

张明辉, 徐涛, 田小波, 唐国彬, 刘震, 白志明. 2025. 虚拟震源地震探测方法及其应用. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(2): 215-224. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-040.

Zhang M H, Xu T, Tian X B, Tang G B, Liu Z, Bai Z M. 2025. Virtual deep seismic sounding method and its applications. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(2): 215-224 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-040.

虚拟震源地震探测方法及其应用

张明辉¹, 徐涛^{2,3*}, 田小波^{3,4}, 唐国彬^{2,5}, 刘震⁶, 白志明^{3,4}

1 山东航空学院 信息工程学院, 滨州 256600

2 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

4 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

5 中国科学院大学, 北京 100049

6 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059

摘要: SsPmp 震相是远震直达 S 波在地表激发的下行 P 波在 Moho 面反射的震相, 具有信号能量大、信噪比高、不易受近地表沉积层和地壳小尺度结构扰动的影响等优势. 虚拟地震测深方法 (VDSS) 是近年来发展的利用 SsPmp 震相与直达 S 波震相的到时差来研究地壳厚度 (或 Moho 面深度) 的探测方法. 本文介绍了 VDSS 方法的原理、优势及其在实际应用中的表现. 研究表明, VDSS 方法在提高探测精度、降低成本、环境影响等方面具有显著优势, 且成功应用于克拉通、造山带和沉积盆地、峨眉山大火成岩省等不同地质环境中, 在探测地壳结构中展现出巨大潜力和应用价值. 但是 VDSS 方法的准确度高度依赖于地震数据的质量, 尤其是远震 S 波的清晰度和震中距的范围, 使得该方法在复杂地质结构区域的应用受到较大限制. 未来, VDSS 与传统接收函数方法、地震层析成像、重力测量等多类地球物理方法的结合, 有望为地壳结构探测提供更全面的约束.

关键词: 虚拟地震测深方法; SsPmp 震相; 地壳结构探测

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-040

中图分类号: P315

文献标识码: A

Virtual deep seismic sounding method and its applications

Zhang Minghui¹, Xu Tao^{2,3*}, Tian Xiaobo^{3,4}, Tang Guobin^{2,5}, Liu Zhen⁶, Bai Zhiming^{3,4}

1 School of Information Engineering, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256600, China

2 Key Laboratory of Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

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

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

Abstract: The SsPmp seismic phase is a seismic phase in which the downward P-wave excited by the far-field direct S-wave is reflected on the Moho surface. It has the advantages of high signal energy, high signal-to-noise ra-

收稿日期: 2024-09-20; 录用日期: 2024-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42104102); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0701-02); 山东航空学院博士科研启动费资助项目 (801002018315)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42104102), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (Grant No. 2019QZKK0701-02), and the Doctoral Research Start-up Funding Project of Shandong University of Aeronautics (Grant No. 801002018315)

第一作者: 张明辉 (1990-), 女, 副教授, 主要从事地震学成像研究. E-mail: zmhjoy@163.com

*通信作者: 徐涛 (1978-), 男, 研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: xutao@mail.iggcas.ac.cn



tio, and is not easily affected by the disturbance of near surface sedimentary layers and small-scale crustal structures. Virtual deep seismic sounding method (VDSS) is a detection method developed in recent years that uses the arrival time difference between SsPmp seismic phase and direct Ss wave seismic phase to study crustal thickness (or Moho depth). This article introduces the principles, advantages, and practical applications of the VDSS method. Research has shown that the VDSS method has significant advantages in improving detection accuracy, reducing costs, and environmental impact, and has been successfully applied in different geological environments such as the craton, orogenic belts and sedimentary basins, and the Emeishan large igneous province. It has shown great potential and application value in crustal structure detection. However, the accuracy of the VDSS method is highly dependent on the quality of seismic data, especially the clarity of far-field S-waves and the range of epicenter distance, which greatly limits the application of this method in areas with complex geological structures. In the future, the combination of VDSS with traditional receiver function methods, seismic tomography, gravity measurements, and other geophysical methods is expected to provide more comprehensive constraints for crustal structure exploration.

Keywords: virtual deep seismic sounding method; SsPmp seismic phase; crustal structure detection

0 引言

Moho 面是地球内部重要的间断面之一, 是地壳和地幔之间的过渡面. 不同的构造单元对应不同的 Moho 面形态, 如稳定克拉通地区的 Moho 面形态相对平缓, 地壳厚度接近全球大陆平均地壳厚度 (Teng et al., 2013, 2014; Zhang et al., 2011b); 部分克拉通地区, 如华北克拉通, 因发生一系列复杂构造运动, Moho 面起伏变化较大, 地壳结构复杂 (武岩等, 2018; 朱日祥, 2007; 朱日祥等, 2012); 造山带下方的 Moho 面形态较为复杂, 起伏剧烈, 地壳厚度变化较大 (嘉世旭和张先康, 2005; Laske et al., 2013; Xu et al., 2015; 张明辉等, 2015; Zhang et al., 2011a, 2013, 2014; Zheng et al., 2009). 因此, 研究 Moho 面的形态和地壳厚度有助于理解研究区域的构造环境和演化过程 (高锐等, 2009; 刘震等, 2015; Liu et al., 2017), 能为地下深部结构的精细探测提供约束 (Liu et al., 2017; Tian et al., 2015; Xu et al., 2015; 张明辉等, 2015). 传统探测 Moho 面形态的方法主要是深反射地震探测 (又称近垂直反射地震探测) (高锐等, 2009; Lü et al., 2015) 和宽角反射/折射地震探测 (Teng et al., 2013, 2014; 张明辉等, 2015; Zhang et al., 2011a, 2011b, 2013, 2014). 深反射地震探测采用小当量震源激发, 接收来自炮点下方浅层地壳中各主要界面的反射波, 探测壳内波阻抗界面的结构信息, 具有较高的横向和垂向分辨率. 宽角反射/折射地震探测采用大当量震源激发, 接收来自地壳和上地幔特定深度的反射波和回折波, 因记录的震相在空间上具

有较好的连续可追踪性, 该方法具有较高的横向分辨率, 能得到较高精度的地壳速度结构. 但是, 由于传统人工地震探测方法成本高, 易受区域环境影响, 且在资料解释方法上较多依赖于人为经验, 制约了该类方法在大范围深部探测中的应用.

天然地震成像方法利用自然界发生的地震, 探测成本相对较低, 且震源能量大, 能探测大尺度深部结构 (刘晏廷等, 2024). 其中, 接收函数法是地震领域一直使用的、通过远震 Pms 或 Smp 转换震相对岩石圈内不连续面进行成像的方法 (Chen and Ai, 2009; Kind et al., 2002; 武振波等, 2016; 张晓青等, 2024). 但是, 由于 Moho 面多次波震相的干扰, 及壳内强的速度间断面对 Moho 面震相识别的影响, 制约了接收函数法对 Moho 界面识别的准确性. 利用从背景噪声中提取的面波和体波信息也可以获得岩石圈内部界面信息 (李奇等, 2021; 马小军和吴庆举, 2025; Tibuleac and von Seggern, 2012), 但是, 由于信噪比相对较低, 该方法在探测界面方面应用较少. Owens 和 Zandt (1997) 利用 1991—1992 年中美合作在青藏高原布设的流动台阵数据, 首先从原始波形垂向分量中分别提取了 SsPmp 震相和 Sp 震相相对于直达 S 波的到时差, 通过波形模拟两个震相, 估计了台阵下方的地壳厚度和泊松比. SsPmp 震相是远震 S 波在地表激发的下行 P 波在 Moho 面反射的震相, 在地表的激发点类似于人工源炮点, 能量强、信噪比高, 利用 SsPmp 震相可以研究地壳的厚度 (Liu et al., 2019; Zandt and Randall, 1985; Zhou et al., 2000). Tseng 等 (2009) 通过发展这种方法成功探测了青藏高原

的地壳厚度, 并将该方法称为虚拟地震测深 (virtual deep seismic sounding, VDSS). 近年来, VDSS 已经成为一种新的壳幔边界成像方法, 并已成功应用于澳大利亚 (Thompson et al., 2019)、美国东西部地区 (Parker Jr et al., 2016; Yu et al., 2016)、青藏高原及其周边地区 (Chen and Jiang, 2020; 亢豆等, 2017; 史克旭等, 2020; Tian et al., 2015; Tseng et al., 2009)、峨眉山大火成岩省 (Liu et al., 2017)、华北克拉通 (Liu et al., 2018, 2020) 等地区的地壳厚度探测中. 本文旨在概述 VDSS 的工作原理、优势、局限性, 展示其在不同地质环境中的应用案例, 并探讨其未来的发展方向.

1 方法原理

地震波在传播过程中遇到速度界面会发生反射、折射, 并在此过程中会发生 P 波和 S 波之间的转换, 这种转换充当了速度界面后续反射的虚拟源. 当直达 S 波在自由表面经过一次反射后, 部分转换为 P 波, 下行 P 波在 Moho 界面反射后被台站接收到的震相, 为 SsPmp 震相 (图 1a). 对于 SsPmp 震

相, 自由表面下的 S 波到 P 波的转换是 Moho 面后续 P 波反射的虚拟源.

1.1 探测原理

对于层状各向同性介质, SsPmp 震相与直达 Ss 波震相的到时差为:

$$T_{\text{SsPmp-Ss}} = 2H \sqrt{\frac{1}{V_P^2} - p_\beta^2} \quad (1)$$

其中, $T_{\text{SsPmp-Ss}}$ 表示 SsPmp 与 Ss 之间的到时差, H 表示地壳厚度, V_P 表示地壳 P 波速度, p_β 表示入射 S 波的射线参数. 本质上, 到时差 $T_{\text{SsPmp-Ss}}$ 是地壳中 P 波的双向传播时间, 主要依赖于地壳厚度、地壳 P 波速度和入射 S 波的射线参数的变化.

对于震中距在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 之间的深源地震事件, 射线参数 p_β 一般大于最上层地幔中的 P 波速度的倒数, 下行 P 波会在 Moho 面发生全反射, 这部分转换能量几乎能全部被反射回地表, 会产生振幅与地震图垂直分量上的直达 S 波相当的 SsPmp 震相 (Liu et al., 2017; Yu et al., 2012, 2016). 利用 SsPmp 震相与 Ss 波的相对到时差, 通过已知的 P 波速度和射线参数, 可以反演地壳厚度, 研究 Moho 面的深度.

1.2 影响因素及广泛适应性

SsPmp 震相到时差及波形主要与地壳厚度、Pn 波速度、Sn 波速度、地壳平均 P 波速度、S 波速度及射线参数等因素有关 (Chen et al., 2013; Liu et al., 2018, 2020; 刘震等, 2015; Yu et al., 2013). 地壳厚度只影响 SsPmp 与 Ss 震相之间的到时差, Pn 波速度、Sn 波速度、壳内 S 波速度的改变不会影响到时差, 但会对 SsPmp 的相位产生影响, 导致 SsPmp 震相的波形发生改变; 射线参数和壳内 P 波速度对到时差和 SsPmp 的相位均有影响. 当岩石圈具有明显的横向非均匀性时, 可用射线理论对震相到时进行定量建模, 即在可观察到可靠的具有较强振幅的 SsPmp 震相的情况下, 可以利用反投影方法对壳幔边界进行成像, 其准确性取决于我们对该区岩石圈结构的了解程度, 但这种情况下会进一步扭曲 SsPmp 的平面波前面假设, 此时将无法利用射线理论对该震相进行正演模拟 (Liu et al., 2018). 当壳幔边界存在明显间断时, SsPmp 震相相移受下地壳 P 波速度、上地幔 P 波速度和射线参数控制, 表明 SsPmp 震相可以约束下地壳和上地

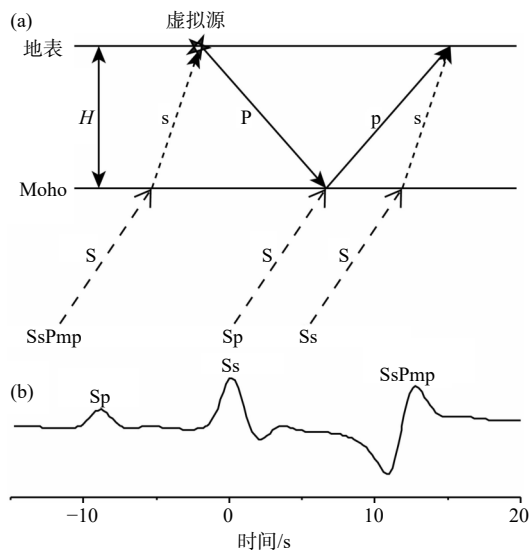


图 1 虚拟地震测深方法原理图 (引自刘震等, 2015). (a) Ss、Sp、SsPmp 震相路径示意图; (b) 给定模型 (地壳厚度为 60 km, 地壳内 P 波速度为 6.2 km/s, Pn 波速度为 8.1 km/s, 射线参数为 0.13 s/km) 下各震相间的到时关系

Fig. 1 Schematic diagram of virtual deep seismic sounding method (from Liu et al., 2015). (a) The paths of Ss, Sp and SsPmp; (b) The relationship of the arrival time among the different phases (Model parameter: the crustal thickness of 60 km, the velocity of P wave in the crust is 6.2 km/s, the uppermost mantle velocity is 8.1 km/s, the ray parameter is 0.13 s/km)

幔 P 波速度 (Liu et al., 2018) .

VDSS 方法一般选择深源地震, 以排除源区其他震相的干扰, 而 Yu 等 (2013) 对 VDSS 方法进行了改进, 通过提取垂向与径向分量的 S 子波信号并对其进行反褶积来消除近源区散射的影响, 使得该方法不仅可以利用深源地震记录, 也可以利用浅源地震记录来约束地壳厚度. Kang 等 (2016) 利用 SsPmp 与 Ss 震相到时差随震中距 (或射线参数) 的关系, 通过将两者的到时差的显著变化作为距离的函数改进了 VDSS, 建立了关于地壳厚度 H 和地壳平均 P 波速度的线性方程 (公式 2), 通过最小二乘法求解, 可得到地壳厚度与地壳平均 P 波速度的最佳估计值及其不确定性, 通过利用澳大利亚两个永久台站的地震数据, 展示了该方法在实际应用中的有效性和可行性. Chen 和 Chen (2020) 在利用上述方法同时确定地壳厚度 H 和地壳平均 P 波速度的基础上, 引入 Sp 震相 (即 SV 波在 Moho 面上的转换 P 波), 通过测量 Sp 震相与直达 Ss 波震相的到时差, 确定了地壳平均 S 波速度 (公式 3) .

$$\frac{T_{\text{SsPmp-Ss}}^2}{4} = \frac{H^2}{V_P^2} - H^2 p_\beta^2 \quad (2)$$

$$T_{\text{Ss-Sp}} = H \left[\left(\frac{1}{V_S^2} - p_\beta^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{1}{V_P^2} - p_\beta^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

VDSS 方法一般针对单个地震台站数据, 而针对复杂的构造区域, 该方法测量出的直达 Ss 波与全反射 SsPmp 波之间的到时差比真实值要小, 且只对 P 波速度敏感, 所以得出的地壳厚度结果一般与接收函数结果和 Airy 重力均衡模型预测结果相差较大. 针对该问题, 魏晓拙等 (2018) 对 VDSS 方法进行改良, 通过直接测量测线上的直达 Ss 波与反射 SsPmp 波震相的走时, 搜索得到满足到时差方程的地壳厚度解, 解决了单台 VDSS 方法无法应用于 S 波速度梯度较大的地区的缺点. 该方法被成功应用于一条跨龙门山构造带的线性台阵的地震数据上, 且结果显示出了与地表构造较高的一致性 (魏晓拙等, 2018) .

2 方法优势与局限性

VDSS 利用远震 S 波在地表激发的转换 P 波探测地壳厚度, 激发点类似于人工源炮点, 具有如下优势: ①高信噪比: VDSS 利用的 SsPmp 震相在莫霍界面发生全反射时, 其信号强度大, 信噪比高,

易于从地震记录中识别 (Liu et al., 2018; Tian et al., 2015) . ②低噪声污染: SsPmp 震相的特性使其不易受浅层结构产生的信号噪声 (如来自浅部结构的回波) 和地壳小尺度结构扰动的影响 (Parker Jr et al., 2016), 对厚的沉积层或壳内不连续面的散射产生的噪声不是特别敏感 (Yu et al., 2012), 相比其他方法, VDSS 能更好地抵抗背景噪音 (Yu et al., 2013) . ③数据处理简单: 对于单个地震事件, 即使不进行叠加和大量滤波, 也能从地震记录中获得清晰的来自莫霍面的 SsPmp 信号, 这使得数据处理过程更加简单和高效 (Yu et al., 2012) . ④能实现对地壳厚度和速度结构的联合约束: 传统上, 基于地震反射的方法在确定地壳厚度和地壳整体 P 波速度时存在固有权衡, 即需要其中一个先验信息来确定另一个参数. 但是, VDSS 方法通过利用 SsPmp 与 Ss 之间的到时差随距离 (或射线参数 p) 的变化克服了这一权衡. 在不同距离上测量 SsPmp 与 Ss 之间的到时差, 每个距离都有不同的射线参数 p , 利用公式 (2), 通过线性回归拟合的斜率和截距, 可以直接估计地壳厚度和地壳平均 P 波速度 (Kang et al., 2016; Liu et al., 2018) . ⑤广泛的适用性: VDSS 方法不仅适用于孤立台站的数据 (Owens and Zandt, 1997; Zhou et al., 2000), 还可以扩展到密集台阵数据 (Liu et al., 2017; Tian et al., 2015; Tseng et al., 2009), 不仅适用于深源地震 (Liu et al., 2017; Yu et al., 2012, 2016), 也适用于浅源地震 (Yu et al., 2013), 亦可在多种地质环境中使用 (Tian et al., 2015; Yu et al., 2012) .

虚拟地震测深方法 (VDSS) 对地震事件的选择较为严格, 且探测理论建立在一定的假设之上, 这都限制了该方法的应用, 具体表现在: ①地震波数据的限制: VDSS 方法依赖于远震事件产生的 S 波, 数据中通常缺乏高于 1 Hz 的有效能量, 这限制了 VDSS 方法在高频段的应用, 而低频数据一般不足以充分解析地下复杂的小尺度异常结构. ②观测数据质量的限制: VDSS 的准确度高度依赖于地震数据的质量, 尤其是远震 S 波的清晰度和震中距的范围 (Tian et al., 2015) . 在某些地区, 由于地质结构复杂或地震信号记录不完整, 难以获得高质量的地震数据, 会限制 VDSS 的应用效果 (Yu et al., 2016) . ③近地表沉积层影响较大: 沉积层的速度和厚度对 SsPmp 的振幅有显著影响, 低速度的沉积层会显著降低 SsPmp 的振幅, 且沉积层的存在还可能导导致其他 P 波震相成为主导震相, 从而被误

识为 SsPmp, 进一步增加了 Moho 面深度估计的误差. 这限制了 VDSS 在某些地区的应用, 特别是在近地表速度较低的区域 (Liu et al., 2018). ④对地壳结构的假设: VDSS 的分析通常基于一定假设的介质模型, 如果实际地壳结构过于复杂, 严重偏离这些假设, 会导致震相走时的观测值显著偏离模型的预测值, 影响最终结果的判定 (Liu et al., 2018).

3 方法应用案例

VDSS 方法以高信噪比、低噪声污染、简单的数据处理流程、广泛的应用范围等优势, 在不同地质环境下的地壳结构探测中展现出了巨大的应用潜力和应用价值.

3.1 克拉通

鄂尔多斯地块位于华北克拉通的西部, 是一个相对稳定的地质单元, 但其周围地区则表现出活跃

的地震活动性. Yu 等 (2012) 利用多种地震数据处理方法, 包括 VDSS 方法和接收函数方法, 对鄂尔多斯地块的地壳厚度进行了研究. 结果显示, 稳定的鄂尔多斯高原下的地壳东侧厚度超过 60 km (图 2), 这与其相对较低的海拔形成了对比. 在鄂尔多斯东吕梁山隆起西缘至太行山隆起东缘之间的华北中部过渡带的地壳厚度结果与 Airy 模型计算得到的 Moho 面深度相差较大, 说明该区构造活动强烈, 构造复杂. 此外, 通过接收函数法观察到地壳内大约 40 km 深处存在康拉德界面, 与 Moho 面间可能存在一个 20 km 厚的镁铁质下地壳层 (图 2). 研究认为, 鄂尔多斯地块下的厚地壳可能是由于长期构造演化中地壳物质不断积累所致, 而基性下地壳层的存在有助于维持地壳的均衡状态, 但也可能导致地壳内部应力的积累, 从而影响华北克拉通的稳定性. 此外, 该结果也反映出接收函数对界面上下地震波速度差大的界面比较敏感, 而 VDSS 对发生全反射的速度界面比较敏感.

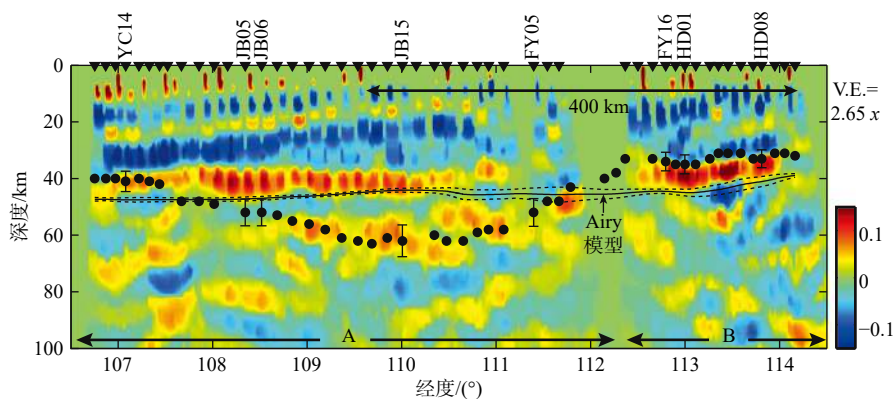


图 2 华北克拉通地壳厚度, 黑点为 VDSS 方法结果, 底图为接收函数结果 (引自 Yu et al., 2012)

Fig. 2 Crustal thickness of the North China Craton. The black dot is the result of the VDSS method, and the base map is the result of the receiver function (from Yu et al., 2012)

3.2 造山带与沉积盆地

VDSS 方法在青藏高原及其周边地区的地壳厚度研究中发挥了重要的作用, 揭示了地壳增厚与减薄的过程. 为研究青藏高原地区地壳厚度的变化, Tseng 等 (2009) 利用位于青藏高原中部的长约 550 km 的 Hi-CLIMB 剖面, 选择震中距在 $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间的地震事件, 采用 VDSS 方法对剖面下方的地壳厚度进行了研究. 结果表明, 青藏高原南北地壳厚度存在较大差异, 其南部地壳厚度约 75 km, 北部的羌塘块体仅有约 60 km (图 3). 针对青藏高原南部发育的南北向裂谷, Tian 等 (2015) 利用在青藏高原南部布设的东西向宽频带地震台阵 (TIBET-

31N) 获得的天然地震数据, 采用 VDSS 方法获得 Moho 面的反射波, 通过波形拟合计算得到沿剖面下方的 Moho 面深度变化图像 (图 4). 结果显示, 地壳厚度变化范围为 70~80 km, 而南北向裂谷下方 Moho 面存在明显的错断 (图 4), 具体表现在亚东—谷露裂谷 (YGR) 附近 Moho 面深度达 80 km, 而念青唐古拉山脉 (NQTL) 以西约 100 km 的水平距离内, Moho 面深度下降约 10 km. 研究揭示地表裂谷与 Moho 面上升之间约 100 km 的水平间距可能是由韧性中地壳的部分解耦造成的. 为研究青藏高原东北向扩展的前缘位置及扩展的动力学模式, 史克旭等 (2020) 利用布设在南北地震带北段的密集宽频带流动台阵资料, 对青藏高原东北缘

及周边地区的地壳厚度进行了研究. 结果显示研究区地壳厚度变化剧烈, 其中, 祁连和西秦岭地块内地壳厚度以 103°E 为界存在明显的东西向横向变化, 与祁连造山带相邻的阿拉善块体南缘地壳也明显加厚; 而鄂尔多斯地块地壳呈南北薄、中央厚的形态

特征, 且在六盘山断裂带下方观测到双 Moho 界面. 研究认为, 青藏高原东北缘地壳增厚方式以均匀缩短增厚为主, 且其向北东扩展的前缘已越过祁连山北缘断裂, 进入阿拉善块体南缘, 这为理解青藏高原的扩张动态提供了关键数据.

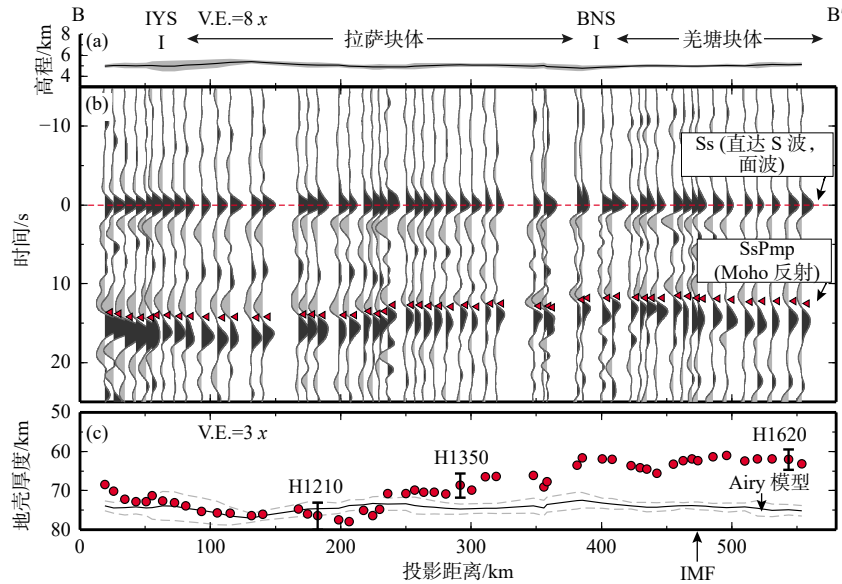


图 3 VDSS 得到的 Hi-CLIMB 剖面地壳厚度 (引自 Tseng et al., 2009)

Fig. 3 Crustal thickness of Hi-CLIMB profile received by VDSS method (from Tseng et al., 2009)

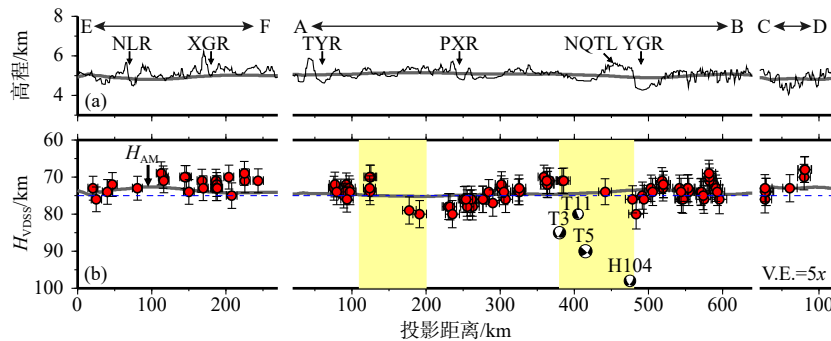


图 4 青藏高原南部剖面地形 (a)、基于波形拟合估算的地壳厚度 (b) (引自 Tian et al., 2015)

Fig. 4 The topography (a), estimated crustal thickness based on waveform fitting (b) of the profile in southern Qinghai-Xizang Plateau (from Tian et al., 2015)

川滇地区位于青藏高原东缘, 是青藏高原向扬子块体的过渡带, 其运动模式和机制一直是目前地学界研究的热点问题之一 (Wang et al., 2010; Yao et al., 2008; 郑晨等, 2016). 亢豆等 (2017) 基于中国地震局地质研究所在中国四川西部布设的流动地震观测台阵的观测资料, 利用 VDSS 方法研究了川滇地块及其周边的地壳结构. 结果显示, 川滇地块地壳厚度为 45~50 km, 四川盆地为 40 km 左右, 松潘—甘孜地块为 30~40 km. 地壳结构简单的四川盆地的结果与 Airy 模型预测结果相一致, 而地壳结构复杂的川滇地块和松潘—甘孜地块的结果明

显小于前人接收函数和 Airy 地壳均衡模型的结果. 鲍铁钊和宁杰远 (2021) 利用 VDSS 方法, 并对地壳结构变化剧烈的区域经过直达 Ss 波到时异常的校正, 得出了川滇地区的地壳厚度分布, 结果显示, 四川盆地的地壳厚度为 32~42 km, 云南地区地壳厚度为 32~37 km, 云南地区与青藏高原交界处, 地壳厚度从 40 km 递增到 60 km, 此结果与前人结果一致.

3.3 峨眉山大火成岩省

峨眉山大火成岩省 (ELIP) 是中-晚二叠世古地幔柱活动形成的大火成岩省, 是我国境内第一个

获得国际学术认可的大火成岩省 (陈赞等, 2023), 其地壳上地幔物性/结构的研究对理解大火成岩省的形成机制及其对现今地球深部过程的影响具有重要意义. Liu 等 (2017) 利用 VDSS 方法探测了峨眉山大火成岩省下方的地壳和上地幔边界, 并结合了重力测量、接收函数分析及深地震探测 (DSS) 等其他地球物理方法的数据, 以提供更全面的地壳和上地幔结构图像. 研究结果发现, 在峨眉山大火成岩省内带深 60~70 km 处存在强的反射震相, 这

表明 ELIP 下方地壳厚度异常增厚, 且增厚的地壳部分具有较高的 P 波速度 (7.0~7.4 km/s) (图 5), 这样一个异常厚的高速下地壳的形成, 可能来源于峨眉山地幔柱物质上涌、分馏和堆积; 通过估计, 峨眉山大火成岩省的体积约为 $1.76 \times 10^6 \text{ km}^3$, 与典型的大火成岩省特征相符. 通过结合多种地震数据分析方法, 研究证明了 VDSS 技术在探测复杂地壳结构方面的有效性和可靠性, 还进一步揭示了 ELIP 下方地壳的复杂性和动态变化.

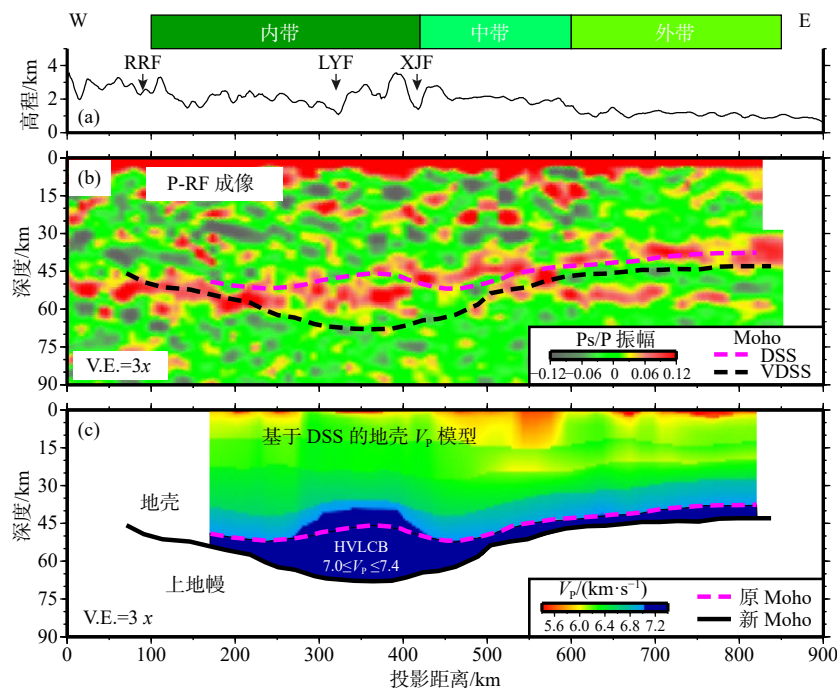


图 5 (a) 穿过 ELIP 的东西向剖面的地形; (b) 基于接收函数共转换点的地壳结构叠加成像结果; (c) 基于 DSS 的地壳 P 波速度结构. 粉红色虚线表示基于 DSS 的莫霍面, 而黑色虚线 (图 b) 和黑色实线 (图 c) 表示基于 VDSS 的莫霍面 (引自 Liu et al., 2017)

Fig. 5 (a) Topography of the east-west trending profile across the ELIP. (b) Migrated image of the crustal structure based on common conversion point technique applied to the stacked receiver function. (c) Crustal P-wave velocity structure obtained from DSS. The pink dashed line depicts the DSS-based Moho, while the black dashed line (b) and the black solid line (c) indicate the VDSS-based Moho (from Liu et al., 2017)

4 结论与展望

Moho 面是地球内部重要的间断面之一, 其形态和地壳厚度有助于理解研究区域的构造环境和演化过程, 能为地下深部结构的精细探测提供约束. VDSS 是一种新的壳幔边界成像方法, 利用对 Moho 面细节不敏感的大而清晰的全反射震相 SsPmp 与直达 Ss 波震相到时差, 提供了对整个地壳厚度的稳健估计. VDSS 方法中的激发点类似于人工源炮点, 但相比于人工源测深法, 不仅成本低, 还因所使用的 SsPmp 震相具有能量强、信噪比高的特点而不易受近地表沉积层、地壳小尺度结构扰动及接

收点环境噪声的影响, 即使 Moho 面相对比较复杂, 利用单个质量好的远震事件也可以很好地确定地壳的平均特性. VDSS 方法具有广泛的适应性, 不仅适用于深源地震和孤立台站的数据, 也可应用于浅源地震和密集台阵数据中, 并成功应用于青藏高原地区、造山带与盆地地区、峨眉山大火成岩省等多种不同地质环境中. 因此, VDSS 作为一种新兴的地壳结构探测技术, 以其独特的优势在地球学领域展现出巨大的潜力.

SsPmp 震相到时差受地壳厚度、地壳平均 P 波速度及射线参数的影响. 利用 SsPmp 与 Ss 震相之间的到时差与震中距 (或射线参数) 的关系, 可以

同时获得地壳厚度与地壳平均 P 波速度. SsPmp 震相的相位会受到 Pn 波速度、Sn 波速度、壳内 S 波速度、射线参数和壳内 P 波速度的影响. 当壳幔边界存在明显间断时, SsPmp 震相又可以约束下地壳和上地幔 P 波速度. 此外, 反射波的振幅大小与界面上下岩层的波阻抗差直接相关, 波阻抗差越大, 反射波的振幅越强. 因此, 未来工作中可将反射波振幅的横向变化纳入地壳结构的探测中, 以期对壳幔边界的深度变化有更好的诊断.

VDSS 对发生全反射的速度界面敏感, 而接收函数方法对界面两侧速度差较大的界面敏感, 两者结合可以对地壳厚度、地壳平均 P 波速度和上地幔顶部 P 波速度等信息进行更加严格的约束. 此外, 将 VDSS 与地震层析成像、重力测量等其他地球物理方法结合, 有望提供更全面的地壳结构图像. 因此, 通过不断的技术革新和跨学科融合, VDSS 将在未来地壳结构研究中扮演着更加重要的角色.

致谢

谨以此文纪念中国地震局地球物理勘探中心张先康研究员.

References

- Bao T Z, Ning J Y. 2021. Crustal thickness of Yunnan-Sichuan region derived from virtual deep seismic sounding method[J]. *North China Earthquake Sciences*, 39(2): 34-39 (in Chinese).
- Chen L, Ai Y S. 2009. Discontinuity structure of the mantle transition zone beneath the North China Craton from receiver function migration[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B6): B06307.
- Chen Q, Chen W P. 2020. Toward simultaneous determination of bulk crustal properties using virtual deep seismic sounding[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(3): 1387-1392.
- Chen W P, Yu C Q, Tseng T L, et al. 2013. Moho, seismogenesis, and rheology of the lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 609: 491-503.
- Chen W P, Jiang Y. 2020. Undulating Moho beneath a near-uniform surface of central Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 543: 116343.
- Chen Y, Zhao Y T, Liu J L, et al. 2023. Lithospheric structure of the Emeishan large igneous province: Implication for plume-lithosphere interaction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(9): 2541-2553 (in Chinese).
- Gao R, Xiong X S, Li Q S, et al. 2009. The Moho depth of Qinghai-Tibet Plateau revealed by seismic detection[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 761-773 (in Chinese).
- Jia S X, Zhang X K. 2005. Crustal structure and comparison of different tectonic blocks in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(3): 611-620 (in Chinese).
- Kang D, Yu C Q, Ning J Y, et al. 2016. Simultaneous determination of crustal thickness and P wave speed by virtual deep seismic sounding (VDSS)[J]. *Seismological Research Letters*, 87(5): 1104-1111.
- Kang D, Yu C Q, Chen J H, et al. 2017. Study on the crustal structure in Sichuan-Yunnan region based on virtual deep seismic sounding method[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 53(5): 825-832 (in Chinese).
- Kind R, Yuan X H, Saul J, et al. 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian plate subduction[J]. *Science*, 298(5596): 1219-1221.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. 2013. Update on CRUST1.0-A1-degree global model of Earth's crust[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. DOI: 10.6092/1970-9870/128.
- Li Q, Zhang Z, Hou J, et al. 2021. Research progress of the extraction body waves from ambient noise[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 51(10): 433-451 (in Chinese).
- Liu T Z, Klemperer S L, Yu C Q, et al. 2018. Post-critical SsPmp and its applications to virtual deep seismic sounding (VDSS)-1: Sensitivity to lithospheric 1-D and 2-D structure[J]. *Geophysical Journal International*, 215(2): 880-894.
- Liu T Z, Klemperer S L, Ferragut G, et al. 2019. Post-critical SsPmp and its applications to virtual deep seismic sounding 2. 1D imaging of the crust/mantle and joint constraints with receiver function[J]. *Geophysical Journal International*, 219(2): 1334-1347.
- Liu T Z, Klemperer S L, Yu C Q, et al. 2020. Post-critical SsPmp and its applications to virtual deep seismic sounding (VDSS)-3: Back-projection imaging of the crust-mantle boundary in a heterogeneous lithosphere, theory and application[J]. *Geophysical Journal International*, 223(3): 2166-2187.
- Liu Y T, Zhong C C, Jiang G M, et al. 2024. Subduction dynamics at the northwestern Pacific slab edge: Constraints of tomography in Kamchatka[J]. *CT Theory and Applications*, 33(2): 135-148 (in Chinese).
- Liu Z, Tian X B, Zhu G H, et al. 2015. Probing the Moho interface using SsPmp waves[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(10): 3571-3582 (in Chinese).
- Liu Z, Tian X B, Chen Y, et al. 2017. Unusually thickened crust beneath the Emeishan large igneous province detected by virtual deep seismic sounding[J]. *Tectonophysics*, 721: 387-394.
- Lü Q T, Shi D N, Liu Z D, et al. 2015. Crustal structure and geodynamics of the middle and lower reaches of Yangtze metallogenic belt and neighboring areas: Insights from deep seismic reflection profiling[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114(4): 704-716.
- Ma X J, Wu Q J. 2025. Preliminary study on Moho reflection wave based on noise interference method and its application in crustal structure imaging of the northeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 56(2): 167-181 (in Chinese).
- Owens T J, Zandt G. 1997. Implications of crustal property variations for models of Tibetan Plateau evolution[J]. *Nature*, 387(6628): 37-42.
- Parker Jr E H, Hawman R B, Fischer K M, et al. 2016. Estimating crustal thickness using SsPmp in regions covered by low-velocity sediments: Imaging the Moho beneath the southeastern suture of

- the appalachian margin experiment (SESAME) array, SE Atlantic coastal plain[J]. *Geophysical Research Letters*, 43: 9627-9635.
- Shi K X, Zhang R Q, Xiao Y. 2020. Constraints on the crustal thickness in the northeastern Tibetan Plateau and adjacent regions from virtual deep seismic sounding[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(12): 4369-4381 (in Chinese).
- Teng J W, Zhang Z J, Zhang X K, et al. 2013. Investigation of the Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles[J]. *Tectonophysics*, 609: 202-216.
- Teng J W, Deng Y F, Badal J, et al. 2014. Moho depth, seismicity and seismogenic structure in China mainland[J]. *Tectonophysics*, 627: 108-121.
- Thompson D A, Rawlinson N, Tkalčić, H. 2019. Testing the limits of virtual deep seismic sounding via new crustal thickness estimates of the Australian continent[J]. *Geophysical Journal International*, 218(2): 787-800.
- Tian X B, Chen Y, Tseng T L, et al. 2015. Weakly coupled lithospheric extension in southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 430: 171-177.
- Tibuleac I M, von Seggern D. 2012. Crust-mantle boundary reflectors in Nevada from ambient seismic noise autocorrelations[J]. *Geophysical Journal International*, 189(1): 493-500.
- Tseng T L, Chen W P, Nowack R L, et al. 2009. Northward thinning of Tibetan crust revealed by virtual seismic profiles[J]. *Geophysical Research Letters*, 36(24): L24304.
- Wang C Y, Lou H, Silver P G. 2010. Crustal structure variation along 30°N in the eastern Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(3/4): 367-376.
- Wei X C, Jiang M M, Chen L, et al. 2018. New VDSS method based on dense linear array and its applications[J]. *Progress in Geophysics*, 33(3): 0986-0992 (in Chinese).
- Wu Y, Ding Z F, Wang X C, et al. 2018. Crustal structure and geodynamics of the North China Craton derived from a receiver function analysis of seismic wave data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(7): 2705-2718 (in Chinese).
- Wu Z B, Xu T, Wu C L, et al. 2016. Crustal shear-wave velocity structure beneath the western Tibetan Plateau revealed by receiver function inversions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(2): 516-527 (in Chinese).
- Xu T, Zhang Z J, Liu B F, et al. 2015. Crustal velocity structure in the Emeishan large igneous province and evidence of the Permian mantle plume activity[J]. *Science China Earth Science*, 58(7): 1133-1147.
- Yao H, Beghein C, van der Hilst R D. 2008. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis. II. Crustal and upper mantle structure[J]. *Geophysical Journal International*, 173: 205-219.
- Yu C Q, Chen W P, Ning J Y, et al. 2012. Thick crust beneath the Ordos Plateau: Implications for instability of the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 357/358: 366-375.
- Yu C Q, Chen W P, van der Hilst R D. 2013. Removing source-side scattering for virtual deep seismic sounding (VDSS)[J]. *Geophysical Journal International*, 195(3): 1932-1941.
- Yu C Q, Chen W P, van der Hilst R D. 2016. Constraints on residual topography and crustal properties in the western United States from virtual deep seismic sounding[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121: 5917-5930.
- Zandt G, Randall G E. 1985. Observations of shear-coupled P waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 12(9): 565-568.
- Zhang M H, Xu T, Lü Q T, et al. 2015. 3D Moho depth beneath the middle-lower Yangtze metallogenic belt and its surrounding areas: Insight from the wide angle seismic data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4360-4372 (in Chinese).
- Zhang X Q, Xu T, Chen L C, et al. 2024. Structure of mantle transition zone beneath South China Block and its dynamic significance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(3): 935-946 (in Chinese).
- Zhang Z J, Deng Y F, Teng J W, et al. 2011a. An overview of the crustal structure of the Tibetan Plateau after 35 years of deep seismic soundings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 977-989.
- Zhang Z J, Yang L Q, Teng J W, et al. 2011b. An overview of the Earth crust under China[J]. *Earth-Science Reviews*, 104(1-3): 143-166.
- Zhang Z J, Bai Z M, Klemperer S L, et al. 2013. Crustal structure across northeastern Tibet from wide-angle seismic profiling: Constraints on the Caledonian Qilian orogeny and its reactivation[J]. *Tectonophysics*, 606: 140-159.
- Zhang Z J, Wang Y H, Houseman G A, et al. 2014. The Moho beneath western Tibet: Shear zones and eclogitization in the lower crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 408: 370-377.
- 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[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(9): 3223-3236 (in Chinese).
- Zheng T Y, Zhao L, Zhu R X. 2009. New evidence from seismic imaging for subduction during assembly of the North China Craton[J]. *Geology*, 37: 395-398.
- Zhou L M, Chen W P, Özalaybey S. 2000. Seismic properties of the Central Indian shield from broadband P-SV conversions at Hyderabad[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(5): 1295-1304.
- Zhu R X. 2007. Deep Earth exploration-a case study from the North China Craton[J]. *Progress in Geophysics*, 22(4): 1090-1100 (in Chinese).
- Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. 2012. Destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 42(8): 1135-1159 (in Chinese).

附中文参考文献

- 鲍铁钊, 宁杰远. 2021. 利用虚拟地震测深方法研究川滇地区地壳厚度[J]. *华北地震科学*, 39(2): 34-39.
- 陈赟, 赵与同, 刘佳乐, 等. 2023. 峨眉山大火成岩省的岩石圈结构: 对地幔柱-岩石圈相互作用的启示[J]. *岩石学报*, 39(9): 2541-2553.
- 高锐, 熊小松, 李秋生, 等. 2009. 由地震探测揭示的青藏高原莫霍面深度[J]. *地球学报*, 30(6): 761-773.
- 嘉世旭, 张先康. 2005. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究[J]. *地球物理学报*, 48(3): 611-620.
- 亢豆, 俞春泉, 陈九辉, 等. 2017. 川滇地区地壳结构的虚拟地表

- 震源反射测深法研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 53(5): 825-832.
- 李奇, 张智, 侯爵, 等. 2021. 背景噪声提取体波方法研究进展[J]. *地震科学进展*, 51(10): 433-451.
- 刘晏廷, 钟成城, 江国明, 等. 2024. 西北太平洋板块边缘俯冲特征: 来自堪察加壳幔速度成像的约束[J]. *CT理论与应用研究(中英文)*, 33(2): 135-148.
- 刘震, 田小波, 朱高华, 等. 2015. SsPmp 震相地壳探测方法[J]. *地球物理学报*, 58(10): 3571-3582.
- 马小军, 吴庆举. 2025. Moho 反射波噪声干涉方法及其在青藏高原东北缘地壳结构成像的应用初探[J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 56(2): 167-181.
- 史克旭, 张瑞青, 肖勇. 2020. 利用虚拟地震测深法约束青藏高原东北缘及周边地区地壳厚度[J]. *地球物理学报*, 63(12): 4369-4381.
- 魏晓拙, 姜明明, 陈凌, 等. 2018. 基于密集线性台阵的虚拟地震测深新方法及其应用[J]. *地球物理学进展*, 33(3): 0986-0992.
- 武岩, 丁志峰, 王兴臣, 等. 2018. 华北克拉通地壳结构及动力学机制分析[J]. *地球物理学报*, 61(7): 2705-2718.
- 武振波, 徐涛, 武澄沆, 等. 2016. 利用接收函数反演青藏高原西部地壳 S 波速度结构[J]. *地球物理学报*, 59(2): 516-527.
- 张明辉, 徐涛, 吕庆田, 等. 2015. 长江中下游成矿带及邻区三维 Moho 面结构: 来自人工源宽角地震资料的约束[J]. *地球物理学报*, 58(12): 4360-4372.
- 张晓青, 徐涛, 陈立春, 等. 2024. 华南地区地幔过渡带结构及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 67(3): 935-946.
- 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[J]. *地球物理学报*, 59(9): 3223-3236.
- 朱日祥. 2007. 地球内部结构探测研究——以华北克拉通为例[J]. *地球物理学进展*, 22(4): 1090-1100.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 2012. 华北克拉通破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(8): 1135-1159.