



西北太平洋板块边缘俯冲特征：来自堪察加壳幔速度成像的约束

刘晏廷, 钟成城, 江国明, 赵大鹏

Subduction Dynamics at the Northwestern Pacific Slab Edge: Constraints of Tomography in Kamchatka

LIU Yanting, ZHONG Chengcheng, JIANG Guoming, and ZHAO Dapeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.223>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于P波三重震相研究青藏高原上地幔速度结构及其动力学意义

Upper Mantle Velocity Structure and Its Dynamic Implications beneath the Tibetan Plateau from Triplicated Seismic P Waveforms

CT理论与应用研究. 2019, 28(2): 175–186

潜水波层析成像速度建模技术在鄂尔多斯黄土塬区的应用研究

Diving Wave Tomography and Reflection Tomography for PSDM Velocity Model Building of Complex Depth Imaging in Loess Tableland Area of Western Edge of Ordos Basin

CT理论与应用研究. 2021, 30(4): 417–424

基于三维层状介质模型地震层析成像正演网格研究

The Study of Seismic Tomography Forward Grid Based on 3D Layered Media Model

CT理论与应用研究. 2018, 27(1): 1–8

基于面波频散的三维横波速度方位各向异性层析成像方法

Method on 3D Tomography of S-wave Velocity Azimuthal Anisotropy by Using Surface-wave Dispersion Curves

CT理论与应用研究. 2020, 29(4): 381–397

非线性层析反演速度建模技术

Non-linear Tomography Inversion Technology for Velocity Modeling

CT理论与应用研究. 2017, 26(5): 543–551

基于射线追踪的成像域走时层析反演及其应用

Traveltime Tomography in Imaging Domain and Application Based on Raytracing

CT理论与应用研究. 2017, 26(1): 27–34



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘晏廷, 钟成城, 江国明, 等. 西北太平洋板块边缘俯冲特征: 来自堪察加壳幔速度成像的约束[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2024, 33(2): 135-148. DOI:10.15953/j.ctta.2023.223.

LIU Y T, ZHONG C C, JIANG G M, et al. Subduction Dynamics at the Northwestern Pacific Slab Edge: Constraints of Tomography in Kamchatka[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(2): 135-148. DOI:10.15953/j.ctta.2023.223. (in Chinese).

西北太平洋板块边缘俯冲特征: 来自 堪察加壳幔速度成像的约束

刘晏廷^{1,2}, 钟成城¹, 江国明^{1,2}, 赵大鹏³

1. 陆内火山与地震教育部重点实验室/中国地质大学(北京), 北京 100083
2. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083
3. 日本东北大学理学部地球物理系, 日本 仙台 9808578

摘要: 堪察加半岛位于太平洋板块的西北边缘处。太平洋板块沿堪察加海沟俯冲进入地幔, 而在板块边缘处, 其俯冲特征是否有不同? 本研究从 IRIS 网站下载 76 个固定台站记录到的来自 2239 个近震事件和 75 个远震事件的 77141 条 P 波到时数据, 利用近震-远震联合层析成像方法 (TOMOG3D) 获得堪察加地区壳幔内的三维 P 波速度结构。成像结果显示, 研究区域下方上地幔内存在非常明显的高速异常块体, 且与深源地震的空间分布高度一致。分析认为, 该高速异常体为俯冲的西太平洋板块, 俯冲角度和深度沿堪察加海沟由北向南均逐渐增加。地幔过渡带和下地幔顶部存在明显的高速异常块体, 可能是由于堪察加半岛下方的太平洋俯冲板块在边缘或深部发生岩石圈熔融或拆沉现象, 该高速异常块体即为拆沉的岩石圈。本文的成像结果中还可清晰地观察到 2 个板块窗口。堪察加地区浅部火山前线下方出现大范围的低速异常, 可能是由于俯冲板块脱水或流经板块窗口的地幔流热物质导致。

关键词: 天然地震层析成像; 堪察加半岛; 壳幔速度结构; 西北太平洋俯冲板块

DOI:10.15953/j.ctta.2023.223 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

堪察加半岛位于亚洲东北部俄罗斯远东地区, 地处太平洋板块的西北边缘。该半岛所属的鄂霍茨克微板块从北美板块独立出来, 楔形插入欧亚板块和太平洋板块之间, 南部与菲律宾海板块相接, 东部边界受到太平洋板块的强烈俯冲作用, 地震活动频繁^[1]。堪察加半岛是俄罗斯最大的火山带和地震活跃区之一, 岛上分布着 160 多座火山, 其中活火山 29 座。堪察加地区火山活动的历史可以追溯到中新世晚期。根据地理位置, 半岛上的火山分为两部分: 一部分是南北向横贯半岛中心地带的死火山, 这些死火山在 10 个百万年 (Ma) 以前是活动的, 而且由南向北一直延伸到阿留申-堪察加汇合带的延长线附近; 另外一部分是沿东部海岸线分布的活火山和死火山^[2-3] (图 1)。

近几十年来, 地震层析成像方法已经成为研究地球内部速度结构的重要工具。通过地表台站记录的地震波观测数据, 地震层析成像方法能够有效地对地下的三维速度结构进行反演, 获得三维 CT 图像^[4]。过去的研究表明, 堪察加地区下方俯冲的太平洋板块是引起该地区火山活动和地震活动的重要原因之一。已有的地震层析成像研究揭示了堪察加半岛下方的速度结构和中-深源地震的空间分布^[5-14], 并据此推断出太平洋板块的俯冲形态^[7], 这些研究也揭示了板块边缘上地幔周围明显的低速异常。Slavina 等^[11]在 1992 年首次提出了堪察加地区的地下三维速度模型, 随后, Gorbatov 等^[12]利用层析成像方法详细研究了位于堪察加半岛下方的俯冲太平洋板块内部的地震分布情况。他们的研究表明, 呈现高速异常的太平洋板块俯冲角度从南向北逐渐减小。Gorbatov 等^[12]对堪察加地区下方 200 km 深度内的三维 P 波速度异常结构进行了研究, 结果显示在堪察加地区的火山前线下方约 30 km 深度范围内存在明显的低速异常, 这些低速异常可能与火山线下方的岩浆活动密切相关。Koulakov 等^[6]研究

收稿日期: 2023-12-13。

基金项目: 国家自然科学基金 (西太平洋俯冲板块内橄榄石亚稳态楔的结构研究 (40904021))。

了位于堪察加半岛活火山群下方地幔浅部的速度异常以及火山岩浆来源,发现堪察加半岛火山线下方浅部地区存在大范围的低速异常,认为这与岩浆活动有关,与 Gorbato^[12]的结果一致。与此同时, Kou^[6]推测在堪察加半岛下方存在一个地幔热物质的上涌通道,俯冲太平洋板块下方的地幔热物质沿着该通道不断上涌,为舍维留奇火山和克柳切夫火山提供岩浆。

最近, Zhao^[9]利用面波各向异性层析成像方法研究了堪察加地区的横波速度结构以及方位各向异性分布。从他们的成像结果中,不难看出板块边缘处存在非常明显的低速异常,而且快波方向显示出低速异常物质的运移状态,很好地揭示出板块边缘处地幔热物质从弧后向弧前的运动特征。但由于他们的研究中所用的基阶面波最大周期为 125 s,使得研究深度仅达到 250 km,因此无法显示上地幔底部和地幔过渡带等深部的速度结构。Jiang^[14]利用远震层析成像方法研究了堪察加地区上地幔和地幔过渡带内的 P 波速度结构,但由于远震射线近乎垂直入射至地表(台站),因此地壳和上地幔顶部的垂直分辨率较差,即无法获得浅部的速度结构。若加入俯冲板块内的中-深震和地壳内的浅源地震,可大大改善地震射线的交叉程度,提高浅部和深部的垂向分辨率。

为了详细研究堪察加地区地壳、上地幔和地幔过渡带内的速度结构,本文利用近震-远震联合层析成像方法研究堪察加半岛下方的三维壳幔 P 波速度结构,尤其是更加细致地刻画出太平洋板块的俯冲形态,为更好地理解该地区的深部地球动力学过程提供新的地震学信息。

1 数据和方法

本研究采用近-远震联合反演的的方法获得研究区域下方的三维速度结构。其中近震数据来源于 IRIS 网站,经挑选后得到 1998 年 6 月至 2020 年 6 月间来自 2239 个近震事件的 76452 条绝对走时数据,所用台站共计 76 个,几乎覆盖整个堪察加半岛(图 1)。图 2 显示近震震中分布,从震源深度可以看出,既有浅源地震,也有深源地震,但 300 km 深度附近的地震明显缺失。

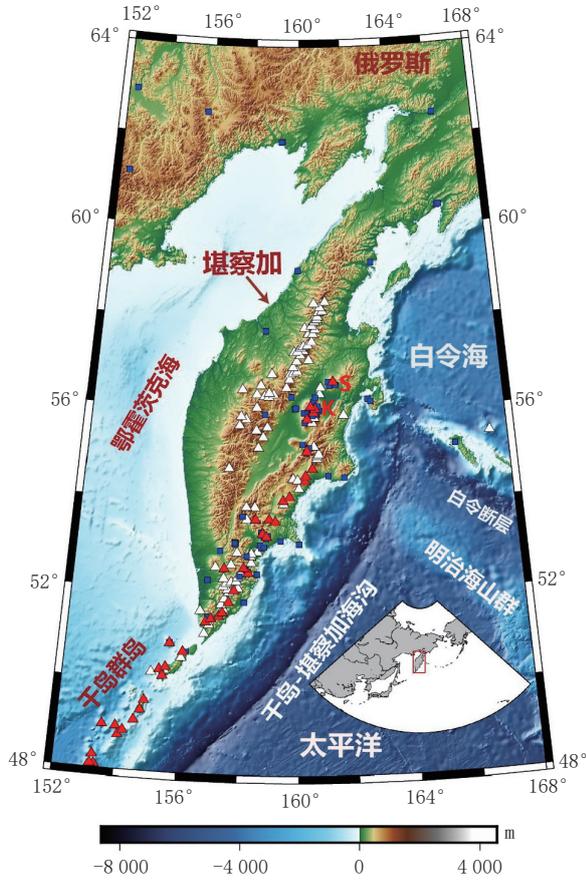
远震数据主要是 Jiang^[14]所使用的相对走时残差数据。远震事件的挑选原则:① 发震时间集中在 1998 年至 1999 年间;② 震中距在 30°~90°之间;③ 震级大于 5 级;④ 每个远震事件至少被 5 个地震台站所记录。经挑选后手动拾取 75 个远震事件的 689 条 P 波数据,拾取精度为 0.1~0.2 s。图 3 显示远震事件的分布,不难看出这些远震事件除大西洋地区和北冰洋地区外,基本涵盖研究区域周围的地区。

本文采用 TOMOG3D 走时层析成像方法^[15]。该方法已被广泛应用于研究全球不同地区的壳幔三维速度结构,涉及诸如板块俯冲、大陆裂解、地幔柱、岩石圈拆沉等地球科学问题^[16]。其原理简述为:① 将地球假定为各向同性并且具有完全弹性的层状介质,将研究区域剖分成许多网格,每个网格节点的速度扰动设为未知参数;研究区域内任意一点的速度扰动可由其周围 8 个网格节点的速度扰动值进行体积加权插值而得到。② 在 IASP91 模型^[17](全球一维速度模型)中,利用三维射线追踪技术^[18]确定震源与台站之间的射线路径并计算理论走时,同时获得走时对射线所经过网格节点上速度异常的偏导系数(即核函数),构建观测方程。③ 利用阻尼最小二乘法求解观测方程组,获得各网格节点上的速度扰动值,对初始模型进行修正,然后重复①~③的步骤;经过多次迭代,得到稳定的成像结果。此外,在反演过程中,近震震源位置保持不变,这是因为所选择的震源是经过 EHB 方法重定位后的^[19]。

2 检测板测试

天然地震层析成像的第 1 步是对研究目标体进行剖分,即网格化。为了确定最佳的网格剖分间距,可采用棋盘格测试法进行理论模型实验^[15,18]。主要包括 3 个步骤:① 制作棋盘格检测板:在相邻的网格节点上分别赋予 $\pm 3\%$ 的速度扰动值,构建理论三维速度模型;② 根据地震和台站的实际分布采用三维射线追踪技术计算得到理论走时,并随机添加方差为 0.1 s 的白噪声,即获得理论的

“观测走时”；③ 利用 TOMOG3D 方法^[15]反演理论“观测走时”，得到三维反演模型，并将其与理论模型 ($\pm 3\%$) 进行对比，若两者一致，则说明网格间距设置恰当，并且结果可信。



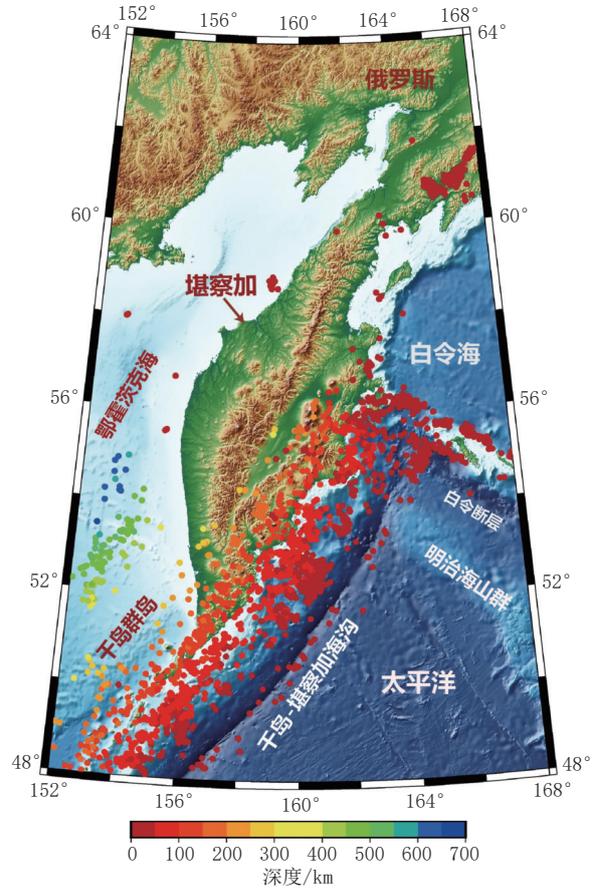
注：蓝色方块为台站，白色和红色三角形分别代表死火山和活火山；字母 S 和 K 分别代表舍维留奇火山和克柳切夫火山。

图 1 堪察加半岛地形与地震台站分布

Fig.1 Topography of the Kamchatka Peninsula and distribution of seismic stations (blue squares)

针对本文的研究区域，分别设置 3 种网格间距，在水平方向上分别为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 以及 $2^\circ \times 2^\circ$ ，而在垂向上则分成 11 层 (5、10、20、30、50、100、200、300、400、500 及 700 km)。0.5° 的网格较小，可分辨较小尺度的速度异常，但由于射线交叉程度有限，该网格下的分辨率并不理想；2° 的网格分辨率虽很好，但网格间距较大，无法分辨率较小尺度的异常体；1° 的网格间距可兼顾空间分辨率和分辨尺度。

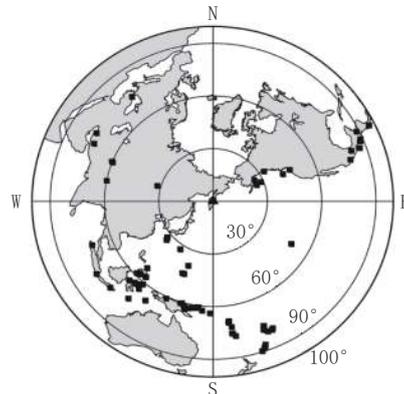
通过综合对比 3 种不同水平网格间距的检测板测试结果，最终确定 $1^\circ \times 1^\circ$ 为最佳的网格间距，如图 4 所示。从图中可以看出，地壳内的可分辨范围主要受限于台站的分布，但随着深度的增加，其高分辨率范围明显增大，这与远震射线和俯冲



注：色棒代表震源深度。

图 2 堪察加地区近震分布

Fig.2 Distribution of local earthquakes in Kamchatka



注：图中的黑色三角形代表研究区域的中心位置，黑色正方形代表远震事件，同心圆圈层旁边的数字代表圆圈上的点到中心点的距离。

图 3 远震事件分布

Fig.3 Distribution of teleseismic events used in the current study

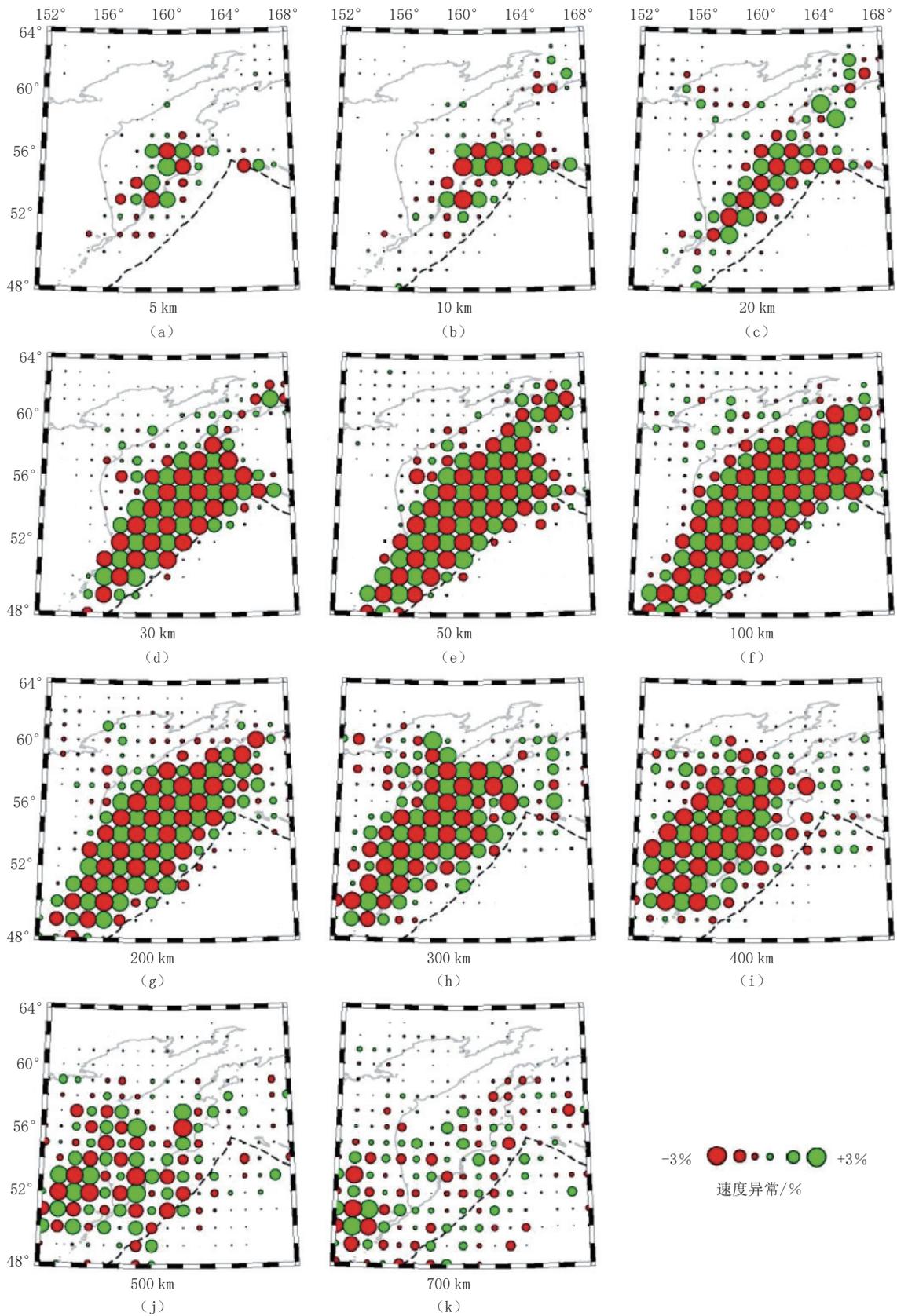


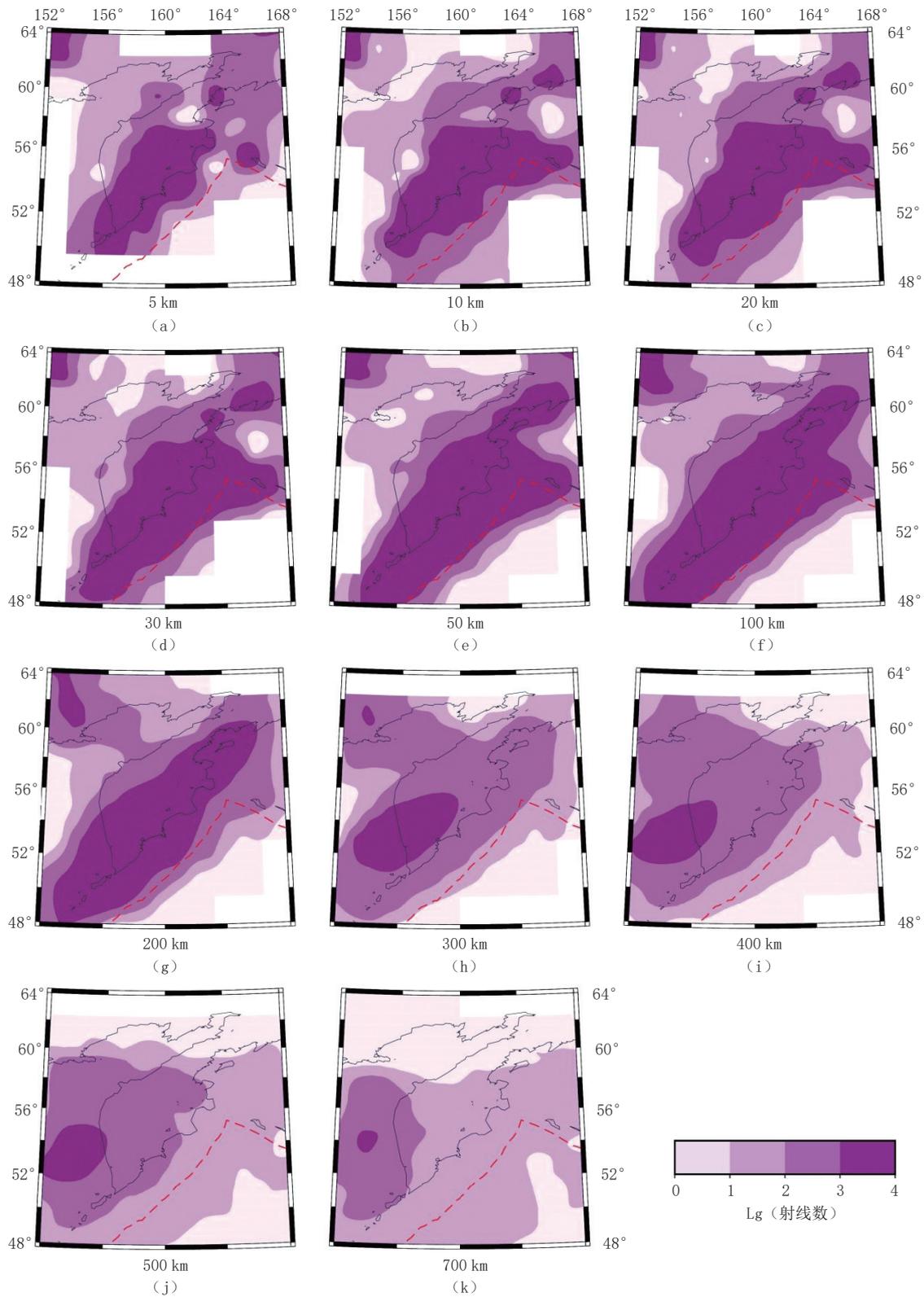
图 4 横向网格间隔为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的检测板测试结果

Fig.4 Results of a checkerboard test with a lateral grid interval of $1^\circ \times 1^\circ$

板块内的深源地震射线交叉分布相关。在 700 km 深度层上，由于射线交叉程度低，导致整体分辨率

低，但在研究区西南部下方仍存在较好的分辨率。

图 5 展示每个深度层上的射线分布情况，从图中不难看出，射线分布越密的地区，其检测板测



注：色棒颜色表示射线数的以 10 为底的对数。

图 5 不同深度上射线数分布
Fig.5 Count of rays at different depths

试结果越好, 即分辨率也较高。

在 TOMOG3D 方法^[16]中, 通常采用阻尼最小二乘法求解观测方程。为获得最佳的阻尼系数, 本研究将阻尼系数设置成不同的参数, 根据数据方差和模型方差绘制折中曲线(图 6)。为平衡数据方差和模型方差, 本文将 30 确定为最佳阻尼系数。此外, 为保持网格节点速度异常的连续性, 反演时水平和垂向均使用光滑因子(1000)。

3 成像结果

3.1 水平剖面结果

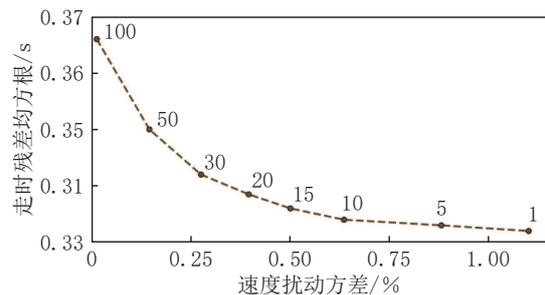
本研究将堪察加地区 0~700 km 深度内的地层分为 11 个水平剖面, 其成像结果如图 7 所示。在每个深度层上, 速度异常呈现出明显的横向不均匀性, 且出现较大范围的高速异常和低速异常区域。随着深度的增加, 速度异常的纵向变化也显著增加, 这表明研究区域下方的速度结构呈现出复杂性和多样性。

在地壳-上地幔顶部(5~50 km 深度, 图 7(a)~图 7(e)), 堪察加半岛东侧火山前线下方存在非常明显的低速异常, 而在堪察加海沟下方则存在较明显的高速异常。这些低速异常在 100 km 以下的深度范围内逐渐消失, 被高速异常替代(图 7(f)~图 7(i))。在 100~400 km 深度范围内, 堪察加半岛东南部(千岛-堪察加海沟与白令断层以南)下方存在明显的呈条带状分布的高速异常体, 并且随着深度的增加该高速异常体从堪察加半岛由海沟逐渐向垂直海沟的北西方向移动(图 7(f)~图 7(i))。值得注意的是, 在 200~300 km 深度层上, 在堪察加海沟与白令断层交汇处下方存在非常明显的低速异常(图 7(g)和图 7(h))。此外, 深度大于 200 km 的高速异常体的形态逐渐变得断断续续。在 500~700 km 深度层, 火山前线下方又出现明显的低速异常, 而在其西部和北部区域下方则出现高速异常(图 7(j)和图 7(k))。

3.2 纵剖面结果

为了进一步分析研究区域下方速度异常随深度的变化情况, 本研究设计 14 条纵剖面, 如图 8 所示, 其中 AA'-HH' 等 8 条剖面垂直于堪察加海沟, 而 II'-NN' 等 6 条剖面则基本平行于堪察加海沟。图 9 显示了垂直于海沟的 8 条纵剖面结果。在 AA'-DD' 剖面(图 9(a)~图 9(d))下方, 在地壳和上地幔内存在明显的高速异常体, 且一直延伸至约 400 km 深处。但在 EE'-FF' 剖面中, 该高速异常体的深度逐渐变浅, 甚至在 GG' 剖面中已消失殆尽。将剖面附近的地震投影到剖面图中, 不难看出震源位置与高速体基本重合, 这充分说明高速异常体为俯冲的太平洋板块。从 AA'-EE' 剖面(图 9(a)~图 9(e))可清晰地观察到高速异常体在 400 km 深度似乎被低速异常冲断了, 并且断掉的高速异常体滞留在地幔过渡带内。位于堪察加半岛南部的滞留高速异常体内还发生了深源地震, 说明这些高速异常体仍然保持着脆性^[7]。图 9(a)~图 9(f)还显示出火山下方存在非常明显的低速异常。这些低速异常体一方面可能与板块俯冲脱水有关, 另一方面可能来自于深部(地幔过渡带或下地幔)。

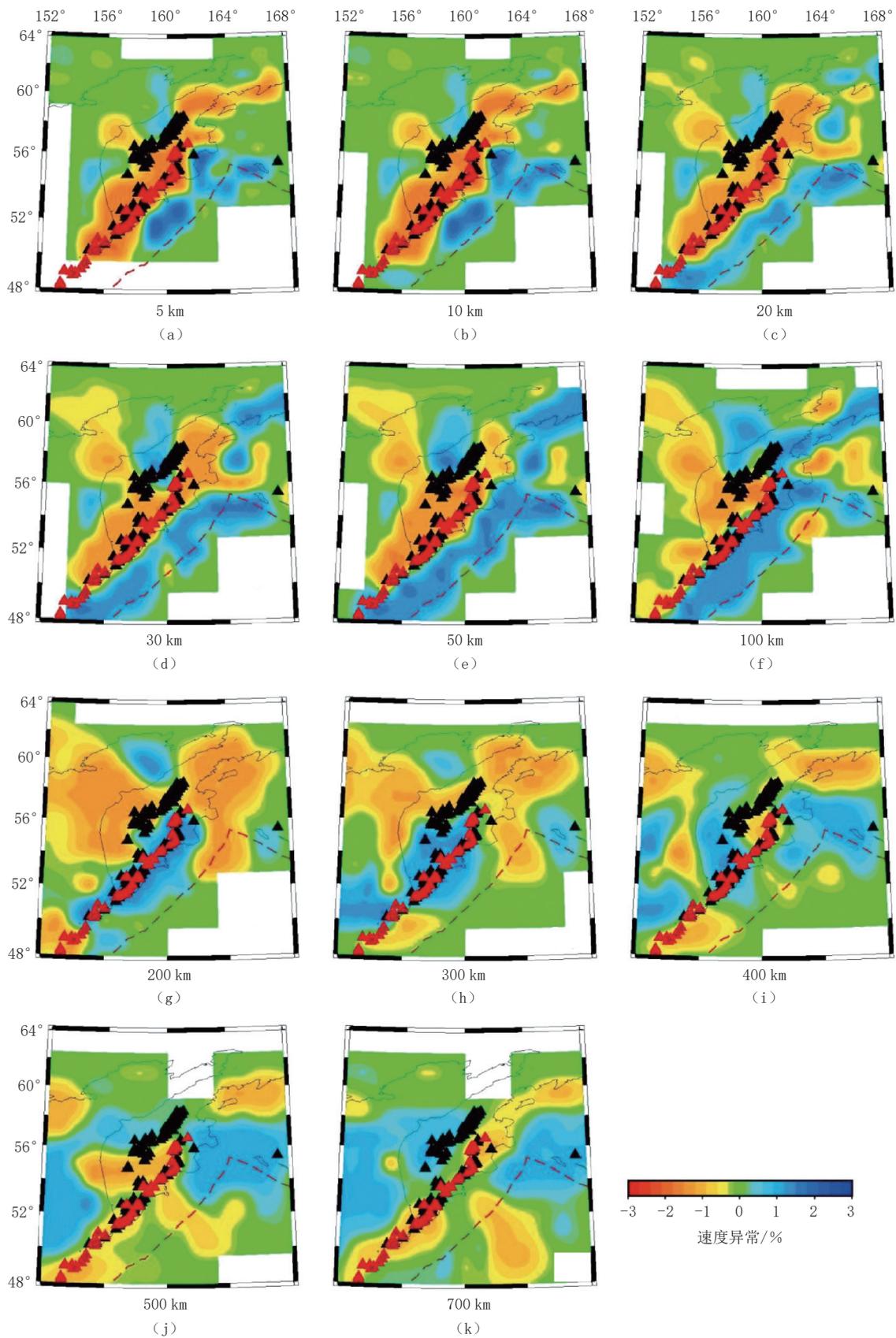
整体而言, 沿堪察加海沟俯冲的太平洋板块在地幔过渡带附近发生了断裂, 这种断裂似乎与深部上涌的热物质有关。断裂板块的上半部分的俯冲深度由南向北逐渐变浅, 而下半部分主要位于地幔过渡带内。俯冲板块上、下两部分之间的空隙被低速的热物质填充, 并且无深源地震发生。从图 2



注: 最佳阻尼系数为 30。

图 6 阻尼系数折中曲线

Fig. 6 Trade-off curve for selecting the optimal damping parameter



注：色棒表示速度异常（%），红色代表低速异常，蓝色则代表高速异常。

图 7 堪察加地区壳幔速度异常水平剖面图

Fig.7 Map views of P-wave velocity anomalies at different depths below Kamchatka

所示的震源分布图中,可清晰地看到深源地震存在一个“真空区”。从图 9 的速度异常图中,可推断该“真空区”可能是热物质由板块后方向地幔楔上涌的通道。

II' - NN' 剖面沿南西-北东走向,基本平行于堪察加海沟,如图 8 所示。 II' 剖面位于千岛-堪察加海沟处附近(图 10(a)),该剖面中的高速异常体主要位于深度小于 200 km 的范围内。 JJ' 剖面与堪察加半岛东侧的活火山前线基本重合(图 10(b)),可以看到火山前线下方的地壳及上地幔顶部区域内存在大范围的低速异常体,可解释为岩浆热物质。此外,还可以看到火山前线附近下方 100~200 km 深度范围内有较多的深源地震发生,恰好位于俯冲板块的上部。 KK' 剖面下方 300 km 深度附近也可发现该高速异常体(图 10(c)),并伴随着少量的深源地震,其余区域内存在明显的低速异常体。值得注意的是, LL' 剖面穿过堪察加半岛西侧的火山前线,其下方存在大范围的低速异常,而高速异常主要位于地幔过渡带内(图 10(d))。 MM' 和 NN' 剖面下方的速度结构特征与 LL' 剖面类似(图 10(e)~图 10(f))。

3.3 可恢复测试

为了检测地幔过渡带内的板块窗口成像结果的可靠性,本文进行可恢复测试,其过程与检测板测试基本一致,只是输入的速度模型不同。如图 11 所示,本文设计两种不同的输入模型。第 1 种模型是将天然地震层析成像结果直接作为输入模型(图 11(a)),所对应的输出模型为图 11(c)所示结果。对比图 11(a)和图 11(c),可以看出两者的速度异常基本一致。第 2 种模型是连续的俯冲板块,其内部的速度异常为 4%(图 11(b)),即假设板块不存在断裂。所对应的输出模型如图 11(d)所示,对比发现板块的连续性保持得非常好。这两种模型的可恢复测试结果充分说明本文所得到的天然地震层析成像结果是可信的,即俯冲板块在 400 km 深度处发生了断裂(存在板块窗口)。

4 讨论

本研究利用近震-远震联合层析成像方法^[15]获得了堪察加地区下方三维壳幔速度结构(深度至 700 km)。从成像结果中,可以清晰地看到 3 个不同的速度特征:① 堪察加海沟与阿留申走滑断层交接处下方存在明显的低速异常,通常认为交接处下方存在板块窗口,而这些低速异常则被解释为穿过板块窗口的高温流体;② 堪察加海沟西侧存在明显的高速异常,该高速体自海沟处一直延伸至地幔过渡带内,并且与和达-贝尼奥夫地震带保持着非常好的空间对应关系,通常被解释为沿堪察加海沟俯冲的太平洋板块,但该高速异常体在地幔过渡带内发生了断裂,表明俯冲板块在深部存在第二个板块窗口;③ 堪察加半岛活火山下方存在明显的低速异常,被解释为上涌的岩浆。这些岩浆一方面可能来自俯冲板块的脱水,另一方面可能与穿过板块窗口的高温物质有关。下面对这些速度特征进行讨论。

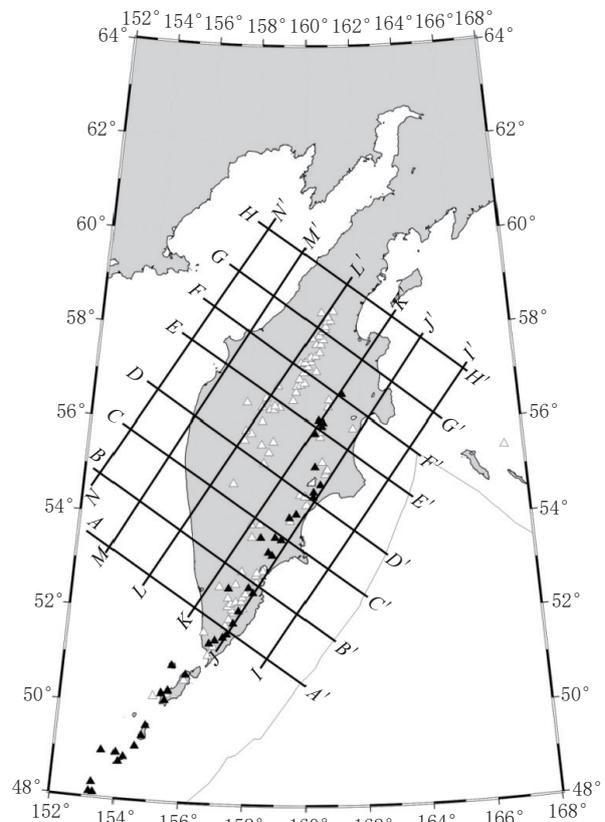
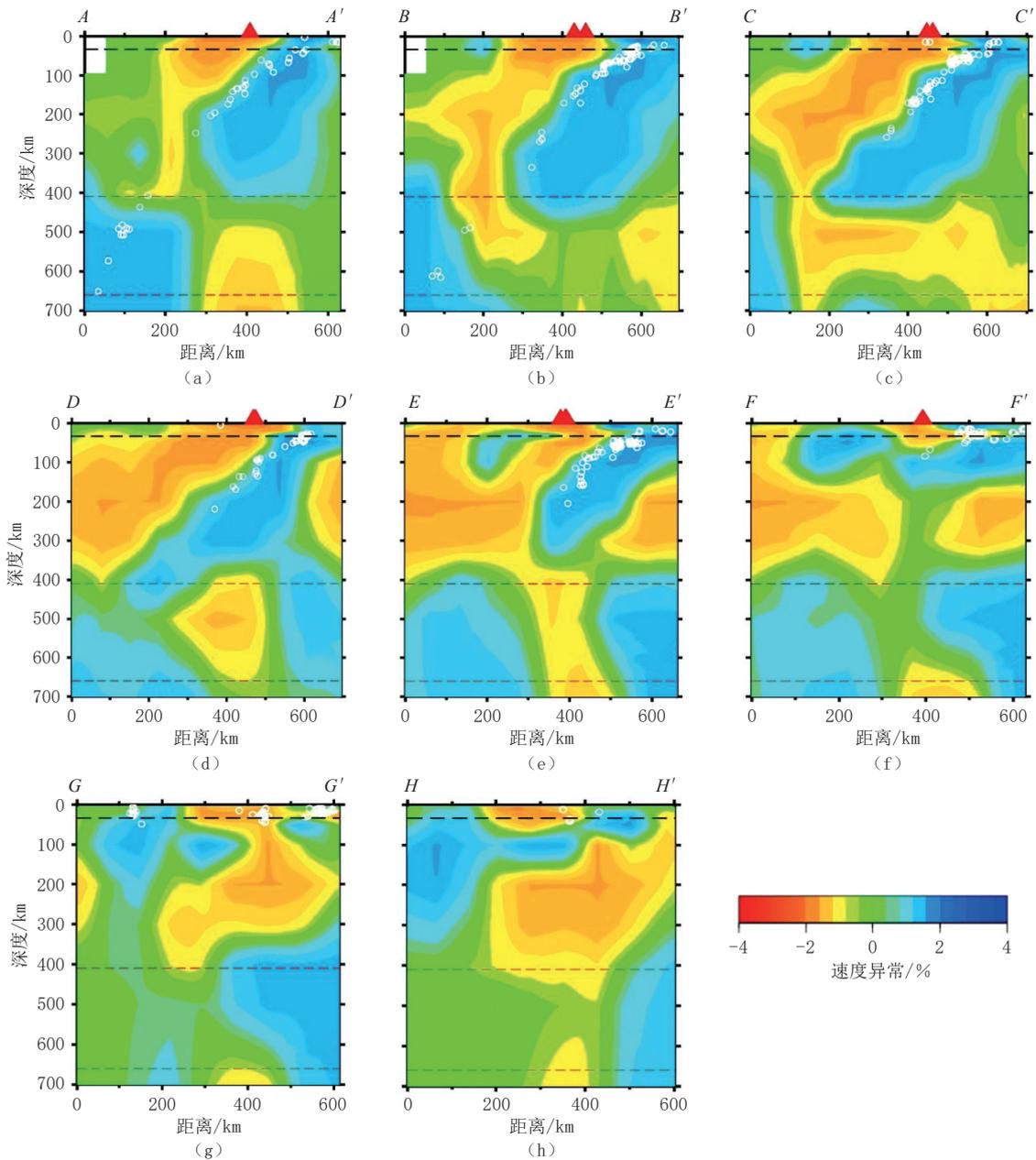


图 8 剖面位置分布

Fig.8 Distribution of profile lines



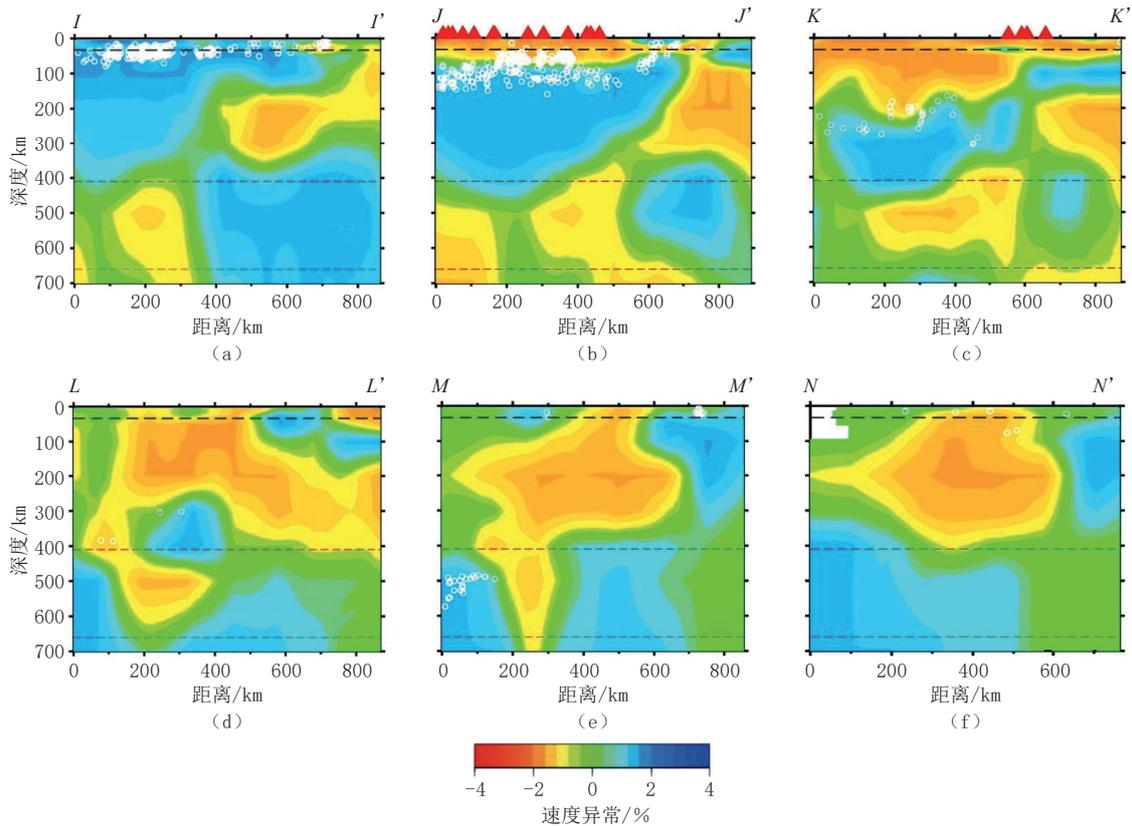
注：剖面图中白色圆圈表示剖面附近的地震；红色和蓝色分别表示低速和高速异常（见色棒）；图中3条虚线从上至下分别代表33 km处的莫霍面，410 km和660 km深度处速度不连续面。

图9 堪察加壳幔速度异常纵向剖面图(剖面 AA' - HH' ，位置见图8)

Fig.9 Vertical cross-sections of velocity anomalies along the profiles (AA' - HH') shown in Fig.8

4.1 板块窗口与板块撕裂

已有的研究表明在阿留申—堪察加海沟汇合带的下方存在着一个被称为“板块窗口”的通道区域^[6-7, 10, 14, 20-21]。俯冲板块后方的地幔热物质可以通过该“板块窗口”上涌到堪察加半岛火山前线下方，为火山前线北侧的舍维留奇火山、克柳切夫火山等活火山提供源源不断的岩浆物质^[6-7]。此外，靠近“板块窗口”的俯冲太平洋板块边缘长期受到上地幔高温物质的烘烤和消融作用，当这种剪切与消融作用达到一定程度时，边缘处的岩石圈可能发生部分熔融^[14, 20]。在俯冲的岩石圈结合不紧密的地方（比如伴随板块一起俯冲的海岭）有可能发生撕裂，最终导致板块拆沉。



注：剖面图上白色圆圈用来表示剖面附近相关的地震事件；红色区域和蓝色区域分别表示剖面图上的低速和高速异常区域（见色棒）；图上3条虚线从上至下分别代表33 km处的莫霍面，410 km和660 km深度处速度不连续面。

图 10 堪察加壳幔速度异常纵向剖面图（剖面 $II'-NN'$ ，位置见图 8）

Fig.10 Vertical cross-sections of velocity anomalies along the profiles ($II'-NN'$) shown in Fig.8

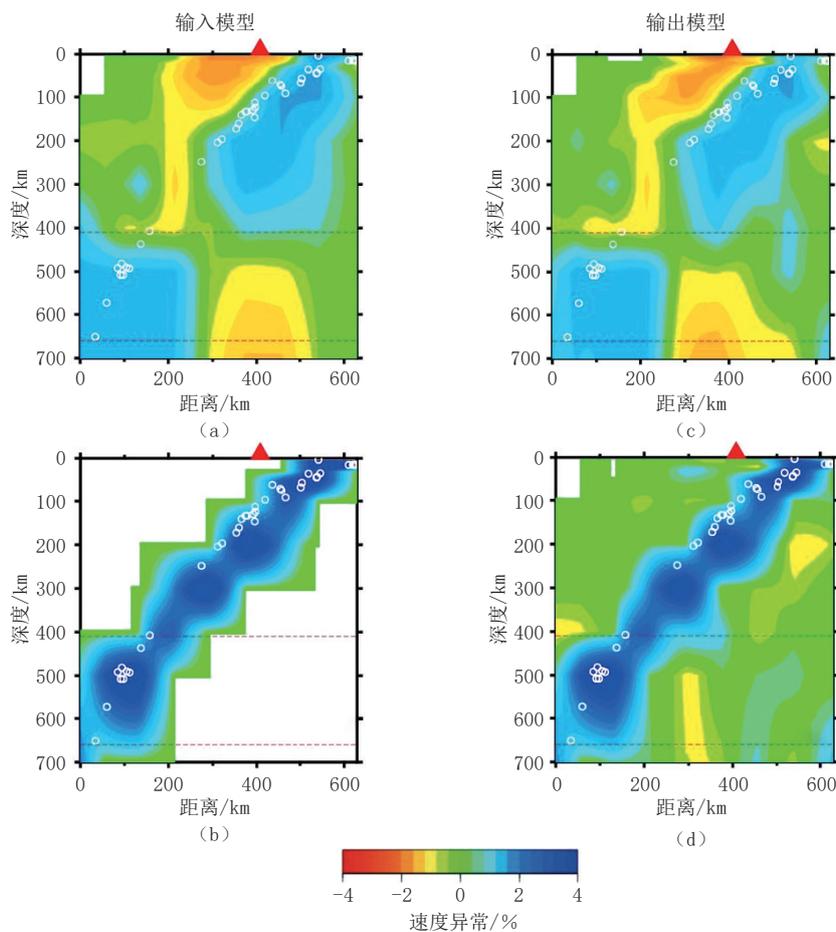
因此，本文认为俯冲太平洋板块边缘处存在板块窗口，在热物质流体的冲刷下，引起板块边缘处的岩石圈发生拆沉。

本文的层析成像结果显示，除板块边缘存在板块窗口，在地幔过渡带中还存在另一个板块窗口。但在 Koulakov 等^[7]的结果中，太平洋板块从堪察加海沟俯冲进入上地幔后，几乎是连续地进入地幔过渡带，只是在 400 km 深度处板块厚度变薄。在本文的最新结果中，堪察加半岛下方 400 km 深度处，太平洋俯冲板块明显发生了断裂。图 11 所示的可恢复测试结果可以明显地看出该断裂特征是可信的。主要因为本文同时使用了近震（尤其是深源地震）和远震的走时信息，提高了深部的空间分辨率，因此所得结果可更加清晰地显示出地幔过渡带内存在板块窗口的特征。

根据速度成像结果，本文绘制了三维透视图用以显示太平洋板块俯冲进入地幔过渡带后发生断裂（或拆沉）的形态（图 12）。在图 12 中，本文推测太平洋板块沿堪察加海沟俯冲进入地幔过渡带后，在板块下方热物质流体的溶蚀作用下，板块在 400 km 深度附近发生了熔断、拆离。然而 Koulakov 等^[7]更加强调 400 km 深度处板块形态变化可能与下方板块因自身重力产生的向下拉力和板块内橄榄石的相变有关。而滞留在地幔过渡带内的板块仍存在深源地震的活动，这说明这些拆离的板块仍保持着脆性或者板内发生了橄榄石亚稳态相变^[22]。但 Koulakov 等^[6]对堪察加地区的俯冲板块形态进行了另外一种解释：该地区可能发生过两次不同时期的大洋板块的俯冲，地幔过渡带内的高速体可能代表着早期俯冲的古板块。

4.2 俯冲板块形态与火山前线

本研究得到的层析成像结果表明靠近阿留申-堪察加海沟汇合带地区下方的太平洋板块俯冲深度



注：(a)和(b)为两种不同的输入模型，(c)和(d)为对应的输出模型。4个剖面结果均沿剖面线AA'（见图8）。

图 11 两种不同速度模型的可恢复测试结果

Fig.11 Results of two restoring resolution tests

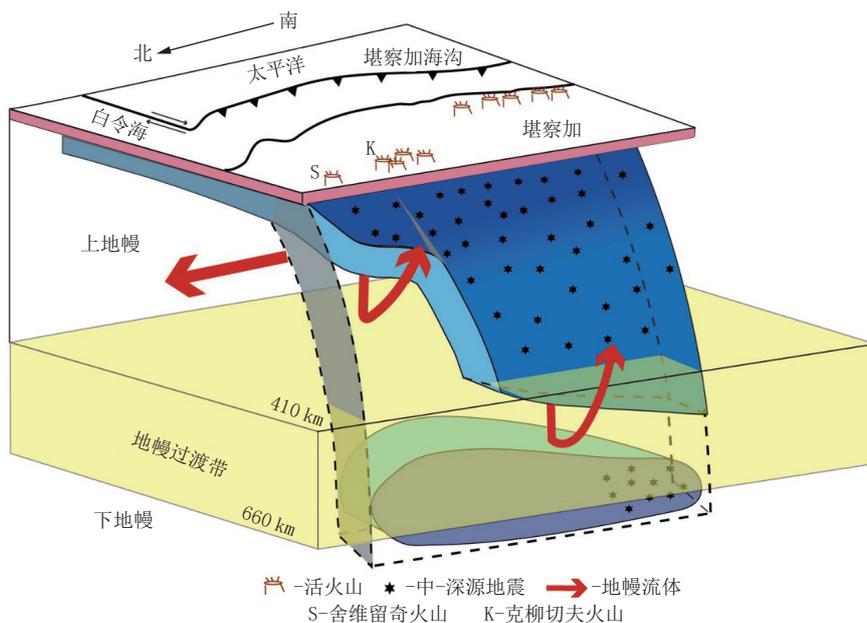


图 12 堪察加地区下方太平洋俯冲板块三维透视图^[14]

Fig.12 Three-dimensional perspective of the subducting Pacific slab beneath Kamchatka^[14]

较浅。而沿海沟自北向南,太平洋板块俯冲的深度逐渐变深(图9)。此外,从图9和图10中明显看出南侧的俯冲板块比北侧的厚。根据双发地震带和高速异常体勾勒的板块俯冲角度,南侧比北侧的大,即北部的板块俯冲较缓,而南部的较陡。简而言之,南侧的俯冲板块深、厚、陡,北侧则相反。

从图8中可以看出堪察加地区东部的火山前线并不完全与海沟平行。Zhao等^[15]的天然地震层析成像结果明确显示日本东北地区的火山前线分布与俯冲的太平洋板块之间存在密切联系:火山前线距离板块上边界的垂直距离大约100 km。根据该结论,不难推断堪察加地区东部的火山前线在其北侧明显西移应归因于下方板块较缓的俯冲角度。这与本文的成像结果完全一致。而导致北侧板块俯冲角度较缓的原因又与其所在的板块边缘位置相关。在阿留申-堪察加海沟汇合带附近,明治海山与太平洋板块一起俯冲到了堪察加地区下方。地热学模型显示:在进入堪察加海沟之前,位于明治-夏威夷热点下方的太平洋岩石圈已经由于延迟增厚现象而变得较薄^[23]。由于明治海山及太平洋北部板块的缺失,位于交汇带下方的剩余太平洋板块密度更低,负向浮力更小,所以其俯冲倾角较低,俯冲深度较浅。剩余板块较低的俯冲倾角也导致了舍维留奇火山、克柳切夫火山两座火山向西移动^[20]。

在本文的成像结果中,无论是水平剖面图(图7)还是纵向剖面图(图9和图10),均可看出火山下方存在明显的低速体,通常被解释为岩浆。这部分观测到的低速异常也与前人的层析成像结果一致^[6]。这种现象在其它的俯冲带地区也有类似的发现^[15,18]。但这些岩浆并不完全来自于100 km深度处板块的脱水,可能还与深部上涌的热物质有关。俯冲板块下方的地幔热物质通过“板块窗口”上涌到板块上方,而这些上涌的高温热物质又引起板块脱水^[24-25]。

5 结论

本文收集了堪察加地区固定台站记录的近10年的近震震相资料和1年的远震波形资料,进行近震-远震联合走时层析成像,获得了研究区域下方三维壳幔P波速度结构,所得主要结论如下:

(1) 堪察加地区下方上地幔内存在非常明显的高速异常块体。沿海沟方向,自北向南,该高速异常体存在的深度逐渐增加,且厚度和俯冲角度也增加。结合中-深源地震分布,将该高速异常体解释为俯冲的太平洋板块。

(2) 堪察加火山地区下方的低速异常,推测是由地下岩浆等热物质引起的。而这些热物质可能来自于俯冲板块的深部脱水或流经板块窗口的热物质。

(3) 堪察加地区存在两个板块窗口,一个位于半岛北部下方的俯冲板块边缘处,另一个位于地幔过渡带内。俯冲板块下方的热物质流经板块窗口到达地幔楔内,板块边缘处的岩石圈由于长期受到周围地幔高温物质的冲刷熔融作用而发生了拆沉。

致谢:感谢美国地震学研究联合会(IRIS)提供的震相数据。本文绘图中使用了GMT软件^[26]。

参考文献

- [1] 臧绍先, 宁杰远. 西太平洋俯冲带的研究及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 188-202. DOI:10.3321/j.issn:0001-5733.1996.02.006.
ZANG S X, NING J Y. Study on the subduction zone in Western Pacific and its implication for the geodynamics[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 39(2): 188-202. DOI:10.3321/j.issn:0001-5733.1996.02.006. (in Chinese).
- [2] HONTHAAS C, BELLON H, KEPEZHINSKAS P K, et al. New 40K-40Ar dates for the Cretaceous-Quaternary magmatism of northern Kamchatka (Russia)[J]. *Comptes Rendus-Academie des Sciences, Serie II: Sciences de la Terre et des Planetes*, 1995, 320: 197-204.
- [3] BRAITSEVA O A, MELEKESTSEV I V, PONOMAREVA V V, et al. Ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kurile-Kamchatka region, Russia[J]. *Bull Volcanol*, 1995, 57: 383-402.
- [4] 冯梅, 安美建. 基于面波频散的三维横波速度方位各向异性层析成像方法[J]. *CT理论与应用研究*, 2020, 29(4): 381-397. DOI:10.15953/j.1004-4140.2020.29.04.01.
FENG M, AN M J. Method on 3D tomography of S-wave velocity azimuthal anisotropy by using surface-wave

- dispersion curves[J]. *CT Theory and Applications*, 2020, 29(4): 381–397. DOI:10.15953/j.1004-4140.2020.29.04.01. (in Chinese).
- [5] KOULAKOV I. Seismic tomography of Kamchatka volcanoes[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, 63(11): 1207–1244. DOI:10.2113/RGG20214380.
- [6] KOULAKOV I, SHAPIRO N M, SENS-SCHÖNFELDER C, et al. Mantle and crustal sources of magmatic activity of Klyuchevskoy and surrounding volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125: e2020JB020097. DOI:10.1029/2020JB020097.
- [7] KOULAKOV I, DOBRETSOV N, BUSHENKOVA N, et al. Slab shape in subduction zones beneath the Kurile–Kamchatka and Aleutian arcs based on regional tomography results[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, 52: 650–667. DOI:10.1016/j.rgg.2011.05.008.
- [8] FAN J, ZHAO D. Subslab heterogeneity and giant megathrust earthquakes[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14: 349–353. DOI:10.1038/s41561-021-00728-x.
- [9] ZHAO L, LIU X, ZHAO D, et al. Mapping the Pacific slab edge and toroidal mantle flow beneath Kamchatka[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126: e2021JB022518. DOI:10.1029/2021JB022518.
- [10] GREEN R G, SENS-SCHÖNFELDER C, SHAPIRO N, et al. Magmatic and sedimentary structure beneath the Klyuchevskoy volcanic group, Kamchatka, from ambient noise tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(3): 280–392.
- [11] SLAVINA L B, PIVOVAROVA N B. Three-dimensional velocity models of focal zones and refinement of hypocenter parameters[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1992, 75(1/3): 77–88.
- [12] GORBATOV A, KOSTOGLODOV V, SUÁREZ G, et al. Seismicity and structure of the Kamchatka Subduction Zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8): 17883–17898. DOI:10.1029/96JB03491.
- [13] GORBATOV A, FUKAO Y, WIDIYANTORO S, et al. Seismic evidence for a mantle plume oceanwards of the Kamchatka–Aleutian trench junction[J]. *Geophysical Journal International*, 2001, 146: 282–288. DOI:10.1046/j.0956-540x.2001.01439.x.
- [14] JIANG G, ZHAO D, ZHANG G. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka[J]. *Tectonophysics*, 2009, 465: 190–203. DOI:10.1016/j.tecto.2008.11.019.
- [15] ZHAO D, HASEGAWA A, KANAMORI H. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B11): 22313–22329. DOI:10.1029/94JB01149.
- [16] ZHAO D. Seismic imaging of northwest Pacific and East Asia: New insight into volcanism, seismogenesis, and geodynamics[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103507. DOI:10.1016/j.earscirev.2021.103507.
- [17] KENNETT B, ENGDahl E. Traveltimes for global earthquake location and phase identification[J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105(2): 429–465. DOI:10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x.
- [18] ZHAO D, HASEGAWA A, HORIUCHI S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B13): 19909. DOI:10.1029/92JB00603.
- [19] ENGDahl E R. Application of an improved algorithm to high precision relocation of ISC test events[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 158(1): 14–18. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2006.03.007>.
- [20] LEVIN V, PARK J, BRANDON M, et al. Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver functions[J]. *Tectonophysics*, 2002, 358(1/4): 233–265. DOI:10.1016/S0040-1951(02)00426-2.
- [21] EGORUSHKIN I I, KOULAKOV I YU, SHAPIRO N M, et al. Structure of the upper crust beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes revealed from ambient noise tomography[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2021, 62(1): 68–82. DOI:10.2113/RGG20204238.
- [22] JIANG G, ZHAO D, ZHANG G. Detection of metastable olivine wedge in the western Pacific slab and its geodynamic implications[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2015, 238: 1–7. DOI:10.1016/j.pepi.2014.10.008.
- [23] DAVAILLE A, LEES M. Thermal modeling of subducted plates: Tear and hotspot at the Kamchatka corner[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226: 293–304. DOI:10.1016/j.epsl.2004.07.024.
- [24] FRANK W B, SHAPIRO N M, GUSEV A A. Progressive reactivation of the volcanic plumbing system beneath Tolbachik volcano (Kamchatka, Russia) revealed by long-period seismicity[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 493: 47–56. DOI:10.1016/j.epsl.2018.04.018.

- [25] FLEROV G B, CHURIKOVA T G, GORDEYCHIK B N, et al. The ziminy sopki Volcanic Massif: Geology and mineralogy of rocks (the Klyuchevskoy Volcanic Group, Kamchatka)[J]. *Earth Science*, 2019, 44(4): 19–34.
- [26] WESSEL P, LUIS J. The GMT/MATLAB toolbox[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18: 811–823. DOI:10.1002/2016GC006723.

Subduction Dynamics at the Northwestern Pacific Slab Edge: Constraints of Tomography in Kamchatka

LIU Yanting^{1,2}, ZHONG Chengcheng¹, JIANG Guoming^{1,2✉}, ZHAO Dapeng³

1. Key Laboratory of Intraplate Volcanoes and Earthquakes Ministry of Education/China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
3. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 9808578, Japan

Abstract: Kamchatka is located at the northwestern edge of the Pacific plate. The Pacific slab is subducting into the mantle along the Kamchatka trench. Are there any differences in subduction features near the edge? To answer this question, seismic tomography was applied to 77,141 P-wave arrival times of 2239 local earthquakes and 75 teleseismic events recorded at 76 permanent stations to study the three-dimensional velocity structure to a depth of 700 km below Kamchatka. A clear high-velocity anomaly was evident beneath the study region, which is consistent with the distribution of intermediate-depth and deep-focus earthquakes. This high-velocity anomaly was interpreted as the subducting Pacific slab with its subduction angle and depth gradually increasing from the north to south along the Kamchatka trench. Another high-velocity anomaly appeared in the mantle transition zone and the uppermost lower mantle, which may reflect a piece of detached oceanic lithosphere due to melting of the subducting slab near the slab edge. Two slab windows were also found, through which hot mantle materials flowed from the slab to the upper-mantle wedge. Large-scale low-velocity anomalies exist under the volcanic front, which reflect hot and wet upwelling flow in the mantle wedge due to the slab dehydration.

Keywords: seismic tomography; Kamchatka Peninsula; crustal–mantle velocity structure; northwestern Pacific slab



作者简介: 刘晏廷, 女, 中国地质大学(北京)地球物理学专业硕士研究生, 主要从事天然地震层析成像和深度学习的研究, E-mail: liuyanting@email.cugb.edu.cn; 江国明[✉], 男, 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院教授、博士生导师, 主要从事天然地震层析成像研究和教学工作, E-mail: jiang_guoming@cugb.edu.cn。