

鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域地壳厚度、泊松比分析^{*}

申金超¹, 张斌¹, 苏道磊², 刘晨¹

(1. 济南市地震局, 山东 济南 250099; 2. 中国科学院青岛海洋所, 山东 青岛 266071)

摘要: 利用远震接收函数方法得到鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域 30 个宽频带地震台站下方的地壳厚度、泊松比值。结果显示: 该区域地壳厚度和泊松比呈现不均一、变化大的特征, 其中泰山地区、沂沭断裂带郯城—莒县段及 RZH 台下方地壳厚度值小、泊松比值高。经分析认为, 鲁西隆起地壳厚度薄、泊松比值高的区域与底部地幔物质上涌及热侵蚀作用相关; 沂沭断裂带地壳厚度和泊松比具有明显分段特征, 体现在断裂带郯城—莒县段地壳厚度薄、泊松比高; 莒县—安丘段与断裂两侧的地壳厚度、泊松比值相近, 说明其壳幔相互作用主要体现在郯城—莒县段; 胶南隆起地区仅 RZH 台站下方地壳厚度值低、泊松比值高, 结合该区域重力异常梯度带特征, 推测大型的北北东向断裂带可能是造成 RZH 台站下方低地壳厚度值和高泊松比值的原因。

关键词: 远震接收函数; 地壳厚度; 泊松比; 鲁西隆起; 沂沭断裂带及胶南隆起区

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)02-0246-09

0 引言

鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域位于华北板块和扬子板块碰撞拼合地带, 构造环境复杂, 以沂沭断裂带为界, 鲁西隆起和胶南隆起分别位于断裂带西侧和东侧, 其中鲁西隆起为华北板块内部伸展作用的结果, 沂沭断裂带为大型走滑剪切构造带, 胶南隆起属于碰撞造山的产物, 多种类型的构造作用导致该区域地壳变形强烈。目前鲁西隆起伸展构造的成因模式还存在多种观点: (1) 受郯庐断裂剪切和后期南北向拉张作用, 形成的以掀斜断块为特征的伸展构造 (李万程, 1998); (2) 受地幔作用影响而形成的伸展隆起构造 (牛树银等, 2004; 燕守勋, 1994); (3) 类变质核杂岩模式 (王桂梁等, 1992; 张自恒, 1995) 等。无论哪种观点, 均需要从整个地壳尺度来判断。沂沭断裂带为大型走滑断裂, 其深度已切割至地幔, 底部地幔活动必然会对断裂构造产生影响, 地壳深部构造特征便成为分析沂沭断裂带壳幔相互作用不可或缺的要害, 前人对沂沭断裂带的地壳结构研究成果较为丰富、研究方法多样 (张碧秀, 汤永安, 1988; 魏梦华等, 1980; 刘昌

铨等, 1983), 但缺乏关于沿断裂带方向的地壳结构差异和地幔活动影响范围的表述; 胶南隆起的深部构造特征, 目前还未引起足够关注, 相关研究也较少。

地壳厚度可以直接体现地壳形态特征, 而泊松比是研究地球内部物质的重要参数, 它与岩石二氧化硅含量成反比关系 (Christensen, 1996)。在不同的构造环境中, 由于地壳自身的应力或壳幔相互作用等, 可引起地壳产生变形、物质交换等, 从而造成地壳厚度、泊松比的分布差异, 所以地壳厚度和泊松比是分析深部构造及壳幔相互作用十分有效的工具。本文通过搜集鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域 30 个宽频带地震台站所记录的远震资料, 利用远震接受函数方法获得了各地震台站下方的地壳厚度、泊松比值, 进而分析宽频带地震台覆盖区的鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域的地壳结构特征, 并探讨各构造单元可能存在的地质构造作用。

1 地质构造概况

鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域处于华北板块和苏鲁大别造山带在东侧交汇的部位,

^{*} 收稿日期: 2015-07-02.

基金项目: 山东省地震局科研基金项目——利用远震接收函数分析鲁西隆起和济阳拗陷地壳厚度、泊松比及其耦合关系 (JJ1401Y) 和山东省地震局合同制科研项目——鲁南地区地壳厚度、泊松比分析 (15Y03) 共同资助。

内部构造环境差别很大, 沂沭断裂带作为鲁西隆起和胶南隆起边界, 断裂带西侧的鲁西隆起位于华北板块内部, 东侧的胶南隆起为苏鲁大别造山带的东延区域 (图 1)。鲁西隆起属于板内的伸展隆起构造 (燕守勋, 1994; 时秀朋, 李理, 2007; 张宝政, 李双林, 1990; 王桂梁等, 1992), 东西夹于聊考断裂和沂沭断裂之间, 包含前寒武基底、古生代海相沉积地层及中—新生代陆相火山沉积地层。沂沭断裂带为大型剪切断裂带, 由四条 NNE 向主干断裂组成, 自西向东分别为郯部—葛沟断裂、沂水—汤头断裂、安丘—莒县断裂和昌

邑—大店断裂, 在地貌上构成两堑夹一垒的构造格局, 中间为汞丹山隆起、东西两侧分别为安丘—莒县地堑和马站—苏村地堑。胶南隆起西以沂沭断裂带为界, 北以五莲—威海断裂为界, 出露的基底地层为中—新元古代云台群与新元古代朋石河组, 胶南隆起具有典型造山带特征, 为华北板块和扬子板块碰撞拼合的结果, 构造以断裂为主, 呈 NNE 向分布, 隆起区有两期韧性剪切带, 早期韧性剪切带呈网格状分布, 后期韧性剪切带呈北东东向分布, 剪切带内分布有榴辉岩等超高压、高压岩类。

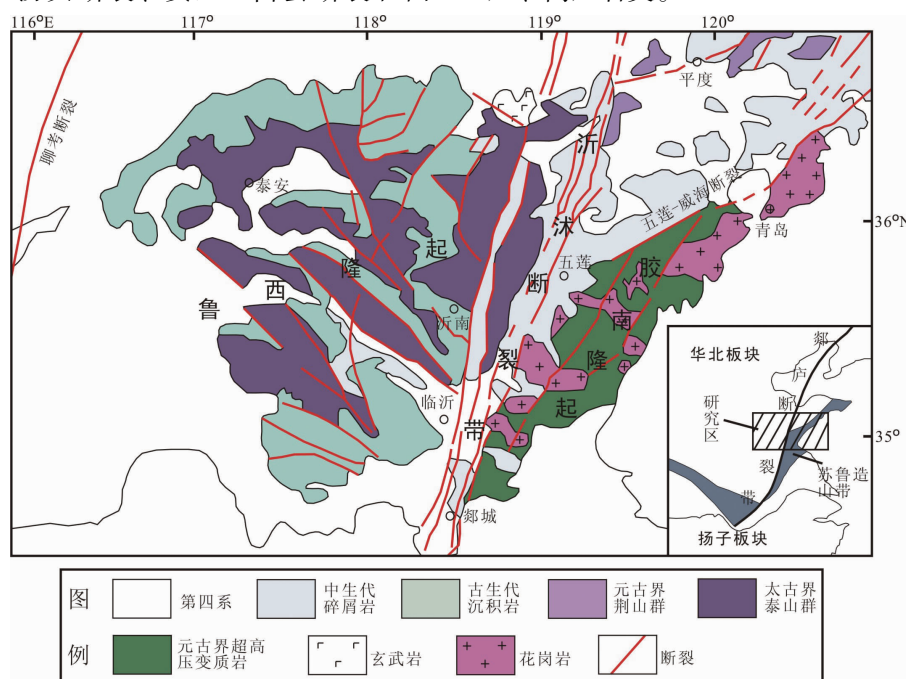


图 1 鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the area of Luxi Uplift, Yishu Fault and Jiaonan Uplift

2 计算方法与结果

2.1 远震接收函数方法原理

远震的体波波形包含震源、传播路径、接收区介质性质等信息, 远震接收函数方法可有效分析莫霍面结构, 并且能有效去除远震震源、传播路径及仪器的影响。该方法主要采用时间域迭代反褶积算法实现接收函数的反褶积计算 (Owens *et al.*, 1984; Langston, 1977; 查小惠, 雷建设, 2013), 可得到 P 波在莫霍面产生的转换波和多次波信息。由于 P 波和 S 波在地壳中传播性质不同, 在假定地壳平均 P 波速度的情况下, 可通过在厚

度域和波速比域搜索转换波及多次波震相的叠加振幅最大值, 并同时可约束地壳厚度和波速比值 (黄海波等, 2012)。另外波速比对 P 波速度变化的敏感性较差, P 波在地壳传播的速度从 6.0 km/s 变到 6.75 km/s, 其波速比变化仅有 0.05 (葛黎等, 2011)。若莫霍面深度为 H , t_{Ps} 、 t_{PpPs} 、 $t_{PsSs + PpPs}$ 分别表示转换波 Ps、多次波 PpPs 及 PsPs + PpPs 震相与初至 P 波的到时差, 则:

$$t_{Ps} = \frac{H}{V_p} (\sqrt{(V_p/V_s)^2 - p^2 V_p^2} - \sqrt{1 - p^2 V_p^2}), \quad (1)$$

$$t_{PpPs} = \frac{H}{V_p} (\sqrt{(V_p/V_s)^2 - p^2 V_p^2} - \sqrt{1 - p^2 V_p^2}), \quad (2)$$

$$t_{PsSs + PpPs} = \frac{H}{V_p} (\sqrt{(V_p/V_s)^2 - p^2 V_p^2} - \sqrt{1 - p^2 V_p^2}). \quad (3)$$

可构建叠加函数为

$$S(H, \kappa) = \omega_1 \gamma(t_{Ps}) + \omega_2 \gamma(t_{PpPs}) - \omega_3 \gamma(t_{PsSs + PpPs}). \quad (4)$$

式中, V_p 和 V_s 分别为地壳的 P 波、S 波的平均速度, p 为射线参数, $\gamma(t)$ 是径向接受函数, ω_i 是权重系数, 其中 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。扫描 H, κ 域, 当 H, κ 对应真实地壳厚度和波速比时, $S(H, \kappa)$ 达到最大值, 可避免对转换波、多次波等震相的人工逐个识别。根据波速比值可以换算出泊松比, 其关系式为

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \right]. \quad (5)$$

式中, σ 为泊松比。

2.2 选取数据及计算结果

笔者挑选出位于鲁西隆起、沂沭断裂带及胶

南隆起区域 30 个固定宽频带地震台站记录的 2010 ~ 2013 年 $M_s > 6.0$ 、震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 之间、具有清晰的初至 P 波和高信噪比的远震波形, 最终各台站接收函数波形数为 30 ~ 70, 地震台站及地震震中分布见图 2, 计算过程将 V_p 设置为 6.2 km/s, 转换波 Ps、多次波 PpPs 和 PsPs + PpSs 的权重分别设置为 0.6、0.3 和 0.1。利用远震接收函数方法, 我们得到各地震台站下方的地壳厚度和泊松比值, 具体见表 1。图 3 ~ 4 给出了 QXT、TIA、ZCH、JUX、TCH、XIT、RZH、WUL 地震台站的接收函数波形和 $H - \kappa$ 叠加结果, 从图中可以看出, 接收函数波形清晰, 转换波和多次波可较好地识别, 获取了各台站准确的地壳厚度和波速比值。

表 1 各地震台站下方地壳厚度、泊松比计算结果

Tab. 1 The calculation results of crustal thicknesses and Poisson's ratio beneath seismic stations

台站标识	$\varphi_N / (^\circ)$	$\lambda_E / (^\circ)$	地壳厚度值/km	泊松比
TIA (泰安台)	36.25	117.10	29.9	0.28
XIT (新泰台)	35.95	117.76	34.3	0.23
TCH (郯城台)	34.70	118.46	30.9	0.29
CSH (苍山台)	34.85	118.05	33.5	0.25
LIS (临沭台)	34.95	118.69	30.9	0.28
JUN (莒南台)	35.17	118.85	33.3	0.27
YSH (沂水台)	35.79	118.63	33.5	0.27
NLA (牛栏台)	35.52	117.98	33.4	0.25
MEY (蒙阴台)	35.76	118.11	33.1	0.27
ANQ (安丘台)	36.37	119.22	34.0	0.26
LQU (临朐台)	36.41	118.49	33.7	0.25
WLS (五龙山台)	36.20	118.88	32.4	0.25
WUL (五莲台)	35.75	119.20	35.7	0.25
JUX (莒县台)	35.54	118.89	30.6	0.32
JIX (嘉祥台)	35.43	116.35	34.3	0.25
ZCH (邹城台)	35.38	117.01	35.3	0.22
LSH (梁山台)	35.81	116.08	33.1	0.26
DSD (独山岛台)	35.10	116.75	33.3	0.24
WSH (汶上台)	35.85	116.57	32.5	0.24
SSH (泗水台)	35.56	117.39	34.3	0.26
QUF (曲阜台)	35.78	117.09	34.1	0.23
JIN (济南台)	36.64	117.04	32.4	0.26
QXT (七星台)	36.49	117.32	31.0	0.29
ZQW (瓦山台)	36.66	117.52	32.3	0.28
PIY (平阴台)	36.29	116.45	33.5	0.27
CHQ (长清台)	36.53	116.82	32.4	0.27
LIC (历城台)	36.65	117.23	32.8	0.24
RZH (日照台)	35.42	119.52	30.9	0.29
LAS (岚山台)	35.13	119.32	34.5	0.24
TZH (陶庄台)	34.89	117.35	32.7	0.26

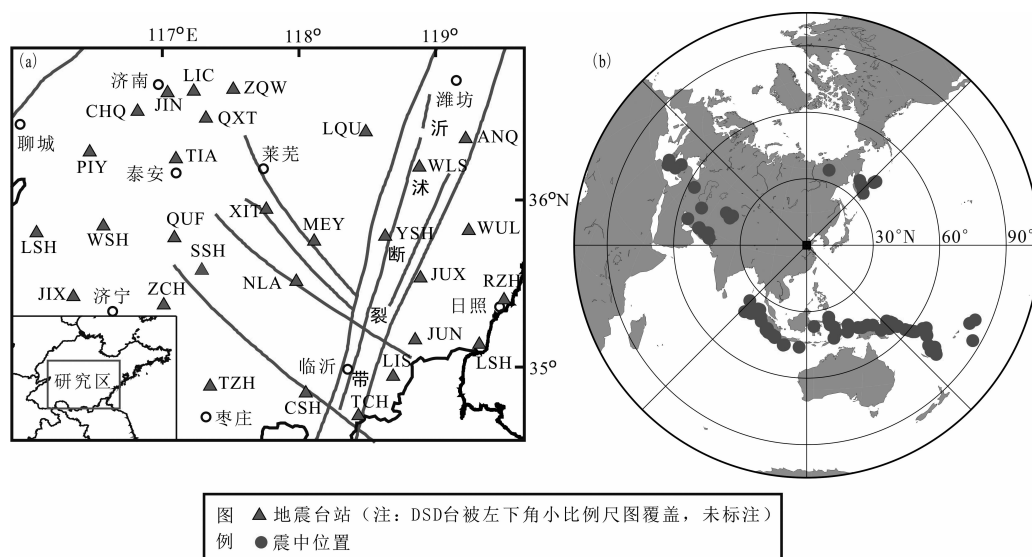


图2 台站分布 (a) 及远震 ($M_s > 6.0$, 震中距 $30^\circ \sim 90^\circ$) 震中分布 (b) 图
Fig. 2 The distribution map of stations (a) and epicentres of teleseismic ($M_s > 6.0$, epicentral distances of $30^\circ \sim 90^\circ$) (b)

从图 5a 中可以看出, 鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域宽频带地震台覆盖地区地壳厚度呈现明显的不均匀分布。鲁西隆起地区北部的泰山及周边地区下方地壳厚度值最小, 其中 TIA 台下方地壳厚度值为 29.9 km, 其它地区地壳厚度值均大于 32 km, 鲁西隆起南部地壳厚度值相对较大; 沂沭断裂带的计算范围局限在宽频带地震台覆盖区域, 其计算结果显示莒县—郯城段地壳厚度均小于 31 km, 而断裂带莒县—安丘段地壳厚度值明显偏高, 同断裂带两侧地壳厚度值相近; 对于胶南隆起地块, 除 RZH 台下方地壳厚度较小, 其余各地震台站下方地壳厚度一般均大于 33 km。鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域宽频带地震台覆盖地区的泊松比值同样分布不均匀, 并且泊松比同地壳厚度存在明显的负相关性, 在泰山及周边地区、沂沭断裂带南段及 RZH 台下方地壳的泊松比值明显较高, 可达到 0.29, 而地壳厚度较大的地区, 其泊松比值反而较小 (图 5b)。

3 地壳厚度、泊松比分析与讨论

不同构造环境的区域, 其地壳厚度和总体岩性组成必然存在差异, 构造活动导致地壳介质的物理化学变化可在地壳厚度和泊松比上得以体现, 地壳厚度可直接反映出地壳结构特征, 而泊松比是分析地球内部物性的重要参数, 不同岩性的地壳会反映出不同的泊松比值, 地壳泊松比值大于

0.30 时, 存在部分熔融区或破碎带, 地壳泊松比值在 0.28 ~ 0.30 之间为基性铁镁质地壳, 小于 0.26 为长英质地壳, 0.26 ~ 0.28 之间属于介于铁镁质和长英质之间的过渡性质的地壳 (嵇少丞等, 2009)。

3.1 鲁西隆起地区

鲁西隆起作为华北板块重要的伸展隆起构造, 其地壳结构总体表现为南厚北薄, 泰山及周边地区地壳厚度最薄, 而该地区地势最高, 因此泰山及周边地区下方莫霍面应呈向上的凸起状 (图 6), 指示了该地区存在地幔物质上涌。一般花岗岩陆壳内铁镁质成分的增加不会使泊松比值超过 0.29, 但部分熔融程度为 5% 的花岗岩的泊松比超过 0.30 (葛繁等, 2011), 因此具有高泊松比值的泰山地区下方应存在明显的部分熔融。根据 Owens 和 Zandt (1997) 的研究, 地幔热侵蚀作用可以引起地壳部分熔融, 并使泊松比值超过 0.30。结合泰山地区呈现的明显地壳厚度小且呈上隆状的地壳结构特征, 我们可以推断该区域存在地幔物质上涌及热侵蚀作用, 并造成泰山地区地壳向上隆起、减薄和高泊松比值。鲁西隆起南部地区地壳厚度相对较大, 地壳泊松比值基本上均小于 0.26, 其中, ZCH 台下方地壳厚度为 35.3 km、泊松比为 0.22, 从泊松比值上判定误区为典型的大陆长英质地壳, 同泰山地区存在明显差异, 该区域构造环境相对稳定, 地壳未发生明显部分熔融, 受到的壳幔相互作用相对较弱, 说明地幔物质上涌及热侵蚀作用应主要集中在泰山地区。

王涛等 (2007) 认为华北克拉通内部的以穹窿为代表的伸展构造为华北岩石圈减薄过程中的地壳响应, 鲁西隆起区位于华北克拉通东部, 属

于典型的板内隆起构造, 鲁西隆起的形成始于中晚侏罗纪 (燕守勋, 1994; 时秀朋, 李理, 2007; 王桂梁等, 1992), 而这与华北岩石圈减薄事件

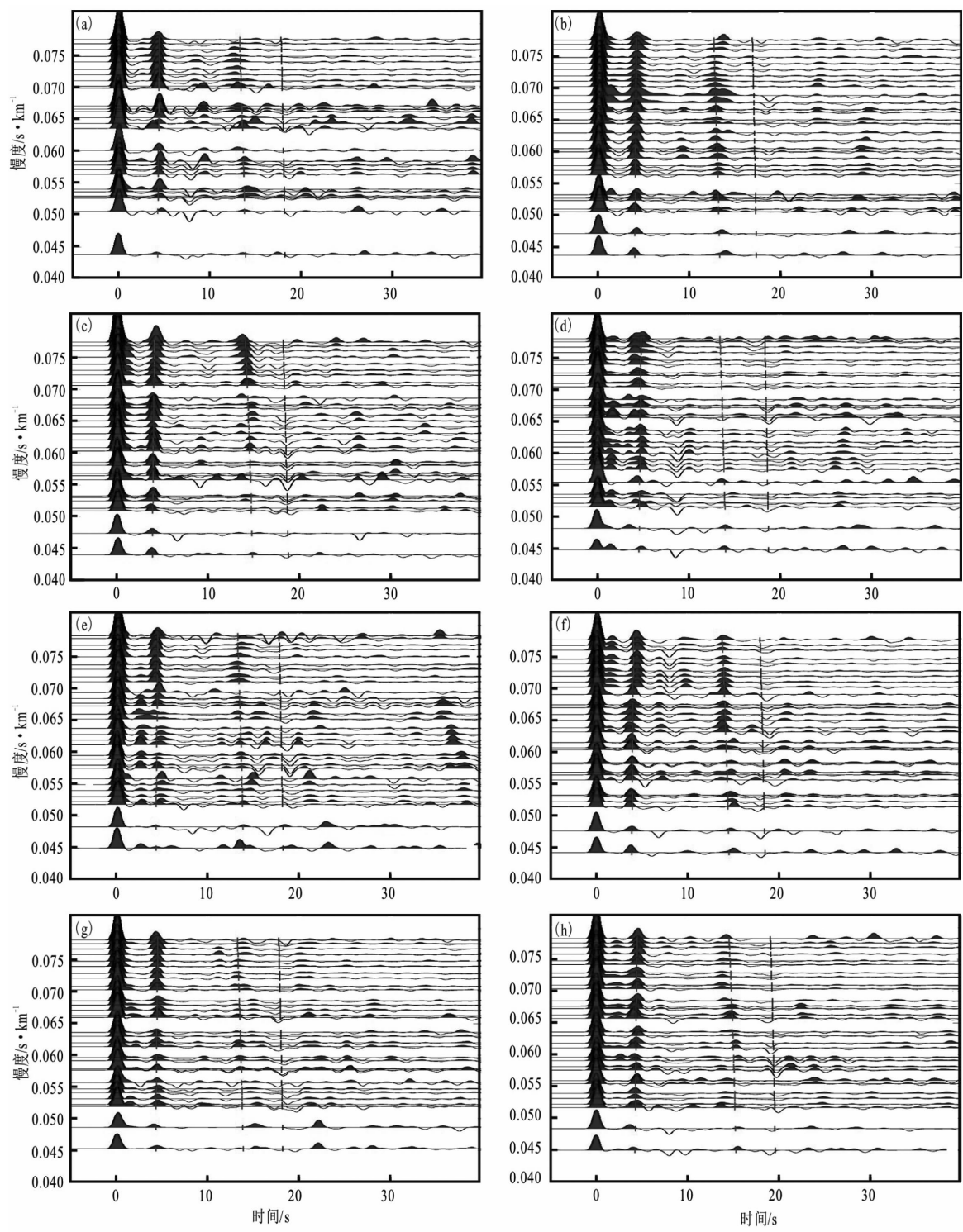


图3 QXT(a)、TIA(b)、ZCH(c)、JUX(d)、TCH(e)、XIT(f)、RZH(g)、WUL(h)地震台站的接收函数
Fig. 3 Receiver functions of QXT(a), TIA(b), ZCH(c), JUX(d), TCH(e), XIT(f), RZH(g) and WUL(h) stations

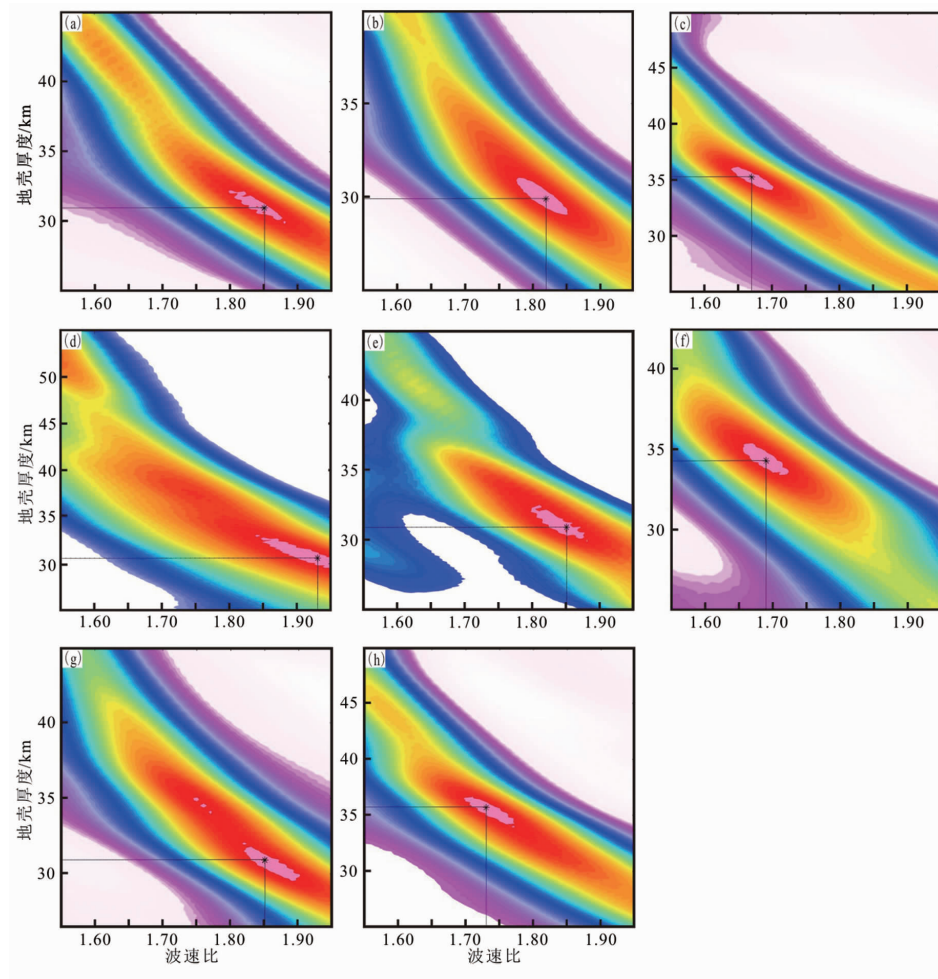


图4 QXT(a)、TIA(b)、ZCH(c)、JUX(d)、TCH(e)、XIT(f)、RZH(g)、WUL(h)
地震台站 $H-\kappa$ 叠加的结果

Fig. 4 The $H-\kappa$ stack results of QXT(a), TIA(b), ZCH(c), JUX(d), TCH(e), XIT(f),
RZH(g) and WUL(h) stations

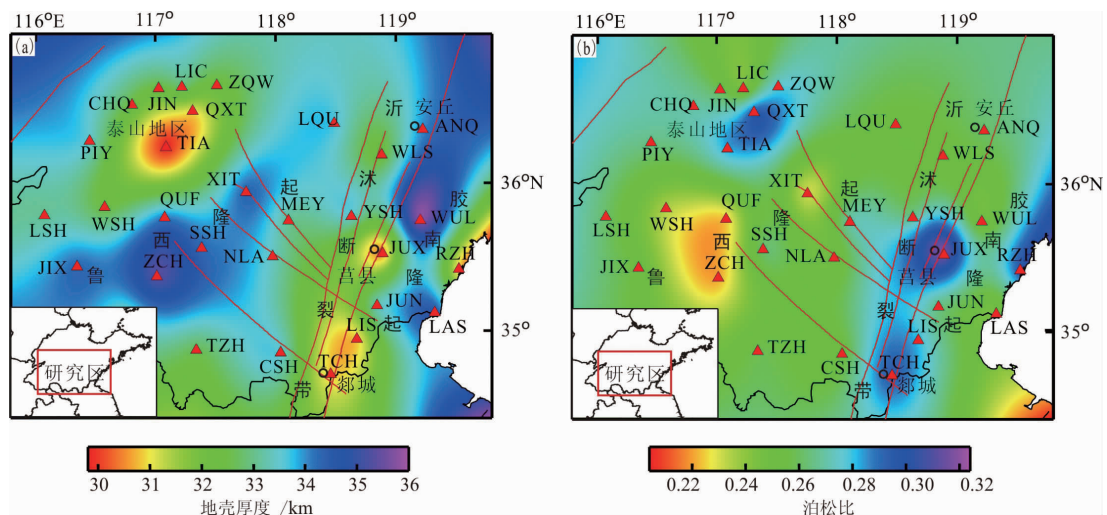


图5 鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区域地区地壳厚度 (a)、泊松比 (b) 分布图

Fig. 5 The distribution map of crustal thicknesses (a) and Poisson's ratio (b) beneath the area of Luxi Uplift,
Yishu Fault and Jiaonan Uplift

(吴福元, 孙德有, 1999; 邓晋福等, 1994) 在时间上相对应, 因此现今鲁西隆起泰山地区的地壳结构及物性特征应是中生代华北岩石圈减薄过程中壳幔相互作用的结果。

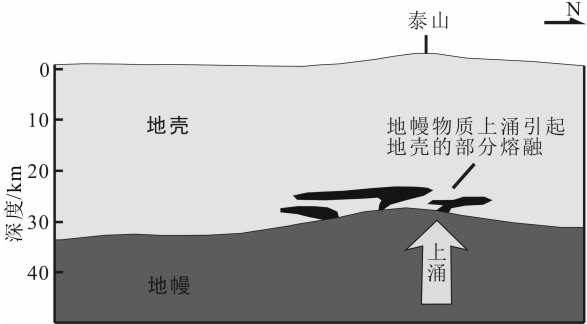


图 6 泰山地区南北向地壳结构剖面示意图
Fig. 6 Sketch map of crustal structure in NS of Taishan area

3.2 沂沭断裂带

本文计算了宽频带地震台所覆盖的沂沭断裂

带范围, 即安丘—郯城一带, 从计算结果上来看, 沂沭断裂带内部存在明显地壳减薄区域和高泊松比值区域, 均集中在郯城—莒县段, 莒县—安丘段地壳厚度和泊松比值同周边地壳相近, 地壳厚度和泊松比值分布特征体现出沂沭断裂带具有明显的分段性。根据苏道磊 (2015) 对沂沭断裂带速度结构的研究表明, 郯城—莒县段地壳中存在明显的低速体, 而莒县—安丘段低速体消失 (图 7), 断裂带速度结构也同样显示出分段特征, 与本文结论一致。从牛漫兰等 (2000) 和曹洋 (2009) 的火山岩地球化学研究结果可以发现, 郯庐断裂带山东段存在明显的地幔物质上涌底侵、幔源岩浆活动等一系列壳幔相互作用, 并且郯庐断裂带为整个岩石圈内的强减薄带, 这应是造成沂沭断裂带郯城—莒县段地壳厚度减薄、泊松比增大的主要原因, 莒县—安丘段可能就没有如此强烈的壳幔相互作用。

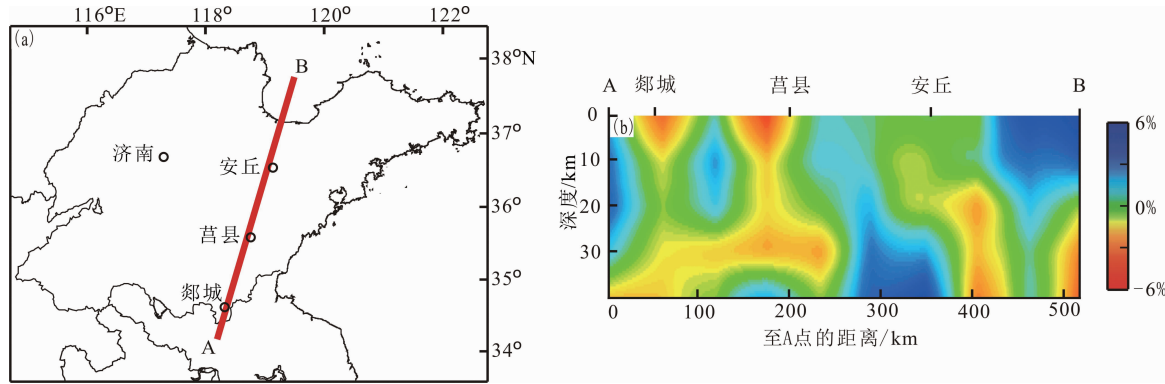


图 7 沂沭断裂带速度结构图 (苏道磊, 2015)
(a) 剖面位置图; (b) 速度结构图
Fig. 7 Velocity structure of Yishu Fault (Su, 2015)
(a) the location of the profile; (b) the image of velocity structure

3.3 胶南隆起区

胶南隆起区只有 RZH 台下方地壳表现出低地壳厚度值和高泊松比值的特征, 显示出 RZH 台站下方地壳具有特殊的物性特征, 从重力异常图 (图 8) 上可以看出, RZH 台站及周边地壳同整个沂沭断裂带一样, 存在明显的重力异常梯度带, 它主要反映构造断裂的升降或大规模的不同密度岩石的接触带, 而同样具有低地壳厚度值和高泊松比值的泰山地区不存在明显的重力异常梯度带, 说明 RZH 台站下方的地壳结构特征同沂沭断裂带相近, 且不同于泰山地区, 因此我们推测大型的

北北东向断裂带可能是造成 RZH 台站下方低地壳厚度值和高泊松比值的原因。此外, WUL 和 LAS 台相比周围地壳厚度较大, 整体来看, 胶南隆起区地壳结构差异较大, 说明该区域构造作用同样强烈, 应为深大断裂主导的结果, 胶南隆起区其它台站下方地壳泊松比值在 0.24 ~ 0.27 之间, 为铁镁质和长英质过渡性质的地壳。

4 结论

通过对鲁西隆起、沂沭断裂带及胶南隆起区

- 时秀朋, 李理. 2007. 鲁西隆起晚中生代以来伸展构造物理模拟[J]. 新疆石油地质, 28(4): 490–493.
- 苏道磊. 2015. 沂沭断裂带及邻近地壳三维速度结构及地震活动性[D]. 北京: 中国科学院大学, 1–105.
- 王桂梁, 燕守勋, 姜波. 1992. 鲁西中生代复合伸展构造系统[J]. 中国矿业大学学报, 21(3): 1–8.
- 王涛, 郑亚东, 张进江等. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义[J]. 地质通报, 26(9): 1154–1166.
- 魏梦华, 史志宏, 殷秀华等. 1980. 根据重力资料分析华北地区地壳结构的基本形态及其与地震的关系[J]. 地震地质, 2(2): 55–60.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 29(4): 313–318.
- 燕守勋. 1994. 从盆底沉积和古构造分析鲁西中生代地壳展史[J]. 中国区域地质, (1): 46–51.
- 张宝政, 李双林. 2007. 鲁西裂谷系的地质特征及演化[J]. 长春地质学院学报, 20(3): 287–295.
- 张碧秀, 汤永安. 1988. 沂沭断裂带地壳结构特征[J]. 中国地震, 4(3): 16–22.
- 张自恒. 1995. 鲁西伸展构造[J]. 山东地质, 11(2): 24–31.
- Christensen N I. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology[J]. J Geophys Res, 101(B2): 3139–3156.
- Langston C A. 1977. The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter[J]. Bull Seism Soc Amer, 67(4): 1029–1050.
- Owens T J, Zandt G. 1997. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution[J]. Nature, 387(6628): 37–43.
- Owens T J, Zandt G, Talor S R. 1984. Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee; a detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms[J]. J Geophys Res, 89(Nb9): 7783–7795.

Analysis on Crustal Thickness and Poisson's Ratio beneath Area of Luxi Uplift, Yishu Fault and Jiaonan Uplift

SHEN Jinchao¹, ZHANG Bin¹, SU Daolei², LIU Chen¹

(1. Earthquake Administration of Jinan Municipality, Jinan 250099, Shandong, China)

(2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract

We obtained the crustal thickness and Poisson's ratio beneath 30 seismic stations in the area of Luxi Uplift, Yishu Fault and Jiaonan Uplift by tele-seismic receiver function method. The results showed that the heterogeneity of crustal thickness and Poisson's ratio was obvious in the study area, and the crustal thickness value was low and the Poisson's ratio was high beneath Taishan area, Tancheng-Juxian section of Yishu Fault and RZH Station. We analyzed the obtained result and found that the area of thin crustal thickness and high Poisson's ratio beneath the Luxi Uplift was related with the mantle upwelling and thermal erosion in the bottom of Taishan area. The crustal thickness and Poisson's ratio of Yishu Fault had obvious segmentation features, which was the crustal thickness was thin and Poisson's ratio was high at Tancheng-Juxian section of Yishu Fault. The value of the crustal thickness and Poisson's ratio at Juxian-Anqiu section was closer to that of in both sides of Yishu Fault, which was indicated that the interaction of crust and mantle mainly occurs at the Tancheng-Juxian section. The low crustal thickness and high Poisson's ratio only existed beneath RZH Station of Jiaonan Uplift area, we induced that it may be caused by the NNE-trending fault combined with the gradient zone of gravity anomaly of Jiaonan Uplift area.

Key words: tele-seismic receiver function; crustal thickness; Poisson's ratio; the area of Luxi Uplift, Yishu Fault and Jiaonan Uplift