

李洪丽,刘财,田有,等.中国东北地壳结构的地震层析成像.吉林大学学报(地球科学版),2022,52(1):270-280.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20210158.

Li Hongli, Liu Cai, Tian You, et al. Seismic Tomography of the Crustal Structure in Northeast China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1): 270-280. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20210158.

# 中国东北地壳结构的地震层析成像

李洪丽<sup>1</sup>, 刘 财<sup>1,2</sup>, 田 有<sup>1,2</sup>, 范 豪<sup>1</sup>

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

2. 长白山火山综合地球物理教育部野外科学观测研究站, 长春 130026

**摘要:**中国东北地区自晚古生代晚期以来,受古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋、太平洋构造域的叠加作用,壳幔结构极为复杂。本文收集中国东北地区国家地震台网接收的 100 980 个 P 波和 91 030 个 S 波到时数据,采用地震走时层析成像方法获得了该地区地壳 P 波和 S 波速度结构,进而获得了泊松比结构,用以探讨复杂的地壳结构。成像结果显示:中国东北地区地壳地震波速度结构呈明显的横向不均匀性,不同构造单元和构造单元内部都存在不同程度的不均匀性。松辽盆地整体上浅层地壳以低速异常为主,尤其是 S 波速度,但部分区域分辨率较低,中下地壳存在较大范围高速异常,推测与太平洋俯冲、后撤导致的岩石圈拆沉和热物质上涌等动力学过程有关;北部的大兴安岭重力梯级带和长白山—一线主要表现为低速异常,表明具有大范围的岩浆作用,广泛岩浆作用为固体矿产资源的形成提供热源或物源;长白山、五大连池等近代活动的火山下方部分地壳区域均表现了较强低地震波速度和高泊松比异常结构特征,表明仍存在活动的可能。

**关键词:**地震层析成像;中国东北;地壳结构;泊松比结构;活火山

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20210158

中图分类号:P315

文献标志码:A

## Seismic Tomography of the Crustal Structure in Northeast China

Li Hongli<sup>1</sup>, Liu Cai<sup>1,2</sup>, Tian You<sup>1,2</sup>, Fan Hao<sup>1</sup>

1. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2. Changbai Volcano Geophysical Observatory, Ministry of Education, Changchun 130026, China

**Abstract:** Since the Late Paleozoic, Northeast China has experienced the combined effect of Paleo-

收稿日期:2021-05-29

作者简介:李洪丽(1981—),女,博士研究生,主要从事地震活动性、地壳速度成像等方面的研究,E-mail: lihongli@jlu.edu.cn

通信作者:田有(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事地球内部结构成像方面的研究,E-mail: tianyou@jlu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41874049);国家重点研发计划项目(2017YFC0601300);吉林省重点科技攻关项目(20200403068SF)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41874049), the National Key Research and Development Project of China (2017YFC0601300) and the Key Scientific and Technological Project of Jilin Province (20200403068SF)

Asian Ocean, Mongolia – Okhotsk Sea, and Pacific tectonic domain, resulting in the extremely complex crust-mantle structure. In this study, we collected 100 980 P – wave arrival times and 91 030 S – wave arrival times compiled by the National Earthquake Network, and the 3 – D P – and S – wave velocity structures in Northeast China were determined by using seismic tomography method. The Poisson’s ratio structure of the study region was also obtained to explore its complex crustal structure. The tomographic results show that the crustal velocity structure in Northeast China exhibits strong lateral heterogeneities with various degrees of heterogeneity between and within different tectonic units. The Songliao basin is a typical rift basin. The shallow crust shows low P – wave and significantly low S – wave anomalies as a whole, with some low resolution regions. Large-scale high-velocity anomalies exist in the middle and lower crust, which may be related to the subduction and retreat of the Pacific plate beneath the Eurasian continent, resulting in the lithospheric delamination and upwelling of hot and wet asthenosphere material. The northern part of the Great Xing’an Range gravity lineament and the Changbai Mountain show low-velocity anomalies, which may indicate large-scale magmatism. The widespread magmatism may provide heat or material sources for the formation of solid mineral resources. The crust beneath Changbai Mountain and Wudalianchi volcanic areas shows significant low velocity and high Poisson’s ratio anomalies, which may indicate the possibility of volcanic activities.

**Key words:** seismic tomography; Northeast China; crustal structure; Poisson’s ratio; active volcano

## 0 引言

中国东北地区处于中朝克拉通和西伯利亚板块之间,东边与西太平洋俯冲板块相邻。由于西太平洋板块俯冲影响,形成以扩张为主、局部压张的构造格局<sup>[1]</sup>。区内形成了一系列北东向、北东东向为主的盆-山构造单元,并分布着众多火山(长白山、五大连池、阿尔山等),同时伴有强烈的地震活动与火山作用,是研究中国内陆地震与火山活动、盆-山构造及板块活动的重要区域。

地震层析成像方法可以直接获取地球内部三维速度结构,是研究地球内部结构最为有效的方法之一。卢造勋等<sup>[2]</sup>收集了 1980—1997 年间的 38 000 多条 P 波走时资料,对中朝克拉通东北缘地区做了地震层析成像方法研究,结果表明研究区域下地壳内低速层上方的高速脆性介质是强震经常发生的地带。赵金仁等<sup>[3]</sup>在长白山天池火山区做了上地壳的三维速度结构层析成像研究,结果表明天池火山口下方及周边有明显的低 P 波速度异常体分布和高  $v_p/v_s$  ( $v_p$ 、 $v_s$  分别为纵、横波速度)分布,并推测该区介质处于“软化高温”的状态。赵大鹏等<sup>[4]</sup>对长白山及邻近地区的地壳和上地幔三维速度结构进行了详细研究,结果显示长白山火山区的地壳和上地幔中存在深达 400 km、宽约 200 km 的显著低速异常,而在地幔转换带内存在明显高速异常体,推测是滞

留的太平洋俯冲板片,这表明长白山火山并不是一种与地幔柱相关的板内热点火山,而是一种与太平洋板块俯冲及其在地幔转换带中滞留、脱水等过程密切相关的弧后板内火山。Zhao 等<sup>[5]</sup>的研究结果也验证了上述结论。田有等<sup>[6]</sup>收集东北及华北地区部分台网所接收的近震及远震走时资料,获得了东北地区地壳与上地幔三维 P 波速度结构,结果显示东北地区地壳与上地幔具有较强的横向不均匀性,整体呈现两个明显的低速异常条带,分别为沿长白山一线与松辽盆地地区。区域地震层析成像结果显示,阿尔山和长白山火山下方都有延伸至地幔转换带中的低速异常,而五大连池火山下方的低速异常延伸至 200 km 左右,表明长白山、阿尔山火山与五大连池火山形成原因存在差异<sup>[7-8]</sup>。

以往成像研究表明,高分辨率的地球内部速度结构和地震分布能够很好地反映地下构造,而且浅层速度结构与地质构造单元有很好的对应关系<sup>[9-10]</sup>。上述在中国东北地区的研究主要针对地壳和上地幔整体结构展开,成像分辨率较低。虽然人工源深反射探测可以获得中国东北局部地区高分辨的地壳和上地幔顶部精细结构<sup>[11-12]</sup>,但二维观测无法覆盖整个区域。迄今为止,未见到针对中国东北地区地壳结构的高分辨率成像研究工作。因此,本次研究利用东北台站收集到的东北地区浅层地震走时资料,获得东北地壳和上地幔顶部 P 波、S 波速度

结构,进而获得泊松比结构,并深入探讨该区地壳结构的不均匀性特征,研究盆地与周边造山带关系以及中国东北活火山(五大连池、长白山等)壳内结构。

## 1 地震层析成像方法与数据选取

### 1.1 地震层析成像方法

本研究采用近震走时层析成像方法<sup>[13]</sup>。该方法在传统的体波层析成像方法基础上作了进一步的改进:一是在速度模型中人为引入了速度间断面,使之更加接近地下真实情况;二是对传统的近似弯曲射线追踪算法<sup>[14]</sup>引入了斯奈尔定律来确定间断面处的射线路径,使之能更好地适用于多个复杂速度间断面的情况。近 30 年来,该方法不断地改进与完善,使得该方法已经能够很好地适用于近震成像、远震成像、近远震联合成像、各向异性层析成像、全球层析成像和衰减层析成像等<sup>[15-18]</sup>。目前,该方法已经成为研究地下结构最常用的层析成像方法之一。

地震波自震源处激发,经过不同传播路径,然后由分布于地球表面的地震台站记录下来。利用观测走时( $t^{\text{obs}}$ )与理论走时( $t^{\text{cal}}$ )获得走时残差( $\delta t$ ),可以用它对速度参数和震源参数的偏导数之和来表示:

$$\delta t = t^{\text{obs}} - t^{\text{cal}} = \left( \frac{\partial t}{\partial \theta} \Delta \theta \right) + \left( \frac{\partial t}{\partial \varphi} \Delta \varphi \right) + \left( \frac{\partial t}{\partial h} \Delta h \right) + \Delta t_0 + \sum_{n=1}^N \frac{\partial t}{\partial v} \Delta v_n + E. \quad (1)$$

式中: $\theta$ 、 $\varphi$ 和 $h$ 分别为震源的经度、余纬度和深度; $N$ 为速度模型中速度参数的数目; $\Delta \theta$ 、 $\Delta \varphi$ 、 $\Delta h$ 、 $\Delta t_0$ 和 $\Delta v_n$ 分别表示震源经度、余纬度、深度、发震时间和速度参数的变化; $E$ 表示高次项误差。

由式(1)可以看出,走时残差与震源参数、速度参数之间的关系并不是线性的。因此实际计算中将非线性问题转化为线性问题,以便建立一个大型观测方程组。

球坐标系下走时对震源参数的偏导数可表示为:

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{(R-h) \sin i \cos \alpha}{v}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \varphi} = \frac{(R-h) \sin i \sin \theta \sin \alpha}{v}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial t}{\partial h} = -\frac{\cos i}{v}. \quad (4)$$

式中: $R$ 为地球半径; $i$ 为离源角; $\alpha$ 为震中相对于台站的方位角; $v$ 为震源附近地震波速度。

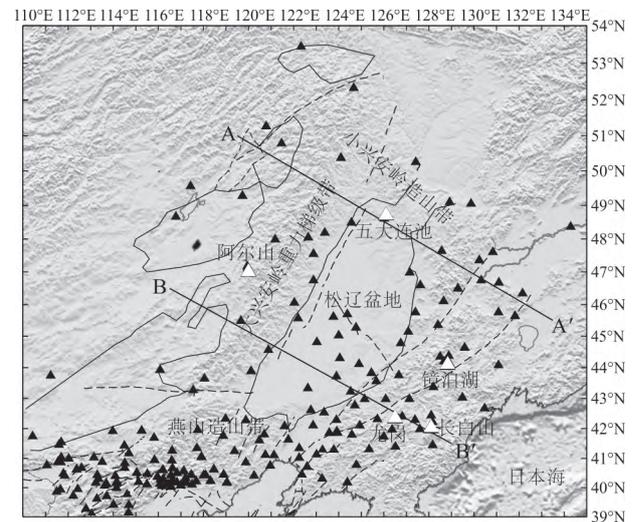
泊松比参数是研究地球内部岩石物理属性的重要物理量<sup>[19]</sup>。因此本研究还对泊松比进行了求取,泊松比的求取公式为

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{(v_P/v_S)^2 - 1} \right]. \quad (5)$$

因此,可以利用得到的 P 波和 S 波速度来求取泊松比的分布。实践证明,利用泊松比的分布来判断地壳介质中是否含有熔融体或流体是十分有效的<sup>[19]</sup>。

### 1.2 地震层析成像数据

本次研究使用了东北地区固定台网的台站数据,所用台站 384 个。如图 1 所示,台站基本覆盖东北大部分区域,但在大兴安岭及黑龙江省北部地区台站较为稀疏。地震事件分布如图 2 所示,收集并筛选了 1974—2013 年间发生的部分区域地震事件共 10 674 个,每个地震 P 波和 S 波旅行时数据数目大于 6。最后用于反演的 P 波和 S 波旅行时数据共 192 010 个,其中 P 波数据 100 980 个,S 波数据 91 030 个。



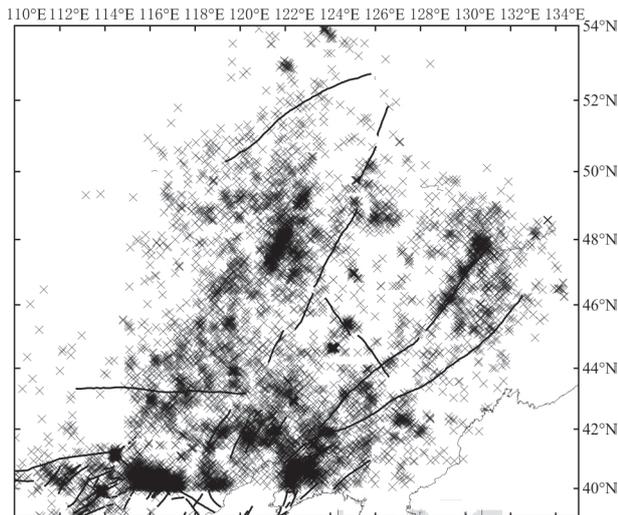
白色三角代表火山;黑色三角代表台站;黑线虚线表示主要断层分布;实线表示盆地边界;AA'和BB'表示两条地震层析成像剖面位置。

图 1 东北地区构造简图和地震台站分布

Fig.1 Tectonic map of Northeast China and distribution of the stations in this study

## 2 地震层析成像分辨率分析

本研究使用了近震层析成像方法,使用 P 波和 S 波旅行时走时数据进行速度结构反演,在模型空



叉号代表地震;黑线表示主要断层分布。

图 2 本研究用地震分布

Fig.2 Distribution of the stations in this study

间中设置  $33 \times 53 \times 6$  的三维网格节点并考虑了 Moho 间断面的起伏变化,其中研究区域水平方向为  $110^{\circ}\text{E}—135^{\circ}\text{E}$ ,  $39^{\circ}\text{N}—54^{\circ}\text{N}$ , 网格节点间距  $0.5^{\circ}$ , 深度分别为 2、10、20、35 km,并在每个方向上加入首尾节点,以便用于初始插值。理论走时的计算采用 IASP91 全球速度模型<sup>[20]</sup>。

本次研究采用了检测板分辨率测试法,在测试中,使用的网格间隔为  $0.5^{\circ}$ 。首先在速度模型中的格点输入正负相间、大小为 3% 的速度扰动,然后根据研究所用台站和地震计算合成走时数据,再对该合成数据进行反演。如果反演获得的速度模型与输入的模型速度扰动分布相似且数值接近,则认为模型分辨率高,反之则较差。在实际反演中,我们只讨论这些分辨率较高的区域速度结构。图 3 和图 4 展示了 P 波和 S 波分辨率检测结果。

在较浅部区域 ( $< 20$  km),反演结果的好坏与台站分布有直接对应关系。由于研究区域的中部松辽盆地内部缺乏台站且收集的地震数据较少,射线覆盖较差,因此分辨率较低;而在研究区域的松辽盆地边界及下部台站较密集、地震事件较多,射线覆盖较好,因此分辨率较高。在包含莫霍面的较深区域 (30~40 km) 分辨率整体都是较好的。对于本次研究的主要目标,松辽盆地边界造山带及莫霍面附近的分辨率认为都是较好的,因此反演结果还是比较可信的。

### 3 地震层析成像结果与讨论

图 5 展示了东北地区 4 个代表性深度上的 P 波和 S 波速度异常与泊松比结构。垂直剖面上的 P 波、S 波速度结构及泊松比分布如图 6 所示,剖面位置见图 1。由图 5 可以看出, P 波和 S 波速度异常在浅部分布大体呈条带状,走向与地表构造走向基本一致,呈北东向。2 km 速度扰动图像与地表盆山构造有很好的对应性:大兴安岭重力梯级带、长白山及燕山造山带大体呈高速,局部高速异常明显;松辽盆地由于成像分辨率较低,在 2 km 深度的成像结果上并未整体表现为低速异常,但随着深度的增加,在 10 km 深度的速度分布图上松辽盆地主要表现为低速异常,尤其是 S 波速度,表明松辽盆地的沉积层较厚。而随着深度增加,大兴安岭造山带与燕山造山带表现出大尺度的低速异常。在典型的火山区(五大连池、长白山)速度异常呈现较明显的低速异常。中下地壳的速度结构与浅部速度结构恰好相反,松辽盆地主要以高速异常为主,一直延伸至上地幔顶部。区域地震层析成像结果显示在松辽盆地下方上地幔内表现为显著的高速异常体,表明可能存在岩石圈拆沉作用<sup>[21]</sup>。

大兴安岭—太行山—武夷山重力梯度带纵贯中国大陆,将中国大陆划分为东部和西部两大构造单元<sup>[22]</sup>,其形成和后期演化备受关注。接收函数获得的东北地区地壳厚度和地表起伏变化总体上显示镜像关系<sup>[23]</sup>,而大兴安岭和松辽盆地地区更为明显。松辽盆地、大兴安岭过渡区域高程变化较大,对应莫霍界面深度也是陡增,在盆山交界处形成一个 Moho 界面深度陡变带,北东向展布,与地表构造展布方向一致,且和大兴安岭重力梯度带几乎重合。速度层析成像结果显示大兴安岭造山带主要以低 P 波和低 S 波速度异常为主,低泊松比结构(图 5、6),表明在造山期或造山后期具有较强的岩浆上涌作用;泊松比结构上主要表现为低值,表明岩浆部分熔融程度或流体含量较低。重力梯度带在早白垩世开始形成,而古太平洋板块大致在晚三叠世或早侏罗世开始向欧亚大陆俯冲。地球化学研究认为华北克拉通东部块体与西部块体差异性的岩石圈减薄是太平洋板块在中国东部俯冲造成的,这也是重力梯度带形成的主要原因<sup>[22]</sup>。太平洋板片俯冲引起大地幔楔内大规模的热物质对流,对重力梯度带的形成具有促进作用。地球物理研究认为大兴安岭地壳

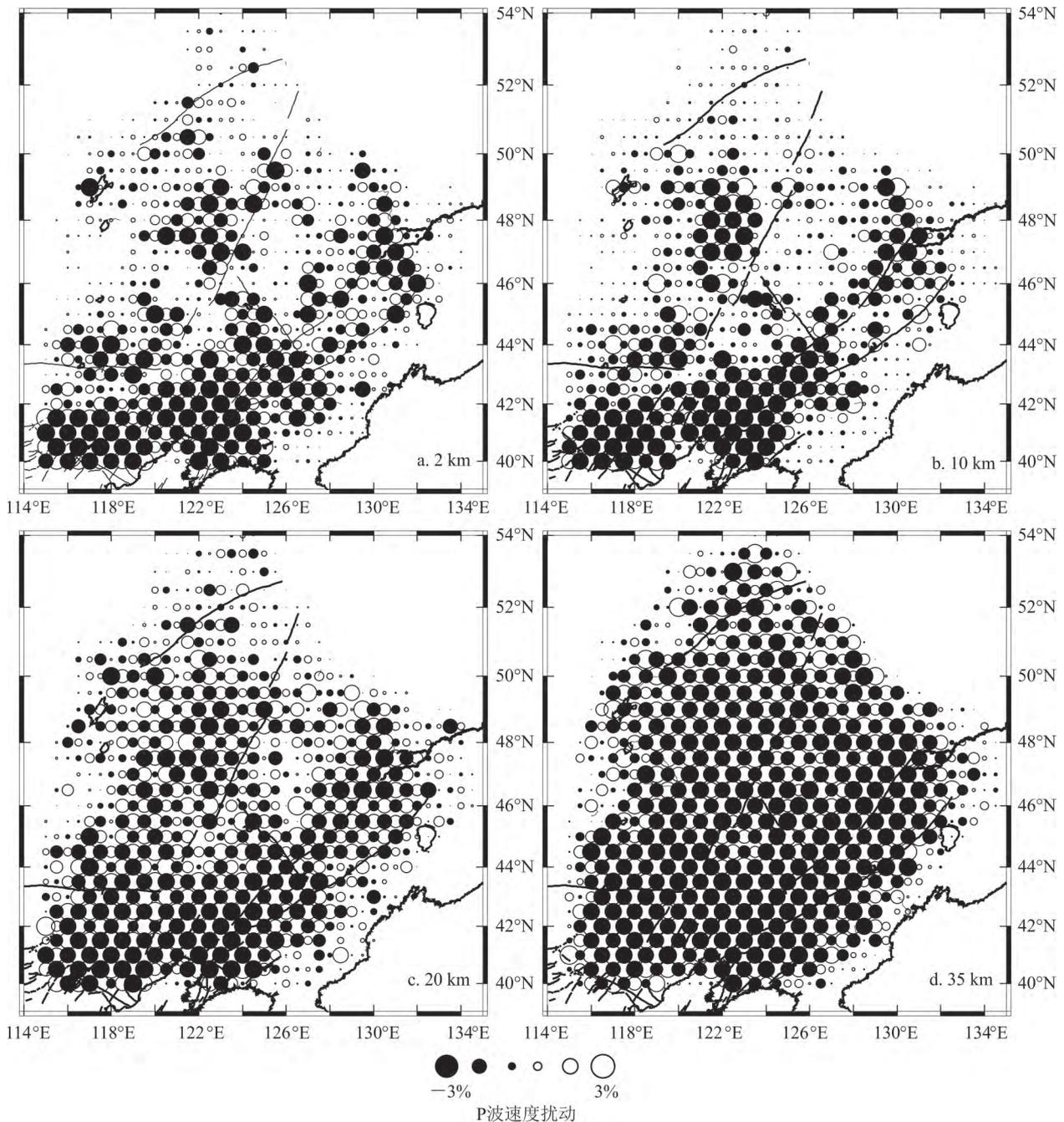


图 3 P 波检测板测试结果

Fig.3 Checkerboard resolution results of P - wave

结构在形成过程中,地壳的增厚以长英质上地壳增厚为主,其波速比变化可能也与陡变带东侧地壳构造拉伸作用有关<sup>[24]</sup>,基于大范围的低速异常特征,本研究得到同样的结论。中国东部地区地震学成像研究表明,太平洋俯冲板块的前缘位置基本到达大兴安岭重力梯度带下方的地幔转换带内,大兴安岭以西的地幔转换带内未发现有明显的高速异常体,

推测西太平洋俯冲板片前端存在于中国东北腹地,但是并未越过重力梯度带<sup>[21]</sup>。基于上述讨论,推测大洋板块深部俯冲导致的地幔物质对流,使得幔源热物质进入到大兴安岭下方的地球内部,高密度的幔源物质是导致该区具有较大正重力异常的主要原因。上升地幔热流在大兴安岭重力梯级带的形成和后期演化阶段均起到关键作用。

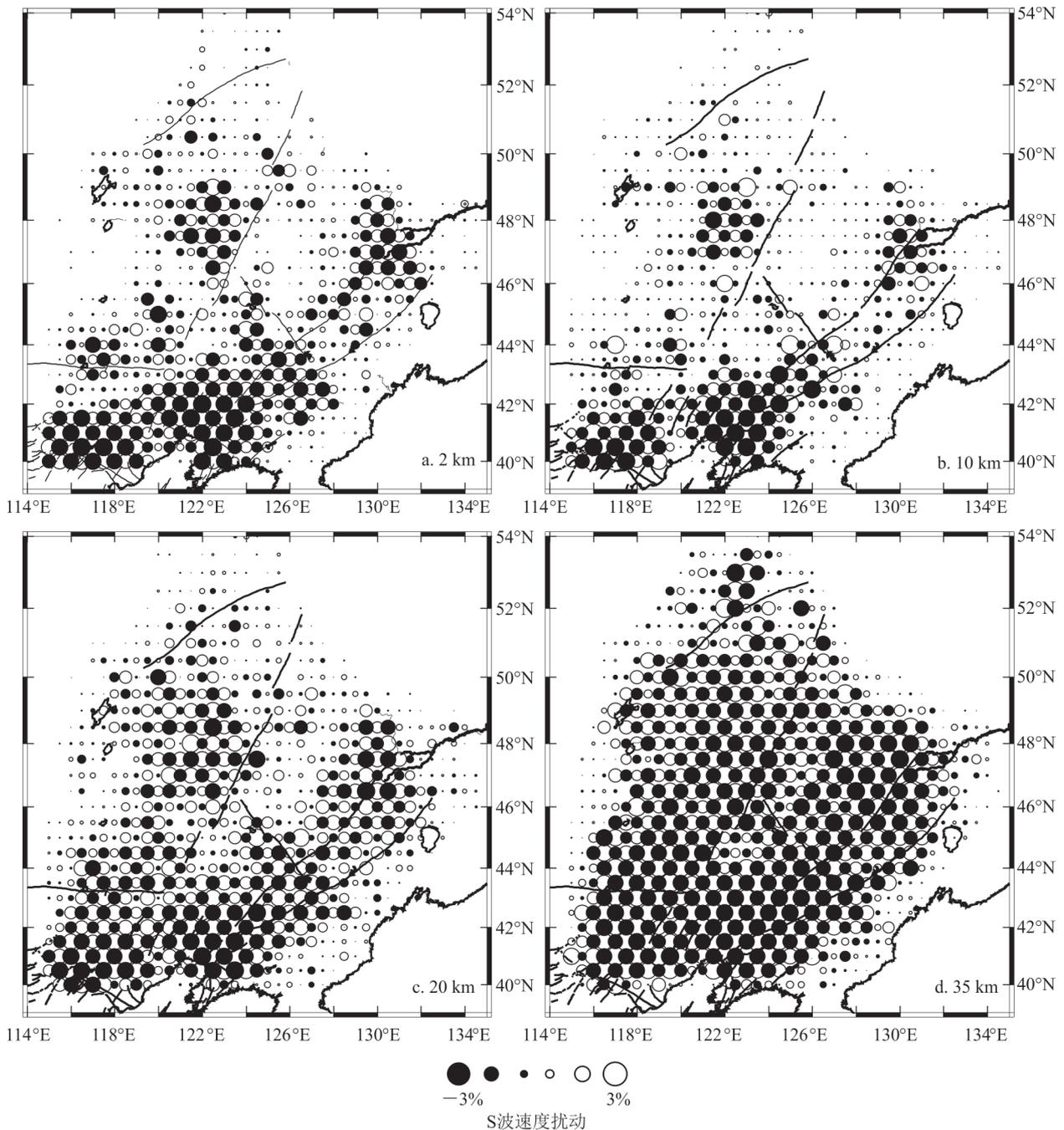
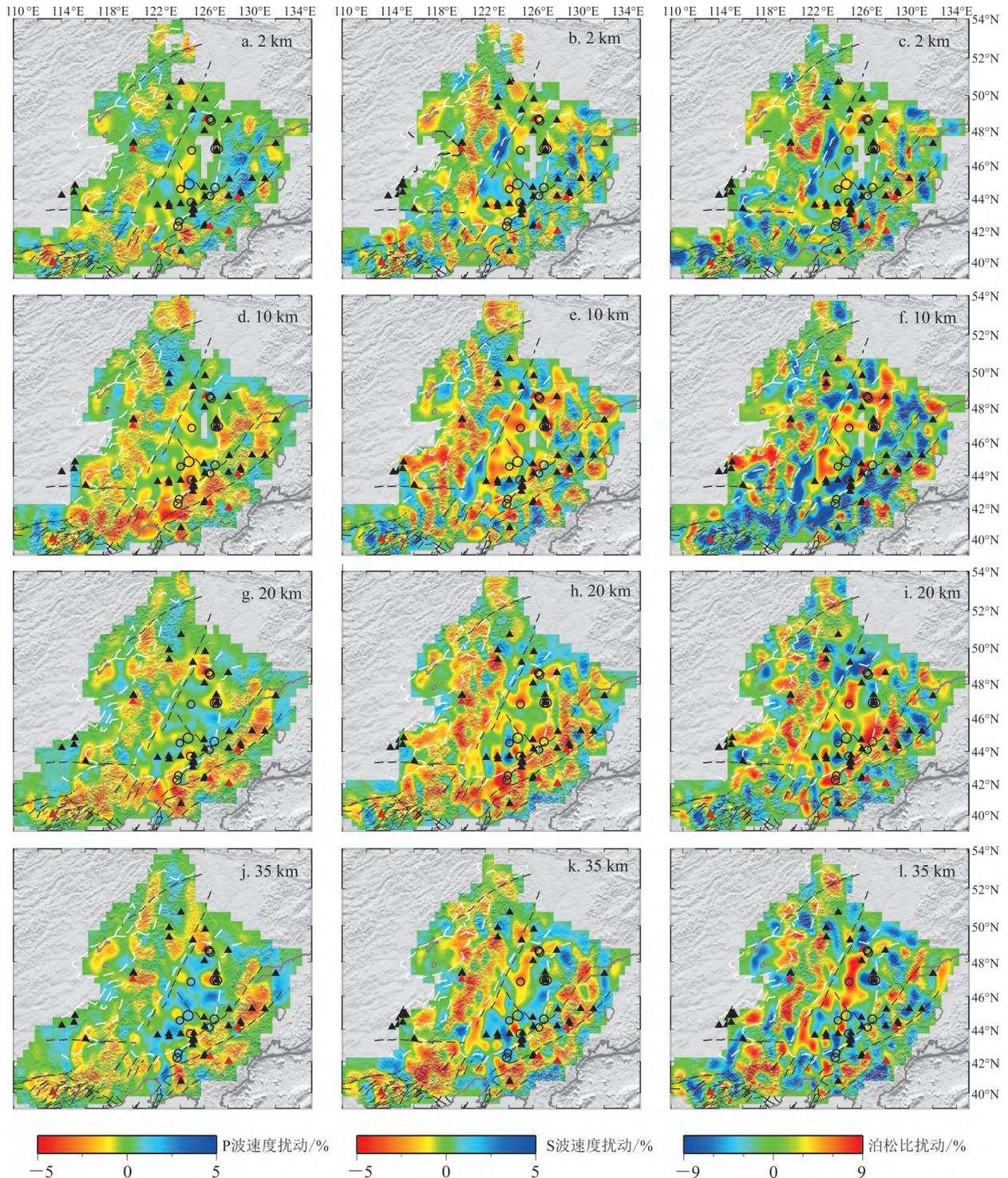


图 4 S 波检测板测试结果

Fig.4 Checkerboard resolution results of S - wave

中国东北中、新生代以来火山活动强烈,现今还存在具有潜在喷发危险性的火山,比如五大连池火山和长白山火山。所以火山深部结构一直以来都是地学界关注的热点。本次研究收集了东北地区绝大部分台站和地震数据,其成像分辨率相比前人研究更高,并获得了更精细的地壳结构。在镜泊湖与长白山火山下方存在明显低速异常,可能与软流圈热物质

上涌有关,结合泊松比分布,推测镜泊湖火山岩浆囊分布于中上地壳,因为该深度范围速度异常普遍偏低,泊松比偏高,可能是由于岩浆囊内热物质熔融所致;而在长白山下方岩浆囊除了在中地壳外,下地壳也可能存在岩浆房。长白山火山 Moho 面较厚,约为 41 km,同时火山中下地壳和西南区域整体具有高泊松比结构特征。大地电磁资料反演获得结果显示在



黑色三角代表中、新生代火山;红色三角表示第四纪火山;虚线表示主要断层。

图 5 4 个典型深度上的 P 波( $v_p$ )、S 波( $v_s$ )速度扰动和泊松比扰动( $\sigma$ )异常结构分布图

Fig.5 Plain views of P-wave, S-wave tomography and Poisson's ratio at four typical depth slices

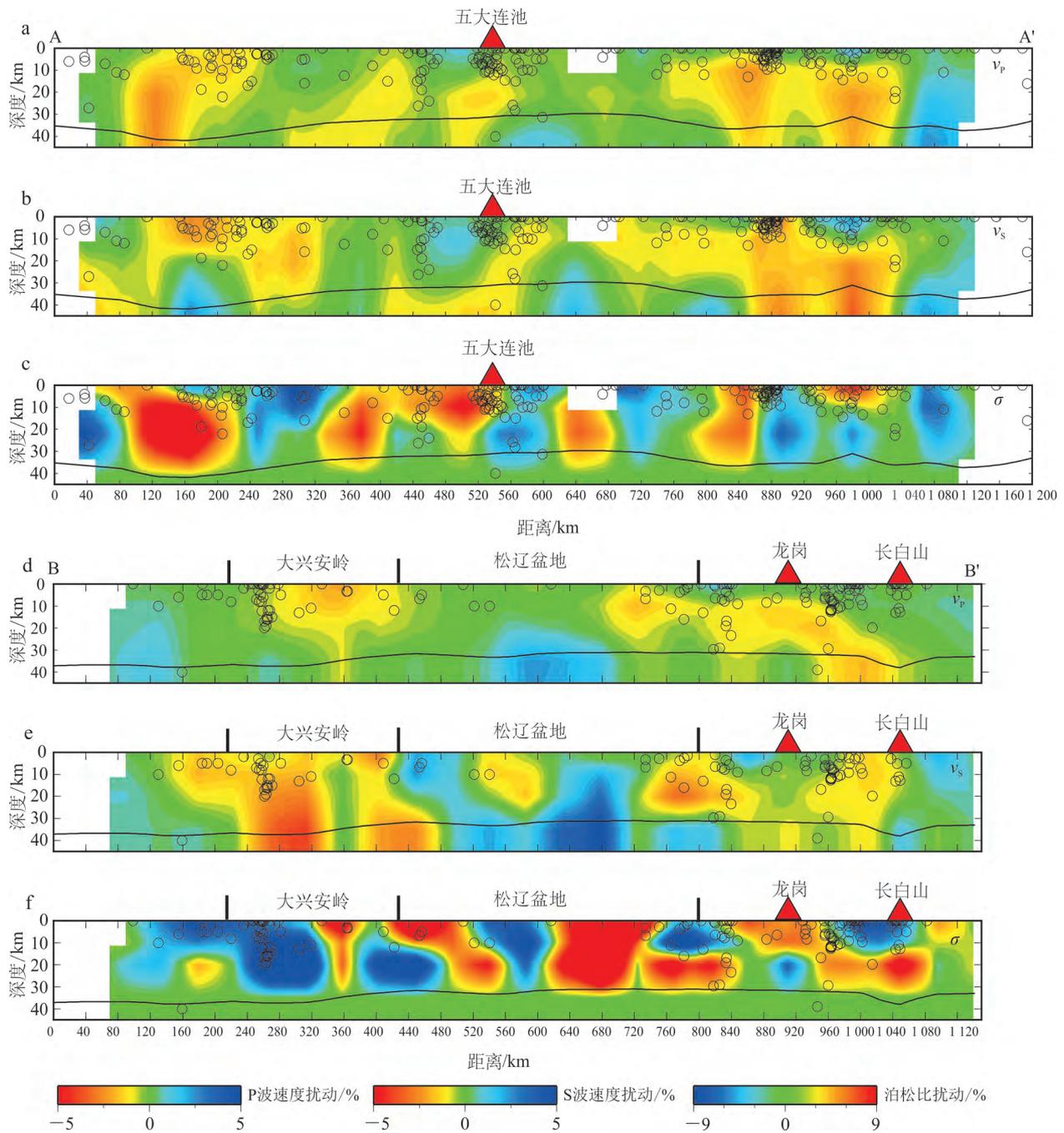
长白山火山地壳内部存在较大范围的低阻体,推测为火山壳内岩浆囊,并向深部延伸<sup>[25]</sup>。接收函数与背景噪声数据联合反演显示长白山火山中地壳 5~

15 km 深度存在大范围的低速异常<sup>[26]</sup>。地震学成像研究表明太平洋板块向地幔俯冲,在地幔转换带内部脱水,造成 410 km 附近地幔物质部分熔融。地

幔对流作用使得热物质上涌到火山下方的上地幔和地壳内部,表现为低速和低阻异常<sup>[26-27]</sup>。基于本文的成像结果推测长白山火山下方地壳内存在大量幔源的铁镁质物质,高温的幔源物质在地壳内产生部分熔融,表现为高泊松比特征。龙岗火山具有相似的特征,但 S 波低速异常不明显。五大连池火山下

方中下地壳也存在低速异常体,高泊松比异常,但与长白山火山不同的是地壳厚度相对较浅,可能表明该区幔源岩浆底侵作用相对较弱。中国东北地区活火山下方的地震波速度和泊松比结构表明火山仍存在活动的可能。

中国东北矿产资源丰富,沿长白山山脉、大兴安



剖面位置见图 1。红色三角代表火山;圆圈代表地震;黑色实线代表 Moho 面。

图 6 2 个典型垂直剖面 P 波 ( $v_p$ )、S 波 ( $v_s$ ) 速度扰动与泊松比扰动 ( $\sigma$ ) 异常结构图

Fig.6 Two typical vertical cross-sections of P ( $v_p$ ), S ( $v_s$ ) tomography and structure of Poisson's ratio

岭和小兴安岭造山带均有大型成矿带<sup>[28-29]</sup>。固体矿床的形成与频繁的岩浆活动密切相关。层析成像结果上看,沿上述 3 个造山带下方地壳和上地幔顶部均分布有较大范围的低速异常。显著低速异常表明曾经发生过强烈的、广泛的岩浆作用。低速的软流圈物质通过破裂的岩石圈上涌到地壳内,与地壳物质同熔为固体矿产资源的形成提供物源。

#### 4 结论

本研究利用东北地区大量台站和区域地震数据,采用地震层析成像方法首次反演了该区高分辨率 P 波、S 波速度模型,并进一步获得泊松比结构,结合本区构造特征,获得以下主要结论:

1) 东北地区地壳具有较强的横向不均匀性,浅层速度异常大体呈北东向,与地表形态有很好对应性,大兴安岭造山带、长白山造山带呈现高速异常,松辽盆地呈现低速异常,但是这种对应性随着深度增加却变得相反,推测与太平洋俯冲与后撤导致的岩石圈拆沉、热物质上涌等动力学过程有关。

2) 大兴安岭重力梯级带下方低速异常延伸至上地幔顶部,结合区域成像结果推测其形成、后期演化与大洋板块深部脱水、地幔流引起的较热和较湿的软流圈物质的上涌作用密不可分。大兴安岭、小兴安岭和长白山上地幔和地壳发生的强烈、广泛岩浆作用为固体矿产资源的形成提供了热源或物源。

3) 五大连池、长白山火山下方存在显著的低地震波速度和高泊松比结构异常,推测火山下方地壳内存在岩浆囊,但五大连池火山与长白山火山 Moho 面深度差别较大,表明其深部岩浆作用机制存在差异。

致谢:日本东北大学赵大鹏教授提供了地震层析成像程序(TOMO3D),中国国家地震局数据中心提供了地震波走时数据,在此表示感谢!

#### 参考文献(References):

- [1] 唐克东,邵济安,李景春,等. 吉林延边缝合带的性质与东北亚构造[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 885 - 891.  
Tang Kedong, Shao Ji'an, Li Jingchun, et al. Nature of the Yanbian Suture Zone and Structure of Northeast Asia[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9): 885 - 891.
- [2] 卢造勋,蒋秀琴,潘科,等. 中朝地台东北缘地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3): 338 - 351.  
Lu Zhaoxun, Jiang Xiuqin, Pan Ke, et al. Seismic Tomography in the Northeast Margin Area of Sino-Korean Platform [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(3): 338 - 351.
- [3] 赵金仁,张先康,杨卓欣,等. 长白山天池火山区上地壳三维速度层析成像[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 796 - 802.  
Zhao Jinren, Zhang Xiankang, Yang Zhuoxin, et al. 3D Tomography of Velocity Structure in the Upper Crust Beneath the Changbaishan Tianchi Volcanic Region [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(6): 796 - 802.
- [4] 赵大鹏,雷建设,唐荣余. 中国东北长白山火山的起源:地震层析成像证据[J]. 科学通报, 2004, 49(14): 1439 - 1446.  
Zhao Dapeng, Lei Jianshe, Tang Rongyu. Origin of the Changbai Intraplate Volcanism in Northeast China: Evidence from Seismic Tomography [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(14): 1439 - 1446.
- [5] Zhao D P, Tian Y. Changbai Intraplate Volcanism and Deep Earthquakes in East Asia: A Possible Link? [J]. Geophysical Journal International, 2013, 195(2): 706 - 724.
- [6] 田有,刘财,冯暄. 中国东北地区地壳、上地幔速度结构及其对矿产能源形成的控制作用[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 407 - 414.  
Tian You, Liu Cai, Feng Xuan. P - Wave Velocity Structure of Crust and Upper Mantle in Northeast China and Its Control on the Formation of Mineral and Energy[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 407 - 414.
- [7] 张风雪,吴庆举,李永华. 中国东北地区远震 P 波走时层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2690 - 2700.  
Zhang Fengxue, Wu Qingju, Li Yonghua. The Traveltime Tomography Study by Teleseismic P Wave Data in the Northeast China Area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2690 - 2700.
- [8] 张风雪,吴庆举,李永华. 中国东北地区远震 S 波走时层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 88 - 101.  
Zhang Fengxue, Wu Qingju, Li Yonghua. A Traveltime Tomography Study by Teleseismic S Wave Data in the Northeast China Area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 88 - 101.
- [9] 田有,赵大鹏,孙若昧,等. 1992 年美国加州兰德斯地震:地壳结构不均匀性对地震发生的影响[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1488 - 1496.

- Tian You, Zhao Dapeng, Sun Ruomei, et al. The 1992 Landers Earthquake: Effect of Crustal Heterogeneity on Earthquake Generation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5): 1488 - 1496.
- [10] Tian Y, Zhao D P, Teng J W, et al. Seismic Imaging of the Crust and Upper Mantle Beneath the North China Craton[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2009, 172: 169 - 182.
- [11] 谭晓森,高锐,王海燕,等. 中亚造山带东段深地震反射剖面大炮揭露下地壳与 Moho 结构:数据处理与初步解释[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021, 51(3): 898 - 908.
- Tan Xiaomiao, Gao Rui, Wang Haiyan, et al. Lower Crust and Moho Structure of the Eastern Segment of the Central Asian Orogenic Belt Revealed by Large Dynamite Shots of Deep Seismic Reflection Profile: Data Processing and Preliminary Interpretation [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 898 - 908.
- [12] 谢樊,王海燕,侯贺晟,等. 中亚造山带东段浅表构造速度结构:深地震反射剖面初至波层析成像的揭露[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021, 51(2): 584 - 596.
- Xie Fan, Wang Haiyan, Hou Hesheng, et al. Near-Surface Fine Velocity Structure in Eastern Segment of Central Asian Orogenic Belt: Revealed by First-Arrival Wave Tomography from Deep Seismic Reflection Profile [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 584 - 596.
- [13] 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.
- [14] Um J, Thurber C. A Fast Algorithm for Two-Point Seismic Ray Tracing[J]. Bull Seis Soc Am, 1987, 77(3): 972 - 986.
- [15] Zhao D P, 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.
- [16] Zhao D P. Global Tomographic Images of Mantle Plumes and Subducting Slabs: Insight into Deep Earth Dynamics [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2004, 146(1): 3 - 34.
- [17] Wang J, Zhao D P. P-Wave Anisotropic Tomography Beneath Northeast Japan[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2008, 170(1): 115 - 133.
- [18] Liu X, Zhao D P. Seismic Attenuation Tomography of the Southwest Japan Arc: New Insight into Subduction Dynamics [J]. Geophysical Journal International, 2015, 201(1): 135 - 156.
- [19] Christensen N. Poisson's Ratio and Crustal Seismology [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101(B2): 3139 - 3156.
- [20] Kennett B, Engdahl E. Traveltimes for Global Earthquake Location and Phase Identification [J]. Geophysical Journal International, 1991, 105: 429 - 465.
- [21] 田有,马锦程,刘财,等. 西太平洋俯冲板块对中国东北构造演化的影响及其动力学意义[J]. 地球物理学报,2019, 62(3): 1071 - 1082.
- Tian You, Ma Jincheng, Liu Cai, et al. Effects of Subduction of the Western Pacific Plate on Tectonic Evolution of Northeast China and Geodynamic Implications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(3): 1071 - 1082.
- [22] Xu Y G. Diachronous Lithospheric Thinning of the North China Craton and Formation of the Daxin'anling-Taihangshan Gravity Lineament [J]. Lithos, 2007, 96(1/2): 281 - 298.
- [23] 朱洪翔,田有,刘财,等. 沉积盆地地区地壳结构估计:预测反褶积方法消除接收函数多次波混响[J]. 地球物理学报,2018, 61(9): 3664 - 3675.
- Zhu Hongxiang, Tian You, Liu Cai, et al. Estimation of the Crustal Structure Beneath the Sedimentary Basin: Predictive Deconvolution Method to Remove Multiples Reverberations of the Receiver Function [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(9): 3664 - 3675.
- [24] 高延光,李永华. 中国东北—华北地区地壳厚度与泊松比及其地质意义[J]. 地球物理学报,2014, 57(3): 847 - 857.
- Gao Yanguang, Li Yonghua. Crustal Thickness and  $v_p/v_s$  in the Northeast China-North China Region and Its Geological Implication [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(3): 847 - 857.
- [25] 汤吉,刘铁胜,江钊,等. 长白山天池火山区大地电磁测深初步观测[J]. 地震地质,1997, 19(2): 69 - 72.
- Tang Ji, Liu Tiesheng, Jiang Zhao, et al. Preliminary Observations of the Tianchi Volcano Area in Changbaishan Mountain by MT Method [J]. Seismology and Geology, 1997, 19(2): 69 - 72.

- [26] Zhu H X, Tian Y, Zhao D P, et al. Seismic Structure of the Changbai Intraplate Volcano from Joint Inversion of Ambient Noise and Receiver Functions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(5): 4984 - 5002.
- [27] Zhao D P, Tian Y, Lei J S, et al. Seismic Image and Origin of the Changbai Intraplate Volcano in East Asia: Role of Big Mantle Wedge Above the Stagnant Pacific Slab [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173(3/4): 197 - 206.
- [28] 杨宝俊,刘财,刘万崧,等. 中国东北地区岩石圈结构的地震学特征与对矿产资源的动力控制作用[J]. *中国地质*, 2006, 33(4): 866 - 873.
- [29] Yang Baojun, Liu Cai, Liu Wansong, et al. Seismological Features of the Lithospheric Structure in Northeast China and Dynamic Controls on Mineral Resources [J]. *Geology in China*, 2006, 33(4): 866 - 873.
- [29] 祁进平,陈衍景, Franco P. 东北地球浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景 [J]. *矿物岩石*, 2005, 25(2): 47 - 59.
- Qi Jinping, Cheng Yanjing, Franco P. Geological Characteristics and Tectonic Setting of the Epithermal Deposits in the Northeast China [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(2): 47 - 59.