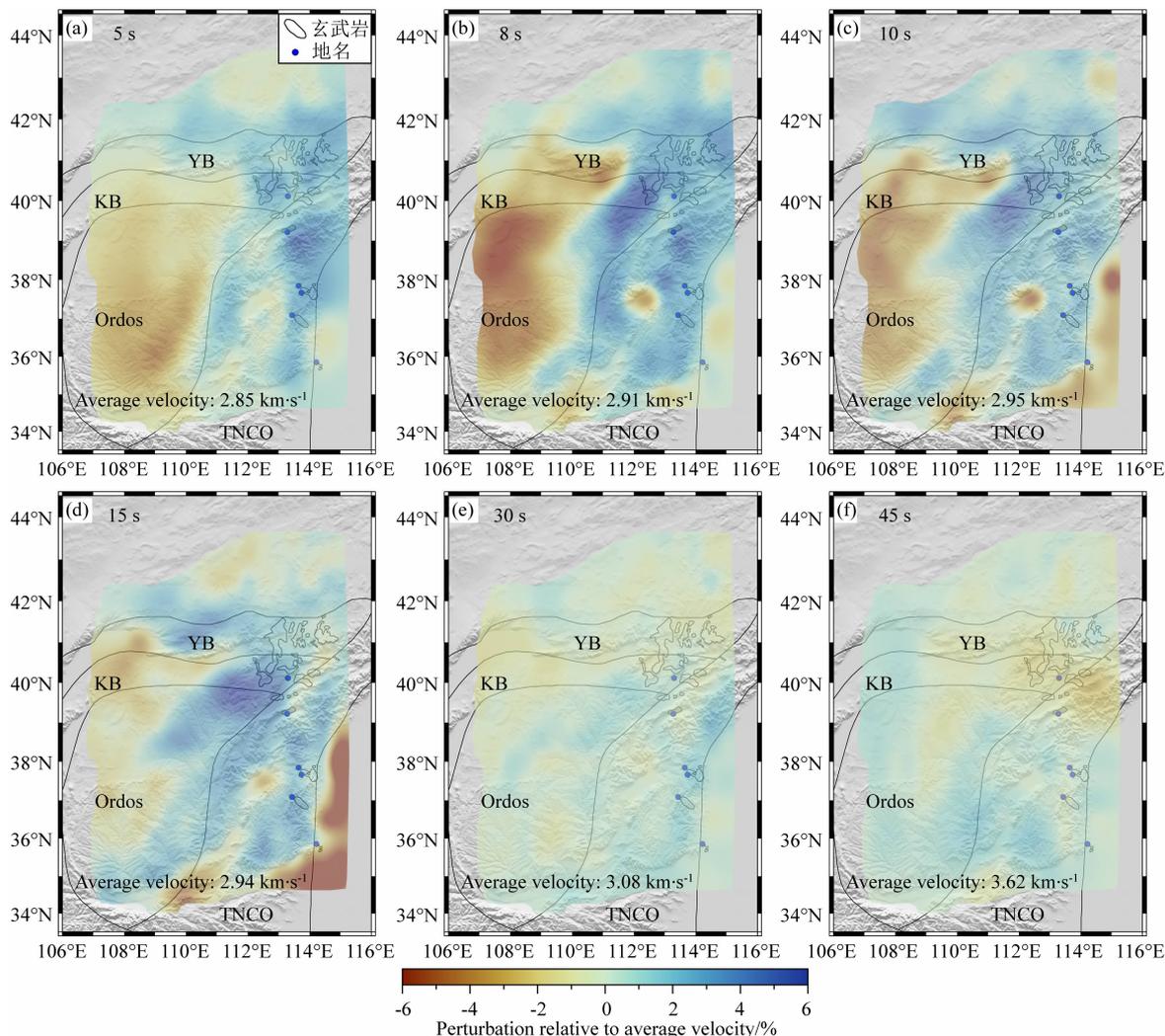


图5 反演获得的不同周期 Rayleigh 波群速度相对于同周期平均速度的扰动分布图
蓝色圆点代表分布有玄武岩的地方,命名见图1.

Fig. 5 The perturbation distribution of the inverted Rayleigh wave group velocity relative to its average for different periods

The meaning of blue circles is similar with that in Fig. 1.

2014).

4 讨论

4.1 西部克拉通的下地壳结构及其物质组成

大陆地壳物质组成的确定可为大陆形成演化研究提供重要的约束,已有研究认为高速($V_P > 7.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $V_S > 4.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)、镁铁质下地壳是全球前寒武纪克拉通的共同特征(Rudnick and Fountain, 1995; Christensen and Mooney, 1995),以及太古代和元古代克拉通具有截然不同的地壳物质组成(Durrheim and Mooney, 1994).基于人工地震探测结果认为华北克拉通西部下地壳组成以铁镁质为主,并推测其与太古代地壳形成过程中的玄武质岩浆底侵或构造-岩浆过程有关(Gao et al., 1998; Li et

al., 2006).

然而,本文反演结果显示华北克拉通西部中下地壳 S 波速度介于 $3.7 \sim 3.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,这一观测结果与最近的人工地震测深(Liu et al., 2006; Tian et al., 2014)、接收函数与面波联合反演(Li et al., 2017)结果相吻合,其结果显示鄂尔多斯块体下地壳 S 波速度介于 $3.7 \sim 3.9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,而 P 波速度介于 $6.4 \sim 6.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.根据岩石速度实验研究结果(Rudnick and Fountain, 1995; Christensen and Mooney, 1995),这种下地壳低的 V_P 和 V_S 可能表明其岩石组成以长英质岩性为主.实际上,下地壳镁铁质物质的缺失在世界其他克拉通也有发现(如 Niu and James, 2002; Kgaswane et al., 2009; Cherepanova et al., 2013; Tugume et al., 2013).镁铁质下地壳拆沉一直被认为是解释下地壳铁镁质物质缺失的一个重要

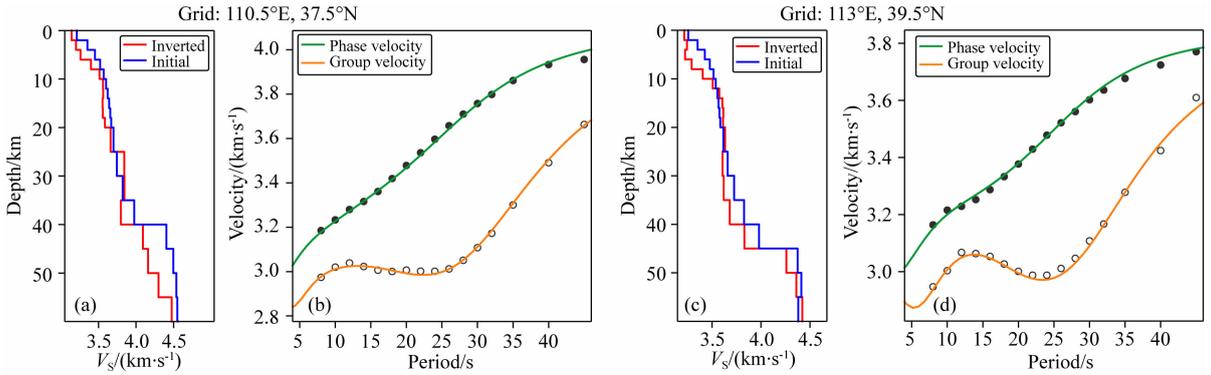


图 6 1D 横波速度结构反演实例

蓝线代表初始速度模型,红线代表反演的速度模型;空心圆点代表观测的群速度频散,其上橙线为基于反演速度模型正演计算的群速度频散曲线;实心圆点代表观测的相速度频散,其上绿线为基于反演速度模型正演计算的相速度频散曲线。

Fig. 6 Two examples of 1D shear wave velocity structure inversion

The blue lines represent the initial velocity model, the red lines represent the inverted velocity structure; the open circles represent the observed group velocity dispersion, and the overlapped orange line is the synthetic group velocity dispersion based on the inversion velocity model; the solid circles represent the observed phase velocity dispersion, and the overlapped green line is the synthetic phase velocity dispersion based on the inverted velocity model.

的地球动力学过程(如, Kay R W and Kay S M, 1993; Gao et al., 1998). 另外,退变质阶段的水化反应可能导致高速、高密度矿物(如石榴石等)的消耗,从而导致地震波速度的降低,这种地质过程也可以解释高速下地壳的缺失(Schulte-Pelkum et al., 2017).

4.2 新生代岩浆活动的深部控制

我们的结果表明,从 20 km 至 45 km 大同盆地下方呈现显著的低速异常(图 7),这与前人的背景噪声成像和地震面波层析成像(Li et al., 2018; 窦立婷等, 2021)结果基本一致,也与该区域的高热流值大致对应(Hu et al., 2000; Guo and Chen, 2017). S 波速度剖面清楚地显示,这个大型低速体向下连续延伸,直达地幔之势(图 8, 9),已有地震体波和面波层析成像结果进一步显示该低速异常可能一直延伸到软流圈地幔、400 km 甚至地幔过渡带以下(Huang and Zhao, 2006; Sun et al., 2010; 张风雪等, 2011; Lei, 2012; Li et al., 2018). 尽管目前关于该低速物质的来源仍有争议,如 Li 等(2018)推测大同火山热物质来自于青藏高原东北缘,而体波成像研究结果则支持大同火山区低速异常与俯冲的太平洋板块脱水有关(Huang and Zhao, 2006; Sun et al., 2010; 张风雪等, 2011; Lei, 2012). 但现有研究都证实大同火山区 Moho 面至上地幔发育大规模的低速异常,很可能代表了源于软流圈的地幔热流大规模上涌结果(Huang and Zhao, 2006; Sun et al., 2010; 张风雪等, 2011; Lei, 2012; Li et al., 2018). 这个推断也得到大同火山群岩石地球化学资料佐证。地

质观察表明,大同火山群由近 15 座大小不等的更新世(0.4~1.0 Ma)火山锥组成,面积达 50 km², 集中分布于大同断陷盆地轴部,呈现侧向水平对称分带特征(邓晋福等, 1987). 岩石地球化学研究表明,火山岩以碱性玄武岩为主,拉斑玄武岩次之,含尖晶石二辉橄榄岩地幔捕虏体(Chen et al., 2007). 大同碱性玄武岩岩浆主体源于软流圈的减压熔融,拉斑玄武岩浆源于上覆岩石圈地幔的部分熔融(马金龙和徐义刚, 2004; Xu et al., 2004). 综合分析这些地质-地球物理资料可以看出,更新世以来,软流圈以大同断陷盆地为中心大规模上涌,强烈的热蚀上覆的岩石圈地幔并诱发其熔融,产生拉斑玄武岩浆,同时因上涌减压而自身熔融,产生碱性玄武岩浆. 30~40 km 深度范围出现的大规模低速异常,则完好地记录了这些玄武岩浆穿过 Moho 界面向地壳大量侵位并在地表快速喷发的地质过程。

自深部地幔直达下地壳的大型低速体,之所以集中出现于大同断陷盆地下方,与其深部岩石圈结构有关,受基底构造控制. 地质研究表明,近 EW 向和近 NS 向元古宙碰撞带在大同盆地附近交汇(图 1; 赵国春, 2009). 这种交叉汇聚无疑使该区的岩石圈强烈破碎,成为西部克拉通构造最薄弱地带和最易被改造地带. 矿物物理实验和理论模拟结果显示,先前存在于岩石圈中的古老构造带在后期的热构造事件过程中,可以引起上地幔顶部热扩散(Tommasi et al., 2001)和机械变形(Tommasi and Vauchez, 2001)的各向异性,并进一步导致岩石圈的不均匀

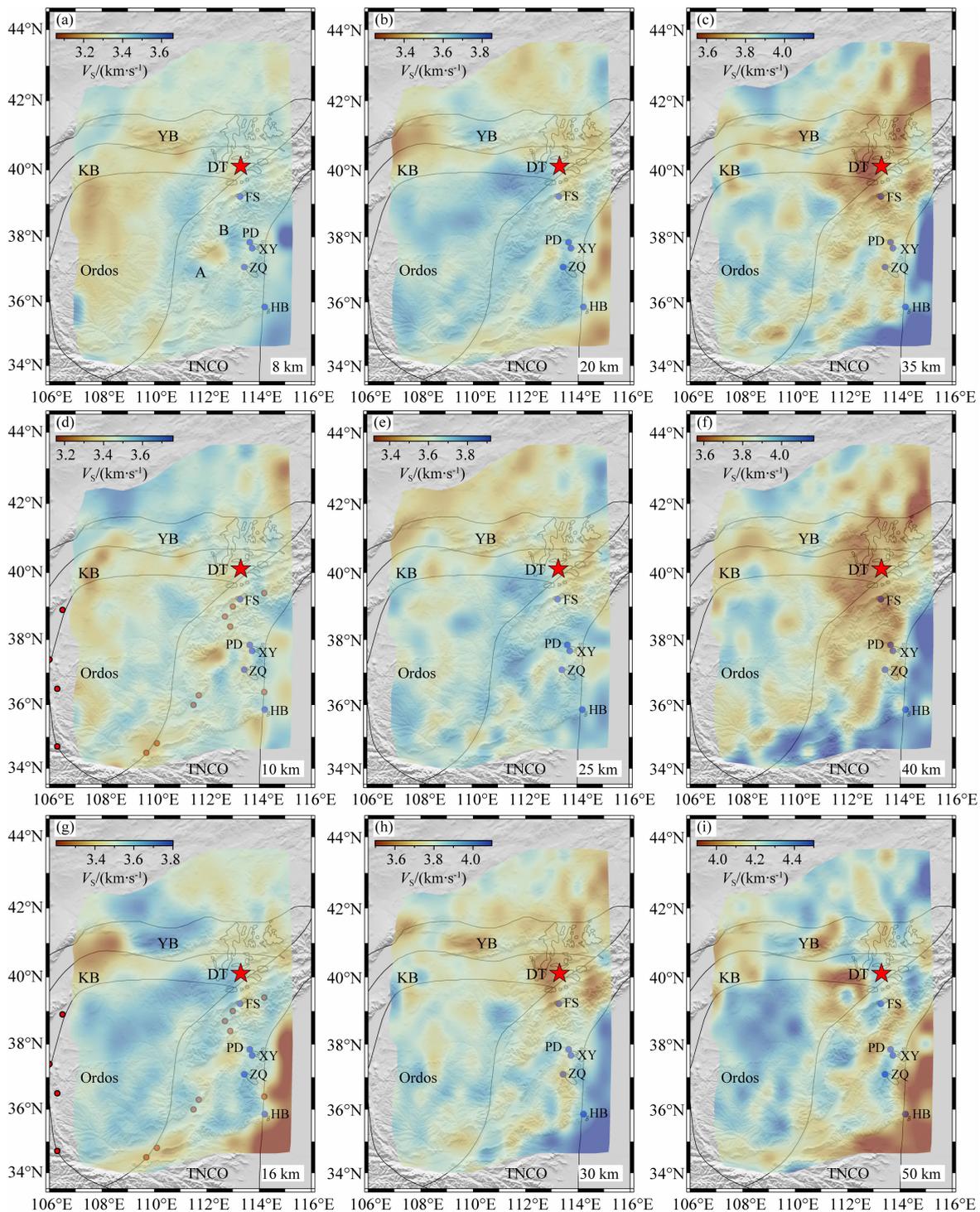


图 7 不同深度横波速度分布, 每个子图的右下角为深度值

KB:孔兹岩带; YB:阴山块体; TNCO:华北克拉通中部造山带; Ordos:鄂尔多斯块体; A:灵石隆起; B:石岭关隆起; 红色圆点为历史上 7 级以上的地震; 黑色闭合曲线代表新生代玄武岩(汤艳杰等, 2006); DT:大同; FS:繁峙; PD:平定; XY:昔阳; ZQ:左权; HB:鹤壁.

Fig. 7 Inverted S-wave velocity at different depths, with depth value shown in the lower right corner for each panel KB: Kunzite Belt; YB: Yinshan Block; TNCO: Central North China Craton Orogenic Belt; Ordos: Ordos Block; A: Lingshi uplift; B: Shilingguan uplift; Red circles represent historical earthquakes of magnitude 7 or above; Dark closed curves represent Cenozoic basalts (Tang et al., 2006); DT: Datong; FS: Fanzhi; PD: Pingding; XY: Xiyang; ZQ: Zuoquan; HB: Hebi.

加热和应变集中, 从而促进古老岩石圈的改造 (Vauchez et al., 1997; Tommasi et al., 2001). 我

们的成像资料也显示, 交汇处的地壳速度结构与邻区存在很大差异, 集中体现在低速体在中下地壳连

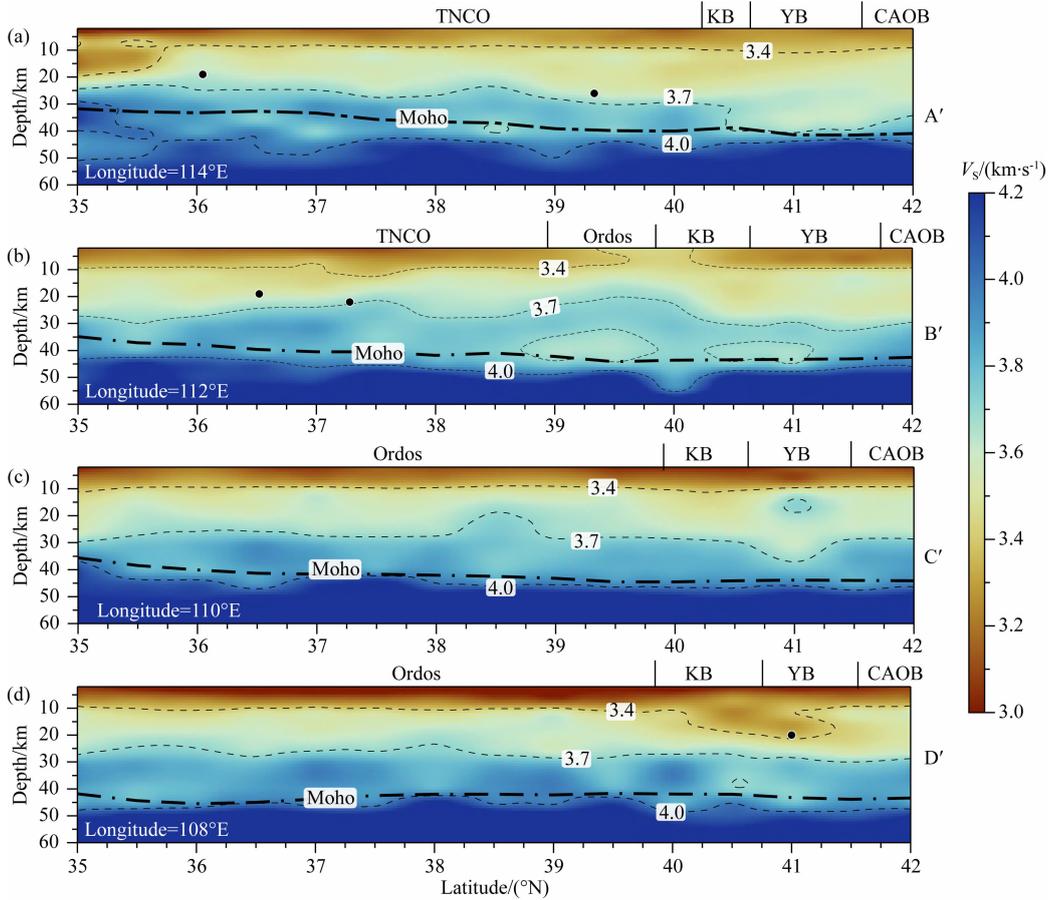


图 8 沿不同经度方向的 S 波速度剖面

黑色圆点代表沿剖面横向 0.2° 范围内的 4 级以上地震 (时间范围为 1977—2012 年)。

Fig. 8 S-wave velocity profiles along different longitude directions

The black dots represent earthquakes of magnitude 4 or greater within 0.2° region of the transverse section (time range 1977—2012).

续或半连续地大面积发育,中地壳高速层出现大范围断失,“缺口”被相对低速带替代(图 8,9). 我们因此认为,两大基底构造带交汇处的岩石圈薄弱区,是新生代软流圈地幔热物质大规模上涌的主干通道(图 10).

4.3 大震孕育的深部背景

华北东部唐山、邢台等大震区的深地震剖面探测显示:地壳上部铲式正断层和低角度的滑脱构造与震源下方贯通下地壳直至莫霍面的高角度深断裂共存,是发育大震的深部构造特征. 地壳深浅构造不一致、高角度超壳深断裂、上地幔顶部速度偏低、莫霍界面局部隆起等,是华北深部孕震环境的共同特征(王椿镛等,2017). Xu 等 (2020) 基于地壳上地幔的横波速度结构对山西断陷带的发震规律进行了研究,并推断研究区震源深度分布与地壳脆韧性过渡带深度有关. 已有的地震层析成像显示:华北大震大多发生在高速与低速区过渡带上(孙若昧和刘富田,1995;Lei et al., 2008; Wang et al., 2012; 王椿镛

等,2017; Xu et al., 2020; 窦立婷等,2021).

我们对西部克拉通的成像结果也证实了上述认识,但同时发现:(1) 尽管环鄂尔多斯断陷带内绝大多数地震以浅震为主(<30 km),96% 的地震震源深度集中在 $5\sim30$ km, 平均震源深度为 14 km(窦立婷等,2021),但在 $10\sim16$ km 深度 S 波速度结构切面图中(图 7),多数 $M>7$ 的地震集中于高速体内部(即使高速体规模很小),或高速与低速相间区的高速体一侧,代表性大震如 1303 年的山西洪洞 $M8$ 地震、1556 年的陕西华县 $M8.25$ 地震和 1695 年的山西临汾 $M8$ 地震,反映大震孕育与深部结构存在某种关联;(2) 在两个断陷系发育大震的区域,上部地壳发育古老的逆冲断裂,地震主要发源于逆冲断裂夹持区域内,震源下方发育贯通下地壳直至莫霍面的高角度深断裂(刘保金等,2012;任隽等,2013). $M>7$ 的大震多位于高角度深断裂的顶端高速体边缘(图 7);(3) 这些深断裂以速度结构突变为标志,以发育串珠状低速异常为特征,并显示向下覆

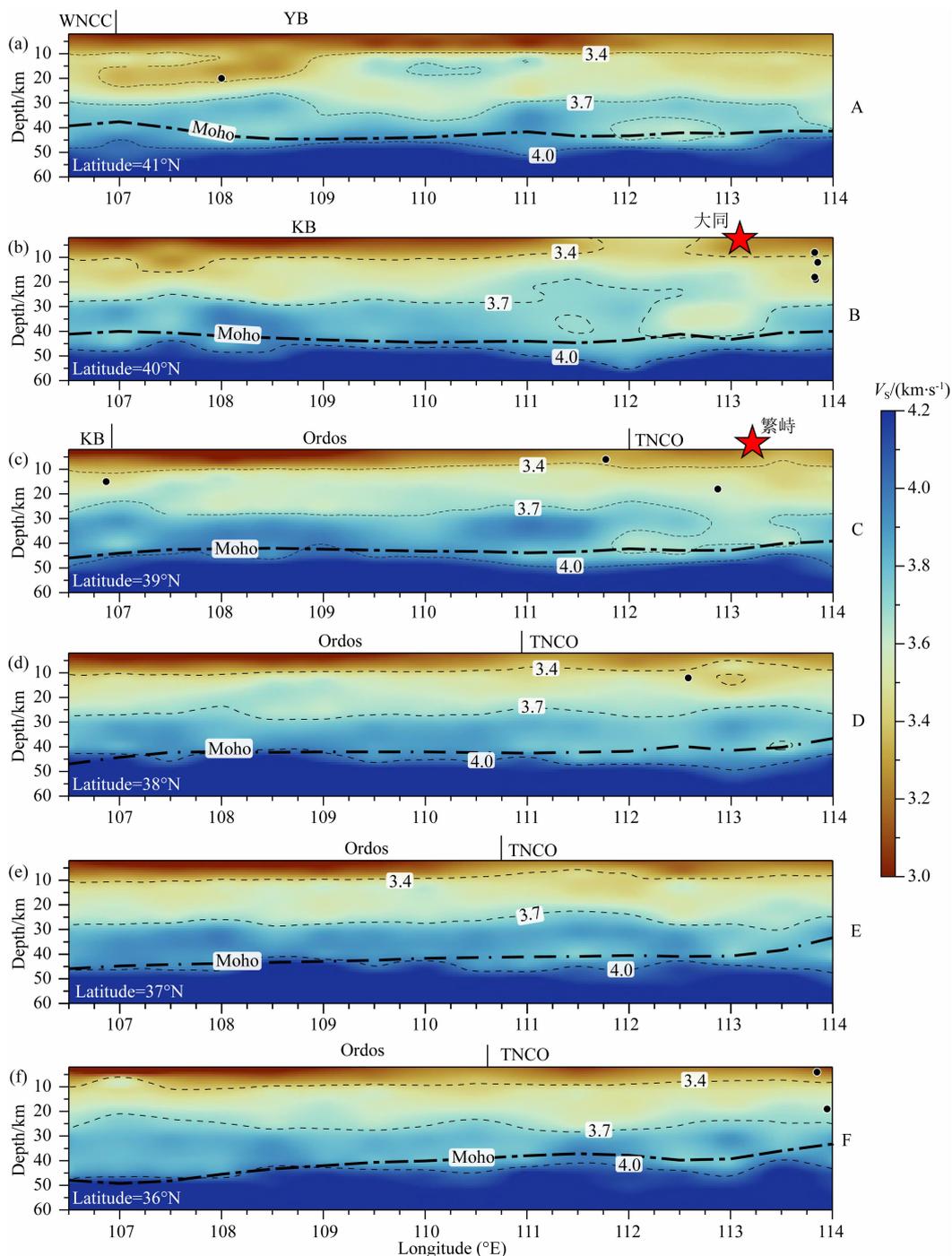


图9 沿不同纬度方向的S波速度剖面

黑色圆点代表沿剖面横向 0.2° 范围内的4级以上地震(时间范围为1977—2012年)。

Fig. 9 S-wave velocity profiles along different latitude directions

The black dots represent earthquakes of magnitude 4 or greater within 0.2° region of the transverse section (time range 1977—2012).

的上地幔断续延伸之趋势(图7—10),反映这些深断裂贯通壳/幔边界,疏导深部热流,并引导热流对穿越的地壳进行交代与改造。

我们的层析成像资料所揭示的复杂的深部速度结构,也与大地电磁探测结果(金胜等,2019)相一致。如,发生M8大震的临汾盆地,10 km以浅发育

倒梯形的高导体,下方出现高阻块体,之下为下地壳高导层,并与下覆的岩石圈高导体相连,地震震源则位于上部高阻体与下部高导体接触带的高阻体内侧(金胜等,2019)。通常情况下,岩石圈尺度的高导体与低速体相对应,记录了来自深部的高热流的运动“轨迹”,而地壳尺度的高阻体与高速体相对应,反映

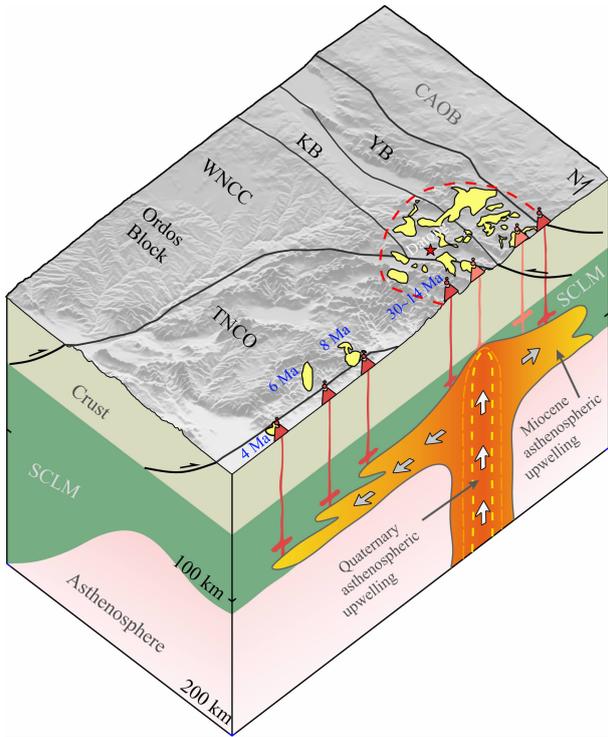


图 10 华北克拉通西部地幔通道流与新生代岩浆活动示意图

华北克拉通西部 EW 与 NS 向元古代碰撞带的基底断裂带在大同地区交汇,破碎改造岩石圈,使之成为软流圈长期汇聚和上涌的主干通道.中新世软流圈近垂直上涌和侧向流动,导致玄武岩浆喷发,形成北部面状岩区和南部火山链.随后软流圈沿主通道继续上涌,形成大同火山群.软流圈减压熔融形成碱性玄武岩,软流圈诱发上覆岩石圈地幔熔融产生拉斑玄武岩. SCLM: subcontinental lithospheric mantle.

Fig. 10 Schematic diagram of mantle upwelling and Cenozoic magmatic activities in the western North China Craton

The basement fault zone of the EW and NS-trending Proterozoic collision zone in the western North China Craton intersected in the Datong area, breaking and transforming the lithosphere, making it the main channel for the long-term convergence and upwelling of the asthenosphere. The Miocene asthenosphere was near vertical upwelling and lateral flow, leading to the eruption of basalt magma, forming the northern faceted rock area and the southern volcanic chain. Then the asthenosphere continued to rise along the main channel, forming the Datong volcano group. The asthenosphere decompresses and melts to form alkaline basalt, and the asthenosphere induces the melting of the overlying lithospheric mantle to produce porphyritic basalt.

了相对低温、应力集中的高强度块区.地壳内部的电阻率界面或低速/高速界面大致代表了脆-塑性转换边界上的应力集中区域.基于以上资料和分析,我们认为:在环鄂尔多斯断陷带,穿越壳/幔边界的深部热流沿陡深断裂上侵,诱发上覆的高应力刚性块体发生蠕动破裂与应力释放,可能是诱发大震的深部

原因.

5 结论

(1) 克拉通西部鄂尔多斯块体下地壳 S 波速度介于 $3.7 \sim 3.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 暗示下地壳以长英质岩石,而非铁镁质岩石为主.

(2) 大同火山区中下地壳到上地幔顶部都表现为明显的 S 波低速异常,推测源自软流圈的地幔热流提供了近垂直的主干上涌通道,并控制了该区新生代岩浆活动的形成与发育.提出了“蘑菇状”巨型软流圈上涌模型来解释华北克拉通中西部新生代岩浆活动所呈现的“南部线状火山链”与“北部面状火山群”分布特征.

(3) 研究区强震集中分布在高速体内部,或高低速相间区的高速体一侧.强震区下地壳、上地幔顶部都表现为明显的低速异常,推测源自深部的热流沿着贯通地壳的陡深断裂上侵,诱发上覆的高应力刚性块体发生蠕动破裂与应力释放,是诱发大震的深部原因.

致谢 祝融峰上又清秋,雁低飞,湘水流.张忠杰老师离开我们十周年之际,谨以此文表达我们的崇高敬意和深切缅怀.感谢中国地震局地球物理研究所“中国地震科学探测台阵数据中心”提供的地震波形数据.感谢中国科学院地质与地球物理研究所苗来成研究员和武澄洸副研究员、成都理工大学翁雪飞硕士的支持和帮助.

References

- Ai S X, Zheng Y, He L P, et al. 2019a. Joint inversion of ambient noise and earthquake data in the Trans-North China Orogen: On-going lithospheric modification and its impact on the Cenozoic continental rifting. *Tectonophysics*, 763: 73-85.
- Ai S X, Zheng Y, Riaz M S, et al. 2019b. Seismic evidence on different rifting mechanisms in southern and northern segments of the Fenhe-Weihe rift zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124 (1): 609-630.
- Bao X W, Song X D, Xu M J, et al. 2013. Crust and upper mantle structure of the North China Craton and the NE Tibetan Plateau and its tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 369-370: 129-137.
- Barmin M P, Ritzwoller M H, Levshin A L. 2001. A fast and reliable method for surface wave tomography. *Pure and Applied Geophysics*, 158(8): 1351-1375.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. 2007. Processing

- seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1239-1260.
- Brocher T M. 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6): 2081-2092.
- Carlson R W, Pearson D G, James D E. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Reviews of Geophysics*, 43(1): RG1001, doi: 10.1029/2004RG000156.
- Chen G, Wang Z W, Bai G J, et al. 2007. Meso-Cenozoic peak-age events and their tectono-sedimentary response in the Ordos basin. *Geology in China* (in Chinese), 34(3): 375-383.
- Chen L, Cheng C, Wei Z G. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1-2): 171-183.
- Chen L, Tao W, Zhao L, et al. 2008. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(1-2): 56-68.
- Chen L. 2010. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. *Lithos*, 120(1-2): 96-115.
- Chen Y, Zhang Y X, Graham D, et al. 2007. Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in Northeast China. *Lithos*, 96(1-2): 108-126.
- Cherepanova Y, Artemieva I M, Thybo H, et al. 2013. Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data. *Tectonophysics*, 609: 154-183.
- Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100 (B3): 9761-9788, doi: 10.1029/95JB00259.
- Deng J F, Mo X X, Lin P Y. 1987. Geological and petrological characters of Datong volcanic group. *Earth Science* (in Chinese), 12(3): 233-239.
- Dou L T, Yao H J, Fang L H, et al. 2021. High-resolution crustal velocity structure in the Shanxi rift zone and its tectonic implications. *Science China Earth Sciences*, 64(5): 728-743.
- Durrheim R J, Mooney W D. 1994. Evolution of the Precambrian lithosphere: Seismological and geochemical constraints. *Journal of Geophysical Research*, 99(B8): 15359-15374.
- Gao S, Zhang B R, Jin Z M, et al. 1998. How mafic is the lower continental crust?. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1-4): 101-117.
- Guo Z, Chen Y J. 2017. Mountain building at northeastern boundary of Tibetan Plateau and craton reworking at Ordos block from joint inversion of ambient noise tomography and receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 463: 232-242.
- Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, 84(6): 1081-1088, doi: 10.1785/0220110096.
- Hu S B, He L J, Wang J Y. 2000. Heat flow in the continental area of China: a new data set. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(2): 407-419.
- Huang J L, Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9): B09305, doi: 10.1029/2005JB004066.
- Huang X, Ding Z F, Ning J Y, et al. 2021. Rayleigh wave phase velocity and azimuthal anisotropy of central North China Craton derived from ambient noise tomography. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(8): 2701-2715, doi: 10.6038/cjg202100442.
- Huang X, Ding Z F, Ning J Y, et al. 2022. Joint inversion of the lithospheric structure of the central North China Craton from ambient noise and seismic surface wave. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 44(4): 539-554, doi: 10.11939/jass.20210042.
- Jia S X, Wang F Y, Tian X F, et al. 2014. Crustal structure and tectonic study of North China Craton from a long deep seismic sounding profile. *Tectonophysics*, 627: 48-56.
- Jin S, Sheng Y, Liang H D, et al. 2019. Lithospheric electrical structure along Shenzha-Shuanghu profile in Tibetan Plateau and its significance. *Earth Science* (in Chinese), 44(6): 1773-1783.
- Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219(1-3): 177-189.
- Kgaswane E M, Nyblade A A, Juliã J, et al. 2009. Shear wave velocity structure of the lower crust in southern Africa: Evidence for compositional heterogeneity within Archaean and Proterozoic terrains. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B12): B12304, doi: 10.1029/2008JB006217.
- Lei J S, Xie F R, Lan C X, et al. 2008. Seismic images under the Beijing region inferred from P and PmP data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168(3-4): 134-146.
- Lei J S. 2012. Upper-mantle tomography and dynamics beneath the North China Craton. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B6): B06313, doi: 10.1029/2012JB009212.
- Li L L, Shen W S, Sui S Y, et al. 2021. Crustal thickness beneath the Tanlu fault zone and its tectonic significance based on two-layer $H\kappa$ stacking. *Earthquake Science*, 34(1): 47-63.
- Li M K, Song X D, Li J T, et al. 2022. Crust and upper mantle structure of East Asia from ambient noise and earthquake surface wave tomography. *Earthquake Science*, 35(2): 71-92.
- Li Q H, Guo S N, Lü D H. 1999. The Deep Structure and Tectonics of the Western and Southwestern Margin of Ordos Block (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 71-86.
- Li S D. 1997. The morphotectonics, seismicity and origin of Shanxi Graben System, East China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis* (in Chinese), 33(4): 467-474.
- Li S L, Guo Z, Chen Y J, et al. 2018. Lithospheric structure of the northern Ordos from ambient noise and teleseismic surface wave tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8): 6940-6957.
- Li S L, Lai X L, Liu B F, et al. 2011. Differences in lithospheric structures between two sides of Taihang Mountain obtained from the

- Zhucheng-Yichuan deep seismic sounding profile. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 871-880, doi: 10.1007/s11430-011-4191-4.
- Li S L, Mooney W D, Fan J C. 2006. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data. *Tectonophysics*, 420(1-2): 239-252.
- Li Y H, Gao M T, Wu Q J. 2014. Crustal thickness map of the Chinese mainland from teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 611: 51-60.
- Li Y H, Wang X C, Zhang R Q, et al. 2017. Crustal structure across the NE Tibetan Plateau and Ordos Block from the joint inversion of receiver functions and Rayleigh-wave dispersions. *Tectonophysics*, 705: 33-41.
- Liu B J, He H L, Shi J H, et al. 2012. Crustal structure and active faults of the Tangyin graben in the eastern margin of Taihang Mountain. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(10): 3266-3276, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.009.
- Liu J, Wu J P, Wang W L, et al. 2021. Ambient noise tomography in the Ordos block and its surrounding areas. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 43(2): 152-167, doi: 10.11939/jass.20200099.
- Liu M J, Mooney W D, Li S L, et al. 2006. Crustal structure of the northeastern margin of the Tibetan plateau from the Songpan-Ganzi terrane to the Ordos basin. *Tectonophysics*, 420(1-2): 253-266.
- Ma J L, Xu Y G. 2004. Petrology and geochemistry of the Cenozoic basalts from Yangyuan of Hebei Province and Datong of Shanxi Province: Implications for the deep process in the western North China Craton. *Geochimica* (in Chinese), 33(1): 75-88.
- Niu F L, James D E. 2002. Fine structure of the lowermost crust beneath the Kaapvaal Craton and its implications for crustal formation and evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 200(1-2): 121-130, doi: 10.1016/S0012-821X(02)00584-8.
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3-4): 175-205.
- Ren J, Feng X J, Wang F Y, et al. 2013. Fine crust structures of Xi'an sag in the Weihe basin revealed by a deep seismic reflection profile. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(2): 513-521, doi: 10.6038/cjg20130215.
- Ruan X M, Teng J W, An Y L, et al. 2011. Analysis of magnetic anomaly and crystalline basement of the Yinshan orogen and the northern Ordos basin regions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(9): 2272-2282, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.010.
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267-309, doi: 10.1029/95RG01302.
- Schulte-Pelkum V, Mahan K H, Shen W S, et al. 2017. The distribution and composition of high velocity lower crust across the continental U. S.: Comparison of seismic and xenolith data and implications for lithospheric dynamics and history. *Tectonics*, 36(8): 1455-1496, doi: 10.1002/2017TC004480.
- Shen W S, Ritzwoller M H, Kang D, et al. 2016. A seismic reference model for the crust and uppermost mantle beneath China from surface wave dispersion. *Geophysical Journal International*, 206(2): 954-979.
- Shi Y T, Gao Y, Jing H L. 2014. Crustal thickness and V_P/V_S ratio in Shanxi Graben, China. *Earthquake Science*, 27(6): 589-597.
- Sun R M, Liu F T. 1995. Crust structure and strong earthquake in Beijing, Tianjin, Tangshan area: I. P wave velocity structure. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 38(5): 599-607, 694.
- Sun X L, Song X D, Zheng S H, et al. 2010. Three dimensional shear wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath China from ambient noise surface wave tomography. *Earthquake Science*, 23(5): 449-463.
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, et al. 2006. Source characteristics and temporal-spatial evolution of Mesozoic and Cenozoic basaltic magmatism in the Taihang Mountains. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 22(6): 1657-1664.
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. 2006. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton. *Chemical Geology*, 233(3-4): 309-327.
- Tian X F, Zelt C A, Wang F Y, et al. 2014. Crust structure of the North China Craton from a long-range seismic wide-angle-reflection/refraction data. *Tectonophysics*, 634: 237-245.
- Tian Y, Zhao D P. 2011. Destruction mechanism of the North China Craton: Insight from P and S wave mantle tomography. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1132-1145.
- Tommasi A, Gibert B, Seipold U, et al. 2001. Anisotropy of thermal diffusivity in the upper mantle. *Nature*, 411(6839): 783-786.
- Tommasi A, Vauchez A. 2001. Continental rifting parallel to ancient collisional belts: an effect of the mechanical anisotropy of the lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(1-2): 199-210.
- Tugume F, Nyblade A, Julià J, et al. 2013. Precambrian crustal structure in Africa and Arabia: evidence lacking for secular variation. *Tectonophysics*, 609: 250-266.
- Vauchez A, Barruol G, Tommasi A. 1997. Why do continents break-up parallel to ancient orogenic belts?. *Terra Nova*, 9(2): 62-66.
- Wang C Y, Duan Y H, Wu Q J, et al. 2016. Exploration on the deep tectonic environment of strong earthquakes in North China and relevant research findings. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 38(4): 511-549, doi: 10.11939/jass.2016.04.002.
- Wang C Y, Wu Q J, Duan Y H, et al. 2017. Crustal and upper mantle structure and deep tectonic genesis of large earthquakes in North China. *Science China Earth Sciences*, 60(5): 821-857, doi: 10.1007/s11430-016-9009-1.
- Wang S J, Wang F Y, Song X H, et al. 2019. Upper mantle anisotropy and tectonic deformation beneath the Ordos Block in the western North China Craton: Constraints from wide-angle seismic data. *Journal of Asian Earth Sciences*, X1: 100008, https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2019.100008.
- Wang W L, Wu J P, Fang L H, et al. 2017. Sedimentary and

- crustal thicknesses and Poisson's ratios for the NE Tibetan Plateau and its adjacent regions based on dense seismic arrays. *Earth and Planetary Science Letters*, 462: 76-85.
- Wang W L, Wu J P, Fang L H. 2012. High resolution Rayleigh wave phase velocity tomography in northern North China. *Geophysical Journal International*, 189(1): 647-658.
- Wilde S A, Zhao G C. 2005. Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 519-522.
- Wu Q J, Zheng X F, Pan J T, et al. 2009. Measurement of interstation phase velocity by wavelet transformation. *Earthquake Science*, 22(4): 425-429.
- Xu H R, Luo Y H, Yang Y J, et al. 2020. Three-dimensional crustal structures of the Shanxi rift constructed by Rayleigh wave dispersion Curves and Ellipticity: Implication for sedimentation, intraplate volcanism, and seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(11): e2020JB020146, doi: 10.1029/2020JB020146.
- Xu L B, Wei W B, Jin S, et al. 2017. Study of deep electrical structure along a profile from northern Ordos block to Yinshan orogenic belt. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(2): 575-584, doi: 10.6038/cjg20170212.
- Xu Y G, Chung S L, Ma J L, et al. 2004. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in the Western and Eastern Sino-Korean Craton: constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths. *The Journal of Geology*, 112(5): 593-605.
- Yang Y M, Yong D, Zhang G Q, et al., 2016. Attenuation relation of seismic intensity in the middle and western regions of Inner Mongolia Autonomous Region. *Seismological and Geomagnetic Observations and Research* (in Chinese), 37(1): 30-37, doi: 10.3969/j.issn.1003-3246.2016.01.005.
- Yin Y T, Jin S, Wei W B, et al. 2017. Lithospheric rheological heterogeneity across an intraplate rift basin (Linfen Basin, North China) constrained from magnetotelluric data: Implications for seismicity and rift evolution. *Tectonophysics*, 717: 1-15.
- Zhang F X, Li Y H, Wu Q J, et al. 2011. The P wave velocity structure of upper mantle beneath the North China and surrounding regions from FMTT. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(5): 1233-1242, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.012.
- Zhang S M, Li F X, Li K. 2000. Statistical seismotectonics of strong earthquakes in Chinese mainland. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 16(4): 352-363.
- Zhang Y Q, Teng J W, Wang F Y, et al. 2011. Structure of the seismic wave property and lithology deduction of the upper crust beneath the Yinshan orogenic belt and the northern Ordos block. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(1): 87-97, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.010.
- Zhao G C. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 25(8): 1772-1792.
- Zhao J R, Zhang X K, Zhang C K, et al. 2006. Features of deep crustal structure beneath the Wutai mountain area of Shanxi province. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 49(1): 123-129.
- Zhao L, Allen R M, Zheng T Y, et al. 2009. Reactivation of an Archean craton: Constraints from P- and S-wave tomography in North China. *Geophysical Research Letters*, 36(17): L17306, doi: 10.1029/2009GL039781.
- Zhu R X, Chen L, Wu F Y, et al. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 789-797, doi: 10.1007/s11430-011-4203-4.
- Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. 2012. Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565-1587, doi: 10.1007/s11430-012-4516-y.
- Zhu R X, Xu Y G. 2019. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 62(9): 1340-1350, doi: 10.1007/s11430-018-9356-y.

附中文参考文献

- 陈刚, 王志维, 白国绢等. 2007. 鄂尔多斯盆地中生代峰值年龄事件及其沉积-构造响应. *中国地质*, 34(3): 375-383.
- 邓晋福, 莫宣学, 林培英. 1987. 大同火山群地质及岩石学特征. *地球科学*, 12(3): 233-239.
- 窦立婷, 姚华建, 房立华等. 2021. 山西断陷带地区高分辨率地壳速度结构及其构造演化意义. *中国科学: 地球科学*, 51(5): 709-724.
- 黄翔, 丁志峰, 宁杰远等. 2021. 基于背景噪声研究华北克拉通中部 Rayleigh 波相速度和方位各向异性. *地球物理学报*, 64(8): 2701-2715, doi: 10.6038/cjg202100442.
- 黄翔, 丁志峰, 宁杰远等. 2022. 基于背景噪声和地震面波联合反演华北克拉通中部岩石圈结构. *地震学报*, 44(4): 539-554, doi: 10.11939/jass.20210042.
- 金胜, 盛跃, 梁宏达等. 2019. 青藏高原申扎一双湖剖面岩石圈电性结构特征及其含义. *地球科学*, 44(6): 1773-1783.
- 李树德. 1997. 中国东部山西地堑系的形成机制及构造地貌、地震探讨. *北京大学学报(自然科学版)*, 33(4): 467-474.
- 李清河, 郭守年, 吕德徽. 1999. 鄂尔多斯西缘与西南缘深部结构与构造. 北京: 地震出版社, 71-86.
- 李松林, 赖晓玲, 刘宝峰等. 2011. 由诸城—宜川人工地震剖面反演结果看太行山两侧岩石圈结构的差异. *中国科学: 地球科学*, 41(5): 668-677.
- 刘保金, 何宏林, 石金虎等. 2012. 太行山东缘汤阴地堑地壳结构和活动断裂探测. *地球物理学报*, 55(10): 3266-3276, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.009.
- 刘靖, 吴建平, 王未来等. 2021. 鄂尔多斯及周边区域噪声层析成像研究. *地震学报*, 43(2): 152-167, doi: 10.11939/jass.20200099.
- 马金龙, 徐义刚. 2004. 河北阳原和山西大同新生代玄武岩的岩石地球化学特征: 华北克拉通西部深部地质过程初探. *地球化学*, 33(1): 75-88.
- 任勇, 冯希杰, 王夫运等. 2013. 深地震反射剖面揭示的渭河盆地西安拗陷的地壳精细结构. *地球物理学报*, 56(2): 513-521,

- doi: 10.6038/cjg20130215.
- 阮小敏, 滕吉文, 安玉林等. 2011. 阴山造山带和鄂尔多斯盆地北部磁异常场与结晶基底特征研究. 地球物理学报, 54(9): 2272-2282, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.010.
- 孙若昧, 刘福田. 1995. 京津唐地区地壳结构与强震的发生——I. P 波速度结构. 地球物理学报, 38(5): 599-607, 694.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰等. 2006. 太行山地区中、新生代玄武质岩浆的源区特征与时空演化. 岩石学报, 22(6): 1657-1664.
- 王椿镛, 段永红, 吴庆举等. 2016. 华北强烈地震深部构造环境的探测与研究. 地震学报, 38(4): 511-549.
- 王椿镛, 吴庆举, 段永红等. 2017. 华北地壳上地幔结构及其大地震深部构造成因. 中国科学: 地球科学, 47(6): 684-719.
- 许林斌, 魏文博, 金胜等. 2017. 鄂尔多斯地块北部至阴山造山带深部电性结构特征研究. 地球物理学报, 60(2): 575-584, doi: 10.6038/cjg20170212.
- 杨彦明, 戴勇, 张国清等. 2016. 内蒙古中西部地区地震烈度衰减关系. 地震地磁观测研究, 37(1): 30-37, doi: 10.3969/j.issn.1003-3246.2016.01.005.
- 张风雪, 李永华, 吴庆举等. 2011. FMTT 方法研究华北及邻区上地幔 P 波速度结构. 地球物理学报, 54(5): 1233-1242, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.012.
- 张世民, 李发祥, 李克. 2000. 中国大陆强震构造环境统计分析. 中国地震, 16(4): 352-363.
- 张永谦, 滕吉文, 王夫运等. 2011. 阴山造山带及鄂尔多斯盆地北部地区上地壳的地震波属性结构及岩性推断. 地球物理学报, 54(1): 87-97, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.010.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报, 25(8): 1772-1792.
- 赵金仁, 张先康, 张成科等. 2006. 山西五台山地区地壳深部结构特征研究. 地球物理学报, 49(1): 123-129.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元等. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583-592.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光等. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135-1159.
- 朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 49(9): 1346-1356.

(本文编辑 何燕)