

基于三重震相波形模拟的东北亚地区上地幔 S 波速度结构研究

赵一帆, 王毅

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026)

摘要: 对上地幔波速结构的研究有助于认识上地幔物质组成和温度分布, 同时还可以为地球动力学的研究提供约束条件。笔者根据中国数字地震台网记录到的位于东亚地区的两个地震波路径近似相互垂直的地震事件, 通过三重震相波形模拟的方法, 对探测区域下方的上地幔速度结构进行了研究。结果表明, 两个不同方向的地震事件得到的波速模型均在 250 km 以上存在低速带, 波速降幅两者有差异; 过渡带下半部分均存在高速带, 表明该区域过渡带受到东亚俯冲板块的影响。该区域过渡带厚度无明显变化是两个不连续面附近温度和成分分布不同造成的, 和该区域过渡带受俯冲带影响的结论不矛盾。

关键词: 上地幔; 地震波速结构; 三重震相波形模拟; 东北亚地区

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.02

0 引言

上地幔波速结构对于研究上地幔温度结构、矿物组成、水含量具有重要意义^[1-4]。三重震相波形模拟的方法在上地幔波速结构的研究中一直有着广泛的应用^[5-13]。与其他上地幔速度结构研究方法: 如体波和面波层析成像^[14-16]、接收函数法^[17-18], 及前驱波模拟^[19-20]等方法相比, 三重震相波形模拟得到的上地幔速度结构不仅包含波速间断面的详细信息, 而且在整个深度方向上都有很好的分辨率, 可以很好地约束间断面之间波速随深度变化的趋势。该方法在深度分辨率上的优势, 对于进一步分析地幔中的物质组成和温度分布具有重要作用, 也可以为研究这一区域的动力学机制提供帮助。

东北亚地区位于欧亚板块和太平洋板块的交汇处。在太平洋板块的俯冲作用影响下, 该地区的地质构造复杂, 为我们提供了研究俯冲板块影响下的上地幔结构的场所。人们对于太平洋俯冲带的演化

过程也提出了很多模型, 例如地幔柱模型^[21], 地幔楔模型^[22-24], 水平俯冲带模型^[25-26]等。近年来, 地震学研究给我们提供了大量关于东亚地区上地幔和过渡带波速结构的信息, 例如, 中国华北地区地幔过渡带底部存在古老的停滞俯冲板片^[27-29], 该区域部分存在的 660 km 不连续面下沉^[3, 30-31], 部分区域存在的过渡带厚度减小^[32-34], 局部区域内发现的 410 km 不连续面之上的低速薄层^[35]。但是总的来说, 我们对于这一区域详细结构的了解仍不透彻, 已有的动力学模型和机制仍存在争议, 对这一地区地幔波速结构的进一步探测可以为地球动力学的研究提供重要的帮助。

笔者利用中国数字地震台网 (China Digital Seismograph Network, CDSN)^[36] 记录到的两次地震事件的 S 波宽频带波形资料, 采用三重震相波形模拟的方法对东北亚地区上地幔速度结构进行研究。这两个地震事件的射线方向相互垂直 (图 1), 由它们得到的速度结构模型, 对于分析探测区域下方的方位角各向异性, 也可提供一定的帮助。

收稿日期: 2022-09-11

第一作者: 赵一帆 (1994-), 男, 硕士, 研究生, 主要从事地幔波速结构研究, E-mail: fcz1f@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 王毅 (1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事地震学、地球内部物理及行星科学研究, E-mail: yiwang25@ustc.edu.cn。

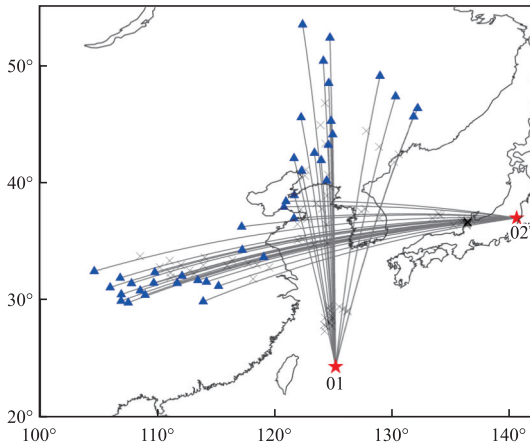


图 1 研究区域及地震事件和台站分布图

Fig. 1 Locations of the earthquakes (red stars) and seismic stations (blue triangles) used in this study

1 数据和方法

地震波在传播过程中遇到波速不连续面时,因为不连续面附近存在着波速的突然变化,地震波会因此出现反射和折射,这使得在同一个事件的台站记录中,有可能分别观察到直达波、反射波和折射波形成的震相,这也就是所谓的三重震相。在上地幔中,存在 410 km 和 660 km 两个波速不连续面^[37],

它们都会在观测波形中形成三重震相(图 2)。不同的震相在地壳及上地幔顶部经过的路径十分接近,因此它们之间的相对走时仅受地幔波速结构控制,由三重震相得到的波速模型可以避免地壳波速以及震源位置和深度对波速结果的影响。文中,将从 410 km 间断面上方穿过的直达波记为 AB 震相;410 km 不连续面上的反射波为 BC 震相;在 410 km 间断面和 660 km 间断面间穿过的地震波为 CD 震相;660 km 不连续面上的反射波为 DE 震相;从 660 km 间断面下方穿过的地震波为 EF 震相。不同的震相对应的地震波路径经过的深度不同,不同震中距处所接收到的同一震相经过的深度也不同,因此由三重震相模拟得到的波速结构在深度方向上有较高的分辨率(图 2)。

因为三重震相的波形较为复杂,各个震相的到时接近,有时会叠加在一起,这使得直接拾取震相到时较为困难。因此我们一般采用波形模拟方法对三重震相进行研究。将由一维速度模型计算得到的理论三重震相波形图和台站接收到的观测波形图进行对比,根据它们之间的差异修改波速模型,并再次进行理论波形图计算和比较,重复该过程直至理论三重震相波形图和观测波形图吻合,得到符合观测三重震相波形的波速模型。

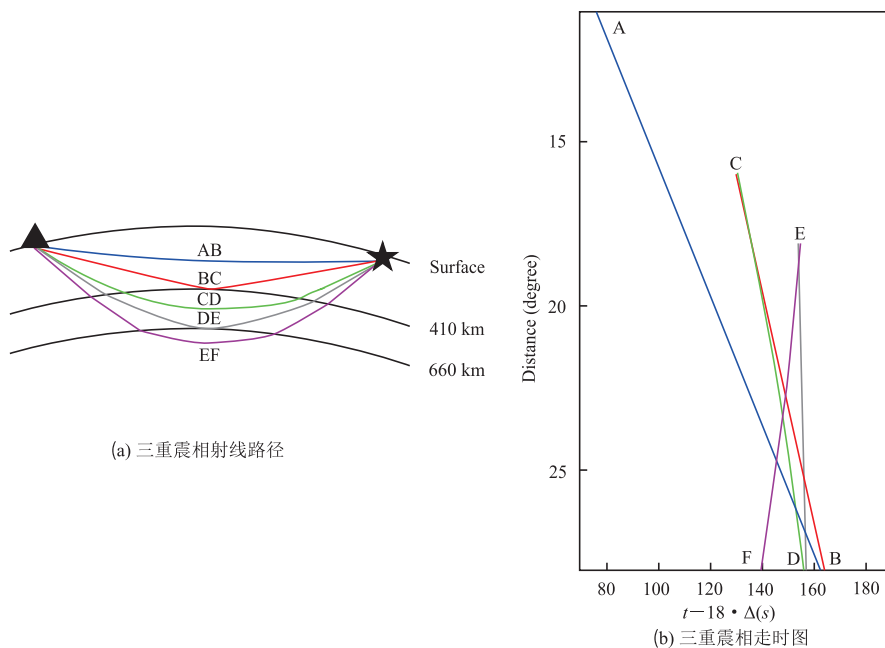


图 2 三重震相的射线路径

Fig. 2 The ray paths

利用三重震相研究上地幔速度结构要求选取的地震事件的震级在 5 级~7 级之间,以使得台站接收到的震相足够清晰而震源时间函数不至于复杂。我们需要一系列震中距在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内的台站,以便得到完整的三重震相;同时为了减小横向速度不均匀性的影响,各台站的方位角变化尽可能的小。综合考虑以上因素,本研究选取了中国数字地震台网记录的两个分别发生在日本琉球群岛和本州

岛的 SH 波数据(图 1,表 1)。这两个地震数据观测区域基本相同,而地震射线方向接近互相垂直,对它们的分析不仅可以研究探测区域上地幔及过渡带 S 波速度结构,还可以研究该区域 S 波方位角各向异性。文中将发生于琉球群岛西南,由南向北穿过研究区域的地震事件记为事件 01;将发生于本州岛东部,由东向西穿过研究区域的地震事件记为事件 02。

表 1 本次研究用地震事件列表

Tab. 1 List of events used in this study

事件	日期	时间/GMT	经度/ $^{\circ}$ N	纬度/ $^{\circ}$ E	震源深度/km	震级/Mw
01	2010/10/4	13:28:41.2	125.26	24.09	32.2	6.3
02	2011/4/11	8:16:19.5	140.54	37	12	6.7

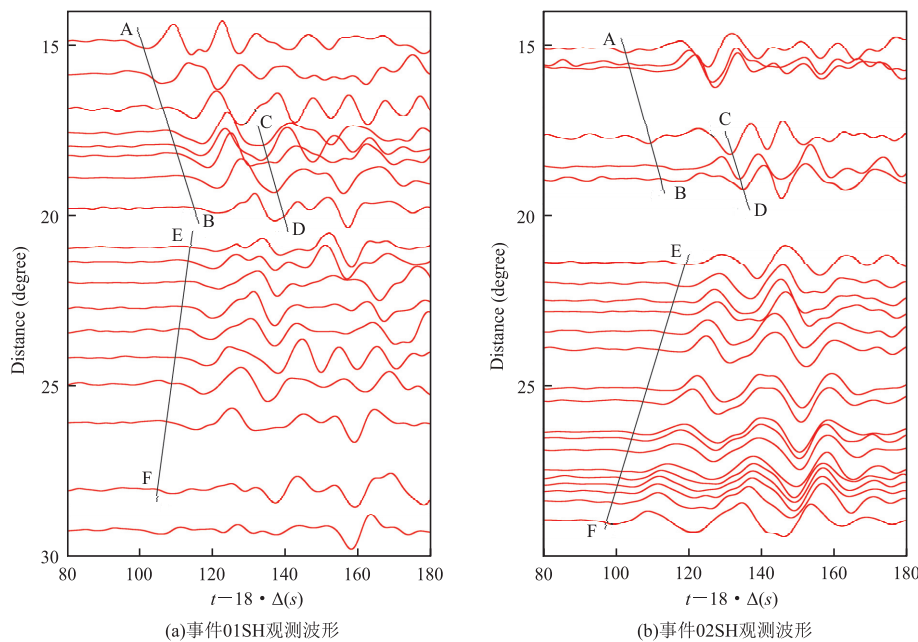


图 3 事件 01(a)和事件 02(b)的 SH 观测波形图

Fig. 3 Observed SH seismograms of event 01 (a) and event 02 (b)

两个地震事件的数据在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的震中距范围内均可以辨认出清晰的 AB、CD 及 EF 震相,而反射波震相微弱难以辨识(图 3)。从观测波形上可以看出两个事件的 CD 与 EF 之间走时差有明显差异,反映出这两个事件在过渡带存在明显波速差异(图 3)。

笔者采用 F-K 方法^[38]计算并合成理论地震图,计算时采用的震源机制来源于 CMT 目录^[39];为减小噪音干扰以便于观察比对,理论地震波形和实际台站记录在绘制成图前均经过了 $0.04\text{ Hz}\sim 0.2\text{ Hz}$ 的带通滤波。

2 模拟结果

根据我们的模拟结果,PREM 模型^[40]无法解释事件 01 的 SH 波数据(图 4(a))。由 PREM 模型^[40](图 4(b))计算得到的模拟地震图和观测波形之间有明显差异:AB、CD 和 EF 震相相对观测波形整体走时推迟,且走时线斜率上也有明显不同。综合考虑波速的相对变化,间断面的深度和跳变幅度等因素,我们在经过一系列正演试错之后,得到了可以较好地拟合事件 01 观测数据的上地幔 SH 波速

结构(图 4(b)),由这一波速模型计算得到的模拟地震图在三重震相的各分支震相的到时和斜率以及的地震波波形的主要特征上均可拟合实际数据(图 4(c))。而比较这一最佳 SH 波速模型与 PREM 模型(图 4(b))可以看到,该模型有着如下特点:它存在着深度在 200 km~300 km 段的低速异常,波速降幅约 4%;深度在 550 km 到 650 km 段的高速异常,波速增幅约 6%;两个不连续面均有明显下沉,但过渡带厚度和 PREM 相同。

三重震相的波形模拟得到的最佳波速模型往往具有不唯一性,我们需要对其中的特殊结构进行约束性测试,从而判断它们是否能准确反映地幔中的实际情况。我们构建了一系列测试模型,来检验最佳波速模型中的结构特征是否得到了很好的约束(图 5)。测试结果表明,最佳模型中除了不连续面绝对深度和绝对波速之外,其余的特征均得到了很好的约束。首先是对于最佳模型位于 200 km~300 km 深度段的低速异常的测试,我们构建了除了不设置这一低速异常外其余部分和最佳模型一致的测试模型 test01(图 5(a))。比较由这一测试模型得出的理论波形图与观测波形(图 5(b)),可以看到,在震中距 17°~19°之间,理论波形图的 AB 震相到明显提前,并且它振幅也和观测表现出了一定的差异。这说明最佳模型中的这一低速异常得到了较好的约束。其次,我们构建了除了不设置 550 km~650 km 这一高速异常外其他部分和最佳模型一致

的测试模型 test02(图 5(a))。可以看到,理论波形图与观测波形相比(图 5(c)),在震中距 21°~26°之间,理论波形图的 EF 震相在到时上出现了落后,并且波形上也表现出了一定的差异。这说明最佳模型中的这一高速异常得到了较好的约束。事件 01 的最佳 SH 波速模型中的速度不连续面深度和 PREM 模型也有着明显的差异,但过渡带厚度和 PREM 是相同的,我们将最佳模型中的过渡带整体上移 20 km 作为测试模型 test03,同时将用于计算模拟地震图的震源深度也提升了 20 km(图 5(d))。由测试模型 test03 得到的理论三重震相波形仍然可以拟合观测波形(图 5(e))。这说明,最佳模型中的不连续面绝对深度并没有得到很好的约束,这是因为由三重震相波形模拟得到的不连续面深度是和震源深度之间的相对深度,考虑到我们并没有对震源深度进行重定位,最佳模型中不连续面绝对深度存在一定的不确定性。但是,过渡带的厚度与震源深度无关,是得到了约束的。关于绝对波速的约束,我们构建了将最佳模型均匀减速,使其绝对波速和 PREM 模型接近的 test04 模型(图 5(f)),由这一模型得到的理论波形在绝对到时上确实与观测波形有一定差异;但如果仅比较相对到时,可以发现,它在各个震相上都能较好地拟合观测波形,(图 5(g))。这说明最佳模型中的波速随深度的变化是得到了较好约束的,而绝对波速受到震源位置、深度等因素影响,不能被很好的约束。

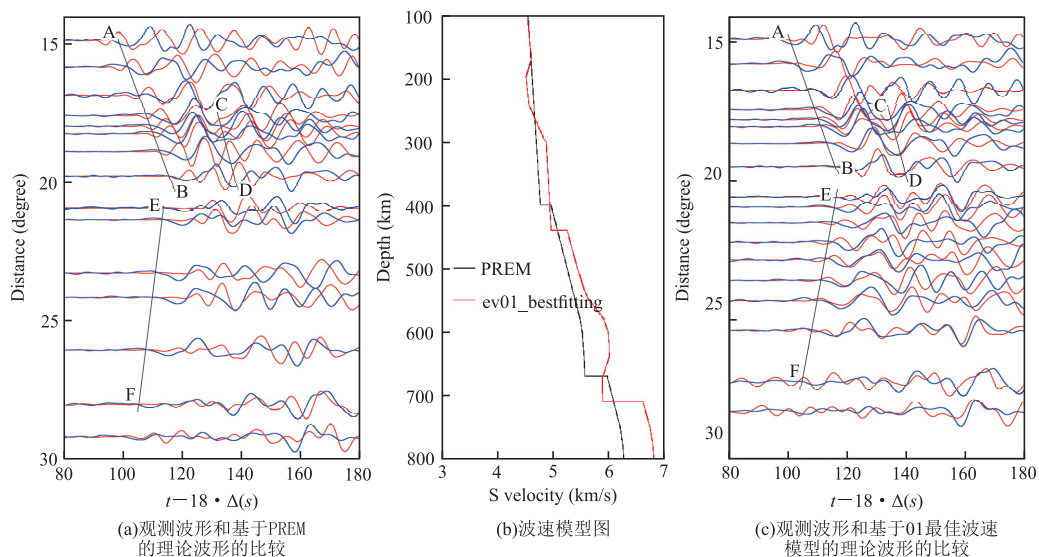


图 4 事件 01 的 SH 观测波形(蓝色)和基于(a)PREM 模型和(c)事件 01 最佳模型的理论波形图(红色)之间的比较

Fig. 4 Comparisons between observed SH seismograms (blue) of event 01 and synthetic seismograms (red) based on (a) PREM velocity model and (c) the best-fitting model for event 01

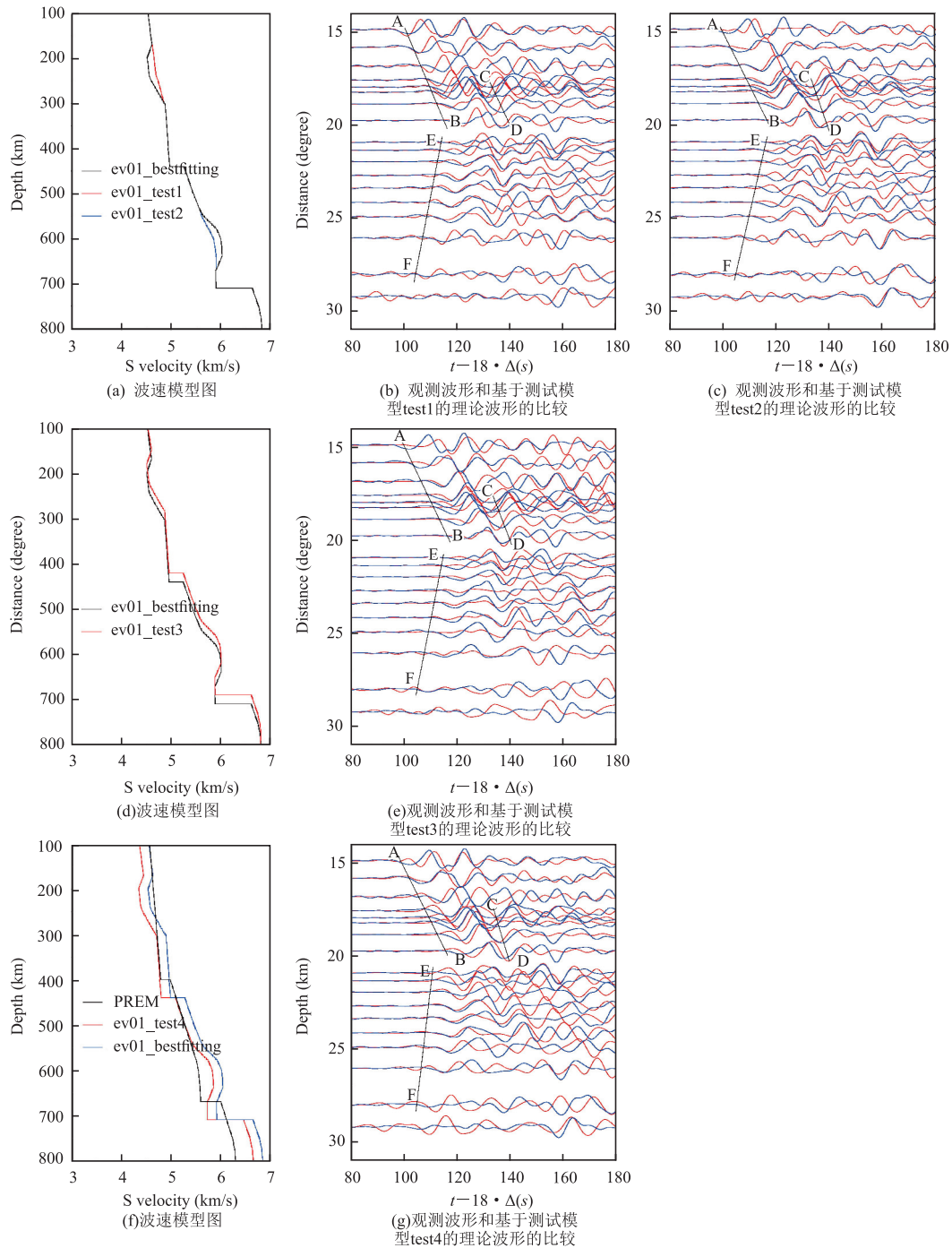


图 5 事件 01 的观测 SH 波形(蓝色)和基于事件 01 不同的测试波速模型的理论波形(红色)之间的比较
 Fig. 5 Comparisons between observed SH seismograms (blue) of event 01 and synthetic seismograms (red) based on different testing models

对于事件 02,我们同样发现,PREM 模型不能描述这一区域上地幔波速结构(图 6(a)),由 PREM 模型得到的理论波形图在 AB、CD 和 EF 震相上均和观测波形有明显差异。经过多次正演试错,我们得到了可以很好地拟合事件 02 数据记录的最佳 SH 波速模型(图 6(b)),由这一模型计算

得到的理论波形图中 AB、CD 和 EF 震相的到时、走时线斜率和波形均可拟合观测波形(图 6(c))。和 PREM 模型相比,这一最佳模型在 200 km 深度以上存在低速异常,波速降幅约 6%;在 300 km~400 km 深度段存在高速异常;在过渡带底部存在一个 60 km 厚的高速异常,波速增幅约 1%;该模

型的不连续面深度和过渡带厚度同 PREM 模型基本一致。考虑到由波形模拟得到的速度结构的不唯一性,最佳模型中的异常速度结构也进行了约

束性测试。测试结果表明,最佳模型中除了不连续面绝对深度和绝对波速之外,其余的特征均得到了很好的约束。

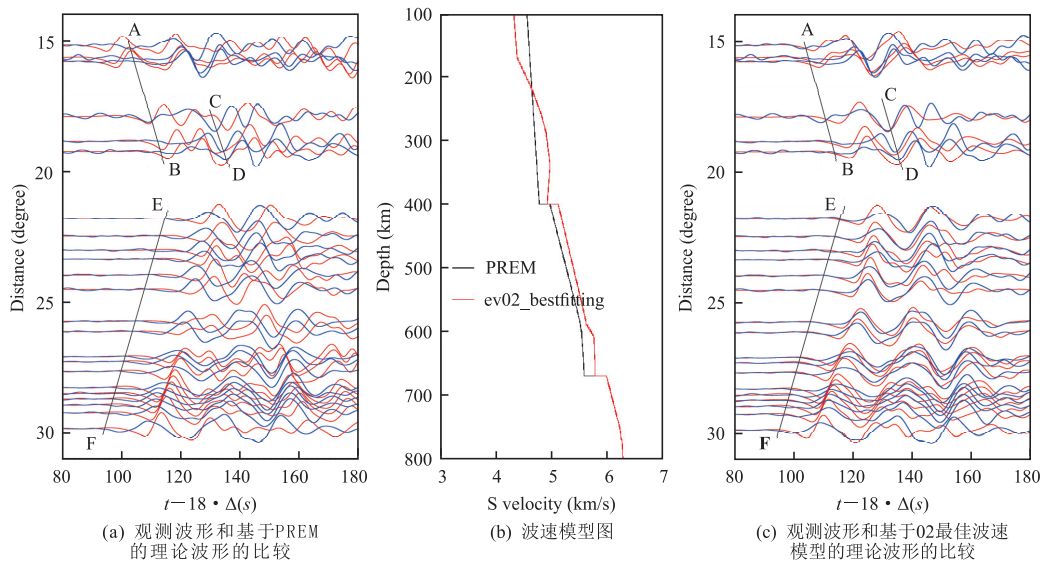


图 6 事件 02 的 SH 观测波形 (蓝色) 和基于 (a) PREM 模型和 (c) 事件 02 最佳模型的理论波形图 (红色) 之间的比较

Fig. 6 Comparisons between observed SH seismograms (blue) of event 02 and synthetic seismograms (red) based on (a) PREM velocity model and (c) the best-fitting model for event 02

对比由两个不同方向的地震事件得到的波速模型可以看到,它们在整体速度结构上表现出了一定的相似性,但在细节上存在差异,这一方面反映出研究区域下方可能存在方位角各向异性,另一方面是由于两个事件所探测的区域不完全重合造成的。两个方向的波速模型都在上地幔 250 km 以上存在低速带,但东西向模型(事件 02)速度降幅更大;同时东西向波速模型中在 300 km~400 km 存在的高速带在南北向模型(事件 01)中没有发现,这说明该区域上地幔可能存在方位角各向异性,250 km 以上快波方向更接近南北向,250 km 以下快波方向更接近东西向。两个方向的波速模型中过渡带下半部分都存在高速异常带,并且南北向模型中的该高速异常影响的深度范围和波速增幅都更大,考虑到研究区域位于太平洋板块俯冲带附近,我们认为这一高速异常是受俯冲板块的影响形成的。俯冲板片的低温不仅会造成高速异常,也会造成过渡带增厚^[1],但从两个方向构建的速度结构模型都显示该区域的过渡带厚度和 PREM 没有明显差异。原因在于从南北向模型来看,过渡带下半部分波速增加明显,说明研究区域在该深度受俯冲带影响大。模型中也出现了受俯冲带低温影响造成的 660 km 不连续面的明显

下沉,虽然因为震源深度的不确定性,具体下沉深度可能存在一定的不确定性。但该研究区域中 410 km 不连续面也有明显下沉,这和俯冲带低温影响不符。从波速看,该区域 410 km 附近受俯冲带影响较小,且有前人工作显示俯冲带附近 410 km 之上有富含水的低速薄层存在^[35],这一低速薄层可能造成我们的南北向模型中 410 km 不连续面的下沉。由此可见,南北向模型中过渡带中的高速带和正常的过渡带厚度之间并不矛盾。由于两个不连续面附近的温度和成分可能存在差异,用过渡带厚度直接推测地幔温度需要慎重。而东西向模型中过渡带下半部分波速增幅较小,说明受俯冲带影响较弱,因此不连续面深度和过渡带厚度均无明显变化。

3 讨论

由三重震相法分析东亚地区的上地幔速度结构时,横向不均匀性是需要考虑的。三重震相得到的一维速度结构模型实际上来源于对地震射线探测到的区域内的二维速度结构的叠加,当研究区域的上地幔速度结构在横向上出现较大变化时,这一方法对速度结构的约束性会下降。欧亚板块和太平洋板

块交界处,地质结构复杂,横向不均匀性较大。但在本次研究的局部区域内,近些年来研究者基于 P 波走时数据得到的东亚地区上地幔三维速度结构的层析成像结果^[28],以及对东亚地区的上地幔结构有着较好的分辨率的 FWEA18 模型^[41]中,上地幔 S 波波速结构没有表现出明显横向不均匀性。同时考虑到我们将地震台站分布控制在一个较小的方位角范围内,一维波速模型可以描述研究区域内的波速结构。

本次研究中观测到的上地幔浅部低速异常和过渡带下部高速异常,我们也与前人在这一区域得到的研究成果进行了比较。近年来其他研究者对中国东部地区进行的层析成像工作中也发现了在华东地区及其边缘的海域的上地幔浅部(100 km ~ 250 km)区域存在明显的低速异常^[28, 42]。这一低速异常可能与地幔中的高温热流有关,研究区域附近广泛分布的断裂带和近新生代火山系统也可以看作高温热流存在的佐证。而在事件 01 所模拟出的速度结构中存在着过渡带下部的高速异常,在前人的研究中也发现了类似的发现^[43-44],这一异常一般被认为是由太平洋俯冲板块在欧亚板块下方的延伸导致的,并与在较大尺度的层析成像和接收函数研究中发现的 660 km 间断面的下沉表现出一致性^[23, 30, 45-46]。在本次研究区域的邻近区域的上地幔中,前人的研究中还发现了一些其他的特殊速度结构,比如 410 km 间断面的上覆低速层^[47-49],这一低速异常的形成也被认为和俯冲带相关,但具体的形成机理还并不明确。在本文的研究中并未发现类似的低速层,这可能是由于东亚区域上地幔波速结构受太平洋板块俯冲等构造活动的影响在较大尺度上具有横向不均匀性,很多特殊结构的存在范围有限。

4 结论

笔者用波形模拟方法,基于中国数字地震台网记录到的两个不同传播方向的地震事件的 SH 三重震相数据研究了东北亚地区上地幔及过渡带 S 波波速结构。结果显示,该区域在 250 km 之上存在低速异常;过渡带下半部分存在高速异常,表明该区域过渡带受到东亚俯冲带影响;两个模型的高速异常波速增幅和影响范围有差异,显示南北向观测区域更加接近东亚俯冲带。过渡带厚度没有明显异常是因为两个不连续面附近温度和成分分布不同造成

的,和该区域受俯冲带影响的结论并不矛盾。

参考文献:

- [1] SHEARER P M. Global mapping of upper mantle reflectors from long-period SS precursors[J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 115(3): 878-904.
- [2] KARATO S I. Remote sensing of hydrogen in earth's mantle[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 62(1): 343-375.
- [3] WANG Y, WEN L X, WEIDNER D, et al. SH velocity and compositional models near the 660-km discontinuity beneath South America and northeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, DOI: 10.1029/2005JB003849.
- [4] WANG Z F, WANG Y. Global water distribution in the mantle transition zone from a seismic isotropic velocity model and mineral physics modeling[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 984063.
- [5] GRAND S P, HELMBERGER D V. Upper mantle shear structure of North America[J]. *Geophysical Journal International*, 1984, 76(2): 399-438.
- [6] GRAND S P, HELMBERGER D V. Upper mantle shear structure beneath the northwest Atlantic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B13): 11465-11475.
- [7] LEFEVRE L V, HELMBERGER D V. Upper mantle P velocity structure of the Canadian Shield[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B12): 17749-17765.
- [8] NEELE F. Sharp 400-km discontinuity from short-period P reflections[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(5): 419-422.
- [9] WANG Y, WEN L X, WEIDNER D. Upper mantle SH- and P-velocity structures and compositional models beneath southern Africa[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(3/4): 596-608.
- [10] WANG Y, WEN L X, WEIDNER D. Array triplication data constraining seismic structure and composition in the mantle[J]. *Surveys in Geophysics*, 2009, 30(4): 355-376.
- [11] CHU R S, SCHMANDT B, HELMBERGER D V. Upper mantle P velocity structure beneath the Midwestern United States derived from triplicated waveforms[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, DOI:10.1029/2011GC003818.
- [12] 张瑞青. 基于三重震相研究青藏高原和西北太平洋俯冲过渡带速度结构[J]. *国际地震动态*, 2011, 41(3): 41-42.
ZHANG R Q. Study on velocity structure of subduction transition zone between Qinghai-Tibet Plateau and Northwest Pacific based on triple seismic phases[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2011, 41(3): 41-42. (In Chinese)

- [13] 张瑞青, 吴庆举, 李永华, 等. 藏西北地幔过渡带地震波速度结构研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(5): 700—712.
ZHANG R Q, WU Q J, LI Y H, et al. Study on seismic wave velocity structure in mantle transition zone in northwest Tibet[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(5): 700—712. (In Chinese)
- [14] HELFFRICH G. Topography of the transition zone seismic discontinuities [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(1): 141—158.
- [15] TAJIMA F, GRAND S P. Variation of transition zone high-velocity anomalies and depression of 660 km discontinuity associated with subduction zones from the southern Kuriles to Izu-Bonin and Ryukyu[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B7): 15015—15036.
- [16] SCHMID C, VAN DER LEE S, GIARDINI D. Correlated shear and bulk moduli to 1400 km beneath the Mediterranean Region[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 159(3/4): 213—224.
- [17] 李学清, 2004. 太平洋俯冲带上地幔间断面的研究, 中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展——庆贺曾融生院士八十寿辰, 陈运泰滕吉文等主编, 地震出版社, 311—320.
LI X Q. 2004. The Upper Mantle Discontinuities near the Pacific Subduction zone, *Advances in Seismology and Physics of Earth's Interior in China-In Honor of Academician Zeng Rongsheng's 80th Birthday*, editor by Chen, Y. T., Teng, J. W., Seismological Press, 311—320. (In Chinese)
- [18] 吴建平, 明跃红, 苏伟, 等. 长白山火山区壳幔 S 波速度结构研究[J]. 地震地质, 2009, 31(4): 584—597.
WU J P, MING Y H, SU W, et al. S-wave velocity structure beneath Changbaishan Tianchi volcano inferred from receiver function[J]. *Seismology and Geology*, 2009, 31(4): 584—597. (In Chinese)
- [19] GU Y J, DZIEWONSKI A M. Global variability of transition zone thickness[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, DOI:10.1029/2001JB000489.
- [20] HOUSER C, MASTERS G, FLANAGAN M, et al. Determination and analysis of long-wavelength transition zone structure using SS precursors[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 174(1): 178—194. 21.
DENG J F, MO X X, ZHAO H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'continental roots - plume tectonics'[J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 65(3/4): 223—275.
- [22] ZHAO D P, LEI J S, TANG R Y. Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: Evidence from seismic tomography[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(13): 1401—1408.
- [23] NIU F L, LEVANDER A, HAM S, et al. Mapping the subducting Pacific slab beneath southwest Japan with Hi-net receiver functions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 239(1/2): 9—17.
- [24] MARUYAMA S, HASEGAWA A, SANTOSH M, et al. The dynamics of big mantle wedge, magma factory, and metamorphic - metasomatic factory in subduction zones[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16(3/4): 414—430.
- [25] LI Z X, LI X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179.
- [26] ZHANG J J, ZHENG Y F, ZHAO Z F. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China[J]. *Lithos*, 2009, 110(1): 305—326.
- [27] FUKAO Y, OBAYASHI M, INOUE H, et al. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B4): 4809—4822.
- [28] LI C, VAN DER HILST R D. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltome tomography[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, Doi: 10.1029/2009JB006882.
- [29] FUKAO Y, OBAYASHI M. Subducted slabs stagnant above, penetrating through, and trapped below the 660 km discontinuity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(11): 5920—5938.
- [30] FLANAGAN M P, SHEARER P M. Global mapping of topography on transition zone velocity discontinuities by stacking SS precursors[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B2): 2673—2692.
- [31] LI X Q, YUAN X H. Receiver functions in Northeast China—implications for slab penetration into the lower mantle in northwest Pacific subduction zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 216(4): 679—691.
- [32] AI Y S, SHEN Z Y. Crust and upper mantle structure beneath Bohai Sea inferred from receiver function study [J]. *Earthquake Science*, 2011, 24(1): 35—43.
- [33] 许卫卫, 郑天愉, 赵亮. 华北地区 410km 间断面和 660km 间断面结构: 克拉通活化的地幔动力学状态探测[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(5): 678—685.
XU W W, ZHENG T Y, ZHAO L. Structure of 410km discontinuity and 660km discontinuity in North China—Detection of mantle dynamic state of craton activation[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(5): 678—685. (In Chinese)
- [34] 王炳瑜, 陈凌, 艾印双, 等. 华北克拉通东北部及邻区地壳和地幔转换带厚度研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 60—68.

- WANG B Y, CHEN L, AI Y S, et al. Crustal structure and mantle transition zone thickness beneath the northeastern area of the North China Craton and adjacent region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(1): 60–68. (In Chinese)
- [35] HAN G J, LI J, GUO G R, et al. Pervasive low-velocity layer atop the 410-km discontinuity beneath the northwest Pacific subduction zone: Implications for rheology and geodynamics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, DOI:10.1016/j.epsl.2020.116642
- [36] 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 等. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1412–1417. ZHENG X F, OUYANG B, ZHANG D N, et al. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 1412–1417. (In Chinese)
- [37] SHEARER P M, FLANAGAN M P. Seismic velocity and density jumps across the 410- and 660-kilometer discontinuities[J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1545–1548.
- [38] ZHU L P, RIVERA L A. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 619–627.
- [39] EKSTRÖM G, NETTLES M, DZIEWOŃSKI A M. The global CMT project 2004 – 2010: Centroid-moment tensors for 13, 017 earthquakes[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 200/201: 1–9.
- [40] DZIEWOŃSKI A M, ANDERSON D L. Preliminary reference Earth model[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1981, 25(4): 297–356.
- [41] TAO K, GRAND S P, NIU F L. Seismic structure of the upper mantle beneath eastern Asia from full waveform seismic tomography [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(8): 2732–2763.
- [42] LI Y H, WU Q J, PAN J T, et al. An upper-mantle S-wave velocity model for East Asia from Rayleigh wave tomography [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 377/378: 367–377.
- [43] WANG B S, NIU F L. A broad 660 km discontinuity beneath Northeast China revealed by dense regional seismic networks in China[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, Doi: 10.1029/2009JB006608.
- [44] 叶玲玲, 李娟. 东北地区 660km 间断面附近波速结构研究[J]. *地震学报*, 2012, 34(2): 137–146. YE L L, LI J. Detecting velocity structure around 660-km discontinuity beneath Northeastern China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2012, 34(2): 137–146. (In Chinese)
- [45] LI J, CHEN Q F, VANACORE E, et al. Topography of the 660-km discontinuity beneath Northeast China: Implications for a retrograde motion of the subducting Pacific slab[J]. *Geophysical Research Letters*, Doi: 10.1029/2007GL031658.
- [46] CHEN L, AI Y S. Discontinuity structure of the mantle transition zone beneath the North China Craton from receiver function migration[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, Doi: 10.1029/2008JB006221.
- [47] VINNIK L, FARRA V. Low S velocity atop the 410-km discontinuity and mantle plumes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3/4): 398–412.
- [48] 睦怡, 周元泽. 利用三重震相探测中国东部海域 410km 深度低速层[J]. *地震学报*, 2015, 37(1): 1–14. SUI Y, ZHOU Y Z. Low-velocity anomaly around 410 km beneath the Yellow and East China Seas with P wave triplications[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2015, 37(1): 1–14. (In Chinese)
- [49] 王秀姣, 韩光洁, 李娟. 西北太平洋俯冲地区 410-km 间断面上覆低速层探测[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(3): 819–831. WANG X J, HAN G J, LI J. Low-velocity layer atop the upper mantle transition zone in Northwest Pacific subduction zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(3): 819–831. (In Chinese)

The upper mantle shear wave velocity structure beneath northeast asia based on waveform modeling of the upper mantle triplications

ZHAO Yifan, WANG Yi

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Understanding upper mantle velocity structures can help us understand the mantle temperature and composition distribution and provide clues for geodynamics study. We study the upper mantle velocity structure beneath northeast Asia, based on S triplication data of two earthquake events in East Asia, recorded by China Digital Seismograph network. The modeling results of these two events show that both models have a low-velocity zone above 250 km, and a high-velocity zone at the lower part of the mantle transition zone, which suggests the influence of the Pacific subduction slab in this area. The thickness of the mantle transition zone of both models is the same as PREM because the influences of the slab near the two discontinuities are different.

Keywords: upper mantle; velocity structure; upper mantle triplication; East Asia