



鄂尔多斯块体北部地壳结构揭示其长期稳定性机制

尹伟亮¹, 杨涛^{1,2}, 俞春泉^{1,3*}, 张振国^{1,3}

1. 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518055

2. 武汉大学地球与空间科学技术学院, 武汉 430072

3. 南方科技大学, 广东省地球物理高精度成像技术重点实验室, 深圳 518055

* 通讯作者, E-mail: yucq@sustech.edu.cn

2025-07-24收稿, 2025-11-07修回, 2025-12-09接受, 2026-02-27网络版发表

国家科技重大专项项目(2024ZD1001101)、国家自然科学基金面上项目(41974043、42174058)和南方科技大学高水平专项项目(G03050K006)资助

摘要 华北克拉通东西部在地质演化上存在显著差异, 东部经历了中生代以来的大规模岩石圈破坏, 而西部的鄂尔多斯块体则长期保持稳定, 其深部成因机制仍存在诸多争议。鄂尔多斯块体北部构造保存完整、沉积盖层发育连续、地表侵蚀作用较弱, 是研究克拉通内部稳定性机制的理想区域。本文联合多频带接收函数与Pn多次波成像技术, 获取了穿越鄂尔多斯块体北部约500 km宽频带地震台阵下方从沉积层至莫霍面的高分辨率地壳结构模型。结果显示, 盆地内部沉积层厚度较大且连续, 最大达4.6 km; 结晶地壳平均厚度约39.5 km, 整体地壳厚度为 42.9 ± 0.8 km, 莫霍面平坦, 波速结构均一, 呈现典型克拉通特征。结晶地壳平均P波速度为 6.5 ± 0.05 km s⁻¹, 纵横波速比为 1.75 ± 0.04 , 对应地壳平均SiO₂含量约为 53.5 ± 2.1 wt%, 显示中-基性成分特征, 支持鄂尔多斯块体起源于太古宙洋底高原的构造模型。块体东缘沉积层显著减薄、地壳增厚。均衡分析表明, 地壳厚度、沉积剥蚀、岩石圈地幔结构与幔源岩浆活动共同调控地表高程变化, 反映浅部与深部过程的协同均衡作用。本研究揭示了鄂尔多斯块体地壳结构的精细特征, 为理解克拉通岩石圈长期稳定机制提供了关键地震学证据。

关键词 鄂尔多斯块体, 地壳结构, Pn多次波, 接收函数, 构造稳定性

1 引言

克拉通是地球上最古老、最稳定的大陆岩石圈单元, 其形成可追溯至太古宙或更早时期。长期以来, 克拉通被视为大陆构造中最难被破坏的单元, 其地球动力学稳定性受到全球地球科学界广泛关注。然而, 近年来研究表明, 诸如中国东部华北克拉通、美国西部怀俄明克拉通等曾经历过岩石圈减薄、地幔侵蚀与热-化学扰动, 挑战了传统的“克拉通不可破坏”观点, 引发了对其长期稳定性的重新审视(吴福元等, 2014; Wu等, 2019; Zhu等, 2021; Liu等, 2025)。克拉通的稳定性不仅反映了岩石圈的热化学状态和构造演化过程, 也直接影响着大陆地壳的长期保存、资源富集以及板块重建等关键地质过程。

华北克拉通作为东亚地区典型的古老克拉通, 其东西部在中生代以来经历了截然不同的构造命运: 东部岩石圈经历了热-化学侵蚀以及下地壳拆沉等地质过程而失去稳定性, 表现出岩石圈大规模减薄、强烈伸展与岩浆活动(Xu, 2001; Gao等, 2004; Wu等, 2019), 而西部鄂尔多斯块体则保留了较为完整的岩石圈结构, 地质构造稳定性显著(Chen等, 2009; Tian等, 2011; 黄方, 2015)。关于鄂尔多斯块体长期稳定的成因, 目前存在多种假说, 主要包括与地幔柱活动相关的洋底高原和与俯冲弧岩浆分异相关的下地壳再分层模型(Kusky和Moon-ey, 2015; He等, 2018)。

鄂尔多斯块体表层基底出露较少、地表剥蚀作用弱、构造扰动较弱, 是研究克拉通岩石圈保存机制的理想区域。已有多项地震学研究表明, 鄂尔多斯块体地壳厚度

中文引用格式: 尹伟亮, 杨涛, 俞春泉, 张振国. 2026. 鄂尔多斯块体北部地壳结构揭示其长期稳定性机制. 中国科学: 地球科学, 56(4): 1565–1575, doi: 10.1360/SSTe-2025-0223

英文引用格式: Yin W, Yang T, Yu C, Zhang Z. 2026. Crustal structure beneath the northern Ordos Block reveals its long-term stability. Science China Earth Sciences, 69(4): 1528–1538, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1790-0>

明显大于华北克拉通东部(Yu等, 2012; Tian等, 2014; 危自根等, 2015), 岩石圈具有较高波速和厚度(Tian等, 2009; Li和van der Hilst, 2010; 吴建平等, 2022)。其中, 块体北部相比南部保留了更为完整的岩石圈地幔内部不连续面, 显示出更为稳定的构造特征(Huang等, 2022)。然而, 鄂尔多斯块体边缘的河套地堑下方岩石圈显著减薄, 并伴随热异常和低波速特征, 表明局部岩石圈存在被侵蚀和改造的迹象(Chen等, 2009; Wang等, 2017)。总体而言, 鄂尔多斯块体在宏观上呈现稳定特征, 但受限于厚重沉积盖层的屏蔽效应, 盆地内部精细的地壳结构与成分信息仍缺乏高分辨率约束。

近年来, 地震成像技术的进展为突破这些限制提供了可能。Pn多次波是由Pn波在地壳界面多次反射产生的震相, 其对地壳厚度和P波速度(V_P)极为敏感, 尤其适用于沉积盆地下的莫霍面成像(Yu等, 2019)。该方法已成功应用于美国Imperial Valley及Mississippi Embayment等盆地的地壳成像中。此外, 多频带接收函数分析通过波形拟合, 可有效识别沉积层结构, 并提高对莫霍面深度及纵横波速比(V_P/V_S)的成像精度(王旭等, 2019; 汤晨晓等, 2022)。这两种方法在参数敏感性与成像深度方面具有高度互补性, 为厚沉积区的地壳结构联合反演提供了有效路径。

本研究依托沿鄂尔多斯块体北部布设的密集线性地震台阵观测数据, 联合应用多频带接收函数与Pn多次波分析, 旨在实现以下目标: (1)获取沉积层至结晶地壳的精细速度结构, 识别横向结构变化特征; (2)结合均衡模型, 评估地壳厚度变化与地表高程之间的关系, 探讨深部结构对均衡效应的制约机制; (3)基于 V_P 与 V_P/V_S 参数估算地壳平均成分, 探讨其块体基底成因与构造背景。研究成果有助于深化对鄂尔多斯块体及华北克拉通稳定性维持机制的认识, 并为理解克拉通岩石圈的长期保存提供新的地震学证据。

2 地质构造背景

华北克拉通是中国面积最大、地质记录最为完整的前寒武纪陆块, 广泛保留了大陆起源、增生、稳定与破坏的全过程地质记录(Wu等, 2019)。现今华北克拉通可划分为东部陆块、西部陆块和中部缝合带三大构造单元。东、西陆块最早分别形成于太古宙, 二者于~1.85 Ga沿中部造山带拼合, 形成统一的克拉通(Zhao等, 2001)。在此后长达十亿年的时间里, 华北整体保持构造稳定, 虽经历多期次岩浆活动与裂谷伸展, 但其主要分布于克拉通边缘及内部薄弱带(彭澎, 2016), 未显著破坏整体结构。

鄂尔多斯块体位于华北克拉通西部, 构造上为中-新生代稳定沉积盖层覆盖下的典型克拉通核心残块。中元古代发育了长城系-蓟县系裂谷沉积体系, 随后进入新元古代至古生代的长期抬升与剥蚀阶段。自早古生代起, 鄂尔多斯地区进入稳定的地台型沉积阶段, 广泛发育浅海碳酸盐岩及海陆交互相沉积, 代表克拉通内部稳定沉积过程的典型阶段(何登发等, 2021)。地壳-岩石圈内岩浆活动极弱, 改造作用主要局限于周边边界活动带, 构造运动以垂向整体性的隆升-沉降为主, 区域性沉积间断时间可长达亿年。

中生代以来, 华北克拉通东西部演化路径出现显著分化。在古太平洋板块俯冲与伸展背景下, 克拉通东部经历强烈岩石圈破坏、减薄与热事件, 形成大规模岩浆岩系与新生代伸展盆地(Wu等, 2019)。而鄂尔多斯块体则整体维持稳定沉积环境, 三叠-侏罗系发育稳定, 晚白垩世以来以隆升剥蚀为主, 第四系直接覆盖在白垩系之上, 反映出其稳定的构造状态(何登发等, 2021)。

在现代构造背景下, 华北仍处于太平洋板块俯冲与青藏高原向东挤出的双重应力场影响中。尽管鄂尔多斯块体周缘如山西裂谷、河套地堑等地区表现出一定程度的构造活动, 但主块体内部地壳与岩石圈结构仍保持完整, 具备高波速、低热流、厚岩石圈等典型“克拉通型”特征(Huang等, 2022; Liu等, 2024)。一些研究认为, 其稳定性可能源于深部洋底高原性质的岩石圈根或上轻弱、下重强的独特地壳结构(Kusky和Mooney, 2015; He等, 2018)。

然而, 由于鄂尔多斯块体广泛分布的沉积盖层对传统地震成像方法构成挑战, 其下方地壳结构、速度组成与均衡状态至今仍缺乏高精度约束。尤其是块体在长期构造扰动背景下如何维持稳定、其结晶地壳是否具有致性结构与成分, 仍是制约理解克拉通长期稳定性机制的关键科学问题之一。因此, 通过新型高分辨率地震成像方法深入解析该区域的沉积层与结晶地壳结构, 对于揭示克拉通残块的深部控制机制与动力学响应模式具有重要意义。

3 数据与方法

3.1 地震资料与数据预处理

本研究使用的数据来自华北内部结构计划(NCISP-4) 2005年9月至2006年10月布设于鄂尔多斯块体北部的线性宽频带流动地震台阵(Ai和Zheng, 2005)。台阵沿东西方向延伸, 总长度约500 km, 自华北克拉通腹地向西穿越鄂尔多斯块体, 共布设50个宽频带地震台站, 平均间距

约10 km(图1)。该高密度台阵为获取沉积盖层下地壳结构的高分辨率图像提供了数据支撑。

本研究选取两类地震事件以匹配不同成像需求：用于接收函数分析的远震事件为震级 $M \geq 5.5$ 、震中距 30° – 90° 的远震P波事件；用于Pn及其多次波研究的区域地震事件为 $M \geq 3.5$ 、震中距小于 10° 的近震。所有原始数据经过统一预处理流程，包括仪器响应去除、基线校正以及去趋势处理。数据质量控制基于CrazySeismic软件平台(Yu等, 2017)，通过人工筛选剔除噪声波形，仅保留信噪比较高的记录用于后续分析。

3.2 接收函数提取与多频带波形拟合

接收函数通过对远震P波径向与垂直分量进行反卷积，可提取出对地下速度不连续界面敏感的Ps转换波及其多次反射震相(如PpPs、PsPs+PpSs; 图2A)，因而被广泛用于地壳和上地幔结构研究(Langston, 1979)。本研究采用Ammon(1991)提出的频域反卷积算法，设置高斯滤波参数范围为0.5–4.0，处理168个高质量远震事件。为保证接收函数波形质量，我们利用Seispy软件(Xu和He, 2022)对结果进行筛选与归类，按台站、震中距与反方位角分组，剔除信噪比较低或一致性较差的波形，总共得到11416条多频带接收函数。最终，仅选择震中距 30° – 50° 、反方位角 180° – 210° 范围内的地震事件簇进行线

性叠加(图3B，网络版附图S1)。由于事件簇分布集中(震中距和反方位角的标准差分别在 4° 与 8° 以内，P波射线参数为 $0.0736 \pm 0.0024 \text{ s km}^{-1}$)，因此未进行动校正处理。叠加后的接收函数结果为后续速度结构反演提供了可靠约束。

考虑到鄂尔多斯盆地厚沉积层会产生强烈混响和时间延迟从而影响地壳深部结构的成像质量和准确性，本文首先采用接收函数多频波形拟合方法，构建浅部沉积层结构模型。利用实际数据加权平均得到的射线参数进行一维波形正演模拟，构建沉积层厚度和P波速度的网格参数空间，重点拟合沉积层Pds转换波及其PpPds多次波(图2A)。Vp/Vs值参考前人成像结果固定为1.92(Wei等, 2023)。

在波形拟合过程中，采用波形互相关和均方根误差比值(Root-Mean-Square-Error Ratio, $RMSE_{\text{ratio}}$)评估观测与正演波形的一致性：

$$RMSE_{\text{ratio}} = \frac{RMS(\text{syn} - \text{obs})}{RMS(\text{obs})} \quad (1)$$

其中，互相关时窗取 $[-5, 10] \text{ s}$ ， $RMSE_{\text{ratio}}$ 时窗取 $[-1, 4] \text{ s}$ 。模型选择标准为互相关系数 ≥ 0.8 ，并结合实际数据噪声水平($\text{noise}_{\text{level}}$ ，时窗在 $[-10, -1] \text{ s}$ 内的加权叠加平均振幅值)，保留满足如下约束条件的模型空间：

$$RMSE_{\text{ratio}} < \sqrt{\min(RMSE_{\text{ratio}})^2 + 4 \times \text{noise}_{\text{level}}^2} \quad (2)$$

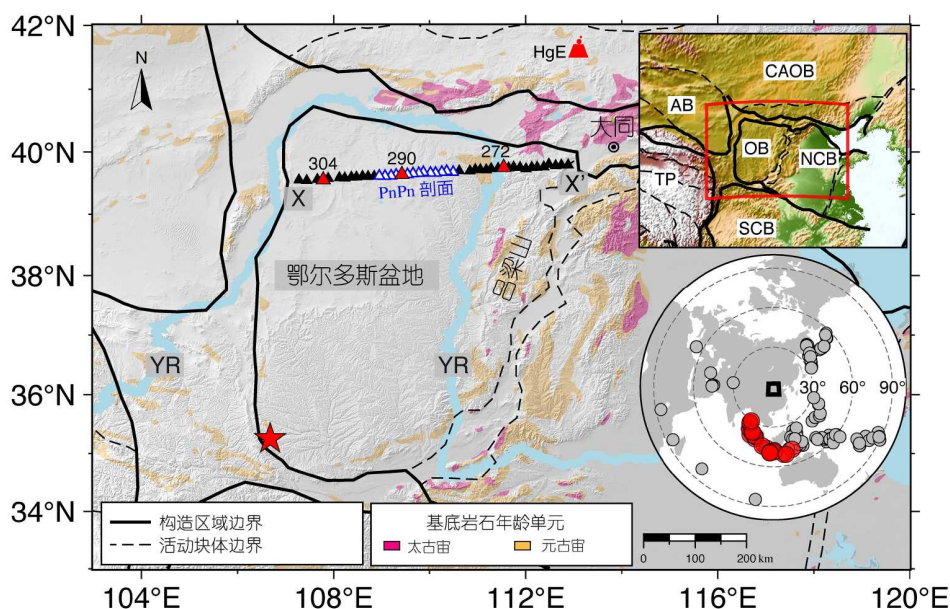


图1 华北克拉通构造背景与地震台阵分布图。黑色实线为构造单元边界，黑色虚线为块体内部活动边界。亮紫色和亮黄色分别为地表出露的太古代和元古宙基底。实心三角形表示台站位置，其中蓝色三角形是记录到清晰Pn多次波的台站范围，红色三角形为详细展示多频带接收函数波形拟合示例的台站，XX'为剖面。红色星号是用于Pn多次波分析的区域地震。右上插图为华北克拉通及周边构造简图。右下插图中标出了用于接收函数分析的远震事件，其中红色圆点为本次研究采用的地震事件簇。YR，黄河；HgE，全新世Honggeertu火山；OB，鄂尔多斯块体；NCB，华北盆地块体；SCB，华南块体；TP，青藏高原；AB，阿拉善块体；CAOB，中亚造山带

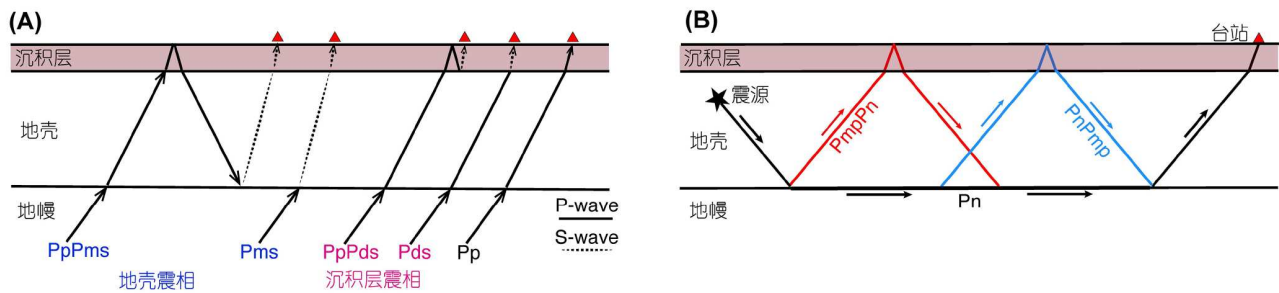


图2 本研究用地震震相传播路径示意图。(A) 接收函数分析中主要震相传播路径示意图, 包括沉积层、壳幔间断面转换波与多次波; (B) 区域地震Pn多次波(如PnPn)的传播路径示意图

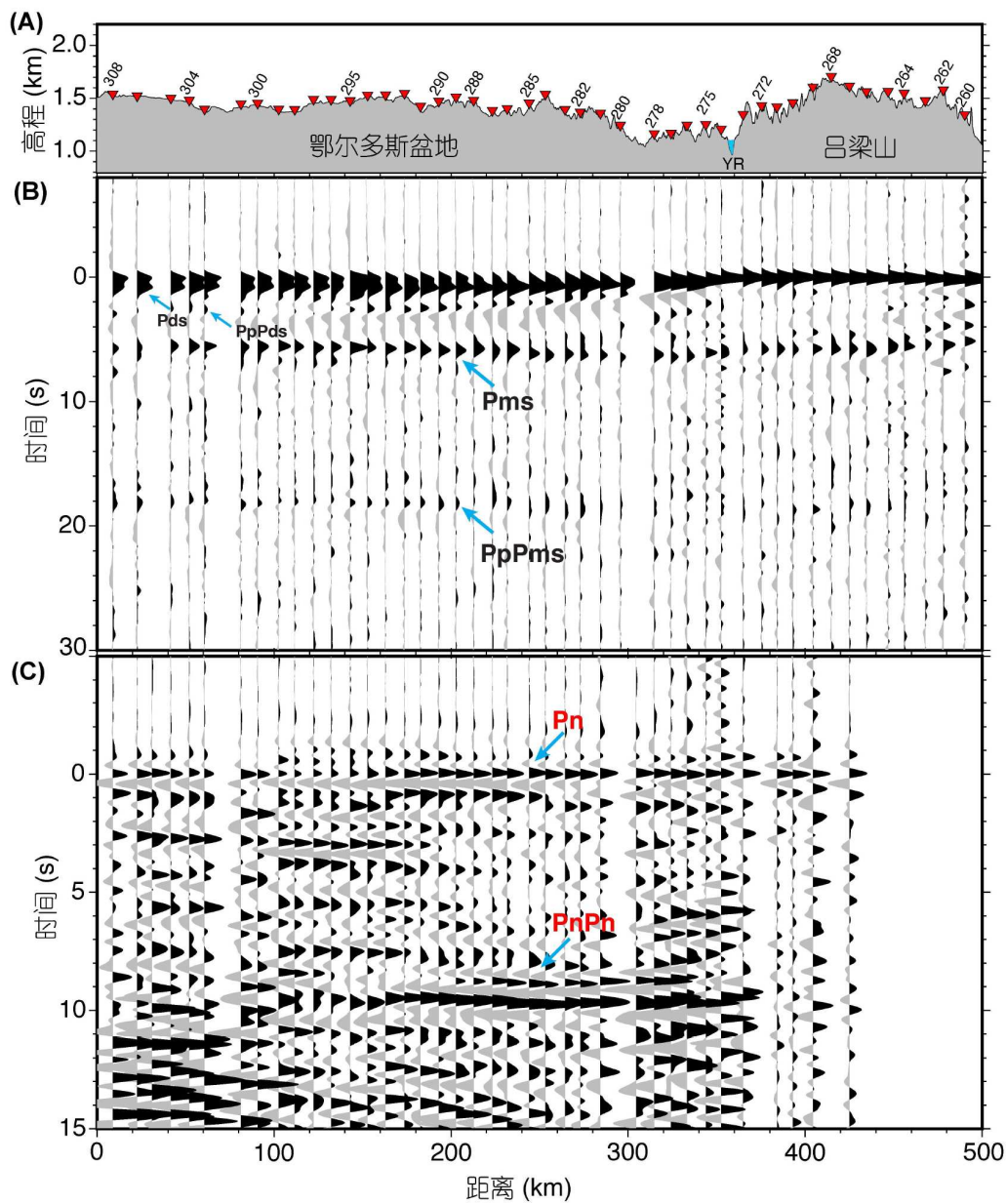


图3 接收函数与区域地震Pn波形沿测线剖面图。(A) 沿测线地形分布, 红色倒三角显示了台站位置, 数字为台站编号, YR为黄河径流位置; (B) 各台站接收函数事件簇线性叠加剖面; (C) Pn及PnPn震相剖面图, 按照Pn震相对齐, 测线中部台站(参见图1)在约10 s附近出现明显PnPn震相

最终使用K-Means技术对其模型参数网格搜索结果进行聚类分析,在考虑相邻台站之间空间连续性的基础上,约束得到整条线阵下方的沉积层速度结构。

3.3 Pn及其多次波

Pn多次波方法基于对地壳内Pn首波及其多次波(如PnPn震相)的观测(Yu等, 2019; 图2B)。该方法可为地壳厚度和平均 V_p 提供重要约束,尤其适用于厚沉积盆地地区。Pn和PnPn震相走时差可以表示为

$$T_{\text{PnPn-Pn}} = 2H\sqrt{V_p^{-2} - p^2} \quad (3)$$

式中, H 为地壳厚度, V_p 为地壳P波速度, p 为射线参数。

本文对区域地震波形进行0.5–1.5 Hz带通滤波以增强Pn及PnPn震相识别度,并结合理论走时曲线进行震相拾取,仅保留具备清晰PnPn震相、信噪比较高的台站纳入分析。

3.4 接收函数与Pn多次波联合分析地壳结构

接收函数对 V_p/V_s 与界面深度具有较高敏感性,但对绝对 V_p 分辨力不足;而Pn多次波对 V_p 与 H 均敏感。因此,本文采用联合反演策略以充分利用两种方法的互补优势。首先,基于接收函数波形拟合获得的沉积层模型固定不变;随后在结晶地壳参数空间(V_p 、 V_p/V_s 、厚度)中进行联合网格搜索,计算对应的合成接收函数与PnPn波形,与实测波形进行同时拟合。通过残差最小化与波形匹配优度评估最佳模型。最终构建出沿测线的沉积层-结晶地壳高分辨率速度剖面,为后续的地壳成分估算与均衡建模分析提供基础。

4 结果

4.1 接收函数和Pn多次波剖面

接收函数剖面(图3B)清晰地揭示了华北克拉通西部地壳结构的整体特征,主要表现为全区连续清晰的地壳Pms转换波,指示了可有效追踪的莫霍界面。细节上,剖面在零时附近的沉积盖层响应、多次波发育程度以及地壳尺度震相清晰度等方面表现出显著的横向分段性,其变化与地理单元的分布密切对应。黄河以西的鄂尔多斯盆地地形平缓,其接收函数零时附近呈现典型的多峰结构(主峰+次峰+~3 s震相),为厚沉积层基底转换波及层内多次波响应,且地壳PpPms多次波连续性强。向东部过渡至鄂尔多斯盆地与吕梁山的接合带,波形特征发生显著变化:零时附近波形由西部的双峰叠合(宽缓)向东渐变为单峰(宽缓),指示沉积层显著减薄;同时,PpPms

多次波清晰度降低但仍可辨识其趋势。进入黄河以东的吕梁山主体区域,地形起伏显著而其区域平均高程与西部盆地相近,接收函数零时附近波形以单峰为主,表明其缺乏厚层沉积盖层干扰;PpPms多次波仅在少数台站可有效识别,反映了吕梁山区域壳内结构的非均匀性对多次波成像的制约。此外,基于首波Pn震相零时刻正极性最大振幅对齐的剖面显示,在剖面中部(对应于图1标注台站)约10 s位置处,观测到一组清晰且连续的震相,其振幅约为Pn首波两倍,该震相被解释为Pn多次波(PnPn; 图3C)。

4.2 沉积层结构

研究区域浅层沉积层结构呈现显著的横向非均匀性,主要表现为鄂尔多斯盆地内部发育巨厚沉积层,而东部造山带区域沉积盖层急剧减薄甚至缺失。盆地内部台站(如X2.304、X2.290)的接收函数表现出明显的频率依赖性和多震相叠加特征,反映沉积层对地震波传播过程的强烈影响(图4A):在低频条件下,波形呈现宽缓单峰形态,且峰值相对零时刻存在明显延迟;在高频条件下,波形呈现多峰叠加结构,除初至P波外,还可清晰识别出沉积层内产生的Pds转换波及其多次反射波PpPds。相比之下,东部吕梁山区台站(如X2.272)的接收函数表现出完全不同的特征:无论高频还是低频条件下,波形均呈现单一主峰形态,且峰值位于零时刻。这一现象表明该区域沉积盖层极薄或缺失,基底岩石直接出露或近浅地表分布。代表性台站接收函数多频带反演结果清晰揭示了近地表速度结构的横向变化规律(图4B)。

基于接收函数波形拟合的沉积层结构反演结果显示,鄂尔多斯块体北部沿500 km测线的沉积盖层具有明显的横向分段特征,该结果与区域反射地震及油气钻井资料揭示的地层厚度剖面结果相似程度高(图4C,网络版附图S2)。沉积层厚度与近地表速度呈现强烈横向非均质性,根据沉积厚度的横向空间分布特征,可将测线划分为三个构造域。盆地内部(A区)沉积盖层较厚且横向连续,最西端台站(如X2.308)最大厚度达4.6 km,向东逐渐减薄至X2.280台站附近的~2.5 km,平均沉积厚度为 3.3 ± 0.6 km。在盆地边缘B构造域近地表P波速度较低(平均 1.6 ± 0.16 km s⁻¹),符合未固结-弱固结沉积物特征,平均沉积厚度为 1.2 ± 0.4 km。与A区相比,B区沉积层的急剧减薄指示该区域曾发生显著的构造剥蚀作用。位于黄河以东的吕梁山区(C区)沉积厚度进一步减小且横向起伏加剧,过渡带标志性台站X2.273的近地表P波速度已接近4 km s⁻¹,山区内部如X2.270台站附近,沉积盖层几近缺失。沉积层厚度与速度的陡峭横向梯度清晰刻画了稳定

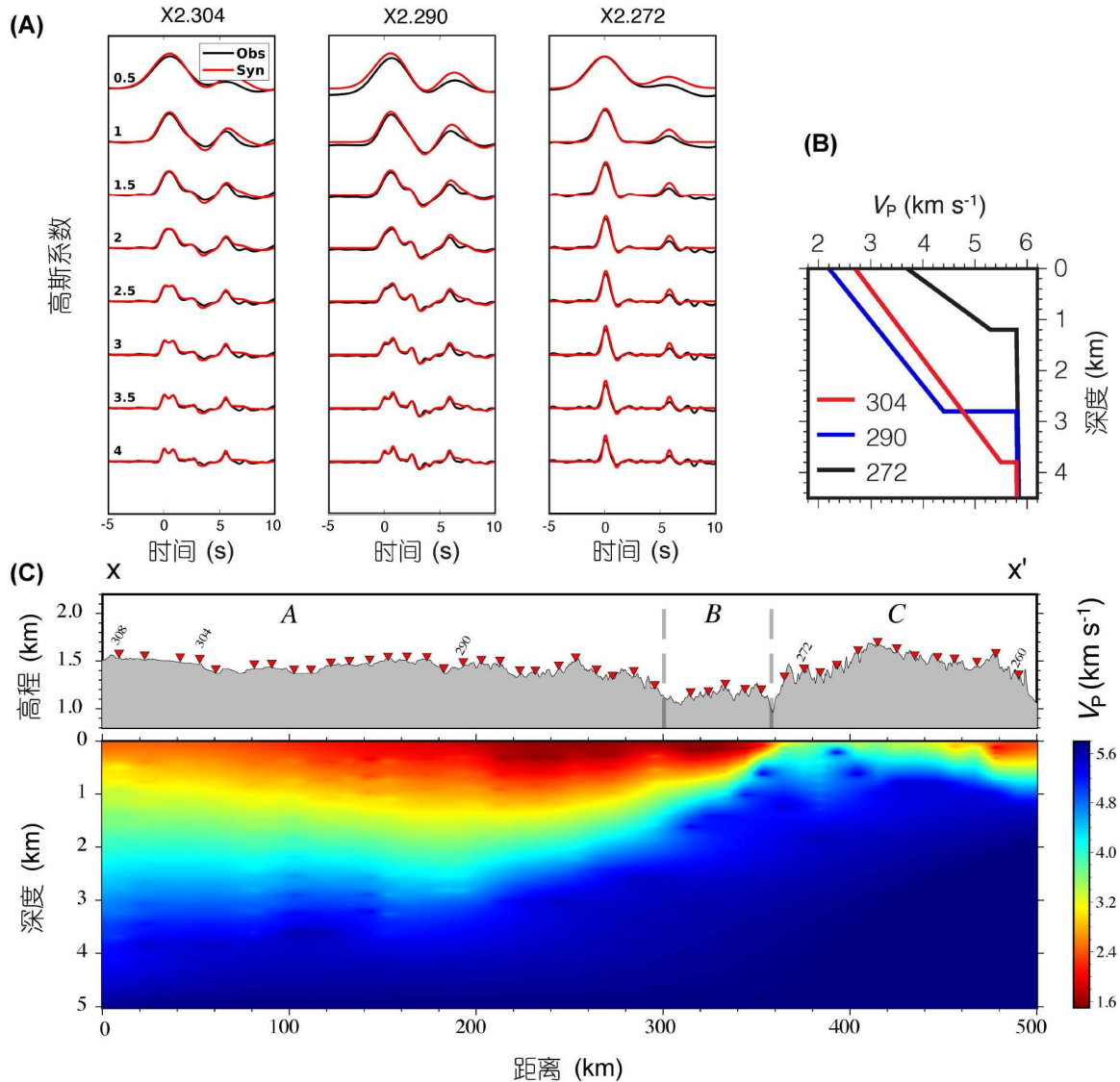


图4 接收函数多频带波形拟合及沉积层结构。(A) 多个频带同时进行波形拟合的示例, 台站具体位置可参考图1。图中黑色实线为观测波形, 红色实线为最佳拟合正演波形; (B) 三个台站的最佳拟合对应的沉积层模型; (C) 测线地形图与沉积层结构剖面图, 其中A、B、C区域划分详见正文描述

的盆地内部与构造剥蚀活跃的吕梁山脉之间显著的结构边界。

4.3 结晶地壳结构

在沉积层速度结构的基础上, 本文通过联合分析接收函数与Pn/Pn波数据, 获得了沿测线的结晶地壳结构参数, 包括地壳厚度、 V_p 及 V_p/V_s 值(图5、图6)。在盆地内部区域A, 接收函数实际数据叠加剖面显示莫霍面Pms与Pp/Pms震相都可清楚追踪(图3B), 其结晶地壳呈现显著均一性和横向连续性。莫霍面深度相对平缓, 平均地壳厚度为 42.9 ± 0.8 km, 结晶地壳厚度(不含沉积层)达 39.5 ± 0.9 km。 V_p/V_s 在1.70–1.83范围内缓慢变化, 平均值

为 1.75 ± 0.04 。在考虑地壳厚度存在2 km误差时, Pn/Pn波的加入可使 V_p 约束的不确定性从0.3降低至0.15 km s^{-1} , 显著提升 V_p 约束精度(图6C, 网络版附图S3)。Pn/Pn多次波在盆地内部清晰可见, 其约束的 V_p 值介于 6.45 – 6.57 km s^{-1} , 平均 6.5 ± 0.05 km s^{-1} 。在盆地边缘区域B, 可靠观测数据的反演结果显示, 莫霍面深度与区域A相比存在明显抬深, 地壳厚度为40.5 km, 结晶地壳厚度为39.1 km, V_p/V_s 值为1.91。在吕梁山区(C区), 莫霍面较盆地内部加深超过4 km, 平均值为 47 ± 0.9 km, 这些特征伴随沉积层厚度减薄与界面强烈起伏, 反映出强烈的地壳变形作用。网络版附表S1汇总了本次研究获得的沉积层和结晶地壳速度结构参数结果。

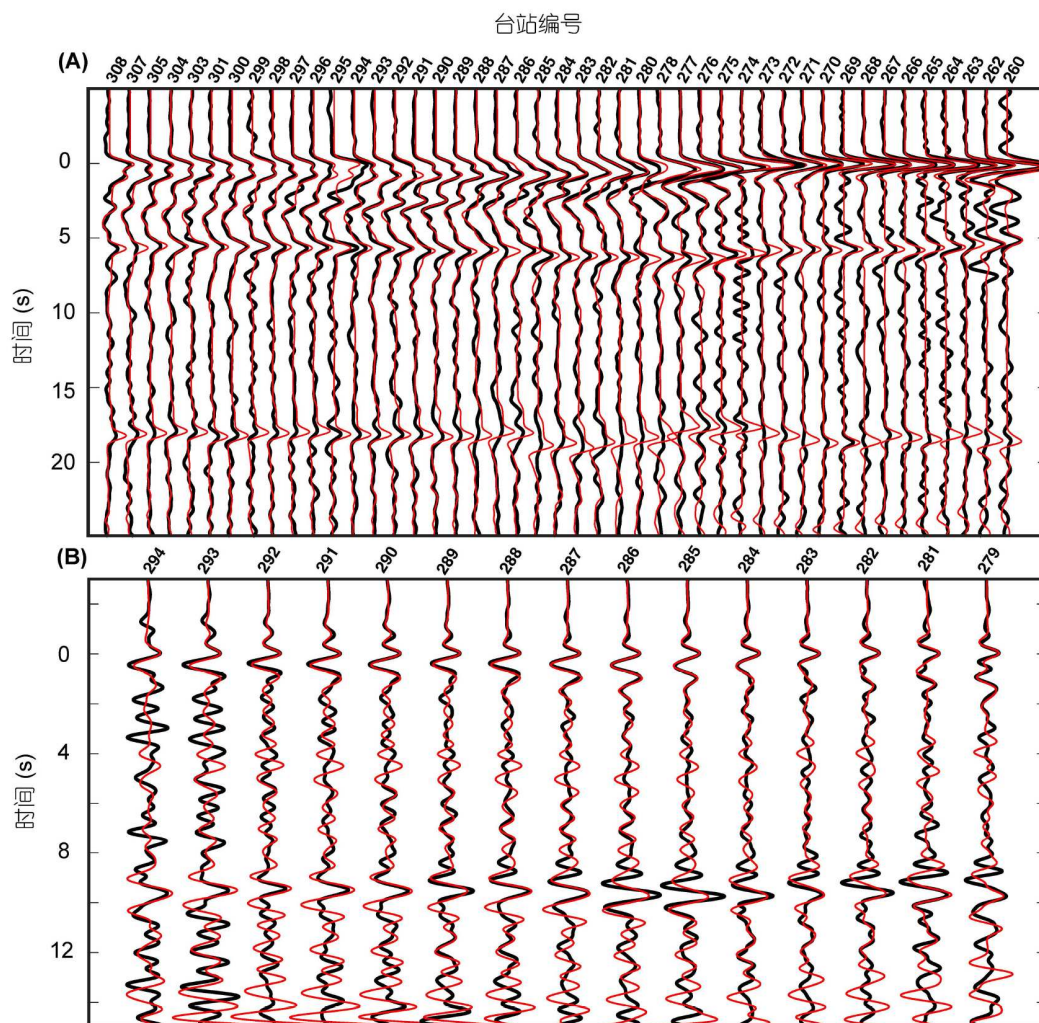


图5 接收函数与Pn多次波波形拟合结果。(A) 接收函数拟合图, 红线为最佳拟合正演波形, 黑线为观测数据; (B) Pn与PnPn多次波波形拟合图

5 讨论

5.1 与前人结果的对比

本研究基于多频带接收函数与Pn多次波联合分析, 获得了鄂尔多斯块体北部沉积层与结晶地壳的高分辨率结构图像, 显著提升了沉积盖层之下的地壳成像质量, 尤其在结构连续性与波速精度方面相较前人研究取得突破。所得结果证实块体内部结晶地壳横向均一, Moho面平缓, 地壳整体厚度稳定, 符合以往主动源与被动源成像结果(Tian等, 2014; Wei等, 2023), 但在细节层面上明显提高了成像精度与分辨能力。本研究获得的沉积层最大厚度达4.6 km, 与区域反射地震及钻井剖面数据一致(Yang等, 2005; 网络版附图S2), 但本方法通过波形拟合进一步实现了横向连续结构的细致刻画。相比早期单频接收函数方法, 本研究采用多频带接收函数波形拟

合技术, 更准确地识别沉积层相关震相及其多次波, 显著降低了Moho面走时不确定性。此外, PnPn多次波的联合使用增强了对地壳平均 V_p 的独立约束, 有效解决了接收函数方法对 V_p/V_s 耦合参数敏感、 V_p 难以准确获取的瓶颈问题。所获得的盆地内部区域Moho深度(平均 42.9 ± 0.8 km)与前人研究结果(Jia等, 2014)相符, 但本研究进一步刻画了其沿测线的细微起伏特征, 并在沉积层剥蚀区明确建立了地壳增厚与构造边缘地形演化之间的耦合关系。

5.2 均衡分析与地幔动力学过程约束

尽管测线东部吕梁山区地壳厚度较盆地内部增加了超4 km, 但其地表高程差异不足0.1 km(图7A), 显著偏离传统艾里均衡模型对地形响应的预测。这种不一致性表明该地区可能存在多种补偿机制。本文首先基于地壳

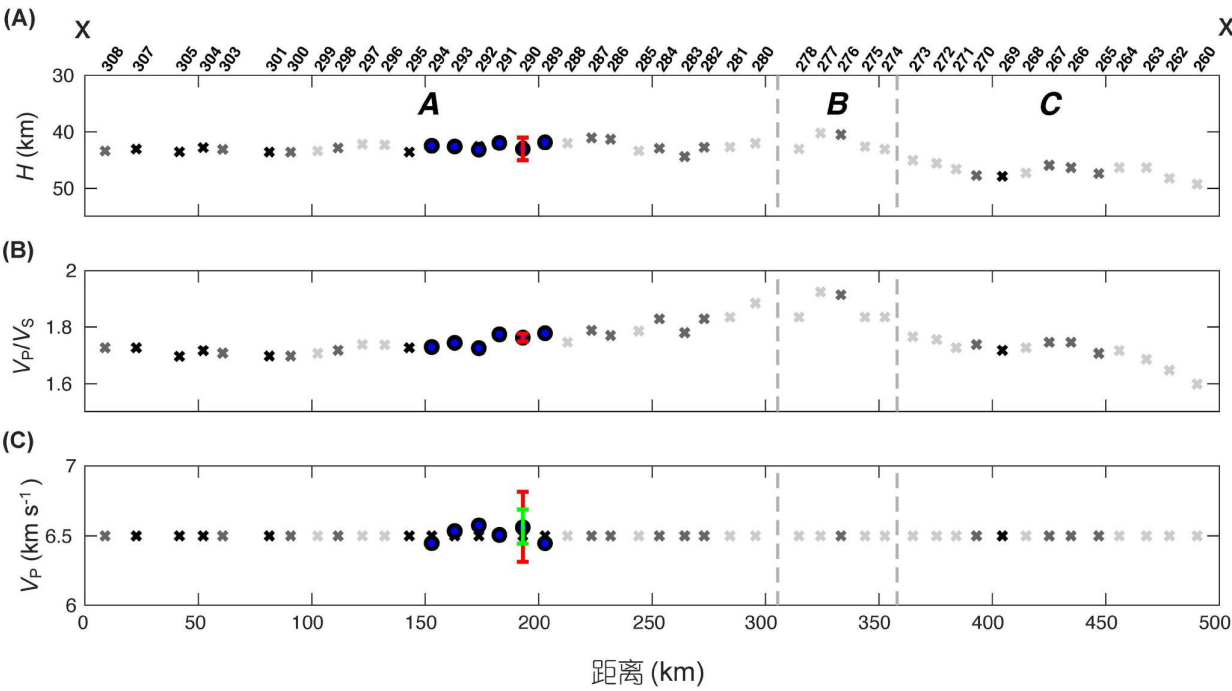


图6 地壳结构参数沿测线分布图。(A) 总体地壳厚度分布；(B) 结晶地壳 V_p/V_s 值；(C) 结晶地壳平均 V_p 。蓝色圆点表示接收函数与Pn/Pn联合反演结果，叉形为仅接收函数反演结果，颜色深浅代表结果可靠性。红色、绿色误差棒分别表示 ± 2 km厚度误差下，单独接收函数与联合反演约束 V_p 的不确定度对比。A、B、C区域划分同图4C

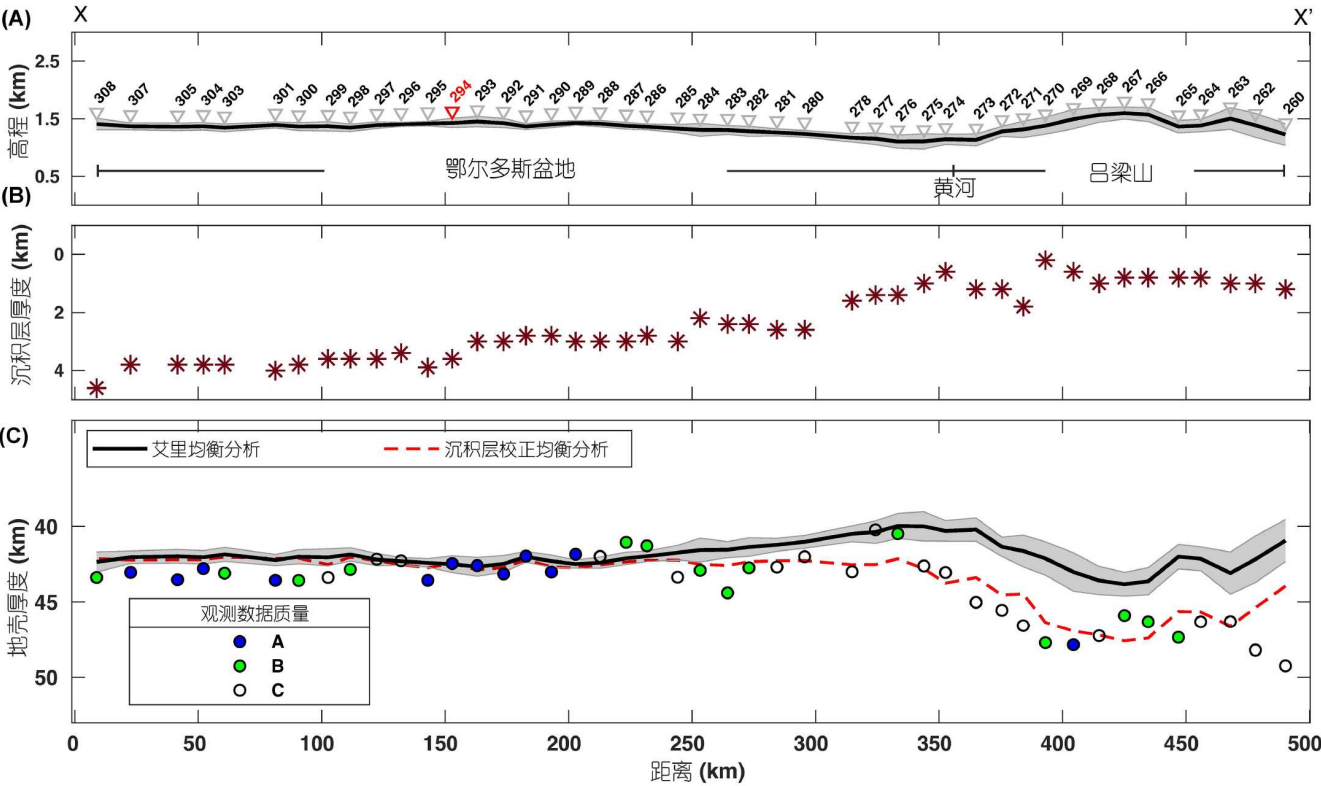


图7 艾里均衡分析与沉积补偿机制评估。(A) 台站100 km范围内平均地表高程、标准差及主要地理单元空间分布；(B) 沉积层厚度分布；(C) 理论与观测地壳厚度对比。黑线表示传统均匀密度艾里模型结果，阴影区为标准差；红色虚线表示考虑沉积密度修正后的均衡厚度。圆点为地震学观测结果，符号颜色指示数据可靠性等级

均衡模型对此进行探讨。以盆地内部可靠性高的X2.294台站地壳结构为参考模型(网络版附表S1)。根据地壳均衡原理,理论莫霍面深度与实际观测基本一致,如测线西部所示(图7C)。然而,在测线东部,实际观测的地壳厚度较艾里模型预测偏离约5 km(图7C黑色实线)。从地形均衡贡献来看,与X2.294台站相比,东侧X2.269地壳增厚(47.9 vs. 42.5 km)应导致地形隆升约0.7 km;但同时,该区域沉积层显著减薄(3.6 vs. 0.6 km; 图7B),致使地壳平均密度增大(2793 vs. 2828 kg m⁻³),进而引起约0.52 km的地形沉降,显著抵消了因地壳增厚带来的隆升效应。引入沉积层影响后,地壳均衡预测与实际观测吻合度显著提高(图7C红色虚线),表明沉积层减薄是一种重要的地壳均衡补偿机制。

此外,前人研究结果表明吕梁山区岩石圈明显减薄(Chen等, 2009; Zhang等, 2019),地球化学证据也表明该东部区域发育新生代玄武质岩浆活动(如大同火山),暗示软流圈上涌及岩石圈减薄(Xu等, 2004, 2005)。由于岩石圈地幔密度高于软流圈,其减薄可引起地形的隆升。假设两者密度差为43 kg m⁻³(Becker等, 2014; Xia等, 2020; 网络版附表S2),以X2.294和X2.269为例,10 km的岩石圈减薄可导致约0.21 km地形隆升。另一方面,

软流圈上涌引发的减压熔融可能导致高密度镁铁质岩浆底侵至地壳中(Xu等, 2005)。例如,当地壳内侵入比例为10 wt%、密度约3000 kg m⁻³的基性物质时,可产生约0.26 km的地形沉降。这一沉降效应在一定程度上抵消了岩石圈减薄所引起的隆升,反映出两者在地形表现上存在相互补偿机制。此外,软流圈上涌伴随的动态地形效应及岩石圈挠曲作用也可能对地表高程产生进一步影响,但其具体机制超出本文研究范围。综上所述,东部吕梁山区正处于岩石圈改造过程,而鄂尔多斯内部岩石圈仍保持稳定,揭示出两者地球动力学背景的显著差异。

5.3 地壳平均成分估算

利用结晶地壳的波速参数,可以对鄂尔多斯盆地地区的平均地壳成分进行定量估算。结果显示,接收函数和Pn多次波联合约束下的 V_p 为6.45–6.57 km s⁻¹, V_p/V_s 值为1.73–1.78,符合典型中-基性地壳的弹性参数特征。在此基础上,结合已有的岩石物理模型与温压校正关系(Gao等, 1998; Sui等, 2022),推算鄂尔多斯地壳的平均SiO₂含量为53.5±2.1 wt%(图8; 见网络版附录A)。这一数值显著低于全球大陆地壳平均值(约60–62 wt%, Chris-

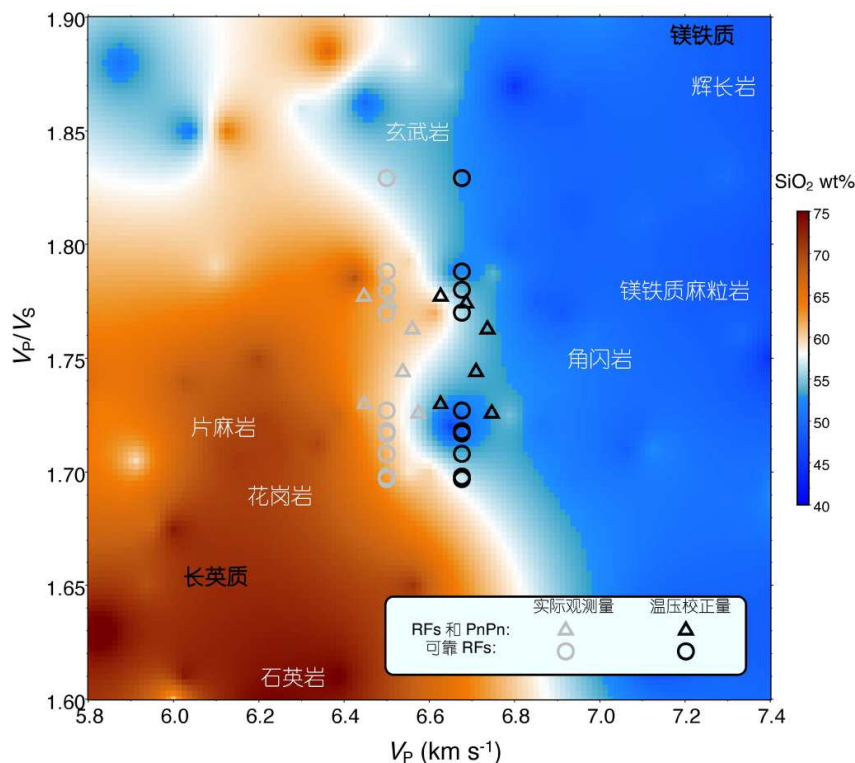


图8 地震波速约束下的地壳SiO₂含量估算图。基于Sui等(2022) V_p - V_p/V_s -SiO₂关系绘图。灰色符号为实际地震学测量结果,黑色符号为经温压校正后的参数;三角形为接收函数与Pn联合结果,圆圈为单一接收函数约束结果。棕色、蓝色区域分别对应长英质与镁铁质岩石参考范围,图中标注典型岩性参数位置

tensen和Mooney, 1995), 亦低于华北克拉通东部演化型地壳的平均值(Gao等, 1998)。从成分上看, 鄂尔多斯地壳表现出明显的中-基性特征, 与全球典型下地壳组成(Rudnick和Fountain, 1995)更为接近。

5.4 鄂尔多斯块体长期稳定性机制及地球动力学启示

鄂尔多斯块体内部表现出结晶地壳结构连续、Moho面平坦、速度均匀、地表形变弱等特征, 符合其作为华北克拉通西部稳定核心的解释(Chen, 2010; 黄方等, 2015)。自中生代以来, 该区域未经历显著的岩石圈扰动, 其地壳-地幔结构得以较好保存, 呈现出典型的克拉通核部特征。与之对比, 鄂尔多斯东缘则表现出地壳加厚、沉积剥蚀和近地表波速增加等现象, 反映其在新生代受到了复杂的构造与热过程改造, 包括岩石圈减薄、地幔热异常和软流圈上涌等作用(Xu等, 2004, 2005), 由此形成了稳定核与活动边缘之间鲜明的动力学对比。

然而关于鄂尔多斯块体长期稳定性的深部成因机制, 学界主要存在两种构造模式的争论。一种是洋底高原增生模式, 认为其起源于地幔柱作用形成的洋底高原, 厚实的基性洋壳和难熔残余地幔具有低密度和高强度, 从而赋予块体先天的稳定性(Kusky和Mooney, 2015)。另一种是俯冲带相关的弧岩浆分异与下地壳再分层模式, 强调古元古代俯冲背景下钙碱性岩浆分异形成下地壳上部轻弱、下部致密坚固的分层结构, 并通过壳幔耦合实现整体稳定(He等, 2018)。这两种机制对地壳成分具有截然不同的预测: 洋底高原模型预期结晶地壳平均成分偏基性, 而与俯冲再分层相关的过程则预期中酸性成分占主导(如Hacker等, 2011)。

结合本研究的地壳平均成分估算结果, 鄂尔多斯块体的SiO₂含量仅约53.5 wt%, 明显偏低, 显示出整体中-基性组成特征。这一证据与俯冲相关模式存在差异, 而更符合洋底高原型地壳的预测。因此, 可以推测鄂尔多斯块体的形成可能与早期洋底高原物质的增生密切相关, 其厚实、强度高的地壳-地幔结构为后期长期稳定提供了物质基础。类似的特征在塔里木盆地也有所体现, 该盆地高密度、高波速的结晶地壳特点同样指示其基底可能为残存的洋底高原物质(Deng等, 2017)。

综合来看, 本研究结果支持如下构造演化模型: 鄂尔多斯基底为太古宙形成的岩石圈残块, 其地壳结构源自洋底高原型地壳增生过程, 在后续多期构造-地幔耦合背景下仍保持稳定。其稳定性维持机制既依赖于早期刚性结构的继承性保护, 亦反映出周边薄弱带在应力传递与能量释放上提供的构造缓冲作用。这一“稳定核+活动边缘”的复合动力格局, 不仅适用于鄂尔多斯的演化, 也

为全球其他古老克拉通单元的长期保存提供了区域范式与理论参考。

6 结论

本文联合多频接收函数与Pn多次波成像, 获取了鄂尔多斯块体北部从沉积层至结晶地壳的高分辨率结构模型。结果显示, 块体内部结晶地壳厚度稳定(约39.5 km)、波速均一(V_p 为 $6.5 \pm 0.05 \text{ km s}^{-1}$), 推算的SiO₂含量($53.5 \pm 2.1 \text{ wt\%}$)指示其整体为中-基性成分, 支持其源自早期洋底高原物质增生并长期保存未受改造。相比之下, 块体东部边缘表现出地壳加厚和沉积层快速减薄。均衡分析表明, 地壳厚度、沉积剥蚀、岩石圈地幔结构与幔源岩浆活动共同调控地表高程变化, 反映浅部与深部过程的协同均衡作用。整体结构与成分特征揭示了鄂尔多斯块体作为华北克拉通稳定核心的继承性与构造独立性, 为理解克拉通长期稳定性机制提供了新证据。

致谢 两位审稿人及责任编委对论文提出建设性修改意见, Hans THYBO教授和邓阳凡研究员在论文撰写过程中给予宝贵建议, 张炎博士、曾宪伟和姚强在数据可视化方面提供帮助, 中国地震局李君副研究员提供区域地震目录、许丰工程师协助完成地震数据下载, 张伟杰博士分享鄂尔多斯块体地表地质图件, 刘锦教授提供华北克拉通古老岩石分布资料, 在此一并致谢。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责, 详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

参考文献

- 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征. 石油学报, 42: 1255–1269
- 黄方, 何丽娟, 吴庆举. 2015. 鄂尔多斯盆地深部热结构特征及其对华北克拉通破坏的启示. 地球物理学报, 58: 3671–3686
- 彭澎. 2016. 华北陆块前寒武纪岩墙群及相关岩浆岩地质图(1:250万地质图及说明书). 北京: 科学出版社
- 汤晨晓, 陈凌, 王旭. 2022. 基于接收函数多频率直达P波振幅约束鄂尔多斯和四川盆地浅部地壳S波速度结构. 中国科学: 地球科学, 52: 1086–1099
- 王旭, 陈凌, 凌媛, 等. 2019. 基于接收函数直达P波振幅研究地壳浅层S波速度结构新方法及其在青藏高原东北缘的应用. 中国科学: 地球科学, 49: 1788–1800
- 危自根, 储日升, 陈凌. 2015. 华北克拉通地壳结构区域差异的接收函数研究. 中国科学: 地球科学, 45: 1504–1514
- 吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 等. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏. 中国科学: 地球科学, 44: 2358–2372
- 吴建平, 刘雅宁, 钟世军, 等. 2022. 鄂尔多斯块体及周边地区岩石圈结构的接收函数与面波联合反演研究. 中国科学: 地球科学, 52: 1532–1546
- Ai Y S, Zheng T Y. 2005. NCISP4 International Federation of Digital

- Seismograph Networks
- Ammon C J. 1991. The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. *Bull Seismol Soc Am*, 81: 2504–2510
- Becker T W, Faccenna C, Humphreys E D, et al. 2014. Static and dynamic support of western United States topography. *Earth Planet Sci Lett*, 402: 234–246
- 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: 96–115
- Chen L, Cheng C, Wei Z. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 286: 171–183
- Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *J Geophys Res*, 100: 9761–9788
- Deng Y, Levandowski W, Kusky T. 2017. Lithospheric density structure beneath the Tarim basin and surroundings, northwestern China, from the joint inversion of gravity and topography. *Earth Planet Sci Lett*, 460: 244–254
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochim Cosmochim Acta*, 62: 1959–1975
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432: 892–897
- Hacker B R, Kelemen P B, Behn M D. 2011. Differentiation of the continental crust by relamination. *Earth Planet Sci Lett*, 307: 501–516
- He Y, Zheng T, Ai Y, et al. 2018. Growth of the lower continental crust via the relamination of arc magma. *Tectonophysics*, 724–725: 42–50
- Huang S H, Thybo H, Dong S W, et al. 2022. Upper mantle seismic structure in the Ordos Block, China. *J Geodyn*, 151: 101921
- Jia S, Wang F, Tian X, et al. 2014. Crustal structure and tectonic study of North China Craton from a long deep seismic sounding profile. *Tectonophysics*, 627: 48–56
- Kusky T, Mooney W. 2015. Is the Ordos Basin floored by a trapped oceanic plateau? *Earth Planet Sci Lett*, 429: 197–204
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *J Geophys Res*, 84: 4749–4762
- Li C, van der Hilst R D. 2010. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltimes tomography. *J Geophys Res*, 115: 2009JB006882
- Liu L, Chen L, Cao Z, et al. 2025. Periodic instability and restoration of cratonic lithosphere. *Natl Sci Rev*, 12: nwaf027
- Liu Y, Wu J, Cai Y, et al. 2024. Crustal deformation shown by high-resolution P-wave velocity structures in the Ordos Block and northeastern Qinghai-Xizang Plateau. *Geophys J Int*, 240: 1124–1134
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Rev Geophys*, 33: 267–309
- Sui S, Shen W, Mahan K, et al. 2022. Constraining the crustal composition of the continental U.S. using seismic observables. *GSA Bull*, 135: 2038–2056
- Tian X, Teng J, Zhang H, et al. 2011. Structure of crust and upper mantle beneath the Ordos Block and the Yinshan Mountains revealed by receiver function analysis. *Phys Earth Planet Inter*, 184: 186–193
- Tian X, Zelt C A, Wang F, 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, Sun R, et al. 2009. Seismic imaging of the crust and upper mantle beneath the North China Craton. *Phys Earth Planet Inter*, 172: 169–182
- Wang C Y, Sandvol E, Lou H, et al. 2017. Evidence for a crustal root beneath the Paleoproterozoic collision zone in the northern Ordos block, North China. *Precambrian Res*, 301: 124–133
- Wei Z, Chu R, Wang J, et al. 2023. E-W and S-N differences in the sedimentary cover and crystalline crust in the cratonic Ordos Basin from receiver function analysis. *J Geophys Res Solid Earth*, 128: e2022JB025696
- Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, et al. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 47: 173–195
- Xia B, Thybo H, Artemieva I M. 2020. Lithosphere mantle density of the North China Craton. *J Geophys Res Solid Earth*, 125: e2020JB020296
- Xu M, He J. 2022. Seispy: Python module for batch calculation and postprocessing of receiver functions. *Seismol Res Lett*, 94: 935–943
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys Chem Earth Part A-Solid Earth Geodesy*, 26: 747–757
- Xu Y G, Chung S, Ma J, 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. *J Geol*, 112: 593–605
- Xu Y G, Ma J L, Frey F A, et al. 2005. Role of lithosphere-asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. *Chem Geol*, 224: 247–271
- Yang Y, Li W, Ma L. 2005. Tectonic and stratigraphic controls of hydrocarbon systems in the Ordos basin: A multicycle cratonic basin in central China. *Bulletin*, 89: 255–269
- 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. *Earth Planet Sci Lett*, 357–358: 366–375
- Yu C Q, Zheng Y, Shang X. 2017. Crazyseismic: A MATLAB GUI-based software package for passive seismic data preprocessing. *Seismological Res Lett*, 88: 410–415
- Yu C, Zhan Z, Hauksson E, et al. 2019. Determining Moho depth beneath sedimentary basins using regional Pn multiples. *Bull Seismol Soc Am*, 109: L20307
- Zhang Y, Chen L, Ai Y, et al. 2019. Lithospheric structure beneath the central and western North China Craton and adjacent regions from S-receiver function imaging. *Geophys J Int*, 219: 619–632
- Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, et al. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 107: 45–73
- Zhu R, Zhao G, Xiao W, et al. 2021. Origin, accretion, and reworking of continents. *Rev Geophys*, 59: e2019RG000689

(责任编辑: 邓阳凡)