

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240115002

基于接收函数的郟庐断裂带南段及其周缘壳内结构研究*

李婷婷, 张 岑, 范文华, 孙小航, 朱 峰, 孙业君

(江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 提取郟庐断裂带南段苏皖地区东西两侧40个宽频带固定台站记录的2015~2022年远震波形数据, 采用远震P波接收函数方法, 计算且筛选出1758条高质量的接收函数, 并结合H-K叠加搜索方法反演得到各台站下方的地壳厚度和泊松比值。结果表明: (1) 研究区莫霍面起伏较大, 地壳厚度介于28~36 km之间, 平均地壳厚度约为32.6 km; 地壳厚度有明显块体分布特征, 位于山地隆起的大别造山带和苏鲁造山带莫霍面埋深明显高于盆地或平原地区, 同一块体内部因地形地貌和壳内物质的复杂性, 也存在明显差异; 地壳厚度以郟庐断裂带为界, 大致呈现自西向东减薄特征; 地壳厚度与研究区的地形地貌总体呈现对称关系, 秦岭-大别造山带为研究区地壳厚度值最高区域。(2) 研究区台站下方泊松比值主要介于0.20~0.29之间, 跨度较大, 表明壳内物质组成复杂; 研究区平均泊松比值约为0.24, 与全国大陆均值接近; 位于山地隆起区域的部分台站泊松比值较高, 分析认为可能与壳内涌入熔融物质或与铁镁物质的侵入有关; 研究区泊松比与地壳厚度具有反相关关系, 地壳厚度高值处往往对应泊松比的低值区域。

关键词: 苏皖地区; 郟庐断裂带; 接收函数; 地壳厚度; 泊松比

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1465-09

Crustal Structure of the Southern Section and Surroundings of the Tan-Lu Fault Zone Based on Receiver Functions

LI Tingting, ZHANG Cen, FAN Wenhua, SUN Xiaohang, ZHU Feng, SUN Yejun
(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: Extracting the teleseismic waveform data recorded from 2015 to 2022 by 40 broadband seismic stations on the east and west sides of the Tan-Lu fault zone in the Jiangsu-Anhui regions, 1758 high-quality receiver functions were calculated and filtered using the teleseismic P-wave receiver function method. The H-K superposition search method was then applied to obtain the crustal thickness and Poisson's ratio beneath each station. The results showed that: (1) The Moho interface in the study area showed significant undulations, with crustal thickness ranging from 28 to 36 km and an average crustal thickness of approximately 32.6 km. The crustal thickness was characterized with distinct block distribution, with the Moho interface burial depth in the Dabie and Sulu orogenic belts located in mountainous uplifts significantly greater than in basins or plains. Within the same block, notable varia-

* 收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-04-07

基金项目: 三结合提升性课题(3JH-201902017)、三结合一般性课题(3JH-202401028)、江苏省地震局测震创新团队(202201)资助

作者简介: 李婷婷(1990—), 女, 工程师, 硕士。主要从事地数字地震学研究。E-mail: 972516012@qq.com

通信作者: 孙业君(1979—), 男, 研究员, 硕士。主要从事地震监测预报研究。E-mail: 382231407@qq.com

tions also occurred due to the complexity of topography and crustal composition. The crustal thickness showed a general thinning trend from west to east, demarcated by the Tan-Lu fault zone. There was a symmetrical relationship between the crustal thickness and the topography in the study area, with the Qinling-Dabie orogenic belt being the region of maximum crustal thickness. (2) The Poisson's ratio in the study area mainly ranged from 0.20 to 0.29, with a large span, indicating complex crustal composition. The average Poisson's ratio in the study area was about 0.24, close to China's continental average. Some stations located in mountainous uplift areas had higher Poisson's ratios, possibly due to the influx of molten material or the intrusion of iron and magnesium materials. Poisson's ratio in the study area showed an inverse correlation with crustal thickness, with higher crustal thickness often corresponding to regions with lower Poisson's ratio.

Keywords: Jiangsu-Anhui region; Tan-Lu fault zone; receiver function; crustal thickness; Poisson's ratio

0 引言

郯庐断裂带是我国东部规模最大的一条巨型断裂带,其总长达 2 400 km^[1],北起黑龙江,南至江西,其作为华北板块和扬子板块的地壳结构和地球物理场的转换地带,记录了板块间的碰撞和演化过程,备受地震研究学者们的关注^[2]。一直以来,有关郯庐断裂带的中段和北段研究成果颇为丰富^[3-5],而南段苏皖地区的研究因区内复杂的地质构造环境起步较晚^[6-8],广大地球科学研究者对区内地壳结构、岩石圈形成、演化以及动力学机制等进行了大量的科学研究与探索,并形成了百家争鸣的局面^[9-11]。

郯庐断裂带南段斜贯苏皖地区全境,跨越华北板块、扬子板块、秦岭—大别造山带以及苏鲁造山带,作为各板块的汇聚之地,地壳结构极为复杂。地壳厚度和泊松比研究历来被视作区域板块划分、地壳形变以及地壳物质组成的重要依据, Moho 面埋藏深度保留了地球生长和演变的动力学过程^[11],因此,开展研究区地壳厚度和泊松比研究,认识研究区的 Moho 面几何形态与壳内结构对认识块体之间交汇作用产生的结构特征有重要意义,对其他相近构造单元的形成以及物理状态等有重要启示作用。

远震 P 波接收函数方法^[12]因其可以很大程度上消除震源、传播路径以及仪器响应的影响,是目前研究地壳结构的常用方法。为了抑制地壳结构的横向不均匀性, L.P. Zhu 等^[13]提出 H-K 叠加搜索方法,通过批量处理波形数据,将同一台站记录到的转换波 Ps 和多次转换波 PpPs、PpPs+PsPs 的振幅进行叠加,该方法在不考虑介质各向异性的前提下,获得研究台站下方平均地壳模型。

本文基于接收函数方法,利用郯庐断裂带苏皖地区东西两侧固定台站 2015~2022 年记录到的远震波形数据,提取各台站 P 波接收函数,再使用 H-K 叠加搜索方法,反演研究区台站下方的地壳厚度和泊松比,分析郯庐断裂带苏皖地区东西两侧台站下方的地壳结构特征。本文更加倾向宏观分析研究区整体特征,因此主要收集了位于郯庐断裂带两侧的江苏台网和安徽台网固定台站数据(图 1)。

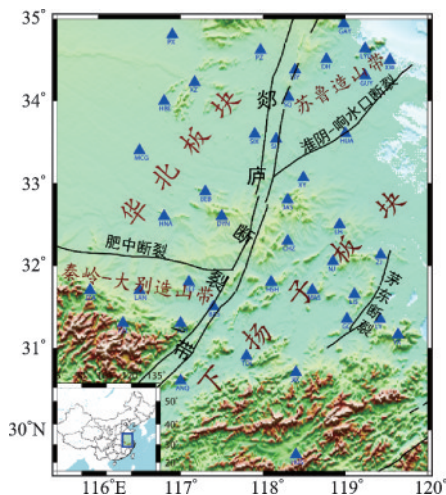


图 1 研究区域台站空间分布

Fig.1 Spatial distribution of stations in the study area

1 数据与方法

1.1 数据选取与处理

自 2007 年“十五”项目完成后,江苏和安徽数字地震台网均进行了数字化升级改造,台站观测地震计多为宽频带地震计。因部分台站因仪器类型不合

适或观测仪器故障导致波形质量较差,经过人工筛选剔除后,本文最终选取了2015~2022年郯庐断裂带苏皖段共40个宽频带地震台站记录的远震事件,其中江苏和安徽各有20个台站参与计算反演,所涉及的台站分布如图1所示。所选台站使用的地震计基本为CMG-3ESPC-60宽频带型号,极少数台站选用了CMG-3ESPC-120和BBVS-120甚宽频带型号。本文使用研究区内台站记录到的 $M \geq 5.5$ 的远震事件,选取震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 且截取初至P波到前20 s至后150 s的远震事件波形,经过人工复核共计筛选出符合条件的远震事件687个(图2)。

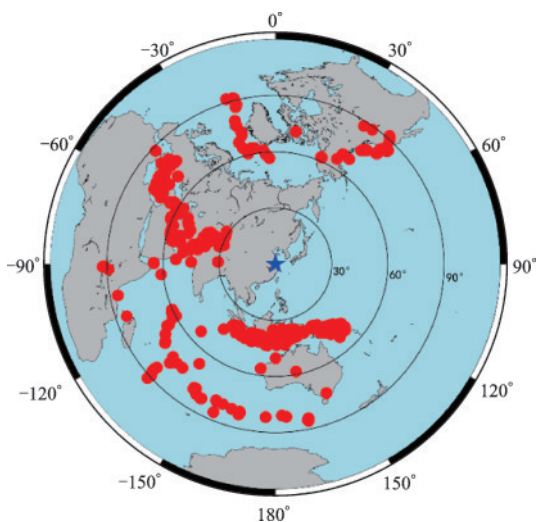


图2 文中所选的687个地震分布

Fig.2 Distribution of 687 earthquakes selected in this paper

1.2 接收函数计算与提取

远震地震事件的地震波可近似认为垂直入射后被台站接收,因此可通过垂直向波形对水平向波形进行时间域反褶积,消除可能因为震源、观测仪器以及传播路径等带来的影响,从而提取到符合条件的接收函数^[14-15]。在计算接收函数前,对数据去仪器响应、去均值以及去趋势处理,采用 $0.1 \sim 2$ Hz的频率进行带通滤波;进行方位角校正,将原地震事件的Z、N、E三分向波形旋转至Z、R、T坐标系;设置高斯滤波参数设为3,采用时间域反褶积方法计算并提取径向接收函数;再对接收函数进行重采样,采样间隔设置为0.1 s;人工筛选,剔除拟合率较差的接收函数;设置接收函数截取窗口时长为40 s,数据延迟5 s,提取接收函数。

1.3 H-K 叠加计算

H-K 叠加搜索是在假设各台站下方地壳结构相对均匀的前提下,根据接收函数的振幅和时间特性,对一次转换波Ps和多次转换波(PpPs、PpPs+PsPs)组合叠加后,其震相走时可近似看成只与地壳厚度和波速比相关^[15],根据理论走时计算振幅加权之和的极大值,对应的即是研究台站下方的地壳厚度和波速比的最佳值。本文在进行H-K叠加扫描时,设置P波平均速度为 6.3 km/s ^[16-17],该值主要是依据前人研究结果以及Crust1.0模型综合设定^[11,16]。转换波震相的权重分别设为0.6、0.3和0.1,震相权重的设定主要是由震相可识别度决定,即清晰度越高,叠加的权重越大,反之,叠加的权重则越小^[10]。H和K的扫描间隔分别为1 km、0.01,设置扫描范围分别为 $20 \sim 45 \text{ km}$ 、 $1.6 \sim 1.85$ 。分别对每个台站的接收函数进行H-K组合叠加,网格搜索振幅加权之和的极大值,标记位置点的横纵坐标值即为所求台站下方的平均地壳厚度和波速比。

2 反演结果

2.1 接收函数特征分析

本文为研究区40个台站共提取到了1758条接收函数,将接收函数按震中距进行排列,如图3所示列举了研究区6个台站的接收函数结果及其相对应的H-K叠加搜索结果。其中图3A-C、为安徽省HNA、JAS以及BAS台结果,图3D-F、为江苏省LY、LH以及XW台结果。接收函数结果图中的绿色实线分别为不同震中距接收函数的一次转换波和多次转换波的震相理论位置。由于研究区各台站地下构造结构差异,每个台提取的接收函数总数差异较大,但这并不影响后续地壳结构的研究。

从图3可以看出,研究区台站虽然横跨华北板块、苏鲁造山带、下扬子板块以及秦岭-大别造山带四个不同块体,但其台站下方莫霍面的转换波Ps记录都很清晰,振幅也最大,具有较好的一致性;接收函数中震相的实际到时与根据H-K叠加结果的理论到时(绿色实线)具有较好的一致性,也进一步表明本文的计算结果相对可靠。同时,我们也关注到不同台站转换波的震相到时和形态差异较大,尤其是以郯庐断裂带为界的东西两侧,表明了两侧台站下方的莫霍面起伏较大;研究区台站接收函数中

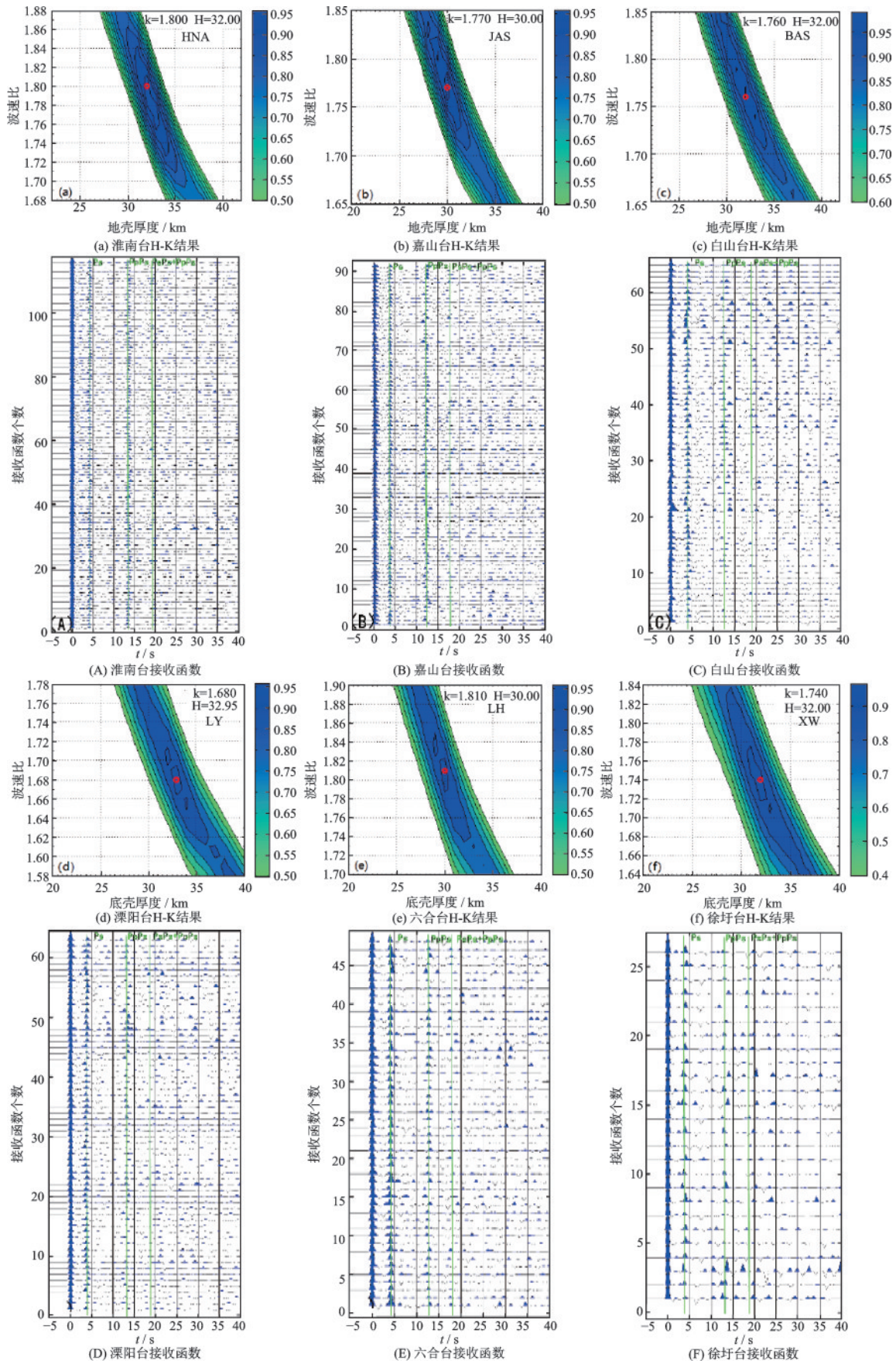


图3 不同台站的接收函数和H-K叠加结果

Fig.3 Results of the receiver functions and H-K superposition at different stations

PpPs震相虽然较Ps震相弱些,但整体记录也较清晰;多次转换波PsPs+PpPs的记录较差,能量最弱,这些差异特征可能与研究区背景噪声干扰和地表沉积层等有关,具体不在此处作深入分析。

表1 研究区台站下方地壳厚度和泊松比

Table 1 Crustal thickness and Poisson's ratio beneath the study area stations

| 构造板块 | 台站 | 经度/(°) | 纬度/(°) | 地壳厚度/km | 波速比 | 泊松比 |
|----------|-------|--------|----------|-----------|-----------|-------|
| 华北板块 | PX | 116.9 | 34.8 | 32.3±0.7 | 1.78±0.03 | 0.269 |
| | PZ | 117.9 | 34.6 | 32.5±1.0 | 1.75±0.06 | 0.258 |
| | XZ | 117.2 | 34.2 | 33.1±0.5 | 1.77±0.04 | 0.266 |
| | HBE | 116.8 | 34.0 | 33.9±0.9 | 1.82±0.04 | 0.284 |
| | MCG | 116.5 | 33.4 | 35.0±0.5 | 1.64±0.05 | 0.204 |
| | SIX | 117.9 | 33.6 | 32.0±1.2 | 1.74±0.02 | 0.253 |
| | BEB | 117.3 | 32.9 | 30.9±0.6 | 1.71±0.03 | 0.240 |
| | HNA | 116.8 | 32.6 | 32.0±0.5 | 1.77±0.05 | 0.266 |
| | DYN | 117.5 | 32.6 | 35.0±0.7 | 1.67±0.03 | 0.220 |
| | HEF | 117.1 | 31.8 | 33.0±1.5 | 1.73±0.04 | 0.249 |
| 秦岭-大别造山带 | BAS | 117.4 | 31.5 | 32.0±0.9 | 1.76±0.06 | 0.262 |
| | LAN | 116.5 | 31.7 | 34.1±0.5 | 1.75±0.02 | 0.258 |
| | JZA | 115.9 | 31.7 | 35.9±0.8 | 1.70±0.03 | 0.235 |
| | FZL | 116.3 | 31.3 | 35.9±1.3 | 1.79±0.05 | 0.273 |
| | SCH | 117.0 | 31.3 | 35.0±0.6 | 1.75±0.04 | 0.258 |
| 苏鲁造山带 | GAY | 119.0 | 34.9 | 34.0±1.3 | 1.74±0.04 | 0.253 |
| | LYG | 119.2 | 34.6 | 35.0±0.5 | 1.68±0.07 | 0.226 |
| | XW | 119.5 | 34.5 | 32.0±0.7 | 1.74±0.06 | 0.253 |
| | DH | 118.8 | 34.5 | 31.2±1.1 | 1.73±0.05 | 0.249 |
| | XIY | 118.4 | 34.4 | 32.0±1.7 | 1.80±0.03 | 0.277 |
| | SQ | 118.3 | 34.1 | 32.3±1.5 | 1.76±0.05 | 0.262 |
| | SH | 118.2 | 33.5 | 33.1±0.5 | 1.77±0.04 | 0.266 |
| | GUY | 119.2 | 34.3 | 31.0±1.2 | 1.73±0.03 | 0.249 |
| 下扬子板块 | HUA | 119.0 | 33.6 | 28.2±0.8 | 1.78±0.04 | 0.269 |
| | XY | 118.5 | 33.1 | 31.9±1.2 | 1.73±0.03 | 0.249 |
| | JAS | 118.3 | 32.8 | 30.0±0.4 | 1.77±0.02 | 0.266 |
| | LH | 118.9 | 32.5 | 28.1±1.3 | 1.78±0.03 | 0.269 |
| | CHZ | 118.3 | 32.3 | 31.1±1.3 | 1.75±0.08 | 0.258 |
| | NJ | 118.9 | 32.1 | 32.0±0.8 | 1.71±0.05 | 0.240 |
| | HSH | 118.1 | 31.8 | 33.0±0.6 | 1.77±0.03 | 0.266 |
| | ZJ | 119.4 | 32.1 | 33.9±1.1 | 1.72±0.06 | 0.245 |
| | LIS | 119.1 | 31.7 | 30.0±0.8 | 1.78±0.05 | 0.269 |
| | MAS | 118.6 | 31.7 | 32.0±0.6 | 1.72±0.03 | 0.245 |
| | GC | 119.0 | 31.4 | 30.9±0.9 | 1.73±0.06 | 0.249 |
| | LY | 119.4 | 31.4 | 32.9±0.6 | 1.70±0.06 | 0.235 |
| | YX | 119.6 | 31.2 | 33.3±0.5 | 1.76±0.03 | 0.262 |
| | TOL | 117.8 | 30.9 | 33.0±0.8 | 1.73±0.05 | 0.258 |
| | JIX | 118.4 | 30.7 | 33.0±0.8 | 1.73±0.05 | 0.258 |
| | HUS | 118.4 | 29.7 | 35.0±1.7 | 1.74±0.03 | 0.253 |
| ANQ | 117.0 | 30.6 | 32.0±1.4 | 1.75±0.04 | 0.258 | |

2.2 地壳厚度特征

图3(a)~(f)分别为安徽HNA、JAS、BAS以及

江苏LY、LIS和XW台H-K叠加结果,图中红色圆圈位置即为反演后确定的研究台站地壳厚度和波速比值。通过对研究区每个台站提取的接收函数

进行H-K叠加搜索,反演对应的地壳厚度和波速比,再根据波速比与泊松比两者间的换算关系,计算泊松比值。表1所示即为研究区各台站经过H-K反演后得到的结果,其中地壳厚度的平均误差控制在1 km范围内,波速比的误差大多低于0.05,也从侧面验证了本文参数设定的合理性以及结果的可靠性。

根据表1的计算结果,绘制了研究区地壳厚度的空间分布(图4),其中图4(a)壳厚度的空间差值分布,图4(b)剖面图的形式展示地壳厚度结果。经分析发现,研究区台站下方平均地壳厚度为32.6 km,与全国平均地壳厚度比较低。研究区莫霍面起伏较大,地壳厚度为28~36 km,尤其是以郟庐断裂带为界的東西两侧,具有明显的板块分布特征,这与前文郟庐断裂带为界的東西两侧台站转换波的震相到时和形态在较大差异研究结果相一致,莫霍面埋深由东向西加深,地壳厚度整体呈现自西

向东减薄趋势。结合图4(b)发现,研究区的地壳厚度分布与该区的地质构造背景较吻合,整体与地形地貌呈对称关系。具体表现为位于山地隆起地带的台站地壳厚度值也较高,位于平原地区或者盆地的台站地壳厚度值较低。比如研究区的秦岭一大别造山带和苏鲁造山带,两个块体的地壳厚度均明显高于周边地区,如该区的佛子岭台、金寨台、舒城台以及连云港台地壳厚度均在35 km以上,而位于秦岭一大别造山带莫霍面的下凹程度又明显大于苏鲁造山带区域,分析认为可能因是软流圈物质的上涌,造成苏鲁造山带山根已逐步趋向消失^[18-19]。这也说明皖西的秦岭一大别造山带与位于苏北的苏鲁造山带的岩石圈区域构造既有相同的特征,又有地区差异。

研究区下扬子板块内部地壳结构也有明显的差异,莫霍面起伏较大,地壳厚度介于28~34 km之间。例如位于下扬子板块的皖东南地区和苏南被动陆缘地区,受板块因山地隆起,地壳厚度约33 km左右,如含山、泾县、宜兴以及镇江等台;而位于苏北盆地地区的台站,如淮安台,其莫霍面埋深非常浅,地壳厚度明显减薄,平均约为28 km。位于华北板块的皖中及皖北平原地区,地壳厚度主要介于30~33 km,如泗县台、蚌埠台以及淮南等台,其下方地壳厚度均在这个范围内;华北板块南段的鲁西地块地壳厚度主要介于32~33 km之间,如该区的沛县台、邳州台和徐州台,由于受苏鲁造山带和扬子板块联合俯冲作用的影响,造成该区域内地壳抬升,岩石圈有增厚趋势。

2.3 泊松比特征

泊松比是认识地球内部物质构成和地壳结构特征的一个非常重要的参数^[20]。利用波速比与泊松比的转换公式,将研究区域H-K反演后的波速比值换算成台站下方的平均泊松比值。图5即为研究台站的泊松比分布,其中图5(a)速比空间插值分布,图5(b)研究区地壳厚度与泊松比的关系验证。为了提高研究结果的精度,本文将泊松比结果保留到小数点后三位。

结合表1泊松比计算结果以及图5泊松比的空间分布发现,研究区平均泊松比约为0.242,与全国大陆均值接近,表明研究区地壳物质的构成主要还是酸性岩。研究区泊松比值跨度相对较大,主要介于0.20~0.29,这表明研究区壳内物质组成复杂,区

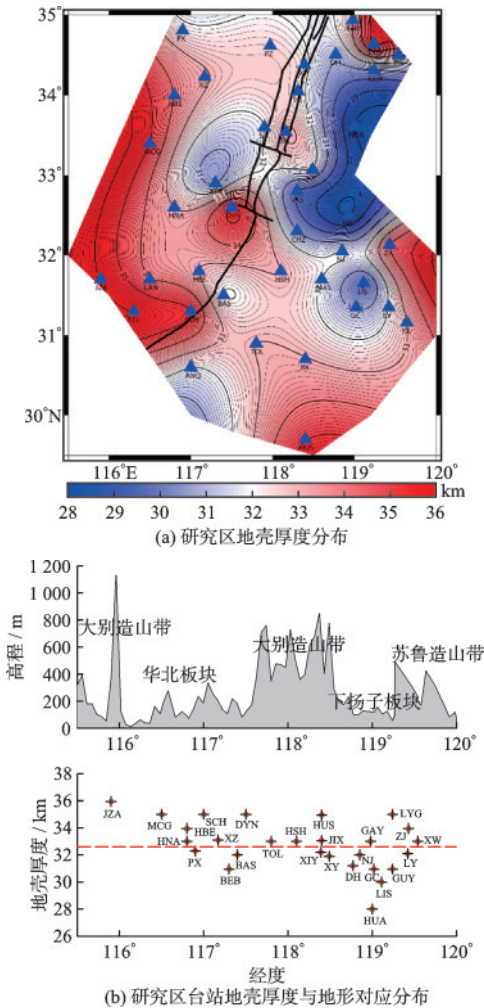


图4 研究区地壳厚度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of crustal thickness in the study area

域分布特征明显,有较强的不均匀性。例如,位于秦岭-大别造山带和苏鲁造山带及周边台站下方的泊松比值较高,如佛子岭台、白山台、新沂台以及淮安台等,最高泊松比达至0.277。相关研究表明^[6,11,21],泊松比值会随着熔融体熔融程度的增加而增大,泊松比的高值很可能与研究区地壳内侵入了大量熔融物质或者其他流体有关,这些熔融物质或流体会造成横波快速衰减,从而导致波速比提升,间接影响了泊松比值;同时,上地幔铁镁物质的侵入也会带来泊松比值的升高^[11]。

对比图4(a)地壳厚度空间插值分布与图5(a)比空间差值分布,发现地壳厚度高值处往往对应泊松比的低值区域,即泊松比值随着莫霍面埋深的加深而降低。为了进一步验证二者间的关系,我们采用稳健回归拟合法,对研究区经H-K反演得到的地壳厚度和泊松比结果进行拟合,发现二者具有反相线性关系。其线性拟合后的相关系数 $R=-0.32$,回归方程为: $y=-0.0022x+0.33$ 。地壳厚度与泊松比的关系隐含了地壳形变和构造演化的动力学过程,研究认为该结果可能与拉张环境下基性岩浆的侵入有关^[11,22]。研究区域在构造拉伸作用下,莫霍面

埋深整体抬升,导致断裂带及剪切带处压力骤减并发生部分熔融,大量基性岩的入侵提高了地壳中铁镁物质的比例,从而带来了泊松比的升高。因此,研究区泊松比与地壳厚度整体呈反相关系。

3 结论与讨论

本文基于远震P波接收函数,利用H-K叠加搜索方法计算郟庐断裂带东西两侧苏皖地区各台站下方的地壳厚度和泊松比值,较宏观地研究了该区域的地壳结构特征,并验证了研究区地壳厚度与泊松比的对应关系,总结如下:

(1)研究区域各台站提取的P波径向接收函数中各转换波震相的实际到时与根据H-K叠加结果的理论到时具有较好的一致性,其中,所有台站的接收函数中直达波与一次转换波Ps的振幅能量最强,震相十分清晰,绝大多数台站的PpPs震相也能有清晰的呈现。不同台站转换波的震相到时和形态差异较大,尤其是以郟庐断裂带为界的东西两侧,侧面验证了两侧台站下方的莫霍面埋深差异。

(2)研究区平均地壳厚度为32.6 km,台站下方地壳结构有明显块体分布特征,位于山地隆起的大别造山带和苏鲁造山带莫霍面埋深明显高于盆地或平原地区。研究区地壳厚度大致呈现自西向东减薄特征,莫霍面埋深由东向西加深。地壳厚度与研究区域的地形地貌整体呈对称关系,其中,大别造山带的地壳厚度值最高,下扬子板块内部因地形地貌的多样性导致同一块体的莫霍面起伏也较大,介于28~34 km,华北板块地壳厚度主要介于30~33 km,华北板块南段的鲁西地块地壳厚度变化相对稳定。

(3)研究区台站下方泊松比值主要介于0.20~0.29,区域平均泊松比值约为0.242,与全国大陆均值接近。区域内泊松比跨度相对较大,具有较强的不均匀性,表明研究区的壳内物质组成复杂。位于山地隆起的两大造山带内及临近的部分台站,泊松比值较高,分析认为可能与壳内涌入熔融物质或铁镁物质的侵入有关。研究区泊松比与地壳厚度具有反相关系,地壳厚度高值处往往对应泊松比的低值区域。

本研究对宏观认识研究区内的地壳结构特征、应力构造分布具有重要意义,研究结果与早起研究区人工地震、密集台阵成像以及其它相关研究结果

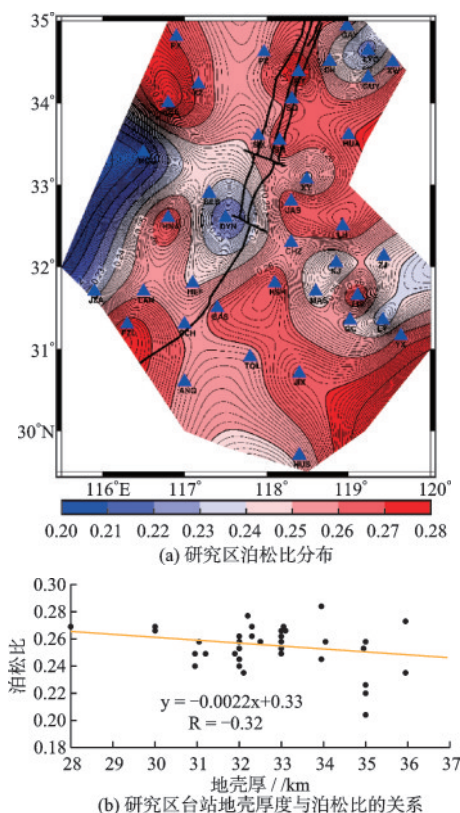


图5 研究区泊松比分布以及与其地壳厚度的关系
Fig.5 Distribution of Poisson's ratio and its relationship with crustal thickness in the study area

具有较好的一致性^[5,11,23-24]。下一步将增加流动观测台站数据,联合面波频散和接收函数共同约束反演该区域的地壳结构,以期获得更高分辨率的数据来弥补本文的不足。

参考文献:

- [1] 孙业君,黄耘,江昊琳,等. 郯庐断裂带鲁苏皖段构造应力场及分段特征研究[J]. 地震, 2015, 35(3): 66-75.
Sun Y J, Huang Y, Jiang H L, et al. Tectonic stress field and segmentation characteristics in the Shandong—Jiangsu—Anhui segment of Tancheng—Lujiang Fault Zone [J]. Earthquake, 2015, 35(3): 66-75 (in Chinese)
- [2] 顾勤平,康清清,丁志峰,等. 郯庐断裂带鲁苏皖段及邻区上地幔顶部Pn波速度与各向异性[J]. 地球物理学报, 2020, 63(7): 2548-2565.
Gu Q P, Kang Q Q, Ding Z F, et al. Uppermost Mantle Pn-wave velocity and anisotropy structure beneath the Shandong—Jiangsu—Anhui segment of Tan—Lu Fault Zone and its adjacent regions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(7): 2548-2565. (in Chinese)
- [3] 沈小七,姚大全,郑海刚,等. 郯庐断裂带重岗山—王迁段晚更新世以来的活动习性[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 139-148.
Shen X Q, Yao D Q, Zheng H G, et al. The activity behavior of Chonggangshan-Wangqian segment of Tan-Lu Fault Zone since late pleistocene[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(1): 139-148. (in Chinese)
- [4] 余腾,王鑫,李明峰,等. 郯庐断裂带苏皖段及邻区b值时空特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(2): 173-179.
Yu T, Wang X, Li M F, et al. Research on the b-value space-time characteristics in Jiangsu-Anhui section and adjacent area of Tan-Lu Fault Zone[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(2): 173-179. (in Chinese)
- [5] 何奕成,范小平,赵启光,等. 郯庐断裂带中南段地壳结构分段特征[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3164-3178.
He Y C, Fan X P, Zhao Q G, et al. Segmentation of crustal structure beneath the middle-south segment of Tan-Lu Fault Zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3164-3178. (in Chinese)
- [6] 李婷婷,刘利,胡光武,等. 江苏地区波速比与泊松比分布特征[J]. 地震, 2019, 39(3): 149-157.
Li T T, Liu L, Hu G W, et al. Distribution of wave velocity ratio and Poisson's ratio in Jiangsu area [J]. Earthquake, 2019, 39(3): 149-157. (in Chinese)
- [7] 李清河,熊振,黄耘,等. 据地壳介质非均匀性判断郯庐断裂带鲁苏段未来大震位置[J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1454-1464,1589.
Li Q H, Xiong Z, Huang Y, et al. Location of future large earthquakes in Jiangsu-Shandong of the Tanlu Fault Zone from crustal media inhomogeneity[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1454-1464,1589. (in Chinese)
- [8] 顾勤平,丁志峰,康清清,等. 郯庐断裂带中南段及邻区基于背景噪声的瑞利波群速度层析成像[J]. 地球物理学报, 2020, 63(4):1505-1522.
Gu Q P, Ding Z F, Kang Q Q, et al. Group velocity tomography of Rayleigh wave in the middle-southern of the Tan-Lu Fault Zone and adjacent regions using ambient seismic noise [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(4): 1505-1522. (in Chinese)
- [9] 孙业君,黄耘,刘泽民,等. 日本Mw9.0地震前后郯庐断裂带中南段构造应力场动态变化特征[J]. 地球物理学报, 2022, 65(6): 2124-2136.
Sun Y J, Huang Y, Liu Z M, et al. Dynamic variation characteristics of tectonic stress field in the middle-southern segment of Tan-Lu fault zone before and after the 2011Tohoku-Oki Mw9.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(6): 2124-2136. (in Chinese)
- [10] 李婷婷,刘利,范文华,等. 基于远震P波接收函数研究江苏地区地壳厚度和泊松比[J]. 地震研究, 2020, 43(4): 680-688,768.
Li T T, Liu L, Fan W H, et al. Study on crustal thickness and ratio of Poisson in Jiangsu province by teleseismic receiver function [J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(4): 680-688,768. (in Chinese)
- [11] 顾勤平,李大虎,丁志峰,等. 利用接收函数研究郯庐断裂带鲁苏皖段及邻区地壳结构特征[J]. 地球物理学报, 2022, 65(9): 3280-3296.
Gu Q P, Li D H, Ding Z F, et al. Crustal structure characteristics beneath the Shandong Jiangsu Anhui segment of the Tan Lu fault zone and its adjacent regions using receiver functions [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(9): 3280-3296. (in Chinese)
- [12] Phinney. Structure of the Earth's crust from spectral behavior of long-period body waves [J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69(14): 2997-3017.
- [13] Zhu L P, Hiroo K. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions [J]. Jour-

- nal of Geophysical Research, 2000, 105 (B2) : 2969-2980.
- [14] 何凯, 杜瑞林, 董彦君, 等. 利用远震接收函数研究湖北地区地壳结构[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(6): 646-649, 660.
He K, Du R L, Dong Y J, et al. Crustal structure and Poisson ratio beneath Hubei province derived from teleseismic receiver functions[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38 (6) : 646-649, 660. (in Chinese)
- [15] 洪德全, 王行舟, 李军辉, 等. 利用远震接收函数研究安徽地区地壳厚度[J]. 地震地质, 2013, 35(4) : 853-863.
Hong D Q, Wang X Z, Li J H, et al. Study on the crustal thickness beneath stations of seismic network in Anhui province by teleseismic receiver function [J]. Seismology and Geology, 2013, 35(4) : 853-863. (in Chinese)
- [16] 何奕成, 缪发军, 赵启光, 等. 2021年11月17日江苏大丰海域M5.0地震震源区三维P波速度结构[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1): 167-175.
He Y C, Miao F J, Zhao Q G, et al. The three-dimensional P-wave velocity structure across the source region of Dafeng sea area M5.0 earthquake, Jiangsu, on 17November 2021 [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1) : 167-175. (in Chinese)
- [17] 查小惠, 吕坚, 江春亮, 等. 基于接收函数的华南及邻区地壳结构研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(1): 67-73.
Zha X H, Lyu J, Jiang C L, et al. Study on crustal structure in South China and adjacent areas based on receiver function[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(1): 67-73. (in Chinese)
- [18] 徐纪人, 赵志新. 苏鲁造山带区域地壳山根结构特征[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 149-156.
Xu J R, Zhao Z X. Regional structure characteristics of crustal root of mountain beneath the Sulu Orogenic Belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1) : 149-156. (in Chinese)
- [19] 贾根, 徐士银, 郭钢. 江苏省大地构造主要特征及其演化[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 620-630.
Jia G, Xu S Y, Guo G. The main characteristics ang evolution of geotectonics in Jiangsu Province [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22 (3) : 620-630. (in Chinese)
- [20] 李善邦. 中国地震[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
- [21] 刘启元, Kind Rainer, 陈九辉, 等. 大别造山带壳幔界面的断错结构和壳内低速体[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2005, 35(4): 304-313.
Liu Q Y, Kind R, Chen J H, et al. The break-slip structure and low-speed body in crust at the boundary of crust-mantle in Dabie orogen [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 35 (4) : 304-313. (in Chinese)
- [22] 嵇少丞, 王茜, 杨文采. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义[J]. 地质学报, 2009, 83(3): 324-330.
Ji S C, Wang Q, Yang W C. Correlation between crustal thickness and Poisson's ratio in the North China Craton and its implication for lithospheric thinning [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(3) : 324-330. (in Chinese)
- [23] 黄耘, 李清河, 孙业君, 等. 江苏及邻区地壳上地幔结构研究[J]. 西北地震学报, 2006, 28(4): 369-376.
Huang Y, Li Q H, Sun Y J, et al. Review of study on the crust and upper mantle structure in Jiangsu province and is adjacent areas [J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(4) : 369-376. (in Chinese)
- [24] 宫杰, 孙业君, 郑江蓉, 等. 江苏海洋地震台站与效能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(3): 614-625.
Gong J, Sun Y J, Zheng J R, et al. Construction and efficiency analysis of Jiangsu marine seismic stations [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3) : 614-625. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)