

田 有, 刘 财, 冯 晔. 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. 地球物理学报, 2011, 54(2): 407~414, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.017

Tian Y, Liu C, Feng X. P-wave velocity structure of crust and upper mantle in Northeast China and its control on the formation of mineral and energy. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2):407~414, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.017

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

田 有, 刘 财, 冯 晔

吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘 要 中国东北地区处于古亚洲洋和滨太平洋构造域叠合部位, 地质构造极其复杂. 利用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东北地区地壳与上地幔三维 P 波速度结构, 成像分辨率在 80 km 左右. 成像结果表明东北地区地壳与上地幔具有较强的横向不均匀性. P 波速度异常走向大体呈北东向, 与该区地表构造走向一致. 5 km 深度的速度异常与地表起伏形态有很好的对应关系: 阴山、燕山与大兴安岭造山带表现为高速异常; 渤海湾盆地, 松辽盆地表现为低速异常, 渤海湾低速异常一直延伸至 >200 km 深度. 东北地区呈现两个明显的低速异常条带, 分别是沿着长白山一线与松辽盆地地区, 其中长白山低速异常延伸至 400 km 深度附近. 地幔转换带 (410~660 km) 表现为显著高速异常体, 这与西向俯冲的高速太平洋板块在地幔转换带中的滞留相对应. 较高分辨率的三维速度成像结果表明东北地区构造演化 (如岩浆活动、岩石圈演化、深震与火山活动等) 与东北亚地区大地幔楔内软流圈上涌与西太平洋板块在地幔转换带中的滞留密切相关. 东北地区的岩浆活动在矿产与油气资源的形成过程中起着提供物源和深层控制作用.

关键词 中国东北地区, 地震层析成像, 地壳与上地幔, P 波速度, 岩浆活动

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.017

中图分类号 P315

收稿日期 2010-07-01, 2010-12-05 收修定稿

P-wave velocity structure of crust and upper mantle in Northeast China and its control on the formation of mineral and energy

TIAN You, LIU Cai, FENG Xuan

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract Northeast China, which is located at the composite part of Paleo-Asian ocean and Pacific ocean domains, has undergone multi-stage tectonism. The activity of crust and upper mantle is strong and geological structure is complicated. In this paper, we obtain the three-dimensional P-wave velocity model of northeast China by using P-wave travel times from local and teleseismic events in North and Northeast China. The tomographic resolution is about 80 km. The tomographic images show a very heterogeneous structure in the crust and upper mantle under Northeast China. The velocity structure in the shallow depth (5 km depth) correlates well with

基金项目 国家 973 计划项目 (2009CB219301), 深部探测专项 (Sinoprobe-02-02), 吉林大学基本科研业务费项目 (421030584423), 国家自然科学基金 (40974054), 公益性行业科研专项 (201011078), 页岩岩勘探开发项目 (OSP-02, OSR-02) 联合资助.

作者简介 田 有, 男, 1979 年生, 吉林大学地球探测科学与技术学院, 副教授, 主要从事地球内部结构成像研究工作.

E-mail: you_tian918@yahoo.com.

the surface geological features; Yanshan and Da Hinggan Ling orogens show high-velocity anomalies and the Bohai Bay and Songliao basin show prominent low-velocity anomalies which extend down to more than 200 km depth. Two low-velocity anomaly belts exist in Northeast China, which are along the Changbai Mountain and Songliao Basin, respectively. Changbai Mountain low-velocity anomaly extends down to about 400 km depth. Mantle Transitional Zone (MTZ) represents high-velocity anomaly which correlates well with the high-velocity Pacific subducted slab stagnating in the MTZ. High resolution tomographic images represent that structural evolution of Northeast China (e. g., magmatism, lithosphere evolution, deep seismicity and volcanism) is related to the upwelling of hot and wet asthenospheric materials in the big mantle wedge above the stagnant Pacific slab. The magmatism of Northeast China provided the source in formation of the minerals and took deep control effect on energy source formation.

Keywords Northeast China, Seismic tomography, Crust and upper mantle, P-wave velocity structure, Magmatic activity

1 引言

中国东北地区在地质构造上位于中朝块体和西伯利亚板块之间,处于兴蒙地槽褶皱系的东部,其南侧以开源—赤峰深大断裂为界,东临西太平洋边缘海。该区处于古亚洲构造域和滨太平洋构造域叠合部位,经历多期构造作用,地质构造错综复杂^[1~3](图 1)。联合利用重、磁场资料对中国东北地区地壳结构特征研究表明,重、磁场异常与该区地质构造具有很好的对应关系^[2]。杜晓娟等^[4]根据断裂分布及异常区的重力场特征,将东北地区划分为大兴安岭褶皱区、松嫩凹陷区、张广才岭褶皱区和华北地台北缘等 4 个构造单元,而根据各单元内重力异常的局部特征,进一步分为 8 个二级构造单元。综上所述,近几十年来东北地区的区域构造研究以地质研究与位场研究为主,但位场特征对于研究深部构造特征无法提供足够的信息。利用地震学信息(主要是速度结构)的研究主要集中在东北地区几个人工源地震测深剖面等局部区域,例如:满洲里—绥芬河地学断面^[5]、东乌珠穆沁旗—东沟断面^[6]等。这些地震测深剖面所提供的局部地球物理信息对于理解整个东北地区的大地构造及其动力学是十分有限的。

东北地区深部构造与地壳、地幔低速物质的分布有助于研究固体矿产、油气资源的深层动力控制作用。东北地区的主要地质构造单元呈北东向、北北东向展布,张广才岭褶皱带以西是二连盆地、海拉尔盆地、根河盆地和漠河盆地,兴安岭—张广才岭褶皱带和完达山造山带之间是松辽盆地和孙

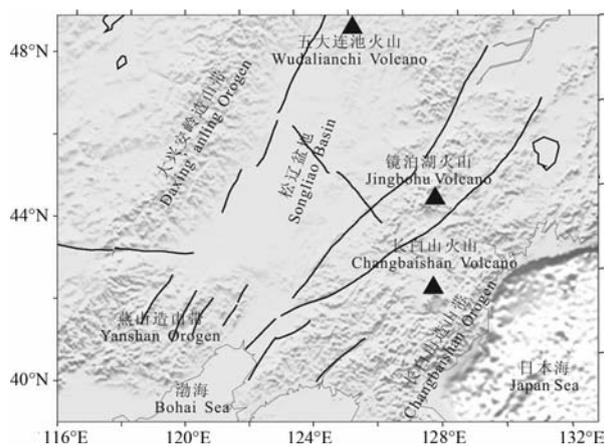


图 1 中国东北地区构造简图

黑色三角形代表火山;实线表示主要的断裂分布

Fig. 1 Tectonic map of Northeast China.

Black triangles denote the volcanoes;

Solid lines present the main faults

吴—嘉荫盆地,完达山造山带以东是三江盆地。主要的油田有位于松辽盆地上的大庆油田和吉林油田,位于渤海湾盆地的辽河油田,油气及固体矿产资源极为丰富。油气资源主要分布在各大沉积盆地内部及边缘地区,而固体矿产资源主要分布在盆地周边的褶皱带、造山带区域^[2,3]。高分辨率的 P 波三维速度能够很好地确定岩浆活动区域进而对于确定固体矿产资源的分布具有很好的指导意义,即深部岩浆活动控制着多种固体矿产的形成和分布。

地震层析成像是研究地球内部速度结构非常有效的方法之一,它能够提供更地球内部三维速度结构。以往的地震层析成像研究表明,高分辨率的地球内部速度结构及地震分布能够很好地反映深大断裂的位置、软流圈热物质上涌通道,并且表层的

速度结构与地表的地质构造单元具有很好的对应关系^[7,8]。例如,沉积盆地一般表现为低速,而造山带表现为高速异常;深大断裂区域一般表现为低速异常,而异常的倾向与断裂带倾向大体一致;深部软流圈热物质上涌通常表现为显著的低速异常。虽然前人在东北地区做了一些地震层析成像研究工作^[9,10],但由于这些研究的重点分别放在全中国大陆和全球的构造上,在东北地区的成像分辨率非常有限。所以本研究拟收集东北及其周边区域布设的地震台站所接收到的近震与远震走时资料,利用近震与远震联合层析成像方法获取东北地区壳幔三维速度结构,为东北地区深部构造及其东北亚动力学研究提供高分辨率的三维速度模型。

2 数据与方法

为了使研究区(中国东北地区)深部区域的地震射线密集交叉覆盖,本研究中利用了华北部分地区与东北地区所有台网的台站,所用的台站达到了645个,其中还包括Wu & Hetland^[11]在长白山火山区设立的19个临时地震台站。如图2a所示,研究区内台站分布较为密集。19个临时地震台(图2a黑色四边形所示)分布于长白山火山周围,在1998年6月下旬至10月期间运行。本研究收集了1980~2005年间发生的4802个区域地震(图2b),收集到P波走时数据为49799个。另外,收集了1980~2002年间9599个远震的相对走时残差数据。最终用于成像的P波走时数据共计239519个,远震分布如图3所示。这些走时数据的读取误差在0.1~0.2 s左右。本研究也采用了赵大鹏等^[12]研究所用的19个临时台站所记录的548个远震相对走时残差数据。

本研究采用近震远震联合层析成像方法^[13],该方法允许模型空间内存在几个复杂形状的间断面,并且在模型中地震波速度在三维空间变化。该方法应用十分广泛,并取得了很多非常有意义的成果。成像反演过程中近震采用走时数据,而远震采用相对走时残差数据。相对走时残差的计算详见文献^[13]。

在反演中,对区域地震进行重新定位。由于采用远震的相对走时残差数据,所以在成像反演中远震震源参数采用ISC的地震目录报告给出^[14],并令其固定不变。理论走时的计算采用iasp91全球平均速度模型^[15]。通过改变网格节点间距,进行了多

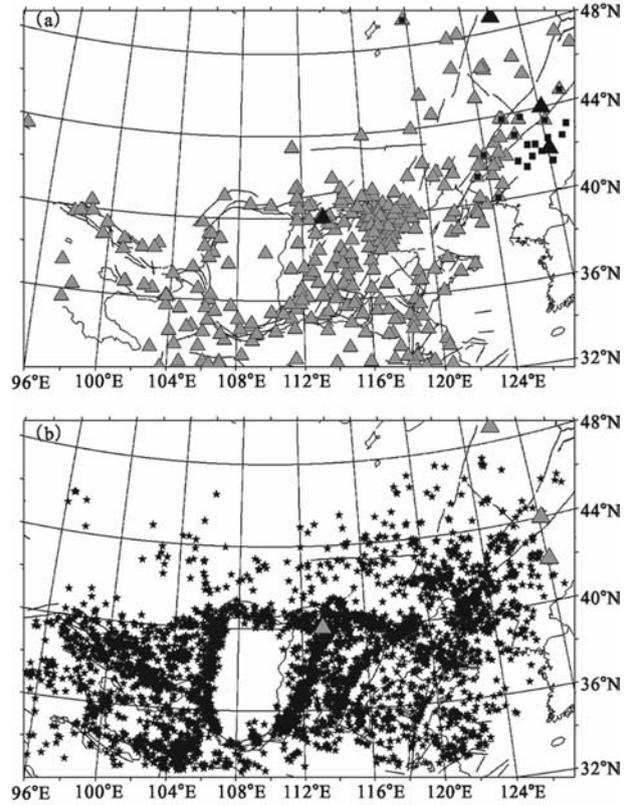


图2 研究所用台站(a)及区域地震震中(b)分布 (a)图中黑色三角和黑色四边形分别代表火山与布设在长白山火山区的临时地震台站;(b)图中灰色三角代表火山。

Fig. 2 Distribution of stations (a) and events (b) used in the study

Black triangles and black quadrangles denote the volcanoes and temporary stations set up around Changbai volcano region in (a), respectively. Grey triangles present volcanoes in (b).

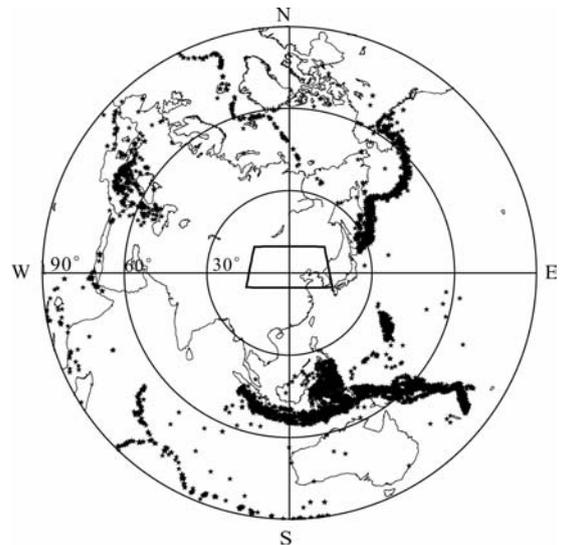


图3 研究所用远震震中分布图
Fig. 3 Distribution of teleseismic events used in this study

次反演, 选取了最佳的水平网格间距为 0.8° , 深度上为 $20 \sim 80$ km 不等. 经统计, 未知速度参数为 7488 个, 但为了提高反演精度, 在反演时只选取了穿过射线数大于 30 条的共计 5987 个未知速度参数进行了反演.

3 分辨率分析

由于地球物理反演结果的不唯一性, 对结果进行分辨率分析成为必要环节. 一个简便方法就是在模型空间内设置一些有规律的速度异常, 然后计算理论走时, 再对其反演, 最后将反演结果与初始合成模型进行对比, 看对初始构建的模型还原程度如

何, 从而来评价成像分辨率的高低.

地震层析成像分辨率由研究所用的数据多少及射线交叉情况所决定. 图 4 展示了 6 个深度层位上的分辨率检测结果. 在检测板测试中, 首先在模型格点处输入相间的 $\pm 3\%$ 的速度扰动, 然后计算合成走时数据, 再对该数据进行反演, 反演结果如图 4 所示. 结果显示: 由于在研究区的东南部海域没有台站分布, 而在北部和西北地区台站与地震较为稀少, 所以分辨率较差; 但由于本研究采用了大量的远震数据, 在研究区上地幔区域的各层位上分辨率均较为理想. 作为本研究重要的目标区域, 长白山火山区及东北大部分地区深部的成像分辨率均较好, 尤其是地幔转换带内, 整个研究区均有很好的分辨.

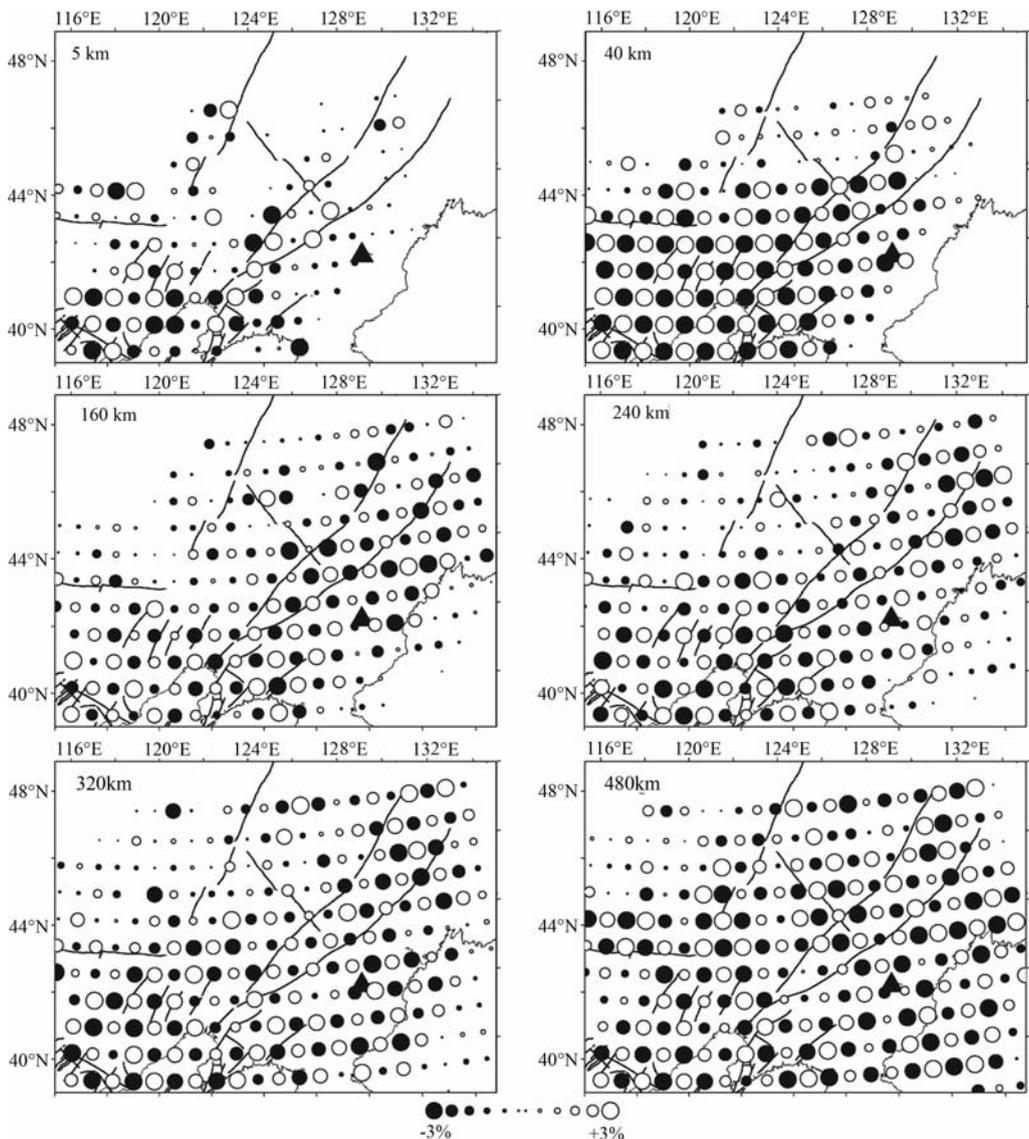


图 4 6 个深度层上检测板分辨率检测结果

各层深度标度在图的左上角.

Fig. 4 Checkerboard resolution results in six layers

The depth is shown at the upper-left corner of each map.

4 成像结果与讨论

4.1 成像结果

由于东北地区台站的分布较稀,地震较少,所以为了提高东北地区的地震层析成像分辨率,在该研究中利用了华北地区台站和地震资料,但在成像结果中我们只展示了东北地区的三维速度结构(图5,图6).

图5为反演所得到6个典型深度层位上的P波速度扰动图像,图中标有该区主要断层、地震活动

和火山分布.图6展示了4个垂直速度剖面,剖面位置如图6e所示.结果显示P波速度异常走向大体呈北东向,与该区地表地质构造走向一致(图5).5 km深度速度异常与地表起伏形态有很好的对应关系:燕山与大兴安岭造山带表现为高速异常,而渤海湾盆地、松辽盆地表现为低速异常,渤海湾低速异常一直延伸至 >200 km 深度(图5).由于长白山造山带岩浆活动频繁,呈现明显的低速异常.东北地区在200 km 深度以上区域呈现两个低速异常条带,分别是沿着长白山一线与松辽盆地地区,其中长白山火山区低速异常延伸至400 km

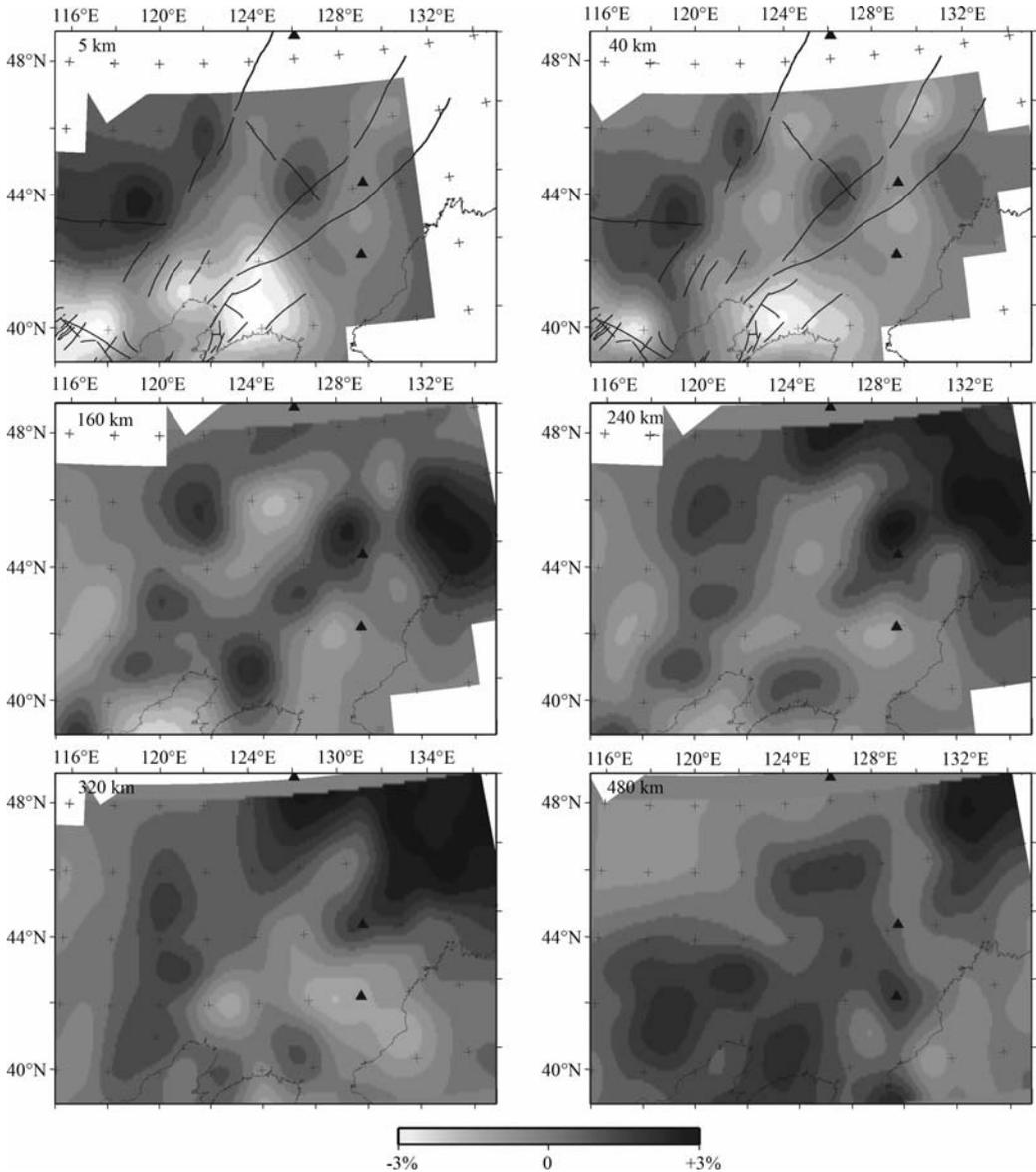


图5 6个典型深度上的P波速度层析成像结果

各层深度标在图左上角;白色与黑色分别表示低速与高速;黑色三角形表示火山.

Fig. 5 Plan views of P-wave tomography at six typical depth slices

The depth is shown at the upper-left corner of each map. White and black colors denote slow and fast velocity anomalies (in %); the black triangles denote the volcanoes.

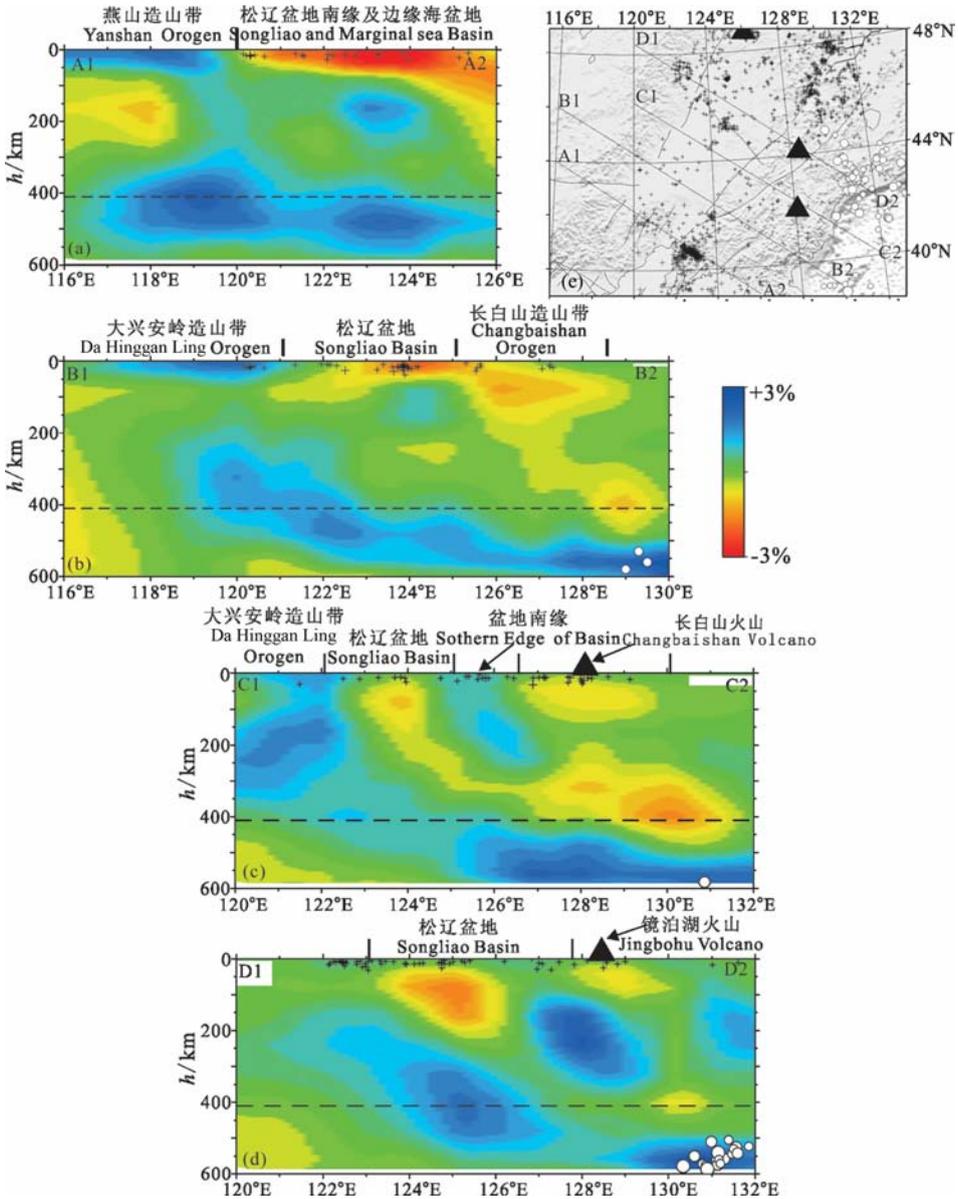


图 6 4 个典型垂直剖面的 P 波速度异常图；剖面位置见图 (e)

红色与蓝色分别表示低速与高速异常；黑色三角形代表火山；黑色十字与白点分别表示浅震 (0~30 km) 与深震 (450~600 km)

Fig. 6 Four typical vertical cross sections of P-wave tomography along profiles shown in (e).

Red and blue colors denote slow and fast velocity anomalies (in %); The black triangles denote the volcanoes.

Black crosses and white dots show the shallow (0~30 km) and deep (450~600 km) earthquakes

深度附近. 在 200 km 以下区域, 两个低速异常合并为一个低速异常 (图 5, 图 6). 地幔转换带 (410~660 km) 表现为显著高速异常, 并伴有深震发生, 这与西向俯冲、高波速的太平洋板块在转换带中的滞留相对应 (图 5, 图 6).

4.2 中国东北地区深部构造与大地幔楔模型

GPS 研究表明不是所有的板块构造边界呈现一条很狭窄的变形带, 一些板块边界区域会形成一个宽广的变形区域, 诸如印度板块与欧亚板块相互作用形成了几千公里的青藏高原. 同样, 西太平洋板

块的俯冲对中国大陆构造演化的影响已远至大陆内部. 全球与区域层析成像研究^[9,10]表明冷的、高速的西太平洋板块已俯冲到华北太行山地区, 停滞在地幔转换带中的太平洋板块与其上面地幔区域形成了一个巨大的地幔楔.

很多研究表明流体广泛地存在于地壳和上地幔中^[16,17]. 岩浆中的水来源主要有四个方面: 地球表面的水循环、从地壳岩石中吸收的水、大洋岩石圈中含水矿物随俯冲板片带到地幔内和储存在地幔中的原始水^[18]. Peacock^[19]研究表明俯冲带向地幔中输

送的水量比火山活动带到地表的水要多六倍以上,而更多的水通过俯冲板块被带入地幔和地幔转换带内. Huang et al. [20] 研究推断出太平洋地区地幔转换带中的水含量约为 $0.1\text{wt}\% \sim 0.2\text{wt}\%$ ($1.5 \sim 3.0$) $\times 10^4$ ppm H/Si) 左右, 远远高于上地幔的水含量 ($100 \sim 500$ ppm H/Si). 最近, 通过电导率和 P 波速度结构, Ichiki 等 [21] 估计了中国东北地区地幔的水含量和地热结构, 他们的研究表明在东北亚地区的整个上地幔或至少在软流圈内含有大量的水 (约 $500 \sim 1000$ ppm H/Si), 这与地震层析成像结果中大范围的低速异常相对应. 富含流体的上地幔可能就是停滞在地幔转换带内的太平洋板块深部脱水所造成的. 由于古老板块俯冲较快 ($7 \sim 10$ cm/a), 所以在 $100 \sim 200$ km 深度未能完成充分脱水反应, 大量的含水矿物将水带到地幔转换带内, 然后再通过含水的 Mg-Si 矿物发生脱水反应注入上地幔中 [22~24]. 地幔内流体的存在降低了岩石的熔点, 故造成东北亚地区地幔中大范围的部分熔融. 其他研究如数值模拟 [25]、大地电磁测深 [26]、航磁异常资料 [27] 等也表明东北地区地壳或者上地幔区域存在广泛的岩浆活动.

基于以上分析, 本研究认为东北地区深部构造及部分熔融的形成与西向俯冲的太平洋板块深部脱水及大地幔楔内热物质上升等过程有关. 首先由于太平洋板块的脱水注入到上地幔底部降低岩石熔点形成大范围的部分熔融体; 热物质不断上涌到达岩石圈底部, 随着东北地区拉张构造环境的形成导致东北地区岩石圈破裂; 从而部分熔融物质通过破裂的岩石圈上升到地壳中, 最终在 200 km 以上区域形成两条主要的热物质上涌通道.

4.3 中国东北地区地壳、上地幔结构对矿产能源形成的控制作用

矿产资源包括煤炭、石油和天然气等能源, 也包括固体矿产资源. 前一种能源一般赋存于沉积盆地中, 后一种多形成于褶皱带或活化地台区域并受控于区域岩浆活动. 深部构造是沉积盆地受控因素之一, 沉积盆地的深部速度结构对沉积盆地的形成进而对油气生成、运移、聚集和储存等具有控制作用 [3]; 而固体矿床的形成与频繁的岩浆活动密切相关. 所以中国东北地区油气与固体矿产资源非常丰富.

在研究区域内存在一条成矿带, 即沿长白山山脉一线, 该区矿产富集 [28]. 从 P 波层析成像结果上看, 沿长白山一线呈现明显的低速异常, 尤其是在

上地幔底部及地壳区域 (图 5, 图 6). 该显著低速异常表明曾经发生过强烈的、广泛的岩浆作用. 富含油气等能源的松辽盆地下面也表现为明显的低 P 波速度异常. 低速的软流圈物质通过破裂的岩石圈上涌到地壳内, 在中上地壳与地壳物质同熔, 这促进了该区沉积盆地的形成. 综合研究表明在东北地区软流圈热物质的上涌不但为固体矿产资源的形成提供物源, 而且对沉积盆地演化以及沉积盆地内部油气等资源的形成起着深层动力控制作用.

5 结 论

高分辨率三维成像结果表明东北地区构造演化与东北亚地区大地幔楔内软流圈上涌、西太平洋板块在地幔转换带中的滞留密切相关. 东北地区的岩浆活动在矿产与油气资源的形成过程中起着提供物源和深层控制作用. 虽然成像结果在一定程度上反映东北地区的主要区域构造及地球动力学特征, 显然 80 km 左右的成像分辨率不足以研究东北地区精细三维速度结构, 所以非常有必要在东北地区布设临时地震台网以提高地震层析成像的分辨率.

致 谢 特别感谢日本东北大学赵大鹏教授提供的地震层析成像计算程序 (TOMO3D). 同时感谢中国科学院地质与地球物理研究所孙若昧教授与中国国家地震局数据中心提供的地震波走时数据. 感谢匿名评审专家对该论文提出的宝贵意见. 本文中图件均用 GMT 软件绘制 [29].

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. 地质通报, 2004, **23**(9): 885~891
Tang K D, Shao J A, Li J C, et al. Nature of the Yanbian suture zone and structure of Northeast Asia. *Geol. Bull. China* (in Chinese), 2004, **23**(9~10): 885~891
- [2] 涂广红, 江为为, 朱东英等. 中国东北地区剩余重力异常特征与地质构造及成矿带的关系. 地球物理学进展, 2006, **21**(3): 746~755
Tu G H, Jiang W W, Zhu D Y, et al. The relationships between the characteristics of Northeast China residual gravity and magnetic anomalies and geological tectonic & metallogenic belt. *Progress in Geophysics* (in Chinese), **21**(3): 746~755
- [3] 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. 中国地质, 2006, **33**(4): 866~873
Yang B J, Liu C, Liu W S, et al. Seismological features of the lithospheric structure in Northeast China and dynamic

- controls on mineral resources. *Geology in China* (in Chinese), 2006, **33**(4): 866~873
- [4] 杜晓娟, 孟令顺, 张明仁. 利用重力场研究东北地区断裂分布及构造分区. *地球科学与环境学报*, 2009, **31**(2): 200~206
- Du X J, Meng L S, Zhang M R. Research on fault distribution and tectonic divisions in Northeast China in terms of gravity field. *J. Earth Sci. Environ.* (in Chinese), 2009, **31**(2): 200~206
- [5] 杨宝俊, 穆石敏, 金旭等. 中国满洲里—绥芬河地学断面地球物理综合研究. *地球物理学报*, 1996, **39**(6): 772~782
- Yang B J, Mu S M, Jin X, et al. Synthesized study on the geophysics of Manzhouli—Suifenhe geoscience transect, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(6): 772~782
- [6] 卢造勋, 夏怀宽. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地学断面. *地球物理学报*, 1993, **36**(6): 765~772
- Lu Z X, Xia H K. Geoscience transect from Dong Ujimqinqi, Nei Mongol, to Donggou, Liaoning, China. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1993, **36**(6): 765~772
- [7] 田有, 赵大鹏, 孙若味等. 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. *地球物理学报*, 2007, **50**(5): 1488~1496
- Tian Y, Zhao D P, Sun R M, et al. The 1992 Landers earthquake: effect of crustal heterogeneity on earthquake generation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(5): 1300~1308
- [8] Tian Y, Zhao D, Sun R, et al. Seismic imaging of the crust and upper mantle beneath the North China Craton. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2009, **172**: 169~182
- [9] Zhao D, Tian Y, Lei J, et al. Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: Role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2009, **173**: 197~206
- [10] Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, **146**: 3~34
- [11] Wu F, Hetland E. The Changbaishan, China, PASSCAL experiment. 21st Seismic Research Symposium: Technologies for Monitoring the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty, Las Vegas, 1999, NV, USA
- [12] 赵大鹏, 雷建设, 唐荣余. 中国长白山火山的起源: 地震层析成像证据. *科学通报*, 2004, **49**(14): 1439~1446
- Zhao D P, Lei J S, Tang R Y. Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: Evidence from seismic tomography. *Chinese Sci. Bull.*, 2004, **49**: 1401~1408
- [13] Zhao D, Hasegawa A, Kanamori H. Deep structure of Japan subduction zones as derived from local, regional, and teleseismic events. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 22313~22329
- [14] Engdahl R, van der Hilst R, Buland R. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1998, **88**: 722~743
- [15] Kennett B, Engdahl E. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int.*, 1991, **105**: 429~465
- [16] Ohtani E. Water in the mantle. *Science*, 2005, **1**: 25~30
- [17] Zhao D, Maruyama S, Omori S. Mantle dynamics of western Pacific to East Asia: New insight from seismic tomography and mineral physics. *Gondwana Res.*, 2007, **11**: 120~131
- [18] Thompson A. Water in the Earth's upper mantle. *Nature*, 1992, **358**: 295~302
- [19] Peacock S. Fluid processes in subduction zones. *Science*, 1990, **248**: 329~337
- [20] Huang X, Xu Y, Karato S. Water content in the transition zone from electrical conductivity of wadsleyite and ringwoodite. *Nature*, 2005, **434**(7034): 476~479
- [21] Ichiki M, Baba K, Obayashi M, et al. Water content and geotherm in the upper mantle above the stagnant slab: Interpretation of electrical conductivity and seismic P-wave velocity models. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2006, **155**: 1~15
- [22] Shieh S, Mao H, Hemley R, et al. Decomposition of phase D in the lower mantle and the fate of dense hydrous silicates in subducting slabs. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, **159**: 13~23
- [23] Komabayashi T, Omori S, Maruyama S. Petrogenetic grid in the system MgO-SiO₂-H₂O up to 30 GPa, 1600 degree C: applications to hydrous peridotite subducting into the Earth's deep interior. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: B03206
- [24] Ohtani E, Litasov K, Hosoya T, et al. Water transport into the deep mantle and formation of a hydrous transition zone. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, **143**: 255~269
- [25] 朱桂芝, 石耀霖, 陈石等. 西太平洋板块向我国东北地区深部俯冲的数值模拟. *地球物理学报*, 2009, **52**(4): 950~957, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.011
- Zhu G Z, Shi Y L, Chen S, et al. Numerical simulations on deep subduction of western Pacific plate to NE China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(4): 950~957, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.011
- [26] 刘财, 张兴洲, 刘洋等. 东北亚跃进山拼贴带及邻域岩石圈结构特征的地电学证据. *地球物理学报*, 2009, **52**(4): 958~965, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.012
- Liu C, Zhang X Z, Liu Y, et al. Geoelectrical evidence for characteristics of lithospheric structure beneath the Yuejinshan collage zone and its vicinity in Northeast Asia. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(4): 958~965, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.012
- [27] 胡旭芝, 徐鸣洁, 谢晓安等. 中国东北地区航磁特征及居里面分析. *地球物理学报*, 2006, **49**(6): 1674~1681
- Hu X Z, Xu M J, Xie X A, et al. A characteristic analysis of aeromagnetic anomalies and Curie point isotherms in Northeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(6): 1674~1681
- [28] 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. *矿物岩石*, 2005, **25**(2): 47~59
- Qi J P, Chen Y J, Franco P. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the Northeast China. *J. Mineral Petrol* (in Chinese), 2005, **25**(2): 47~59
- [29] Wessel P, Smith W. New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *Eos Trans.*, 1998, AGU 79, 579