

靳炎锡,秦满忠,李少华.利用前驱波研究地幔间断面的若干进展[J].地震工程学报,2023,45(1):209-219.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220831002

JIN Yanxi, QIN Manzhong, LI Shaohua. Some progress in the study of mantle discontinuities using precursor waves[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(1): 209-219. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220831002

利用前驱波研究地幔间断面的若干进展

靳炎锡¹, 秦满忠^{1,2}, 李少华^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 地幔速度结构提供了地球内部热和化学状态及其构造演化历史的重要信息。对于地幔间断面的研究可以更清楚地了解地球内部温度分布特征和化学结构,并对确定地幔间断面成因及地幔对流模式等地球动力学问题具有重要的意义。地震学观测显示在410 km、660 km深度普遍存在速度间断面,并且在全球特定区域的上地幔(220 km、300~350 km、520 km、560 km)和下地幔(800~900 km、1 100~1 200 km、1 800 km、2 400 km)也有速度间断面的存在,不同区域地幔间断面的起伏可能受到温度、含水量、矿物相变及俯冲板块的影响。利用前驱波来研究地幔间断面具有独特优势,前驱波相比参考震相较早到达观测台站,从而避免其他震相的干扰,可以更准确地研究较弱的速度间断面。文章收集整理近些年来地震学家利用前驱波研究地幔间断面的成果,包括长周期反射震相SS或PP的前驱波、深震震相sP、pP的前驱波和地球表面反射震相PKPPKP(P'P')的前驱波等,并对不同前驱波的特点及地幔间断面的相关研究成果进行总结。利用前驱波研究地幔间断面的方法已较为成熟,及时收集总结相关的研究成果对认识地球内部结构并了解地幔的物质组成、板块俯冲对地幔结构的影响及地幔对流模式等科学问题具有重要的意义。

关键词: 地幔间断面; 前驱波; 反射波; 转换波; 俯冲带

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)01-0209-12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220831002

Some progress in the study of mantle discontinuities using precursor waves

JIN Yanxi¹, QIN Manzhong^{1,2}, LI Shaohua^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The mantle velocity structure provides crucial information regarding the thermal and chemical states and tectonic evolutionary history of the Earth's interior. The study of mantle dis-

收稿日期: 2021-08-31

基金项目: 甘肃省科技重大专项(21ZD4FA011); 国家自然科学基金青年基金(41504050); 地震科技星火计划项目(XH20060); 甘肃省地震科技计划野外站基金(2021Y10)

第一作者简介: 靳炎锡,女,硕士,主要从事地球内部结构研究。E-mail:15751835788@163.com。

通信作者: 秦满忠(1981—),男,甘肃临洮人,硕士,副研究员,主要从事地球内部结构、主动源重复探测技术研究与应用等方面的研究工作。E-mail:qinmzh@163.com。

李少华(1981—),男,河北安平人,硕士,高级工程师,主要从事地震学研究、地震波形反演方面工作。

E-mail:lish@gsdzj.gov.cn。

continuities can provide a clearer understanding of the temperature distribution characteristics and chemical structure of the Earth's interior. Moreover, it is important for determining geodynamic issues, such as the cause of mantle discontinuities and mantle convection models. Seismological observation data show that velocity discontinuities are commonly found at the depths of 410 and 660 km, as well as in the upper mantle (220, 300–350, 520, and 560 km) and lower mantle (800–900, 1 100–1 200, 1 800, and 2 400 km) in specific regions of the world. The topography of mantle discontinuities in different regions may be influenced by temperature, water content, mineral phase transformation, and subducting plates. The use of precursors to study mantle discontinuities has a unique advantage: Precursors arrive at the observation station earlier than the reference phase, thus avoiding the interference of other phases and detecting the weak discontinuity of the mantle more accurately. In this study, we collected and compiled research results on mantle discontinuities obtained by using precursors in recent years. The precursors used included precursors of long-period reflection phases SS or PP, of deep phases sP and pP, and of the Earth surface reflection phase PKPPKP. In addition, we summarized the characteristics of different precursors and related research results of mantle discontinuities. Methods for the use of precursors to study mantle discontinuities have matured. The timely collection and summarization of relevant research results are important for understanding various scientific problems, i.e., the internal structure of the Earth, material composition of the mantle, influence of slab subduction on the mantle structure, and mantle convection mode. Keywords:

Keywords: mantle discontinuity; precursor; reflected wave; converted wave; subduction zone

0 引言

地球内部间断面的研究一直是地震学备受关注的科学问题^[1]。了解在哪些深度存在间断面以及间断面的强弱、起伏形态和化学物理性质,对于建立客观真实的地球模型及地幔对流形式的确定都具有重要的意义^[2]。目前已知全球普遍存在 410-km 和 660-km 速度间断面,对上地幔中这两种速度间断面的起伏形态、速度跃变的研究为地幔物理化学成分、温度和合理的对流模型提供了重要的约束,研究表明间断面与地幔物质中橄榄石的多态相变有关,这些间断面的深度可能随地幔温度的横向变化而变化^[3]。

近年来,全球大量的地震学观测使得地球上地幔的结构变得更为清晰。地震学家发现地球上地幔具有层状结构,上地幔的地震波速梯度陡峭,同时地震波速度和密度存在不连续的变化,即地幔间断面。在地球科学界,普遍认为全球在上地幔 410 km 和 660 km 深度处存在速度间断面,在此深度处发生的变化主要涉及化学相变。矿物物理学解释表明,410-km 间断面认为是 α 相橄榄石向 β 相橄榄石转变的结果,并且由热力学研究得出,410-km 间断面的相变具有正的克拉珀龙斜率(即 dP/dT),约为 $+2.5 \sim +4.0$ MPa/K^[4-6],温度较冷处,如冷的俯冲

板块会使 410-km 间断面抬升,而在温度较高的地区,如洋中脊和地幔柱热点区域会使 410-km 间断面下沉^[7]。而 660-km 间断面表现为 γ 相尖晶石分解成钙钛矿和镁铝榴辉石^[8-9],其间断面的相变具有负的克拉珀龙斜率,约为 $-4.0 \sim -0.5$ MPa/K,冷的俯冲板块会使 660-km 间断面出现下沉^[10],而洋中脊和地幔柱热点区域会使 660-km 间断面抬升。

多位学者发现不同地区的 410-km 间断面有局部抬升和 660-km 间断面的下沉^[11-14]。Tibi 等^[14]研究了汤加俯冲带 410-km 和 660-km 间断面的起伏特征,发现 410-km 间断面的起伏特征较为复杂,不能仅用橄榄石的相变来解释,而 660-km 间断面具有双重下沉的特征,可能与该地区复杂的地震活动有关。Flanagan 等^[15]在全球范围内发现不同地区 660-km 间断面的下沉与该地区的俯冲带有关,而 410-km 间断面没有明显的深度变化。

除了上地幔存在 410-km 和 660-km 间断面以外,一些学者在上地幔 220~250 km、300 km 等深度也发现了速度间断面^[16-17],300-km 间断面表现为柯石英转换为斯石英^[18],也有学者认为此间断面是斜方辉石转换为单斜辉石形成的^[19]。地震学家也成功地在全球范围内发现了上地幔 520 km 深度处的间断面^[20-22],520-km 间断面表现为 β 相尖晶

石转换为 γ 相尖晶石^[15]。更有学者在一些地区下地幔 800~900 km 和 1 100~1 200 km、1 800 km、2 400 km 深度也观测到了间断面的存在^[23-26]。

由于前驱波震相在参考震相之前到达,可以避免其他震相的干扰,通过叠加大量观测波形数据可以有效提取前驱波震相。许多地震学家利用 SS 震相的前驱波^[27-34]、PP 前驱波^[35-40]、sP 和 pP 震相的前驱波^[41-46]、PKPPKP(P'P')震相的前驱波^[47-50]开展了全球地幔间断面的研究工作,并对地幔间断面的起伏形态特征做了详细合理的解释。本文收集整理了近些年来地震学者利用前驱波(S410S、S660S、P410P、P660P、sMP、pMP、s410P、p410P、PKP410PKP、PKP660PKP 等)研究地幔间断面的研究成果,并对不同参考震相[长周期反射震相 SS 或 PP、深震震相 sP、pP 和地球表面反射震相 PKP-PKP(P'P')等]前驱波的特征、优缺点及地幔间断面的相关研究成果进行了总结。

1 不同反射震相的前驱波研究

在研究地震波的传播过程时,发现地震波在传播时遇到不同深度的间断面会发生反射或者转换,从而产生不同的反射波或转换波。比如 SS、PP、sP、pP、PKPPKP 等震相在 410-km 和 660-km 间断面底部会产生 S410S、S660S、P410P、P660P、s410P、p410P、PKP410PKP、PKP660PKP 等反射或转换震相^[15,42,51],这些产生的新震相在参考震相之前到达,因此叫做前驱波。通常来说,前驱波震相普遍较弱,振幅或能量很小,如 pP 震相的前驱波振幅不到 pP 震相的 5%,SS 震相的前驱波振幅仅为 SS 震相振幅的 2%~5%,因此可以通过叠加多条地震观测波形数据有效压制噪声,来达到清楚识别前驱波震相的目的,从而可以利用前驱波与参考震相的到时差来研究上地幔间断面的起伏特征^[52-54]。

1.1 SS 和 PP 前驱波研究

SS 震相是 S 波在地表发生一次反射并继续以 S 波传播到观测台站的震相。SS 前驱波(SdS,其中 d 表示间断面的深度)与 SS 震相具有相似的传播路径,其反射点在震源与观测台站之间地球内部间断面(如 410-km、660-km 等)的底部,由于前驱波传播路径较短,故早于参考震相 SS 到达观测台站(图 1),PP 震相及其前驱波 PdP 也有相似的射线传播路径。

SS 和 PP 前驱波是目前唯一在海洋和大陆区域都有显著覆盖的体波震相,具有长周期的性质,且

对弱的间断面敏感,因此常用来探究 1 200 km 以上地幔间断面的存在及特征。而且 SS 和 PP 前驱波走时与振幅对 SS 和 PP 反射点下方的结构敏感,研究区域不受地震与台站分布的局限,大大提高了对海洋等台站分布稀疏地区地球内部结构的认识^[7,55]。

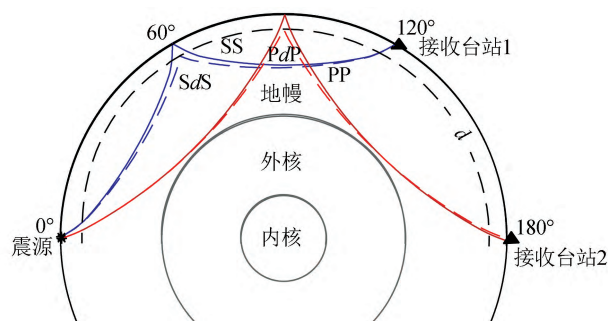


图 1 SS 震相及其前驱波 SdS、PP 震相及其前驱波 PdP 射线传播路径示意图[其中星号代表震源位置,三角形代表接收台站位置,蓝色实线和蓝色虚线分别为 SS 震相及其前驱波 SdS 射线传播路径,红色实线和红色虚线分别为 PP 震相及其前驱波 PdP 射线传播路径, d 表示间断面深度(如 410 km、660 km 等),0°、60°、120°、180°代表震中距,震源深度为 30 km]

Fig. 1 Ray propagation paths of SS phase and its precursor wave SdS, and PP phase and its precursor wave PdP

Deuss 等^[31]使用 SS 前驱波(SdS)发现在海洋和大陆下方都存在 Lehmann 间断面(220-km),并且在约 260 km 和 310 km 深度都观测到较弱的间断面。Rost 等^[36]采用短周期(1 Hz)台阵数据,利用 PP 的前驱波(PdP)研究了西北太平洋地区上地幔 200-km 间断面,并发现该间断面起伏变化明显。Shearer 等^[56]利用 PP 前驱波在全球尺度观测到了 410-km 间断面,并发现 410-km 间断面存在约 30 km 的起伏。An 等^[57]利用 SS 前驱波探测了太平洋东北部和加拿大西北部下方的间断面,发现 250~330 km、520 km、900~1 200 km 深度范围内都存在一些较弱的反射体。Tian 等^[22]叠加了大量的 SS 前驱波数据,发现 520-km 间断面是一个弱的全球性间断面,而 560-km 间断面只出现在特定的区域。Houser^[33]利用 SS 的前驱波(S410S、S660S)发现 410-km 间断面起伏与过渡带内的速度无关,而 660-km 间断面起伏变化与过渡带内的波速变化相关。Deuss^[7]利用 SS 和 PP 的前驱波研究了上地

幔不同深度的速度间断面,发现 410-km 间断面的结构相对简单,520-km 间断面显示出复杂的结构,而 660-km 间断面在地震学和矿物物理学上都有更为复杂的特征,需要用橄榄石和石榴石的相变相结合来解释其结构。肖勇等^[58]通过 SS 前驱波震相研究,发现阿留申—阿拉斯加俯冲带西部 410-km 间断面深度接近于全球平均值,而 660-km 间断面出现明显下沉,导致地幔过渡带明显加厚。

1.2 sP 和 pP 等深震震相前驱波研究

sP 是上行的 S 波到近地球表面发生反射并转换成 P 波后到达观测台站的震相,pP 是上行的 P 波到近地球表面发生反射到达观测台站的震相。其反射点在近源区速度间断面(如 Moho、LAB、410-km、660-km 等)底部,在一些狭长且深源地震分布密集的俯冲带(如汤加—斐济俯冲带、马里亚纳俯冲带等)利用 pP、sP 等深震震相的前驱波(sdP、pdP 等, d 为间断面深度)来确定狭窄俯冲带间断面的横向变化具有很大的优势。这些近源前驱波震相(sdP、pdP 等)具有较小的菲涅尔区,有利于对反射波和转换波的识别,提高地球内部结构的分辨率,因此可以更好地研究上地幔的间断面结构^[52-53]。深源地震可以避免产生多次波和噪声对研究震相的干扰,可以通过叠加大量地震观测数据有效提取前驱波信号,进而得到前驱波与参考震相的到时差,计算转换点处的间断面深度。通常使用 N 次根叠加方法^[54,59]、PWD 相位加权叠加法^[60-61]来有效提取前驱波信号。

Schenk 等^[62]利用莫霍面反射的 pP 震相前驱波 pMP,通过反射率方法计算了理论地震图并与观测波形进行比较,得到地壳厚度和莫霍面的 P 波速度变化。并利用此方法对朝鲜北部地壳进行研究,发现,从北到南约 300 km,地壳厚度从 27 km 增加到 32 km,同时莫霍面的速度变化量从 1.3 km/s 减少到 0.9 km/s。Zheng 等^[63]利用 pP、sP、sS 在 Moho 反射的前驱波 pMP、sMP 和 sMS 研究了鄂霍次克海的地壳和上地幔结构,发现鄂霍次克海大部分地区地壳厚度为 19~25 km,并发现其下方上地幔顶部的 v_P/v_S 值在 1.6~1.7 之间,可能是由于地幔孔隙流体的存在和二氧化硅的富集造成了低 v_P/v_S 值的现象。Jia^[64]等利用琉球弧大量的中深源地震,使用 Moho 底界面和壳内界面反射的 sP 和 pP 前驱波研究了琉球弧下方地壳结构,发现沿着琉球弧 Moho 深度变化范围为 22~27 km,表明大陆地壳较薄,而在冲绳海槽之下地壳厚度从 26 km 向南逐渐

减小到了 15 km。崔清辉^[46]利用 sP 震相与其在 LAB 底界面反射的前驱波 sLABP 走时差计算出反射点深度,发现南美中部地区从西到东 LAB 深度从 60~63 km 增加到了 78~82 km,可能跟大陆岩石圈被改造的差异程度有关。

Gilbert 等^[65]利用 pP 前驱波研究了汤加—斐济俯冲带附近上地幔的结构,发现 410-km 间断面在汤加俯冲板块附近上升了 30 km,660-km 间断面下降了 20~30 km。Vidale 等^[66]利用 pP 震相及其前驱波对南美洲、汤加地区、小笠原地区和马里亚纳下方地幔结构研究发现了 410-km 间断面的局部抬升和 660-km 间断面的局部下沉。Flanagan 等^[42]通过 sS、sP 和 pP 深震震相的前驱波研究观测到汤加地区下方 410-km 间断面横向变化为 33 km,并在 410-km 间断面上方观测到其他反射体的存在。蒋志勇等^[2]利用前驱波 sdP、pdP 和转换波 SdP 研究了鄂霍次克海下方的地幔结构,发现了 410-km 和 660-km 间断面分别存在抬升和下沉现象,在鄂霍次克海北部俯冲板片穿透 660-km 间断面并进入下地幔,而在其南部俯冲板片停滞在 660-km 间断面的上方。

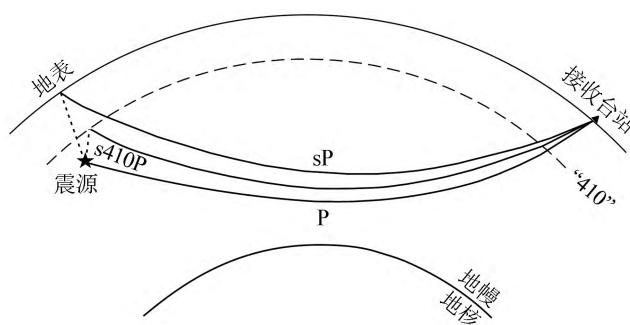


图2 sP 及其前驱波 s410P 射线路径示意图(五角星代表震源位置,实线和虚线分别表示 P 波和 S 波。前驱波 s410P 为上行的 S 波在 410-km 间断面底部反射并转换的 P 波)

Fig.2 Ray propagation paths of sP phase and its precursor wave s410P

1.3 PKPPKP(P'P')前驱波的研究

PKPPKP 震相又称为 P'P' 波,是 P 波穿过地球外核到达地表经过反射后再穿过地球外核最终到达观测台站的震相。Engdahl 等^[51]从多个地震事件波形中观测到 P'P' 之前约 150 s 处存在一个未知震相,将该震相解释为 650 km 深度处间断面的前驱波。与 SS、PP、sP 及 pP 等震相不同的是,P'P' 波穿过地球外核,传播路径近似垂直,P'P' 前驱波(PKPPKP, d 为间断面的深度)只有在接近焦散

点附近较小的震中距范围($60^{\circ}\sim 75^{\circ}$)内能够被较好地观测到^[67]。P'P'前驱波携带有大量的能量,同时射线入射方向近似垂直(图 3),这使得 P'P'前驱波具有对间断面结构尤其是小尺度结构非常敏感的特性,可用于研究间断面是否尖锐等问题。Benz 等^[48]和 Xu 等^[68]利用 P'P'的前驱波 P'410P'和 P'660P'推断印度洋、大西洋及南极洲地区下方 410-km 是一个渐变的间断面(局部可能较为尖锐),而 660-km 是一个相对尖锐的间断面,因此,P'410P'的振幅普遍弱于 P'660P',而且具有明显的横向差异,以至于 P'410P'只有在局部地区被观测到。

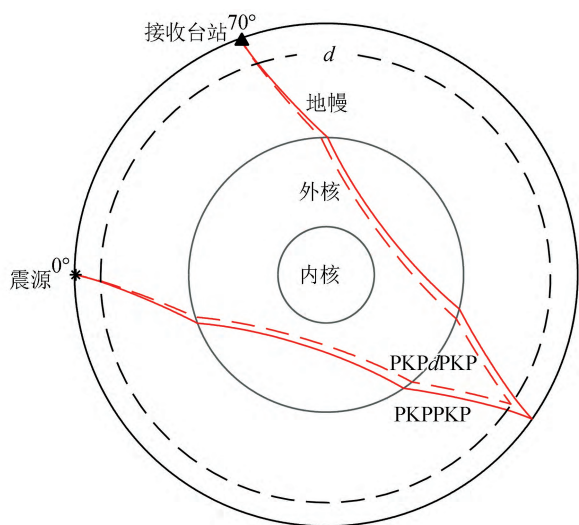


图 3 PKPPKP 及其前驱波 PKPdPKP 射线路径示意图[其中星号代表震源位置,三角形代表接收台站位置,红色实线和红色虚线分别为 PKPPKP 震相及其前驱波 PKPdPKP 的射线传播路径, d 表示间断面的深度(如 410 km、660 km 等), 0° 、 70° 代表震中距,震源深度为 30 km]

Fig.3 Ray propagation paths of PKPPKP phase and its precursor wave PKPdPKP

Whitcomb 等^[47]利用 P'P'前驱波观测到了地幔中不同深度(280 km、410 km、520 km、630 km、940 km 及 1 250 km 等)的间断面。Adams^[67]利用 P'P'前驱波研究了南极洲东部地区下方地幔结构,发现 420 km 和 650 km 深度处都存在明显的反射体。Nakanishi^[69]利用 P'P'前驱波发现在靠近大西洋中脊地区下方 660 km 深处存在着一个尖锐的间断面。Xu 等^[70]利用 P'P'的前驱波研究了非洲南部下方的上地幔间断面,并发现了明显的 410-km 间断面和 660-km 间断面。Wu 等^[50]使用 P'P'前驱波研究表明玻利维亚地区下方 410-km 间断面比较平

坦,而 660-km 间断面存在小尺度的起伏,这一结果支持地幔混合对流模型。Schultz 等^[71]对 P'P'前驱波发展了一种基于反卷积、叠加、Radon 变换和深度迁移的新型处理方法,并用此方法研究了纳斯卡南美俯冲带下方地幔结构,发现 410-km 间断面与橄榄石和石榴石的相变有关,而 660-km 间断面存在下沉。

2 利用其他震相对地幔间断面的研究

除了本文提到的 SS、PP、sP、pP、PKPPKP(P'P')等震相的前驱波,还有一些学者利用其他震相与不同的方法对地幔间断面进行了研究,包括 SdP 转换波、核幔界面反射震相(ScS 和 ScP)、三重震相及接收函数等。

2.1 SdP 转换波

SdP 转换波是下行的 S 波在近源区地幔间断面处(d 为间断面深度)转换成下行的 P 波,震源与地幔间断面之间距离较短,可用于研究震源下方地幔间断面的起伏特征(图 4)。Chen 等^[17]使用 N 次根叠加方法提取 SdP 转换波并对汤加地区地幔结构进行了研究,结果显示在 230 km 存在一个平坦的速度间断面,这表明汤加地区下方的 Lehmann 间断面有逐渐下沉趋势且没有明显的起伏波动。谢彩霞等^[16]利用 SdP 转换波发现在汤加地区 300 km 左右存在一个明显的速度间断面,且该间断面的起伏程度强于 410-km 间断面。Cui 等^[72]利用宽频带地震计观测到的 SdP 转换波研究了兴都库什—帕米尔地区下方的 410-km 间断面,发现在兴都库什下方 410-km 间断面平均深度为 375 km,在帕米尔下方 410-km 间断面平均深度为 395 km,与 IASP91 模型相比,该地区 410-km 间断面的隆起幅度更大,并认为 410-km 间断面的隆起可能是由于冷俯冲板片的下穿引起的。Richards 等^[41]利用 SdP 转换波研究了汤加—斐济俯冲带下方地幔结构,发现汤加北部下方 660-km 间断面的深度在 660~680 km 之间,汤加南部下方 660-km 间断面的深度在 660~700 km 之间。Zhou 等^[44]利用下行转换波 SdP 研究了 Izu—Bonin 地区下方 660-km 间断面的结构,发现北部地区 670 km、710 km 和 730 km 深度有三个明显的间断面,南部地区下方只有 700 km 和 740 km 两个深度存在间断面。Li 等^[73]利用 SdP 转换波研究了我国东北地区俯冲带对 660-km 间断面的影响,俯冲带的下边界与 660-km 间断面相连。从研究区域向西,660-km 间断面受冷的俯冲带的影响

逐渐加深,研究区东部 660-km 间断面较为平缓,没有表现出受俯冲带的明显影响。Kawakatsu 等^[23]利用 SdP 转换波研究发现汤加俯冲带下方 920 km 处存在间断面,在日本和弗洛雷斯海的俯冲带下方同样存在明显间断面,研究认为 920-km 间断面是一个化学界面,而 660-km 间断面是一个相变界面。

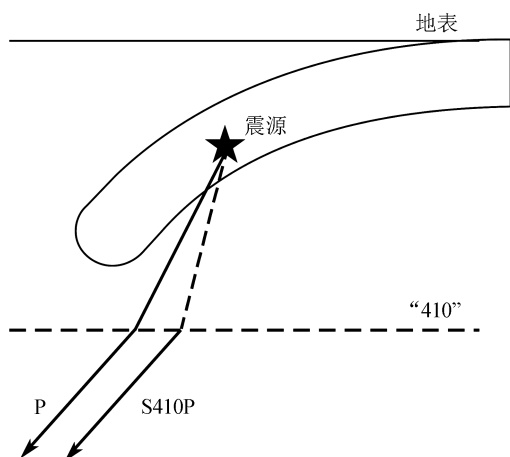


图4 转换波 S410P 射线路径示意图(五角星代表震源位置,实线和虚线分别表示 P 波和 S 波。转换波 S410P 为下行的 S 波在 410-km 间断面转换的 P 波)

Fig.4 Ray propagation path of the converted wave S410P

2.2 核幔界面反射震相(ScS 和 ScP)

ScS 和 ScP 震相都是核幔界面反射震相(图 5)。其中 ScS 震相是 S 波在核幔界面发生反射产生的震相,ScSScS(ScS2)震相是 ScS 震相再次在核幔界面发生反射产生的震相。ScP 震相是 S 波在核幔界面发生反射并转换成的 P 波,利用 ScS 及 ScP 震相可以研究下地幔间断面及核幔边界速度结构。Revenaugh 等^[74]利用 ScS 震相多次反射波在日本海、黄海和亚洲最东部下方探测到 410-km 间断面顶部低速层的存在。Courtier 等^[75]利用 ScS 震相研究了塔斯曼海和珊瑚海(Tasman and Coral Seas)下方的地幔结构,并在 410-km 间断面上方观测到低速层的存在,其平均深度为 352 km。Kato 等^[76]利用 ScS 震相研究了日本下方的地幔结构,发现 660-km 间断面下沉了约 10 km,而 410-km 间断面没有明显变化。Wang 等^[77]利用 ScS 震相研究了日本海及其邻近地区下方地幔结构,发现 660-km 间断面下沉了 10~20 km,这种下沉可能是太平洋俯冲板片造成的。Roth 等^[78]通过 ScS 震相发现了汤加俯冲带下方西部地区 660-km 间断面下沉了约 30 km。Li 等^[79]利用 ScS 震相在太平洋大型低速

区(LLVP)的北缘发现了一个巨型超低速带(UL-VZ)。

Castle 等^[25]通过对 ScP 震相在阿拉斯加地区和墨西哥湾下方 1 800 km 到核幔边界(CMB)之间没有发现明显的速度间断面。Rost 等^[80]利用 ScP 震相研究了在汤加—斐济和澳大利亚之间的 CMB 的结构,表明 CMB 上方存在一个超低速带(UL-VZ),其厚度约 5~20 km。Garnero 等^[81]利用 ScP 震相研究了西南太平洋下方地幔底部的结构,证实有 ULVZ 的存在。Persh 等^[82]利用加利福尼亚州北部和南部地震台网观测数据未提取到与 ULVZ 相关的前驱波信号,在前驱波应该出现的时间窗内,发现核幔边界(CMB)的反射震相(PcP 和 ScP)叠加振幅比前人提出的 ULVZ 模型预测的振幅低。

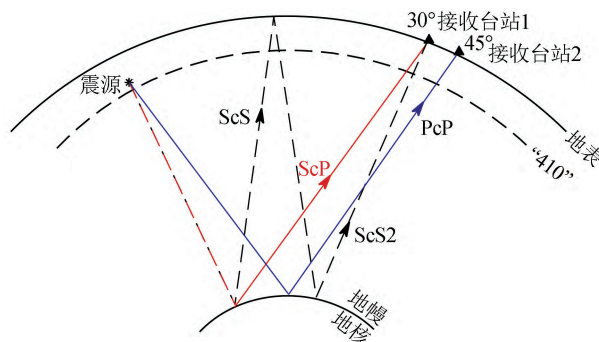


图5 ScS、ScS2、ScP、PcP 震相传播路径示意图(黑色虚线代表 ScS 及 ScS2 震相,红色虚线及实线代表 ScP 震相,蓝色实线代表 PcP 震相)

Fig.5 Ray propagation paths of ScS, ScS2, ScP, and PcP phases

2.3 三重震相

地震波经过不同速度间断面时由于速度跳变在某些震中距会产生“三重震相”(图 6),三重震相分别对应间断面之上的直达波(AB)、间断面处的广角反射波(BC)和穿透到间断面之下的折射波(CD),其到时差和振幅比对间断面附近的结构敏感,因此,利用 P 波和 S 波的重三重震相可以研究不同地区地幔过渡带的速度结构^[83]。李国辉等^[84]基于 P 波三重震相研究了扬子克拉通地幔转换带结构,发现 410-km 间断面上方存在低速层,并对其成因进行了分析讨论。崔辉辉等^[83]研究了华北克拉通东部 660-km 间断面附近的 P 波速度结构,发现华北克拉通东部 660-km 间断面下沉约 15~20 km。吕苗苗等^[85]利用 P 波三重震相对华南地区上地幔间断面进行了研究,得出 660-km 间断面下沉

约 11 km,可能与后尖晶石相变的克拉珀龙斜率为负有关的结论。王秀姣等^[86]研究了西北太平洋俯冲地区 410-km 间断面,研究结果表明 410-km 间断面上方存在厚约 (47 ± 14) km,异常值约 2%的低速层,横向展布近 700 km。李嘉琪等^[87]对千岛俯冲板块内部及附近 410-km 间断面的结构进行了非线性反演,研究结果表明 410-km 间断面在研究区域有着不同程度的抬升(10~70 km),但俯冲带内部似乎不存在大量的亚稳态橄榄石。Li 等^[88]研究了千岛地区 410-km 间断面及俯冲板块的结构,得到了 410-km 间断面的深度为 (420 ± 15) km,在 410-km 间断面下方 50~70 km 的深度为俯冲板块上界面的结论。

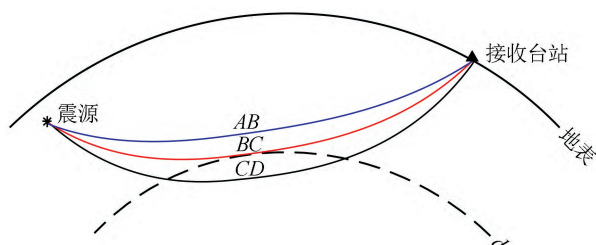


图 6 P 波三重震相传播路径示意图(AB、BC、CD 分别代表直达波、反射波和折射波)

Fig.6 Ray propagation paths of the P-wave triplications

2.4 接收函数方法

接收函数方法主要基于远震 P 波或 S 波近似垂直入射的特点,利用其在台站下方间断面处产生的转换波(P_s 、 S_p 等)研究台站下方地壳和上地幔间断面(Moho、LAB、410-km、660-km 等)的速度结构(图 7)。Heit 等^[89]利用 S 波的接收函数方法研究发现南美地区 LAB 深度约为 50~160 km,而 Moho 从大陆海岸下方的 18 km 逐渐变深到安第斯地区下方的 80 km。Vinnik 等^[90]利用 P 和 S 波接收函数方法发现芬兰地区 LAB 深度在 160 km。薛光琦等^[91]利用 S 波接收函数方法研究了青藏高原西部下方上地幔结构,发现位于塔里木岩石圈和青藏高原岩石圈汇聚处下方 200 km 深度存在 S 波低速异常。Zhu 等^[92]用 P-S 转换震相接收函数反演得出南加州地区 Moho 深度为 21~37 km。Li 等^[93]用 P-S 转换震相接收函数研究了北美克拉通区域东缘的地幔间断面,清楚地观测到了 270~280 km 深度的间断面。吴庆举等^[94]利用远震体波偏移叠加方法,研究发现在西藏南部下方存在一个倾斜界面,自 100 km 深度由南向北俯冲到 410-km 间断面附近,说明印度—欧亚板块在碰撞时地壳(上岩石

圈)与上地幔岩石圈拆离后向更深的亚欧上地幔俯冲。Ai 等^[12]采用 P 波接收函数对中国东北地区 660-km 间断面进行了深入的研究,发现 660-km 间断面在 $128.0^\circ \sim 130.5^\circ \text{E}$ 、 $40.0^\circ \sim 44.0^\circ \text{N}$ 区域内下沉,并在周围地区呈现不连续状态,推测可能是由于上地幔和俯冲板块之间的相互作用导致了这种现象。Cui 等^[95]在天山地区使用 P 波接收函数,发现在造山过程中地壳存在不同程度的增厚现象,认为热地幔物质上涌使得壳内发生部分熔化从而导致了地壳的增厚。

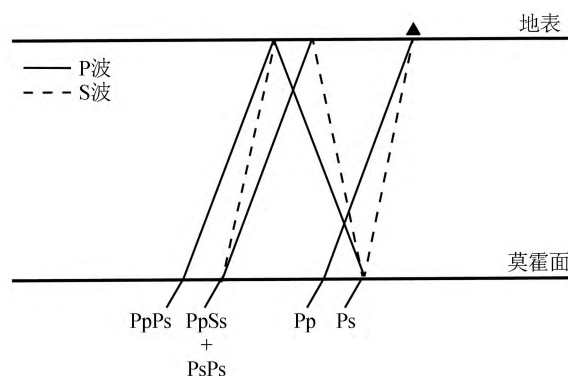


图 7 P 波接收函数射线传播路径示意图

Fig.7 Ray propagation path of the P-wave receiver function

3 总结与展望

随着全球地震观测数据的极大丰富,地震学家利用不同震相[长周期反射震相 SS 或 PP、深震震相 sP、pP 和地球表面反射震相 PKPPKP($P'P'$)等]的前驱波、 SdP 转换波、核幔界面反射震相(ScS 和 ScP)及三重震相及接收函数等方法全面研究了全球上地幔间断面结构。由于前驱波震相在参考震相之前到达,可以避免其他震相的干扰,通过叠加大量观测波形数据可以有效提取前驱波震相,是研究全球地幔间断面结构的重要手段。本文阐述了不同震相前驱波($S410S$ 、 $S660S$ 、 $P410P$ 、 $P660P$ 、 sMP 、 pMP 、 $s410P$ 、 $p410P$ 、 $PKP410PKP$ 、 $PKP660PKP$ 等)的研究成果,并对不同震相前驱波的特征进行归纳总结:

(1) SS 和 PP 具有长周期震相特征,其反射点在震源和接收台站位置的中间点附近,SS 和 PP 前驱波走时与振幅对 SS 和 PP 反射点下方的结构敏感,受地震和台站的空间分布局限性较小,可以提高海洋等台站分布稀疏地区地球内部结构的认识。SS 和 PP 前驱波的振幅还可以约束间断面(410-km、660-km)两侧的速度、密度比值。SS 前驱波研

究适用于震中距 $110^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 之间(在这个范围内受其他震相干扰较少),且对弱间断面很敏感,因此常用来研究 1 200 km 以上地幔间断面的结构特征,但其前驱波横向分辨率较低。PP 前驱波的观测较为困难,其受到其他震相的干扰较为严重,故而较难观测到 P410P、P660P 等前驱波。

(2) sP 和 pP 是远震深震震相,其反射点在近源区速度间断面(如 Moho、LAB、410-km 及 660-km 等)底部,其前驱波具有较小的菲涅尔区,对地球内部结构的分辨率较高。sP 和 pP 前驱波研究一般适用于震中距在 $70^{\circ}\sim 95^{\circ}$ 之间的中、深源远震(此范围内其前驱波能被更好地提取),在狭窄俯冲带(如汤加—斐济俯冲带、马里亚纳俯冲带等)间断面的横向变化研究具有很大的优势。

(3) PKPPKP(PP)震相具有高频(可达 1 Hz)特征,同时射线入射方向近似垂直,有近乎对称的菲涅尔区,横向分辨率大,对间断面结构和小尺度结构非常敏感。P'P'波穿过地球外核,传播路径近似垂直,其前驱波只有在接近焦散点附近较小的震中距范围($60^{\circ}\sim 75^{\circ}$)内能够被较好地观测到,可对间断面的精细特征进行分析,如判断间断面是否尖锐等。但在对地幔间断面的多数研究中,P'410P'的振幅普遍弱于 P'660P',而且具有明显的横向差异,P'660P'比 P'410P'更能清晰地被识别,在局部地区才能观测到 P'410P'。

地震学者们通常认为 410-km 间断面的形成是由橄榄石(Olivine) α 相到 β 相的相变造成,660-km 间断面是 γ 相橄榄石(Ringwoodite)到钙钛矿(Perovskite)和镁方铁矿(Magnesio-Wustite)的相变造成的。410-km 和 660-km 间断面的起伏并非仅如岩石实验预测结果呈现单一相关性,可能与温度及化学物质成分都有关,410-km 的起伏主要因为相变,而 660-km 界面则不完全是相变面,还有一部分区域是化学变化,并且由于俯冲带的存在会引起温度和物质变化,从而影响地幔间断面。地震学者们不同地区的不同深度(220~250 km、300~350 km、520 km、560 km、800~900 km、1 100~1 200 km、1 800 km 和 2 400 km)发现了地幔间断面。

尽管许多地震学者们对地幔间断面的研究取得了长足进展,但对特殊区域(如狭窄的俯冲带、海洋区域和观测台站分布稀疏区域等)地幔间断面精细结构的研究结果还存在一定分歧。因此,随着地震观测数据的不断积累,技术方法的不断创新,综合研

究区域不同深度的速度间断面、地震分布和观测台站的位置等信息,结合不同震相前驱波、反射波和转换波特征研究地幔间断面精细结构,探讨地幔间断面结构与温度、水含量、矿物相变及俯冲板块的影响等因素,并与矿物物理学、地球动力学和地球化学等学科开展交叉融合研究,对于正确理解地球内部温度分布特征和化学结构,确定地幔间断面成因及地幔对流模式等地球动力学问题具有重要的意义。

参考文献(References)

- [1] NIU F L, KAWAKATSU H. Direct evidence for the undulation of the 660-km discontinuity beneath Tonga: comparison of Japan and California array data[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(5): 531-534.
- [2] 蒋志勇, 臧绍先, 周元泽. 鄂霍次克海下间断面的起伏及俯冲带的穿透[J]. *科学通报*, 2003, 48(4): 320-327.
JIANG Zhiyong, ZANG Shaoxian, ZHOU Yuanze. Undulation of the lower discontinuity of the sea of the Okhotsk and penetration of the subduction zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 320-327.
- [3] RINGWOOD A E. Composition and petrology of the earth's mantle[J]. *Science*, 1999, 285: 1545-1548.
- [4] KATSURA T, ITO E. The system Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 at high pressures and temperatures: precise determination of stabilities of olivine, modified spinel, and spinel[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B11): 15663-15670.
- [5] BINA C R, HELFFRICH G. Phase transition Clapeyron slopes and transition zone seismic discontinuity topography[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1994, 99(B8): 15853.
- [6] KATSURA T, YAMADA H, NISHIKAWA O, et al. Olivine-wadsleyite transition in the system $(Mg, Fe)_2SiO_4$ [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B2): 105-122.
- [7] DEUSS A. Global observations of mantle discontinuities using SS and PP precursors[J]. *Surveys in Geophysics*, 2009, 30(4/5): 301-326.
- [8] RINGWOOD A E. Composition and evolution of the upper mantle[J]. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 1969, 13: 1-17.
- [9] HELFFRICH G R, WOOD B J. The earth's mantle[J]. *Nature*, 2001, 412(6846): 501-507.
- [10] ITO E, TAKAHASHI E. Postspinel transformations in the system Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 and some geophysical implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B8): 10637-10646.
- [11] SHEARER P M. Upper mantle seismic discontinuities[J]. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 2000, 117: 115-132.
- [12] AI Y S, ZHENG T Y, XU W W, et al. A complex 660 km discontinuity beneath Northeast China[J]. *Earth and Planetary*

- Science Letters, 2003, 212(1-2): 63-71.
- [13] CHAMBERS K, DEUSS A, WOODHOUSE J H. Reflectivity of the 410-km discontinuity from PP and SS precursors[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110(B2): 301.
- [14] TIBI R. Detailed structure and sharpness of upper mantle discontinuities in the Tonga subduction zone from regional broadband arrays[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(B6): 313.
- [15] 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.
- [16] 谢彩霞, 周元泽, 王卓君, 等. 汤加—斐济地区 300 km 间断面的 SdP 转换波证据[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1591-1600.
XIE Caixia, ZHOU Yuanze, WANG Zhuojun, et al. Evidence of SdP conversion phases for the 300 km discontinuity beneath Tonga—Fiji region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(5): 1591-1600.
- [17] CHEN J, ZHOU Y Z, WANG H C. Detection of the Lehmann discontinuity beneath Tonga with short-period waveform data from Hi-net[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(8): 1953-1960.
- [18] WILLIAMS Q, REVENAUGH J. Ancient subduction, mantle eclogite, and the 300 km seismic discontinuity[J]. Geology, 2005, 33(1): 1.
- [19] MATSUKAGE K N, NISHIHARA Y, KARATO S I. Seismological signature of chemical differentiation of Earth's upper mantle[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(B12): 305.
- [20] REVENAUGH J, JORDAN T H. Mantle layering from ScS reverberations: 3. the upper mantle[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1991, 96(B12): 19781-19810.
- [21] GAHERTY J B, KATO M, JORDAN T H. Seismological structure of the upper mantle: a regional comparison of seismic layering[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1999, 110(1/2): 21-41.
- [22] TIAN D D, LV M D, WEI S S, et al. Global variations of Earth's 520- and 560-km discontinuities[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 552: 116600.
- [23] KAWAKATSU H, NIU F L. Seismic evidence for a 920-km discontinuity in the mantle[J]. Nature, 1994, 371(6495): 301-305.
- [24] WYSESSION M E, LAY T, REVENAUGH J, et al. The D' discontinuity and its implications [M]//The Core-Mantle Boundary Region. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1998: 273-297.
- [25] CASTLE J C, VAN DER HILST R D. Using ScP precursors to search for mantle structures beneath 1 800 km depth[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(8): 1422.
- [26] CASTLE J C, VAN DER HILST R D. Searching for seismic scattering off mantle interfaces between 800 km and 2 000 km depth[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, 108(B2): 2095.
- [27] SHEARER P M. Constraints on upper mantle discontinuities from observations of long-period reflected and converted phases[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1991, 96(B11): 18147.
- [28] SHEARER P M. Global mapping of upper mantle reflectors from long-period SS precursors[J]. Geophysical Journal International, 1993, 115(3): 878-904.
- [29] LEE D K, GRAND S P. Depth of the upper mantle discontinuities beneath the East Pacific Rise[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(23): 3369-3372.
- [30] GU Y, DZIEWONSKI A M, AGEE C B. Global de-correlation of the topography of transition zone discontinuities[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 157(1-2): 57-67.
- [31] DEUSS A, WOODHOUSE J. Seismic observations of splitting of the mid-transition zone discontinuity in Earth's mantle[J]. Science, 2001, 294(5541): 354-357.
- [32] SCHMERR N, GARNERO E J. Upper mantle discontinuity topography from thermal and chemical heterogeneity[J]. Science, 2007, 318(5850): 623-626.
- [33] 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.
- [34] LAWRENCE J F, SHEARER P M. Imaging mantle transition zone thickness with SdS-SS finite-frequency sensitivity kernels[J]. Geophysical Journal International, 2008, 174(1): 143-158.
- [35] FLANAGAN M P, SHEARER P M. A map of topography on the 410-km discontinuity from PP precursors[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(5): 549-552.
- [36] ROST S, WEBER M. A reflector at 200 km depth beneath the northwest Pacific[J]. Geophysical Journal International, 2001, 147(1): 12-28.
- [37] ROST S, WEBER M. The upper mantle transition zone discontinuities in the Pacific as determined by short-period array data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 204(3/4): 347-361.
- [38] DEUSS A, REDFERN S A, CHAMBERS K, et al. The nature of the 660-kilometer discontinuity in Earth's mantle from global seismic observations of PP precursors[J]. Science, 2006, 311(5758): 198-201.
- [39] LAWRENCE J F, SHEARER P M. Constraining seismic velocity and density for the mantle transition zone with reflected and transmitted waveforms[J/OL]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2006, 7(10) [2022-08-31]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006GC001339>.
- [40] THOMAS C, BILLEN M I. Mantle transition zone structure along a profile in the SW Pacific: thermal and compositional variations[J]. Geophysical Journal International, 2009, 176(1): 113-125.
- [41] RICHARDS M A, WICKS C W. S-P conversions from the

- transition zone beneath Tonga and the nature of the 670 km discontinuity[J]. *Geophysical Journal International*, 1990, 101(1): 1-35.
- [42] FLANAGAN M P, SHEARER P M. Topography on the 410-km seismic velocity discontinuity near subduction zones from stacking of sS, sP, and Pp precursors[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B9): 21165-21182.
- [43] 王永飞, 丁志峰, 刘红俊. 利用 pP 前驱波研究过渡带间断面起伏[C]//中国地球物理学会第二十八届年会论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2012: 174.
- WANG Yongfei, DING Zhifeng, LIU Hongjun. Mapping topography on discontinuity of transition zone using pP precursors[C]// Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2012: 174.
- [44] ZHOU Y Z, YU X W, YANG H, et al. Multiplicity of the 660-km discontinuity beneath the Izu—Bonin area[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 198/199: 51-60.
- [45] 秦满忠, 张元生, 刘旭宙, 等. 利用甘肃地震台网记录的 sP 前驱波研究汤加—斐济俯冲带“410”间断面深度[J]. *地震学报*, 2016, 38(1): 53-58.
- QIN Manzhong, ZHANG Yuansheng, LIU Xuzhou, et al. On “410” discontinuity depth of the Tonga—Fiji subduction zone by the sP precursor recorded by Gansu seismic network[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2016, 38(1): 53-58.
- [46] 崔清辉, 高雅健, 周元泽. 基于 sP 前驱震相叠加研究南美中部地区岩石圈—软流圈边界形态[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(7): 2589-2598.
- CUI Qinghui, GAO Yajian, ZHOU Yuanze. The nature of the lithosphere—asthenosphere boundary beneath the central South America area from the stacking of sP precursors[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2589-2598.
- [47] WHITCOMB J H, ANDERSON D L. Reflection of P'P' seismic waves from discontinuities in the mantle[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1970, 75(29): 5713-5728.
- [48] BENZ H M, VIDALE J E. Sharpness of upper-mantle discontinuities determined from high-frequency reflections[J]. *Nature*, 1993, 365(6442): 147-150.
- [49] ZHANG B, ZENG X, XIE J, et al. Validity of resolving the 785 km discontinuity in the lower mantle with P'P' precursors? [J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(6): 3278-3285.
- [50] WU W, NI S, IRVING J C E. Inferring Earth's discontinuous chemical layering from the 660-kilometer boundary topography[J]. *Science*, 2019, 363(6428): 736-740.
- [51] ENGBAHL E R, FLINN E A. Seismic waves reflected from discontinuities within Earth's upper mantle[J]. *Science*, 1969, 163(3863): 177-179.
- [52] HELFFRICH G. Topography of the transition zone seismic discontinuities[J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(1): 141-158.
- [53] ROST S, THOMAS C. Array seismology: methods and applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(3): 2-1-2-27.
- [54] 臧绍先, 周元泽. N 次根倾斜叠加方法在间断面研究中的应用[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(3): 407-415.
- ZANG Shaoxian, ZHOU Yuanze. Nth root slant stack and its application in study of mantle discontinuities [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(3): 407-415.
- [55] 白玲, JEROEN Ritsema. 采用 SS 前驱波研究地幔过渡带间断面特征[C]//中国地球物理学会第二十八届年会论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2012: 208.
- BAI Ling, JEROEN Ritsema. Study of global mantle transition zone di from SS precursors[C]// Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2012: 208.
- [56] 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.
- [57] AN Y. Imaging mantle discontinuities and velocity structures using the radon transform[D]. Edmonton: University of Alberta (Canada): Department of Physics, 2007.
- [58] 肖勇, 张瑞青, 况春利. 阿留申—阿拉斯加俯冲带及周边地区地幔过渡带结构研究[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(3): 838-850.
- XIAO Yong, ZHANG Ruiqing, KUANG Chunli. Mantle transition zone structure beneath the Alaska—Aleutian subduction zone and its surroundings[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(3): 838-850.
- [59] CASTLE J C, CREAGER K C. Seismic evidence against a mantle chemical discontinuity near 660 km depth beneath Izu—Bonin[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(3): 241-244.
- [60] JIANG G M, ZHAO D P. Observation of high-frequency PKiKP in Japan; insight into fine structure of inner core boundary[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 59: 167-184.
- [61] SCHIMMEL M, PAULSEN H. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 130(2): 497-505.
- [62] SCHENK T, MÜLLER G, BRÜSTLE W. Long-period precursors to pP from deep-focus earthquakes; the Moho underside reflection pMP[J]. *Geophysical Journal International*, 1989, 98(2): 317-327.
- [63] ZHENG Y C, LAY T. Low v_P/v_S ratios in the crust and upper mantle beneath the Sea of Okhotsk inferred from teleseismic pMP , sMP , and sMS underside reflections from the Moho[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(B1): B01305.
- [64] JIA X, SUN D. Imaging the crustal interfaces along the Ryukyu Arc—trough system using precursors to teleseismic sP

- and pP[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(2): e2020JB020413.
- [65] GILBERT H J, SHEEHAN A F, WIENS D A, et al. Upper mantle discontinuity structure in the region of the Tonga subduction zone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(9): 1855-1858.
- [66] VIDALE J E, BENZ H M. Upper-mantle seismic discontinuities and the thermal structure of subduction zones[J]. *Nature*, 1992, 356(6371): 678-683.
- [67] ADAMS R D. Reflections from discontinuities beneath Antarctica[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971, 61(5): 1441-1451.
- [68] XU F, VIDALE J E, EARLE P S. Survey of precursors to P'P': fine structure of mantle discontinuities[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B1): ETG7-1.
- [69] NAKANISHI I. Seismic reflections from the upper mantle discontinuities beneath the Mid-Atlantic Ridge observed by a seismic array in Hokkaido region, Japan[J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 13(13): 1458-1461.
- [70] XU F, VIDALE J E, EARLE P S, et al. Mantle discontinuities under southern Africa from precursors to P'P'_{df}[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(4): 571-574.
- [71] SCHULTZ R, GU Y J. Multiresolution imaging of mantle reflectivity structure using SS and P'P' precursors[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(1): 668-683.
- [72] CUI Q H, ZHOU Y Z, LI W L, et al. Seismic evidence for the 410 km discontinuity beneath the Hindu Kush—Pamir region from the SdP converted phases[J]. *Tectonophysics*, 2019, 766: 31-39.
- [73] 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*, 2008, 35: L01302.
- [74] REVENAUGH J, SIPKIN S A. Seismic evidence for silicate melt atop the 410-km mantle discontinuity[J]. *Nature*, 1994, 369(6480): 474-476.
- [75] COURTIER A M, REVENAUGH J. Deep upper-mantle melting beneath the Tasman and Coral Seas detected with multiple ScS reverberations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(1-2): 66-76.
- [76] KATO M, MISAWA M, KAWAKATSU H. Small subsidence of the 660-km discontinuity beneath Japan probed by ScS reverberations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(3): 447-450.
- [77] WANG X, LI J, CHEN Q F. Topography of the 410 km and 660 km discontinuities beneath the Japan Sea and adjacent regions by analysis of multiple-ScS waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(2): 1264-1283.
- [78] ROTH E G, WIENS D A. Depression of the 660 km discontinuity beneath the Tonga slab determined from near-vertical ScS reverberations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(9): 1223-1226.
- [79] LI J W, SUN D Y, BOWER D J. Slab control on the megasized North Pacific ultra-low velocity zone[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1042.
- [80] ROST S, REVENAUGH J. Small-scale ultralow-velocity zone structure imaged by ScP[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(B1): 2056.
- [81] GARNERO E J, VIDALE J E. ScP: a probe of ultralow velocity zones at the base of the mantle[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(3): 377-380.
- [82] PERSH S E, VIDALE J E, EARLE P S. Absence of short-period ULVZ precursors to PcP and ScP from two regions of the CMB[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(2): 387-390.
- [83] 崔辉辉, 周元泽, 石耀霖, 等. 华北克拉通东部滞留板块下方低速异常的地震三重震相探测[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(4): 1309-1320.
- CUI Huihui, ZHOU Yuanze, SHI Yaolin, et al. Seismic detection of a low-velocity anomaly under the stagnant slab beneath the eastern North China Craton with P-wave triplication[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(4): 1309-1320.
- [84] 李国辉, 睦怡, 周元泽. 基于 P 波三重震相的下扬子克拉通地幔转换带顶部低速层初探[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(7): 2362-2371.
- LI Guohui, SUI Yi, ZHOU Yuanze. Low-velocity layer atop the mantle transition zone in the lower Yangtze Craton from P waveform triplication[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2362-2371.
- [85] 吕苗苗, 丁志峰, 朱露培. 基于 P 波三重震相的华南地区上地幔速度结构研究[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(10): 3765-3779.
- LÜ Miaomiao, DING Zhifeng, ZHU Lupei. Upper mantle velocity structure beneath South China derived from triplicated seismic P waveforms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 3765-3779.
- [86] 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 Xiujiao, HAN Guangjie, LI Juan. Low-velocity layer atop the upper mantle transition zone in Northwest Pacific subduction zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(3): 819-831.
- [87] 李嘉琪, 宁杰远, 蔡晨, 等. 基于三重震相波形非线性反演的俯冲带 410-km 间断面起伏研究[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(2): 507-524.
- LI Jiaqi, NING Jieyuan, CAI Chen, et al. Topography of the 410-km discontinuity in and around subduction zone from nonlinear inversion of triplicated waveforms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(2): 507-524.
- [88] LI J Q, CHEN M, NING J Y, et al. Constraining the 410-km discontinuity and slab structure in the Kuril subduction zone with triplication waveforms[J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 228(2): 729-743.

(下转第 243 页)

- time object detection for autonomous driving[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Honolulu, HI, USA. IEEE. :446-454.
- [39] ZHANG X,ZHANG J,YUAN C C,et al.Locating induced earthquakes with a network of seismic stations in Oklahoma via a deep learning method[J].Scientific Reports,2020,10:1941.
- [40] ZHANG X,ZHANG M,TIAN X.Real-time earthquake early warning with deep learning:application to the 2016 $M_{6.0}$ central Apennines, Italy earthquake [J]. Geophysical Research Letters,2021,48(5):2020GL089394.
- [41] ZHOU Y J,YUE H,FANG L H,et al.An earthquake detection and location architecture for continuous seismograms: phase picking, association, location, and matched filter (PALM) [J]. Seismological Research Letters, 2022, 93 (1): 413-425.
- [42] Klein F W. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes [R]. US Geological Survey, 2002.
- [43] WALDHAUSER F. hypoDD—a program to compute double-difference hypocenter locations [R]. Earthquake Science Center, 2001.
- [44] ROSS Z E, IDINI B, JIA Z, et al. Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence [J]. Science, 2019, 366 (6463): 346-351.
- [45] SHELLEY D R. A high-resolution seismic catalog for the initial 2019 Ridgecrest earthquake sequence: foreshocks, aftershocks, and faulting complexity [J]. Seismological Research Letters, 2020, 91 (4): 1971-1978.

(上接第 219 页)

- [89] HEIT B,YUAN X H,BIANCHI M,et al.Study of the lithospheric and upper-mantle discontinuities beneath eastern Asia by SS precursors[J].Geophysical Journal International,2010,183(1):252-266.
- [90] VINNIK L,KOZLOVSKAYA E, ORESHIN S, et al. The lithosphere, LAB, LVZ and Lehmann discontinuity under central Fennoscandia from receiver functions[J]. Tectonophysics, 2016, 667: 189-198.
- [91] 薛光琦,钱辉,姜枚.青藏高原西缘上地幔构造特征:穿越西昆仑造山带的接收函数反演[J].地质论评,2005,51(6):708-712. XUE Guangqi, QIAN Hui, JIANG Mei. Tectonic characteristic of mantle on the west edge of Qinghai—Xizang Plateau: receiver function inversion through west Kunlun orogenic belt [J]. Geological Review, 2005, 51 (6): 708-712.
- [92] ZHU L P,KANAMORI H.Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105 (B2): 2969-2980.
- [93] LI A B. Crust and upper mantle discontinuity structure beneath eastern North America [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107 (B5): 2100.
- [94] 吴庆举,曾融生,赵文津.喜马拉雅-青藏高原的上地幔倾斜构造与陆-陆碰撞过程[J].中国科学(D辑:地球科学),2004,34(10):919-925. WU Qingju, ZENG Rongsheng, ZHAO Wenjin. Upper mantle tilting tectonics and land-land collision processes in the Himalayan-Tibeta plateau [J]. Science in China (Ser D), 2004, 34 (10): 919-925.
- [95] CUI Q H,ZHOU Y Z,LI J T,et al.Crustal thickness (H) and v_p/v_s ratio (κ) images beneath the central Tien Shan revealed by the H - κ -c method [J]. Tectonophysics, 2022, 822: 229157.