

危自根, 储日升, 谢军等. 2024. 当阳复向斜页岩气探测区地壳结构及其构造暗示. 地球物理学报, 67(8): 2963-2971, doi: 10.6038/cjg2023R0015.

Wei Z G, Chu R S, Xie J, et al. 2024. Crustal structure in the Dangyang Synclinorium shale gas field and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(8): 2963-2971, doi: 10.6038/cjg2023R0015.

当阳复向斜页岩气探测区地壳结构及其构造暗示

危自根, 储日升*, 谢军, 范心甜

中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077

摘要 本文采用接收函数 $H-\kappa$ 叠加、多频接收函数和面波联合反演方法, 获得了扬子克拉通当阳复向斜区 21 个密集流动地震台下方的地壳厚度、 V_p/V_s 比和 S 波速度. 结果表明, 该区平均地壳厚度和 V_p/V_s 比值分别为 33.8 km 和 1.75, 推测当阳复向斜经历过下地壳减薄但地壳整体尚保持典型克拉通结构特征. 研究区绝大部分台站都在 3~4 km 深度存在 1~2 km 厚的低 S 波速度层, 推测可能与该深度范围内富集高孔隙度和低密度的页岩气层有关. 本研究表明, 基于密集流动地震台阵被动源数据资料, 可为油气资源勘探提供有价值的参考.

关键词 当阳复向斜; 页岩气勘探; 低速薄层; 接收函数和面波联合反演; 接收函数 $H-\kappa$ 叠加

doi: 10.6038/cjg2023R0015

中图分类号 P315, P313

收稿日期 2023-01-06, 2023-06-12 收修定稿

Crustal structure in the Dangyang Synclinorium shale gas field and its tectonic implications

WEI ZiGen, CHU RiSheng*, XIE Jun, FAN XinTian

State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract In this paper, the crustal thickness, V_p/V_s ratio and S-wave velocity beneath 21 temporary seismic stations deployed in the Dangyang Synclinorium of the Yangtze Craton were obtained using the $H-\kappa$ stacking method of receiver function and joint inversion of multifrequency receiver function and surface wave dispersion. An average crustal thickness of 33.8 km and average V_p/V_s ratio of 1.75 were obtained in the Dangyang Synclinorium, suggesting that it has experienced thinning of the lower crust, but the body of crust still maintains typical cratonic structure. 1~2 km-thick low-velocity layer at depths of 3~4 km was imaged beneath most stations, which may be related to the enrichment of shale gas strata with high porosity and low density within the depth range. Our study suggests that passive source data from dense temporary seismic stations can provide valuable references for oil-gas exploration.

Keywords Dangyang Synclinorium; Shale gas exploration; Low-velocity thin layer; Joint inversion of receiver function and surface wave dispersion; $H-\kappa$ stacking method of receiver function

0 引言

下志留统龙马溪组储层富有厚度大、分布广以及有机质丰度较高的页岩(赵文智等, 2020). 目前, 在四川盆地及其周边等上扬子地区建立了多个页岩气示

页岩气勘探表明, 中国南方上奥陶统五峰组—

基金项目 国家自然科学基金(42325401, U20A2095)和湖北省自然科学基金(2023AFB1076)和中国科学院战略先导科技专项(XDB41020202, XDB18010304)资助.

第一作者简介 危自根, 副研究员, 主要从事地震学壳幔结构研究. E-mail: weizigen@apm.ac.cn

* **通讯作者** 储日升, 研究员, 主要从事地震学和地球动力学研究. E-mail: chur@apm.ac.cn

范区,比如长宁—威远国家级页岩气先导示范区.地震勘探技术具有精度高和穿透深度大的特点,在油气勘探开发前期被广泛应用.然而,地震勘探经济成本高且需要人工激发震源,应用成本相对低的被动源观测方法来探测油气资源受到了科研人员广泛和长期的关注.

近年来,油气勘探相对匮乏的中扬子块体受到了科研人员的广泛关注,其中当阳复向斜地区成为页岩气勘探开发的重要区域(赵文智等, 2020).当阳复向斜是江汉盆地的次级构造单元,位于江汉盆地西侧,黄陵背斜东侧,呈近东南-西北向展布(图1).当阳复向斜具有元古代变质基底,显生宙以来先后

经历了印支期褶皱阶段、燕山期逆冲推覆定型阶段和喜马拉雅期的破坏改造构造发展阶段,具有双重构造、构造反转和推覆滑脱三大地质构造特征(杨玉江, 1997).钻井资料表明,当阳复向斜主要发育以碳酸盐岩和泥质岩为主的四套烃源岩,页岩气开发有利区埋深为2000~4500 m,泥页岩总厚度超过150 m,优质页岩厚度约为50 m,五峰组—龙马溪组具备良好的页岩气成藏地质条件(邹辰等, 2016; 范家维等, 2020).由于经历过多期构造运动以及复杂的构造变形,目前对当阳复向斜的精细深部结构特征研究以及油气勘探程度相对较低,制约了该区页岩气开发(何勇等, 2021).

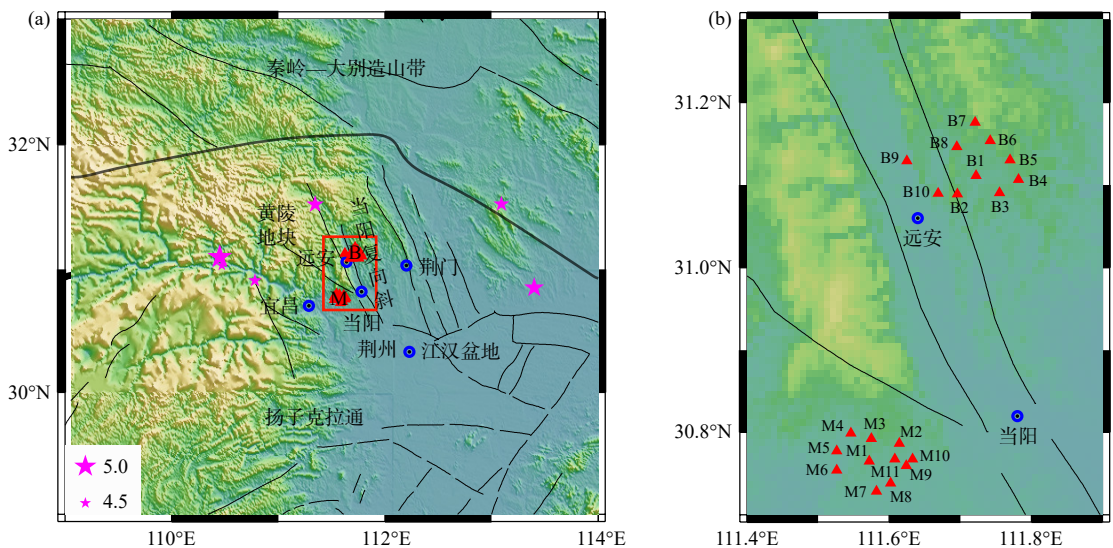


图1 当阳复向斜构造背景,周边中强地震(粉色五角星)和流动台站(红色三角形)分布

(a)中红色矩形表示研究区域(b). (a)中粗、细实线分别为构造边界线和断层分布(Deng et al., 2003).

Fig. 1 Tectonic setting and distribution of surrounding moderate-strong earthquakes (pink pentagrams) and temporary seismic stations (red triangles) in the Dangyang Synclinorium

Red rectangle in (a) shows the study region (b). Thick and thin solid lines in (a) show the tectonic boundaries and faults (Deng et al., 2003), respectively.

接收函数与面波成像方法是获得壳幔结构的两种常用工具(James, 1971; Langston, 1979; Shapiro and Campillo, 2004).接收函数和面波数据联合反演(Julià et al., 2000)能够减小各自数据单独反演的非唯一性和充分发挥不同方法的优势,受到了广泛应用并获得了丰富的高价值成果(胡家富等, 2005; Liu et al., 2014; Zheng et al., 2016; Cai et al., 2021).Wei等(2022)采用接收函数和面波联合反演方法获得了四川威远页岩气场~5 km台间距流动地震台站下方的地壳S波速度,发现在低海拔向斜区3~4 km深处普遍存在1~2 km厚的低速层,推测该层低速特征可能与该深度的奥陶系和志留系页岩气有关.本文中,我们采用多频接收函数和面波联合反演方法

(Herrmann, 2013)反演当阳复向斜区两个密集流动地震台阵下方的地壳S波速度结构(图1).基于台阵下方浅层和深层速度特征,分析探讨联合反演方法和观测数据是否能用来研究该区的页岩气分布特征,以及当阳复向斜中下地壳是否在显生宙多期构造运动中受到改造与破坏.

1 数据与方法

1.1 数据

本文使用资料包括远震接收函数和瑞雷面波群速度和相速度频散数据.提取接收函数的远震事件波形来自中国科学院精密测量科学与技术创新研

究院于 2021—2022 年在当阳复向斜地区布置的由 21 个宽频带地震仪组成的两个台阵 (M 和 B) 记录到的数据 (图 1)。这些流动地震台站相邻台间距小于 5 km, 所用的地震仪型号为频带宽度为 120 s~50 Hz 的 Guralp 3ESPCDE 一体机, 有效观测数据时间为 3~9 个月不等。为了提取尽可能多的有效接收函数, 通过大量不同震中距提取的接收函数对比, 发现在 28°~30° 和 90°~95° 震中距范围内也能提取

出高质量的接收函数。对台阵观测期间记录到的大于 5.5 级, 28°~95° 震中距范围内的远震事件 (图 2a), 我们截取直达 P 波到时前 20 s 和后 80 s 的波形数据, 采用时间域迭代反褶积方法 (Herrmann, 2013) 提取高斯系数分别为 1.0, 2.0 和 3.0 的 P 波径向接收函数。对提取的接收函数, 我们人工删除 Ps 震相不清晰等低质量的波形, 保留 1161 个接收函数来开展下一步的成像工作。

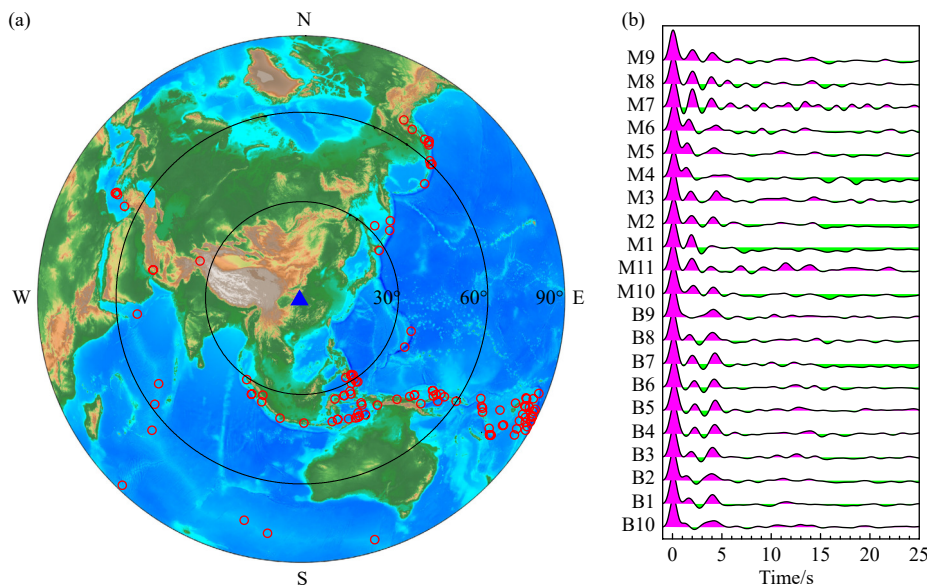


图 2 本文用到的台站 B6 (三角形) 记录到的远震事件 (圆圈) 分布 (a) 以及高斯系数为 2.0 的单台径向接收函数叠加后的波形 (b)

Fig. 2 (a) Teleseismic event (circles) distribution used for station B6 (blue triangle) and (b) stacked waveforms of radial receiver functions for each station with a Gaussian factor of 2.0 in this study

面波群速度和相速度频散曲线来自两部分。0.8~5 s 群速度和相速度频散曲线来自台阵 M 和 B 观测资料提取到的数据, 8~70 s 相速度频散曲线和 8~50 s 群速度频散曲线来自噪声/面波成像结果 (Shen et al., 2016)。本文采用地震学经典计算程序 CPS 软件包 (Herrmann, 2013) 和参考 Bensen 等 (2007) 提出的噪声数据分析处理流程来提取 0.8~5 s 频散曲线。基于去除 6 级以上地震、仪器响应、均值和倾斜分量以及进行时域规则化和频谱白噪声化的 24 小时垂直分量数据, 我们计算了不同台阵所有台站一天记录的互相关, 然后再叠加相同台站对不同时间段的互相关函数。图 3a 和 3b 展示了不同台站对垂直分量 1~5 s 周期的互相关函数, 可以看出明显的瑞雷面波信号。图 3c 和 3d 展示了在 1.5~4.5 km·s⁻¹ 速度窗和 0.5~5 s 时间窗口内, 参考台间距至少超过 1 倍波长以及信噪比大于 5 的标准提取的群速度和相速度频散曲线。

1.2 方法

1.2.1 接收函数 H - κ 叠加方法

接收函数 H - κ 叠加方法 (Zhu and Kanamori, 2000) 被广泛用来研究全球不同构造区地震台站下方的地壳厚度 (H) 与平均 V_p/V_s 比 (κ) 信息 (如 He et al., 2014; Li et al., 2014; Cheng et al., 2022)。该方法假设地壳为一维水平结构, 通过叠加 Moho 面 Ps 转换震相和 PpPs/PsPs + PpSs 多次波震相的能量值来获取地壳结构信息。针对单台保留的接收函数, 我们以 4° 为步长对每 4° 范围内所有方位角的接收函数进行叠加以减小横向不均匀性和突出有效信号, 然后对叠加后的接收函数在 H - κ 平面域内进行震相叠加能量搜索, 进而获得台站下方的地壳厚度和平均 V_p/V_s 比。在 H - κ 搜索过程中, 参考研究区人工源地震勘探结果 (Li et al., 2006; Zhang et al., 2013), 选取地壳平均 P 波速度为 6.35 km·s⁻¹, 根据 Ps, PpPs 和 PpSs + PsPs 震相信噪比逐渐减小特征, 加权值分别

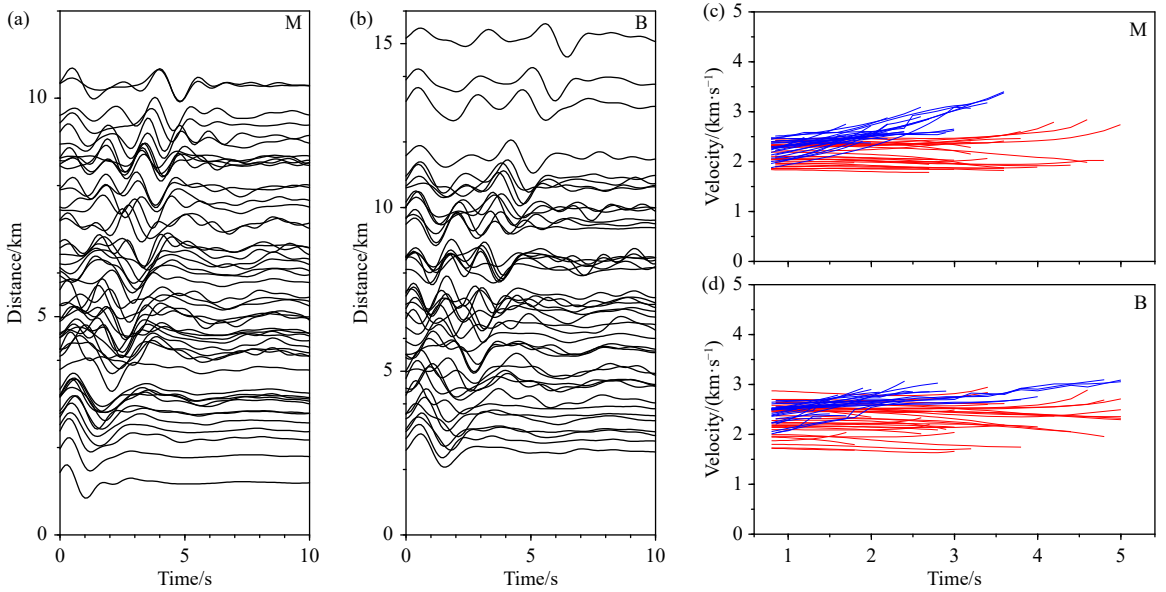


图 3 M 和 B 台阵内不同台站对提取的互相关函数(a, b)和群(红色线条)/相速度(蓝色线条)频散曲线(c, d)

Fig. 3 Cross-correlation functions (a, b) and group (red lines)/phase (blue lines) velocity dispersion curves (c, d) extracted from different station-pair in arrays M and B

设为 0.6, 0.3, 0.1, 高斯系数为 2.0. 图 4 展示了两个典型台站叠加后的接收函数波形和 $H-\kappa$ 叠加结果.

1.2.2 接收函数和面波联合反演方法

本文采用多频接收函数和面波联合反演方法,

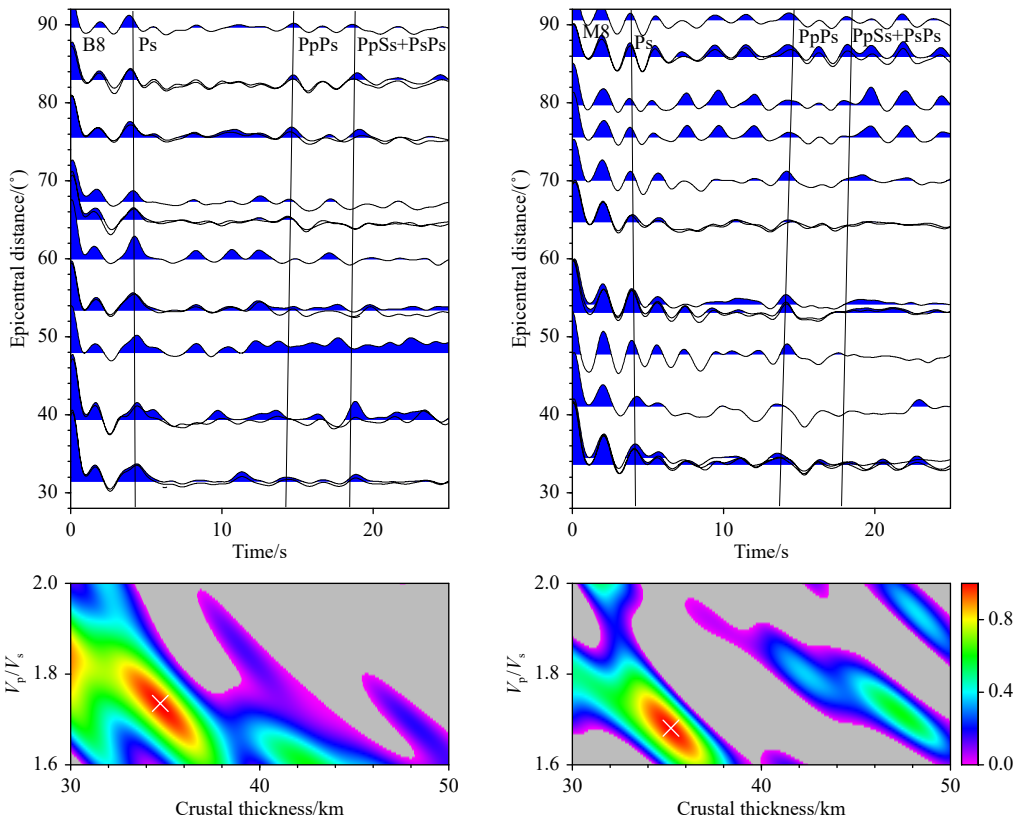


图 4 台站 B8 和 M8 按震中距排列的接收函数道集和 $H-\kappa$ 叠加结果

上图中黑色实线为不同震相的理论到时, 下图中十字叉表示最佳地壳厚度和 V_p/V_s 比值.

Fig. 4 Receiver functions sorted by epicentral distance and $H-\kappa$ stacking results for stations B8 and M8

Black lines in the upper panels show the theoretical arrival times of different phases, crosses in the lower panels give the best values of crustal thickness and V_p/V_s ratio.

同时拟合高斯系数为 1.0、2.0 和 3.0 的接收函数和群/相速度频散曲线 (Herrmann, 2013), 反演单台下方地壳的 S 波速度. 理论测试表明通过同时拟合多个频段接收函数可以用来提取不同尺度的深部结构特征 (Li et al., 2017). 反演过程中, 拟合的接收函数时窗为 $-5 \sim 25$ s, 群/相速度频散曲线分别为 $0.8 \sim 50$ s 和 $0.8 \sim 70$ s. 基于研究区频散曲线和单台接收函数的分辨率和周期特征, 经过不同权重测试, 我们发现接收函数和面波权重值为 7:3 时, 能最佳拟合研究区的接收函数和频散曲线. 初始模型设置中, 顶部 8 层每层 1 km, 其他层为 2 km 一层, 反演深度为

$0 \sim 60$ km. 为了减小联合反演对初始模型的依赖性以及 $H-\kappa$ 叠加得到的 H 对输入 V_p 的敏感性 (Zhu and Kanamori, 2000; 危自根等, 2016), 我们设置 Moho 面为 4 km 的连续过渡带以及初始地壳 S 波速度为 AK135 模型的平均速度 $3.617 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, Moho 面厚度和 P 波速度参考 $H-\kappa$ 叠加结果. 去除接收函数拟合度小于 75% 的波形, 以免对结果可靠性造成影响. 图 5 展示了研究区两典型台站多频接收函数以及联合反演的波形和结果. 可以看出, 不同频率接收函数和面波频散曲线都拟合较好, 表明结果的相对可靠性.

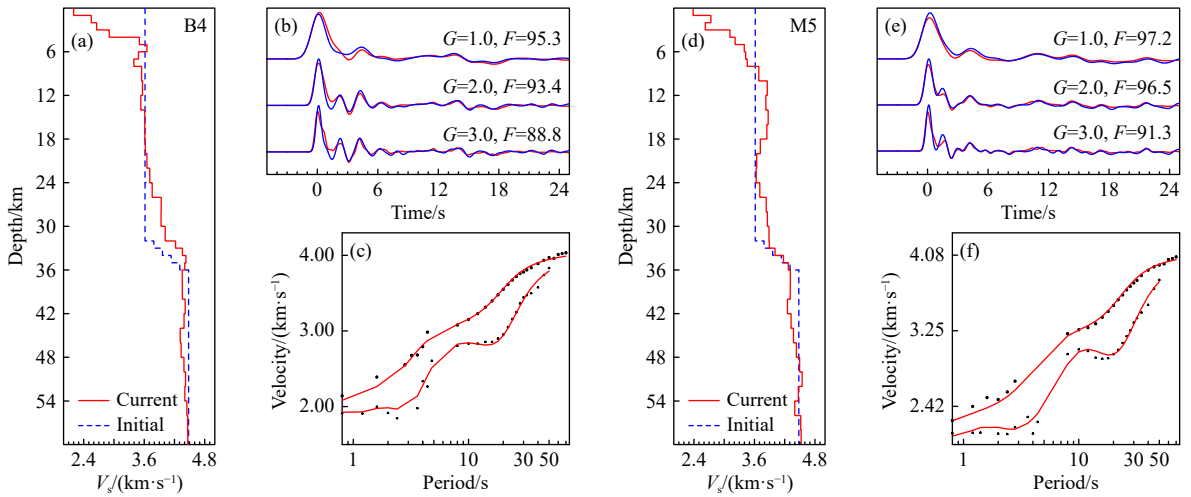


图 5 台站 B4 和 M5 多频接收函数和面波联合反演示意图

(a, d) 中, 蓝色虚线和红色实线分别表示初始和反演的 S 波速度. (b, e) 中, 蓝色和红色实线分别表示观测和拟合的接收函数. (c, f) 中, 三角形和圆圈分别表示提取的不同周期群速度和相速度值, 红色线条表示拟合的频散曲线. F 和 G 分别为拟合度和高斯系数.

Fig. 5 Schematic diagrams for joint inversion of multi-frequency receiver function and surface wave data for stations B4 and M5

Blue dashed lines and red solid lines in (a, d) show the initial and inverted S-wave velocities, respectively. Blue and red solid lines in (b, e) show the observed and recovered receiver functions, respectively. In (c, f), triangles and circles show the group and phase velocities in different periods, respectively, and red lines show the fitted dispersion curves. F and G show fitness and Gaussian factor, respectively.

2 结果与讨论

2.1 联合反演结果可靠性分析

相比于只依赖于 Moho 面主要震相走时的接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法, 接收函数和面波联合反演方法需要设置初始模型且通过拟合波形特征来反演结果. 图 6 展示了台站 M5 的数据质量和初始模型对联合反演结果的影响. 针对初始模型影响, 我们把初始模型速度变化 $\pm 5\%$, 其他参数不变进行联合反演 (图 6a, b, c). 结果表明, 不同初始模型拟合的不同频率的接收函数和频散曲线以及反演后的波形都几乎一致. 针对数据不确定性 (图 6d, e, f), 我们在 $\pm 1\%$ 误

差范围内随机生成 100 套接收函数和频散曲线组合, 然后联合反演这些组合的 S 波速度结构. 结果表明, 在经历 100 次的联合反演后, 反演结果都和最终数据得到的 S 波速度具有类似的深度变化特征, 不同层与最终值最大的速度差异在 $10 \sim 12$ km, 约为 1%. 上述对初始模型和数据不确定性的分析表明, 本文采用联合反演得到的结果具有强的稳定性和相对可靠性.

2.2 当阳复向斜地壳结构和构造暗示

$H-\kappa$ 叠加结果表明, 在当阳复向斜中, B 台阵地壳厚度在 $30.3 \sim 35.3$ km 范围内变化, 平均厚度为 33.4 km; V_p/V_s 比值在 $1.70 \sim 1.85$ 范围内变化, 平均值为 1.77. M 台阵地壳厚度在 $30.3 \sim 35.7$ km 变化,

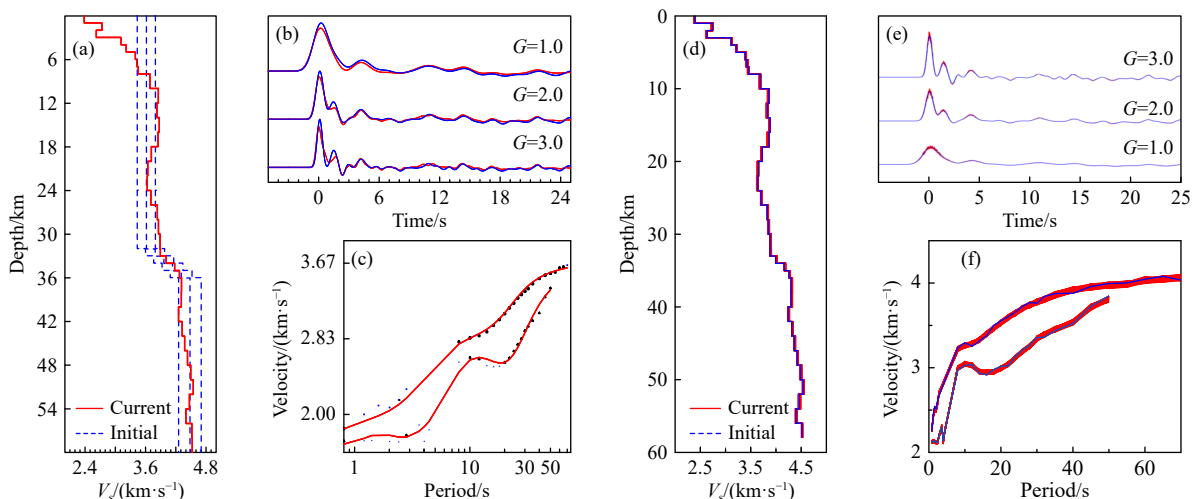


图 6 初始模型 (a, b, c) 和数据不确定性 (d, e, f) 对台站 M5 联合反演结果的影响

(a, b, c) 中, 蓝色虚线、实线、三角形和圆圈分别表示初始模型 (a)、观测的接收函数 (b) 和提取的不同周期群速度和相速度值 (c), 红色线为对应的反演结果和拟合波形. (d, e, f) 中, 红色和蓝色线条分别为随机生成的 100 套以及本文最终使用的反演模型 (d)、接收函数 (e) 和频散曲线 (f). G 为高斯系数.

Fig. 6 Effects of different initial models (a, b, c) and data uncertainty (d, e, f) on the joint inversion results for station M5

In (a, b, c), blue dashed lines, solid lines, triangles and circles show the initial models (a), observed receiver functions (b) and group and phase velocities in different periods (c), respectively, red lines are corresponding inverted results and fitted waveforms. In (d, e, f), red and blue lines show the random 100 sets and last inverted models (d), receiver functions (e) and dispersion curves (f) in this study, respectively. G shows the Gaussian factor.

平均值为 34.1 km; V_p/V_s 比值在 1.68~1.86 范围内变化, 平均值为 1.74. 两个台阵平均地壳厚度为 33.8 km, 平均波速比为 1.75. 参考全球和中国大陆地震 P 波速度结构 (Christensen and Mooney, 1995; Li et al., 2006) 以及全球大陆地壳平均 $\sim 1.78 V_p/V_s$ 比值 (Zandt and Ammon, 1995), 我们设置 $3.82 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为中下地壳的分界速度值. 结果表明, B 和 M 台阵大

部分台站下地壳厚度小于 8 km, 个别台站薄于 4 km (图 7, 8). 本文观测到的薄的下地壳与人工源观测到的湖北地区小于 10 km 厚的下地壳一致 (Li et al., 2006), 明显低于上扬子地区四川盆地达到 16 km 厚的下地壳 (Wei et al., 2020). 我们观测到的研究区域地壳厚度与人工源测深 (Li et al., 2006) 和接收函数成像 (Cheng et al., 2022) 得到的厚度也是一

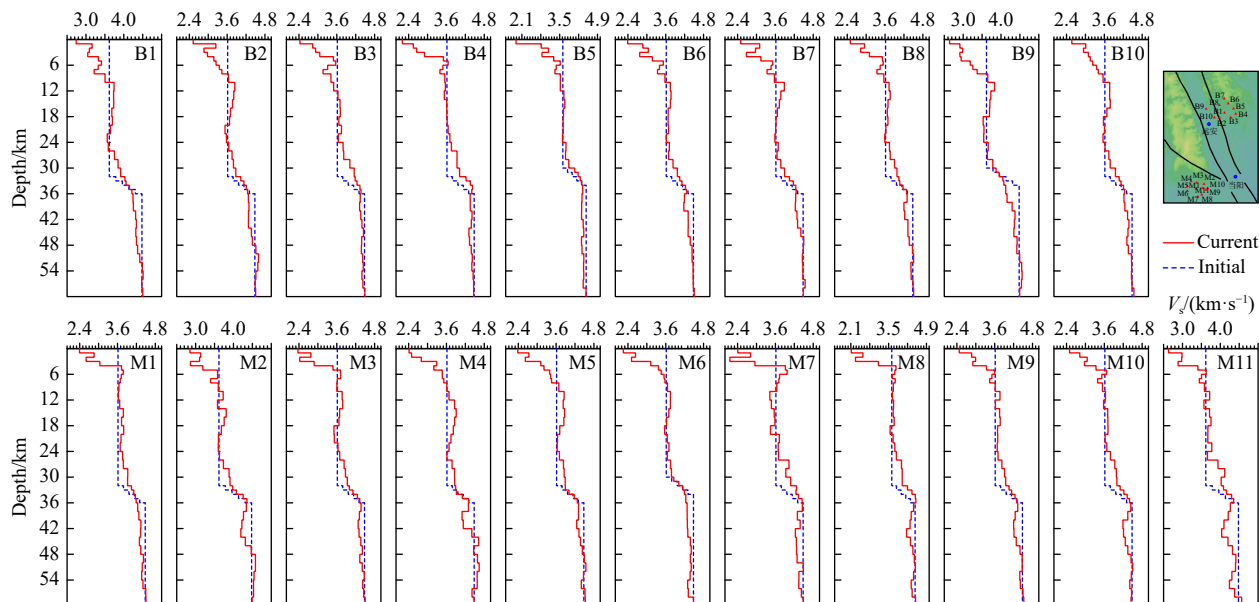


图 7 研究区台站下方初始 (蓝虚线) 和反演 (红实线) 的 S 波速度

Fig. 7 The initial (blue dashed line) and inverted (red solid line) S-wave velocity beneath each station in the study region

致的. 已有研究表明, 当阳复向斜位于长期构造稳定的扬子克拉通, 其中位于上扬子地块的四川盆地地壳厚度超过 40 km (如 He et al., 2014; Li et al., 2014; Cheng et al., 2022). 本文观测到的当阳复向斜区 < 35 km 厚的薄地壳和整体低于全球大陆平均值的

V_p/V_s 比表明, 该区地壳减薄主要发生在下地壳部分. 鉴于该区相对低的平均 V_p/V_s 比值 (~ 1.75) 以及地幔铁镁质物质底侵会显著增加 V_p/V_s 比 (Ji et al., 2009), 我们推测该区地壳尚未受到地幔物质影响.

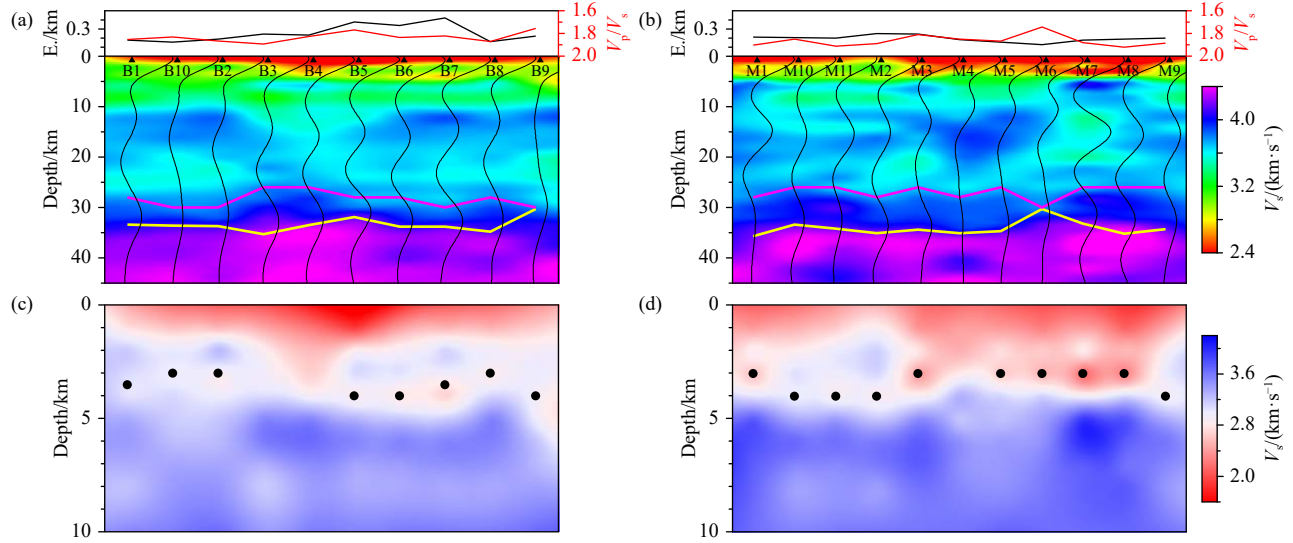


图 8 研究区台站(三角形)下方海拔($E.$, 粗黑线)、平均波速比(红线)、基于本文反演地壳模型和 IASP91 地幔模型的高斯系数为 2.0 的 Ps 震相深度域接收函数(黑线)、中下地壳分界面(紫线)、Moho 面(黄线)和 S 波速度分布(黑色圆点(c, d)表明台站下方浅层低速层位置).

Fig. 8 Elevation ($E.$, thick black lines), average V_p/V_s ratio (red lines), receiver functions in the depth domain with Gaussian factor of 2.0 based on Ps phase of inverted crustal model from this paper and mantle model from IASP91 Model (black lines), middle-lower crust interface (purple line), Moho depth (yellow lines) and S-wave velocity beneath each station (triangles) in the study region

The black dots (c, d) mark the locations of the shallow low-velocity layer beneath the stations.

2.3 浅层低速薄层 V_s 页岩气

联合反演结果表明, 除了台站 B3 和 B4 外(图 7), 其他台站在 3~5 km 深度都存在 1~2 km 厚低速层, 并且集中在 3~4 km 深度(图 8). Wei 等(2022)通过理论测试分析表明, 在高斯系数与本文相同情况下, 采用多频接收函数和面波联合反演方法能可靠地反演出 4 km 深度 1 km 厚的低速层. 基于多频接收函数和面波相速度频散曲线联合反演, Wei 等(2022)发现在威远页岩气场低海拔向斜区 3~4 km 深处普遍存在 1~2 km 厚的低速层, 而该低速层在相对高海拔的背斜区却没有被观测到, 因此推测该层低速特征可能与对应深度的奥陶系和志留系页岩气有关. 目前当阳复向斜页岩气露头、钻井和地震勘探等资料研究表明(邹辰等, 2016; 范家维等, 2020), 该区主要发育以碳酸盐岩和泥质岩为主的四套烃源岩, 包括上震旦统灯影组、下寒武统石牌组—水井沱组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组

和上三叠统九里岗组—下侏罗统香溪组, 其中五峰组—龙马溪组页岩气资源最为丰富, 页岩气勘探开发有利区埋深为 2000~4500 m, 泥页岩总厚度大于 150 m. 一般来说, 页岩气富集往往会导致相应层具有相对高的孔隙度和低密度特征, 进而降低该层位的 S 波速度. 基于上述观测资料, 我们推测本文观测到 M 和 B 台阵下方 3~4 km 深度 1~2 km 低速层可能与该层富含页岩气有关.

3 结论

本文采用接收函数 $H-\kappa$ 叠加和多频接收函数与面波联合反演方法获得了当阳复向斜密集流动台站下方的地壳厚度, V_p/V_s 比以及 S 波速度结构. 结果表明, B 台阵地壳厚度和 V_p/V_s 比平均值分别为 33.4 km 和 1.77, M 台阵地壳厚度和 V_p/V_s 比平均值分别为 34.1 km 和 1.74. B 和 M 台阵大部分台站下

地壳厚度小于 8 km, 个别台站薄于 4 km. 本文观测到的相对薄的地壳和低的 V_p/V_s 比表明, 该区下地壳发生了减薄但地壳尚未受到地幔物质影响. 研究区台站下方在 3~5 km 深度普遍存在 1~2 km 厚低速层, 且集中在 3~4 km, 推测可能与该深度范围内富集页岩气有关.

致谢 感谢中国科学院精密测量科学与技术创新研究院提供观测数据, 感谢审稿专家的建设性意见.

References

- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1239-1260.
- Cai Y, Wu J P, Rietbrock A, et al. 2021. *S* wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath Shanxi rift, central North China Craton and its tectonic implications. *Tectonics*, 40(4): e2020TC006239, doi: [10.1029/2020TC006239](https://doi.org/10.1029/2020TC006239).
- Cheng S H, Xiao X, Wu J P, et al. 2022. Crustal thickness and V_p/V_s variation beneath continental China revealed by receiver function analysis. *Geophysical Journal International*, 228(3): 1731-1749.
- Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view. *J. Geophys. Res. : Solid Earth*, 100(B6): 9761-9788.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. 2003. Basic characteristics of active tectonics of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(4): 356-372.
- Fan J W, Chen K Q, Shen J J, et al. 2020. Shale reservoir characteristics of Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi Formations in Dangyang synclinorium, Middle Yangtze region. *Petroleum Geology and Experiment* (in Chinese), 42(1): 69-78.
- 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.
- He Y, Zhang D T, Li W M, et al. 2021. Fault system in the intensely superimposed reworked zone of Middle Yangtze area and its formation mechanism: Fault characteristics of Dangyang synclinorium and its influence on shale gas preservation. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 41(9): 1-11.
- Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismol. Res. Lett.*, 84(6): 1081-1088.
- Hu J F, Zhu X G, Xia J Y, et al. 2005. Using surface wave and receiver function to jointly inverse the crust-mantle velocity structure in the West Yunnan Area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48(5): 1069-1076.
- James D E. 1971. Andean crustal and upper mantle structure. *J. Geophys. Res.*, 76(14): 3246-3271.
- Ji S C, Wang Q, Salisbury M H. 2009. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson's ratio. *Tectonophysics*, 463(1-4): 15-30.
- Julià J, Ammon C J, Herrmann R B, et al. 2000. Joint inversion of receiver function and surface wave dispersion observations. *Geophysical Journal International*, 143(1): 99-112.
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *J. Geophys. Res. : Solid Earth*, 84(B9): 4749-4762.
- Li S L, Mooney W D, Fan J C. 2006. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data. *Tectonophysics*, 420(1-2): 239-252.
- Li X L, Li Z W, Hao T Y, et al. 2017. A multi-frequency receiver function inversion approach for crustal velocity structure. *Comput. Geosci.*, 102: 45-55.
- Li Y H, Gao M T, Wu Q J. 2014. Crustal thickness map of the Chinese mainland from teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 611: 51-60.
- 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.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31(7): L07614, doi: [10.1029/2004GL019491](https://doi.org/10.1029/2004GL019491).
- 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.
- Wei Z G, Chu R S, Chen L, et al. 2016. Analysis of $H-\kappa$ stacking of receiver functions beneath crust with complex structure: taking the Anatolia Plate as an example. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(11): 4048-4062, doi: [10.6038/cjg20161110](https://doi.org/10.6038/cjg20161110).
- Wei Z G, Li Z W, Chen L, et al. 2020. Crustal structure underneath central China across the Tibetan Plateau, the North China Craton, the South China Block and the Qinling-Dabie Orogen constrained by multifrequency receiver function and surface wave data. *Journal of Asian Earth Science*, 202: 104535, doi: [10.1016/j.jseas.2020.104535](https://doi.org/10.1016/j.jseas.2020.104535).
- Wei Z G, Chu R S, Xie J, et al. 2022. Crustal structure in the Weiyuan shale gas field, China, and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 837: 229449, doi: [10.1016/j.tecto.2022.229449](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229449).
- Yang Y J. 1997. An elementary analysis to seismic geologic characteristics in Dangyang area. *Marine Origin Petroleum Geology* (in Chinese), 2(4): 8-13.
- Zandt G, Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*, 374(6518): 152-154.
- Zhang Z J, Deng Y F, Chen L, et al. 2013. Seismic structure and rheology of the crust under mainland China. *Gondwana Research*, 23(4): 1455-1483.
- Zhao W Z, Jia A L, Wei Y S, et al. 2020. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 25(1): 31-44.
- 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*

International, 204(1): 583-590.

Zhu L P, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J. Geophys. Res. : Solid Earth*, 105(B2): 2969-2980.

Zou C, Zhou S Y, Mei J, et al. 2016. Geological evaluation of upper Ordovician-Lower Silurian gas-bearing shales and optional potential areas in the North of Dangyang Synclinorium, Hubei. *Marine Origin Petroleum Geology (in Chinese)*, 21(2): 22-28, doi: [10.3936/j.issn.1672-9854.2016.02.003](https://doi.org/10.3936/j.issn.1672-9854.2016.02.003).

附中文参考文献

范家维, 陈孔全, 沈均均等. 2020. 中扬子地区当阳复向斜奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩储层特征. *石油实验地质*, 42(1): 69-78.

何勇, 张东涛, 栗维民等. 2021. 中扬子强烈叠加改造区断裂系统与成因

机制: 当阳复向斜断裂特征及其与页岩气保存的关系. *天然气工业*, 41(9): 1-11.

胡家富, 朱雄关, 夏静瑜等. 2005. 利用面波和接收函数联合反演滇西地区壳幔速度结构. *地球物理学报*, 48(5): 1069-1076.

危自根, 储日升, 陈凌等. 2016. 复杂地壳接收函数 $H-\kappa$ 叠加——以安纳托利亚板块为例. *地球物理学报*, 59(11): 4048-4062, doi: [10.6038/cjg20161110](https://doi.org/10.6038/cjg20161110).

杨玉江. 1997. 当阳地区地震地质特征浅析. *海相油气地质*, 2(4): 8-13.

赵文智, 贾爱林, 位云生等. 2020. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望. *中国石油勘探*, 25(1): 31-44.

邹辰, 周松源, 梅珏等. 2016. 湖北当阳复向斜北部页岩气地质评价与有利区优选. *海相油气地质*, 21(2): 22-28, doi: [10.3969/j.issn.1672-9854.2016.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9854.2016.02.003).

(本文编辑 何燕)