

山东地区地壳及上地幔结构研究

曲平¹ 吕杰¹ 郭震² 于勇² 陈永顺^{2,†}

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055;

† 通信作者, E-mail: johnyc@sustech.edu.cn

摘要 利用布设在山东省境内的宽频带流动地震观测台阵和国家地震局固定地震观测台站记录的地震数据, 应用接收函数和SKS波分裂方法, 研究山东地区的地壳与上地幔结构, 得到该区域的地壳厚度、地壳平均P波与S波的波速比以及SKS波分裂延迟的分布情况。结果表明, 山东地区地壳厚度范围为28~39 km; 胶南隆起的北段和南段以及鲁西隆起北侧济阳凹陷的地壳厚度小于32 km, 鲁西隆起下方的地壳比较厚。研究区P波与S波的波速比主要分布在1.67~1.94之间, 鲁西隆起西南部和胶南隆起北段该比值小于1.75, 可能是由中上地壳增厚以及下地壳减薄和拆沉造成。鲁西隆起南北P波与S波的波速比差异反映地壳活动的差异。地幔物质的各向异性显示, 山东地区西部的地壳减薄和拆沉可能仍在进行。

关键词 接收函数; 地壳厚度; P波与S波的波速比; SKS波分裂; 郯庐断裂

Study on Crust and Upper Mantle Structure in Shandong Area

QU Ping¹, LÜ Jie¹, GUO Zhen², YU Yong², CHEN Yongshun^{2,†}

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055; † Corresponding author, E-mail: johnyc@sustech.edu.cn

Abstract This paper records seismic data, using the broadband seismic station and the state seismic station in Shandong Province. Receiver function and shear-waves splitting are applied to study the earth's crust and upper mantle structure beneath Shandong and its adjacent area. This study analyzed the crust thickness distribution of the region, distribution of crustal average P and S wave velocity ratio, and the regional distribution of shear wave splitting delay. It can be seen that the range of crust thickness in Shandong region is 28–39 km. The crustal thickness of the northern and southern sections of the Jiaonan uplift is less than 32 km. The crustal thickness of Jiyang depression on the north side of west Shandong uplift is also within 32 km. The lithosphere below the western Shandong uplift is relatively thicker. The velocity ratios of P and S in the study area are mainly distributed in the range of 1.67–1.94. In the southwest part of the Luxi uplift and the northern part of the Jiaonan uplift, the wave velocity ratio of P and S is less than 1.75, which may be caused by the thickening of the middle and upper crust, and the thinning and subsidence of the lower crust. The difference between velocity ratio of P and S in the north and south of the west uplift reflects the difference of crustal activity. The anisotropy of mantle material indicates that crust thinning and subsidence in the west of Shandong region may still be ongoing.

Key words receiver function; crust thickness; wave velocity ratio of P and S; shear-waves splitting; Tanlu fault zone

山东地区位于中国大陆东部, 被北北东走向的郯庐断裂带分为东、西两部分, 东部主要由胶北隆起、胶莱盆地和胶南隆起构成^[1], 西部的主要构造单元为鲁西隆起和济阳凹陷^[2]。鲁西隆起位于华北

克拉通东部, 在地貌上与华北克拉通西部有明显的差异。由于热侵蚀和拆沉作用, 华北克拉通东部岩石圈遭到破坏, 出现明显的减薄现象^[3–7]。鲁西隆起中, 新生代构造格局为北北西向的盆–山格局^[8]。

中、新生代以来,伴随着华北克拉通岩石圈破坏,鲁西隆起发生强烈的地壳运动,岩石学证据表明,这一时期存在来自上地幔50 km深度以下的镁铁质包体,证明发生了上地幔局部熔融^[8-9]。地幔熔融与华北克拉通岩石圈破坏在时间上的一致性表明,华北克拉通岩石圈的破坏对鲁西隆起的抬升有一定程度的影响,因此对鲁西隆起的研究有助于揭示华北克拉通东部的破坏过程和机制。位于郯庐断裂带东侧的胶东造山带是由扬子板块与华北克拉通陆-陆碰撞产生的。由于郯庐断裂带走滑位移的影响,胶东造山带向东北方向错动约500 km,因此对胶东造山带的研究有助于探究扬子板块和华北克拉通碰撞的过程。近年来,该区域的超高压变质带一直是国内外研究的热点。

接收函数方法是研究地球内部间断面的主要方法之一,主要用于研究莫霍面、岩石圈和软流圈边界以及410 km和660 km间断面^[10-12]。通过提取接收函数携带的地下间断面信息,可以精确地获得地球内部间断面的位置以及平均泊松比在间断面以上的变化(这些信息可以用于分析不同区域间断面深度变化的趋势)。

SKS波分裂方法是研究地幔物质各向异性的主要方法之一。与其他各向异性研究方法相比,SKS波分裂方法计算过程简单,水平分辨率高。相对于地壳和下地幔,SKS波分裂对上地幔各向异性的敏感性更强。SKS波分裂方法通过分析SKS波在穿过上地幔时发生的分裂,研究地幔物质的各向异性(观测到的各向异性主要由上地幔的地幔流横向运动引起^[13])。SKS波分裂方法能够揭示地幔物质的流动方向,可以为当今正在发生的动力学过程提供证据^[14]。

近年来,随着宽频带密集台阵在全国范围内的大面积布设,越来越丰富的高质量地震观测数据被用于构造学研究。通过地球物理方法分析和处理后,大量的密集观测数据可以生成更高分辨率的地下结构成像。本文利用地球物理宽频带地震仪收集的最新地震数据,研究山东地区的地壳和上地幔结构,探索该地区正在发生的动力学过程。

1 资料来源及处理方法

1.1 数据

本文使用的连续波形地震数据来自山东地区的54个宽频带流动地震台站和39个固定台站,其中包括北京大学2011年7月至2012年7月布设的20

台宽频带流动地震台站(采样频率为40 Hz)、中国科学院地质与地球物理研究所分别于2001—2003年布设的21个和2009—2010年布设的13个宽频带流动地震台站(采样频率为40 Hz)以及中国地震局布设的39个固定台站(收集2012年1月至2013年5月的连续地震波形数据,采样频率为100 Hz)。

如图1所示,本研究使用的台站覆盖区域较大(115°—123°E, 34°—38°N,东西向长约700 km,南北向宽约400 km),跨越郯庐断裂带,一部分位于大别—苏鲁造山带。长时间的流动地震观测数据可以保证本文中接受函数使用的远震事件在360°范围的各个方向分布较均匀。

1.2 接收函数计算

接收函数方法通过对远震的P波和PS转换波进行反卷积计算,去除震源和传播路径的影响,得到地震波对台站下方地壳结构的响应,从而对莫霍面进行成像。对于30°—90°方向的远震地震事件,当P波到达接收台站时,入射方向接近垂直。如果台站下方存在速度间断面,P波会在速度间断面上产生PS转换波,P波主要由台站的垂向分量记录,PS转换波主要由台站的水平分量记录,对垂直分量和水平分量进行反卷积计算,得到接收函数。

图2展示SD09台站计算得到的接收函数,图中3个正波峰分别为直达P波、PS转换波和PpPs多次波,其后的负波峰为PpSs和PsPs多次波。PS转换波的波形清晰;多次波强度较弱,并且波形与直达P波不完全一致,可能是较厚地表沉积层的多次波干扰造成的。

在接收函数计算中,数据量是保障结果可靠性的基础。本文中,每个台站有效接收函数的数量超过5个才能被纳入计算。通过手动筛选接收函数,去除异常结果,本研究共获得1788条接收函数数据,用于成像和计算。

1.3 H - κ 叠加与Krichhoff偏移叠加

接收函数方法是一种对速度间断面的深度敏感的数据处理方法。当近垂直入射的地震波穿过地下速度间断面时,入射P波会在界面处发生转换,产生出射的P波和S波。出射波又会在速度间断面与地表间发生多次反射。最终体现在接收函数上,是一系列的转换波震相和多次波震相。这些震相与P波直达震相的到时差跟地下速度间断面的深度、P波速度和S波速度相关,震相的强度与速度间断面的速度跳跃相关。

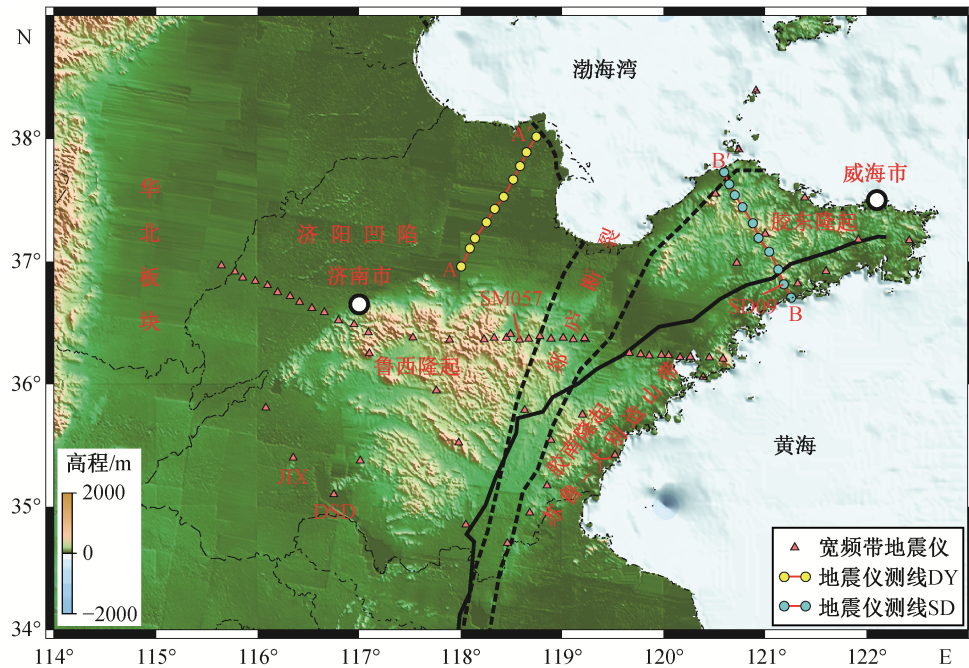


图1 山东地区地质构造与台站分布

Fig. 1 Geological setting of Shandong area and distribution of the stations

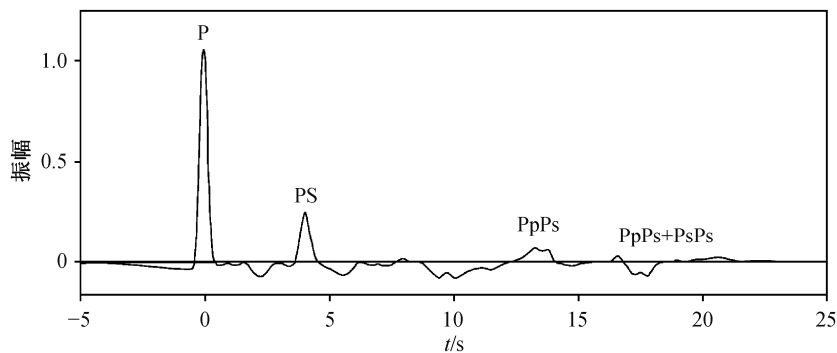


图2 SD09 台站接收函数叠加结果

Fig. 2 Receiver functions stacked waveform of station SD09

H - κ 叠加方法是常用的接收函数方法之一,对莫霍面的深度敏感。另外,相对于P波速度,叠加结果对P波与S波的波速比敏感性更高。因此, H - κ 叠加方法对确定地壳厚度、地壳平均P波与S波的波速比非常有效^[15]。本文利用Zhu等^[15]的方法,对选取的接收函数进行叠加计算,通过将莫霍面上的PS转换波与PpPs, PpSs和PsPs多次波进行叠加,找到最适合的莫霍深度以及P波与S波的波速比,计算公式如下:

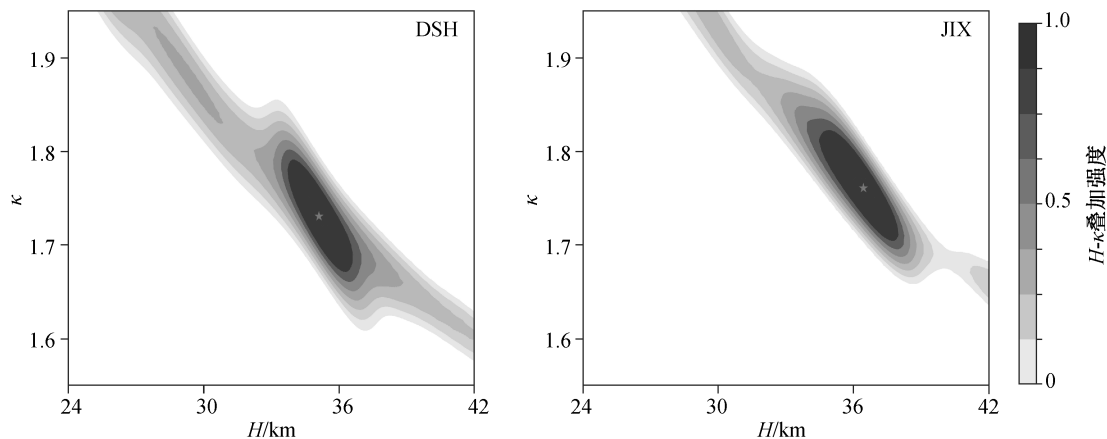
$$s(H, \kappa) = \omega_1 r(t_1) + \omega_2 r(t_2) - \omega_3 r(t_3),$$

式中, $s(H, \kappa)$ 表示叠加后 H - κ 域的值; H 表示地壳厚度(km); κ 表示P波与S波的波速比,与泊松比 σ 正

相关($\sigma = 0.5(1 - 1/(\kappa^2 - 1))$); ω_1 , ω_2 和 ω_3 分别表示PS, PpPs, PpSs和PsPs转换波的权重($\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$),依据3个震相的强度设定,本文选取的权重值分别为0.45, 0.35和0.2。 t_1 , t_2 和 t_3 分别表示3个转换波在某个 H 和 κ 值下与直达P波的理论到时差。

H - κ 叠加计算过程中, S波对 H 和 κ 的敏感性较弱,因此可以直接选取一个平均的固定的地壳内P波速度值。本文使用的台站的平均地壳P速度选自Crust2.0模型^[16]。通过接收函数叠加,我们得到每个台站下方的地壳厚度和平均地壳 κ 值。图3(a)和(b)分别展示DSH和JIX台站的 H - κ 叠加结果,可以看到,收敛较好。

为了对 H - κ 叠加结果的误差进行分析,本文应



五角星表示 H - κ 叠加计算得到的极值点

图 3 DSH 和 JIX 台站 H - κ 叠加结果

Fig. 3 H - κ analysis result of stations DSH and JIX

用 bootstrap 方法, 对 H - κ 叠加计算得到的 H 和 κ 值进行误差估计。本文设定 bootstrap 迭代次数为 50, 每次迭代时, 对每一个地震事件, 在 0~1 的范围内进行随机加权。从表 1 看出, 大部分台站的误差估计值较小, 但 BHC 和 QID 台站的 H 值误差大于 3, 可能与台站下方的沉积层较厚有关。

接收函数的 Krichhoff 偏移叠加方法能够提供更加精细的莫霍面结构^[17], 本文使用该方法对山东地区的莫霍面结构进行成像。Kirchhoff 偏移成像在二维情况下的积分公式为

$$u_{(x,z)} = \frac{1}{2\pi} \int \frac{1}{vr} S_{tr}(\theta) \frac{\partial}{\partial t} u_{(x_{in}, z=0)} dx,$$

其中, $u_{(x,z)}$ 为台站位置的波场, $u_{(x_{in}, z=0)}$ 为地下波场, $S_{tr}(\theta)$ 为倾角修正项。将上式进行线性化求解, 可以解得地下不同位置的散射强度。由于远震 P 波接近垂直入射, 本文近似地采用入射地震波的垂直分量作为 P 波, 水平分量作为 S 波。当震中距较小时, 入射角会小于 30° , 波形发生变化, 不再符合 P 波入射的近垂直假设。因此, 本文在接收函数偏移成像过程中, 设定入射角小于 30° 。

1.4 SKS 波分裂

本文使用 SKS 波分裂方法对数据进行分析。SKS 波分裂方法计算简单, 水平分辨率高, 是研究上地幔流动的常用方法。由于 SKS 波具有偏振性, 当剪切波从各向同性介质进入各向异性介质时, 会分裂成两个波速不同的正交的偏振波。Zhang 等^[18]的研究结果表明, 在高温高压条件下, 如果应变大于 150%, 橄榄石晶体的快轴方向与地幔流动方向

大致相同。地幔中橄榄石晶体的优势方向引起的各向异性可以达到 7%^[13]。

本文以 SplitLab 程序的算法为核心, 进行 SKS 波分裂研究。选取的地震事件震中距为 $85^\circ \sim 140^\circ$, 矩震级大于 5.0。依据 SKS 波的频带范围, 选取的滤波范围为 0.04~0.25 Hz。

在进行 SKS 波分裂的数据处理时, 我们通过 STA/LTA 方法来判断是否存在清晰的地震震相^[19], 选取短时窗长度为 5 s, 0020 长时窗长度为 30 s。由于 SKS 波在穿过核幔边界时的偏振方向是已知的, 快、慢波波形的互相关性好, 因此我们通过互相关函数法判断 SKS 波形分裂的 Null 值, 并利用最小本征值法计算 SKS 波分裂参数, 人工挑选出比较清晰的 SKS 波形分裂结果(图 4)。在进行 SKS 波数据处理时, 受方法和数据量的限制, 每个台站选择 5~12 条数据进行计算。

2 山东地区东部地壳与上地幔结构

2.1 P 波 Krichhoff 偏移成像结果

对 A-A' 和 B-B' 两条南北向测线剖面(位置见图 1), 使用接收函数偏移成像方法, 反演 45 km 深度以上的地下速度结构, 对莫霍面进行成像。

剖面 A-A' 位于郯庐断裂西侧的华北平原, 北段靠近渤海, 南端近邻鲁西隆起。偏移成像结果(图 5(a))显示, 该剖面南部地壳厚度大致在 32~34 km 范围内变化。剖面北部没有清晰的偏移成像结果, 可能由于过厚的沉积层造成接收函数中携带复杂的多次反射波, 对成像结果造成干扰。

表 1 山东地区台站接收函数 H - κ 叠加结果
Table 1 H - κ analysis result of the stations in Shandong area

台站	北纬/(°)	东经/(°)	H/km		κ		台站	北纬/(°)	东经/(°)	H/km		κ	
			数值	误差	数值	误差				数值	误差	数值	误差
ANQ	36.374	119.22	34.7	1.68	1.79	0.036	YSH	35.788	118.63	36.2	0.2	1.76	0.009
BHC	38.392	120.91	33.9	3.13	1.72	0.070	YTA	37.520	121.39	33.9	0.56	1.72	0.072
CHD	37.913	120.74	32.2	2.00	1.80	0.043	ZCH	35.376	117.01	38.0	0.18	1.67	0.006
CSH	34.853	118.05	36.0	0.16	1.74	0.005	SM103	36.420	117.09	36.4	0.21	1.76	0.008
DSD	35.101	116.75	35.1	0.18	1.73	0.008	SM098	36.379	117.53	37.7	0.46	1.75	0.019
HAY	36.820	121.32	34.2	0.17	1.74	0.006	SM093	36.36	117.89	37.8	0.22	1.78	0.009
JIN	36.639	117.04	37.2	0.19	1.70	0.006	SM075	36.364	118.23	37.7	0.2	1.79	0.007
JIX	35.400	116.35	36.4	0.22	1.76	0.008	SM069	36.376	118.33	37.7	0.33	1.78	0.010
JUN	35.172	118.85	35.7	0.43	1.75	0.011	SM063	36.377	118.45	37.3	0.21	1.76	0.007
JUX	35.543	118.89	36.4	1.81	1.71	0.051	SM057	36.36	118.58	30.1	2.60	1.94	0.071
LAY	36.988	120.72	34.8	2.86	1.76	0.077	SM051	36.370	118.67	34.9	0.26	1.78	0.009
LIS	34.951	118.68	34.1	0.48	1.78	0.013	SM045	36.390	118.78	33.5	0.32	1.83	0.011
LOK	37.552	120.51	33.9	0.3	1.73	0.008	SM039	36.370	118.89	34.9	0.15	1.78	0.006
LQU	36.409	118.49	36.0	0.27	1.75	0.016	SM033	36.377	119.01	36.3	0.26	1.83	0.007
LSH	35.807	116.08	35.8	0.22	1.74	0.008	SM027	36.364	119.11	38.8	0.35	1.73	0.007
LZH	37.224	121.00	36.5	0.45	1.69	0.010	SM021	36.364	119.23	37.5	0.36	1.76	0.011
NLA	35.522	117.98	36.1	0.34	1.72	0.009	SE01	36.254	119.66	37.0	0.29	1.72	0.009
QID	36.057	120.39	37.0	4.06	1.70	0.103	SE02	36.243	119.77	37.9	0.18	1.69	0.006
RCH	37.171	122.42	31.9	0.71	1.72	0.026	SE03	36.233	119.86	36.2	1.66	1.75	0.076
RSH	36.920	121.60	33.8	0.26	1.73	0.009	SE04	36.237	119.98	34.2	0.49	1.82	0.013
RZH	35.422	119.52	32.0	0.56	1.88	0.017	SE05	36.234	120.05	35.9	0.59	1.76	0.022
TCH	34.703	118.46	30.1	2.30	1.90	0.060	SE06	36.218	120.16	33.0	1.19	1.91	0.049
TIA	36.250	117.10	31.9	0.35	1.82	0.011	SE07	36.222	120.26	36.6	0.61	1.74	0.016
WED	37.178	121.92	32.6	0.21	1.75	0.009	SE08	36.217	120.45	36.8	0.25	1.72	0.011
WUL	35.751	119.20	34.5	2.32	1.82	0.058	SE09	36.206	120.58	30.8	2.29	1.88	0.060
XIT	35.947	117.76	36.3	0.54	1.73	0.022							

剖面 B-B' 位于胶东隆起, 呈北南走向。偏移成像结果(图 5(b))显示, 该剖面地壳厚度大致在 30~35 km 范围内变化。胶东隆起中部对应的地壳厚度最大, 接近 35 km, 而在测线两端的沿海部位, 地壳厚度较小, 约为 30 km。

2.2 P 波 H - κ 成像结果

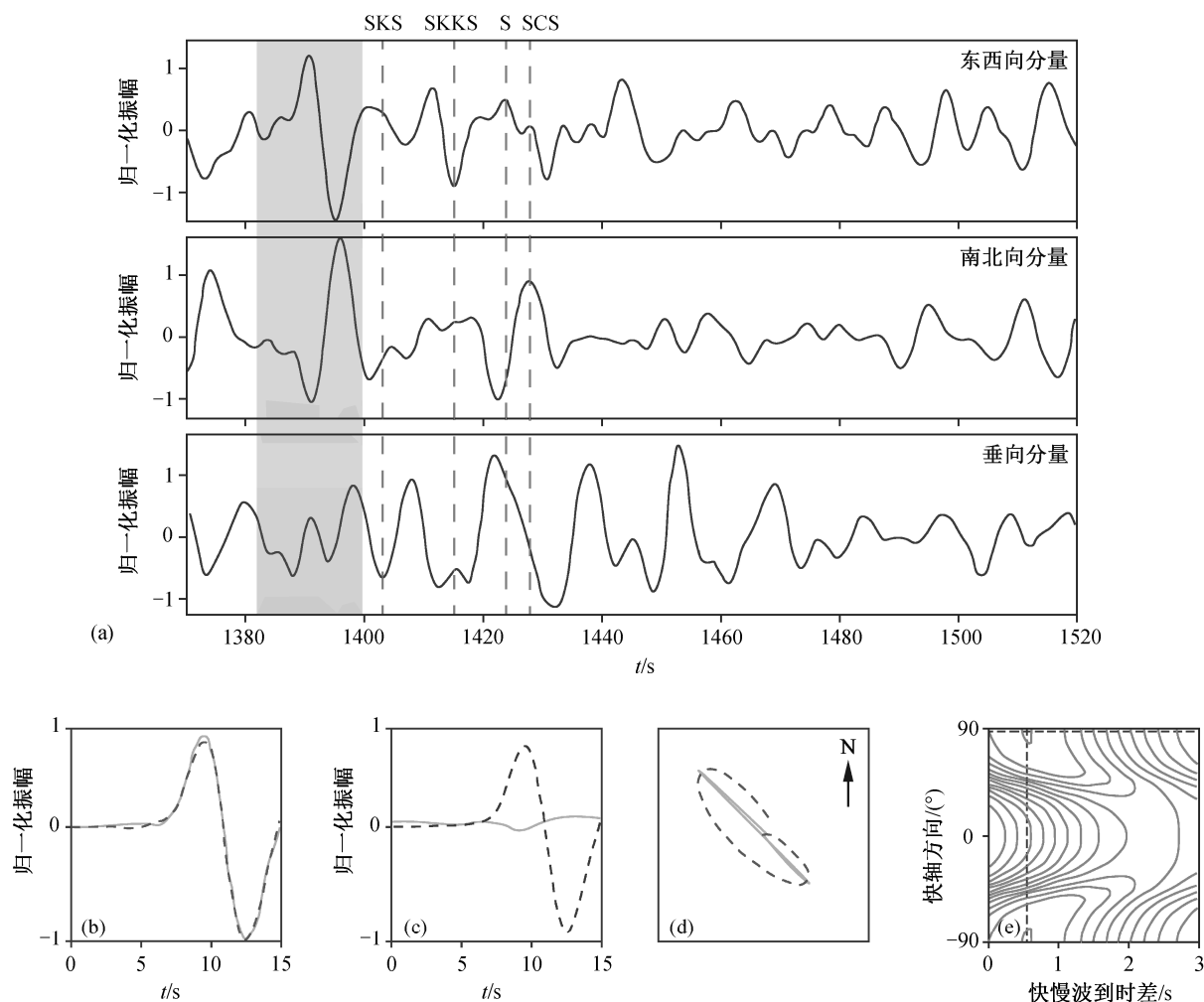
利用 H - κ 叠加方法, 对山东境内流动地震观测台站和固定地震观测台站的数据进行分析, 得到该区域每个台站下方的地壳厚度和 κ 值。通过对数据进行插值计算, 最终得到地壳厚度分布图(图 6)和 κ 值分布图(图 7)。

从图 6 可以看出, 山东地区地壳厚度的范围为 28~39 km, 胶南隆起的北段和南段地壳厚度小于 32 km; 鲁西隆起北侧的济阳凹陷地壳厚度也在 32 km

以内; 胶北隆起地壳厚度一般大于 32 km; 鲁西隆起下方的地壳比较厚, 为 33~37 km, 最厚的部位可达 39 km。

从图 7 可以看出, 山东地区的 κ 值主要分布在 1.67~1.94 之间, 鲁西隆起西南部和胶南隆起北段小于 1.75。

Chen 等^[20]利用接收函数方法, 对华北克拉通东部流动地震台站的数据进行分析, 山东南部剖面的分析结果显示, 该区域地壳厚度小于 40 km, 本文的研究结果与之相近。同时, 本文得到的山东北部地壳厚度与江为为等^[21]利用重力和磁场特征得到的地壳厚度和变化趋势相近。人工地震的研究结果显示, 鲁西隆起的地壳厚度为 33~36 km^[22-23], 本文结果(33~37 km)与之一致。



(a)为SD09台站0.04~0.25 Hz滤波范围内一条清晰的SKS波形记录,灰色阴影区标示实际SKS波形的位
(b)中黑色虚线和灰色实线分别表示校正后进行振幅归一化的快波和慢波波形;(c)中黑色虚线和灰色实线
分别表示校正前切向和径向SKS波的波形;(d)中黑色虚线和灰色实线分别表示校正前后的质点运动轨迹;
(e)为最小本征值等值线,水平虚线与竖直虚线的交点为SKS波分裂计算得到的最小本征值点

图 4 山东地区 SD09 台站单个事件横波分离计算结果

Fig. 4 Shear-waves splitting result of one event recorded by SD09 seismic station in Shandong area

2.3 SKS 波分裂结果

图 8 中,台站的延迟时间主要在 0.50~1.90 s 的范围,延迟最大的区域位于鲁西隆起的西部,胶东隆起部位的延迟较小。鲁西隆起下方可能有流动速度更快或厚度更大的地幔物质流动。

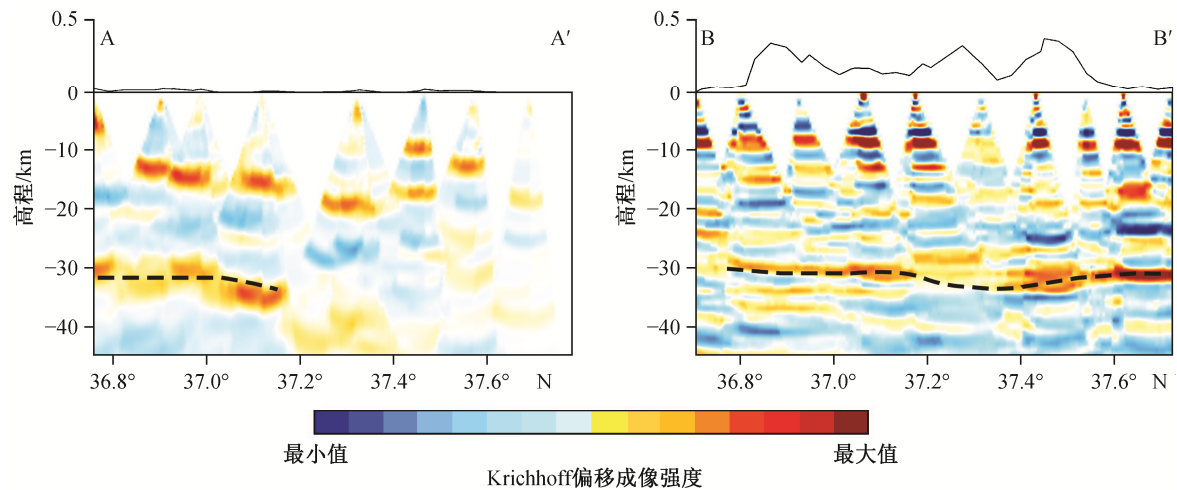
图 8 显示,SKS 波分裂的快轴方向大致为东西向,与 GPS 观测到的板块运动方向一致,这可能与太平洋板块向西对华北克拉通的俯冲相关。

3 讨论与结论

泊松比是反映地壳物质成分的重要参数之一,结合地壳厚度,可以揭示地壳内部的构造演化过

程。地壳 κ 值分布可以直接与泊松比相对应。从上述结果可以看出,山东地区地壳的不均匀性比较强,各个地质单元呈现出不同的特性。山东地区地壳厚度和泊松比的变化,显示郯庐断裂带及大别-苏鲁造山带的地壳结构存在跃变。

本文的第一个发现是,鲁西隆起部位地壳厚度较大,至沿海区域地壳厚度逐渐减薄,这是山东地区地壳结构的主要特征。鲁西隆起的地壳厚度约为 38 km,其南部与北部的 κ 值存在明显的差异,呈现南低北高的趋势。由于南部凹陷比较发育,因此 κ 值的变化趋势呈现与地形较好的对应关系。由于该区域发生过较强烈的岩浆活动^[9],而铁镁质岩浆的



黑色虚线表示 Krichhoff 偏移成像得到的地壳下边界位置; 剖面 A-A'和 B-B'的位置见图 1

图 5 山东地区接收函数 Krichhoff 偏移成像结果

Fig. 5 Krichhoff migration analysis result in Shandong area

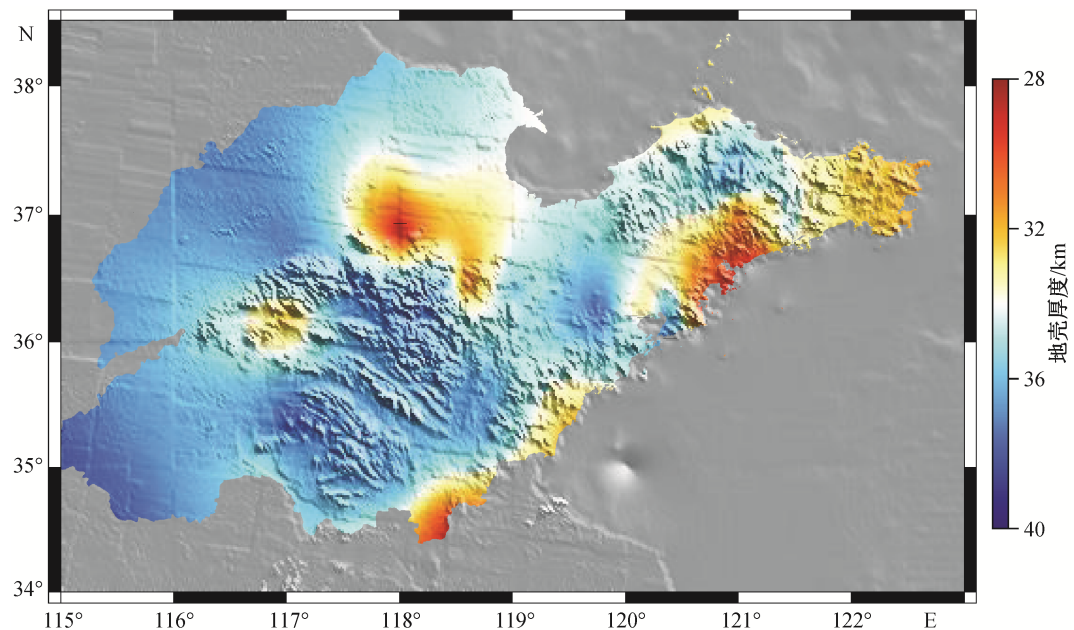


图 6 山东地区地壳厚度分布

Fig. 6 Crust thickness profile in Shandong area

侵入可以使 κ 值升高, 这与北部的 κ 值分布特点相吻合, 但与南部的 κ 值分布特点相左。鲁西隆起的地壳厚度比周围的区域大, 因此脆性矿物为主要成分的中上地壳也有相应的增厚。我们认为, 与鲁西隆起北部不同的是, 南部区域受到比较强烈的拉伸, 导致流变性较强的下地壳减薄, 因此该区域主要显示中上地壳的低 κ 值特征。此外, 由于华北克拉通岩石圈正在经历减薄和破坏^[3-7], 鲁西隆起南部在岩石圈拆沉的同时, 下地壳的物质也相应地减少^[8],

两个因素共同作用, 降低鲁西隆起南部的 κ 值, 导致鲁西隆起南北两部分 κ 值的差异。

本文的第二个发现是, 胶南隆起北端和胶北隆起东部具有相似的较低 κ 值, 地壳厚度大于 32 km, 其成因可能与鲁西隆起南部相似, 主要由中上地壳的增厚和下地壳拉伸减薄共同作用造成。胶南隆起南部及中部(或苏鲁造山带)的地壳厚度比较薄, 但是 κ 值增大, 两者为负相关的关系, 可能与超高压变质岩体的广泛分布有关。

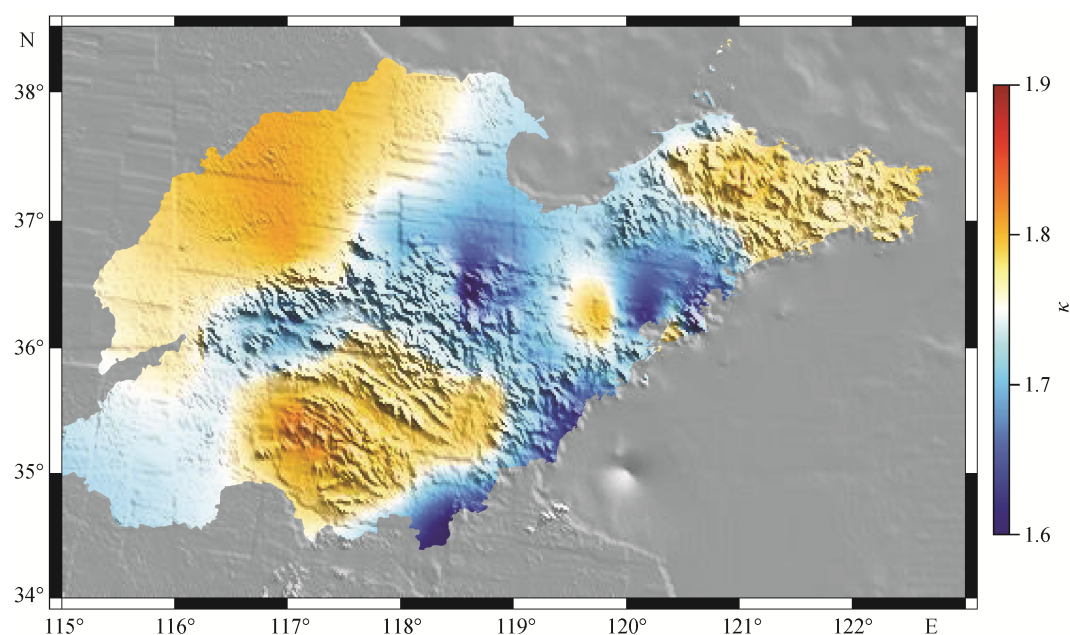
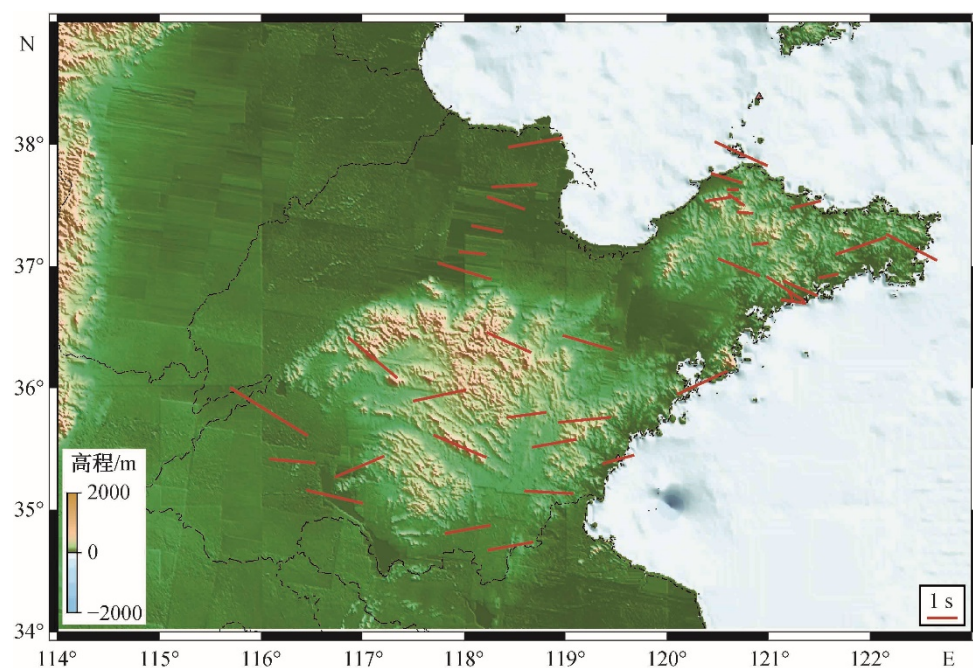


图 7 山东地区地壳平均 κ 值分布
Fig. 7 Average κ of the crust in Shandong area



红色短棒指示各台站下方 SKS 波分裂计算得到的快波方向, 其长度表示 SKS 波分裂的快慢波到时差

图 8 山东地区 SKS 波分裂结果
Fig. 8 Shear-waves splitting result in Shandong area

本文结果显示, 在纬度 36° 以北, 东经 118° — 119° , 莫霍面深度相对于周围区域的约 35 km , 抬升至约 30 km , 这可能是郯庐断裂造成的。在该区域所有台站地壳结构的观测结果中, SM057 台站尤

其明显地存在较薄的地壳结构(表 1)。 κ 值的计算结果也显示, 该台站下方存在显著的异常, 而周围其他台站并无显著的地壳厚度和 κ 值异常, 这种现象与郭震等^[24]的 P 波和 S 波接收函数研究结果以及

Chen^[10]的P波接收函数研究结果一致。接收函数采用的地震波实际上并非完全垂直入射,通常存在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的入射角,因此莫霍面上的异常扰动不可能只影响单个台站,也应当在临近台站的结果中有所反映。本文认为,该处的异常结构可能是台站下方小范围的异常扰动造成的。此外,研究区最北端地壳厚度约为36 km,考虑到该处沉积层较厚,波速较慢的沉积层会使 $H-\kappa$ 叠加计算得到的地壳厚度结果变大,因此本文仅展示该结果,不对该处的地壳加厚现象进行更深入的探讨。

正在进行的印度-欧亚大陆碰撞,可能产生远距离的影响。关于这种影响对中国东部新生代构造演化的作用,有些研究者做了分析。在对鄂尔多斯周边SKS波的研究中,观测到鄂尔多斯块体南侧存在显著的地幔流,并对鄂尔多斯块体的岩石圈产生侵蚀,证明印度-欧亚大陆碰撞引起地幔流动的影响范围已覆盖鄂尔多斯区域^[14]。Zhao等^[25]通过对华北克拉通SKS波的研究,认为地幔流并未对华北克拉通造成显著的影响;他们观测到祁连山地区的SKS波分裂快轴方向对地震后的方位角存在依赖性,表明各向异性的情况比较复杂,可能存在多层各向异性,这一异常现象可能来自印度-欧亚大陆碰撞的长期影响;他们还认为华北克拉通中部存在空间上连贯的快轴方向,这种模式表明该区域地幔上升流的水平偏转,可能起源于地幔过渡带。

前人对华北地区的SKS研究受台站数量限制,数据覆盖较稀疏。本文利用山东地区的固定台站和部分北京大学布设的流动地震台站,观测到山东地区存在与华北中南部类似的,连贯的横波快轴方向(图8)。山东地区的快轴方向大致为东-西方向,与Zhao等^[25]的观测结果相同,也与前人在该区域邻区的观测结果^[26-27]一致,并相互连贯。本文认为,这一快轴方向反映区域地幔上升流的水平偏转。

在接收函数的 $H-\kappa$ 叠加计算中, H 值与 κ 值互相耦合,共同决定PS、PpPs和PpSs转换波相对于直达P波的到时差。因此,当计算得到的地壳厚度存在极端低异常值时, κ 值容易在求解结果中产生高异常值,在 $H-\kappa$ 叠加结果(图2)中出现从左向上向右延伸的形态。本文根据bootstrap方法对误差进行计算,发现这一低地壳厚度异常值对应的SM057台站存在更大的误差。因此,我们认为在该台站观测到的地壳厚度和 κ 值异常可能是较浅部特殊异常结构的散射波引起的假象,不能反映深部莫霍面的变

化。这一异常结构在SM057台站东西两侧不存在。SM057台站位于南北贯穿山东地区的郯庐断裂带,对于该处观测到的地壳异常结构,后续工作中需要收集其南北两侧更密集的台站观测资料,进行更深入的探索。

参考文献

- [1] 林钧堂. 鲁东构造单元划分及其边界问题. 中国区域地质, 1993, 2(8): 158-166
- [2] 牛树银, 胡华斌, 毛景文, 等. 鲁西地区地质构造特征及其形成机制. 中国地质, 2004, 31(1): 34-39
- [3] An M, Shi Y. Lithospheric thickness of the Chinese continent. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 159(3/4): 257-266
- [4] Chen L. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. *Lithos*, 2010, 120(1/2): 96-115
- [5] Menzies M A, Fan W, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Geological Society, London, Special Publications*, 1993, 76(1): 71-81
- [6] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(5): 583-592
- [7] 朱日祥, 郑天愉. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报, 2009, 54(14): 1950-1961
- [8] 李三患, 王金铎, 刘建忠, 等. 鲁西地块中生代构造格局及其形成背景. 地质学报, 2005, 79(4): 487-497
- [9] 林景仟, 金焯. 鲁西地区中生代火成活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(3): 213-220
- [10] Chen L. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S-and P-receiver function migration. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173(3/4): 216-227
- [11] Wilson D, Aster R. Seismic imaging of the crust and upper mantle using regularized joint receiver functions, frequency-wave number filtering, and multi-mode Kirchhoff migration. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110: B05305
- [12] Yue H, Chen Y J, Sandvol E, et al. Lithospheric and upper mantle structure of the northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117: B05307

- [13] Savage M K. Seismic anisotropy and mantle deformation: what have we learned from shear wave splitting?. *Reviews of Geophysics*, 1999, 37(1): 65–106
- [14] Yu Y, Chen Y J. Seismic anisotropy beneath the southern Ordos block and the Qinling-Dabie orogen, China: Eastward Tibetan asthenospheric flow around the southern Ordos. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 455: 1–6
- [15] Zhu L, Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105 (B2): 2969–2980
- [16] Laske G, Masters G, Reif C. CRUST 2.0: a new global crustal model at 2×2 degrees [EB/OL]. (2001) [2016–09–01]. <http://mahi.ucsd.edu/Gabi/rem.dir/crust/crust2.html>
- [17] Dellinger J A, Gray S H, Murphy G E, et al. Efficient 2.5-D true-amplitude migration. *Geophysics*, 2000, 65 (3): 943–950
- [18] Zhang S, Karato S. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear. *Nature*, 1995, 375: 774–777
- [19] Earle P S, Shearer P M. Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(2): 366–376
- [20] Chen L, Tao W, Zhao L, et al. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1/2): 56–68
- [21] 江为为, 郝天珧, 焦丞民, 等. 山东青州–牟平重、磁场特征及地壳结构. *地球物理学进展*, 2000, 15 (4): 18–26
- [22] 嘉世旭, 刘昌铨. 华北地区人工地震测深震相与地壳结构研究. *地震地质*, 1995, 17(2): 97–105
- [23] 嘉世旭, 张先康. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 611–620
- [24] 郭震, 唐有彩, 陈永顺, 等. 华北克拉通东部地壳和上地幔结构的接收函数研究. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3591–3600
- [25] Zhao L, Zheng T, Lu G, et al. No direct correlation of mantle flow beneath the North China Craton to the India-Eurasia collision: constraints from new SKS wave splitting measurements. *Geophysical Journal International*, 2011, 187(2): 1027–1037
- [26] Zhao L, Zheng T. Using shear wave splitting measurements to investigate the upper mantle anisotropy beneath the North China Craton: distinct variation from east to west. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L10309
- [27] Gao Y, Wu J, Yi G X, et al. Crust-mantle coupling in North China: preliminary analysis from seismic anisotropy. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(31): 3599–3605