

Chanho Yu, Kwang-Hee Kim, Mancheol Suh, et al. 利用远震接收函数研究黄海周边地区的地壳上地幔结构. 地球物理学报, 2010, **53**(6):1336~1343, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.012

Chanho Yu, Kwang-Hee Kim, Mancheol Suh, et al. Crust and upper-mantle structure beneath the region around the Yellow Sea from teleseismic receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(6):1336~1343, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.012

利用远震接收函数研究黄海周边地区的 地壳上地幔结构

Chanho Yu^{1,2}, Kwang-Hee Kim^{1*}, Mancheol Suh², Bongchool Suk¹,
Paul Rydelek¹, Suyoung Kang¹, Yongcheol Park³, 刘劲松⁴

1 韩国海洋与发展研究所, 安山, 韩国

2 韩国公州大学, 公州, 忠南, 韩国

3 韩国极地研究所, 仁川, 韩国

4 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 利用宽频带流动台站(YSBSN)记录的远震波形数据和远震接收函数方法,反演了黄海东、西两侧地壳上地幔的 S 波速度结构. 结果表明,莫霍面深度在 30~38 km 之间变化,位于中方一侧的 JNN 台下方地壳厚度最大,可以归因于华北板块和扬子板块的碰撞;韩方一侧的地壳厚度自北向南逐渐变厚,但仍然难以厘定朝鲜半岛南部潜在碰撞带的位置,这些问题的解决需要更大范围的流动台站观测. 由于部分台站位于巨厚的沉积层和多孔的火山岩之上,与浅部构造的相关性使得接收函数表现出较大振幅的混响,从而影响了来自深部结构的转换震相.

关键词 黄海,宽频带流动地震台阵,S 波速度结构,远震接收函数

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.012

中图分类号 P738,P315

收稿日期 2009-04-06,2009-05-28 收修定稿

Crust and upper-mantle structure beneath the region around the Yellow Sea from teleseismic receiver functions

Chanho Yu^{1,2}, Kwang-Hee Kim^{1*}, Mancheol Suh², Bongchool Suk¹,
Paul Rydelek¹, Suyoung Kang¹, Yongcheol Park³, LIU Jin-Song⁴

1 *Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Korea*

2 *Kongju National University, Kongju, Chungnam, Korea*

3 *Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea*

4 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

Abstract Teleseismic events are used to obtain shear-wave velocity models beneath the stations of the Yellow Sea Broadband Seismic Network (YSBSN). Some stations are located on top of either a thick sedimentary basin or highly porous volcanic rocks and receiver functions at these stations exhibit prominent high-amplitude and long-period reverberations which obscure the subtle phases associated with deeper structures. Due to the shallow subsurface effects in receiver

基金项目 韩国科学与工程基金会的联合研究项目(F01-2007-000-10100-0),KORDI(PE98534),KOPRI(PP09020),中国国际合作重大项目(40620140435),中国国家自然科学基金项目(90814011,40674046),中国国家高技术研究发展计划(863)(2006AA09Z359)资助.

* 通讯作者 Kwang-Hee Kim,韩国海洋研究与发展研究所,E-mail:kwanghee@kordi.re.kr

functions, shear-wave velocity models beneath only 8 broadband seismic stations are successfully inverted. Depth to the crust-mantle transition (the Moho) varies from 30 to 38 km beneath YBSBN stations. The thickest crust is observed beneath the station JNN in China, which is attributed to the ancient collision boundary between the North China block and the South China block. Although general increase of the crustal thickness from north to south in Korea is observed with high confidence, it is not possible to delineate the location of potential collision boundary in the southern Korea peninsula, which would require wider coverage by broadband seismic instruments to resolve.

Keywords Yellow Sea, Broadband seismic network, Shear-wave velocity model, Receiver functions

1 引言

秦岭—大别造山带是华北板块 (North China block, NCB) 和华南板块 (South China block, SCB) 的碰撞缝合带, 并在中生代时期就形成了现在的构造格局 (图 1)。在中国东部, 碰撞带被郯庐断裂错开约 540 km, 继续向东延伸直至被黄海覆盖^[1]。黄海东侧的朝鲜半岛由若干前寒武地块组成 (Nangrim, Kyonggi, and Yongnam 地块), 并被褶皱断层所分隔 (Imjingang 构造带和 Okchon 褶皱带)。关于东北亚构造演化存在一些研究成果, 最新的研究表明, 朝鲜半岛 Imjingang 构造带代表了早三叠纪华北板块和华南板块的碰撞带; 随后, 侏罗纪沿 Okchon 褶皱带形成碰撞带, 构成朝鲜半岛主要大地格局^[2]; 同时一些研究者提出, 形成于早古生代的 Okchon 褶皱带是华南构造带的延伸^[3]。尽管尚存争议, 还有一种假设认为: 华北板块和华南板块之间的碰撞带应该起始于华南板块东北部向华北板块东部挤入的凹部, 并形成左旋的郯庐断裂和 Okchon 褶皱带上右旋 Honam 剪切带^[1]。基于蛇绿岩和超高压变质岩的分析, Ishiwatari 和 Tsujimori^[4] 认为华北板块和华南板块的边界可能没有延伸到朝鲜半岛, 而是在黄海内部转而向南延伸。最近的层析成像结果也支持在南黄海和朝鲜半岛之间存在南北向走滑的深大断裂 (黄海东部断裂带)^[5, 6]。如上所述, 关于朝鲜半岛构造演化的假设大都集中于华北板块和华南板块之间缝合带, 尽管没有来自黄海内部的直接证据, 但其无疑成为这些观点争议的核心内容。

为了探索黄海地区构造演化长期悬而未决的科学问题, 中韩两国科研人员在黄海周边布设了 11 台宽频带流动地震仪, 通过记录远震波形数据并利用接收函数方法反演了台站下方地壳上地幔的速度结

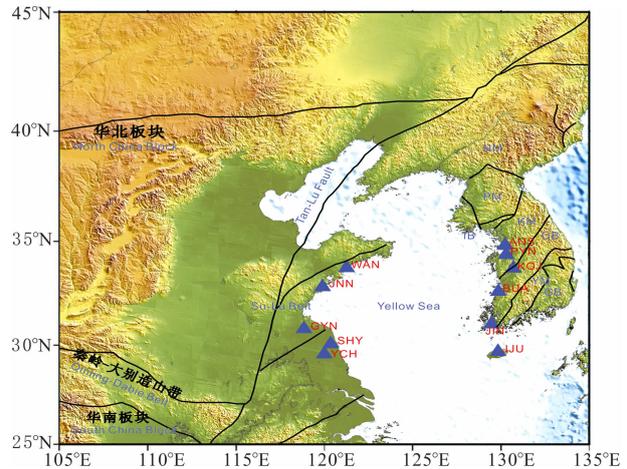


图 1 东北亚地区的构造简图

蓝色三角表示黄海流动地震台站的位置. NM: Nangrim 地块; PM: Pyungnam 地块; IB: Imjingang 构造带; KM: Kyeonggi 地块; OB: Okchon 构造带; YM: Youngnam 地块.

Fig. 1 Simplified tectonic map of the northeast Asia. Locations of broadband seismic stations installed by the Yellow Sea Broadband Seismic Network are shown by blue triangles. Major tectonic structures are denoted: NM: Nangrim Massif; PM: Pyungnam Massif; IB: Imjingang Belt; KM: Kyeonggi Massif; OB: Okcheon belt; YM: Youngnam Massif.

构, 展示了黄海地区中韩国际合作研究的初步结果。

2 方法和数据

作为获取地壳上地幔 S 波速度结构的常规方法^[7-11], 接收函数包括了径向和垂向分量的反褶积, 通过消除径向分量的 P 波多次波, 从而获得接收函数^[12]。对大量远震事件中提取的接收函数进行叠加, 以提高信噪比并生成反映台站下方速度结构的接收函数。假设台站下方符合水平层状模型, 则可以利用接收函数反演台站下方的一维 S 波速度结构; 对于具有倾斜界面的结构来说, 可以跟踪接收函

数随方位的变化,需要仔细挑选数据和确定叠加范围.本文中所使用的接收函数方法可以参考已有文献^[13, 14].

该项合作计划的研究团队由地球物理、构造地质和海洋学的不同学科的学者组成,包括中国科学院地质与地球物理研究所、广州海洋地质调查局、韩国公州大学、韩国海洋研究与发展研究所.宽频带流动地震台阵 YSBSN (Yellow Sea Broadband Seismic Network) 于 2007 年下半年建立(图 1),由 11 台宽频带地震仪组成,每个台站配置 Guralp 3ESP 地震计和 RefTek130 采集器,时间服务采用 GPS 授时服务.中方一侧的台站使用 40 sps 的采样率,3~4 个月收集一次数据并进行仪器维护;韩方一侧的台站则采用实时数据传输并提交到 KORDI 进行地震数据分析.

数据挑选采用以下原则(图 2):震中距位于 30° 和 90° 之间,高信噪比,震级大于 6.5 的地震事件;震源参数(震中、深度和震级)取自美国国家地震信息中心和美国地质调查局.图 3 给出了韩国公州大学 KOJ 台记录的一个远震波形,该地震位于震中距为 63° 的南太平洋;图 3b 给出了一个太平洋深震的接收函数实例.

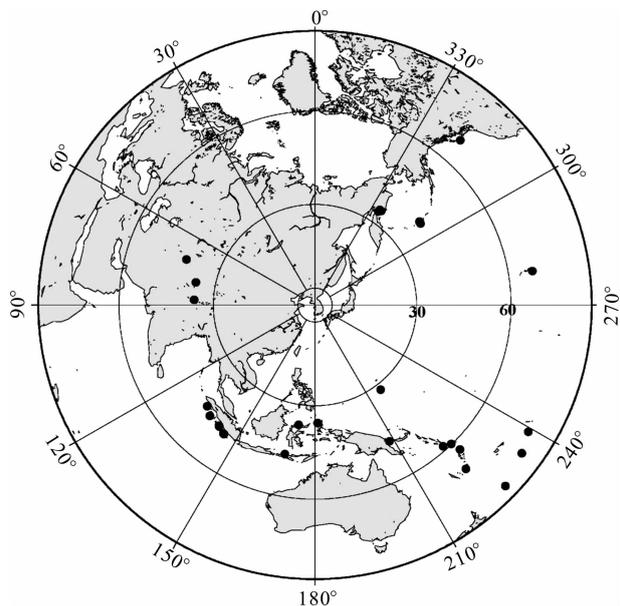


图 2 用于接收函数分析的 27 个远震分布 (黑色圆点,震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 之间、震级大于 6.5)

Fig. 2 Event locations (solid circles) used in the receiver function analysis in the study. The 27 events used in the present study were selected based on consideration of epicentral distance ($30^\circ < \Delta < 90^\circ$), magnitude (> 6.5), and high signal-to-noise ratio

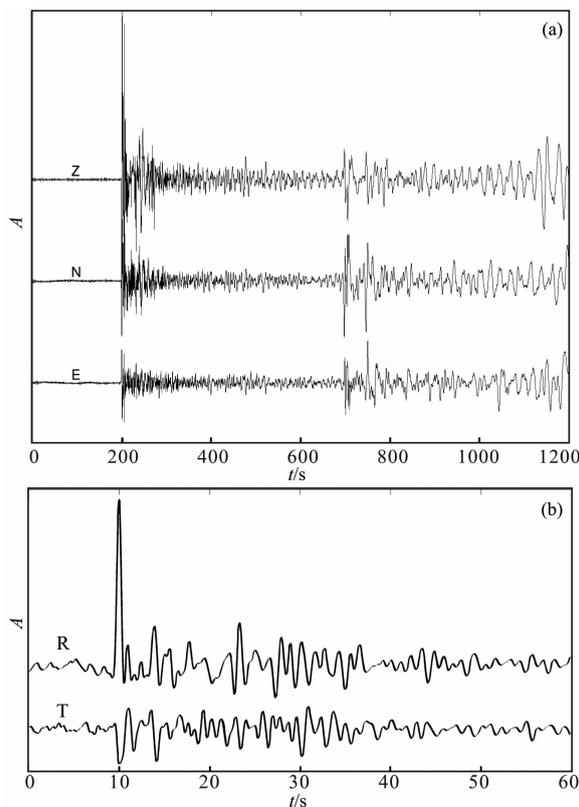


图 3 KOJ 台的远震波形和相应的接收函数

(a) 三分量地震波形,地震位于南太平洋,震源深度为 110 km,震级为 6.9 级;(b) 径向和切向接收函数.

Fig. 3 (a) A typical 3-component teleseismic broadband record for a intermediate deep (110 km) event with magnitude 6.9 in the South Pacific region recorded at Kongju station (KOJ). (b) Radial (R) and transverse (T) receiver functions after the deconvolution process.

3 反演结果

在约一年多的时间内,11 个台站中共有 8 个台站取得了较多的高质量数据. ANS 台和 PYN 台均位于朝鲜半岛中部的前寒武纪 Gyeonggi 地块之上(图 1),其中 Gyeonggi 地块地震活动较弱.为了提高信噪比,对 ANS 台记录的 4 个远震的径向接收函数分量进行了叠加,以便获取具有代表性的接收函数波形(图 4),叠加前后的接收函数在 P 波初至后的 3.7 s 均有明显来自莫霍面的 Ps 转换波.反演初始速度模型参考了 IASPEI91^[15] 模型,并对 120 km 深度以上的部分进行了修改,以适应研究区域的实际结构(图 5),这一速度模型也是韩国地球科学和矿产资源研究所(KIGAM)用于地震定位的速度模

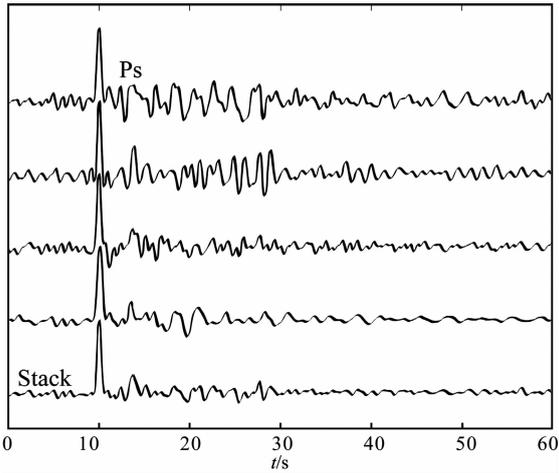


图 4 ANS 台 4 个径向分量接收函数的叠加结果
P 波初至之后的 3.7 s 出现 Ps 转换波震相。

Fig. 4 Radial component receiver functions from 4 teleseismic earthquakes recorded at station ANS and a representative receiver function obtained by stacking
Note consistent arrival of Ps at 3.7 second after the initial P wave arrival.

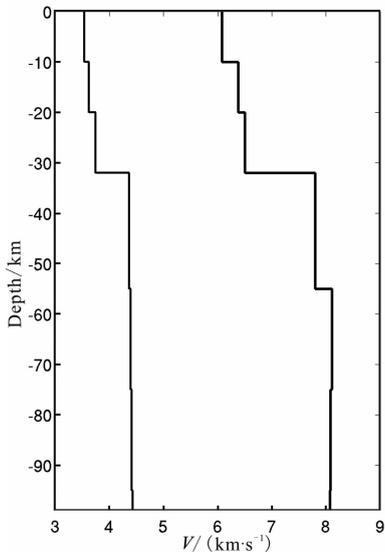


图 5 一维初始速度模型

Fig. 5 Initial velocity model for 1-D velocity inversion

型^[16]. 反演后 ANS 台站下方 2~4 km 深度上出现高速层,地壳内部 S 波速度随深度逐渐增加,30~32 km 深度上出现相对尖锐的壳幔转换界面(图 6), PYN 台站径向分量的接收函数由 6 个远震事件叠加而成,其结果与 ANS 台十分接近:即在 30~32 km 深度出现相对尖锐的壳幔转换界面(图 7),同样观察到地壳浅部的高速层,并且地壳内部的速度随深度逐步增加。

KOJ (Kongju) 台位于 Gyeonggi 地块和 Okchon 褶皱带的边界位置,对 4 个事件的接收函数进行了

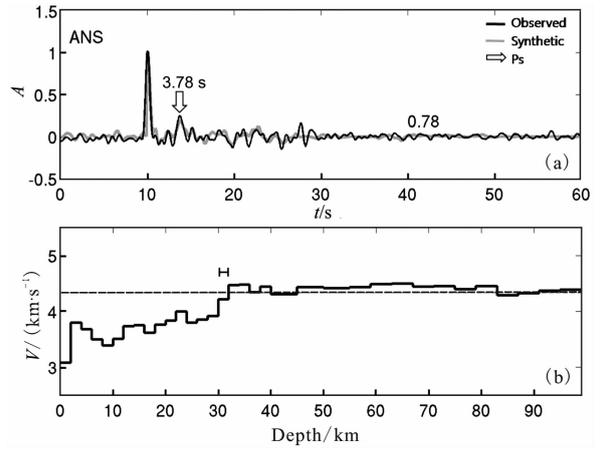


图 6 ANS 台的接收函数和 S 波速度结构

(a) 接收函数, P 波初至后 3.78 s 出现莫霍面 Ps 转换震相;
(b) S 波速度分布, 莫霍面出现在 30~32 km 深度。

Fig. 6 Observed and synthetic receiver function for station ANS

(a) P-to-S converted phase from the Moho discontinuity arrives at 3.78 second after the onset on both traces; (b) Inversion result for ANS reveals the crust - mantle transition occurs at 30~32 km depth beneath the station.

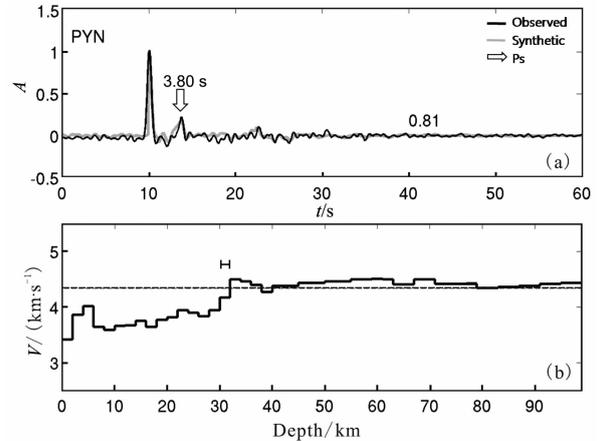


图 7 PYN 台的接收函数和 S 波速度结构

(a) 接收函数, P 波初至后 3.80 s 出现莫霍面 Ps 转换震相;
(b) S 波速度分布, 莫霍面出现在 30~32 km 深度。

Fig. 7 Observed and synthetic receiver function for station PYN

(a) P-to-S converted phase from the Moho discontinuity arrives at 3.80 second after the onset. (b) Inversion result for PYN reveals the crust - mantle transition occurs at 30~32 km depth beneath the station.

叠加,速度结构显示在 32~34 km 深度出现了相对尖锐的壳幔转换界面(图 8)。

BUA 和 JIN 台站均位于 Okchon 褶皱带, Okchon 褶皱带主要由变质沉积岩或变质火山岩组成^[17],分隔了南部的 Yeongnam 地块和北部的 Gyeonggi 地块(图 1)。通过对 5 个事件的接收函数进行叠加,

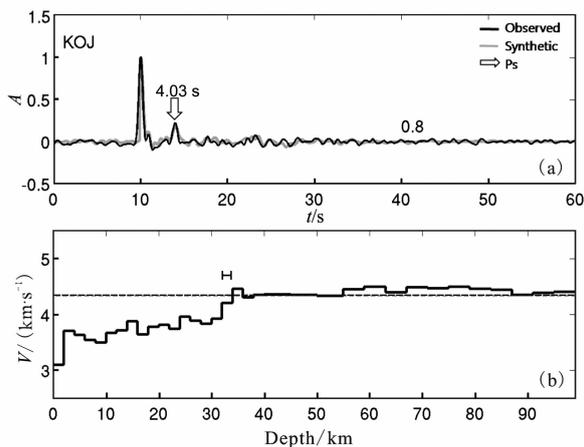


图 8 KOJ 台的接收函数和 S 波速度结构

- (a) 接收函数, P 波初至后 4.03 s 出现莫霍面 Ps 转换震相;
(b) S 波速度分布, 莫霍面出现在 32~34 km 深度。

Fig. 8 Observed and synthetic receiver function for station KOJ

- (a) P-to-S converted phase from the Moho discontinuity arrives at 4.03 second after the onset; (b) Inversion result for KOJ reveals the crust-mantle transition occurs at 32~34 km depth beneath the station.

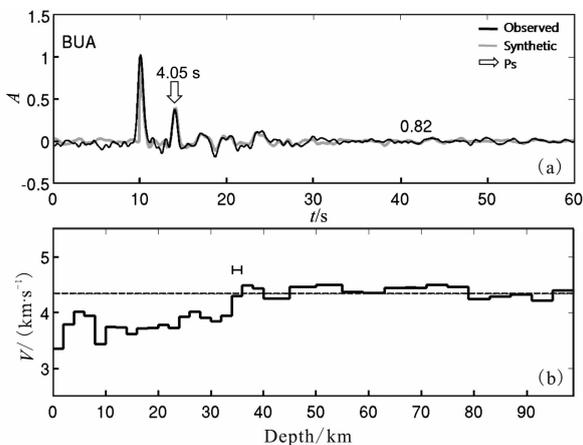


图 9 BUA 的接收函数和 S 波速度结构

- (a) 接收函数, P 波初至后 4.05 s 出现莫霍面 Ps 转换震相;
(b) S 波速度分布, 莫霍面出现在 34~36 km 深度。

Fig. 9 Observed and synthetic receiver function for station BUA

- (a) P-to-S converted phase from the Moho discontinuity arrives at 4.05 second after the onset; (b) Inversion result for BUA reveals the crust-mantle transition occurs at 34~36 km depth beneath the station

得到了 BUA 台站下方叠加后的接收函数(图 9)。在台站下方 34~36 km 深度观察到了尖锐的壳幔边界, 并推断地壳浅表层 2~8 km 深度有相对较厚的高速层。JIN 台下方 5 个事件的接收函数的叠加结果表明, 莫霍面位于 34~36 km 深度(图 10), 但是没有观察到高速层的存在。

WAN 和 JNN 台站均位于华北板块和华南板

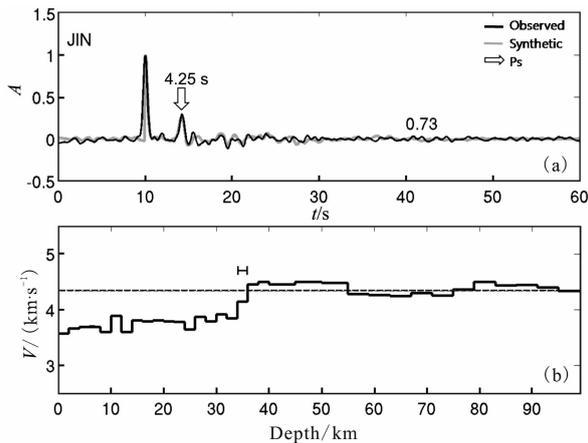


图 10 JIN 台的接收函数和 S 波速度结构

- (a) 接收函数, P 波初至后 4.25 s 出现莫霍面 Ps 转换震相;
(b) S 波速度分布, 莫霍面出现在 34~36 km 深度。

Fig. 10 Observed and synthetic receiver function for station JIN

- (a) P-to-S converted phase from the Moho discontinuity arrives at 4.25 second after the onset; (b) Inversion result for JIN reveals the crust-mantle transition occurs at 34~36 km depth beneath the station.

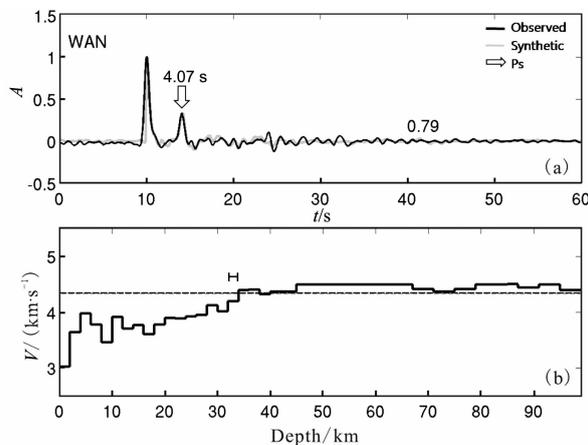


图 11 WAN 台的接收函数和 S 波速度结构

- (a) 接收函数, P 波初至后 4.07 s 出现莫霍面 Ps 转换震相;
(b) S 波速度分布, 莫霍面出现在 32~34 km 深度。

Fig. 11 Observed and synthetic receiver function for station WAN

- (a) P-to-S converted phase from the Moho discontinuity arrives at 4.07 second after the onset; (b) Inversion result for WAN reveals the crust-mantle transition occurs at 32~34 km depth beneath the station

块碰撞带——苏鲁造山带上, 分布有超高压变质岩。对 WAN 台 9 个事件的接收函数进行了叠加, 在上地壳观察到了较高的 S 波速度。莫霍面深度分布在 32~34 km 深度(图 11)。对 JNN 台 3 个事件的接收函数进行了叠加, 莫霍面位于 34~38 km 深度, 是所有台站中最深的(图 12), 同时在 50~58 km 深度

观察到了 S 波低速异常。

GYN 台位于华南板块和苏鲁造山带的边界附近,对 15 个事件的接收函数进行了叠加,从反演得到的速度结构看,莫霍面位于 30~32 km 深度(图 13)。

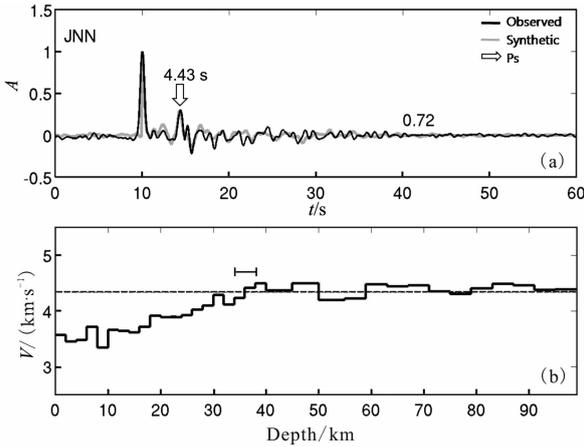


图 12 JNN 台的接收函数和 S 波速度结构

- (a) 接收函数, P 波初至后 4.43 s 出现莫霍面 Ps 转换震相;
(b) S 波速度分布, 莫霍面出现在 34~38 km 深度。

Fig. 12 Observed and synthetic receiver function for station JNN
(a) P-to-S converted phase from the Moho discontinuity arrives at 4.43 second after the onset; (b) Inversion result for JNN reveals the crust-mantle transition occurs at 34~38 km depth beneath the station.

4 讨论和结论

黄海周边地区地壳厚度存在横向变化,莫霍面 Ps 转换震相的到时延迟表明地壳厚度自北向南逐渐增加(图 14 a)。例如,位于韩国最北部 ANS 和

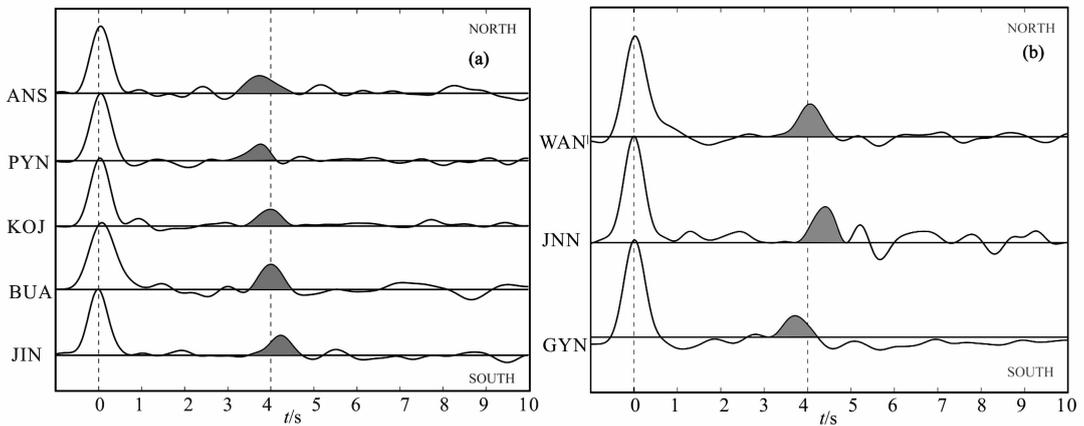


图 14 不同台站莫霍面 Ps 转换震相的到时变化

- (a) 韩方一侧; (b) 中方一侧。

Fig. 14 Variation of Ps (P-to-S converted phase at Moho) arrival times on radial component receiver function at different stations (a) in Korea and (b) in China. These Ps phases provide strong constraints on the depths and velocity contrasts of the crust-mantle discontinuity

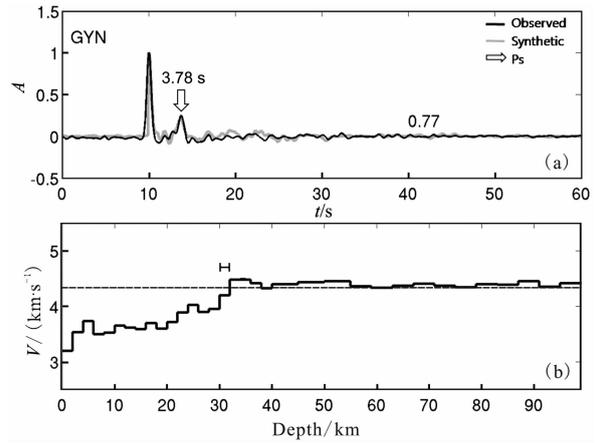


图 13 GYN 台的接收函数和反演的 S 波速度结构
(a) 接收函数, P 波初至后 3.78 s 出现莫霍面 Ps 转换震相;
(b) S 波速度分布, 莫霍面出现在 32~34 km 深度。

Fig. 13 Observed and synthetic receiver function for station GYN
(a) P-to-S converted phase from the Moho discontinuity arrives at 3.78 second after the onset; (b) Inversion result for GYN reveals the crust-mantle transition occurs at 30~32 km depth beneath the station.

PYN 台的 Ps 转换波震相延迟为 3.73 s,最南端 JIN 台站转换震相的到时为 4.25 s,比北部延迟了 0.52 s,估计 JIN 台下方的莫霍面要比 ANS 台深 3.5~4 km。反演后的速度结构也表明地壳厚度自北向南逐渐增加:根据 ANS 和 PYN 台估算的 Gyeonggi 地块的莫霍面深度为 30~32 km, KOJ 台下方的莫霍面深度为 32 km;向南至 Okchon 褶皱带, BUA 和 JIN 台下方的莫霍面约为 32~34 km。最深的莫霍面出现在中方一侧 JNN 台站附近,地壳厚度自北向

南逐渐减薄(图 14b),表明苏鲁造山带在华北板块和华南板块的碰撞作用下发生地壳增厚.

中方 SHY 和 YCH 台径向分量的接收函数分别在 1.62 s 和 1.15 s 出现 P 波初至延迟(图 15). 这些台站位于巨厚的沉积盆地,上地壳 S 波低速层(对应于高的泊松比)可能是造成 P 波初至延迟的原因. 在 JJU 台观测到了 0.45 s 的 P 波延迟(图 15),估计是多孔的火山岩不利于 S 波的传播是造成 JJU 台 P 波延迟的原因.

尽管黄海周边流动地震观测的时间有限,通过接收函数反演的 S 波速度结构仍然揭示出莫霍面的

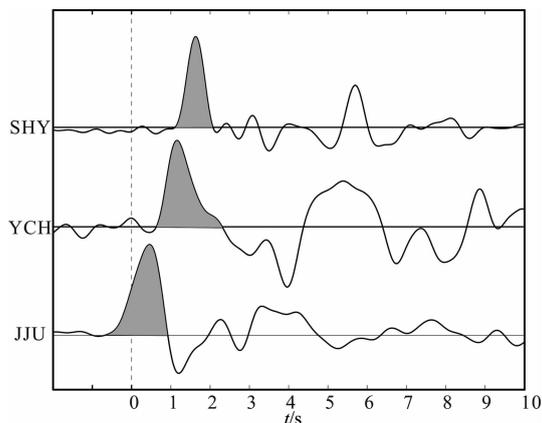


图 15 三个台站的 P 波初至延迟时间(由于地壳浅表层较高的高泊松比,P 波初至在 SHY 台延迟了约 1.62 s)

Fig. 15 Phase lags of P onset on the radial component receiver functions. Phase lags as large as 1.62 seconds (SHY) are observed due to high Poisson's ratios of the thin upper layer

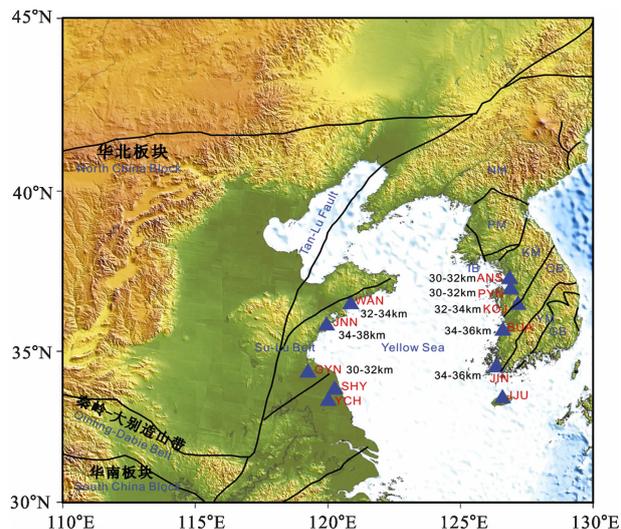


图 16 黄海周边流动台站下方的莫霍面深度分布
Fig. 16 Estimated depths of the crust-mantle transition layers (the Moho) beneath the stations of the Yellow Sea Broadband Seismic Network

横向变化(图 16). 总体上黄海东西两侧的莫霍面深度在 30~38 km 深度之间,JNN 台下方较厚的地壳与苏鲁造山带的超高压变质作用有关,反映出华北板块和华南板块的碰撞边界特征. 虽然有些观点认为朝鲜半岛 Imjingang 断裂带是该碰撞带的向东延伸,也有观点认为苏鲁-大别缝合带在朝鲜半岛一侧的黄海内部转折向南延伸,由于这些地域已经超出了黄海周边流动地震观测的范围,从本文的研究结果还难以做出判断,尚需要开展更为广泛的地震学研究提供相应的证据.

致谢 感谢刘启元研究员提供了接收函数的处理程序.

参考文献(References)

- [1] Yin A, Nie S. An Indentation Model for the North and South China Collision Tan-Lu and Honam Fault Systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 1993, **12**(4): 801~813
- [2] Ree J H, Cho M, Kwon S T, et al. Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 1996, **24**(12): 1071~1074
- [3] Chang E Z. Collisional orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1996, **13**(3-5): 267~277
- [4] Ishiwatari A, Tsujimori T. Paleozoic ophiolites and blueschists in Japan and Russian Primorye in the tectonic framework of East Asia: A synthesis. *The Island Arc*, 2003, **12**: 190~206
- [5] 郝天珧,徐亚,胥颀等. 对黄海—东海研究区深部结构的一些新认识. *地球物理学报*, 2006, **49**(2): 405~416
Hao T, Xu Y, Xu Y, et al. Some new understandings on the deep structure in Yellow Sea and east China Sea. *Chinese J. Geophys.*, 2006, **49**(2): 405~416
- [6] 胥颀,李志伟, Kim K H, 等. 黄海的地壳速度结构与中朝—扬子块体拼合边界. *地球物理学报*, 2009, **52**(3): 646~652
Xu Y, Li Z, Kim K H, et al. Crustal velocity structure and collision boundary between the Sino-Korea and Yangtze blocks in the Yellow Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(3): 646~652
- [7] Langston C A. Structure under mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *Journal of Geophysical Research*, 1979, **83**(B9): 4749~4762
- [8] Cassidy J F. Numerical experiments in broadband receiver function analysis. *Bulletin Seismological Society of America*, 1992, **82**(3): 1453~1474
- [9] Randall G E. Efficient calculation of differential seismograms for lithospheric receiver functions. *Geophysical Journal International*, 1989, **99**: 469~481
- [10] 刘启元, Kind R, 李顺成. 中国数字地震台网的接收函数及其

- 非线性反演. 地球物理学报, 1998, **40**(3): 373~385
- Liu Q Y, Kind R, Li S C, Receiver function at the stations of the Chinese digital seismic network (CDSN) and their nonlinear inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, **40**(3): 373~385
- [11] Owens T J, Taylor S R, Zandt. Crustal structure at Regional Seismic Test Network stations determined from inversion of broadband teleseismic P waveforms. *Bulletin-Seismological Society of America*, 1987, **77**(2): 631~662
- [12] Ammon C J. The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms. *Bulletin-Seismological Society of America*, 1991, **81**: 2504~2510
- [13] 刘启元, Kind R, 李顺成. 接收函数复谱比的最大或然性估计及非线性反演. 地球物理学报, 1996, **39**: 531~543
- Liu Q Y, Kind R, Li S C. Maximal likelihood estimation and nonlinear inversion of the complex receiver function spectrum ratio. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**: 531~543
- [14] Kim K H, Chiu J M, Kao H, et al. A Preliminary Study of Crustal Structure in Taiwan Region Using Receiver Function Analysis. *Geophysical Journal International*, 2004, **159**: 146~164
- [15] Kennett B L N, Engdahl E R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 1991, **105**: 429~465
- [16] Park J H. Crustal Velocity Structure of the Southern Korean Peninsula Using 3-D Seismic Tomography, in School of Earth and Environmental Sciences. 2006, Seoul: Seoul National University, 154
- [17] Chough S K, Kwon S T, Ree J H, et al. Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, 2000, **52**: 175~235
- [18] Sheehan A F, Abers G A, Jones C H, et al. Crustal thickness variations across the Colorado Rocky Mountains from teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(B10): 20391~20404
- [19] Zelt B C, Ellis R M. Receiver-function studies in the Trans-Hudson Orogen, Saskatchewan. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1999, **36**: 585~603

(本文编辑 汪海英)