



阿拉斯加俯冲带构造不均匀性及其对板间逆冲型大地震的影响

王超平, 刘鑫, 赵大鹏, 郭玲莉, 苟涛

Structural heterogeneity in the Alaska subduction zone and its influence on interplate megathrust earthquakes

WANG Chaoping, LIU Xin, ZHAO Dapeng, GUO Lingli, and GOU Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

伊豆-小笠原-马里亚纳俯冲带地震成因

TRIGGERING CAUSES OF EARTHQUAKES ALONG THE IZU-BONIN-MARIANA SUBDUCTION ZONE

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 83-97

苏拉威西俯冲带结构与俯冲起始机制的三维地震观测

Introduction to the 3-D seismic observation of the north Sulawesi subduction zone and the study of initiation mechanism

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 131-137

1990年菲律宾 M_w 7.7级强震对马尼拉俯冲带静态应力触发影响

A PRELIMINARY STUDY ON STATIC STRESS TRIGGERING EFFECTS ON MANILA SUBDUCTION ZONE BY THE PHILIPPINE M_w 7.7 EARTHQUAKE 1990

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(6): 93-99

复杂断块地震绕射波分离及其影响因素

Separation of seismic diffraction wave and its influencing factors in complex fault blocks

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 212-219

西太平洋雅浦俯冲带的地貌及地层结构特征

GEOMORPHOLOGY AND STRATIGRAPHIC FRAMEWORK OF THE YAP SUBDUCTION ZONE, WESTERN PACIFIC

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 23-29

俯冲带水圈-岩石圈相互作用研究进展与启示

Interaction between hydrosphere and lithosphere in subduction zones

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 58-70



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王超平, 刘鑫, 赵大鹏, 等. 阿拉斯加俯冲带构造不均匀性及其对板间逆冲型大地震的影响 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 96-108.
WANG Chaoping, LIU Xin, ZHAO Dapeng, et al. Structural heterogeneity in the Alaska subduction zone and its influence on interplate megathrust earthquakes[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 96-108.

阿拉斯加俯冲带构造不均匀性及其对板间逆冲型大地震的影响

王超平¹, 刘鑫¹, 赵大鹏², 郭玲莉¹, 苟涛³

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. 日本东北大学理学部地球物理系, 日本仙台 9808578

3. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

摘要: 由于太平洋板块俯冲到北美板块之下, 阿拉斯加俯冲带弧前地区频繁发生板间逆冲型大地震。大地震的空间分布并不均匀, 且孕震机制仍不清晰。为了厘清阿拉斯加俯冲带弧前板间逆冲型大地震的成因机制, 本研究收集了2018—2019年间布设在阿拉斯加地区的268台地震台站记录到的远震波形数据, 从中测量了25~100 s周期的远震瑞利波振幅和相位数据。通过地震层析成像方法, 建立了一个新的阿拉斯加俯冲带上地幔三维剪切波速度模型。成像结果显示, 在阿拉斯加弧前之下, 存在着沿海沟方向的横向构造变化。在弧前板间逆冲型大地震震源区之下, 俯冲板片常呈现为显著的高速异常体, 并被具有明显低速异常的板下地幔所撑起。该特征表明, 在板间逆冲型大地震震源区之下发生了软流圈的聚集, 这可能增加了俯冲板片的浮力, 从而加强了俯冲板片与上覆板块间的耦合, 从而在一定程度上控制了弧前板间逆冲型大地震的形成。

关键词: 地震层析成像; 逆冲型大地震; 剪切波; 瑞利波; 阿拉斯加俯冲带

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041901

Structural heterogeneity in the Alaska subduction zone and its influence on interplate megathrust earthquakes

WANG Chaoping¹, LIU Xin¹, ZHAO Dapeng², GUO Lingli¹, GOU Tao³

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

2. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 9808578, Japan

3. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: The subduction of the Pacific Plate beneath the North American Plate causes frequent occurrence of interplate megathrust earthquakes in the Alaska forearc. However, the distribution of megathrust earthquakes is not uniform and their causal mechanism is still not clear. To clarify this issue, we collected teleseismic waveform data recorded at 268 seismic stations deployed in Alaska during 2018-2019, and measure the teleseismic fundamental mode Rayleigh-wave amplitude and phase data at periods of 25~100 s. We applied a seismic tomographic method to determine a new three-dimensional shear-wave velocity model of the upper mantle beneath Alaska. Our tomographic results revealed lateral structural variations along the trench beneath the Alaska forearc. Beneath the source zones of megathrust earthquakes, the subducting slab exhibits an obvious high-velocity anomaly and is supported by a slab with obvious low-velocity anomalies. These features suggest possible convergence of the asthenosphere beneath the source zones of the megathrust earthquakes, which may strengthen the coupling between the subducting slab and the overlying plate by increasing the slab buoyancy, and thus affect the generation of the megathrust earthquakes.

Key words: seismic tomography; megathrust earthquake; shear wave; Rayleigh wave; Alaska subduction zone

阿拉斯加俯冲带是太平洋板块沿阿留申海沟俯冲到北美板块之下形成的。俯冲作用造成了阿

拉斯加弧前巨大逆冲断层带中的大地震 ($M_w \geq 7.0$), 例如, 众所周知的1964年阿拉斯加9.2级大地

资助项目: 国家自然科学基金项目“东北日本俯冲带弧前深部构造特征及其对板间逆冲型大地震的影响”(41972211); “东南亚环形俯冲系统与西太平洋间深部通道(南纬0°~3°)各向异性和地幔交互机制研究”(42106071); 日本科学促进协会项目(19H01996)

作者简介: 王超平(1997—), 男, 硕士研究生, 从事地球深部构造研究, E-mail: wangchaoping@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 刘鑫(1985—), 男, 副教授, 从事地球深部构造及演化研究, E-mail: liuxin@ouc.edu.cn

收稿日期: 2024-04-19; 改回日期: 2024-07-09. 周立君编辑

震^[1]和 2021 年 8.2 级大地震^[2]。阿拉斯加弧前巨大逆冲断层带向海一侧可延伸到阿留申海沟附近^[3], 被 1946 年阿留申群岛海啸地震^[4-5]和 2018 年海沟附近的浅部慢滑移事件^[6]所限定。阿拉斯加弧前巨大逆冲断层带向陆一侧, 沿阿拉斯加半岛可深达 50 km 左右, 但在 1964 年 Mw 9.2 大地震的震源区附近逐渐上升到约 25 km 的深度, 其底界被深部慢滑移事件^[7-11]、低频地震和构造震颤^[12-13]所限定。这种在俯冲板片上表面随深度而变化的破裂特性, 主要归因于随深度增加的温度和压力所引起的岩石摩擦性质的变化^[14-16]。

在阿拉斯加弧前巨大逆冲断层带中, 从西到东沿着海沟方向, 逆冲型大地震的分布具有明显的分段特征^[17](图 1a)。此外, 在该断层带中, 断层闭锁程度的分布也是不均匀的^[5, 18-20]。最近, 2021 年的 Mw 8.2 和几次 Mw ~ 7 逆冲型大地震发生在 1938 年 Mw 8.3 大地震的震源区附近, 此处滑移亏损量相对较高^[2, 3, 20-24]。相比之下, 在过去的几十年里, 只有少数 (Mw ~ 6) 逆冲型大地震发生在 1946 年 Mw 8.2 大地震的震源区附近, 此处滑移亏损量相对较低^[20]。此外, 在 1964 年 Mw 9.2 地震的震源区没有观察到逆冲型大地震 (Mw ≥ 6), 此处断层闭锁程度更高但并不均匀^[5, 18, 25]。

为了阐明阿拉斯加弧前板间逆冲型大地震的成因机制, 本研究利用阿拉斯加两栖地震实验

(Alaska Amphibious Community seismic Experiment, AACSE) 台网^[26]和布设在阿拉斯加地区的其他地震台网记录的地震波形数据, 测量了 25~100 s 周期的远震基阶瑞利波振幅和相位数据, 通过地震层析成像方法, 建立了新的阿拉斯加俯冲带上地幔三维剪切波速度模型。本研究揭示出, 沿海沟方向的横向构造变化控制了阿拉斯加板间逆冲型大地震的发生。

1 地震数据

本研究使用了 268 个地震台站记录的地震波形数据, 这些台站部署在阿拉斯加半岛及其周边的陆地和海底, 范围从 1946 年 Mw 8.2 大地震的震源区到 1964 年 Mw 9.2 大地震的震源区(图 1a), 这些台站属于 AACSE 台网(XO)和部署在阿拉斯加地区的其他地震台网(AK、AT、AV、GM、TA 和 YG)。

首先从国际地震中心(ISC)公布的全球地震目录中选择了 2018—2019 年间发生的 298 个远震事件(图 1b)。这些远震事件的震源深度小于 100 km, 震级大于等于 5.8 级, 震中距离约为 30°至 150°。然后从地震学联合研究机构(IRIS)数据管理中心下载了这些远震事件的波形数据。本研究使用 Liu 和 Zhao 的方法^[27], 从垂向分量(Z)的地震波形中测量基阶瑞利波的振幅和相位数据(图 2)。图 2 展示了

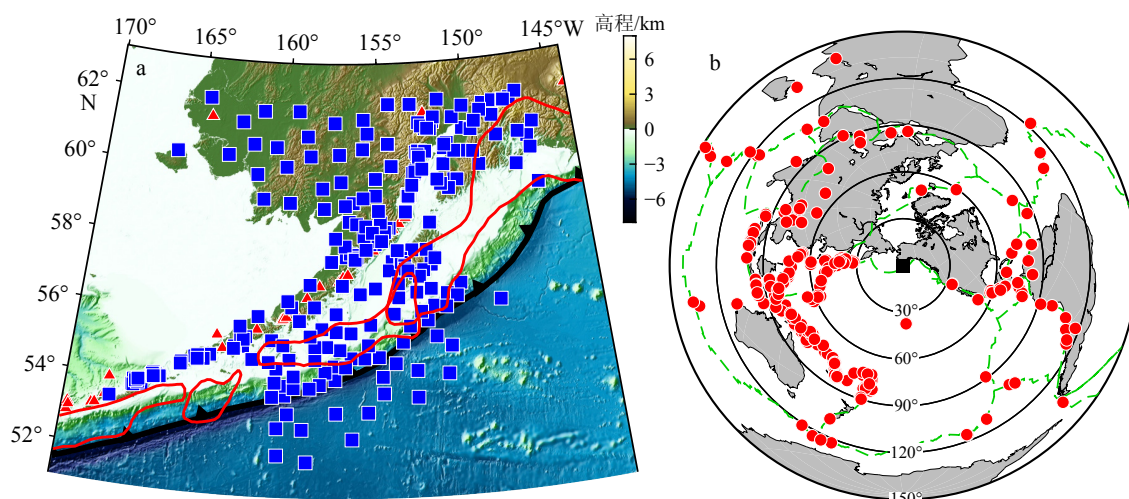


图 1 本研究使用的地震台站和远震事件分布图

a: 地震台站分布(蓝色方块), 红色三角形代表活火山, 黑色锯齿线代表阿留申海沟, 红线指示了 1957 年、1946 年、1938 年和 1964 年沿着海沟从西向东展布的板间逆冲型大地震的余震区^[17]; b: 远震事件(红色圆点), 黑色方块指示了研究区位置, 绿色虚线表示板块边界。

Fig.1 Distributions of seismic stations and teleseismic events used in this study

a: Distribution of seismic stations (blue squares), red triangles denote active volcanoes, black sawtooth line denotes the Aleutian trench, red lines show aftershock zones of the 1957, 1946, 1938, and 1964 megathrust earthquakes from the west to east along the trench^[17]; b: distribution of teleseismic events (red dots), black square shows the study area, green dashed lines denote plate boundaries.

数据处理过程中的一个例子。2018年9月5日发生的一次地震事件(震级 6.5, 震源深度 35 km), 如图 2a 中的蓝色五角星所示。图 2a 中的红色方块表示部署在阿拉斯加地区的地震台站 XO.ET19。图 2b 展示了 XO.ET19 台站记录的去除了仪器响应后的垂向、2 道和 1 道分量上的地震波形。首先采用群速度 2.5~5.0 km/s 范围内的自适应时间窗分离出去除了仪器响应后的垂向分量上的宽频瑞利波, 如图 2c 中的红线所示; 第二步, 将分离出的宽频瑞利波, 进行与周期相关的高斯滤波, 得到 25~100 s(间隔为 5s)的 16 个不同周期的瑞利波。图 2c 中的蓝线表示高斯滤波后得到的 16 个不同周期的瑞利波波形。然后计算出这 16 个不同周期瑞利波的包络线(图 2c 中的黑线)。计算出每个包络线的正则化

振幅, 并将其绘制在图 2d 中; 之后选择各个周期的最佳群速度到达时刻(图 2c 和图 2d 中的绿色菱形), 选好每个周期的最佳群速度到时后, 提取出各个周期最佳群速度到时前后 450 s 的瑞利波; 最后, 通过傅立叶分析计算出瑞利波的振幅和相位。在每个周期, 本研究只保留了至少被 10 个地震台站所记录的事件。由此, 本研究中使用的每个周期的振幅和相位数据对的数量范围为 10803 至 18312。

2 地震层析成像方法

本研究首先采用双平面波法^[28-29]开展瑞利波相速度层析成像, 求得阿拉斯加俯冲带 25~100 s 周期范围内的二维相速度模型。然后使用 Liu 和

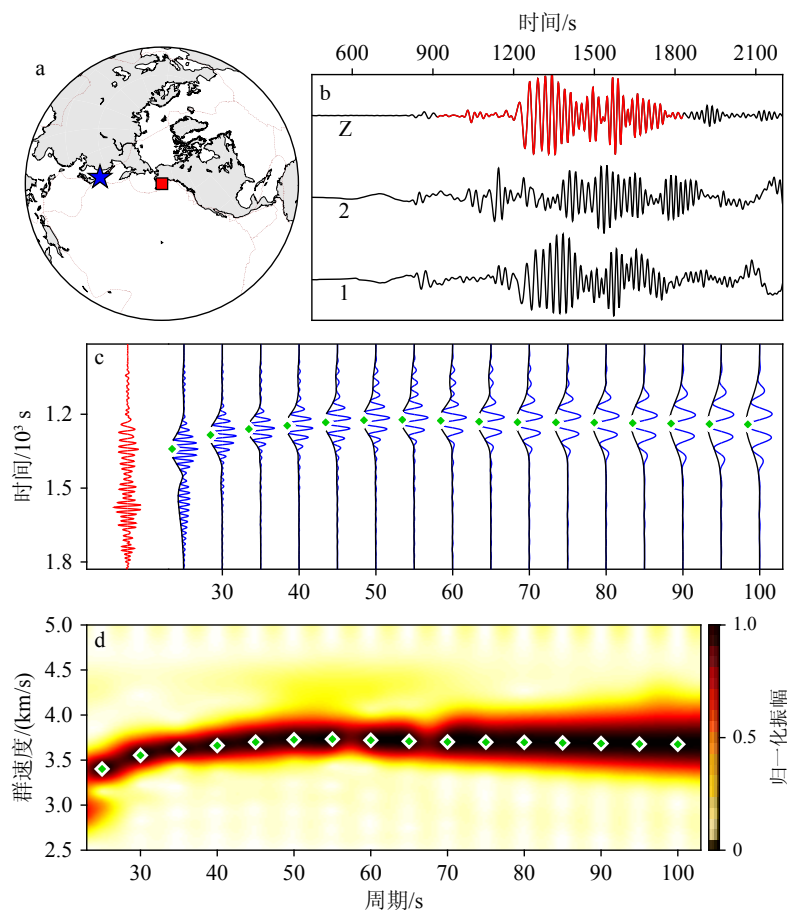


图 2 瑞利波数据测量示例图

a: 2018 年 9 月 5 日发生的一次地震事件(震级 6.5, 震源深度 35 km)(蓝色五角星), 红色方块表示地震台站 XO.ET19; b: 台站记录到的宽频带三分量地震图; c: 高斯滤波后 25~100 s 周期的瑞利波(蓝线), 黑线为包络线; d: 归一化的包络线振幅。

b 和 c 中的红线表示宽频瑞利波, c 和 d 中的绿色菱形表示在每个周期拾取的基阶瑞利波群速度的到达时刻。

Fig.2 An example of measuring teleseismic Rayleigh-wave data

a: A teleseismic event (M6.5, focal depth 35 km) took place on September 5, 2018 (blue star). Red square denotes a seismic station XO.ET19; b: broadband three-component seismograms of the teleseismic event recorded at the station shown in (a); c: gaussian-filtered Rayleigh waves (blue lines) in the periods of 25~100 s. Black lines are envelopes; d: normalized amplitudes of the envelopes. Red lines in (b) and (c) denote broadband Rayleigh waves. Green diamonds in (c) and (d) are the arrival of the fundamental mode Rayleigh-wave picked group in each period.

Zhao 的方法^[27], 将获得的相速度模型反演为三维剪切波速度模型。为了确认三维剪切波速度模型的主要特征, 本研究还开展了大量的分辨率测试。

2.1 瑞利波相速度平均频散曲线

为了反演瑞利波振幅和相位数据, 需要减少多路径干扰效应。这种干扰效应可能是由于研究区外的地震速度不均匀性引起的远震瑞利波在特定周期上的振幅变化。为了处理这个问题, 本研究采用了双平面波法^[28], 同时考虑了有限频效应^[29]。双平面波法假设远震瑞利波在一个周期内可以简化为两个水平传播的平面波的叠加。这两个平面波可以使用它们各自的相位、振幅和方位角来表示^[28]。根据双平面波法, 在反演过程中, 将每个周期每个远震事件的归一化振幅和校正后的相位数据转化为实部和虚部进行计算。

在实际操作中, 首先根据 Liu 和 Zhao 提出的步骤^[27]确定研究区的瑞利波相速度平均频散曲线。对于给定的特定周期下的瑞利波相速度, 使用双平面波法确定远震事件的双平面波参数^[28], 并计算实部和虚部残差的均方根值。瑞利波相速度的取值范围为 3.0~5.0 km/s, 间隔为 0.05 km/s。在周期 25~100 s 范围内, 以 5 s 为间隔, 对得到的残差均方根在每个周期上进行归一化处理后绘制在图 3 中。根据图 3 中展示的残差均方根分布特征, 选取了研究区瑞利波相速度平均频散曲线, 即图 3 中的黑色线, 其将用于后续的相速度层析成像中。

2.2 瑞利波相速度层析成像

为开展瑞利波相速度层析成像, 本文建立了三维网格用以表征相速度^[27, 30]。网格点由经度、纬度

和周期表示。网格的周期范围是 25~100 s, 间隔为 5 s。横向网格间距为纬度 0.5°, 经度 1.0°。在反演过程中, 先用研究区瑞利波相速度平均频散曲线确定每个事件在每个时期的双平面波参数^[28]。然后在考虑有限频率效应的基础上, 建立观测方程组, 将观测到的实部和虚部残差与网格节点处未知的相速度的扰动以及每个周期双平面波参数的扰动联系起来^[28]。采用带有阻尼和平滑正则化的 LSQR 算法来求解该观测方程组^[31]。根据阻尼和平滑的权衡曲线, 选择了最优的阻尼和平滑参数(图 4a, b)。经过三次迭代后, 所有周期的残差均方根显著降低(图 4c), 并最终获得了阿拉斯加俯冲带周期 25~100 s 范围内的瑞利波相速度模型(图 5)。

2.3 剪切波速度层析成像

某一周期内的瑞利波相速度(C)与纵波和横波速度(V_p 和 V_s)以及密度(ρ)的异常有关, 可以表示为:

$$\frac{\delta C}{C} = \int \left(K_\rho \frac{\delta \rho}{\rho} + K_{V_p} \frac{\delta V_p}{V_p} + K_{V_s} \frac{\delta V_s}{V_s} \right) dz \quad (1)$$

其中, K_ρ 、 K_{V_p} 和 K_{V_s} 为在深度 z 处对应的敏感核^[32-33]。在本研究中, 假设 25~100 s 周期范围内的瑞利波相速度扰动主要反映了研究区地壳和上地幔的 V_p 和 V_s 异常, 使用关系式 $\rho = (V_p + 2.4)/3.125$ 来计算 ρ ^[34]。由于 25~100 s 的瑞利波相速度扰动仅对浅部的 V_p 结构敏感(图 6a), 因此在本研究中只讨论剪切波速度结构。在反演过程中, 建立了三维网格用来表征 V_p 和 V_s 异常^[27, 30]。网格的横向间距与相速度层析成像中所使用的横向网格间距一致。网格均布置在 25~500 km 深度范围内, 深度间隔为 25 km。研究区的一维 V_p 和 V_s 模型, 如图 6c

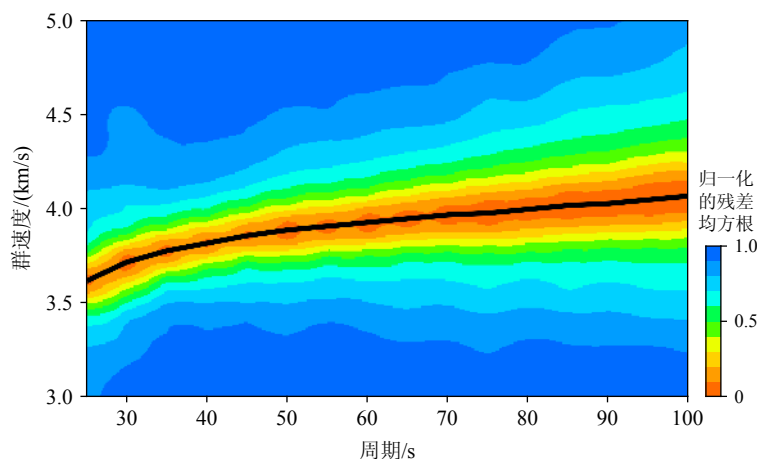


图 3 阿拉斯加地区瑞利波平均相速度频散曲线

Fig.3 Dispersion curve of average phase-velocity of Rayleigh-wave in Alaska

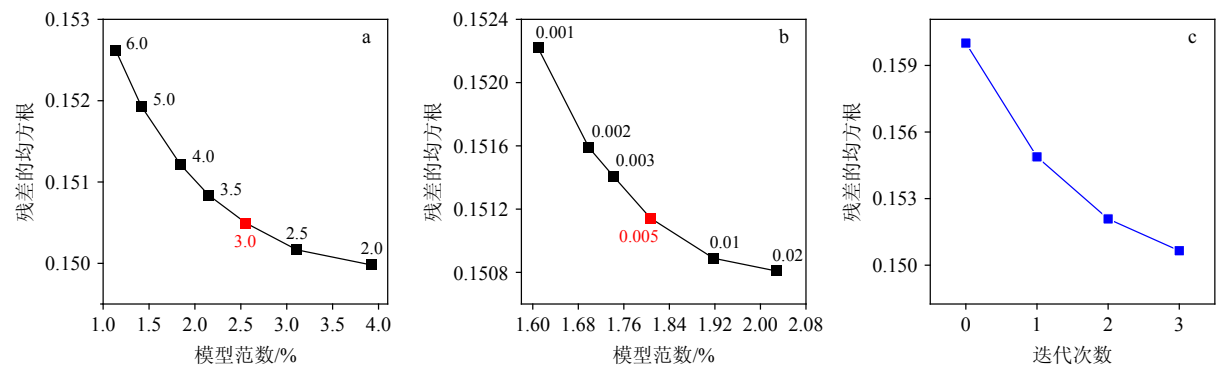


图 4 瑞利波相速度层析成像中涉及的参数

a: 选择阻尼系数的权衡曲线, b: 选择平滑系数的权衡曲线。a 和 b 中的数字表示反演中采用的参数值, 红色数字代表本研究中选择的最佳阻尼和平滑系数。c: 每次迭代后实部和虚部残差的均方根值。

Fig.4 Parameters of the Rayleigh-wave phase-velocity tomography

a: The trade-off curve for selecting the optimal damping coefficient; b: the trade-off curve for selecting the smoothing coefficient. Gray and red numbers in (a) and (b) are values of the coefficients used for the inversions. Red numbers in (a) and (b) are the optimal damping and smoothing coefficients. c: the root-mean-square values of real and imaginary residuals after each iteration.

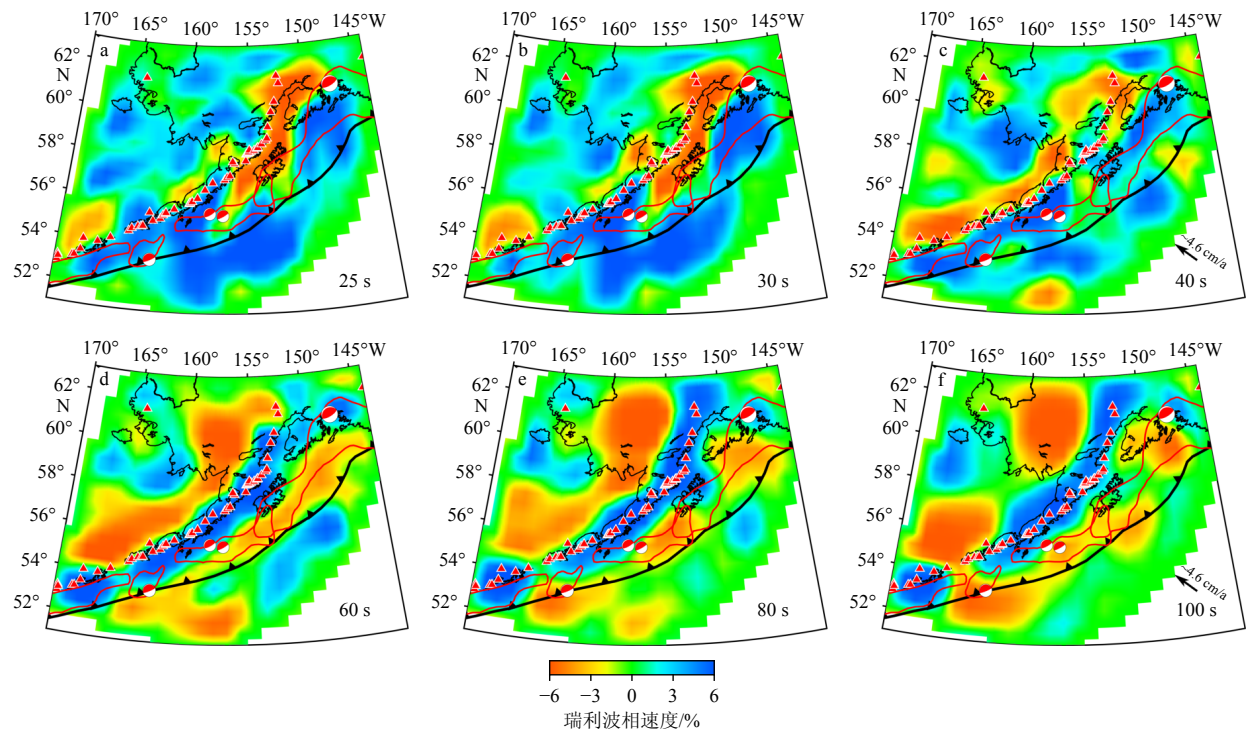


图 5 阿拉斯加地区六个周期的瑞利波相速度层析成像平面图

图中红色沙滩球从西到东依次表示 1946 年 Mw 8.2、1938 年 Mw 8.3、2021 年 Mw 8.2 和 1964 年 Mw 9.2 大地震的震源机制解。图中黑色箭头指出了太平洋板块的运动方向^[31]。

Fig.5 Plane views of Rayleigh-wave phase-velocity tomography for six periods in Alaska

Red beach balls from the west to east along the trench denote focal mechanisms of the 1946 Mw 8.2, 1938 Mw 8.3, 2021 Mw 8.2, and 1964 Mw 9.2 megathrust earthquakes, respectively. Black arrows show the moving directions of the Pacific plate^[31].

中的蓝线和红线所示, 是根据 Wang 等的方法^[35]来确定的。本研究采用带阻尼正则化的 LSQR 算法来求解观测方程组^[31]。进行了多次反演来开展权衡分析, 以确定最佳阻尼系数(图 6d)。在采用了最

佳阻尼系数的情况下, 经过 10 次迭代后, 残差的均方根明显减小(图 6e), 最终得到了阿拉斯加俯冲带上地幔三维剪切波速度层析成像模型(图 7-8)。

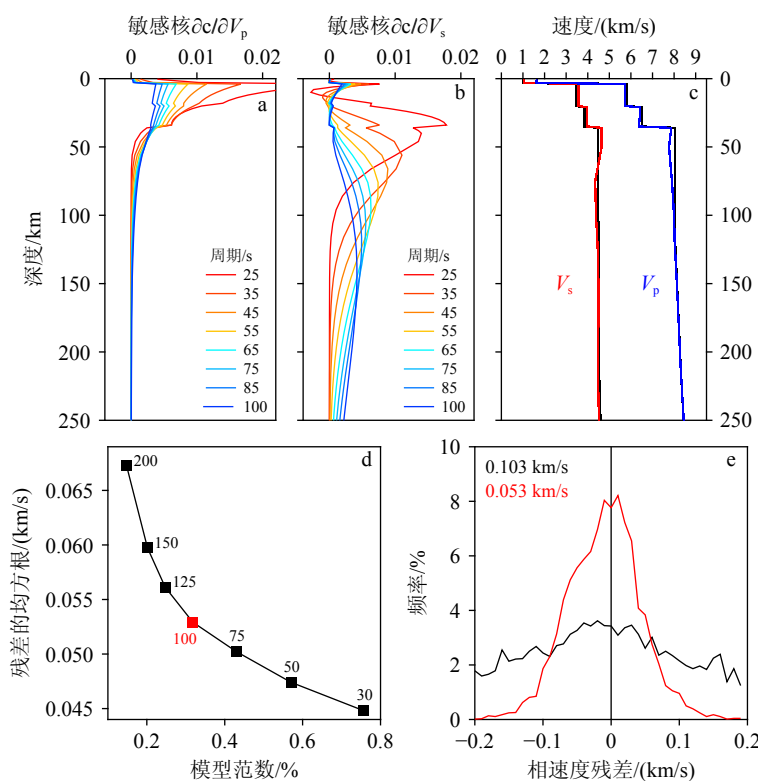


图 6 剪切波速度层析成像中涉及的参数

a、b: 不同周期瑞利波相速度异常对不同深度纵波和剪切波速度(V_p 和 V_s)扰动的敏感核(如彩色线显示); c: 本研究求得的阿拉斯加地区一维 V_p (蓝色线)和 V_s (红色线)模型。灰色线表示修改后的大陆区域 AK135 模型^[35]; d: 选择阻尼系数的权衡曲线, 其最佳阻尼系数为 100; e: 反演前(灰色线)和反演后(红色线)的瑞利波相速度残差分布以及反演前后瑞利波相速度残差的均方根值(左上角数字)。

Fig.6 The parameters of the shear-wave velocity tomography

a-b: The sensitivity kernels of Rayleigh wave phase velocity anomalies of different periods to the disturbances of P-wave and shear wave velocities (V_p and V_s) at different depths (as shown by the colored lines); c: the one-dimensional V_p (blue line) and V_s (red line) models for the Alaska region obtained in this study.

The gray line represents the modified AK135 model for the continental region^[35]; d: the trade-off curve for the damping coefficient selection; the optimal damping coefficient was 100; e: the distribution of the Rayleigh wave phase velocity residuals before (gray line) and after (red line) inversion, as well as the root mean square value of the Rayleigh wave phase velocity residuals before and after inversion (the numbers in the upper left corner).

3 分辨率分析

本研究开展了详尽的棋盘格分辨率测试^[27]。在输入模型中, 相邻 V_s 扰动值被分别赋为 $\pm 6\%$ 。基于这样的输入 V_s 模型, 计算了周期为 25~100 s 的合成相速度模型。在合成相速度模型时, 向模型中加入标准偏差为 0.01 km/s 的正态分布的随机误差。将合成相速度模型作为输入模型, 计算出与真实数据集具有相同双平面波参数的合成实部和虚部数据。然后反演这些合成实部和虚部数据, 以求得输出的相速度模型。最后, 反演输出的相速度模型以得到输出的 V_s 模型。

分辨率测试结果表明, 本研究获得的剪切波速度成像模型, 可以在约小于 250 km 的深度范围内, 很好地恢复具有不同速度特征的两个异常层(每层

厚度至少为 50 km)。此外, 由于本研究使用的周期为 25~100 s 的瑞利波具有不同的波长, 成像模型的横向分辨率从浅层处约 100 km 逐渐增加到深层处约 400 km。

为了确认图 7 和图 8 中所示成像模型的主要特征, 除了棋盘格法分辨率测试外, 本文还进一步开展了多组恢复分辨率测试来验证剪切波速度层析成像结果的可靠性。恢复分辨率测试的方法与棋盘格法分辨率测试十分类似, 只需使用不同的初始输入模型。首先将上文所示的剪切波速度方位各向异性层析成像反演的结果作为输入模型, 在合成相速度数据时向模型中加入标准偏差 0.01 km/s 的正态分布随机误差进行剪切波速度恢复分辨率测试^[27, 30]。恢复分辨率测试的过程与棋盘格分辨率测试的过程基本相同, 主要区别在于, 输入模型是从获得的最终成像模型中构建的。恢复分辨率测试

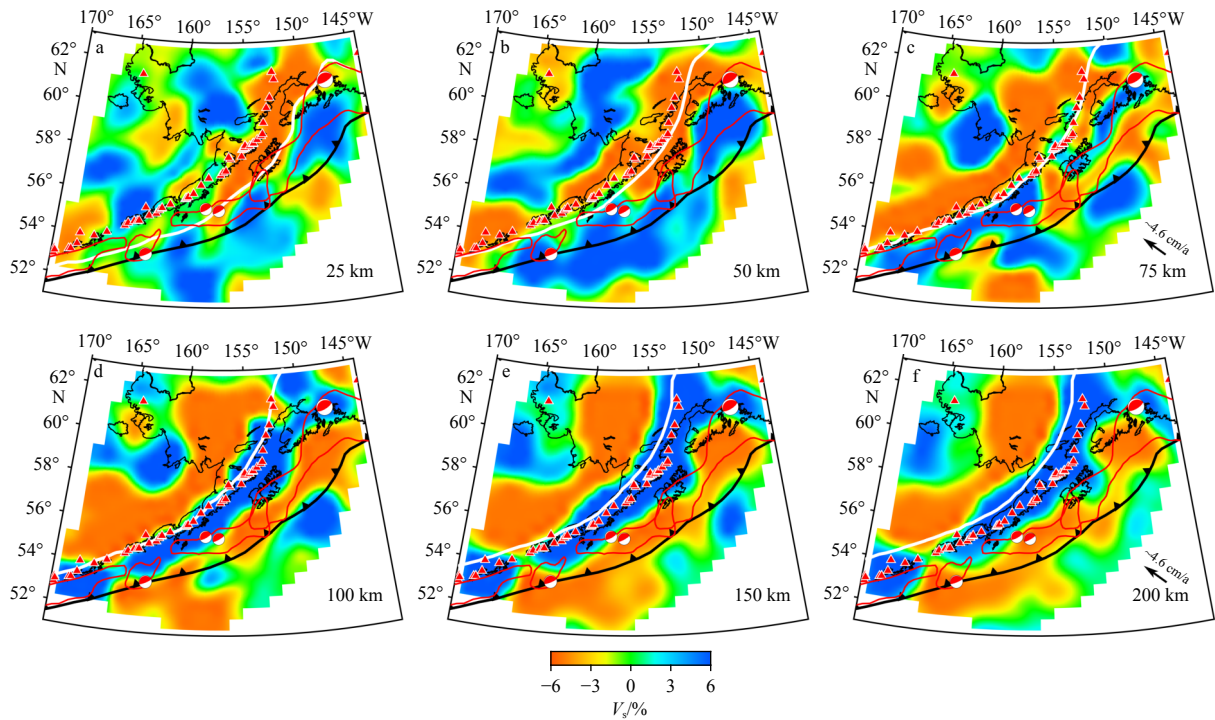


图 7 阿拉斯加地区不同深度剪切波速度层析成像平面图

图中白色线表示每个深度处俯冲的太平洋板片上边界^[36-37]。

Fig.7 Plane views of shear-wave velocity tomography at six depths

White lines denote the upper boundary of the subducting Pacific slab at different depths^[36-37].

的结果展示在图 9-12 中,测试结果显示,本文获得的成像模型中的特征可以被很好地恢复。

4 结果与讨论

本研究获得的阿拉斯加俯冲带上地幔剪切波速度层析成像结果显示,俯冲的太平洋板片被清晰地成像为一倾斜的高剪切波速带,而显著的低剪切波速异常体存在于地幔楔中和俯冲板片之下的地幔(板下地幔)中(图 7-8)。这些成像特征与阿拉斯加地区许多先前的成像模型相类似^[38, 40-49]。除此之外,本研究获得的成像模型还清晰地揭示出,在阿拉斯加弧前之下,存在着沿海沟方向的横向构造变化(图 10)。图 10 显示了阿拉斯加弧前下方沿海沟方向的横剖面,该剖面切过阿拉斯加弧前巨大逆冲断层带的中心区域。在 1946 年、1938 年和 2021 年以及 1964 年弧前板间逆冲型大地震震源区下方,板下地幔中存在明显的低波速异常(图 10)。在这些震源区之下,俯冲的太平洋板片表现为明显的高波速异常体,并且似乎受到板下地幔中低波速异常体的支撑(图 10)。相比之下,在舒马金间隙和科迪亚克岛以东地区之下,板下地幔中没有明显的低波速异常,且俯冲的太平洋板块呈现为下沉的趋势(图 10)。

这些层析成像特征还可以很好地与阿拉斯加弧前的板间耦合程度联系起来。在科迪亚克岛以西的 1938 年大地震震源区内,板间耦合率从舒马金间隙的几乎蠕变向东增加到完全耦合^[20]。在科迪亚克岛以东,板间耦合率则相对较低,但在 1964 年大地震震源区附近,即蒙塔古岛附近,板间耦合率又显著增加^[18],其强耦合区域为图 10c 中的棕色线圈定区域。

弧前巨大逆冲断层带中,地震分布和断层闭锁程度沿海沟方向的分段性特征,通常归因于巨大逆冲断层带中的横向不均匀性,这种横向不均匀性通常由巨大逆冲断层带附近的俯冲板片和/或上覆板块中的各种构造、岩石组成和流体含量引起^[50-55]。利用阿拉斯加两栖地震实验台网记录的地震数据,前人对阿拉斯加半岛近海的弧前巨大逆冲断层带进行了高分辨率三维地震层析成像研究,估算了俯冲的太平洋板片的蛇纹岩化体积比例,揭示了俯冲板片的流体含量可能影响俯冲板片与上覆板块之间的耦合程度以及孕震行为^[45, 47-48]。最近, Cordell 等从 1938 年 Mw 8.3 和 1946 年 Mw 8.2 大地震破裂带之间的区域采集了海洋大地电磁数据,并据此建立了阿拉斯加弧前地区精细的二维电阻率模型,该模型表明俯冲板片地幔中的流体可能会影响弧前

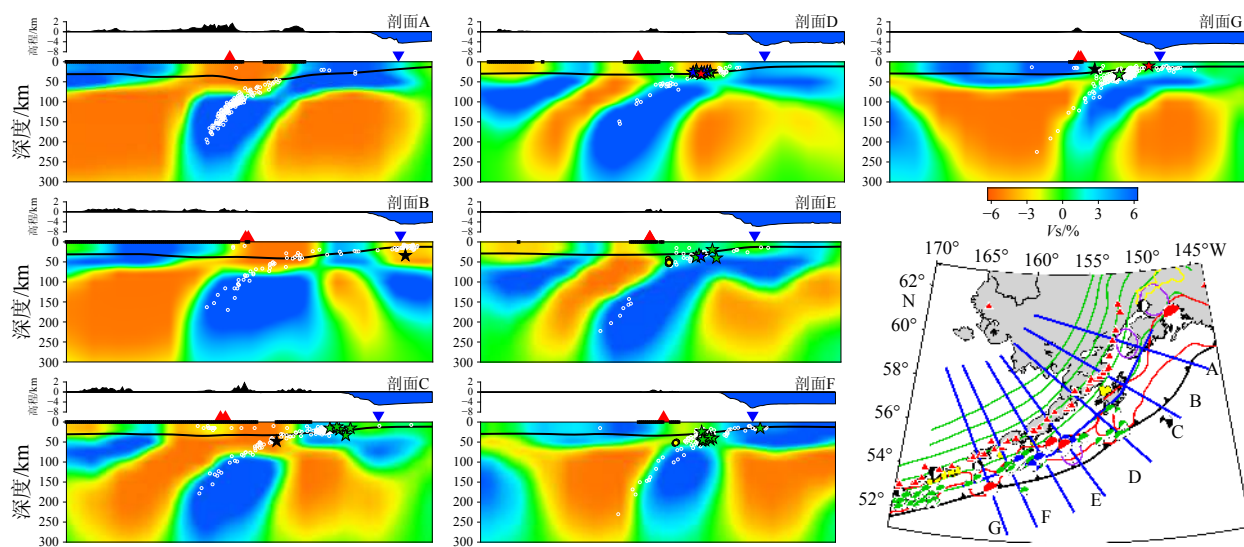


图 8 阿拉斯加地区剪切波速度层析成像剖面图

剖面位置如最后一张图的蓝色线所示。

红色三角形表示剖面附近的活火山, 蓝色倒三角形表示阿留申海沟的位置, 黑色细线和粗线分别表示莫霍面^[38]和陆地范围, 白色圆圈表示剖面周边的地震活动性^[39], 红色 ($M_w \geq 8.0$) 和蓝色 ($8.0 > M_w \geq 7.0$) 以及绿色 ($7.0 > M_w \geq 6.0$) 五角星表示剖面周边发生的浅源逆冲型大地震, 黄色圆点显示了剖面周边发生的低频地震, 绿色线表示太平洋俯冲板上边界的深度线^[36-37], 彩色沙滩球表示浅源逆冲型大地震的震源机制解, 黑色沙滩球表示其他类型浅源大地震 ($M_w \geq 6.0$) 的震源机制解, 紫色线圆圈指示了慢滑事件发生的区域^[6-9]。

Fig.8 Profiles of Alaska shear-wave velocity tomography

The positions of cross-sections are shown in blue lines in the inset map. Red triangles denote active volcanoes close to each cross-section. Blue reverse triangles denote the Aleutian trench axis. Black thin and thick lines in each cross-section denote the Moho discontinuity^[38] and the land area, respectively. White circles in each cross-section show the background seismicity^[39]. Red ($M_w \geq 8.0$) and blue ($8.0 > M_w \geq 7.0$), and green ($7.0 > M_w \geq 6.0$) stars show shallow megathrust earthquakes. Yellow dots show low-frequency earthquakes. Green lines in the inset map show depth contours of the upper boundary of the subducting Pacific slab^[36-37]. Colorful beach balls in the inset map denote focal mechanisms of shallow large thrust earthquakes, whereas black beach balls show focal mechanisms of other types of shallow large earthquakes ($M_w \geq 6.0$). Purple lines in the inset map denote areas of slow slip events^[6-9].

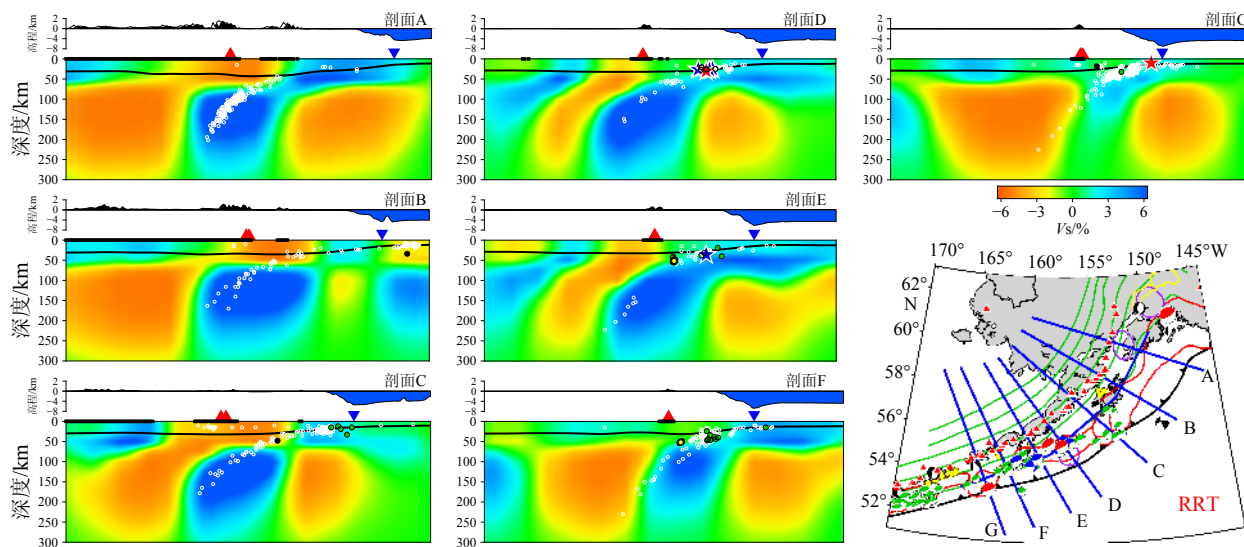


图 9 阿拉斯加地区恢复分辨率测试结果图

图中所示为输出的剪切波速度模型, 该测试的输入模型及图中标记同图 8。

Fig.9 The test results on the resolution of the tectonic reconstruction in Alaska as shown in the output shear wave velocity model

The input model for this test is shown in Fig. 8. The markings in the figure are the same as in Fig. 8.

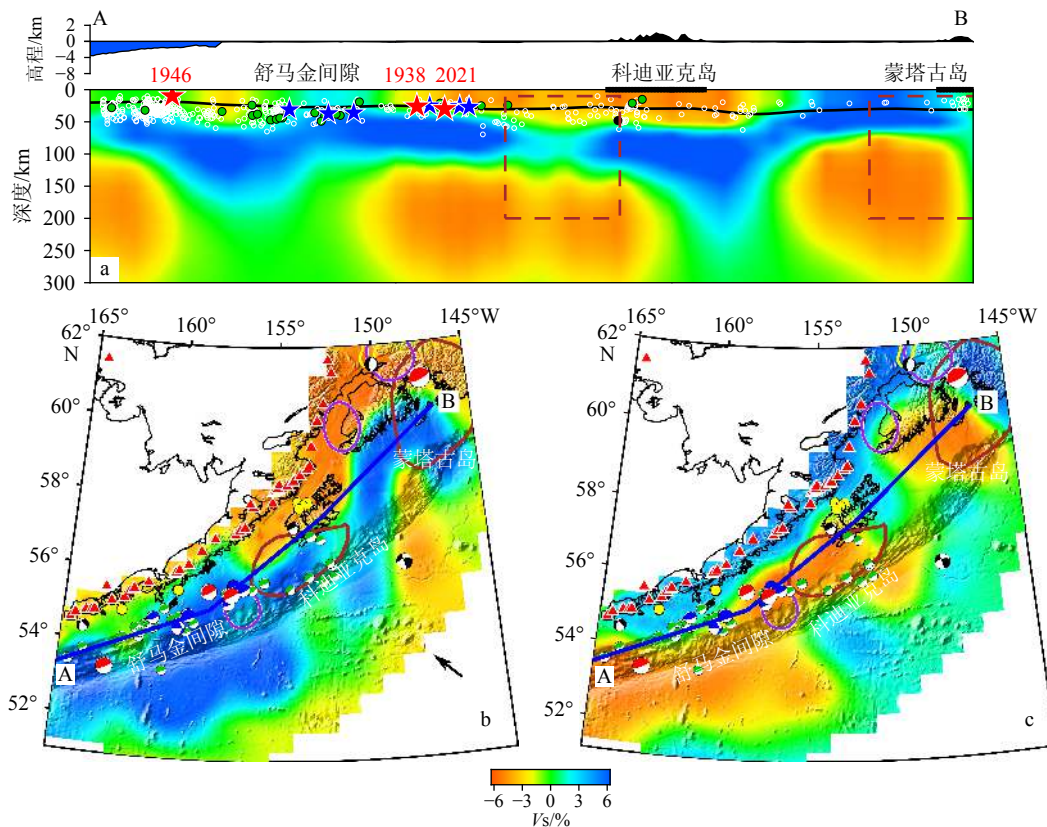


图 10 阿拉斯加弧前俯冲太平洋岩石圈-软流圈系统构造特征

a: 沿着 A-B 剖面的弧前地区下的剪切波速度异常情况(剖面位置如 b 和 c 中蓝线所示); b: 50 km 深度处剪切波速度异常; c: 200 km 处速度剪切波速度异常。b 和 c 中的褐色线指示了板间强耦合区域^[18], 图例符号同图 8。

Fig.10 Deep structure of the subducting Pacific lithosphere-asthenosphere system beneath Alaska forearc

a: The shear-wave velocity anomalies along the A-B section in the forearc area as shown by the blue lines in (b) and (c); b: shear-wave velocity anomaly at a depth of 50km; c: shear-wave velocity anomaly at a depth of 200 km. Brown lines in (b) and (c) show the areas with high interplate coupling^[18]. The markings in the figure are same as in Fig. 8.

板间逆冲型大地震的产生^[56]。

弧前巨大逆冲断层带表现出的沿海沟方向的分段性特征, 还可能与更深部的构造相关, 例如俯冲板片以及俯冲板片之下的地幔软流圈的浮力特征。前人提出海沟附近大洋岩石圈的年龄与板间逆冲型大地震的最大震级之间存在简单的线性关系^[57], 而 2011 年日本东北大地震(Mw9.0)的发生证伪了这种关系^[50]。尽管如此, 随后的研究表明, 全球不同弧前巨大逆冲断层带处(不包括阿拉斯加地区)的 b 值与俯冲板片年龄之间呈正相关性^[58]。由于年轻的俯冲板片通常具有更大的浮力, 这一相关性特征可能表明俯冲板片的浮力控制了其应力状态以及板间逆冲型大地震的最大震级^[58]。然而, 板片浮力可能不仅与俯冲板片的岩石圈年龄有关。地震层析成像显示, 在卡斯卡迪亚弧前的俯冲板片下方积累了大量低波速的地幔软流圈物质^[59-60]。这些板下聚集的软流圈物质可能具有较大的浮力, 从

而导致了弧前巨大逆冲断层带的分段性特征, 甚至影响了卡斯卡迪亚弧前的地形, 其特征是低波速的软流圈物质主要存在于断层闭锁程度较高、地震密度较大以及地形较高的地区下方^[61-62]。对全球最近 6 次大地震(Mw≥9.0)震源区深部开展的层析成像研究表明, 板下具有浮力的软流圈物质对弧前板间逆冲型大地震形成有显著影响^[63]。但该研究认为这些板下具有浮力的软流圈物质并不正好位于大地震震源区之下, 而是位于其周缘区域^[63]。这与 Bodmer 等^[61]在卡斯卡迪亚地区的研究结果存在明显差异。

基于新获得的阿拉斯加俯冲带上地幔剪切波速度层析成像结果(图 10), 本研究认为俯冲作用可能导致了海沟附近俯冲板片之下软流圈物质的聚集。这些具有正浮力的软流圈物质似乎支撑起了俯冲板片(图 10), 相当于增加了俯冲板片的浮力, 从而增强了俯冲板片与上覆板块之间的耦合程

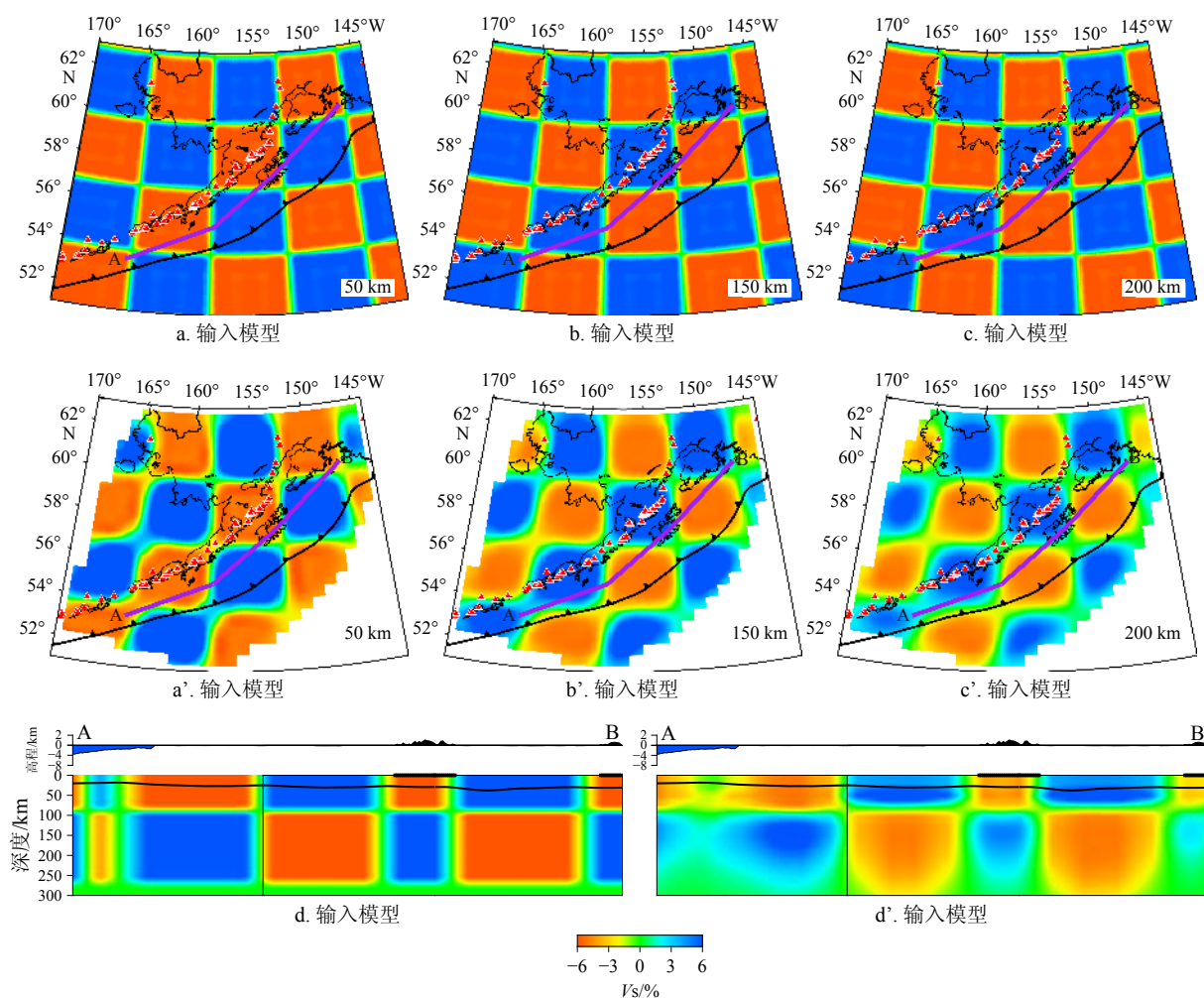


图 11 棋盘格分辨率测试结果

a-c: 输入的剪切波速度模型在不同深度的平面图, a'-c': 输出的剪切波速度模型在不同深度的平面图, d: 输入模型的剖面图, d': 输出模型的剖面图。剖面位置以紫色线标注在 a-c 和 a'-c' 中。

Fig.11 Results of a checkerboard resolution test

a-c: Plane views of input V_s model at different depths; a'-c': Plane views of output V_s model at different depths; d: the vertical profile of the input V_s model; d': the vertical profiles of the output V_s model. The position of the profiles are along the purple lines in a-c and a'-c'.

度。这一过程可能影响甚至控制了阿拉斯加弧前板间逆冲型大地震的产生。具有正浮力的软流圈物质沿阿留申海沟的聚集似乎是不均匀的(图 10), 由此可能在一定程度上促进了阿拉斯加弧前板间耦合程度和逆冲型大地震的分布不均匀性的形成。阿拉斯加地区的这一深部构造特征与卡斯卡迪亚地区的情况非常相似^[61-62]。沿海沟方向软流圈物质的非均质性质则可能与阿拉斯加湾中的鲍伊热点和柯布热点轨迹有关^[64]。本研究表明, 弧前板间逆冲型大地震似乎更易发生在俯冲板片浮力较大的地区。俯冲板片的浮力可能不仅与俯冲板片自身的性质有关, 如流体含量^[45, 47-48, 56]和/或俯冲板片的岩石圈年龄^[58], 而且还会受到俯冲板片之下软流圈物质的横向不均匀性影响。软流圈物质的横向

不均匀性, 在某些情况下, 可能源自深部地幔物质的上涌^[60]。

5 结论

(1) 阿拉斯加俯冲带中, 俯冲的太平洋板片整体呈现为倾斜的高波速异常体, 而在地幔楔和板下地幔中则存在显著的低波速异常体。

(2) 在阿拉斯加弧前地区, 存在着沿海沟方向的横向构造变化。在弧前板间逆冲型大地震震源区下方, 板下地幔中存在明显的低波速异常体, 并似乎支撑起了呈现为高波速异常体的俯冲板片。而在其他区域, 板下地幔中未见明显低波速异常体, 俯冲板片则具有下沉趋势。

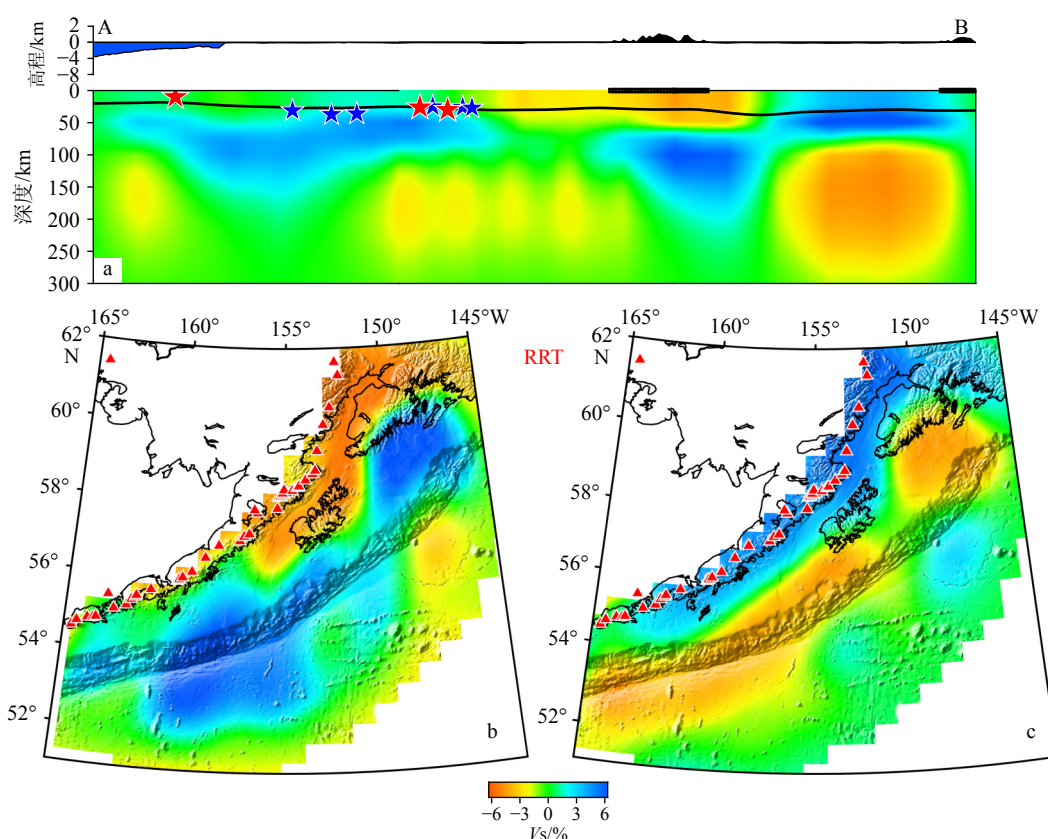


图 12 阿拉斯加弧前俯冲太平洋岩石圈-软流圈系统构造特征恢复分辨率测试

a: 沿着 A-B 剖面的弧前地区下的剪切波速度异常恢复情况, b: 50 km 深度处剪切波速度异常恢复情况, c: 200 km 深度处剪切波速度异常恢复情况, 图例符号同图 8。

Fig.12 Resolution test on the reconstruction of tectonic features of the Pacific lithosphere-asthenosphere subduction system in the Alaska forearc

a: The abnormal reconstruction of shear-wave velocity in the forearc region along the A-B profile; b: the velocity anomaly reconstruction at a depth of 50 km, c: the velocity anomaly reconstruction at a depth of 200 km. The markings in the figure are same as in Fig. 8.

(3)俯冲和深部地幔上涌导致了海沟附近具有正浮力的软流圈物质聚集,从而增加了俯冲板片的浮力,增强了俯冲板片与上覆板块间的耦合程度。这可能影响甚至控制了弧前板间逆冲型大地震的形成。

参考文献 (References)

- [1] Kanamori H. The Alaska Earthquake of 1964: radiation of long-period surface waves and source mechanism[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(26): 5029-5040.
- [2] Ye L L, Bai Y F, Si D J, et al. Rupture model for the 29 July 2021 M_w 8.2 Chignik, Alaska earthquake constrained by seismic, geodetic, and tsunami observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(7): e2021JB023676.
- [3] Freymueller J T, Suleimani E N, Nicolisky D J. Constraints on the slip distribution of the 1938 M_w 8.3 Alaska Peninsula earthquake from tsunami modeling[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(9): e2021GL092812.
- [4] Pelayo A M, Wiens D A. Tsunami earthquakes: slow thrust-faulting events in the accretionary wedge[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B11): 15321-15337.
- [5] Johnson J M, Satake K, Holdahl S R, et al. The 1964 Prince William Sound earthquake: joint inversion of tsunami and geodetic data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B1): 523-532.
- [6] He B, Wei X Z, Wei M, et al. A shallow slow slip event in 2018 in the Semidi segment of the Alaska subduction zone detected by machine learning[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 612: 118154.
- [7] Ohta Y, Freymueller J, Hreinsdóttir S, et al. A large slow slip event and the depth of the seismogenic zone in the south central Alaska subduction zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 247(1-2): 108-116.
- [8] Wei M, McGuire J J, Richardson E. A slow slip event in the south central Alaska subduction zone and related seismicity anomaly[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(15): L15309.
- [9] Fu Y N, Freymueller J T. Repeated large slow slip events at the south-

- central Alaska subduction zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 375: 303-311.
- [10] Fu Y N, Liu Z, Freymueller J T. Spatiotemporal variations of the slow slip event between 2008 and 2013 in the southcentral Alaska subduction zone[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(7): 2450-2461.
- [11] Okada Y, Nishimura T. Systematic detection of short-term slow slip events in south-central Alaska[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(17): e2023GL104901.
- [12] Brown J R, Prejean S G, Beroza G C, et al. Deep low-frequency earthquakes in tectonic tremor along the Alaska-Aleutian subduction zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(3): 1079-1090.
- [13] Wech A G. Extending Alaska's plate boundary: tectonic tremor generated by Yakutat subduction[J]. *Geology*, 2016, 44(7): 587-590.
- [14] Scholz C H. Earthquakes and friction laws[J]. *Nature*, 1998, 391(6662): 37-42.
- [15] Lay T, Kanamori H, Ammon C J, et al. Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B4): B04311.
- [16] Obara K, Kato A. Connecting slow earthquakes to huge earthquakes[J]. *Science*, 2016, 353(6296): 253-257.
- [17] Tape C, Lomax A. Aftershock regions of Aleutian-Alaska megathrust earthquakes, 1938-2021[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(7): e2022JB024336.
- [18] Zweck C, Freymueller J T, Cohen S C. Three-dimensional elastic dislocation modeling of the postseismic response to the 1964 Alaska earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B4): ECV 1-1-ECV 1-11, doi: 10.1029/2001JB000409.
- [19] Li S S, Freymueller J T. Spatial variation of slip behavior beneath the Alaska Peninsula along Alaska-Aleutian subduction zone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(8): 3453-3460.
- [20] Drooff C, Freymueller J T. New constraints on slip deficit on the Aleutian megathrust and inflation at Mt. Veniaminof, Alaska from repeat GPS measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(4): e2020GL091787.
- [21] Elliott J L, Grapenthin R, Parameswaran R M, et al. Cascading rupture of a megathrust[J]. *Science Advances*, 2022, 8: eabm4131.
- [22] Zhao B, Bürgmann R, Wang D Z, et al. Aseismic slip and recent ruptures of persistent asperities along the Alaska-Aleutian subduction zone[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3098.
- [23] Brooks B A, Goldberg D, DeSanto J, et al. Rapid shallow megathrust afterslip from the 2021 M8.2 Chignik, Alaska earthquake revealed by seafloor geodesy[J]. *Science Advances*, 2023, 9(17): eadf9299.
- [24] Liu C L, Bai Y F, Lay T, et al. Megathrust complexity and the up-dip extent of slip during the 2021 Chignik, Alaska Peninsula earthquake[J]. *Tectonophysics*, 2023, 854: 229808.
- [25] Ichinose G, Somerville P, Thio H K, et al. Rupture process of the 1964 Prince William Sound, Alaska, earthquake from the combined inversion of seismic, tsunami, and geodetic data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B7): B07306.
- [26] Barcheck G, Abers G A, Adams A N, et al. The Alaska amphibious community seismic experiment[J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(6): 3054-3063.
- [27] Liu X, Zhao D P. Seismic evidence for a plume-modified oceanic lithosphere-aesthenosphere system beneath Cape Verde[J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 225(2): 872-886.
- [28] Forsyth D W, Li A B. Array analysis of two-dimensional variations in surface wave phase velocity and azimuthal anisotropy in the presence of multipathing interference[M]//Levander A, Nolet G. *Seismic Earth: Array Analysis of Broadband Seismograms*. American Geophysical Union, 2005: 81-97.
- [29] Yang Y J, Forsyth D W. Regional tomographic inversion of the amplitude and phase of Rayleigh waves with 2-D sensitivity kernels[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(3): 1148-1160.
- [30] Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic imaging of *P* and *S* wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B13): 19909-19928.
- [31] Paige C C, Saunders M A. LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 1982, 8(1): 43-71.
- [32] Kreemer C, Blewitt G, Klein E C. A geodetic plate motion and global strain rate model[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(10): 3849-3889.
- [33] Saito M. DISPER80: a subroutine package for the calculation of seismic normal mode solutions [M]//Doornbos D. *Seismological Algorithms: Computational Methods and Computer Programs*. New York: Academic Press, 1988: 293-319.
- [34] Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 2[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(7): 2199-2224.
- [35] Wang X, Liu X, Zhao D P, et al. Oceanic plate subduction and continental extrusion in Sumatra: insight from S-wave anisotropic tomography[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 580: 117388.
- [36] Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122(1): 108-124.
- [37] Hayes G P, Moore G L, Portner D E, et al. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model[J]. *Science*, 2018, 362(6410): 58-61.
- [38] 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.
- [39] Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. Update on CRUST1.0—A 1-global model of Earth's crust[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2013, 15: EGU2013-2658.
- [40] Engdahl E R, Di Giacomo D, Sakarya B, et al. ISC-EHB 1964-2016, an improved data set for studies of earth structure and global seismicity[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(1): e2019EA000897.
- [41] Zhao D P, Christensen D, Pulpan H. Tomographic imaging of the Alaska subduction zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B4): 6487-6504.
- [42] Eberhart-Phillips D, Christensen D H, Brocher T M, et al. Imaging the transition from Aleutian subduction to Yakutat collision in central Alaska, with local earthquakes and active source data[J]. *Journal of*

- [Geophysical Research: Solid Earth](#), 2006, 111(B11): B11303.
- [43] You T, Zhao D P. Seismic anisotropy and heterogeneity in the Alaska subduction zone[J]. [Geophysical Journal International](#), 2012, 190(1): 629-649.
- [44] Gou T, Zhao D P, Huang Z C, et al. Structural heterogeneity in source zones of the 2018 Anchorage intraslab earthquake and the 1964 Alaska megathrust earthquake[J]. [Geochemistry, Geophysics, Geosystems](#), 2020, 21(3): e2019GC008812.
- [45] Gou T, Xia S H, Huang Z C, et al. Structural heterogeneity of the Alaska-Aleutian Forearc: implications for interplate coupling and seismogenic behaviors[J]. [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 2022, 127(11): e2022JB024621.
- [46] Feng L, Liu C M, Ritzwoller M H. Azimuthal anisotropy of the crust and uppermost mantle beneath Alaska[J]. [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 2020, 125(12): e2020JB020076.
- [47] Li Z S, Wiens D A, Shen W S, et al. Along-strike variations of Alaska subduction zone structure and hydration determined from amphibious seismic data[J]. [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 2024, 129(3): e2023JB027800.
- [48] Wang F, Wei S S, Drooff C, et al. Fluids control along-strike variations in the Alaska megathrust slip[J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 2024, 633: 118655.
- [49] Liu C M, Zhang S N, Sheehan A F, et al. Surface wave isotropic and azimuthally anisotropic dispersion across Alaska and the Alaska-Aleutian subduction zone[J]. [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 2022, 127(11): e2022JB024885.
- [50] Zhao D P, Huang Z C, Umino N, et al. Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (M_w 9.0)[J]. [Geophysical Research Letters](#), 2011, 38(17): L17308.
- [51] Moreno M, Haberland C, Oncken O, et al. Locking of the Chile subduction zone controlled by fluid pressure before the 2010 earthquake[J]. [Nature Geoscience](#), 2014, 7(4): 292-296.
- [52] Bassett D, Sandwell D T, Fialko Y, et al. Upper-plate controls on co-seismic slip in the 2011 magnitude 9.0 Tohoku-oki earthquake[J]. [Nature](#), 2016, 531(7592): 92-96.
- [53] Steckler M S, Mondal D R, Akhter S H, et al. Locked and loading megathrust linked to active subduction beneath the Indo-Burman Ranges[J]. [Nature Geoscience](#), 2016, 9(8): 615-618.
- [54] Liu X, Zhao D P. Upper and lower plate controls on the great 2011 Tohoku-oki earthquake[J]. [Science Advances](#), 2018, 4(6): eaat4396.
- [55] Hua Y Y, Zhao D P, Toyokuni G, et al. Tomography of the source zone of the great 2011 Tohoku earthquake[J]. [Nature Communications](#), 2020, 11(1): 1163.
- [56] Cordell D, Naif S, Evans R, et al. Forearc seismogenesis in a weakly coupled subduction zone influenced by slab mantle fluids[J]. [Nature Geoscience](#), 2023, 16(9): 822-827.
- [57] Ruff L, Kanamori H. Seismicity and the subduction process[J]. [Physics of the Earth and Planetary Interiors](#), 1980, 23(3): 240-252.
- [58] Nishikawa T, Ide S. Earthquake size distribution in subduction zones linked to slab buoyancy[J]. [Nature Geoscience](#), 2014, 7(12): 904-908.
- [59] Hawley W B, Allen R M, Richards M A. Tomography reveals buoyant asthenosphere accumulating beneath the Juan de Fuca plate[J]. [Science](#), 2016, 353(6306): 1406-1408.
- [60] Zhao D P, Hua Y Y. Anisotropic tomography of the Cascadia subduction zone[J]. [Physics of the Earth and Planetary Interiors](#), 2021, 318: 106767.
- [61] Bodmer M, Toomey D R, Hooft E E E, et al. Buoyant asthenosphere beneath Cascadia influences megathrust segmentation[J]. [Geophysical Research Letters](#), 2018, 45(14): 6954-6962.
- [62] Bodmer M, Toomey D R, Roering J J, et al. Asthenospheric buoyancy and the origin of high-relief topography along the Cascadia forearc[J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 2020, 531: 115965.
- [63] Fan J K, Zhao D P. Subslab heterogeneity and giant megathrust earthquakes[J]. [Nature Geoscience](#), 2021, 14(5): 349-353.
- [64] Chaytor J D, Keller R A, Duncan R A, et al. Seamount morphology in the Bowie and Cobb hot spot trails, Gulf of Alaska[J]. [Geochemistry, Geophysics, Geosystems](#), 2007, 8(9): Q09016.