

柳存喜, 王志. 2014. 南阿拉斯加地壳及上地幔结构成像研究. 地球物理学报, 57(7): 2113-2126, doi:10. 6038/cjg20140708.

Liu C X, Wang Z. 2014. Structure imaging of the crust and upper mantle in south of Alaska. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7): 2113-2126, doi:10. 6038/cjg20140708.

## 南阿拉斯加地壳及上地幔结构成像研究

柳存喜<sup>1</sup>, 王志<sup>1,2\*</sup>

1 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059

2 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510301

**摘要** 通过反演 562891 个纵波和 156321 个横波走时数据, 第一次同时获得了阿拉斯加地区地壳及上地幔的纵波与横波速度以及泊松比图像, 为更好地认识阿拉斯加地区的深部地震结构、太平洋板块与亚库塔特板块的俯冲几何形态提供了科学依据. 成像结果表明 P 波和 S 波速度图像与泊松比结构具有很好的一致性, 强的高速度和低泊松比异常沿着阿拉斯加俯冲带延伸至 200 km 深度, 该高速度和低泊松比异常体与俯冲带的地震空间分布吻合, 因此, 我们认为该高速体为俯冲的太平洋板块和亚库塔特板块. 从地震空间分布发现, 大部分大地震 ( $M > 6.5$ ) 发生在高速度与低速度异常交界处, 可能反映了俯冲板块之间强耦合作用. 在俯冲带的地幔楔显示出广泛的低速度和高泊松比异常, 并且这些异常与岛弧火山的位置相对应, 这与大洋板块俯冲所形成的岩浆入侵作用有关. 研究结果表明在南阿拉斯加俯冲带, 俯冲板块的俯冲角度从兰格尔块体下方的平坦变成在布里斯托尔湾下方的陡峭, 这与亚库塔特板块俯冲在兰格尔块体下方和太平洋板块俯冲在布里斯托尔湾下方有关. 在基奈半岛和科迪亚克岛连接处的上地幔位置存在强烈的低速与高泊松比异常体, 使该处的大洋俯冲板块变薄. 这一现象可能与亚库塔特板块和太平洋板块相互碰撞作用以及软流圈强烈的上升流入侵有关.

**关键词** 太平洋俯冲带; 地震层析成像; 地震产生; 板块间耦合; 亚库塔特板块

doi:10. 6038/cjg20140708

中图分类号 P315, P542

收稿日期 2014-03-02, 2014-04-24 收修定稿

### Structure imaging of the crust and upper mantle in south of Alaska

LIU Cun-Xi<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>1,2\*</sup>

1 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

**Abstract** For the first time we used 562891 P- and 156321 S-wave travel-time data to invert for the  $V_p$  and  $V_s$  structures simultaneously in the crust and upper mantle in south of Alaska. At the same time, the Poisson's ratio images were calculated from the inverted velocity models. Our tomographic results provide crucial information for a better understanding of seismic structures and the geometry of the subducting slabs under south of Alaska. The P-wave velocity is similar to that of the S-wave velocity and coincides well with the Poisson's ratio image. Strong high velocity ( $V_p$ ,  $V_s$ ) and low Poisson's ratio ( $\sigma$ ) anomalies down to 200 km depth are clearly imaged along the Alaska subduction zone, indicating the subducting Pacific and Yakutat slabs. The high-velocity and low- $\sigma$  zone is well consistent with the spatial distribution of the earthquakes along the

**基金项目** 国家自然科学基金 (41372229), 中国科学院百人计划 (17314059), 高等学校博士点基金博导类课题 (20115122110007, 20125122110002) 和四川省科基金 (2010JQ0033, KYTD201002) 联合资助.

**作者简介** 柳存喜, 在读硕士生, 固体地球物理专业.

\* **通讯作者** 王志, 博士, 教授, 从事地球物理及大陆动力学方面的研究. E-mail: miker-wang@sohu.com

subducting slab. Most of large earthquakes ( $M > 6.5$ ) are located in the boundaries between the high- and low-velocity zones, suggesting strong interplate coupling of the subducting slabs. Wide low-velocity anomalies with high Poisson's ratio are revealed in the mantle wedge of the subduction zone, which might reflect the magmatic flow associated with the slab subduction. Our study indicates the dipping angle of the slab changes from steep in the Wrangell Block to flat under the Bristol Bay in south of Alaska, which is associated with the Yakutat plate under the Wrangell Block and the Pacific plate subducting under the Bristol Bay. A strong low-velocity body in the upper mantle is observed under the conjunction of the Kenai Peninsula and the Kodiak Island, suggesting the collision of the Yakutat and Pacific plates as well as the strong upwelling of the mantle asthenosphere that might have thinned the subducting plate there.

**Keywords** Pacific slab subduction; Seismic tomography; Earthquake generation; Interplate coupling; Yakutat plate

## 1 引言

阿拉斯加南部位于北美板块和东太平洋板块接壤的复杂区域(图 1),该区域由一系列增生地体组成,如威廉王子地体,亚库塔特地体,楚加奇地体(Brocher et al., 1994).同时,阿拉斯加南部火山分布密集,形成火山岛链.海沟规模宏大,长达百万米,宽约 100 km.该区域地震集中、震级强烈,据记载阿拉斯加是 1900—2001 年全球特大地震发生区域之一,如 1964 年发生的能量震级  $M_w 9.2$  的特大地震(Kanamori et al., 1986).并且太平洋板块和亚库塔特微型板块分别以 51 mm/a、44 mm/a 的速度向西北方向移动(Finzel et al., 2011).因此,其独特的地理位置和复杂的构造环境对研究该区域下方太平洋俯冲板块的几何形态和俯冲深度、增生地体在深度方向上的几何形态和地震活动与阿留申大逆冲的关系以及莫霍面在地体增生中的作用等一系列问题(Fuis et al., 1991)有非常重要的意义.

关于阿拉斯加南部地区板块俯冲的构造特征及该区域地壳上地幔精细结构已有不少地球物理研究. Thomas M. Brocher 等(Brocher et al., 1994)在阿拉斯加海湾北部和威廉王子湾利用宽角地震反射折射剖面、地震活动研究及相关物理特性的实验测量确定了威廉王子地体、亚库塔特地体、阿留申大逆冲和俯冲太平洋板块的几何形态,同时提出俯冲在阿拉斯加南部下方的是一块复合板块,是由均匀厚度的太平洋板块和不同厚度的亚库塔特板块组成.赵大鹏等(Zhao et al., 1995)利用 1977 年到 1991 年的 P 波到时数据通过层析成像方法研究了阿拉斯加中部和南部下方三维速度结构,成像结果

表明上地壳与主要地表地质特征相关性很好,在地壳上地幔及地幔楔低速异常与火山活动有关系,并认为太平洋板块的厚度为 45~55 km, P 波速度高于周围地幔 3%~6%. 齐诚等(Qi et al., 2007)使用近震和远震的 P 波走时数据采用层析成像联合反演方法研究了阿拉斯加下方 700 km 的三维速度结构,通过高速异常得出了太平洋板块俯冲的深度及它与库拉板块的相关信息,由低速异常表明阿拉斯加南部存在太平洋—胡安德富卡板块窗,该结论与已有的研究一致.同时,齐诚等(Qi et al., 2007)利用大量的 P 波和 S 波近震走时数据通过建立非均匀网格模型反演 P 速度对阿拉斯加下方地壳和上地幔的结构做了相关研究. Ferris (Ferris et al., 2003)、艾印双等(Ai et al., 2005)通过接收函数方法对阿拉斯加地区做了研究,但以上研究都没有提供横波和泊松比的深部结构图像.

本文利用 1992 年到 2002 年阿拉斯加区域密集地震台网接收的地震资料,采用赵大鹏等(Zhao et al., 1992)提出的层析成像的方法对精心挑选的 P 波、S 波走时数据做了处理,第一次同时获得了阿拉斯加南部区域的三维速度结构和泊松比分布.文章在赵大鹏、齐诚等研究的基础上,除了计算 P 波速度结构之外,同时使用 S 波走时数据进行了地震定位和反演,从反演获得的纵横波速度模型,计算了研究区域的泊松比.通过 P 波、S 波三维速度和泊松比分布对太平洋板块在阿拉斯加南部区域的俯冲情况做了研究,讨论了阿拉斯加南部地震活动的相关结构和构造环境,进一步揭示该区域地震发生与太平洋板块俯冲、板块几何形态的关系,为探索该区域地壳和上地幔精细结构、太平洋板块俯冲机制等构造运动提供重要证据.

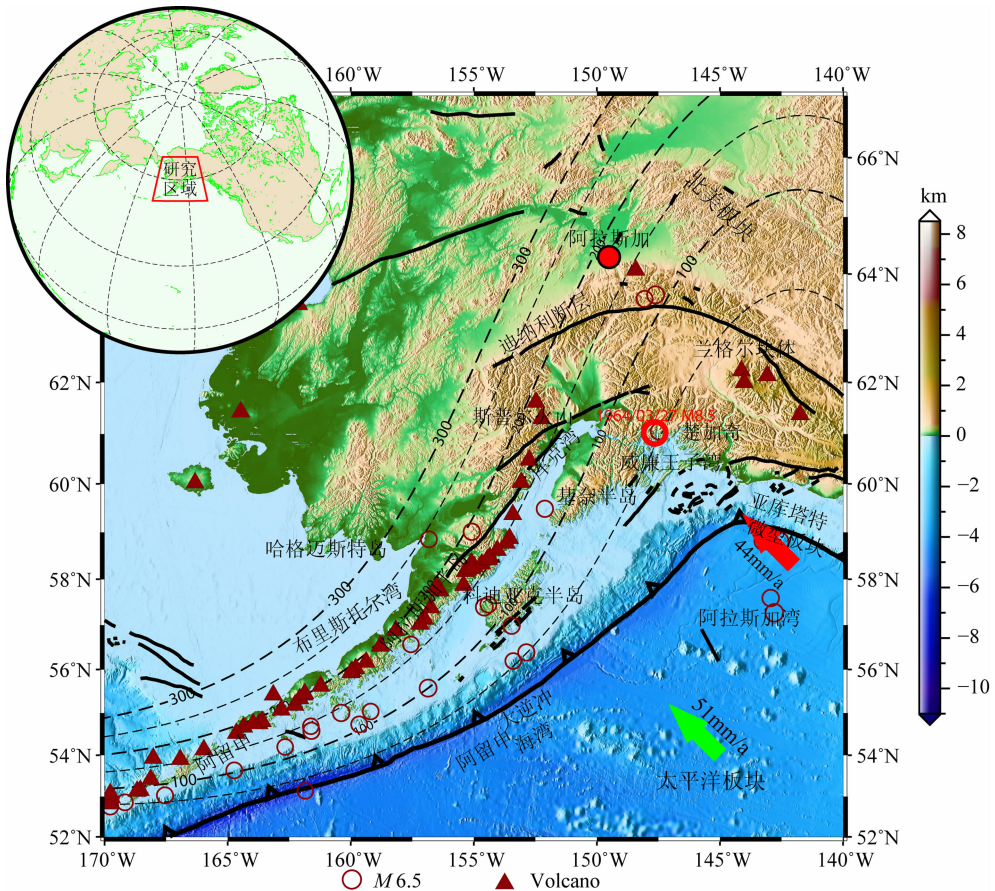


图1 研究区域阿拉斯加的地形构造图. 红色的圈表示在1992年至2002年期间发生在阿拉斯加地区震级在5.5级以上的地震. 红色的三角形表示火山, 黑色的虚线表示研究区域的俯冲带的上边界, 黑色的实线表示断层. 绿色的箭头表示太平洋板块俯冲的方向, 红色的箭头表示亚库塔特板块俯冲方向, 左上角图中的红色方框表示研究区域, 地形的高程色标如右边所示

Fig.1 Tectonic background of South of Alaska. The red open circles denote large historic earthquakes ( $M > 5.5$ ) occurred during the period from 1992 to 2002. Dark red triangles denote the active volcanoes. Black dashed lines showing depth distribution of the upper boundary of Pacific plate beneath the Alaska region. The faults are show as the black solid lines. A green arrow indicates the direction of subduction of the Pacific plate and a red arrow denotes the direction of subduction of Yakutat plate. The red square on the upleft insert map indicates the present study area. The elevation scale is shown to the right of the map

## 2 数据资料与方法

本文研究区域覆盖了阿拉斯加州的广大地区 ( $170^{\circ}\text{W}—140^{\circ}\text{W}$ ,  $52^{\circ}\text{N}—67^{\circ}\text{N}$ ). 我们收集了1992年1月1日至2002年12月31日期间发生在该区域的地震资料. 通过对地震资料严格的筛选, 最后挑选出了大量的P波和S波走时数据. 筛选的具体标准如下: (1) 地震事件均发生在本研究区域内; (2) 每一个地震事件都有二十条以上的走时记录; (3) 只筛选发生在台网范围内的地震事件. 最后, 在研究区域共挑选出11792个地震事件中的562891个P波和

156321个S波到时数据. 文章中使用了1992年1月1日至2002年12月31日期间记录地震事件的466个地震台站. 这些台站属于阿拉斯加地区台网, 三维地震和台站分布如图2所示.

体波走时层析成像方法自20世纪70年代中期Aki和Lee首次创立以来, 相继在20世纪80年代Thurber和20世纪90年代初赵大鹏的研究后趋于成熟 (e. g., Zhao et al., 1992, 1994; Lei et al., 2005; Wang and Zhao, 2005; Wang et al., 2006) 并得到了成功的应用 (e. g., Wang and Zhao, 2005, 2006; Lei et al., 2005; Wang et al., 2006; 田有等, 2007, Zhao et al., 2009). 在阿拉斯加南

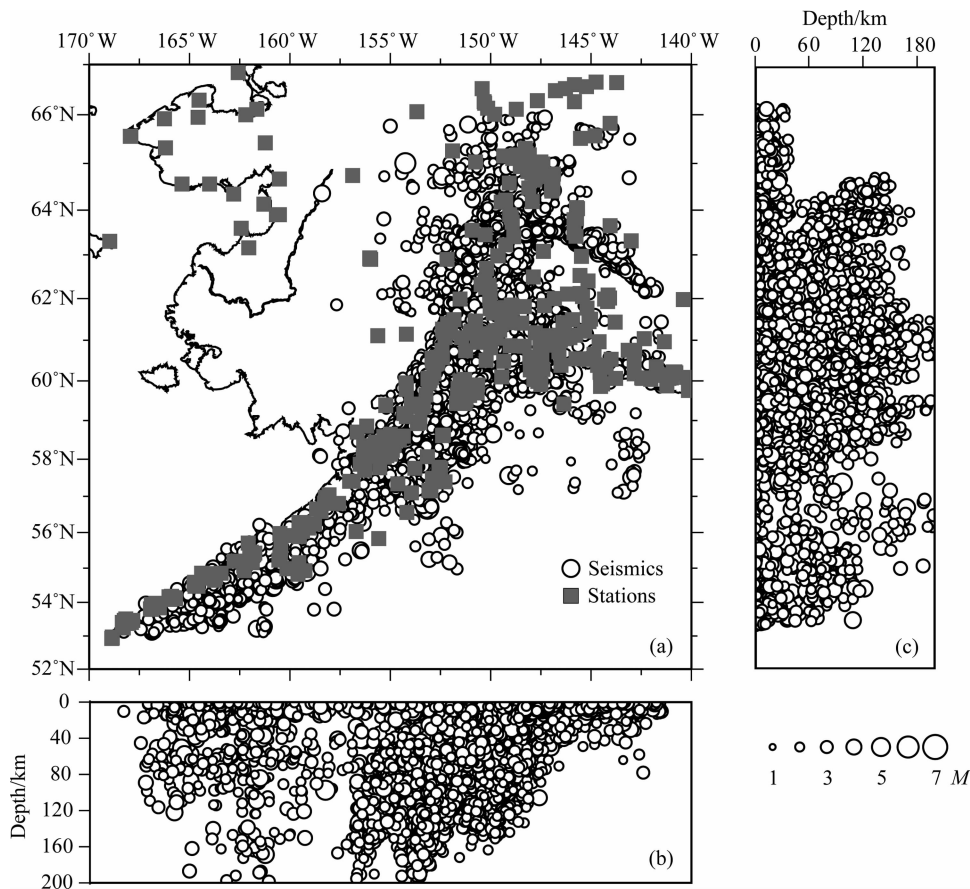


图 2 研究区域内地震和台站分布图. 白色的圈表示发生在研究区域内地震分布, 灰色方形表示研究区域内的台站分布. 震级大小如右下角所示

Fig. 2 Distributions of seismic stations and 3-D hypocenters. White opened circles denote earthquakes occurred in Alaska. Gray squares represent seismic stations. Magnitude scale of the earthquakes is shown on lower right of the map

部区域的研究中, 我们应用了赵大鹏等 (Zhao et al., 1992, 1994) 的层析成像联合反演的的方法. 利用选取研究区域内 P 波和 S 波走时数据进行地震定位及速度反演, 确定该地区下方地壳和上地幔的三维速度结构. 泊松比结构是从反演获得的速度模型计算出来的. 在速度反演过程中, 采用三维网格点来表示地下模型空间速度分布, 模型空间任意一点的速度通过周围八个点的直线性插值求得. 反演过程将震源参数和速度参数联合反演, 采用 LSQR (正交分解最小二乘法) 方法求解系数矩阵, 进行线性反演. 该方法不仅适用于连续变化的速度模型, 同时可以应用于存在复杂间断面的速度结构中. 在研究阿拉斯加区域时, 为了有效降低最终残差, 考虑到了研究下方的康拉德面、莫霍面和太平洋俯冲板块的速度不连续界面对计算射线路径和走时的影响, 在反演过程中, 将三个不连续面的深度信息带入了速度模型中. 其中, 不连续面中的康拉德面和莫霍面信息来自 Crust 2.0 模型, 康拉德不连续面平均约为

10.3 km, 莫霍面不连续面平均约为 26.9 km. 在一维速度模型的设置方面, 本文参考了赵大鹏 (Zhao et al., 1995)、齐诚 (Qi et al., 2007) 等关于阿拉斯加的研究, P 波、S 波一维速度模型如图 3a 所示. 在三维网格设置上, 水平网格为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 垂直网格间隔为 10~25 km, 结合不连续面的位置及其深度方向地震分布, 将深度方向分成四部分: 第一部分以莫霍面附近为界, 以上每 10 km 分一层; 第二部分为 30~60 km, 以上每 15 km 分层; 第三部分 60~100 km, 以 20 km 为间隔分层; 第四部分 100~200 km, 每 25 km 分层, 总计 12 层, 网格模型如图 3b 所示. 在反演参数设置上, 每个网格点通过射线数设置为最少 10 条, 阻尼系数为 20.

### 3 分辨率测试分析

在结果分析讨论之前, 为了说明反演获得的速度异常和高速度的俯冲大洋板块的分辨率可靠性,

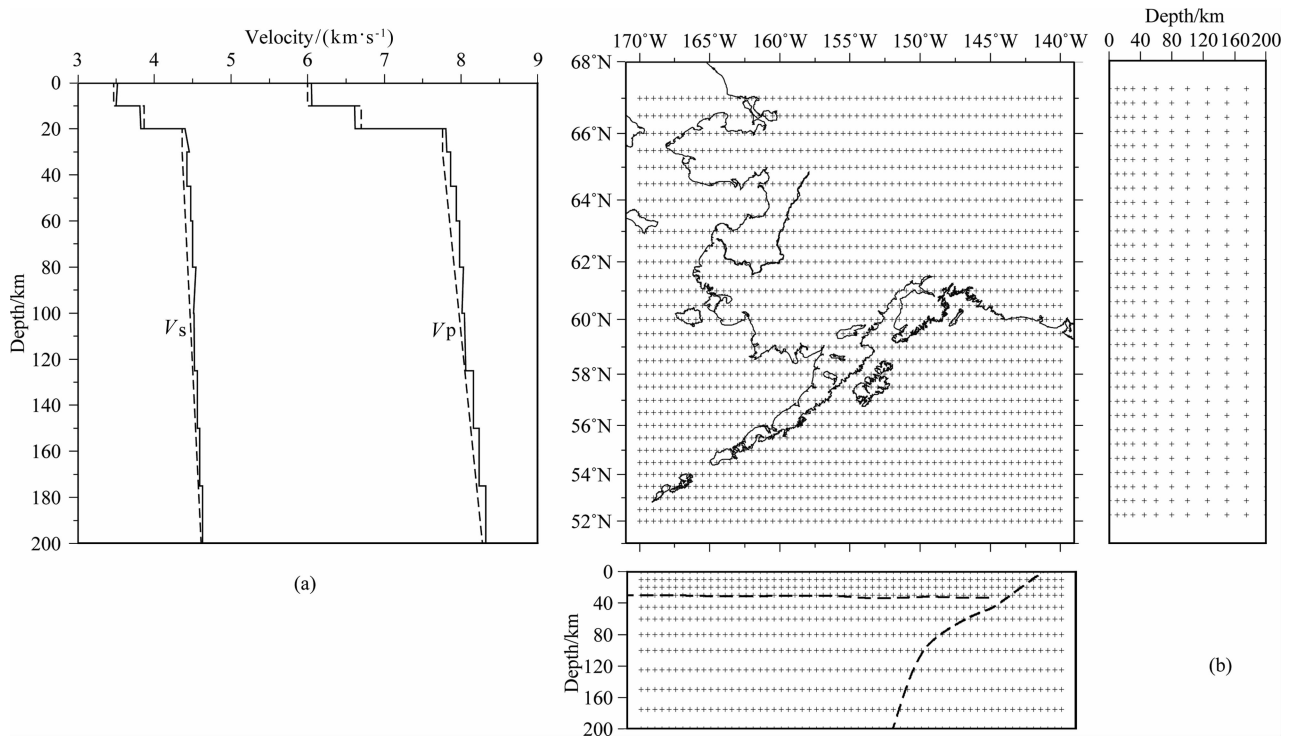


图3 一维速度和三维网格模型

(a)一维P波和S波速度初始模型;图(a)中虚线表示初始速度模型,实线表示震源定位和层析成像反演计算使用的速度。

(b)震源定位和层析成像反演使用的三维网格模型。图b中的粗虚线表示莫霍面和太平洋俯冲板块的上边界

Fig. 3 1-D initial velocity and 3-D grid models

(a) The 1-D initial  $V_p$  and  $V_s$  models. The initial velocity models are indicated with dash lines, solid lines show the calculated velocity used for hypocenter location and tomographic inversion. (b) The grid model used for hypocenter location and tomographic inversion. Thick dashed lines show the Moho discontinuity and the upper boundary of Pacific slab

本文对研究区域做了可恢复性测试(e. g., Wang et al., 2006),该方法是检测地震层析成像反演结果的可靠性和分辨率测试的有效方法之一。图4的左侧分别是P波(a)和S波(b)恢复性测试的输入模型。该模型是将该区域P波和S波反演获得的真实结果分别作为两个初始模型。在使用输入模型计算的理论走时中(即正演计算),分别将0.07和0.1的随机误差加到P波和S波上,然后使用相同的地震事件和台站数及射线数等参数分别使用输入模型对P波和S波进行反演。图4的右侧分别是P波(a)和S波(b)恢复性测试的输出结果,即输出模型。通过对输入模型和输出结果比较可以发现:P波和S波速度振幅大小有变化,但是所表示异常的形态和规模与输入模型基本一致。P波和S波高速异常分布与阿拉斯加南部下方太平洋板块和亚库塔特板块的俯冲情况一致。但是,可以明显发现随着深度的增加,分辨率在逐渐降低,尤其在南阿拉斯加东部和阿拉斯加半岛。这主要是因为阿拉斯加东部,地震相对中部地区要少(图2c),在阿拉斯加半岛区域,台站都分布在陆地(图2a)。由于地

震和台站都比较稀疏(图2b),导致该区域的射线密度比较低,从而导致分辨率比较低。图4c是恢复实验垂直剖面的实例,可以看出右侧的输出结果与左侧的输入模型相比,除了输出结果的振幅值与输入模型相比稍有减弱外,无论是振幅还是异常体的空间分布形态都基本上恢复出来。通过对图4输入模型和输出结果对比发现,总的来说,输入模型能较好地恢复出来,说明本研究所采用的地震数据和选取的初始参数所反演出的速度模型是可靠和真实的。

## 4 结果分析与讨论

通过可靠性分析,在本节我们将对阿拉斯加南部区域的成像结果进行分析讨论。图5是P波速度(a)、S波速度(b)和泊松比结构(c)在不同深度的水平切片。图6是P波和S波速度以及泊松比分别沿L1、L2、L3、L4、L5、L6剖面的图像,其中L1、L2、L3、L4、L5剖面沿着亚库塔特板块和太平洋板块俯冲方向。L1位置剖面北端穿过迪纳利(Denali)断层,

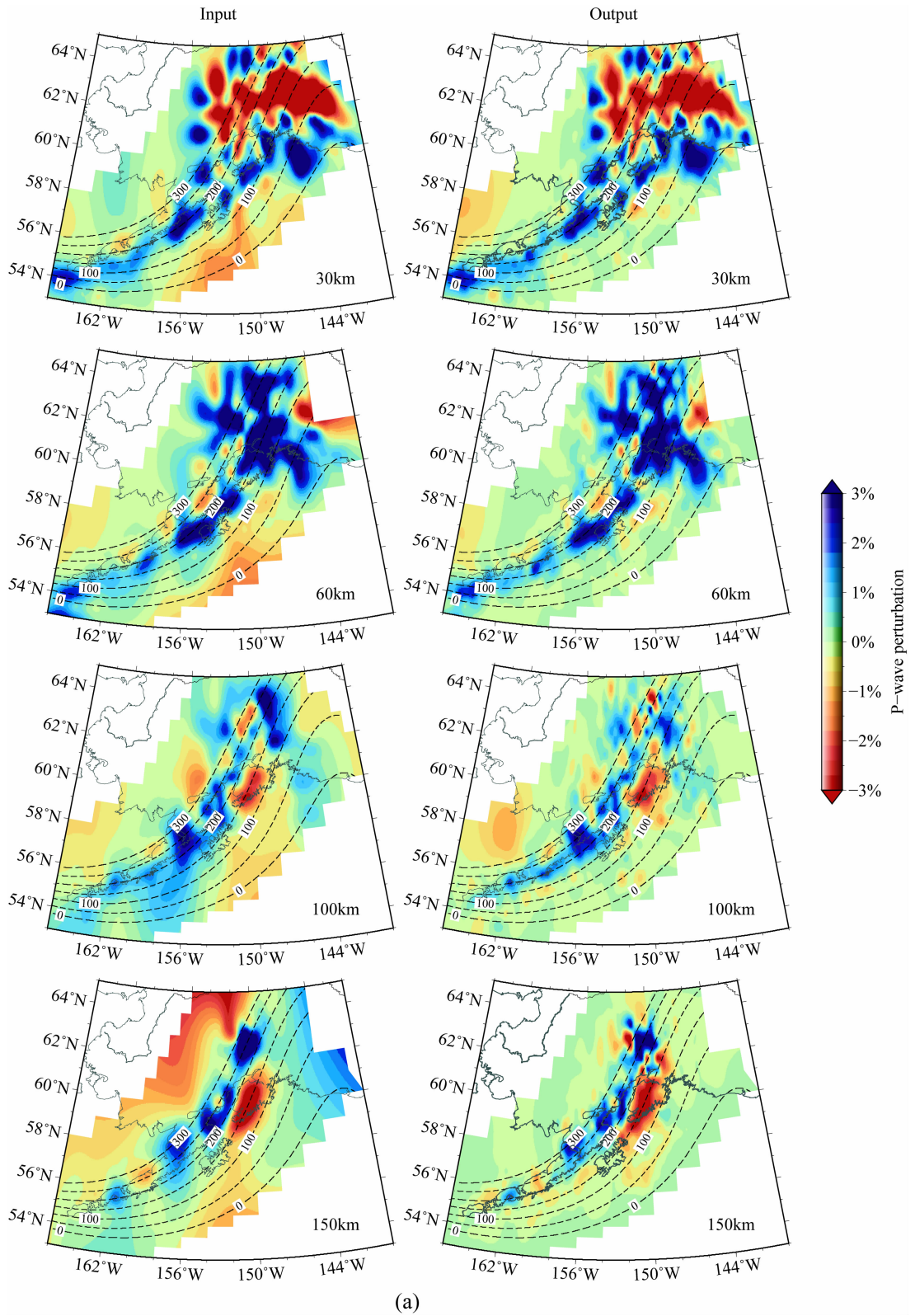


图 4a P 波恢复性试验

Fig. 4a The restoring resolution test for P-wave

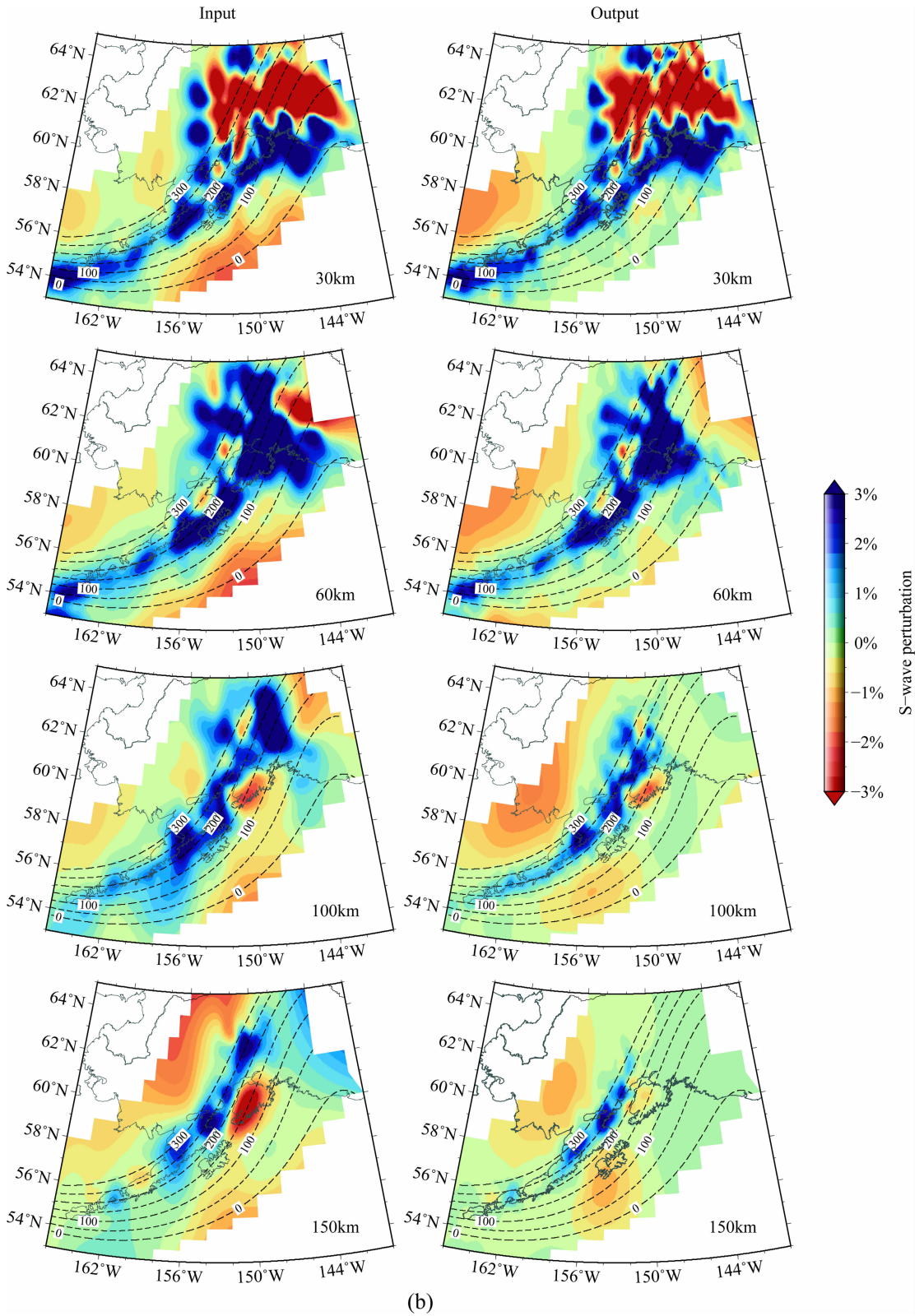


图 4b S 波恢复性试验

Fig. 4b The restoring resolution test for S-wave

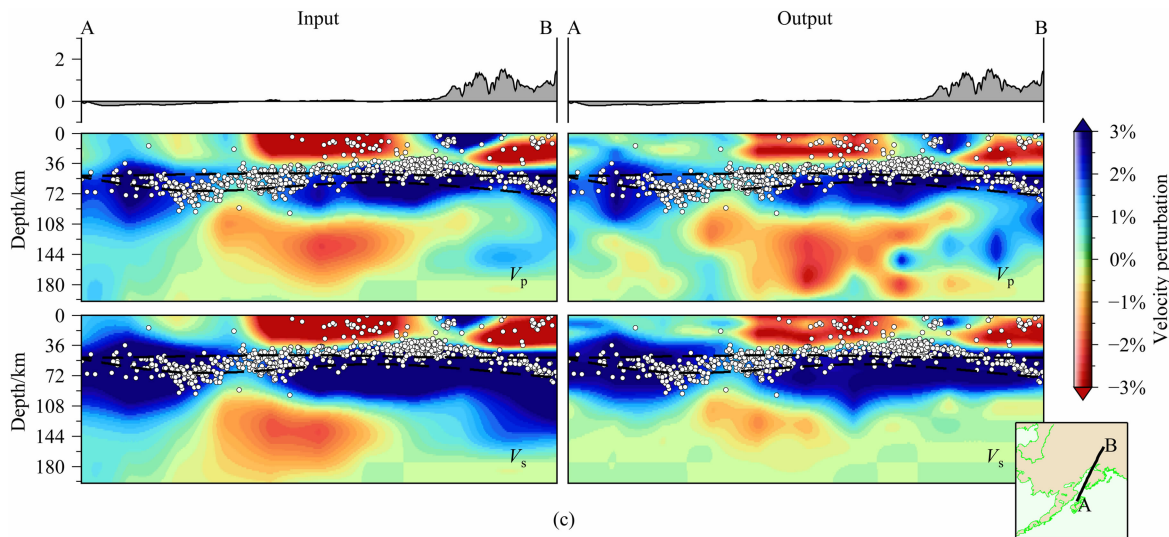


图 4 速度恢复性分辨率测试结果

(a) P波、(b) S波和(c)沿插图中位置的恢复性试验. 每幅图的左侧为输入模型, 右侧为输出模型. 红色的表示低速度, 蓝色表示高速度. 图中黑色的虚线表示研究区域俯冲板块上边界和莫霍面. 每一层的深度标志在每一幅图的右下角. 白色的圆圈表示沿剖面 10 km 范围内的地震, 速度扰动色标如右图所示.

Fig. 4 Map views of restoring resolution test

(a) P-wave, (b) S-wave and (c) vertical section along the line shown in the insert map. Left column indicates the input model and right column denote the output model for each map. Red color denotes low velocity while blue color indicates high velocity. Black dashed lines showing depth distribution of the upper boundary of Pacific plate and Moho discontinuity. The depth of each map is shown at the lower right corner. White dots indicate seismicity with a 10km thickness bound to each slice. The velocity perturbation scale is shown on the right.

南端与兰格尔(Wrangell)山脉相接. L2剖面穿过威廉王子湾, 临近迪纳利断层. L3剖面横穿基奈半岛, 北临斯普尔火山(Spurrr). L4剖面位于基奈半岛和阿拉斯加-阿留申半岛之间. L5剖面位于阿拉斯加半岛. L6剖面东端位于兰格尔板块, 西端穿过阿拉斯加半岛. 同时, 发生在每层或每个剖面 10 km 范围内的地震和火山也表示在图上, 其中红色圆圈表示震级在 6.5 级以上的大地震. 本研究在层析成像反演中没有引入大洋俯冲板块先验信息到初始速度模型, 速度扰动是通过每层反演速度的平均值求得.

图 5a、图 5b 和图 5c 是不同深度的速度和泊松比水平剖面, 我们可以看出 P 波速度和 S 波速度与泊松比异常在空间分布上十分相似. 在阿拉斯加南部区域地壳附近的速度异常与该区域地表主要特征有密切的关系, 大部分的低速度( $V_p$ ,  $V_s$ )与该区域的火山活动及沉积盆地有关, 如库克湾(Cook Inlet)盆地等. 从 10 km 处的水平剖面可以看到, 研究区域的东北部, 地震基本沿迪纳利(Denali)断层分布, 对比 10 km 和 30 km 处的水平剖面, 可以明显地看到迪纳利断层周围在 30 km 附近基本没有地震分布, 我们认为迪纳利断层下方岩石破裂深度延伸小于 30 km, 该推断结论与 Eberhart (Eberhart et al., 2003) 研究一致. 同时, 我们可以发现研究区

域内地表的一些断层(如迪纳利断层)与俯冲板块顶面等值线明显存在一定的夹角(图 1 和图 5), 这可能与亚库塔特板块俯冲到阿拉斯加南部下方引起结构变化有关, 前人也有相关的介绍(Tian and Zhao, 2012). 在阿拉斯加中南部与阿留申大逆冲之间分布着显著的高速度( $V_p$ ,  $V_s$ )与低泊松比异常, 这些异常与地震的分布具有较好的一致性, 这一特征与前人的 P 波层析成像研究结果类似(Qi et al., 2007). 大约在 100~200 km, 库克湾(Cook Inlet)盆地南端呈现强烈的低  $V_p$  和  $V_s$  与高泊松比异常, 该异常体被认为是俯冲进来的太平洋板块早先存在的特征或是由地幔变形造成(Qi et al., 2007; Eberhart et al., 2006).

图 5 显示, 地震震源深度靠太平洋侧较浅, 靠近阿拉斯加侧较深, 并且地震基本上都发生在高速度和低泊松比异常带. 震源深度随离太平洋的距离增加而逐渐变深, 形成了一个倾斜的地震分布带, 这样的分布与西太平洋在日本俯冲带的特征相似(Zhao et al., 1992; 马宗晋等, 2003; Wang and Zhao, 2005). 由阿拉斯加地区的地震空间分布特征以及反演获得的速度与泊松比图像中的高速度异常分析, 我们推断该清晰的高速体是俯冲至阿拉斯加下方的太平洋板块和东南部的亚库塔特板块. 同时, 研究范



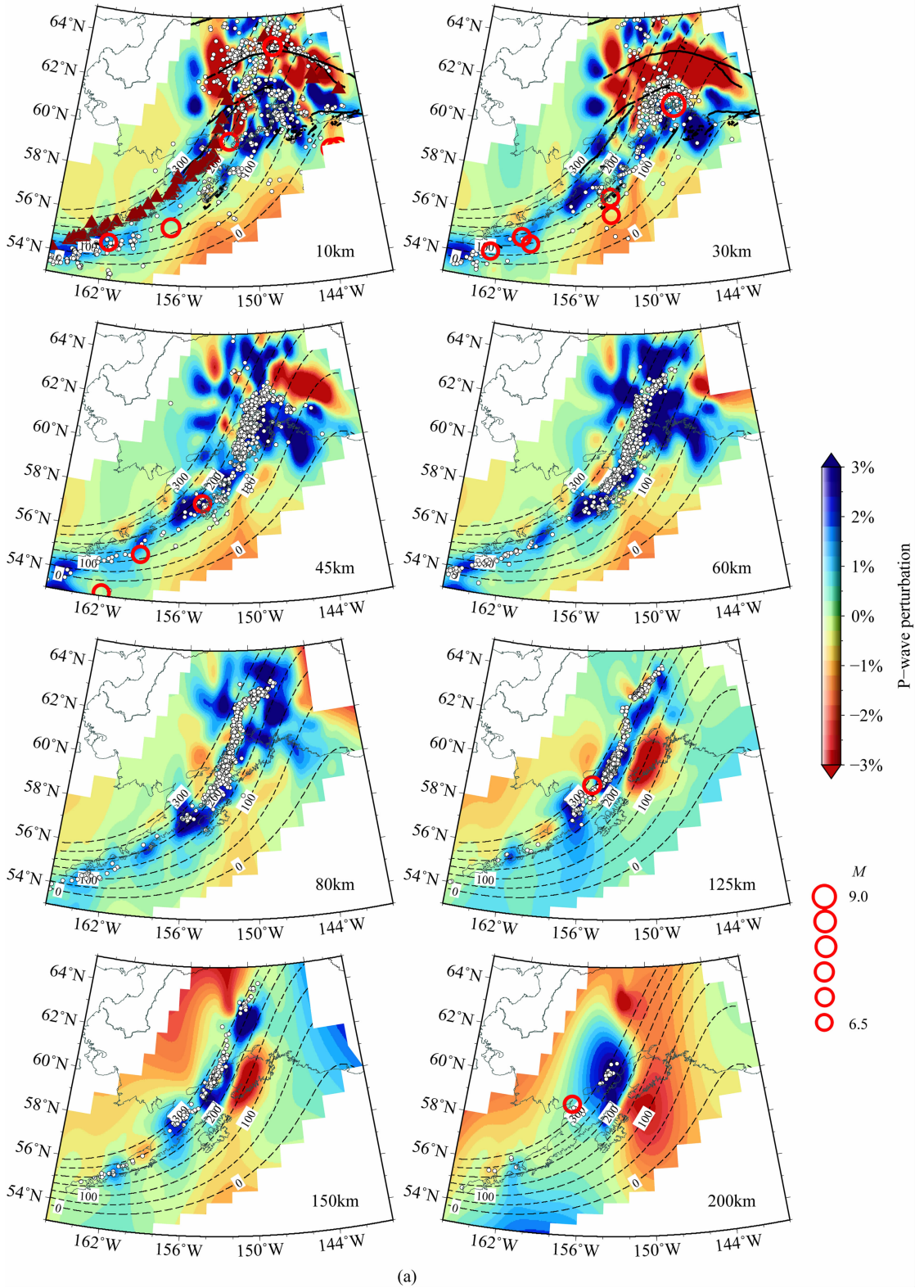


图 5a P 波速度结构水平切片

Fig. 5a The plan views of P-wave velocity perturbations

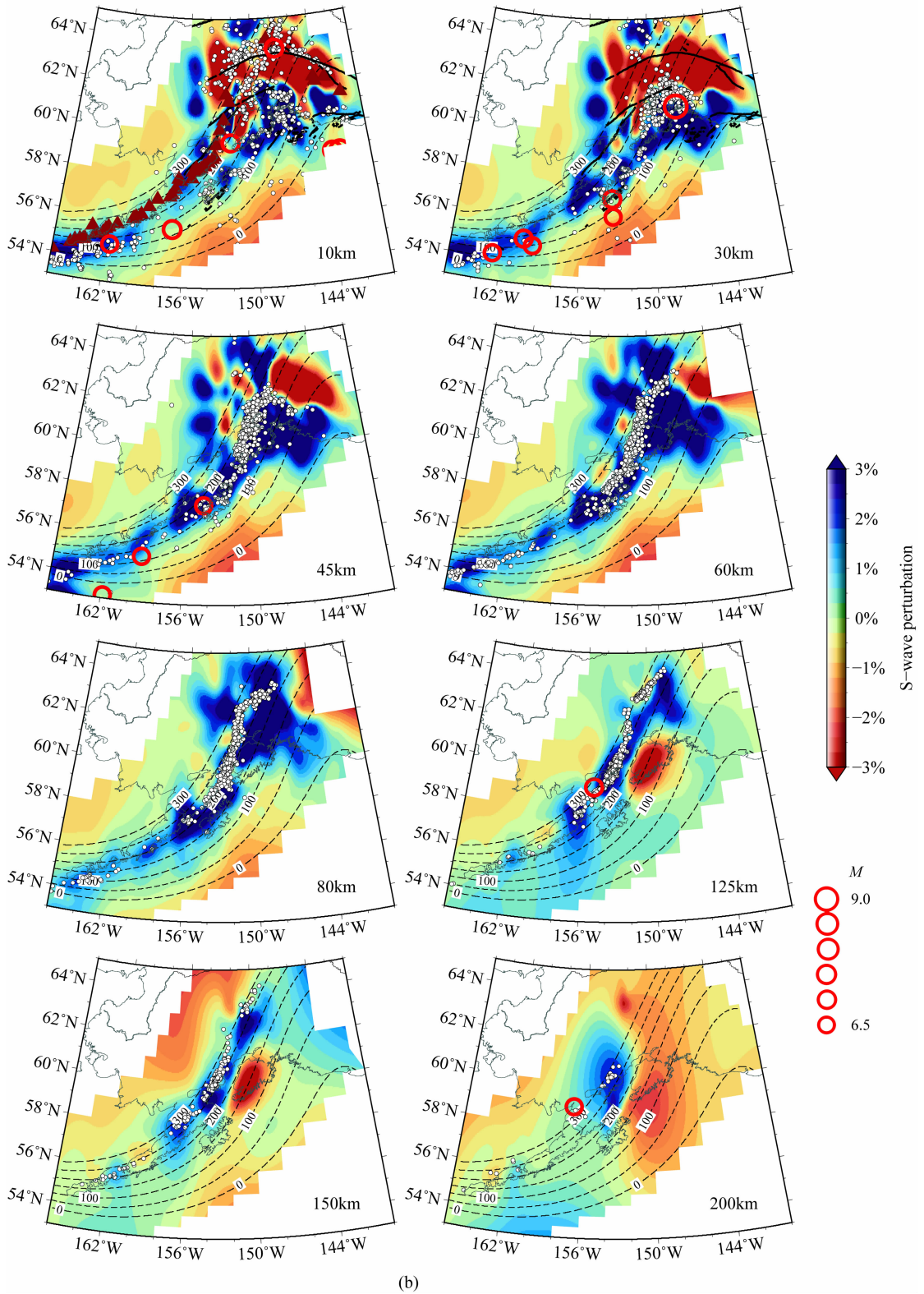


图 5b S 波速度结构水平切片

Fig. 5b The plan views of S-wave velocity perturbations

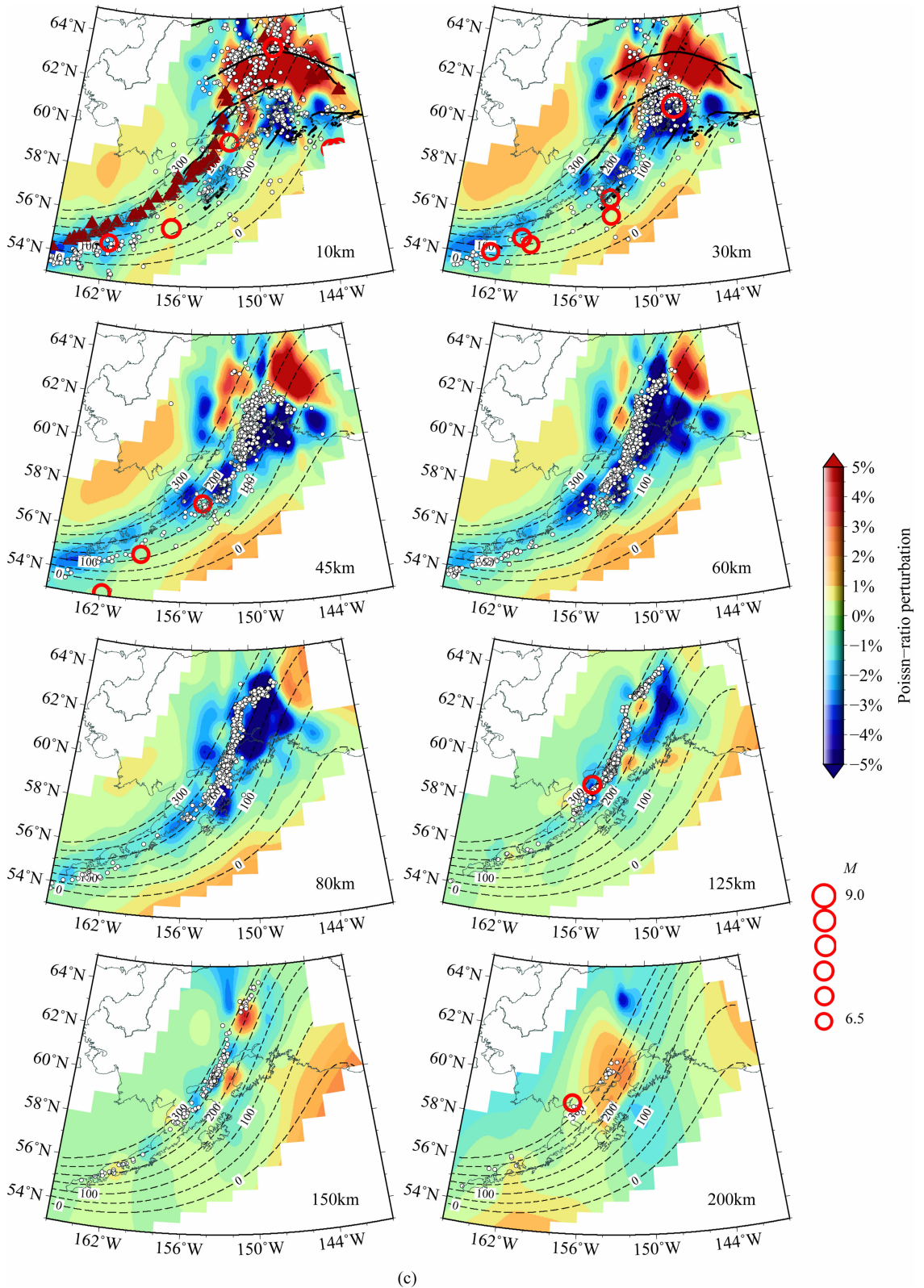


图 5 速度和泊松结构水平切片

(a) P 波速度结构; (b) S 波速度结构; (c) 泊松比结构. 红色的表示低速度和高泊松比, 蓝色表示高速度和低泊松比, 白色圈表示发生在相应水平层上下 5 km 范围内的地震, 红色圆圈表示震级大于 6.5 的地震. 黑色虚线表示研究区域俯冲板块上边界, 黑色的实线表示断层, 每一层的深度标志在每一幅图的右下角, 地震震级标度、速度和泊松比扰动色标如右图所示.

Fig. 5 Plan views of velocity and Poisson's ratio perturbations

(a) P-wave velocity, (b) S-wave velocity, (c) Poisson's ratio perturbations. Red color denotes low velocity and high Poisson's ratio and blue color indicates high velocity and low Poisson's ratio. White circles show earthquakes occurred with a 5 km depth bound to each horizontal section. Red opened circles denote large earthquakes ( $M > 6.5$ ). Black dashed lines indicate upper boundary of the Pacific plate. The faults are show as the black solid lines. The depth is shown on the lower-right corner of each map. Magnitude scale of the earthquakes and the velocity and Poisson's ratio perturbation scales are shown on the right.

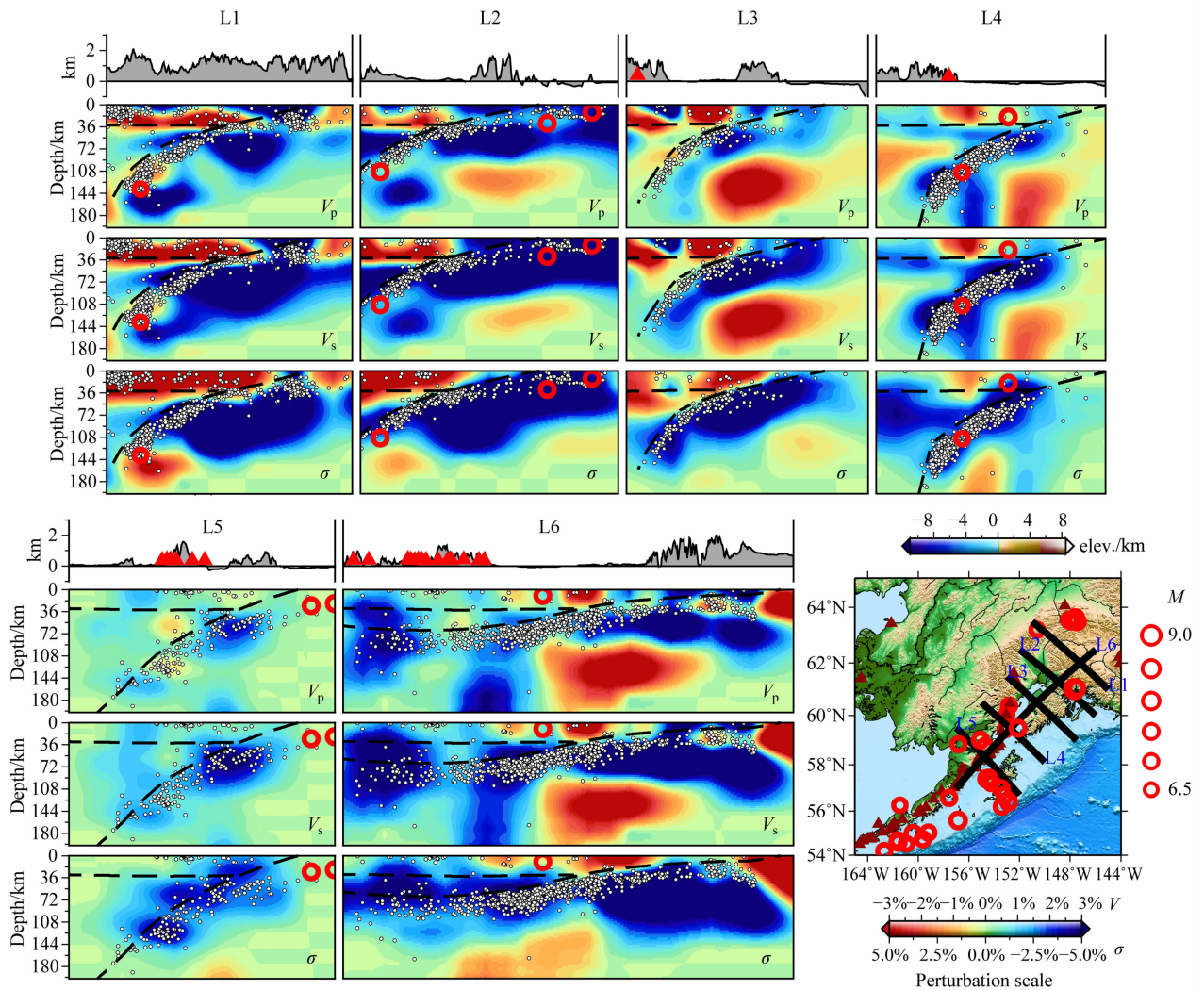


图 6 沿不同位置的速度和泊松比垂直剖面

红色三角形表示活动火山,黑色的虚线分别表示莫霍不连续面和太平洋俯冲板块上边界,白色的圆圈表示沿剖面 10 km 以内地震,红色粗圆圈表示震级大于 6.5 级的地震.红色表示低速度和高泊松比,蓝色表示高速度和低泊松比.对应剖面地表地形标在每个剖面的顶部,地震震级标度、速度和泊松比扰动色标如右下方所示.

Fig. 6 Vertical cross sections of P-wave velocity, S-wave velocity and Poisson's ratio perturbations along the lines shown on the insert map

The surface topography is shown on the top of each profile. Red triangles denote the active volcanoes. Dark dashed lines show Moho discontinuity and the upper boundary of Pacific slab. White dots show seismicity with 10 km thickness bound to each section. Red opened circles denote earthquakes with magnitude greater than 6.5. Red color denotes low velocity and high Poisson's ratio while blue color indicates high velocity and low Poisson's ratio. The magnitude scale of earthquakes, velocity and Poisson's ratio perturbation scales are shown on the lower right corner.

围内大部分大地震(震级大于 6.5 级)发生在高速度异常及低泊松比异常的边缘或高低速度与低泊松比异常转化的位置,表明该区域板块块体之间存在强的板耦合作用.通过 L1, L3, L4 剖面,我们可以发现,在大约 35 km 深地幔楔附近存在较强的低速度和高泊松比异常,我们认为这些异常可能是与亚库塔特板块和太平板块俯冲岩浆流体有关,这些低速体则与岛弧火山活动相关.从 L5 和 L6 位置剖面

来看,尽管其周围存在较多火山,但是在速度异常及泊松比异常上仅表现为轻微的低速度和高泊松比异常,相关研究认为在阿拉斯加半岛东段火山运动的规模比较小(洪汉净等,2011),所以在速度异常上并不非常明显.另外,从分辨率测试结果发现该区域的分辨率较低,因为穿过该区段的射线数相对较少,因而异常不明显.由 L1, L2, L3, L4, L5 高速度与低泊松比异常及空间地震分布情况,我们认为在阿

拉斯加区域下方俯冲太平洋板块的俯冲角度从兰格尔块体到布里斯托尔湾由平坦到逐渐陡峭。图 6b 中剖面 L6 显示,在地震分布上,靠近兰格尔块体穿过楚加奇临近基奈半岛这一段,大部分地震发生在高速度和低泊松比异常区的顶部。但是,从基奈半岛西南到阿拉斯加半岛下方这一段,大部分地震分布在高速度和低泊松比异常内部,依据前人环太平洋地震带相关研究(马宗晋等,2003;上田诚也等,1987),我们认为在俯冲角较小兰格尔至基奈半岛段产生的地震属于大洋岩石圈向下弯曲形成的正断层型浅震,而在俯冲角增大的基奈半岛西南至阿拉斯加半岛段,属于俯冲过程中形成了贝尼奥夫带的中深源板内型地震。在速度异常分布方面,阿拉斯加半岛东端下方 P 波和 S 波高速度异常分布在 15~140 km 范围内,从兰格尔山脉向西南方向高速度异常逐渐变深至 180 km。相比之下,S 波速度异常的连续性较 P 波要好。在靠近阿拉斯加半岛附近 P 波、S 波高速异常和低泊松比异常呈不连续分布,早先(Creager et al., 1992)的研究认为兰格尔板块西端俯冲在阿拉斯加—阿留申板块东端的下方,我们的结果与早先在该区域研究的结果一致。L6 剖面 70 km 之下存在向下延伸至 200 km 的低速度高泊松比的异常体,该低速体位于基奈半岛和科迪亚克岛之间的上地幔,我们推断该低速度可能与亚库塔特板块与太平洋板块俯冲和相互碰撞有关,同时也和地幔软流圈强烈的上升流有关,它使俯冲的太平洋板块在该位置变薄,可能形成俯冲板块新的板片窗。

## 5 结论

本文利用阿拉斯加区域地震台网记录到的 11792 个地震,挑选出 562891 个 P 波和 156321 个 S 波走时震相数据,采用地震层析成像反演方法第一次同时得到了阿拉斯加区域下方 200km 深度范围的 P 波和 S 波的三维速度结构以及泊松比图像。基于 P 波和 S 波速度结构与泊松比图像的一致性,获得了与该区域的地震分布和大洋板块俯冲相关的以下几点结论:

(1) 首次同时获得了阿拉斯加地区的速度( $V_p$ ,  $V_s$ )和泊松比的一致性结构图像。在阿拉斯加东北至西南发现大区域的高速体异常,我们认为是俯冲到阿拉斯加下方的太平洋板块和亚库塔特板块,大部分大地震( $M > 6.5$ )发生在高速异常区域或者在高速度异常与低速度异常之间过渡带,俯冲板块之

间耦合作用在这些区域较强。沿着俯冲区域岛弧链下方地幔楔显示出大范围低速度和高泊松比异常,反映了与大洋板块俯冲相关的火山岩浆活动。

(2) 从格兰尔块体到布里斯托尔湾的高速度和低泊松比异常及地震空间分布情况发现,在南阿拉斯加区域下方的大洋板块的俯冲角度从格兰尔块体到布里斯托尔湾由平坦变得逐渐陡峭,这主要是由于亚库塔特板块和太平洋板块分别俯冲在阿拉斯加的东边和西边的缘故。

(3) 位于基奈半岛和科迪亚克岛连接处 70 km 之下存在延伸至 200 km 深度的低速度和高泊松比的异常体,我们推断该处可能与太平洋板块与亚库塔特板块相互作用以及强烈地幔软流圈上升流有关,该低速度的热物质会使得俯冲的大洋板块变薄,甚至在将来形成俯冲板块板片窗(slab window)。

**致谢** 感谢两位匿名评审专家的宝贵意见,他们的意见提高文章的质量。感谢赵大鹏教授提供层析成像程序开展本次研究工作,感谢 Incorporated Research Institutions For Seismology (IRIS) 和 International Seismological Center (ISC) 提供地震波形和震相资料,感谢 Alaska Earthquake Information Center (AEIC) 提供地震信息,文章中所涉及到的图件均由 GMT 制作。

## References

- Ai Y S, Zhao D P, Gao X, et al. 2005. The crust and upper mantle discontinuity structure beneath Alaska inferred from receiver functions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150 (4): 339-350.
- Brocher T M, Fuis G S, Fisher M A, et al. 1994. Mapping the megathrust beneath the northern Gulf of Alaska using wide-angle seismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978—2012), 99(B6): 11663-11685.
- Creager K C, Chiao L Y. 1992. Membrane deformation rate and geometry of Aleutian-Alaska subduction. // Chritensen D, Wyss M, Habermann R E, Davies J eds. *Wadati Conference on Great Subduction Earthquakes*. Univ. of Alaska, Fairbanks, 27.
- Eberhart-Phillips D, Haeussler P J, Freymueller J T, et al. 2003. The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: A large magnitude, slip-partitioned event. *Science*, 300(5622): 1113-1118.
- Eberhart-Phillips D, Christensen D H, Brocher T M, et al. 2006. Imaging the transition from Aleutian subduction to Yakutat collision in central Alaska, with local earthquakes and active source data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978—2012), 111(B11), doi: 10.1029/2005JB004240.

- Ferris A, Abers G A, Christensen D H, et al. 2003. High resolution image of the subducted Pacific (?) plate beneath central Alaska, 50 ~ 150 km depth. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(3): 575-588.
- Finzel E S, Trop J M, Ridgway K D, et al. 2011. Upper plate proxies for flat-slab subduction processes in southern Alaska. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3): 348-360.
- Fuis G S, Ambos E L, Mooney W D, et al. 1991. Crustal structure of accreted terranes in southern Alaska, Chugach Mountains and Copper River Basin, from seismic refraction results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978—2012), 96(B3): 4187-4227.
- Hong Hanjing. Alaska-Aleutian volcanic belt. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_7e67b28b0100u4hc.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_7e67b28b0100u4hc.html), 2011-09-19/2013-09-25.
- Kanamori H. 1986. Rupture process of subduction-zone earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 293-322.
- Lei J S, Zhao D P. 2005. P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast Asia. *Tectonophysics*, 397(3): 281-295.
- Ma Zongjin, Du Pinren, Hong Hanjing. 2003. Structure and Dynamics of the Earth(in Chinese). Guangzhou:Guangdong Science and Technology Press.
- Qi C, Zhao D P, Chen Y. 2007. Search for deep slab segments under Alaska. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 165(1-2): 68-82.
- Qi C, Zhao D, Chen Y, et al. 2007. New insight into the crust and upper mantle structure under Alaska. *Polar Science*, 1(2): 85-100.
- Tian Y, Zhao D P, Sun R M, et al. 2007. The 1992 Landers earthquake: Effect of crustal heterogeneity on earthquake generation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(5): 1488-1496.
- Tian Y, Zhao D P, Liu C, et al. 2009. A review of body-wave tomography and its applications to studying the crust and mantle structure in China. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 347-360.
- Tian Y, Zhao D P. 2012. Seismic anisotropy and heterogeneity in the Alaska subduction zone. *Geophysical Journal International*, 190(1): 629-649.
- Ueda Serya, Zhang Kang, Chang Gong, 1987. About trench-arc-back arc system arguments, concepts and unsolved problems. *Offshore Oil*(in Chinese), (03)40-47.
- Wang Z, Zhao D P. 2005. Seismic imaging of the entire arc of Tohoku and Hokkaido in Japan using P-wave, S-wave and sP depth-phase data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 152(3): 144-162.
- Wang Z, Zhao D P, Wang J, et al. 2006. Tomographic evidence for the Eurasian lithosphere subducting beneath south Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 33, L18306, doi: 10.1029/2006GL 027166.
- Wang Z, Zhao D P. 2006. Seismic images of the source area of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake in Northeast Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1-2): 16-31.
- Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 97(B13): 19909-19928.
- Zhao D P, Hasegawa A, Kanamori H. 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 99(B11): 22313-22329.
- Zhao D P, Christensen D, Pulpan H. 1995. Tomographic imaging of the Alaska subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978—2012), 100(B4): 6487-6504.
- Zhao D P, Wang Z, Umino N, et al. 2009. Mapping the mantle wedge and interplate thrust zone of the northeast Japan arc. *Tectonophysics*, 467(1-4): 89-106.

## 附中文参考文献

- 洪汉净. 2011. 阿拉斯加-阿留申火带. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_7e67b28b0100u4hc.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_7e67b28b0100u4hc.html), 2011-09-19/2013-09-25.
- 马宗晋, 杜品仁, 洪汉净. 2003. 地球构造与动力学. 广州:广东科技出版社.
- 上田诚也, 张抗, 长工. 1987. 关于沟—弧—弧后体系的论据、概念和未解决的问题. *海洋石油*, (3): 40-47.
- 田有, 赵大鹏, 孙若味等. 2007. 1992年美国加州兰德地震——地壳结构不均匀性对地震发生的影响. *地球物理学报*, 50(5): 1488-1496.
- 田有, 赵大鹏, 刘财等. 2009. 体波走时层析成像方法及其在中国壳幔结构研究中的应用评述. *地学前缘*, 16(2): 347-360.

(本文编辑 胡素芳)