



基于接收函数法的阿拉斯加中南部地幔转换带特征研究

刘亚鑫, 杨慧良, 邢磊, 李倩倩, 刘怀山, 张进, 王林飞, 尹燕欣

Application of receiver function method for characterizing the mantle transition zone structures in central and southern Alaska

LIU Yaxin, YANG Huiliang, XING Lei, LI Qianqian, LIU Huaishan, ZHANG Jin, WANG Linfei, and YIN Yanxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023032801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杭州湾沉积物中硫酸盐—甲烷转换带内的碳循环

Carbon cycle within the sulfate–methane transition zone in the marine sediments of Hangzhou Bay

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 51–60

大洋地幔化学组成不均一性成因研究回顾及展望

GEOCHEMICAL HETEROGENEITY OF OCEANIC MANTLE: A REVIEW

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 1–13

东海洋陆过渡带中—新生代构造变形及动力学机制

MesoCenozoic deformation and dynamic mechanism of the oceancontinent transitional zone in the East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 71–84

西太平洋–北印度洋及其洋陆过渡带：古今演变与论争

West Pacific and North Indian Oceans and Their Ocean–continent Connection Zones: Evolution and Debates

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 1–17

南海中南—司令断裂带的延伸特征及其与南海扩张演化的关系

EXTENSION OF THE ZHONGNAN–SILING FAULT ZONE IN SOUTH CHINA SEA AND ITS BEARING ON SEAFLOOR SPREADING

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(2): 82–98

鲁西地区中生代穹盆构造与东亚构造体制转换

MESOZOIC DOME–BASIN STRUCTURES IN WESTERN SHANDONG PROVINCE AND ITS BEARING ON TRANSITION OF TECTONIC REGIMES IN EAST ASIA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 110–125



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘亚鑫, 杨慧良, 邢磊, 等. 基于接收函数法的阿拉斯加中南部地幔转换带特征研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(2): 223-234.

LIU Yaxin, YANG Huiliang, XING Lei, et al. Application of receiver function method for characterizing the mantle transition zone structures in central and southern Alaska[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 223-234.

基于接收函数法的阿拉斯加中南部地幔转换带特征研究

刘亚鑫¹, 杨慧良^{2,3}, 邢磊^{1,3,4}, 李倩倩¹, 刘怀山^{1,3,4}, 张进^{1,4}, 王林飞^{1,3,4}, 尹燕欣^{1,4}

1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

3. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

4. 海洋油气勘探国家工程研究中心, 北京 100029

摘要:太平洋板块向北美板块俯冲, 在北美洲阿拉斯加大陆边缘形成了碰撞造山带和俯冲构造带, 前人对该区域阿拉斯加俯冲带地幔转换带的研究存在分歧, 一种观点认为太平洋板块俯冲至阿拉斯加中南部下方的地幔转换带内部, 引起地幔转换带增厚, 另一种观点则认为地幔转换带增厚是由于库拉板块残留造成的。因此, 研究阿拉斯加俯冲带区域地幔转换带的精确成像对于厘清太平洋板块俯冲机制和俯冲过程具有重要意义。本文利用美国地震联合会 (IRIS) 在阿拉斯加区域布设的 USArray 部分固定台站接收到远震事件的波形资料, 采用天然地震 P 波接收函数与共转换点道集叠加的方法, 反演得到了阿拉斯加山脉和育空高原 410 km、660 km 间断面和地幔转换带的厚度结构。结果表明: 由于太平洋板块俯冲至地幔转换带内部, 使得 410 km 间断面在阿拉斯加山脉东部和育空高原与阿拉斯加山脉交界处的弧形区域出现了抬升现象, 抬升幅度为 0~20 km, 进而导致在该区域出现不同程度的地幔转换带增厚的现象, 验证了第一种观点。另外, 该地区地幔转换带结构显示, 660 km 间断面在阿拉斯加山脉东部以及阿拉斯加山脉与育空高原交界的东部出现下沉现象, 故此推测阿拉斯加中南部分区太平洋板块已经俯冲至地幔转换带底部。

关键词:接收函数; 地幔转换带; 间断面; 阿拉斯加

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023032801

Application of receiver function method for characterizing the mantle transition zone structures in central and southern Alaska

LIU Yaxin¹, YANG Huiliang^{2,3}, XING Lei^{1,3,4}, LI Qianqian¹, LIU Huaishan^{1,3,4}, ZHANG Jin^{1,4}, WANG Linfei^{1,3,4}, YIN Yanxin^{1,4}

1. The Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

3. Evaluation and Detection Technology Laboratory of Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

4. National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100029, China

Abstract: The subduction of the Pacific Plate towards the North American Plate has formed a collisional mountain belt and subduction zone at the edge of the continent in Alaska. Previous studies on the mantle transition zone beneath the Alaska subduction were in debate. It is believed that the thickening of the transition zone is due to the subduction of the Pacific Plate, or due to the thickening is caused by the residual Kula Plate. Therefore, accurate imaging of mantle transition zones in the Alaskan subduction zone is of great significance for understanding the subduction mechanism and courses of the Pacific Plate. This study provided waveform data from teleseismic events received in several stations of the US Array deployed by Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) in the Alaska region, and adopts the natural earthquake P-wave receiver function and common conversion point stacking method to obtain 410 km and 660 km discontinuity sections and mantle

资助项目:国家自然科学基金“基于冷泉羽状流声学特征的甲烷通量研究——以‘F’站位为例”(42276055); 山东省自然科学基金“同步挤压小波变换与二维离散小波变换联合压制面波方法研究”(ZR2022MD067); 中央高校基本科研业务费专项“基于四维地震监测技术的海洋二氧化碳地质封存研究”(202262008), “海洋 CO₂ 驱油封存储层地震响应特征数值模拟”(202261021)

作者简介:刘亚鑫(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地震勘探工作, E-mail: lyxin1111@163.com

通讯作者:邢磊(1984—), 男, 教授, 主要从事高分辨率海洋地震勘探工作, E-mail: xingleiouc@ouc.edu.cn

收稿日期:2023-03-28; **改回日期:**2023-04-19. 周立君编辑

transition zone thickness structure of the Alaska Range and Yukon Plateau. The new results show that due to the subduction of the Pacific Plate into the mantle transition zone, a 410 km long discontinuity is uplifted in the arc-shaped area of the eastern Alaska Mountains and the junction of the Yukon Plateau and the Alaska Mountains, with an uplift of 0~20 km, which in turn led to different degrees of thickening of the mantle transition zone in this area, which verifies the first view. In addition, the structure of the mantle transition zone in this area shows that a 660 km long discontinuity has subsided in the eastern part of the Alaska Mountain Range and the eastern part of the border between the Alaska Mountains and the Yukon Plateau. Therefore, it is assumed that the Pacific Plate in parts of south-central Alaska has subducted to the bottom of the mantle transition zone.

Key words: receiver function; mantle transition zone; discontinuity; Alaska

为探究阿拉斯加俯冲带地幔转换带的构造特征,前人在该区域开展了广泛的研究,如全球、全区域尺度的体波走时层析成像研究^[1-5]、接收函数研究^[6-10]以及SS前驱波方法约束410 km和660 km界面起伏^[11]等。

地震层析成像结果被用于讨论太平洋板块进入和穿过地幔转换带(Mantle Transition Zone, MTZ, 410~660 km)范围的问题。Qi等^[12]在2007年的研究中发现400~450 km深度处板块运动速度为快速速度,同时在地幔转换带较低的位置也得到了板块运动的快速速度,因此他们认为地幔转换带较低的位置存在快速运动板块的残余。Van Stiphout等^[13]应用层析成像技术研究得到的阿拉斯加俯冲带区域三维P波速度、b值(在地质学中,b值通常用于描述地震的震级分布特性)空间分布结果显示,深度为100 km的俯冲带下方活动火山呈现出高b值,且在深度为100 km的贝尼奥夫带顶部存在明显的高 V_p/V_s 异常,推测与板块脱水和产生岩浆有关;You等^[14]使用层析成像技术对阿拉斯加南部进行了研究,发现该区域三维速度结构与P波各向异性在地壳及上地幔区域存在明显的速度不均匀性,活动火山下方沿着地幔楔的位置分布着明显的低速异常;Ferris等^[7]和Ai等^[15]采用接收函数方法对阿拉斯加地区进行了深入研究,但这些研究均未提供关于纵波、横波和泊松比深部结构的综合图像;Burdick等^[4]在2017年构建的北美P波速度模型中得到了太平洋板块的末端似乎已经渗透到下地幔中,但在更深处模型的分辨率降低,不能对太平洋板块的俯冲边界进行明确的计算;Maguire等^[16]在2018年的研究模型表明,太平洋板块继续俯冲,俯冲至400 km以下,但对于该模型中同样存在一定深度(400 km)之下分辨率不高的问题,不能进行更精确的研究。Jiang等^[17]在2018年构建的上地幔 V_s 模型中发现,俯冲板块在390 km深度处高速异常最为突出,且在地幔转换带中出现了较弱的高速异常。Gou等^[18]的研究得到的P波速度模型显示了450~500 km深度处的太平洋板块,通过比较S波和P波

速度情况,并通过“地下世界图谱”^[5]确定了地幔转换带内的太平洋板块末端。

不同层析模型的俯冲板块深度范围差异可能是由于地幔转换带模型分辨率不同造成的,因此需要使用不同方法来对阿拉斯加地区的地幔转换带和其可能范围及存在的板块进行成像。在成像研究中,接收函数法分析被用于研究全球地幔不连续性的地形,以便更深入地了解阿拉斯加下方的地幔转换带结构和俯冲板块的深度范围。

1 区域地质背景

阿留申-阿拉斯加俯冲带东部(即阿拉斯加南部和阿拉斯加半岛)是由一系列堆积的地体构成^[19],如雅库塔特地体、楚加奇地体、威廉王子地体等(图1)。这些地体起源于阿拉斯加南部北纬30°附近,并随着库拉板块持续地向极地方向移动^[20],最终拼合到古老的陆核-北美克拉通之上。其中,弗兰盖利亚复合地体是一个大型地体,在100~55 Ma与阿拉斯加南部发生碰撞^[21]。在55 Ma,楚加奇地体与弗兰盖利亚复合地体发生碰撞,导致楚加奇地体增生。在弗兰盖利亚复合地体增生后,阿拉斯加西南部地区经历了高达50°的逆时针旋转,将阿拉斯加和阿留申群岛的位置塑造成了我们今天所认识的阿拉斯加俯冲带的形状和位置。在白垩纪中期到古近纪早期,旋转发生之后,由于库拉板块的汇聚,沿着阿拉斯加南部形成了安第斯型的弧系。在24 Ma时,雅库塔特地体与太平洋板块耦合在一起,并随之俯冲至北美板块下方。

在板块俯冲的作用下,阿留申-阿拉斯加俯冲带成为北美构造运动最活跃的地区。该地区地震活动频发,但大部分为浅中源地震,震源深度超过300 km的深源地震不多。该俯冲带周围还孕育了比较多的火山,包括勘察加半岛6个火山、阿留申岛弧30个火山、阿拉斯加与库克湾19个火山。另外,在阿拉斯加地区存在较多的断层,如贯穿整个阿拉斯加州的德奈利断层、造成阿拉斯加中南部大

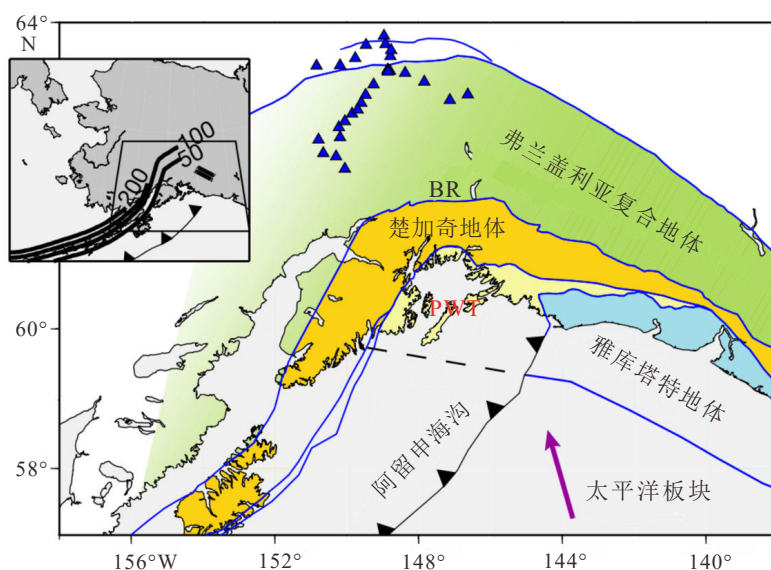


图 1 阿拉斯加南部地体范围

据文献 [20] 修改。PWT: 威廉王子地体, BR: 板块边界。

Fig.1 Terranes of the southern Alaska

PWT: the Prince William terrane; BR: the plate boundary, modified according to reference [20].

部分地区发生火山和地震的阿留申巨型逆冲断层、将楚加奇地体和威廉王子地体分开的科恩台科特断层, 它们都发育在古俯冲区、地质体内、裂谷沿线及两个板块相对运动摩擦的地区。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究主要使用 USArray (<https://earthquake.alaska.edu/>) 阵列中的 AK 台网的固定台站地震事件数据。其中 AK 地震台网的分布情况如图 2 中红色三角的排列所示, 主要集中在阿拉斯加州育空高原和阿拉斯加山脉区域, 在育空高原的排布较为工整, 在阿拉斯加山脉南麓区域的台站分布更为密集; 最终, 本次研究共计使用了 AK 台网中 103 个地震台站数据(图 2)。

前期通过在“国际地震中心 ISC(International Seismological Centre(isc.ac.uk))”和“美国地质调查局(USGS)”的官网上搜索地震事件, 选取了震中距为 25°~100°、发震时刻为 2015 年 1 月 1 日至 2023 年 1 月 31 日之间且震级 ≥ 6.5 级的地震事件。在此基础上, 对地震目录中发震时间比较接近的地震进行筛选, 确保 2 分钟内无重复性地震。经过筛选, 本研究选取了 201 个地震事件, 并以阿拉斯加研究区为中心绘制出震中与研究区域之间的相对位置

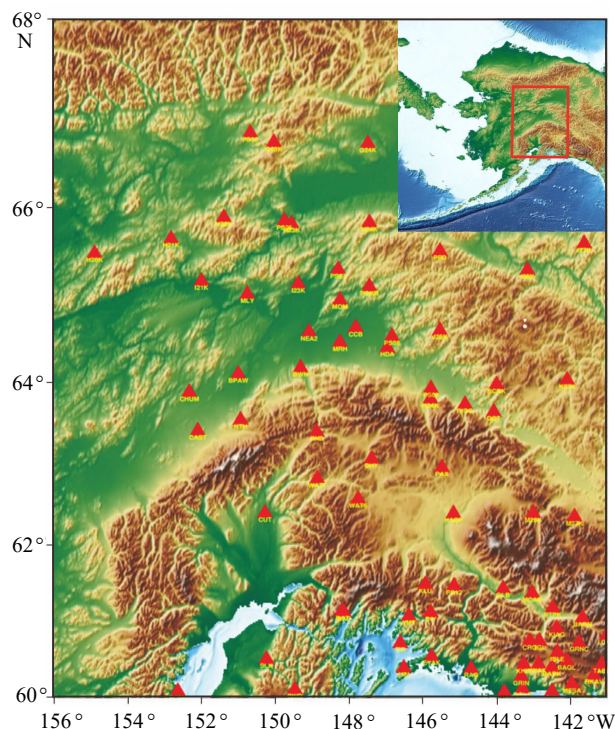


图 2 阿拉斯加州 USArray 阵列台站分布图

Fig.2 Map of USArray Array Station Distribution in Alaska

关系(图 3)。这些地震数目多, 分布分散, 足以保证台站附近的地震射线密度, 从而进一步提高接收函数反演结果的可靠性。

2.2 方法原理

由于地球内部构造是各向异性的介质, 因此地

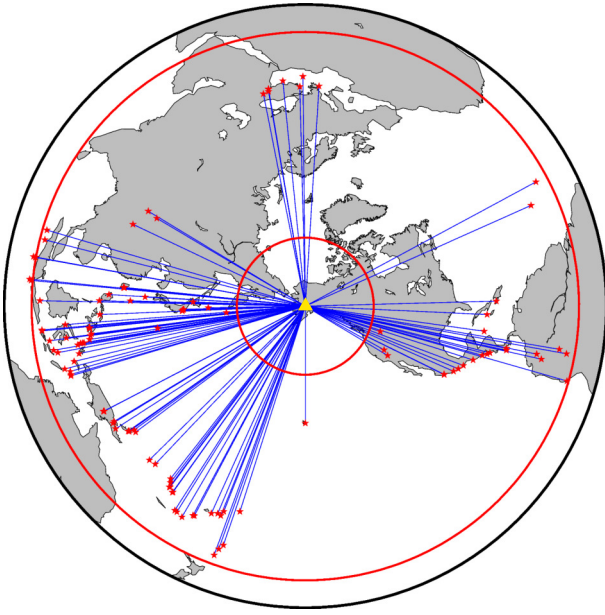


图3 本文涉及到的大于 6.5 级地震事件的分布及与研究区域的位置关系图

图中黄色三角为研究区域,红色五角星为地震发生位置,小的红色圆圈为震中距 25° 的范围,大的红色圆圈为震中距 100° 的范围。

Fig.3 The distribution of earthquakes with magnitude greater than 6.5 and the position of the study area

Yellow triangle: the study area; red stars: earthquake epicenter; small red circles: the range of 25° from the epicenter, and large red circles: the range of 100° from the epicenter.

震波在地下传播的过程中会受到影响,而这种影响是多种因素共同作用的结果,通常对地震波传播受到的下方介质的影响特别关注,这样可以揭示地震台站下方的地质结构特征。通过分析这些影响,可以获得地震台站下方的地下结构速度间断面以及由此产生的转换波和多次反射波的信息。因此,接收函数通常被视为一种反演工具,可用于研究台站下方的地质结构^[22-23]。

地震波形数据是由震源激发地震波经过一定的传播路径到达台站下方并被陆基台站或海底地震仪记录下来,包含震源响应 $S(t)$ 、震源下方响应 $M_S(t)$ 、接收区(即台站下方的结构)响应 $M_R(t)$ 、传播路径响应 $M_I(t)$ 、仪器响应 $I(t)$ 的多重信息,因此地震波信号 $D(t)$ 可以表示为上述 5 个响应的褶积形式^[24]:

$$D(t) = I(t) * S(t) * M_S(t) * M_I(t) * M_R(t) \quad (1)$$

在上述 5 个响应中,只有仪器响应是已知的,而其余 4 种都是未知的,而且均与地下结构密切相关。为了将接收区介质的响应从其余响应中剥离出来,Langston 提出等效震源假设^[22],消除对远震 P 波波形的影响。 $S(t)$ 、 $M_S(t)$ 、 $M_I(t)$ 可以看作垂直分

量和径向分量远震波形的共同因子。公式可在频率域中改写为:

$$D_Z(\omega) = I(\omega) * S(\omega) * M_S(\omega) * M_I(\omega) * M_R^Z(\omega) \quad (2)$$

$$D_R(\omega) = I(\omega) * S(\omega) * M_S(\omega) * M_I(\omega) * M_R^R(\omega) \quad (3)$$

根据公式(2)和(3)可得到去除接收区外其他所有响应,接收区介质在径向分量上的响应可以表示为:

$$M_R^R(\omega) = \frac{M_R^Z(\omega) * D_R(\omega)}{D_Z(\omega)} \quad (4)$$

由于远震事件的入射角接近 90°,垂直分量在接收区介质的响应 $M_R^Z(t)$ 可以表示为一个尖脉冲 $\delta(t)$,变换到频率域后值为 1,因此公式变为:

$$M_R^R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{D_Z(\omega)} \quad (5)$$

再将 $M_R^R(t)$ 经过傅里叶逆变换回到时间域,就得到了接收区介质响应的时间函数 $M_R^R(t)$,被称为径向接收函数。

图 4 对径向接收函数的传播路径和震相进行了简单描述。莫霍面是地壳和地幔分界的速度间断面,当远震 P 波到达莫霍面时,大部分波形能量将继续作为 P 波(震相 Pp)向上传播,而部分波形将转换为 S 波(震相 Ps)穿透莫霍面向上传播。

3 数据处理

3.1 数据预处理

编写 Python 脚本批量下载完成所需的 AK 网络的台站地震数据后,用 Python 软件的 ObsPy 工具包对地震波形数据进行了初步查看(图 5)。其中图 5A 为 AK 台网中的 D20K 台站的数据,在各个分量都能够看到明显有效信号的同时,不同分量上的线性趋势也十分明显,进行数据接收函数计算时需要进行进一步的处理;图 5B 展示的台站数据是质量较好的波形信号,根据振幅的变化,可以很容易地判断出有效信号的到达时间。在对所下载的地震波形信号进行逐一检查后,发现 AK 台网的地震台站的原始信号也存在不同程度的趋势性。可以看出,预处理过程对获得高质量的地震波形数据和计算的接收函数结果至关重要。

通过图 5 可知,部分台站的数据存在信噪比较低的情况。为了使接收函数的计算以及波形反演出来的结果更加准确,进行计算前还需要对下载的数据进行预处理,以提升数据的信噪比和可靠性。

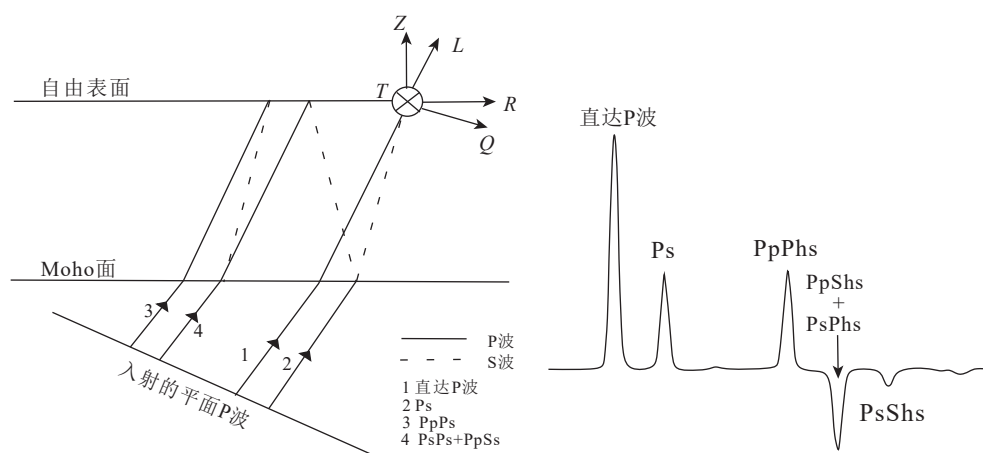


图 4 P 波通过莫霍面产生转换震相和多次波示意图

Fig.4 Illustration of wave conversion and multiple reflections at the Moho

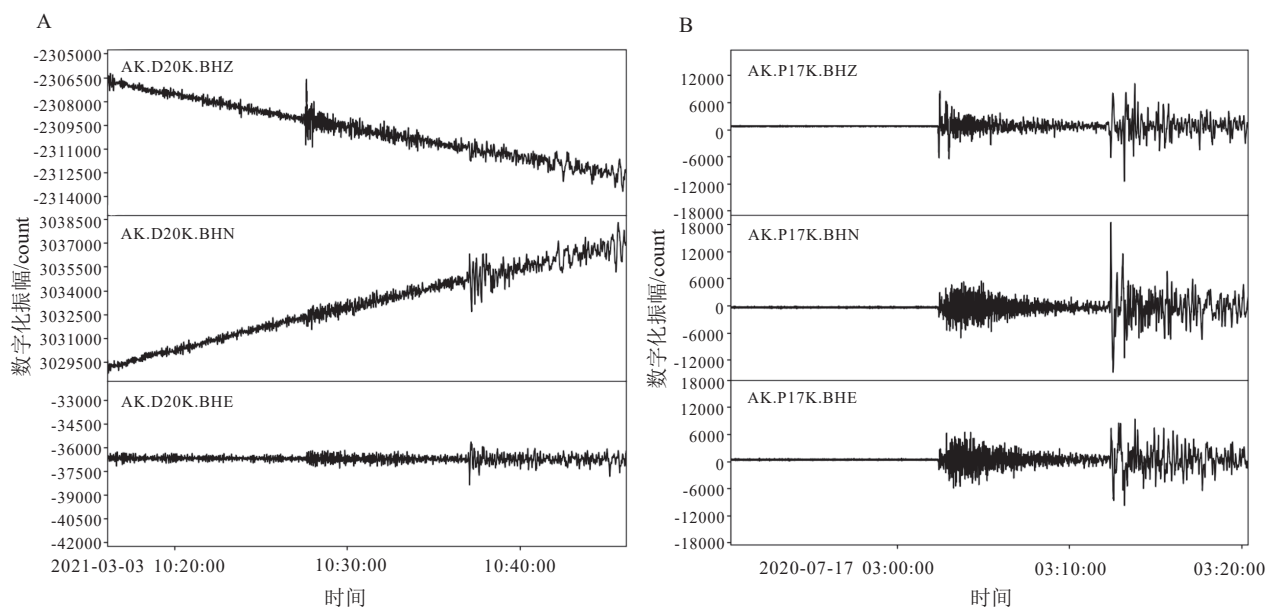


图 5 地震台站原始地震波形展示

Fig.5 Display of raw seismic waveforms from seismic stations

本研究所涉及的预处理流程如下:

(1) 地震仪器校正

由于不同台站的仪器响应可能不同, 为使波形数据能相互比较, 通过地震台站的仪器响应文件或者零极点文件对地震数据进行仪器响应的去除滤波, 即对原始地震记录去平均与去线性趋势等处理和按照需求对波形做带通滤波处理, 保留 0.05~2.5 Hz 频带地震记录, 去除部分异常波动(图 6)。

(2) 旋转方位角

在地震事件的头段数据中添加地震事件的经纬度、震源深度以及地震台站的经纬度和高程信息, 以便于计算反方位角, 根据反方位角, 将原始的 ZNE 三分量地震记录旋转到 ZRT 坐标; 图 7 揭示了 ZNE 坐标系和 ZRT 坐标系两者之间的位置关系。

(3) 截取地震波形

本文采用的方法是利用全球平均速度模型 IASP91 计算得到地震事件的预期走时, 然后在地震记录上定位该事件并从中截取所需的波形数据。对于接收函数, 所截取的地震记录为理论 P 波到时前 10 s, 以及 P 波到时后 120 s 地震数据, 共计 130 s (图 8)。

3.2 接收函数计算及挑选

本文选用频率域迭代反卷积接收函数的方法对各个台站进行计算, 分别获得了研究区域下载台站的径向接收函数和切向接收函数的结果。

为了获得台站高质量的接收函数数据, 对提取的接收函数用 Python 的 Seispy^[25] 工具包再次进行

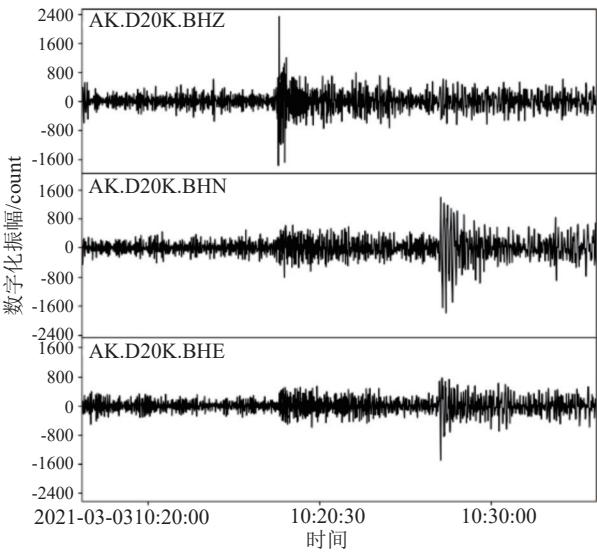


图 6 进行去仪器响应、去趋势性和去均值之后的地震记录
Fig.6 Seismic records after instrument response removal, detrending, and mean removal

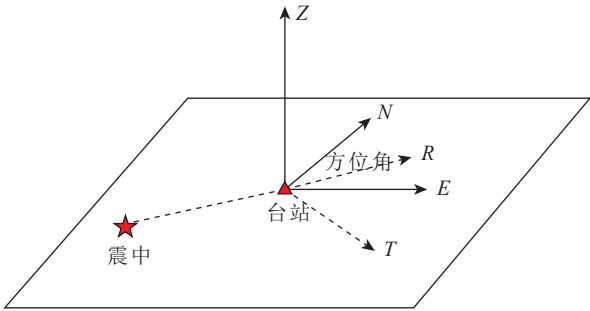


图 7 ENZ 坐标系与 TRZ 坐标的关系示意图
Fig.7 Illustration of the relationship between ENZ and TRZ coordinate systems

挑选,通过对比,挑选出 P 波信号突出、Ps 震相在 P 波震相后 3~5 s 内有明显起跳、整体质量高的接收函数数据。在进行最终的接收函数汇总时,尽量保证接收函数为来自各个方位的地震事件计算而得,且每个台站都挑选了 20 条以上的有效地震记录,保障了结果的可靠性。在地壳和上地幔的边界

处由于两边的物质组成元素相差过大,形成了强波阻抗界面,因此在速度结构上会有一个突然的增强,在莫霍面边界上会产生 Ps、PpPs 和 PpPs+PpSs 等震相,台站下方的莫霍面埋深和速度变化会影响到上述震相的到时,因此在选择数据时尽量选择这 3 个震相清晰的数据,用来提高后续共转换点叠加的准确性,获得可靠的 410 km 和 660 km 间断面形态分布特征。通过挑选,最终得到每个台站可使用的接收函数。图 9 给出了 AK 台网中 BPAW 台站和 HAD 台站下方按照后方位角排列的接收函数,图中可以看出莫霍界面的转换震相(Ps 震相)清晰。

本文共选取了 2 个台站数据进行接收函数计算,2 个台站的具体位置见图 9,通过结果比对,可以很明显地观察到在径向接收函数的显示图中,每种震相相较于切向接收函数而言,在图中显示的更为明显,因此在本文的后续反演研究中,选择径向接收函数进行地壳厚度和 440 km 及 660 km 深度的叠加反演。同时,在径向分量的接收函数显示中,不仅直达 P 波的震相明显,而且能较为清晰地识别出 3~5 s 的 Pms 震相,这一特征为接下来的地壳深度的叠加反演提供了保障。

4 结果

通过收集大量地震台站的地震事件信息来筛选接收函数,使用全球平均速度模型 IASP91 进行时深转换和共转换点道集的叠加,最终获得了阿拉斯加俯冲带区域阿拉斯加山脉及育空高原地区下方的 410 km 间断面和 660 km 间断面的形态特征,同时根据深度差获得过渡带厚度分布(图 10)。

为了得到更为准确的共转换叠加结果,在进行叠加时,本文选择的圆形面元半径为 150 km,并以 100 km 的间隔进行移动,最终得到阿拉斯加州中南部研究区域的叠加结果。通过三维的共转换点叠加的结果可以观察到 410 km 和 660 km 界面的区域

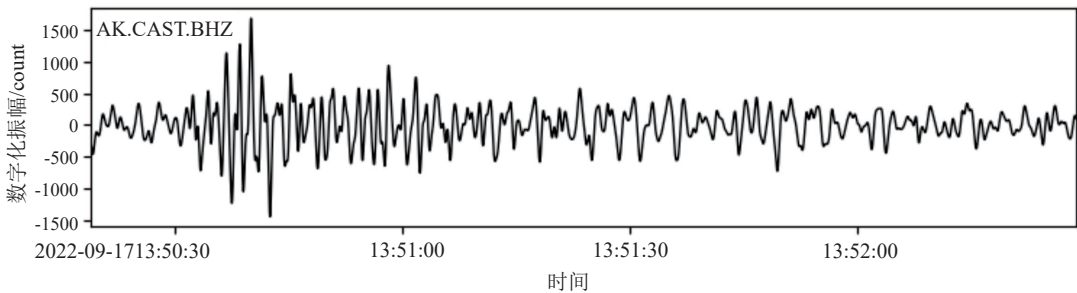


图 8 截取 P 波到达时前 10 s 至 P 波到达后 120 s 的地震记录
Fig.8 Seismic records extracted from 10 seconds before P-wave arrival to 120 seconds after P-wave arrival

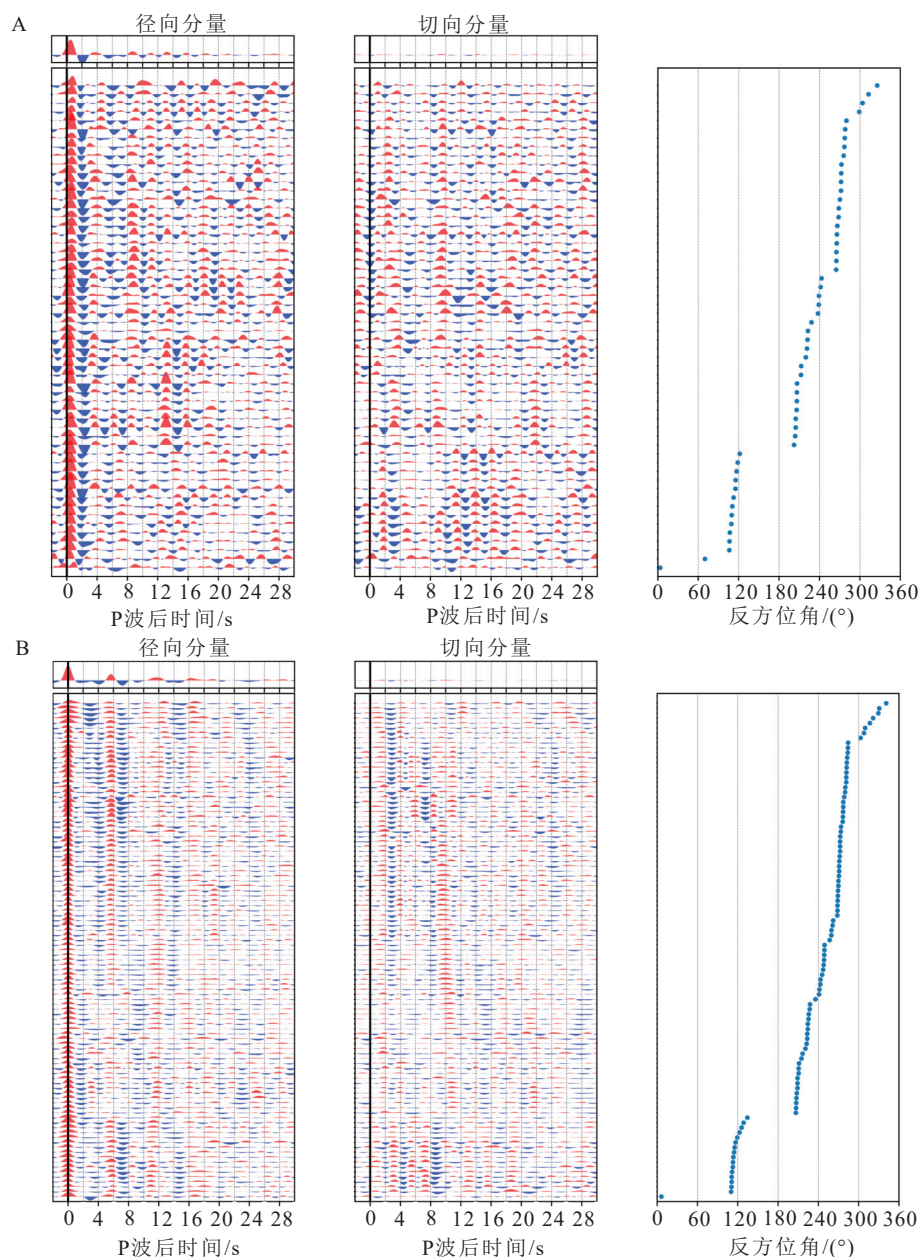


图 9 部分地震台站选取的接收函数显示

A 为 BPAW 台站下方按照后方位角排列的接收函数, B 为 HAD 台站下方按照后方位角排列的接收函数。

Fig.9 Display of selected receiver functions in some seismic stations

A represents the reception pattern beneath the BPAW station arranged according to the rear azimuth, and B represents the reception pattern beneath the HAD station arranged according to the rear azimuth.

起伏特征, 其中 410 km 界面主要的埋深范围为 380~450 km, 660 km 界面的主要埋深范围为 630~680 km, 剔除坏点之后, 在 410 km 总共获得 165 个 410 km 界面的深度值, 在 660 km 总共获得 188 个 660 km 界面的深度值。

图 10A 显示研究区域内 410 km 界面存在明显的纵向变化, 从低纬度到高纬度, 410 km 的埋深整体呈现“深-浅-深”的状态分布, 在 64°N、156°~141°W 的区域, 410 km 界面呈弧形上升, 埋深从 430 km 上

升到 390 km 左右, 呈东西向展布的特征。410 km 的界面主要在 382~438 km 之间变化, 平均埋深为 412.7 km。图 10B 展现出的 660 km 界面的分布特征大致与 410 km 界面的特征相似, 但整体上升的区域较 410 km 界面向南北方向分布的更广, 只有在 65°N 和 60°~62°N、147°~141°W 的区域出现下沉, 分别从 660 km 下沉至 680 km 和 670 km, 整体上研究区域的 660 km 深度层埋深为 634~688 km, 660 km 界面的平均埋深为 663.6 km。

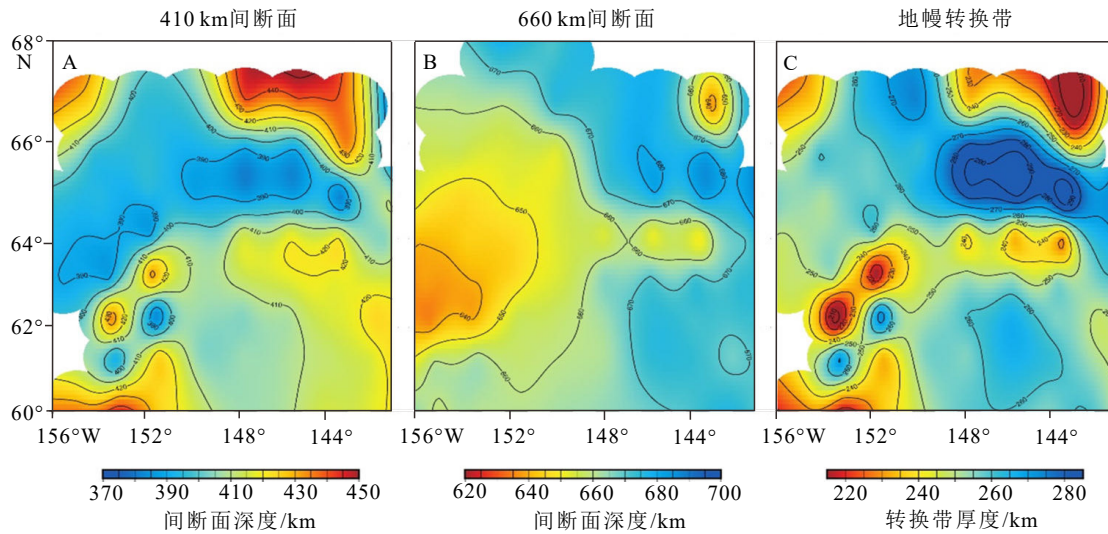


图 10 阿拉斯加山脉及育空高原地区下方的 410 km、660 km 间断面起伏与地幔转换带厚度

Fig.10 Topography of the 410 km and 660 km discontinuities and thickness of the mantle transition zone

在进行共转换点道集叠加成像时,反演得到的数据会受到上地幔速度结构的影响,获取的叠加图显示 410 km 和 660 km 的埋深与实际埋深情况可能存在差异,因此使用地幔转换带的厚度来反映其自身结构更为合理。将反演得到的 660 km 界面的数据与 410 km 界面的数据点相减之后得到地幔过渡带的厚度,根据图 10C 可以直观地观测到阿拉斯加中南部区域地幔转换带厚度的变化情况。在本文的研究区中,地幔转换带的厚度在 202~286 km 之间变化,上述现象也显示出该区域地幔转换带结构在纵向上的不均一性,其中在 64°N 附近出现了弧状的厚度减小的现象,最薄的区域可达到 202 km,小于全球地幔转换带的平均厚度,而在弧状区域的北侧,即 65°~66°N 的范围内,地幔转化带厚度出现明显增厚的现象,最厚处可达到 286 km,大于全球地幔转换带的平均厚度。再次结合 410 km 和 660 km 界面的起伏情况进行研究,在弧状的地幔转换带变薄的区域,410 km 界面并没有出现明显的抬升或下沉,界面埋深处于 410~420 km;在 660 km 界面的显示中,可以看到弧状地幔转换带变浅区域有明显的向上抬升,界面约处于 630~650 km。

通过三维共转换点道集叠加获取了研究区域 410 km 和 660 km 界面埋深的起伏情况,在两层界面上均发现了抬升和下沉,为了进一步了解和研究育空高原与阿拉斯加山脉北部连接处 410 km 和 660 km 界面的上突和地幔转换带厚度的减薄,本研究在形成三维共转换点成像的基础上,并考虑剖面上能够显示更多的台站数据,因此在研究区选择了 5 条测线进行了共转换点叠加计算并获取其剖面图

(图 11)。

测线 A1 沿 151°W 穿过阿拉斯加山脉和育空高原部分地区(60°~67°N)。在叠加剖面上,410 km 间断面上震相清晰、可连续追踪,埋深上可以看到明显的起伏,大约在剖面图测线长度约 320 km (62.8°N)的位置上,410 km 间断面出现明显抬升,由原来的 420 km 左右的埋深抬升至 390~400 km;同时,在间断面处于 420 km 的位置时,也能观察到剖面图在测线长度约 200~300 km (61.8°~62.7°N)内 410 km 间断面的起伏,其余范围内的起伏情况较为平稳。整体来看,410 km 间断面的埋深主要分布于 390~420 km,埋深稍小于全球平均水平。与 410 km 间断面不同,660 km 间断面震相清晰,埋深的横向起伏较为缓和,起伏位置主要发生在测线长度为 300~400 km (62.7°~63.6°N),660 km 间断面埋深主要在 650~660 km,多数在 660 km 左右,与全球平均值接近。

测线 A2 沿 145°W 横穿育空高原部分地区(60°~68°N)。在整个叠加剖面上,410 km 间断面上震相清晰、可连续追踪,埋深上在测线长度为 0~550 km (60°~64.9°N)内十分平稳,埋深处在 400 km 左右的深度,在测线长度为 550~750 km 上 410 km 间断面发生起伏,且出现震相消失的情况,直到在测线长度 760~880 km (66.9°~68°N)再次出现明显且连续的震相,且分别在 390~440 km 处形成两条震相清晰、可连续追踪的间断面,结合三维共转换点偏移叠加结果,由于 66.9°~68°N 区域处在共转换点叠加边缘,用于共转换点叠加的数量较少,结果存在不稳定性。与 410 km 间断面不同,

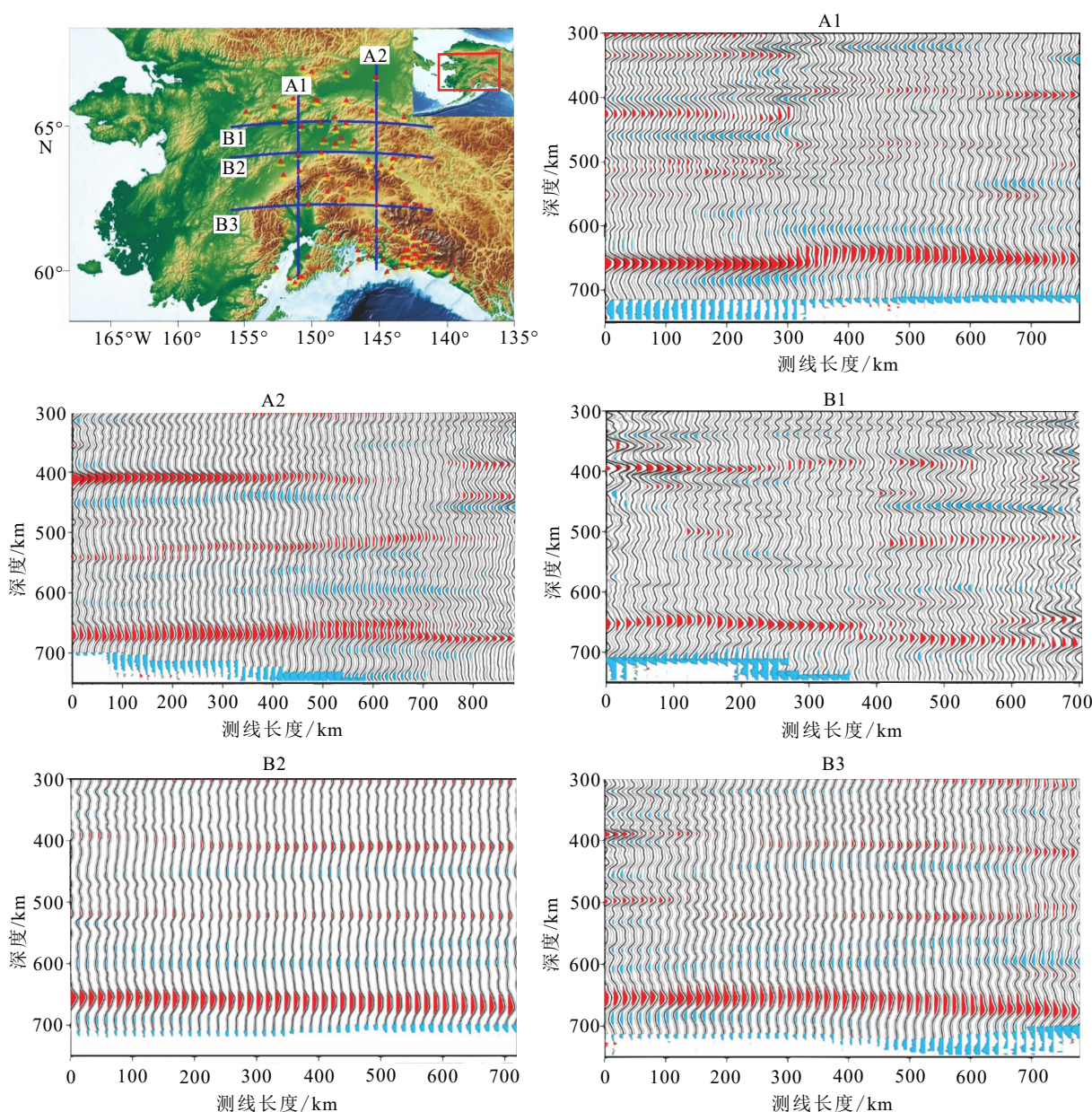


图 11 5 条测线位置及沿测线的共转换点叠加剖面图

Fig.11 The distribution of 5 profile lines and stacked profile of common conversion point along the test line

660 km 间断面震相清晰, 埋深的横向起伏缓和, 在测线长度 700~880 km (66.5°~68°N) 上出现下沉的现象, 660 km 间断面的整体埋深主要在 660~680 km 之间, 稍大于全球 660 km 间断面的平均埋深水平。

测线 B1 沿 65°N 横穿育空高原部分区域 (156°~1141°W)。由图 11-B1 可知, 在整个叠加剖面上, 410 km 间断面上震相较为清晰、可连续追踪, 在横向上可以清晰地看到 410 km 间断面的轻微起伏情况, 在测线长度为 260 km (150.5°W) 处, 410 km 的间断面开始缓慢抬升, 由原来的 400 km 左右抬升至 380~390 km, 整体来看, B1 测线的 410 km 间断面埋深较浅且起伏缓和, 主要分布于 380~400 km。

在后半段的 410 km 间断面的埋深稍小于全球 410 km 间断面的埋深水平。与 410 km 间断面不同, 660 km 间断面震相清晰, 埋深在横向上出现明显的起伏, 主要是在测线长度为 380 km (147.9°W) 的位置出现了间断面下沉的情况, 从埋深 660 km 位置处下降约 20 km 到达 680 km 的埋深处, 660 km 间断面的整体埋深主要为 650~680 km。

测线 B2 沿 64°N 横穿育空高原和阿拉斯加山脉交接地段 (156°~141°W)。在叠加剖面上, 410 km 间断面上震相清晰、可连续追踪, 埋深在测线长度为 200~720 km (141°~151.9°W) 十分平稳, 埋深处于约 410 km 的深度, 在测线长度为 0~200 km

(151.9°~156°W)上 410 km 间断面呈现出向上抬升的现象,最浅的埋深可达到 390 km,整体上,410 km 间断面起伏缓和,大部分处于 410 km 左右的埋深。与 410 km 间断面不同,660 km 间断面震相清晰,埋深在横向上几乎没有明显的起伏,整体埋深主要为 650~660 km,符合 660 km 间断面埋深的全球平均值。

测线 B3 沿 62°N,横穿阿拉斯加山脉部分区域(156°~141°W)。在叠加剖面上,410 km 间断面震相清晰、可连续追踪,无明显激烈的横向变化,埋深由西向东逐渐恢复到全球正常埋深,从 390 km 逐渐恢复至 410 km,并且在测线长度 250~600 km(144.5°~151.2°W)间断面埋深为 410 km 深度,在测线长度为 600~780 km(141°~144.5°W)时,间断面缓慢下沉至 420 km 深度处。660 km 间断面的分布形式与 410 km 间断面的情况相似,但更为平缓。660 km 间断面走势平缓,横轴上前 600 km(144.5°~156°W)的范围内基本稳定在 660 km 的深度,之后逐渐下沉至 680 km 的深度。660 km 间断面埋深稍大于全球平均水平。

当比正常地幔温度更低的地体(例如大洋板块)俯冲到地幔转换带时,且 410 km 的间断面具有正斜率,考虑到克拉布龙斜率的特征影响,深度为 410 km 的速度间断面会变浅;而具有负斜率的 660 km 速度间断面则会变得更深^[26]。随着一系列变化的发生,410 km 和 660 km 的速度间断面将会产生不同的反应:前者上升,后者下沉,地幔转换带的厚度也将增加(图 12)。因为太平洋板块属于大洋板块,当太平洋板块俯冲至地幔转换带内部时,穿过 410 km 间断面,温度低的太平洋板块使 410 km 的速度间断面抬升,埋深变浅,进而使地幔转换带增厚。本文的研究结果表明部分区域存在 660 km

速度间断面下降、埋深变深的情况,根据克拉布龙斜率的特征影响,当低温板块与 660 km 速度间断面接触时,会使间断面下降,因此认为存在太平洋板块已俯冲至地幔转换带底部的情況。

5 讨论

Van Stiphout 等^[13]利用接收函数共转换点叠加结果所显示的阿拉斯加中南部 410 km 间断面出现局部抬升至 390~395 km 深度处的现象,指出阿拉斯加中南部已经存在部分太平洋板块俯冲至地幔转换带内部的观点,不过并没有俯冲至转换带的底部。一些学者的研究也在一定程度上证实了这一结论,Gou 等^[18]在 2019 年采用三维 P 波速度与各向异性成像研究,指出阿拉斯加半岛下方存在一个高速异常体,该异常体从上地幔的顶部一直持续到深度大约 450~500 km 的位置。文章所提到高速异常体的走向基本上是东西方向,与阿留申俯冲带东段平行。该高速异常体一直向东延伸,到达阿拉斯加中南部地区下方。这一发现也验证北太平洋板块已俯冲到阿拉斯加半岛中南部下方转换带的观点。可以理解为,该高速异常体是与阿留申俯冲带东段平行的一条地质构造线,其延伸方向与阿拉斯加中南部地区下方的地质构造有关。

肖勇等^[11]在 2020 年利用 SS 前驱波方法研究得到的结果认为阿拉斯加中南部下方地幔转换带增厚是由库拉板块残留引起,其研究在叠加过程中采用了 2°的叠加半径,对于小尺度地质构造(板块残留)特征不利于分辨,同时他们认为接收函数和体波走时层析成像中探测的均是小尺度地质特征,如 Dahm 等^[9]在 2017 年的研究显示,通过接收函数和

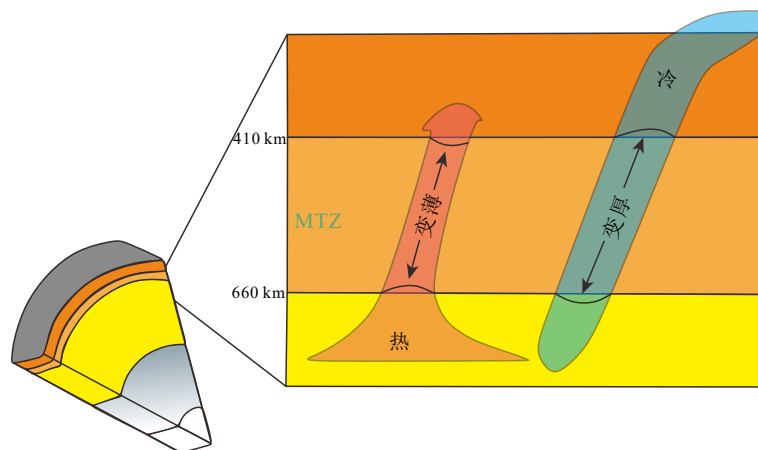


图 12 当有不同温度异常体进入地幔转换带时地幔转换带的厚度变化情况

Fig.12 The thickness variation of the mantle transition zone when masses of different temperatures intruded

体波走时层析成像,发现阿拉斯加中部地区下方410 km 间断面上升幅度很小。Burdick 等^[4]在2017年所观测到的高速异常体仅在东西方向有大尺度的展布,而在南北方向的展布尺度大约只有100 km。因此他们认为在目前的研究中,阿拉斯加俯冲带的北太平洋板块并未俯冲到转换带深度范围内,且在该地区尚未出现大规模的地质构造变化^[11]。

本研究在南北方向和东西方向分别设置了2条和3条测线,共转换点偏移叠加成像的结果显示,无论在南北方向还是在东西方向,都出现了地幔转换带层厚变厚的现象,且规模较大。Van Stiphout 等^[13]的研究显示仅有410 km 间断面发生了抬升,抬升至390~395 km 的深度范围,而在三维共转换点偏移叠加的图10中发现,不仅部分区域的410 km 间断面有抬升情况,一些区域的660 km 间断面同样存在下沉的现象,一般下沉至约680 km 的深度范围,在A2、B1、B3的测线上存在200~400 km 的区域显示660 km 间断面的下沉。

基于上述分析,认为阿拉斯加俯冲带下方的太平洋板块已经俯冲至地幔转换带内部,考虑到研究区内的部分区域存在660 km 间断面整体平缓下沉至大约680~690 km 深度的现象,推测阿拉斯加中南部部分区域太平洋板块可能俯冲至地幔转换带底部,但是需要进一步的研究和佐证。

6 结论

对阿拉斯加中南部区域内的103个地震台站所接收到的高质量地震事件信息进行接收函数计算,并对计算的接收函数进行二次挑选得到震相清晰的接收函数。进行三维共转换点偏移叠加时,使用圆形面元叠加,并设计面元半径为150 km,面元以55 km 的步长移动,最终获得了阿拉斯加州中南部下方三维410 km 和660 km 间断面的起伏和分布形态;在测线上进行共转换点偏移叠加时,根据测线上台站分布情况,选择适应于测线的单次叠加距离和移动步长,得到了测线下方410 km 和660 km 间断面的起伏情况。研究表明:

(1) 阿拉斯加山脉东部(60°~63°N、142°~149°W)以及阿拉斯加与育空高原交界的弧形区域(64°~66°N、141°~156°W)地幔转换带增厚,厚度为260~270 km。在阿拉斯加中南部区域,410 km 间断面在育空高原与阿拉斯加山脉交界处的弧形区域(64°~65.8°N、141°~156°W)出现了抬升现象,抬升幅度为0~20 km;同时660 km 间断面在阿拉

斯加山脉与育空高原交界的东部(64.8°~66°N、141°~148°W)和阿拉斯加山脉东部部分区域(60°~63°N、142°~146°W)出现下沉现象,下沉幅度0~20 km,其他区域660 km 间断面的埋深处于全球平均水平。

(2) 阿拉斯加俯冲带下方的太平洋板块已经俯冲至地幔转换带内,考虑到研究区内的部分区域存在660 km 间断面整体平缓下沉至670~680 km 的现象,认为在阿拉斯加山脉东部(60°~63.5°N、142°~146°W)以及阿拉斯加山脉与育空高原交界的东部(64.8°~66°N、141°~148°W)太平洋板块可能俯冲至地幔转换带底部,但需要进一步的研究和佐证。

参考文献 (References)

- [1] 柳存喜,王志. 南阿拉斯加地壳及上地幔结构成像研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7). [LIU Cunxi, WANG Zhi. Structure imaging of the crust and upper mantle in south of Alaska [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(7).]
- [2] Zhao D, Yamamoto Y, Yanada T. Global mantle heterogeneity and its influence on teleseismic regional tomography. Gondwana Research, 2013, 23(2): 595-616.
- [3] Martin-Short R, Allen R M, Bastow I D. Subduction geometry beneath south central Alaska and its relationship to volcanism. Geophysical Research Letters, 2016, 43(18): 9509-9517.
- [4] Burdick S, Vernon F L, Martynov V, et al. Model Update May 2016: Upper-Mantle Heterogeneity beneath North America from Travel-Time Tomography with Global and USArray Data. Seismological Research Letters, 2017, 88(2A): 319-325.
- [5] van der Meer D G, van Hinsbergen D J J, Spakman W. Atlas of the underworld: slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity [J]. Tectonophysics, 2018, 723: 309-448.
- [6] 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.
- [7] Ferris A, Abers G A, Christensen D H, et al. High resolution image of the subducted Pacific (?) plate beneath central Alaska, 50-150 km depth [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 214(3-4): 575-588.
- [8] Rondenay S, Abers G A, van Keken P E. Seismic imaging of subduction zone metamorphism [J]. Geology, 2008, 36(4): 275-278.
- [9] Dahm H H, Gao S S, Kong F S, et al. Topography of the mantle transition zone discontinuities beneath Alaska and its geodynamic implications: constraints from receiver function stacking. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(12): 10352-10363.
- [10] van Stiphout A M, Cottaar S, Deuss A. Receiver function mapping of mantle transition zone discontinuities beneath Alaska using scaled 3-D velocity corrections [J]. Geophysical Journal International, 2019, 219(2): 1432-1446.

- [11] 肖勇. 阿留申-阿拉斯加俯冲带和汤加-斐济俯冲带地幔过渡带结构研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所硕士学位论文, 2020. [XIAO Yong. Study of the mantle transition zone structure beneath Alaska-Aleutian subduction zone and Tonga-Fiji subduction zone[D]. Master Dissertation of Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2020.]
- [12] Qi C, Zhao D P, Chen Y. Search for deep slab segments under Alaska [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2007, 165(1-2): 68-82.
- [13] van Stiphout T, Kissling E, Wiemer S, et al. Magmatic processes in the Alaska subduction zone by combined 3-D b value imaging and targeted seismic tomography [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2009, 114(B11): B11302.
- [14] You T, Zhao D P. Seismic anisotropy and heterogeneity in the Alaska subduction zone [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(1): 629-649.
- [15] Ai Y S, Zhao D P, Gao X, et al. The crust and upper mantle discontinuity structure beneath Alaska inferred from receiver functions [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2005, 150(4): 339-350.
- [16] Maguire R, Ritsema J, Bonnin M, et al. Evaluating the Resolution of Deep Mantle Plumes in Teleseismic Traveltime Tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(1): 384-400.
- [17] Jiang C X, Schmandt B, Ward K M, et al. Upper mantle seismic structure of Alaska from Rayleigh and S wave tomography [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(19): 10350-10359.
- [18] Gou T, Zhao D P, Huang Z C, et al. Aseismic deep slab and mantle flow beneath Alaska: insight from anisotropic tomography [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2019, 124(2): 1700-1724.
- [19] Rossi G, Abers G A, Rondenay S, et al. Unusual mantle Poisson's ratio, subduction, and crustal structure in central Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2006, 111(B9): B09311.
- [20] Haeussler P, Coe R S, Onstott T C. Paleomagnetism of the late Triassic hound island volcanics: revisited [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1992, 97(B13): 19617-19639.
- [21] McClelland W C, Gehrels G E, Saleeby J B. Upper Jurassic-lower cretaceous basinal strata along the cordilleran margin: implications for the accretionary history of the Alexander-Wrangellia-Peninsular terrane [J]. *Tectonics*, 1992, 11(4): 823-835.
- [22] Langston C A. Corvallis, Oregon, crustal and upper mantle receiver structure from teleseismic P and S waves [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1977, 67(3): 713-724.
- [23] Vinnik L P. Detection of waves converted from P to SV in the mantle [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, 15(1): 39-45.
- [24] Phinney R A. Structure of the Earth's crust from spectral behavior of long-period body waves. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(14): 2997-3017.
- [25] Xu M J, He J. Seispy: Python module for batch calculation and post-processing of receiver functions [J]. *Seismological Research Letters*, 2023, 94(2A): 935-943.
- [26] 朱智昊. 利用接收函数方法研究中国中东部410和660千米间断面起伏[D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2018. [ZHU Zhihao. Topography of the 410-and 660-km discontinuities beneath the central and eastern China using receiver function[D]. Master Dissertation of University of Science and Technology of China, 2018.]