



基于密集地震台阵背景噪声成像的汉中盆地及邻区三维速度结构分析

陈月, 包乾宗, 胡景, 赵韬, 王莹, 刘雨婷

引用本文:

陈月, 包乾宗, 胡景, 等. 基于密集地震台阵背景噪声成像的汉中盆地及邻区三维速度结构分析[J]. *地球物理学报*, 2025, 68(8): 3103–3118.

Chen Y, Bao Q Z, Hu J, et al. Analysis of 3-D velocity structure in Hanzhong basin and adjacent areas based on ambient noise tomography from dense seismic arrays[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, 68(8): 3103–3118.

<https://doi.org/10.6038/cjg2024R0629>

相关论文

密集台阵背景噪声双聚束成像化龙断裂精细结构

吴晓阳, 谭俊卿, 郭震, 任鹏飞, 王力伟, 叶秀薇, 陈永顺

地球物理学报 2022, 65(5): 1701–1711 doi: 10.6038/cjg2022P0549

短周期密集台阵接收函数成像方法揭示南岭中部丹霞盆地及邻区三维地壳结构

毕昊, 方洪健, 杨振, 高锐

地球物理学报 2024, 67(6): 2322–2335 doi: 10.6038/cjg2023R0068

利用密集台阵背景噪声研究通州—三河地区高分辨率三维S波速度结构

徐微, 丁志峰, 吴萍萍, 鲁来玉, 秦彤威, 刘献伟, 黄翔, 高天扬, 刘嘉栋

地球物理学报 2022, 65(12): 4685–4703 doi: 10.6038/cjg2022P0949

基于密集台阵地震背景噪声成像预测煤矿瓦斯分布

黄宇奇, 查华胜, 高级, 令狐建设, 宣金国, 周建斌, 董润平, 霍晶晶, 张海江

地球物理学报 2021, 64(11): 3997–4011 doi: 10.6038/cjg202100483

四川盐源盆地短周期密集台阵背景噪声分布特征分析

田原, 瞿辰, 王伟涛, 于常青, 李丽

地球物理学报 2020, 63(6): 2248–2261 doi: 10.6038/cjg2020N0063

密集台阵背景噪声成像揭示郟庐断裂带潍坊段地壳浅层速度结构及变形特征

靳佳琪, 罗松, 姚华建, 田晓峰

地球物理学报 2023, 66(2): 558–575 doi: 10.6038/cjg2022P0934



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈月, 包乾宗, 胡景等. 2025. 基于密集地震台阵背景噪声成像的汉中盆地及邻区三维速度结构分析. 地球物理学报, 68(8): 3103-3118, doi: 10.6038/cjg2024R0629.

Chen Y, Bao Q Z, Hu J, et al. 2025. Analysis of 3-D velocity structure in Hanzhong basin and adjacent areas based on ambient noise tomography from dense seismic arrays. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 68(8): 3103-3118, doi: 10.6038/cjg2024R0629.



基于密集地震台阵背景噪声成像的汉中盆地及邻区三维速度结构分析

陈月¹, 包乾宗^{1,2*}, 胡景¹, 赵韬³, 王莹³, 刘雨婷¹

1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

2 海洋油气勘探国家工程研究中心, 北京 100028

3 陕西省地震局, 西安 710068

摘要 汉中盆地位于秦岭造山带与上扬子板块的交接之处, 西侧紧邻松潘—甘孜地块, 是研究新生代以来秦岭造山带隆升、青藏高原东北缘向外扩展的理想区域. 本文利用 58 个宽频地震台站在 2014 年 1 月至 3 月的连续波形记录, 对背景噪声做互相关并采用时间尺度的相位加权叠加方法增强信噪比, 进而提取出 2~30 s 内的基阶瑞利面波相速度频散曲线. 通过面波走时直接反演方法获得汉中盆地及邻区地壳 (2~30 km) 的高分辨率三维 S 波速度结构. 研究结果显示: (1) 汉中盆地浅部速度存在较明显的东西差异, 西侧低速区域比东侧更深, 反映了盆地西部断拗陷、东部浅断陷的构造特点. 盆地上地壳速度层向南倾斜, 这可能受到了北侧秦岭山脉在新生代快速隆升的影响. 此外, 印支期到燕山期的沉积间断可能导致了盆地中、上地壳出现 S 波速度跃升的情况. (2) 秦岭造山带在中、上地壳呈现出特殊的反地壳速度结构特征. 其中, 上地壳的显著高速体推测与古生代板块俯冲碰撞导致高压超高压变质岩的产生以及后续多期次的折返有关. 秦岭中地壳的低速异常主要反映了长英质的地壳组分, 这可能是由于中生代的拆沉作用造成了下地壳基性岩层的缺失. (3) 研究区域中、下地壳未出现明显低速异常, 意味着新生代青藏高原东缘的中、下地壳流可能未向东流入秦岭及汉中盆地.

关键词 汉中盆地; 秦岭造山带; 背景噪声成像; 中、下地壳流

中图分类号 P315

收稿日期 2023-09-20, 2024-09-08 收修定稿

DOI: 10.6038/cjg2024R0629

CSTR: 32084.14.cjg2024R0629

Analysis of 3-D velocity structure in Hanzhong basin and adjacent areas based on ambient noise tomography from dense seismic arrays

CHEN Yue¹, BAO QianZong^{1,2*}, HU Jing¹, ZHAO Tao³, WANG Ying³, LIU YuTing¹

1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100028, China

3 Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China

Abstract The Hanzhong basin, located at the junction of the Qinling orogenic belt and the Upper Yangtze

基金项目 国家重点研发计划项目“高铁地震学研究与应用示范”(2021YFA716902), 国家自然科学基金(42474160, 42104051), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“高铁地震数据分析与应用”(2021JM-156), 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102262103, 300102264910), 地震科技星火计划(XH23038A)联合资助.

第一作者简介 陈月, 女, 博士研究生, 主要从事背景噪声成像研究. E-mail: 2021126008@chd.edu.cn

*** 通讯作者** 包乾宗, 男, 长安大学教授, 主要从事地震数据稀疏表示与重建、地震全波形反演、高铁地震学等领域的教学与科研工作. E-mail: qzbao@chd.edu.cn

plate, is adjacent to the Songpan-Garzê block to the west. It is an ideal region for studying the uplift of the Qinling orogenic belt and the outward expansion of the northeastern margin of the Tibetan Plateau since the Cenozoic. In this study, continuous waveform records from 58 broadband seismic stations were used from January to March 2014. Cross-correlation of ambient noise was performed, and the time-scale phase-weighted stacking method was employed to enhance the signal-to-noise ratio. As a result, phase velocity dispersion curves of the fundamental Rayleigh waves in the range of 2 ~ 30 s were extracted. Using the direct inversion method of surface wave travel times, high-resolution 3-D S-wave velocity structure in the crust (2 ~ 30 km) of the Hanzhong basin and adjacent areas was obtained. The results reveal that: (1) There is an obvious east-west difference in the velocity of the shallow basin that the low-velocity area in the west is deeper than that in the east, reflecting the tectonic characteristics of the western fault depression and the eastern shallow fault depression in the Hanzhong basin. The upper crustal velocity layer of the basin displays southward tilting, likely influenced by the rapid uplift of the Qinling Mountains in the north during the Cenozoic. Furthermore, sedimentary discontinuities from the Indosinian to the Yanshanian periods caused abrupt increases in S-wave velocity within the middle-upper crust of the basin. (2) The Qinling orogenic belt exhibits special inverted velocity structure characteristics in the middle-upper crust. The significant high-velocity body in the upper crust is inferred to be related to the generation of high pressure-ultrahigh pressure metamorphic rocks resulting from Paleozoic plate subduction and collision, as well as subsequent multiple stages of exhumation. The low-velocity anomaly in the middle crust of the Qinling, primarily reflecting felsic crustal components, may be due to the removal of lower mafic crust by delamination during the Mesozoic. (3) In the study area, there is no notable low-velocity anomaly in the middle-lower crust, suggesting that the middle-lower crustal flow on the eastern margin of the Tibetan Plateau during the Cenozoic may not flow eastward into Qinling and Hanzhong basin.

Keywords Hanzhong basin; Qinling orogenic belt; Ambient noise tomography; Middle-lower crustal flow

0 引言

汉中盆地是晚新生代形成的中小型断陷盆地,盆地南北两侧分别受控于汉中盆地南缘断裂和勉略缝合带,东侧则以大巴山弧形推覆体主断裂西翼为界(张国伟, 2015). 盆地在地质构造上隶属于上扬子陆块,位于秦岭造山带与大巴山弧形褶皱带之间,西侧与松潘—甘孜地块相连(图 1). 独特的地理位置使其成为多个重要地质单元的交汇区,决定了它将长期受到周缘地块活动的共同影响,具有较复杂的构造演化历史(王明明等, 2013). 盆地北缘的秦岭造山带是中国大陆内部最重要的造山带之一,自新元古代以来经历了长期多阶段的构造演化过程(张国伟等, 2001). 因此,汉中盆地与秦岭造山带存在着十分密切的构造联系(裴先治等, 2002; 张国伟等, 2003).

在汉中盆地曾开展过周缘断裂活动性(王明明等, 2013; 李晓妮等, 2013)、盆地发育机制及构造演化(王明明, 2014)等研究,并取得了一系列有价值的成果. 对于盆地深部结构,已有大量学者采用人工地震探测(任隽等, 2012; 滕吉文等, 2014)、接收函数

(Chen et al., 2010; He et al., 2014)、地震或噪声层析成像(郑晨等, 2016; 潘佳铁等, 2017; 付媛媛和肖卓, 2020; Li et al., 2023)等方法,在陕西及其邻近较大的范围内开展了有关地壳和上地幔深度的研究.

新生代以来,印度板块向欧亚板块俯冲碰撞导致青藏高原地壳增厚和变形(Yin and Harrison, 2000; Tapponnier et al., 2001; Li et al., 2012, 2015; Yang et al., 2012; Tan et al., 2014),研究认为中、下地壳流在青藏高原东部的变形中可能起着重要作用(Enkelmann et al., 2006). 青藏高原抬升后,向东逃逸的地壳流受到刚性地块(四川盆地)的阻挡,分两支向东南和东北方向流动(Clark and Royden, 2000; Enkelmann et al., 2006). 位于四川盆地与鄂尔多斯块体之间的秦岭造山带与汉中盆地,有可能作为青藏高原东部地壳流东北分支的通道(张国伟, 2015),因此对于汉中盆地及邻区的精细地壳速度结构仍需要更深入的研究.

本文利用中国地震科学台阵探测项目二期在汉中盆地及邻区布设的共 58 个宽频台站记录的连续波形数据,使用背景噪声面波成像方法得到盆地及邻区分辨率较高的地壳三维 S 波速度(V_S)结构.

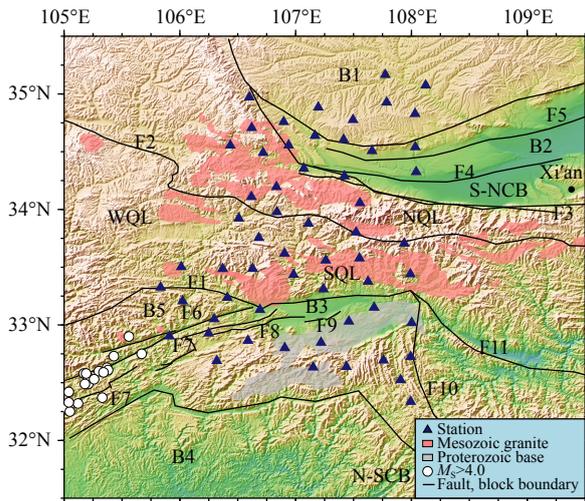


图1 研究区地质背景及地震台站分布图

白色圆圈代表2009年以来发生的 $M_S > 4.0$ 的地震事件, 数据来源于国家地震科学数据中心 (<http://data.earthquake.cn>)。S-NCB: 华北板块南缘; N-SCB: 华南板块北缘; WQL: 西秦岭造山带; SQL: 南秦岭造山带; NQL: 北秦岭造山带; B1: 鄂尔多斯块体; B2: 渭河盆地; B3: 汉中盆地; B4: 四川盆地; B5: 碧口地块; F1: 勉略缝合带; F2: 商丹缝合带; F3: 秦岭山前断裂; F4: 渭河断裂; F5: 乾县—富平断裂; F6: 青川断裂; F7: 茶坝—林庵寺断裂; F8: 梁山南缘断裂; F9: 汉中南缘断裂; F10: 巴山断裂; F11: 安康断裂。构造信息参考张王伟 (2015)。

Fig. 1 Map of geological settings and seismic station distribution in the study area

The white circles represent $M_S > 4.0$ earthquake events since 2009, according to the National Earthquake Data Center (<http://data.earthquake.cn>). S-NCB: Southern North China Block; N-SCB: Northern South China Block; WQL: West Qinling orogenic belt; SQL: South Qinling orogenic belt; NQL: North Qinling orogenic belt; B1: Ordos block; B2: Weihe basin; B3: Hanzhong basin; B4: Sichuan basin; B5: Bikou block; F1: Mianlue suture zone; F2: Shangdan suture zone; F3: Qinling mountain front fault; F4: Weihe fault; F5: Qianxian-Fuping fault; F6: Qingchuan fault; F7: Chaba-Lin'an temple fault; F8: Liangshan south margin fault; F9: Hanzhong south margin fault; F10: Bashan fault; F11: Ankang fault.

The tectonic information refers to Zhang (2015).

通过分析研究区内断裂带附近的构造特征与地表地质构造之间的关系, 为汉中盆地形成机制与演化、地质及沉积环境、断裂活动性等方面研究提供更多的信息。此外, 本文进一步探究了研究区内地壳速度异常体的空间分布特征, 并分析了青藏高原东缘向东挤出和构造逃逸对盆地及邻区的影响, 为研究该区深部的动力学进程提供一定的参考。

1 数据及处理

本文的研究区域 (32.0°N—35.5°N, 105.5°E—108.2°E) 位于汉中盆地及邻区 (图1), 面积约为 200 km × 300 km。台阵由中国地震科学台阵探测项目二

期共 58 个宽频地震台站 (CMG-3ESP) 组成, 频带宽度为 0.02 ~ 60 s, 台站的间距为 20 ~ 40 km, 收集了从 2014 年 1 月至 3 月的垂向分量连续波形数据。

原始数据预处理主要参考 Bensen 等 (2007) 的背景噪声数据处理流程。首先, 将原始数据切割为 1 h 长度, 降采样为 5 Hz。经去均值、去线性趋势、去仪器响应后, 在 2 ~ 40 s 周期频带内进行带通滤波。为了消除地震信号及重大畸变的影响, 使用滑动绝对平均法在时间域进行归一化处理。最后进行谱白化, 来拓宽背景噪声的频带宽度, 使得提取的频散曲线更加连续。

在地震背景噪声数据处理中, 通常将原始噪声序列分割成若干段来分别计算互相关函数 (Cross-Correlation Function, CCF), 再进行叠加以增强 CCF 的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)。线性叠加是一种常用的叠加方法, 通过对噪声序列进行求和平均来提高 SNR。当数据时长较短或随机噪声干扰较大时, 线性叠加抑制噪声的效果欠佳, 而时间尺度的相位加权叠加 (time-scale Phase-Weighted Stack, ts-PWS) 方法构建了更高效的时频变换来改进相干信号的提取 (Ventosa et al., 2017)。本文以 61001 台站与其余台站为例展示 ts-PWS 方法对 CCF 的改善, 图 2a 为 61001 台站与其余台站的路径分布。通过比较单一台站对使用不同叠加方法得到的 CCF 及 SNR (图 2b, c), 可以观察到 ts-PWS 有效提升了信号的 SNR。同样, 对 61001 台站与其余台站的 CCF 使用不同方法进行叠加的结果表明, ts-PWS 得到的 CCF 的 SNR 约为线性叠加的 3.3 倍, 显著地改善了恢复出的瑞利面波信号 (图 3)。文中 CCF 的 SNR 为 $20 \lg(E_s/E_g)$, 其中 E_s 为最大信号包络振幅, E_g 为平均噪声包络振幅。为了提高 CCF 的 SNR 和计算效率, 本文最终使用 ts-PWS 方法对小时长度的 CCF 进行非线性叠加。

时间域经验格林函数 (Empirical Green's Functions, EGF) 近似等于 CCF 对时间的导数。因此, 本文使用图像分析提取技术 (Yao et al., 2006, 2011) 从每个台站对获得的 EGF 中提取基阶瑞利面波的相速度频散曲线。为提高相速度频散曲线的可靠性, 采取了以下方式: (1) 选取 SNR > 7 的 CCF; (2) 频散测量时确保台间距 ≥ 2 倍波长, 以满足远场近似条件; (3) 剔除与相邻点存在明显跳变的频散数据。考虑到本研究区的台站间距变化较大 (台间距从 13 km 到 319 km 不等), 在提升中短周期相速度频

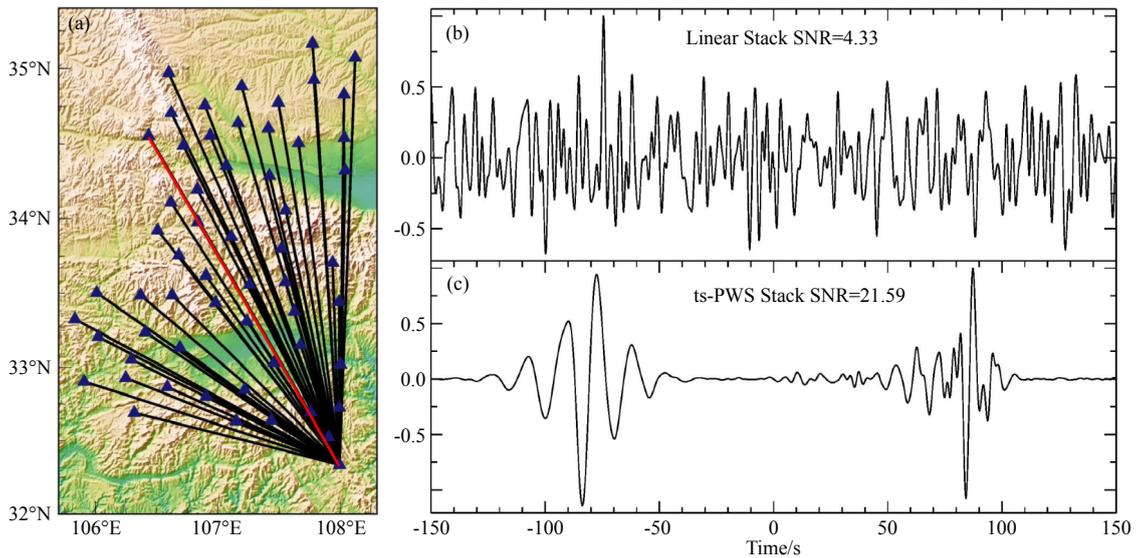


图 2 台站对路径分布及 CCF 波形

- (a) 61001 台站与其余台站的路径分布图 (红线为 61001-61048 台站对); (b) 61001-61048 台站对使用线性叠加得到的 CCF 波形及 SNR;
(c) 61001-61048 台站对使用 ts-PWS 方法得到的 CCF 波形及 SNR.

Fig. 2 Distribution of station pair ray paths and CCF waveforms

- (a) Ray path distribution between station 61001 and other stations (The red line is the path between 61001 and 61048 station); (b) CCF waveform and its SNR obtained from linear stack of station pair 61001-61048; (c) CCF waveform and its SNR obtained from ts-PWS method of station pair 61001-61048.

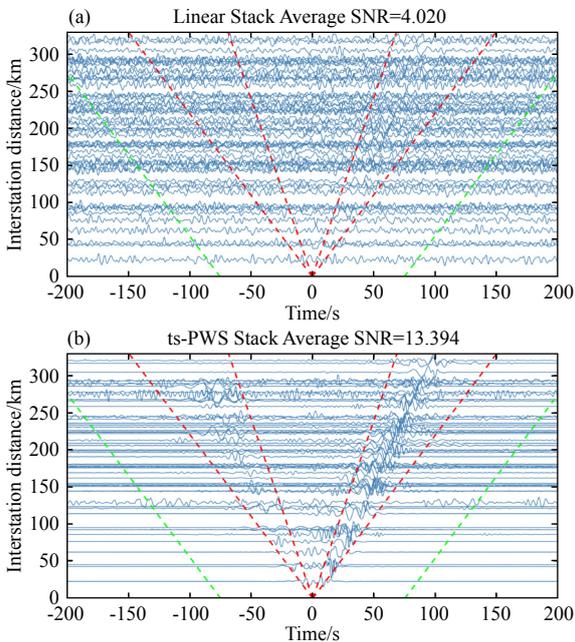


图 3 61001 台站与其余台站的 CCF 波形及 SNR

- (a) 线性叠加; (b) ts-PWS 方法叠加. 红色虚线为信号窗, 绿色虚线为噪声窗.

Fig. 3 CCF waveforms and SNRs between station 61001 and other stations

- (a) Linear stack; (b) ts-PWS method. Red dashed lines outline the window of the signal and green dashed lines outline the window of noise.

为 $1.0 \sim 3.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 频散测量最大周期设为 15 s; 而对于台间距大于等于 100 km 的台站对, 将瑞利波速度窗口设定为 $1.75 \sim 4.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 频散测量最大周期设为 40 s.

研究区地质构造背景较为复杂, 因此频散曲线的可靠性对于反演结果至关重要. 基于相似路径的台站对具有相似的频散曲线 (Zhang et al., 2018), 本文采用路径束分析方法, 计算了相似路径台站对的频散曲线均值. 然后, 剔除与均值差异较大的异常点或曲线, 以减少频散曲线的误差, 保证可靠性. 图 4a, b 分别展示了路径束分析前、后的频散曲线. 经过上述处理, 最终获得了 564 条在 2~30 s 内的基阶瑞利面波相速度频散曲线, 用于反演汉中盆地及邻区的地下三维 S 波速度结构. 本文的频散数据主要集中在 10~20 s 周期内 (图 4b), 且短周期内的相速度值变化较大 ($2 \sim 3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 表明研究区速度存在显著的横向变化.

2 反演

2.1 反演方法

Fang 等 (2015) 的面波直接反演方法已被广泛应用于不同尺度下的三维 S 波速度结构成像 (Chen et al., 2016; Zhang et al., 2020; Huang et al., 2020; 李玲

散数据准确性方面, 进一步采取了以下措施: 对于台间距小于 100 km 的台站对, 将瑞利波速度窗口设

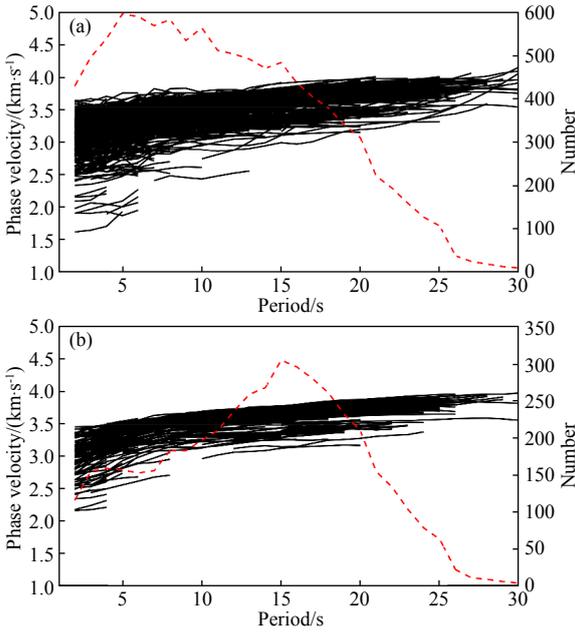


图 4 基阶瑞利面波相速度频散曲线

(a) 路径束分析前的频散曲线; (b) 路径束分析后的频散曲线。黑线表示频散曲线, 红色虚线表示每个周期的频散点数。

Fig. 4 Phase velocity dispersion curves of the fundamental Rayleigh waves

(a) Dispersion curves before path cluster analysis; (b) Dispersion curves after path cluster analysis. The black lines are the dispersion curves, and the red dashed lines represent the number of dispersion points at every period.

利等, 2020). 该方法省去了传统面波层析成像中构建二维群、相速度图的中间步骤, 直接基于面波频散走时反演获得三维 S 波速度结构, 并且考虑了复杂介质中不同周期面波射线弯曲的影响, 利用快速行进法 (Rawlinson and Sambridge, 2005) 来获得台站对之间的瑞利面波走时及射线路径. 因此, 本文采用面波直接反演方法展开研究, 将测量得到的所有不同路径、不同频率下的面波相速度频散走时, 通过直接迭代反演得到汉中盆地及邻区的三维 S 波速度结构。

2.2 初始模型及深度敏感核

初始速度模型的选取是反演过程中十分关键的步骤. 考虑到不同区域的地质构造存在较大差异, 大尺度的速度模型可能并不完全适用于区域尺度的研究. 为了降低初始模型对反演结果的影响, 本文根据前人在研究区的相关研究结果 (Shen et al., 2016; 惠少兴等, 2018; 冯红武等, 2019; Han et al., 2022; 谭友恒等, 2023), 建立了一维初始速度模型 (图 5). 通过传统面波相速度计算方法 (Herrmann, 2013), 正演获得不同模型所对应的基阶瑞利面波相速度频散曲线. 根据不同速度模型得到的相速度频散曲线与

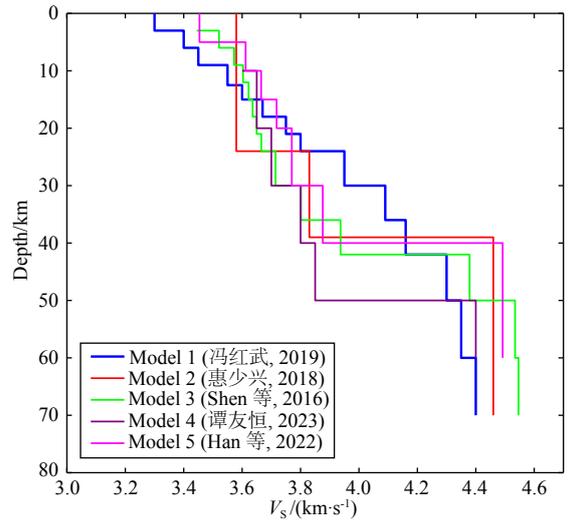


图 5 不同一维初始速度模型

Fig. 5 Different 1-D initial velocity models

实测均值频散曲线间的相关性, 选取了相关性最强 (相关系数为 0.9353) 的模型 (冯红武等, 2019) 作为本文反演的一维初始速度模型。

敏感核曲线能够体现不同深度下不同周期瑞利面波的垂向分辨率. 本文对选取的初始速度模型, 计算了在不同周期下基阶瑞利面波相速度的深度敏感核 (图 6). 可以看到, 5 s 的短周期面波对浅表和上地壳深度 (0 ~ 10 km) 最敏感, 10 ~ 15 s 的面波对中、上地壳深度 (10 ~ 20 km) 较为敏感, 20 ~ 25 s 的面波对中、下地壳深度 (30 ~ 40 km) 较为敏感。

在面波直接反演方法中, 平滑系数太小可能会

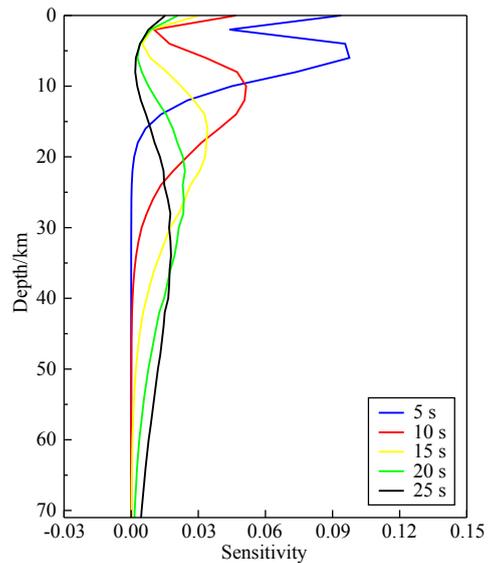


图 6 不同周期基阶瑞利面波相速度的深度敏感核曲线
Fig. 6 Sensitive kernel curves at different depths of phase velocity of the fundamental Rayleigh surface waves with different periods

过度拟合数据, 太大又会使反演所获得的模型被过度平滑. 为了选择合适的平滑系数, 本文分别计算了不同平滑系数下所对应的模型正则化项和数据残差项, 并绘制 L 曲线 (图 7) 进行分析. 在 L 曲线中, 选取拐点所对应的最佳平滑系数为 8.

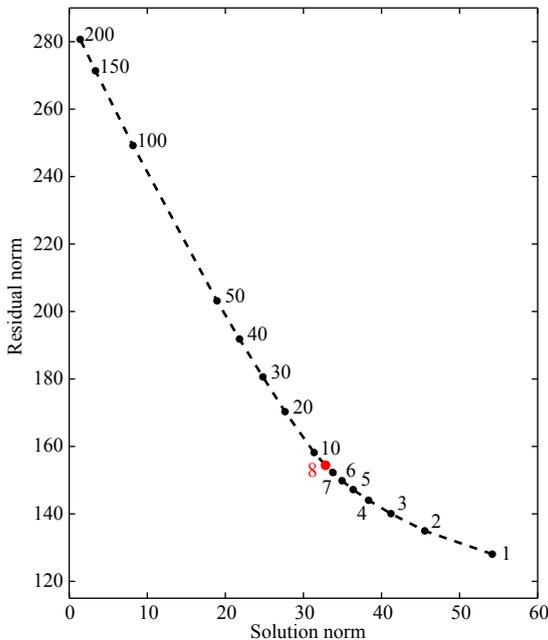


图 7 面波直接反演方法中的 L 曲线分析
红色点为最佳平滑系数.

Fig. 7 L-curve analysis of direct surface wave inversion method

The red dot is the best smoothing coefficient.

2.3 射线覆盖与分辨率

一般来说, 反演结果的分辨率主要取决于射线路径的覆盖程度. 射线覆盖越密集, 分辨率越高; 相反, 覆盖越稀疏, 分辨率则较低. 研究区不同周期射线路径分布如图 8 所示, 大部分区域被台站覆盖, 射线分布较为密集. 检测板测试是评估反演结果空间分辨率的有效手段. 根据研究区射线路径分布情况, 经过大量的测试, 最终将初始速度模型在水平方向上划分为 0.25° (东西方向) $\times 0.25^\circ$ (南北方向), 共计 15×15 个网格点. 速度异常体大小设置为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 速度扰动为 $\pm 10\%$. 为了提高浅部结构的分辨率及更好地拟合数据, 本文根据敏感核曲线 (图 6) 在深度上进行网格划分, 网格间距随深度的增加逐渐增大: $0 \sim 24$ km 以 3 km 为间隔, $24 \sim 42$ km 以 6 km 为间隔, $50 \sim 70$ km 以 10 km 为间隔, 深度网格点数为 15.

图 9 为不同深度检测板测试的结果, 研究区中部检测板得到了较好的恢复, 而研究区边缘网格形

状呈现南北向拉长, 这与射线分布的形态有关. 总体上, 检测板反演较好地恢复了真实模型, 大部分节点的速度扰动均恢复到 $\pm 10\%$, 能够分辨水平方向 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的速度异常. $3 \sim 18$ km 的恢复效果优于 $24 \sim 30$ km, 这与 $5 \sim 20$ s 周期范围内实际射线路径较密集, 而周期超过 20 s 后实际射线路径较稀疏有关. 从检测板的恢复效果和实际射线路径覆盖的情况可知, 反演深度在 $3 \sim 30$ km 是较为可靠的. 在实际数据反演中, 采用与检测板一致的参数设置. 经过 10 次迭代后, 走时残差的标准差从最初的 2.676 s 稳定在 1.572 s (图 10), 这在一定程度上表明本文的反演过程较为稳定. 在后续的成像结果中, 裁去了研究区边界检测板测试恢复效果较差的区域.

3 三维 S 波速度结构

研究区 30 km 以上不同深度的 S 波速度分布如图 11 所示. 3 km 深度 (图 11a) 的速度异常与地表地质构造单元存在较好的关联性, 高低速异常界限与块体边界基本吻合. 在浅部, 秦岭造山带为大面积高速异常, 沉积层较厚的南鄂尔多斯块体 (B1) 西缘则呈现低速异常, 这些特征与已有的噪声成像结果 (贺伟光等, 2015; 丁文秀等, 2017; 冯红武等, 2019) 基本一致. 此外, 汉中盆地 (B3) 的浅表 S 波速度表现出明显的横向不均匀性, 低速异常主要分布在盆地西侧的勉略缝合带 (F1)、梁山南缘断裂 (F8)、青川断裂 (F6) 和茶坝—林庵寺断裂 (F7) 北东段以及汉中南缘断裂 (F9) 附近, 这与前人的研究结果 (危自根等, 2019) 较为符合. 6 km 深度 (图 11b) 处研究区的 S 波速度分布特征与浅地表 (3 km) 相似, 南鄂尔多斯块体西缘仍存在着大面积低速异常, 而汉中盆地的低速异常区域则向西侧集中.

值得注意的是, 在 12 km 深度处的上地壳, 秦岭造山带西部出现显著高速体 (High Velocity Zone, HVZ) (图 11c, $V_S > 4.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 壳内的高速通常与高密度的铁镁质岩石成分有关 (Christensen and Mooney, 1995). 在 18 km 深度处的中、上地壳, 南鄂尔多斯块体西缘的低速特征逐渐消失, 而勉略缝合带 (F1) 与秦岭山前断裂带 (F3) 之间的区域开始呈现低速异常 (图 11d). 深度为 24 km 时, 秦岭造山带地势最陡峭的区域出现低速异常体 (Low Velocity Zone, LVZ) ($V_S = 3.6 \sim 3.75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) (图 11e), 并且延续到了中、下地壳深度 (图 11f).

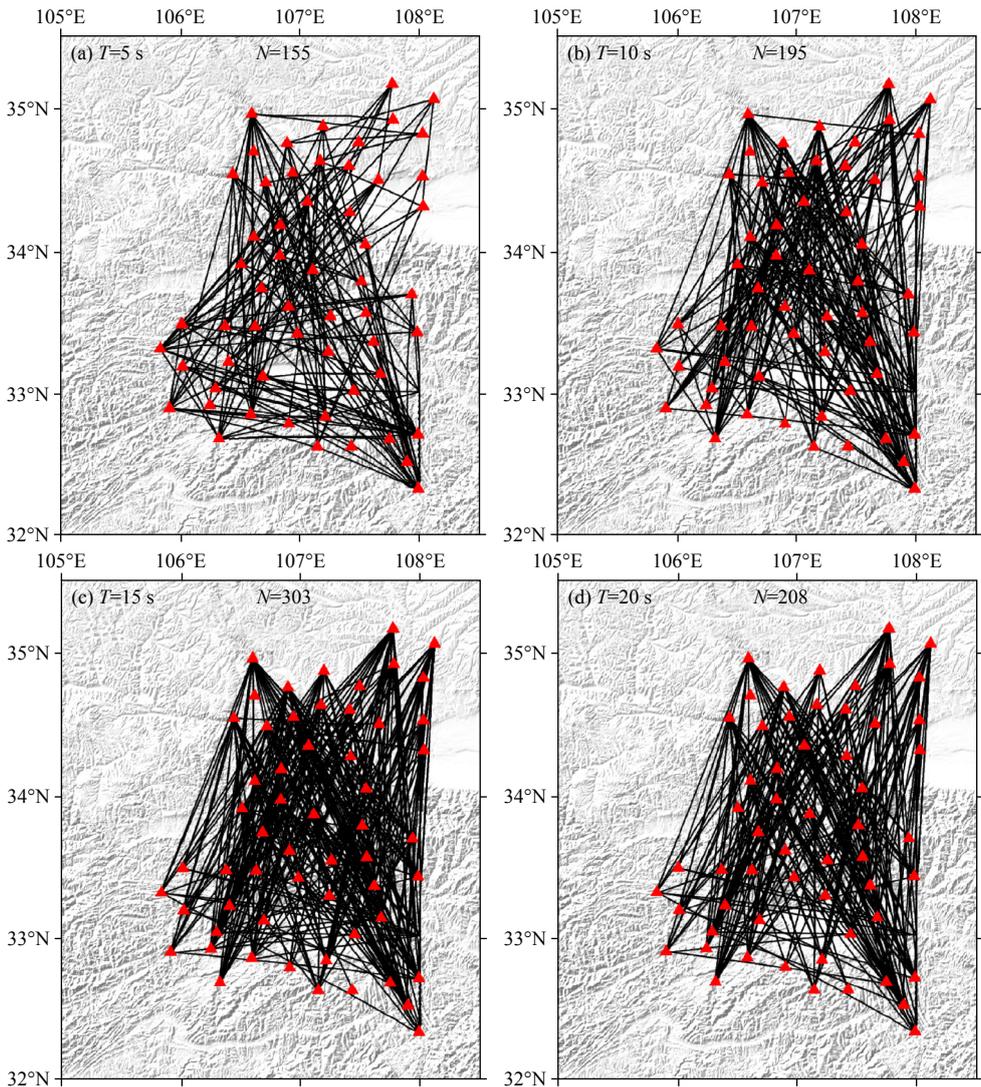


图 8 不同周期瑞利面波射线路径覆盖

T 代表周期, N 代表路径数.

Fig. 8 Ray path coverage of Rayleigh waves at different periods

T represents period and N represents number of paths.

为深入分析研究区的速度在深度上的变化特征, 本文给出了沿着不同测线 (图 11f) 垂向切割的 S 波速度剖面图. AA' 剖面沿着 33°N 自西向东穿过汉中盆地, 可以观察到汉中盆地浅部 (0~6 km) S 波速度有着明显的东西差异 (图 12), 西侧低速区域比东侧更深. 此外, 成像结果显示汉中盆地的 S 波速度值在上地壳深度呈现跳跃式增加 ($V_S = 3.0 \sim 3.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$).

BB' 剖面沿着 107°E 自南向北穿过汉中盆地 (B3)、秦岭造山带、南鄂尔多斯块体 (B1) 西缘, 其较好地反映了这 3 个构造单元在不同深度上的 S 波速度变化特征 (图 13). 剖面显示, 在秦岭山前断裂 (F3) 存在着较明显的 S 波高低速分界线. 汉中盆地及南鄂尔多斯块体西缘在上地壳都呈现低速异常, 但南

鄂尔多斯块体的低速深度更深, 这可能是因为汉中盆地是晚新生代盆地, 以第四纪沉积物为主, 沉积层较薄, 而南鄂尔多斯块体具有新生代和部分中生代低速沉积盖层 (刘宝峰等, 2003), 沉积层较厚. 特别是, BB' 剖面清晰地显示秦岭造山带显著 HVZ 下方存在着 LVZ (图 13), 这使得秦岭在中、上地壳呈现出特殊的反地壳速度结构特征.

4 讨论

4.1 汉中盆地上地壳 S 波速度结构特征

汉中盆地浅部 (0~6 km) S 波速度结构存在不均匀性, 具体表现为西侧低速区域比东侧更深. 构造

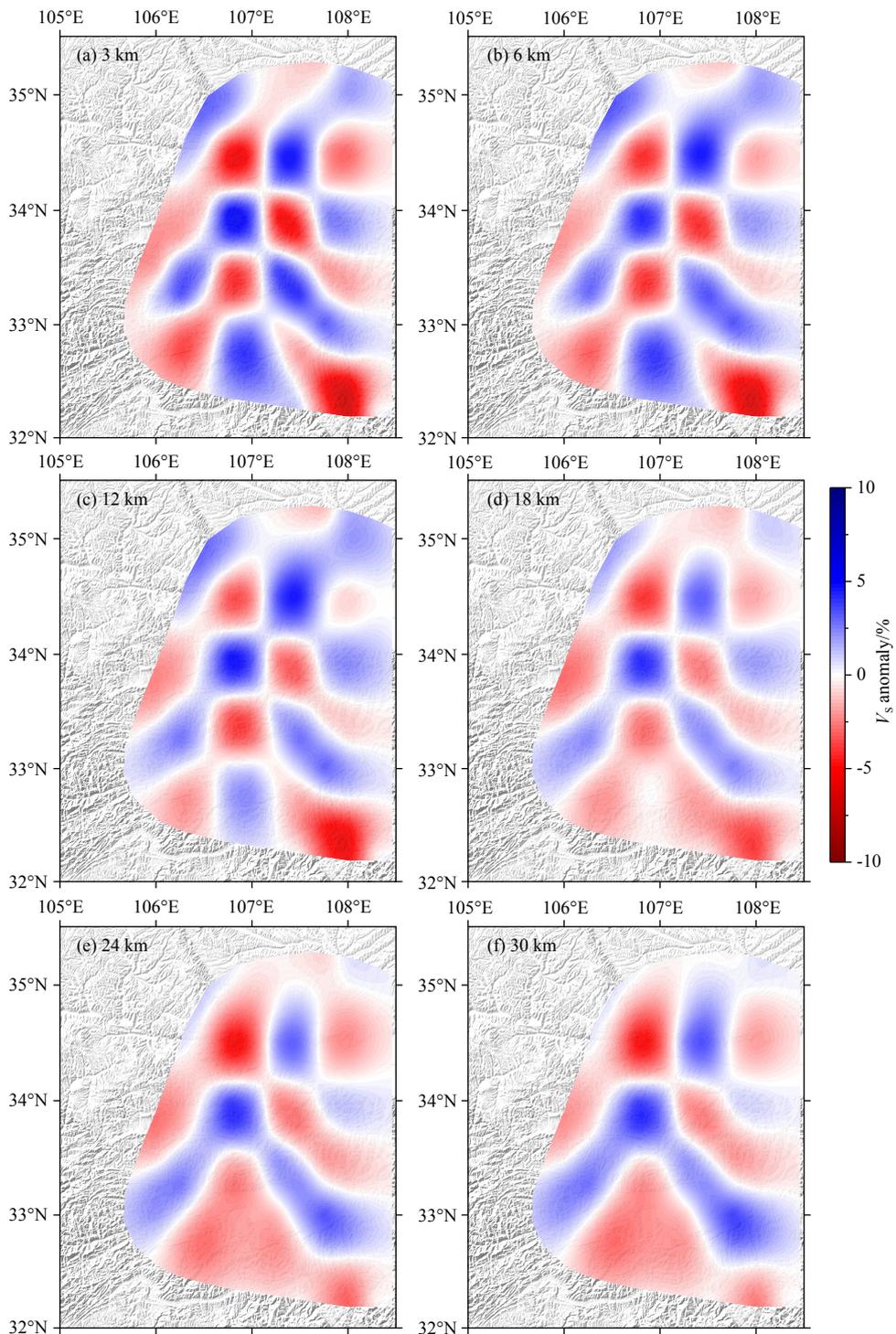


图9 不同深度检测板测试结果

Fig. 9 Checkerboard test results at different depths

应力场的研究认为盆地西侧青川断裂的右行走滑在尾端形成拉张应力区, 造成正断层的发育, 正断层的伸展作用形成了汉中盆地 (樊春等, 2008)。此外, 汉中盆地周缘断裂活动性的研究表明, 上新世以来盆地进入东西非均一性的发育阶段 (王明明等, 2013), 由于盆地西侧断裂 (青川断裂、茶坝—林庵寺断裂、

梁山南缘断裂) 的活动性较大, 使得盆地西侧断陷幅度增大, 沉积厚度增加。因此, 本文得到的盆地浅部西侧低速区域比东侧更深的速度异常特征, 较好地反映了汉中盆地西部断拗陷、东部浅断陷的构造特点。

汉中盆地属上扬子陆块, 以元古代的震旦纪古老基底和中新生代变质沉积火山岩系构造性基底为

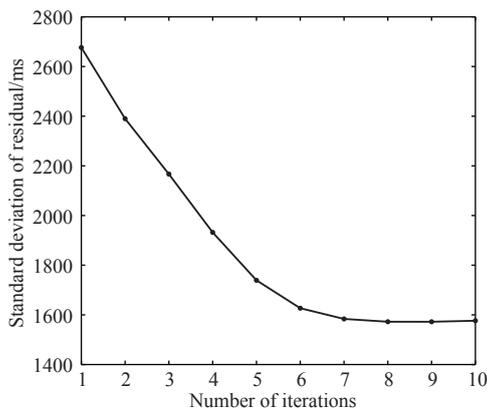


图 10 面波走时残差标准差随反迭代次数的变化

Fig. 10 Variation of standard deviation of surface wave travel-time residuals with the number of inversion iterations

主(李三忠等, 2003). 印支造山期, 盆地由海相沉积向陆相沉积转变(肖安成等, 2011). 燕山期, 秦岭造山带正处于以逆冲推覆构造为主的变形阶段, 盆地缺失了侏罗纪—白垩纪地层, 造成下三叠世与第三纪地层的不整合接触(王明明, 2014; 张国伟, 2015), 盆地内部的沉积间断可能导致了上地壳 S 波速度的跳跃式增加 ($V_S = 3.0 \sim 3.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$). 为了更清楚地分析汉中盆地 S 波速度结构, 本文绘制了盆地在在上地壳不同速度等值面的三维分布(图 14). 结果显示, 盆地在在上地壳的速度层呈现出较明显的向南倾斜特征. 磷灰石裂变径迹研究揭示了秦岭在~10 Ma 的快速隆起(刘建辉等, 2010; Liu et al., 2013), 结合该结果, 可以认为盆地北侧秦岭山脉在新生代的快速隆升可能影响了盆地内部的构造发育.

4.2 秦岭造山带的反地壳速度结构特征

秦岭造山带浅表的 V_S 较高(图 11a, b), 这与更大尺度上的成像结果(Guo and Chen, 2017; Zhao et al., 2021) 较为一致. 秦岭造山带西部中、上地壳出现显著 HVZ, 大致以勉略缝合带(F1)和秦岭山前断裂(F3)为界. 在 HVZ 下方(约 22 km)出现 LVZ(图 13), 本文展示了这一反地壳速度结构的三维空间分布特征(图 15).

针对秦岭造山带中、下地壳的 LVZ, 已有很多研究得到类似的结果. 背景噪声成像和接收函数联合反演结果显示, 秦岭造山带下地壳缺失了高速层, 表现为相对较薄的地壳(Guo and Chen, 2017). 同样, P 波速度和方位各向异性层析成像也揭示了秦岭中、下地壳存在低速异常(Li et al., 2023). 秦岭造山带中、下地壳的低速及壳内较低的 V_p/V_S (Wang C Y et al., 2014; Guo and Chen, 2016), 说明低速物质主要为长英质. 因此, 秦岭中、下地壳呈现低速的原因可能是由于中生代华南板块和华北板块的陆陆碰

撞, 导致地壳增厚发生拆沉, 进而使得该区域下地壳基性岩层缺失(Guo and Chen, 2017; 陈洁等, 2020; Li et al., 2023). 秦岭地区广泛分布的中生代花岗岩(秦江锋和赖绍聪, 2011)也证明了这一点.

与本文获得的秦岭壳内 HVZ 特征类似, 国内外其他研究区域也在壳内深度观察到了超高速异常. 例如: 天山及邻区的地震背景噪声成像(Guo et al., 2010)结果显示, 西昆仑山麓与天山山麓之间的刚性塔里木盆地在地表呈现出超高速特征(剖面显示深度为 10 km 时, $V_S = 4.0 \sim 4.25 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$); 阿拉伯—欧亚板块碰撞形成的扎格罗斯山脉地区的地震面波层析成像结果表明, 扎格罗斯山脉在壳内(14 km)呈现出超高速($V_S = 3.77 \sim 4.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)(VahidRavesh et al., 2023). 对于超高速体如何出现在较浅的壳内深度, 目前仍存在不同的解释(Dashti et al., 2020; Talebi et al., 2020; 张立飞和王杨, 2020).

近年来, 北秦岭造山带东部代表高压超高压变质作用矿物的相继发现为秦岭造山带的深俯冲和折返过程提供了直接证据(Wang H et al., 2014; 陈丹玲等, 2015; 宫相宽等, 2016). 最近, 在北秦岭造山带西部的天水地区, 也发现了与高压超高压变质作用有关的榴闪岩(唐源等, 2022). 岩相学研究表明, 该区的榴闪岩经历了~500 Ma 的榴辉岩相变质作用, 并叠加了~450 Ma 和~420 Ma 的两期退变质改造(唐源等, 2022), 这表明在秦岭造山带东西连接部位可能经历了大陆深俯冲的高压超高压变质作用及后续两期的折返. 此外, 北秦岭早古生代花岗质岩体的研究表明, 北秦岭高压超高压变质岩的主体峰期及两期退变质时代与北秦岭三期岩浆岩的侵位时代大致相同(张成立等, 2013), 并且提出三期岩浆岩的形成分别对应于陆壳深俯冲加厚、深俯冲板片断离和碰撞后伸展的构造背景, 这可能与秦岭造山带高压超高压变质岩的折返存在密切联系.

综合相关研究分析, 本文在秦岭造山带西部观测到的 HVZ 可能与古生代板块俯冲导致高压超高压变质岩的产生以及后续多期次的折返有关. 古生代北秦岭和南秦岭地块之间经历了多阶段俯冲造山作用(张国伟等, 2019): ~500 Ma, 商丹洋岩石圈向北深俯冲至北秦岭之下(Dong et al., 2015; Dong and Santosh, 2016), 地壳的强烈变形和缩短增厚导致温度和压力增高, 在深部发生了榴辉岩相变质作用(Leech, 2001)生成了高压超高压变质岩; ~470—430 Ma, 俯冲板片断离, 高压超高压岩石折返至下地壳(陈丹玲等, 2019).

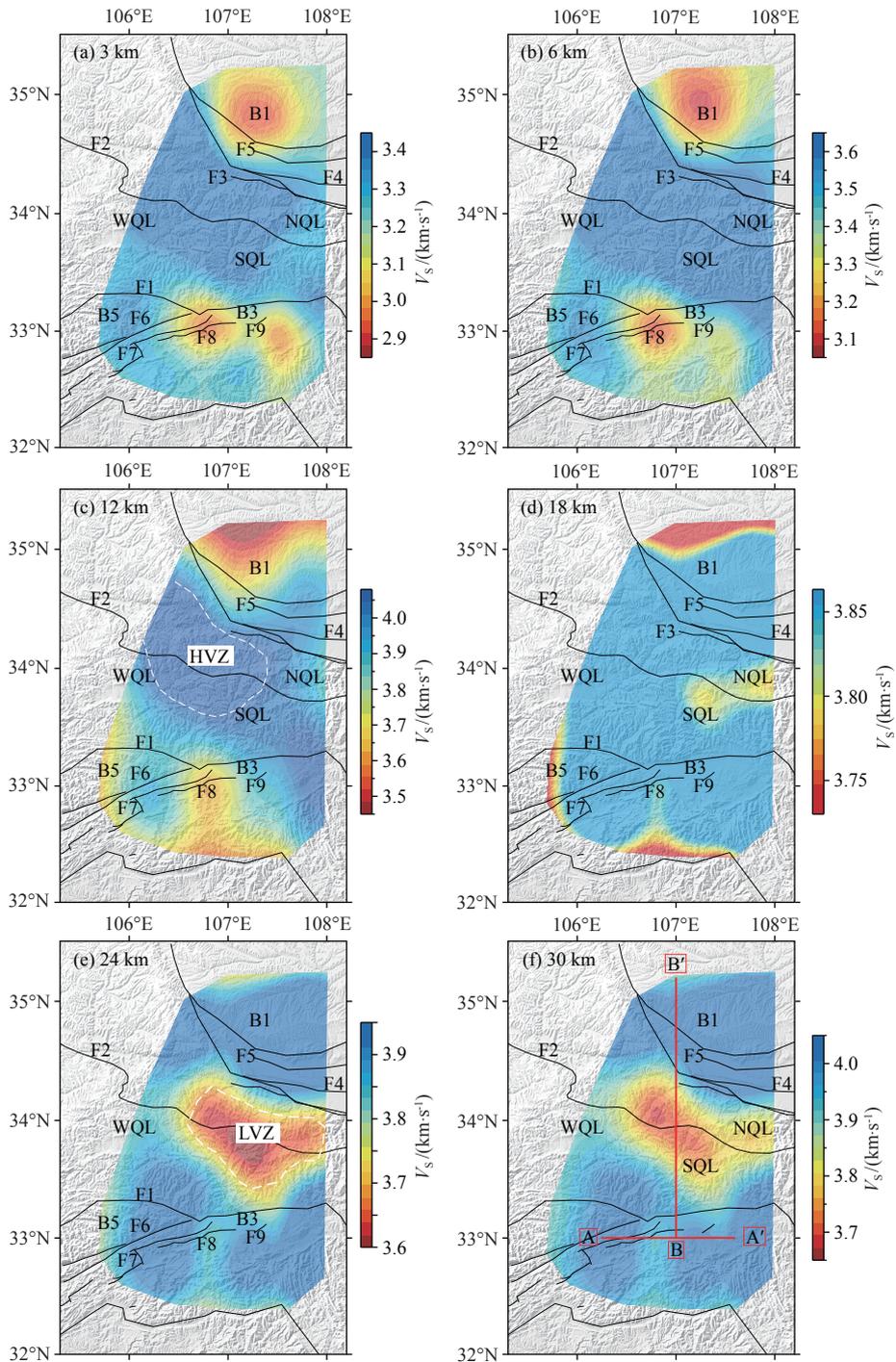


图 11 不同深度的 S 波速度水平切片

(f) 中两条红线分别代表 AA' 和 BB' 剖面。

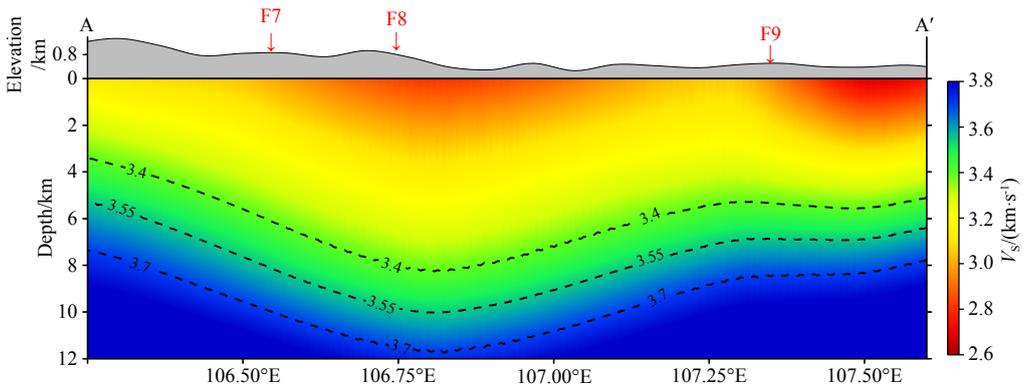
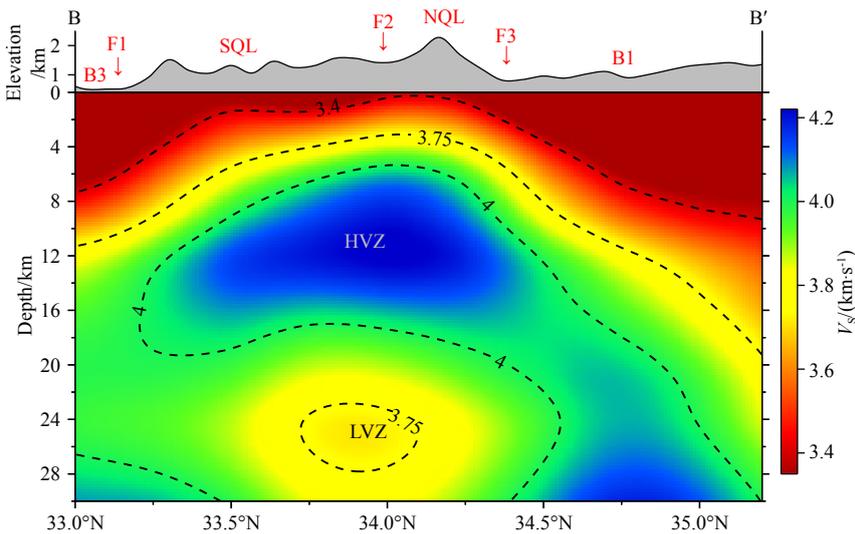
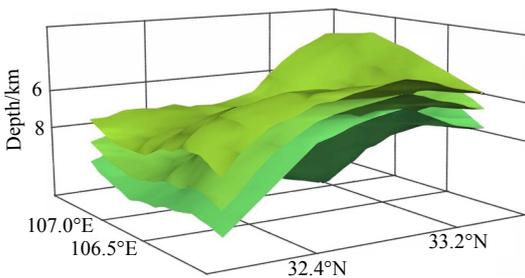
Fig. 11 Images of S-wave velocity distribution at different depths

Two red lines in (f) represent AA' and BB' profiles.

在~430—400 Ma 的造山作用后期, 商丹洋俯冲消减成缝合带, 地壳伸展减薄, 高压超高压岩石再次抬升 (罗芬红等, 2018) 至壳内深度, 从而在北秦岭西部的商丹缝合带 (F2) 下方呈现出超高速异常 (图 11c, 图 13). 本文的结果也进一步佐证了秦岭造山带西、东段可能存在一条统一的新生代高压超高压变质岩

带 (唐源等, 2022).

地质学及岩石学研究表明, 北秦岭的高压超高压岩主要来自于秦岭岩群 (宫相宽等, 2016; 陈丹玲等, 2019; 唐源等, 2022). 秦岭岩群作为北秦岭造山带中变形变质最强烈的单元, 代表了北秦岭元古代寒武纪的基底变质杂岩系 (Dong et al., 2015; Dong

图 12 沿着测线 AA' 的 V_S 剖面与地形图Fig. 12 V_S profile and topographic map along the profile line AA'图 13 沿着测线 BB' 的 V_S 剖面与地形图Fig. 13 V_S profile and topographic map along the profile line BB'图 14 汉中盆地上地壳深度 V_S 等值面 ($V_S=3.55, 3.6, 3.65 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 的三维分布图Fig. 14 3-D distribution of V_S isosurfaces ($V_S=3.55, 3.6, 3.65 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) of upper crustal depth in the Hanzhong basin

and Santosh, 2016). 此外, 从古生代至中生代秦岭各微板块 (北秦岭板块、商丹洋板块、南秦岭板块、勉略洋板块) 之间还发生了多阶段的板块俯冲碰撞 (Dong et al., 2015; Dong and Santosh, 2016). 由于秦岭地区经历了多阶段复杂的构造运动, 推测可能来源

于秦岭岩群的 HVZ 主要为古老的基底变质岩, 在折返到壳内深度后, 还叠加了不同构造背景下的混合岩化作用, 这可能促使其呈现高速特征.

4.3 青藏高原中、下地壳低速体

青藏高原东北部的向外扩展是地球科学领域的热点问题. 据前人研究表明, 在下地壳深度存在着青藏高原低速物质向东运移的现象 (Zheng et al., 2010; Liu et al., 2014; Wang et al., 2020). 青藏高原低速物质在向东运移的过程中受到刚性地壳 (四川盆地) 的阻拦, 分两支分别向东南和东北方向移动 (Clark and Royden, 2000; Enkelmann et al., 2006). 近年来, 许多地球物理研究陆续在川滇地块观测到了东南支的地壳流 (Bai et al., 2010; Bao et al., 2015), 但青藏高原东缘中、下地壳低速体的北部边界一直存在争议 (Yang et al., 2012; 范文渊等, 2015; Zheng D et al., 2016). 不少学者认为青藏高原中、下地壳低速体

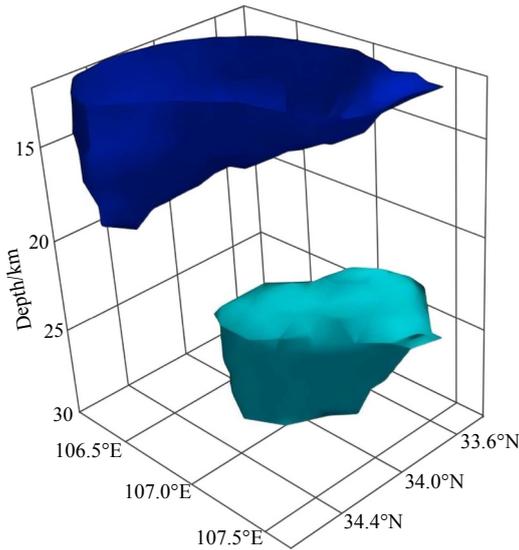


图 15 秦岭造山带 V_S 等值面 ($V_S=3.8, 4.1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 的三维分布图

Fig. 15 3-D distribution of V_S isosurfaces ($V_S=3.8, 4.1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) in the Qinling orogenic belt

向北运移抵达了柴达木地块, 并且紧邻西秦岭断裂带南侧 (Zheng et al., 2010; Wang et al., 2020), 柴达木地块及巴颜喀拉地块的 S 波低速值约为 $3.4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (谭友恒等, 2023). 本文的成像结果显示, 秦岭造山带及汉中盆地在 中、下地壳 (图 13) 的 S 波速度高于巴颜喀拉地块的速度, 没有呈现显著的低速异常 (Song et al., 2018; Li et al., 2022). 其次, P 波速度和方位各向异性层析成像 (Li et al., 2023) 及 Ps 分裂分析 (Li and Wu, 2022) 结果显示, 秦岭地区中、下地壳为近南北向的快波速度方向, 意味着秦岭很大可能不存在向东流动的中、下地壳流。

结合相关研究, 本文认为青藏高原东缘的中、下地壳低速流 ($V_S < 3.4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 可能未延伸至汉中盆地及秦岭造山带. 接收函数与噪声数据联合反演 (刘巍等, 2021)、基于宽频带密集台阵的结果分析 (叶卓等, 2018) 也都表明青藏高原中、下地壳的低速物质并没有大规模挤入秦岭造山带, 这在一定程度上佐证了本文的观点. 青藏高原低速物质向外挤出并在秦岭向东流动的中、下地壳流模型 (Clark and Royden, 2000; Enkelmann et al., 2006), 可能不太适合解释秦岭造山带及汉中盆地新生代以来的变形。

本研究区的宽频带地震仪覆盖范围较小, 对上地幔深度没有足够的分辨率, 还需更多的台站波形数据及有关资料扩大研究区域, 才能对青藏高原东缘中、下地壳流的北东向运移做更深入的探讨。

5 结论

本研究采用地震背景噪声成像技术处理了 在汉中盆地及邻区布设的共 58 个宽频台站记录的连续波形数据. 通过计算背景噪声互相关, 利用时间尺度的相位加权叠加方法和时频分析技术, 经过台站路径束分析, 最终获得了 564 条周期为 2~30 s 的基阶瑞利面波相速度频散曲线. 利用面波走时直接反演方法得到了汉中盆地及邻区分辨率较高的地壳三维 S 波速度结构, 并结合该区已有的地质和地球物理研究成果, 主要得到以下结论:

(1) 汉中盆地及邻区地壳浅表的速度分布与地表地质构造单元存在着较好的关联性. 秦岭山脉在浅部为高速特征, 南鄂尔多斯块体及汉中盆地则表现为与沉积层有关的低速特征。

(2) 汉中盆地浅部速度存在明显的东西差异, 具体表现为西侧低速区域比东侧更深, 该异常较好地反映了汉中盆地西部断拗陷、东部浅断陷的构造特点. 盆地上地壳速度层向南倾斜, 这可能与北侧秦岭山脉在新生代的快速隆升有关. 此外, 印支期到燕山期的沉积间断, 可能导致了盆地在中、上地壳的 S 波速度出现跳跃式增加。

(3) 秦岭造山带中、上地壳呈现出特殊的反地壳速度结构特征. 秦岭西部上地壳的显著高速异常体, 推测与古生代板块俯冲碰撞导致的高压超高压变质岩的产生以及后续多期次的折返有关, 其可能来自北秦岭造山带中变形变质最强烈的秦岭岩群. 秦岭中地壳的低速异常主要对应于长英质的地壳组分, 可能是由于中生代华南板块与华北板块碰撞导致地壳增厚发生拆沉, 使得下地壳基性岩层缺失。

(4) 研究区中、下地壳未出现显著低速异常. 结合相关研究, 认为青藏高原东缘的中、下地壳低速物质可能未向东流入秦岭及汉中盆地. 青藏高原地壳通道流模型可能不太适用于解释秦岭造山带和汉中盆地自新生代以来的变形。

致谢 感谢审稿专家和编辑建设性的建议, 感谢陕西省地震局为本研究提供的地震波形数据, 感谢中国科学技术大学姚华建教授团队提供的背景噪声程序和面波直接反演程序, 感谢中国科学院地质与地球物理研究所田小波研究员给予的帮助和建议。

References

Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the

- eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 3(5): 358-362, doi: [10.1038/ngeo830](https://doi.org/10.1038/ngeo830).
- Bao X W, Sun X X, Xu M J, et al. 2015. Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 415: 16-24, doi: [10.1016/j.epsl.2015.01.020](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.01.020).
- Brian 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, doi: [10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x).
- Chen D L, Ren Y F, Gong X K, et al. 2015. Identification and its geological significance of eclogite in Songshugou, the North Qinling. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 31(7): 1841-1854.
- Chen D L, Liu L, Liao X Y, et al. 2019. The distribution, *P-T-t* evolution and formation mechanism of HP-UHP metamorphic rocks in the North Qinling Orogenic Belt. *Earth Science* (in Chinese), 44(12): 4017-4027, doi: [10.3799/dqkx.2019.256](https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.256).
- Chen J, Chen Y S, Guo Z, et al. 2020. Crustal structure of the Ordos block and adjacent regions along an N-S profile of 107.6°E. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(7): 2592-2604, doi: [10.6038/cjg2020M0659](https://doi.org/10.6038/cjg2020M0659).
- Chen K X, Hao K C, Brown D, et al. 2016. Three-dimensional ambient noise tomography across the Taiwan Strait: The structure of a magma-poor rifted margin. *Tectonics*, 35(8): 1782-1792, doi: [10.1002/2015TC004097](https://doi.org/10.1002/2015TC004097).
- Chen Y L, Niu F L, Liu R F, et al. 2010. Crustal structure beneath China from receiver function analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B3): B03307, doi: [10.1029/2009JB006386](https://doi.org/10.1029/2009JB006386).
- 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(B6): 9761-9788, doi: [10.1029/95JB00259](https://doi.org/10.1029/95JB00259).
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28(8): 703-706, doi: [10.1130/0091-7613\(2000\)28<703:TOBTEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<703:TOBTEM>2.0.CO;2).
- Dashti F, Lucente F P, Motaghi K, et al. 2020. Crustal scale imaging of the Arabia-central Iran collision boundary across the Zagros suture zone, West of Iran. *Geophysical Research Letters*, 47(8): e2019GL085921, doi: [10.1029/2019GL085921](https://doi.org/10.1029/2019GL085921).
- Ding W X, Fu Y Y, Gao Y, et al. 2017. Phase velocity tomography of Rayleigh in Qinling-Dabie and its adjacent areas using ambient seismic noise. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(8): 2959-2968, doi: [10.6038/cjg20170805](https://doi.org/10.6038/cjg20170805).
- Dong Y P, Zhang X N, Liu X M, et al. 2015. Propagation tectonics and multiple accretionary processes of the Qinling Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 104: 84-98, doi: [10.1016/j.jseas.2014.10.007](https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.10.007).
- Dong Y P, Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29(1): 1-40, doi: [10.1016/j.gr.2015.06.009](https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.009).
- Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. 2006. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin?. *Geological Society of America Bulletin*, 118(5-6): 651-671, doi: [10.1130/B25805](https://doi.org/10.1130/B25805).
- Fan C, Wang E Q, Wang G, et al. 2008. Dextral strike-slip and tectonic transformation of the northern Longmen Shan fault belt from Late Neogene: A case study from the Qingchuan fault. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 43(3): 417-433.
- Fan W Y, Chen Y S, Tang Y C, et al. 2015. Crust and upper mantle velocity structure of the eastern Tibetan Plateau and adjacent regions from ambient noise tomography. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(5): 1568-1583, doi: [10.6038/cjg20150510](https://doi.org/10.6038/cjg20150510).
- Fang H J, Yao H J, Zhang H J, et al. 2015. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: Methodology and application. *Geophysical Journal International*, 201(3): 1251-1263, doi: [10.1093/gji/ggv080](https://doi.org/10.1093/gji/ggv080).
- Feng H W, Yan W H, Yan S, et al. 2019. Joint inversion of ambient noise and surface wave for S-wave velocity of the crust and uppermost mantle beneath Weihe basin and its adjacent area. *Seismology and Geology* (in Chinese), 41(5): 1185-1205, doi: [10.3969/j.issn.0253-4967.2019.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4967.2019.05.008).
- Fu Y Y, Xiao Z. 2020. Ambient noise tomography of Rayleigh and Love wave in Northeast Tibetan plateau and adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(3): 860-870, doi: [10.6038/cjg2020N0239](https://doi.org/10.6038/cjg2020N0239).
- Gong X K, Chen D L, Ren Y F, et al. 2016. Identification of coesite-bearing amphibolite in the North Qinling and its geological significance. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 61(12): 1365-1378, doi: [10.1360/N972015-01277](https://doi.org/10.1360/N972015-01277).
- Guo Z, Chen Y J. 2016. Crustal structure of the eastern Qinling orogenic belt and implication for reactivation since the Cretaceous. *Tectonophysics*, 683: 1-11, doi: [10.1016/j.tecto.2016.06.007](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.007).
- 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, doi: [10.1016/j.epsl.2017.01.026](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.026).
- Guo Z, Gao X, Wang W M, et al. 2010. S-wave velocity of the crust around Tianshan Mountains inverted from seismic ambient noise tomography. *Chinese Science Bulletin*, 55(31): 3590-3598, doi: [10.1007/s11434-010-4017-3](https://doi.org/10.1007/s11434-010-4017-3).
- Han S C, Zhang H J, Xin H L, et al. 2022. USTClitho2.0: Updated unified seismic tomography models for continental China lithosphere from joint inversion of body-wave arrival times and surface-wave dispersion data. *Seismological Research Letters*, 93(1): 201-215, doi: [10.1785/0220210122](https://doi.org/10.1785/0220210122).
- He R Z, Shang X F, Yu C Q, et al. 2014. A unified map of Moho depth and V_p/V_s ratio of continental China by receiver function analysis. *Geophysical Journal International*, 199(3): 1910-1918, doi: [10.1093/gji/ggu365](https://doi.org/10.1093/gji/ggu365).
- He W G, Chen Y S, Ye Q D, et al. 2015. Ambient noise Love-wave tomography in Qinling orogeny and surrounding area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(1): 47-56, doi: [10.6038/pg20150108](https://doi.org/10.6038/pg20150108).
- 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](https://doi.org/10.1785/0220110096).
- Huang S Y, Yao H J, Lu Z W, et al. 2020. High-resolution 3-D shear wave velocity model of the Tibetan Plateau: Implications for crustal deformation and porphyry Cu deposit formation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7): e2019JB019215, doi: [10.1029/2019JB019215](https://doi.org/10.1029/2019JB019215).
- Hui S X, Jin Z D, Song X Q. 2018. Crustal velocity model of the Shaanxi region. *Technology for Earthquake Disaster Prevention (in Chinese)*, 13(2): 363-372, doi: [10.11899/zzyfy20180211](https://doi.org/10.11899/zzyfy20180211).
- Leech M L. 2001. Arrested orogenic development: Eclogitization, delamination, and tectonic collapse. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(1-2): 149-159, doi: [10.1016/S0012-821X\(00\)00374-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00374-5).
- Li L L, Huang X L, Yao H J, et al. 2020. Shallow shear wave velocity structure from ambient noise tomography in Hefei city and its implication for urban sedimentary environment. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 63(9): 3307-3323, doi: [10.6038/cjg202000097](https://doi.org/10.6038/cjg202000097).
- Li M K, Li J W, Wei Y. 2022. Lithospheric structure beneath the Qinling Orogenic Belt and its surrounding regions: Implications for regional lithosphere deformation. *Terra Nova*, 34(1): 91-101, doi: [10.1111/ter.12566](https://doi.org/10.1111/ter.12566).
- Li M K, Wu T F. 2022. Ps-splitting analysis reveals differential crustal deformation beneath the Qinling Orogenic Belt and its surrounding areas. *Geophysical Journal International*, 229(2): 853-861, doi: [10.1093/gji/ggab509](https://doi.org/10.1093/gji/ggab509).
- Li M Y, Liu S L, Yang D H, et al. 2023. Deformation of the Qinling belt revealed by P-wave velocity and azimuthal anisotropy tomography. *Geophysical Journal International*, 234(1): 263-279, doi: [10.1093/gji/ggad069](https://doi.org/10.1093/gji/ggad069).
- Li S Z, Lai S C, Zhang G W, et al. 2003. Metamorphic dynamics of the Mian-lue suture zone of Qinling orogenic belt and the southern Qinling block. *Chinese Journal of Geology (in Chinese)*, 38(2): 137-154.
- Li X N, Feng X J, Ren J, et al. 2013. Activity identification of the buried segment of Liangshan south margin fault in the west of Hanzhong basin. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 35(4): 534-542, doi: [10.3969/j.issn.0253-3782.2013.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-3782.2013.04.008).
- Li Y L, Wang C S, Zhao X X, et al. 2012. Cenozoic thrust system, basin evolution, and uplift of the Tanggula Range in the Tuotuohe region, central Tibet. *Gondwana Research*, 22(2): 482-492, doi: [10.1016/j.gr.2011.11.017](https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.11.017).
- Li Y L, Wang C S, Dai J G, et al. 2015. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan-Himalayan orogen: A review. *Earth-Science Reviews*, 143: 36-61, doi: [10.1016/j.earscirev.2015.01.001](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.01.001).
- Liu B F, Li S L, Zhang X K, et al. 2003. Study of crustal structure with S-wave data from Maqin-Jingbian profile. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 25(1): 82-88.
- Liu J H, Zhang P Z, Zheng D W, et al. 2010. The cooling history of Cenozoic exhumation and uplift of the Taibai Mountain, Qinling, China: Evidence from the Apatite Fission Track (AFT) analysis. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 53(10): 2405-2414, doi: [10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.014).
- Liu J H, Zhang P Z, Lease R O, et al. 2013. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range-Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology. *Tectonophysics*, 584: 281-296, doi: [10.1016/j.tecto.2012.01.025](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.025).
- Liu Q Y, Van der Hilst R D, Li Y, et al. 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nature Geoscience*, 7(5): 361-365, doi: [10.1038/ngeo2130](https://doi.org/10.1038/ngeo2130).
- Liu W, Guo Z, Chen Y S, et al. 2021. The crustal and uppermost mantle structure of the Qinling-Tongbai-Dabie orogenic belt from integrated geophysical observations. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 64(9): 3179-3193, doi: [10.6038/cjg202100406](https://doi.org/10.6038/cjg202100406).
- Luo F H, Chen D L, Gong X K, et al. 2018. Multi-stages partial melting of North Qinling ultrahigh pressure metamorphic terrane during exhumation. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 34(12): 3671-3689.
- Pan J T, Li Y H, Wu Q J, et al. 2017. Phase velocity maps of Rayleigh wave based on a dense coverage and portable seismic array in NE Tibetan plateau and its adjacent regions. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 60(6): 2291-2303, doi: [10.6038/cjg20170621](https://doi.org/10.6038/cjg20170621).
- Pei X Z, Zhang G W, Lai S C, et al. 2002. Main geological features of the Mianlue tectonic belt on the southern margin of the West Qinling. *Geological Bulletin of China (in Chinese)*, 21(8): 486-494.
- Qin J F, Lai S C. 2011. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Late-Triassic Granitoids from the Qinling Orogenic Belt (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Rawlinson N, Sambridge M. 2005. The fast marching method: An effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media. *Exploration Geophysics*, 36(4): 341-350, doi: [10.1071/EG05341](https://doi.org/10.1071/EG05341).
- Ren J, Peng J B, Wang F Y, et al. 2012. The research of deep structural features of Weihe basin and adjacent areas. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 55(9): 2939-2947, doi: [10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.013](https://doi.org/10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.013).
- 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, doi: [10.1093/gji/ggw175](https://doi.org/10.1093/gji/ggw175).
- Song P H, Teng J W, Zhang X M, et al. 2018. Flyover crustal structures beneath the Qinling Orogenic Belt and its tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8): 6703-6718, doi: [10.1029/2017JB015401](https://doi.org/10.1029/2017JB015401).
- Talebi A, Koulakov I, Moradi A, et al. 2020. Ongoing formation of felsic lower crustal channel by relamination in Zagros collision zone revealed from regional tomography. *Scientific Reports*, 10(1): 8224, doi: [10.1038/s41598-020-64946-w](https://doi.org/10.1038/s41598-020-64946-w).
- Tan X B, Lee Y H, Chen W Y, et al. 2014. Exhumation history and faulting activity of the southern segment of the Longmen Shan, eastern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 81: 91-104, doi: [10.1016/j.jseas.2013.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.12.002).
- Tan Y H, Yu X W, Song Q, et al. 2023. Three-dimensional shear wave velocity structure in the eastern margin of the Tibetan Plateau based on the ambient noise. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 66(3): 1050-1069, doi: [10.6038/cjg2022Q0048](https://doi.org/10.6038/cjg2022Q0048).

- Tang Y, Chen D L, Ren Y F, et al. 2022. Discovery of Early Paleozoic eclogite-facies metamorphic rocks in the western part of North Qinling Orogen and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 38(3): 585-597, doi: 10.18654/1000-0569/2022.03.01.
- Taponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671-1677, doi: 10.1126/science.105978.
- Teng J W, Li S L, Zhang Y Q, et al. 2014. Fine velocity structures and deep processes in crust and mantle of the Qinling orogenic belt and the adjacent North China craton and Yangtze craton. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 57(10): 3154-3175, doi: 10.6038/cjg20141006.
- VahidRavesh S, Shirzad T, Yaminifard F, et al. 2023. The upper crustal shear wave structure of the Zagros collision zone from local earthquake Rayleigh wave tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 343: 107079, doi: 10.1016/j.pepi.2023.107079.
- Ventosa S, Schimmel M, Stutzmann E. 2017. Extracting surface waves, hum and normal modes: Time-scale phase-weighted stack and beyond. *Geophysical Journal International*, 211(1): 30-44, doi: 10.1093/gji/ggx284.
- Wang C Y, Sandvol E, Zhu L, et al. 2014. Lateral variation of crustal structure in the Ordos block and surrounding regions, North China, and its tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 387: 198-211, doi: 10.1016/j.epsl.2013.11.033.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, et al. 2014. Deep subduction of continental crust in accretionary orogen: Evidence from U-Pb dating on diamond-bearing zircons from the Qinling orogen, central China. *Lithos*, 190-191: 420-429, doi: 10.1016/j.lithos.2013.12.021.
- Wang K M, Lu L Y, Maupin V, et al. 2020. Surface wave tomography of northeastern Tibetan Plateau using beamforming of seismic noise at a dense array. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(4): e2019JB018416, doi: 10.1029/2019JB018416.
- Wang M M, Zhou B G, Yang X P, et al. 2013. A study on the activity of the faults around and the Late Quaternary tectonic features in the Hanzhong basin. *Seismology and Geology (in Chinese)*, 35(4): 778-792, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2013.04.008.
- Wang M M. 2014. A study on developmental mechanism and tectonic evolution of the Hanzhong Basin [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator.
- Wei Z G, Chu R S, Yang X L, et al. 2019. Crustal structure and seismic activity in the Hanzhong basin and its adjacent areas. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 41(4): 445-458, doi: 10.11939/jass.20180145.
- Xiao A C, Wei G Q, Shen Z Y, et al. 2011. Basin-mountain system and tectonic coupling between Yangtze block and South Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 27(3): 601-611, doi: 10.2110/jsr.2011.25.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Zheng Y, et al. 2012. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid-crustal low velocity zone beneath Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4): B04303, doi: 10.1029/2011JB008810.
- Yao H J, Van Der Hilst R D, De Hoop M V. 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis – I. Phase velocity maps. *Geophysical Journal International*, 166(2): 732-744, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.
- Yao H J, Gouédard P, Collins J A, et al. 2011. Structure of young East Pacific Rise lithosphere from ambient noise correlation analysis of fundamental- and higher-mode Scholte-Rayleigh waves. *Comptes Rendus Géoscience*, 343(8-9): 571-583, doi: 10.1016/j.erte.2011.04.004.
- Ye Z, Gao R, Li Q S, et al. 2018. Eastward extrusion and northward expansion of the Tibetan Plateau—Discussions for the deep processes of the plateau uplift. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 63(31): 3217-3228, doi: 10.1360/N972018-00478.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280, doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.211.
- Zhang C L, Liu L, Wang T, et al. 2013. Granitic magmatism related to early Paleozoic continental collision in North Qinling. *Chinese Science Bulletin*, 58(35): 4405-4410, doi: 10.1007/s11434-013-6064-z.
- Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, et al. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Zhang G W, Dong Y P, Lai S C, et al. 2004. Mianlüe tectonic zone and Mianlüe suture zone on southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 47(4): 300-316.
- Zhang G W. 2015. Mianlüe Tectonic Zone of the Qinling Orogen and China Continental Tectonics (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Zhang G W, Guo A L, Dong Y P, et al. 2019. Rethinking of the Qinling Orogen. *Journal of Geomechanics (in Chinese)*, 25(5): 746-768, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.05.064.
- Zhang L F, Wang Y. 2020. The exhumation of high- and ultrahigh-pressure metamorphic terranes in subduction zone: Questions and discussions. *Science China Earth Sciences*, 63(12): 1884-1903, doi: 10.1007/s11430-020-9579-3.
- Zhang Y T, Li H Y, Huang Y F, et al. 2020. Shallow structure of the Longmen Shan Fault zone from a high-density, short-period seismic array. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(1): 38-48, doi: 10.1785/0120190147.
- Zhang Y Y, Yao H J, Yang H Y, et al. 2018. 3-D crustal shear-wave velocity structure of the Taiwan strait and Fujian, SE China, revealed by ambient noise tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9): 8016-8031, doi: 10.1029/2018JB015938.
- Zhao K F, Luo Y H, Yang Y J, et al. 2021. High-resolution lithospheric structures of the Qinling-Dabie orogenic belt: Implications for deep subduction and delamination of continental lithosphere. *Tectonophysics*, 806: 228799, doi: 10.1016/j.tecto.2021.228799.
- Zheng C, Ding Z F, Song X D. 2016. Joint inversion of surface wave dispersion and receiver functions for crustal and uppermost mantle structure in Southeast Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 59(9): 3223-3236, doi: 10.6038/cjg20160908.
- Zheng D, Li H Y, Shen Y, et al. 2016. Crustal and upper mantle structure beneath the northeastern Tibetan Plateau from joint analysis of receiver functions and Rayleigh wave dispersions. *Geophysical Journal International*, 204(1): 583-590, doi: 10.1093/gji/eggv469.
- Zheng Y, Yang Y J, Ritzwoller M H, et al. 2010. Crustal structure of the

northeastern Tibetan plateau, the Ordos block and the Sichuan basin from ambient noise tomography. *Earthquake Science*, 23(5): 465-476, doi: 10.1007/s11589-010-0745-3.

附中文参考文献

- 陈丹玲, 任云飞, 宫相宽等. 2015. 北秦岭松树沟榴辉岩的确定及其地质意义. *岩石学报*, 31(7): 1841-1854.
- 陈丹玲, 刘良, 廖小莹等. 2019. 北秦岭高压-超高压岩石的时空分布、 P - T - t 演化及其形成机制. *地球科学*, 44(12): 4017-4027, doi: 10.3799/dqkx.2019.256.
- 陈洁, 陈永顺, 郭震等. 2020. 沿 107.6°E 南北向剖面鄂尔多斯地块及周缘地区地壳结构. *地球物理学报*, 63(7): 2592-2604, doi: 10.6038/cjg2020M0659.
- 丁文秀, 付媛媛, 高原等. 2017. 秦岭—大别及邻区背景噪声的瑞利波层析成像. *地球物理学报*, 60(8): 2959-2968, doi: 10.6038/cjg20170805.
- 樊春, 王二七, 王刚等. 2008. 龙门山断裂带北段晚新近纪以来的右行走滑运动及其构造变换研究——以青川断裂为例. *地质科学*, 43(3): 417-433.
- 范文渊, 陈永顺, 唐有彩等. 2015. 青藏高原东部和周边地区地壳速度结构的背景噪声层析成像. *地球物理学报*, 58(5): 1568-1583, doi: 10.6038/cjg20150510.
- 冯红武, 颜文华, 严珊等. 2019. 背景噪声和地震面波联合反演渭河盆地及邻区壳幔 S 波速度结构. *地震地质*, 41(5): 1185-1205, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2019.05.008.
- 付媛媛, 肖卓. 2020. 青藏高原东北缘及邻区 Rayleigh 和 Love 波背景噪声层析成像. *地球物理学报*, 63(3): 860-870, doi: 10.6038/cjg2020N0239.
- 宫相宽, 陈丹玲, 任云飞等. 2016. 北秦岭含柯石英斜长角闪岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 61(12): 1365-1378, doi: 10.1360/N972015-01277.
- 贺伟光, 陈永顺, 叶庆东等. 2015. 秦岭及周边地区背景噪声 Love 波层析成像. *地球物理学进展*, 30(1): 47-56, doi: 10.6038/pg20150108.
- 惠少兴, 金昭娣, 宋秀青. 2018. 陕西地区地壳速度模型研究. *震灾防御技术*, 13(2): 363-372, doi: 10.11899/zzfy20180211.
- 李玲利, 黄显良, 姚华建等. 2020. 合肥市地壳浅部三维速度结构及城市沉积环境初探. *地球物理学报*, 63(9): 3307-3323, doi: 10.6038/cjg2020O0097.
- 李三忠, 赖绍聪, 张国伟等. 2003. 秦岭勉(县)略(阳)缝合带及南秦岭地块的变质动力学研究. *地质科学*, 38(2): 137-154.
- 李晓妮, 冯希杰, 任隽等. 2013. 陕南汉中盆地西部梁山南缘断裂隐伏段的活动性鉴定. *地震学报*, 35(4): 534-542, doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2013.04.008.
- 刘宝峰, 李松林, 张先康等. 2003. 玛沁-靖边剖面 S 波资料研究与探讨. *地震学报*, 25(1): 82-88.
- 刘建辉, 张培震, 郑德文等. 2010. 秦岭太白山新生代隆升冷却历史的磷灰石裂变径迹分析. *地球物理学报*, 53(10): 2405-2414, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.014.
- 刘巍, 郭震, 陈永顺等. 2021. 地球物理综合观测揭示秦岭—桐柏—大别复合造山带地壳及上地幔结构. *地球物理学报*, 64(9): 3179-3193, doi: 10.6038/cjg2021O0406.
- 罗芬红, 陈丹玲, 宫相宽等. 2018. 北秦岭超高压地体折返过程中的多期次部分熔融. *岩石学报*, 34(12): 3671-3689.
- 潘佳铁, 李永华, 吴庆举等. 2017. 基于密集流动地震台阵的青藏高原东北缘及邻区 Rayleigh 波相速度层析成像. *地球物理学报*, 60(6): 2291-2303, doi: 10.6038/cjg20170621.
- 裴先治, 张国伟, 赖绍聪等. 2002. 西秦岭南缘勉略构造带主要地质特征. *地质通报*, 21(8): 486-494.
- 秦江锋, 赖绍聪. 2011. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩成因与深部动力学. 北京: 科学出版社.
- 任隽, 彭建兵, 王夫运等. 2012. 渭河盆地及邻区地壳深部结构特征研究. *地球物理学报*, 55(9): 2939-2947, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.013.
- 谭友恒, 于湘伟, 宋倩等. 2023. 基于背景噪声研究青藏高原东缘三维横波速度结构. *地球物理学报*, 66(3): 1050-1069, doi: 10.6038/cjg2022Q0048.
- 唐源, 陈丹玲, 任云飞等. 2022. 北秦岭造山带西段早古生代榴辉岩相变质岩石的发现及其地质意义. *岩石学报*, 38(3): 585-597, doi: 10.18654/1000-0569/2022.03.01.
- 滕吉文, 李松岭, 张永谦等. 2014. 秦岭造山带与邻域华北克拉通和扬子克拉通的壳、幔精细速度结构与深层过程. *地球物理学报*, 57(10): 3154-3175, doi: 10.6038/cjg20141006.
- 王明明, 周本刚, 杨晓平等. 2013. 汉中盆地周缘断裂活动性及晚第四纪构造特征. *地震地质*, 35(4): 778-792, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2013.04.008.
- 王明明. 2014. 汉中盆地发育机制及构造演化研究 [博士学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 危自根, 储日升, 杨小林等. 2019. 汉中盆地及邻区地壳结构和地震活动性研究. *地震学报*, 41(4): 445-458, doi: 10.11939/jass.20180145.
- 肖安成, 魏国齐, 沈中延等. 2011. 扬子地块与南秦岭造山带的盆山系统与构造耦合. *岩石学报*, 27(3): 601-611, doi: 10.2110/jsr.2011.25.
- 叶卓, 高锐, 李秋生等. 2018. 青藏高原向东挤出与向北扩展——高原隆升深部过程之探讨. *科学通报*, 63(31): 3217-3228, doi: 10.1360/N972018-00478.
- 张成立, 刘良, 王涛等. 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用. *科学通报*, 58(23): 2323-2329, doi: 10.1360/csb2013-58-23-2323.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪等. 2003. 秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. *中国科学 (D 辑)*, 33(12): 1121-1135.
- 张国伟. 2015. 秦岭勉略构造带与中国大陆构造. 北京: 科学出版社.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏等. 2019. 关于秦岭造山带. *地质力学学报*, 25(5): 746-768, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.05.064.
- 张立飞, 王杨. 2020. 俯冲带高压-超高压变质地体的抬升折返机制: 问题和探讨. *中国科学: 地球科学*, 50(12): 1727-1747, doi: 10.1360/SSTe-2020-0002.
- 郑晨, 丁志峰, 宋晓东. 2016. 利用面波频散与接收函数联合反演青藏高原东南缘地壳上地幔速度结构. *地球物理学报*, 59(9): 3223-3236, doi: 10.6038/cjg20160908.

(本文编辑 陈永焱, 何燕)