

- 谢振新, 吴庆举, 周仕勇等. 2018. 兴蒙造山带诺敏河火山群地壳厚度与波速比研究. 地球物理学报, 61(12):4805-4816, doi: 10.6038/cjg2018M0197.
- Xie Z X, Wu Q J, Zhou S Y, et al. 2018. Study of crustal thickness and  $V_P/V_S$  ratio beneath the Nuomin River volcanoes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(12):4805-4816, doi:10.6038/cjg2018M0197.

# 兴蒙造山带诺敏河火山群地壳厚度与波速比研究

谢振新<sup>1,2,3</sup>, 吴庆举<sup>1,3\*</sup>, 周仕勇<sup>2</sup>, 朱敏<sup>1,3</sup>

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 北京大学理论与应用地球物理研究所, 北京 100871

3 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081

**摘要** 利用布设于兴蒙造山带诺敏河火山群地区的宽频带流动地震台站资料, 基于接收函数方法, 获取了该地区的地壳厚度与波速比值. 研究结果显示, 该地区的地壳厚度介于 32~38 km, 莫霍面深度在空间上分布特征与五大连池为中心的火山带分布具有较好的一致性: 沿着火山带延展方向地壳较薄. 该地区的波速比介于 1.74~1.84, 波速比在空间上与地壳厚度变化具有一致性: 高波速比主要集中于靠近五大连池火山带地区, 向诺敏河火山和小古里河火山延展. 研究认为: 诺敏河火山与五大连池火山带可能具有相同的岩浆来源, 可能与富钾岩石圈地幔拆沉作用造成的地幔热物质上涌有关. 研究区地壳厚度与波速比呈现负相关关系, 暗示该地区可能发生过岩浆底侵作用.

**关键词** 诺敏河火山群; 接收函数; 地壳厚度; 波速比

doi:10.6038/cjg2018M0197

中图分类号 P315

收稿日期 2018-04-03, 2018-07-16 收修定稿

## Study of crustal thickness and $V_P/V_S$ ratio beneath the Nuomin River volcanoes

XIE ZhenXin<sup>1,2,3</sup>, WU QingJu<sup>1,3\*</sup>, ZHOU ShiYong<sup>2</sup>, ZHU Min<sup>1,3</sup>

1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2 Institute of Theoretical and Applied Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

3 Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** We analyze thousands of receiver-function data recorded by 43 temporary seismic stations to reveal the crustal structure beneath the Nuomin River volcanoes in Northeast China. The  $H-\kappa$  method is applied to measure crustal depth and average  $V_P/V_S$  ratio. Results show that the crustal thickness of this area varies from 32 km to 38 km. The Moho depth is relatively larger in the west, decreasing significantly to  $\sim 32$  km beneath the volcanoes and adjacent areas, then increasing slowly to  $\sim 35$  km. The crust is thin in NNW direction, consistent with the trend of the volcanic belt centered at Wudalianchi. The region nearby Wudalianchi volcanoes has an average  $V_P/V_S$  ratio of 1.80, higher than in the west part of the study area, extending towards Nuomin River volcanoes and Xiaoguli River volcanoes. Research suggests that the delamination of K-rich lithosphere mantle triggered the upwelling of magma in Northeast China. Negative correlation between crustal thickness and Poisson's ratio is thought to result from simultaneous underplating of mafic magmas from upper mantle into crust which has likely modified crustal composition during Mesozoic-Cenozoic tectonic extension.

基金项目 国家自然科学基金项目(41474074)资助.

第一作者简介 谢振新, 男, 1992 年生, 在读博士生, 主要从事地球深部构造方面的研究. E-mail: xiezhenxin@pku.edu.cn

\* 通讯作者 吴庆举, 男, 研究员, 从事地震学、地球动力学方面的研究. E-mail: wuqj@cea-igp.ac.cn

**Keywords** Nuomin River volcanoes; Receiver functions; Crustal thickness;  $V_p/V_s$  ratio

## 0 引言

兴蒙造山带(XMOB)位于中亚造山带(CAOB)东段,由北部的西伯利亚地块与南部的华北克拉通俯冲挤压碰撞而形成(Jahn et al., 2000; Şengör et al., 1993),以南北重力梯度线(NSGL)为界,与东边的松辽盆地分隔开。受到古太平洋板块的俯冲作用,从晚中生代时期开始中国东北地区地质构造单元经历了从挤压到拉张的过程,在软流圈上涌和岩浆底侵作用(Meng, 2003; Wu et al., 2002; Zorin, 1999a)的影响下,中国东北地区发育大量的新生代火山,如长白山火山、镜泊湖火山、五大连池火山、哈拉哈河—淖尔河火山等。这些火山远离板块边界,属于典型的板内火山。大地幔楔模型认为长白山乃至整个东北地区的东亚上地幔低速异常是与太平洋板块的深部俯冲至地幔转换带,然后滞留脱水和热湿物质上涌等动力学过程相关(Lei and Zhao, 2005, 2006; Zhao, 2004; Zhao et al., 2007, 2009; 雷建设等, 2018),面波层析成像的结果进一步验证了东北地区的地幔对流循环模型(Guo et al., 2015, 2016)。长白山火山可能与俯冲太平洋板块下方的热物质由于板块后撤遇到板块空缺然后在此上升形成有关(Tang et al., 2014)。从火山岩成分分类上来说,五大连池火山、科洛火山等板内火山不同于东部的长白山火山与南部的哈拉哈河—淖尔河火山,属于钾质火山,前人通过对钾质板内火山的成因研究,提出了多种模型以解释火山的形成机制:1)岩石圈地幔的低度熔融(Zhang et al., 1995);2)以含金云母的石榴石橄榄岩为主成分的地幔源缓慢上涌(Zou et al., 2003);3)岩石圈地幔的拆沉作用及含有金云母成分的岩石圈地幔经过交代作用后熔融(Farmer et al., 2002; Hunt et al., 2012);4)来自地幔转换带的含水地幔柱上涌(Kuritani et al., 2013)。

以五大连池火山为中心,沿小古里河—科洛—五大连池—二克山分布的一系列钾质火山构成了我国东北钾质火山岩带,与处于兴蒙造山带南部以哈拉哈河—淖尔河火山区为代表的钠质火山形成强烈对比(赵勇伟等, 2008; 赵勇伟和樊祺诚, 2011)。诺敏河火山群位于大兴安岭山脉北端,以诺敏农场为中心,分布有 24 座火山,熔岩流分布面积约 600 km<sup>2</sup>

(图 1),诺敏河火山玄武岩的 K-Ar 同位素研究表明诺敏河火山的喷发时间为距今 2.3~0.13 Ma(樊祺诚等, 2012),进一步的地球化学研究表明火山的形成时期介于早更新世至全新世(Zhao et al., 2014a)。诺敏河火山玄武岩具有接近原始岩浆的高锰特征,岩浆上升过程中极少演化和受到地壳混染,从岩石地球化学的组成成分上看与其东部的五大连池火山具有很强的相似性,两者在岩浆源区上可能具有一定的联系(李霓等, 2012; 樊祺诚等, 2012, 2008; 赵勇伟等, 2013; 马保起等, 2006)。

前人地震学研究表明,在东北地区下地壳与上地幔广泛存在低速异常(Guo et al., 2014, 2015, 2016; Kang et al., 2016; Li et al., 2012, 2016a, b; Liu et al., 2017; Tang et al., 2014; Tao et al., 2014; Zhang et al., 2012, 2014, 2016; Zhao et al., 2009; 张风雪等, 2013, 2014; 潘佳铁等, 2014),低速异常分布可能代表了岩浆物质向上运移的通道。地震层析成像研究显示阿尔山火山下方深达 400 km 的上地幔存在显著的低速异常结构(Zhang et al., 2017; 张风雪等, 2013, 2014),与长白山火山下方观测到的深部低速异常具有相似性(Lei et al., 2013; Lei and Zhao, 2005; Zhao et al., 2007, 2009),而在诺敏河火山下方的上地幔仅存在 100 km 的低速异常,与诺敏河火山较近的五大连池火山下方同样存在类似 100 km 以上低速异常(张风雪等, 2014, 2013)。大地电磁数据研究得出,在研究区的东部五大连池火山区下方存在明显低阻体,可能反映了五大连池下方的岩浆囊系统(詹艳等, 2006)。地球化学及地震学研究结果预示诺敏河火山群与其东部以五大连池火山为中心的火山带可能存在紧密联系。

由地壳内  $V_p/V_s$  比得到的泊松比是构成地球与行星物质成分的极其重要的弹性力学参数,测量泊松比已成为探索地球内部物质成分、构造和物理状态最有用的方法之一(Christensen, 1996; Holbrook et al., 1988; Ji and Salisbury, 1993; Zandt and Ammon, 1995)。为研究诺敏河火山区地壳厚度与波速比特征,以及与小古里河—科洛—五大连池—二克山钾质火山带的关系,进一步解释东北地区钾质板内火山可能的形成机制,本文拟利用位于该地区的地震数据通过 P 波接收函数方法对该地区地壳结构特征开展进一步地研究、讨论。

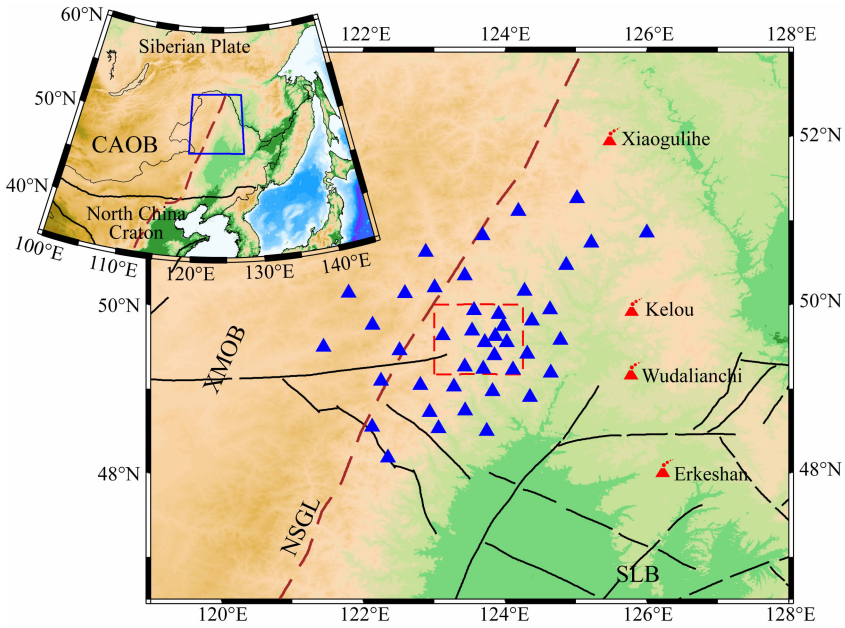


图 1 台站分布图

蓝色三角代表台站位置;黑色实线表示断层.红色虚线框表示诺敏河火山群分布. NSGL:南北重力梯度线; SLB:松辽盆地;XMOB:兴蒙造山带;CAOB:中亚造山带.

Fig. 1 Distributions of seismic stations

Blue triangles represent for seismic stations, black lines are faults, red dash lines represent for distribution range of Nuomin River volcanoes. NSGL: North-South Gravity Line, SLB: Songliao Basin; XMOB: Xingmeng Orogenic Belt, CAOB: Central Asian Orogenic Belt.

## 1 数据和方法

接收函数方法自 20 世纪首次提出后 (Langston, 1977), 经过近 40 年的发展与改进 (Park and Levin, 2000; Wu et al., 2007; 刘启元, 1996), 已广泛应用于地震学研究当中. 地震数据是由震源时间函数、震源区介质相应、射线路径相应、接收区介质相应与仪器响应的褶积表示, 在一定的假设前提下, 将远震 P 波波形利用反褶积方法去除其他响应, 只留下接收区下方的介质相应, 即为 P 波接收函数. 对远震事件的地震数据去均值、去线性趋势、去尖灭后, 利用时间域反褶积方法提取得到接收函数.

当远震 P 波穿过莫霍面时, 会产生 Ps 转换波及多次反射波震相, 各个震相与初至震相的到时差和 P 波速度、S 波速度、地壳厚度  $H$  有关, 它们满足如下关系:

$$H = \frac{t_{Ps}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2} - \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - p^2}},$$

$$H = \frac{t_{PpPs}}{\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2} + \sqrt{\frac{1}{V_p^2} - p^2}},$$

$$H = \frac{t_{PpSs+PsPs}}{2\sqrt{\frac{1}{V_s^2} - p^2}}.$$

在已知射线参数  $p$  的情况下, 可以求出地壳厚度 ( $H$ ) 与  $V_p/V_s$  比 ( $\kappa$ ).  $H-\kappa$  叠加方法的原理是利用每个  $H, \kappa$  值, 计算得到三个震相的到时, 根据到时可以获得在该到时处三个震相的振幅值, 将振幅值按照一定的权重叠加:

$$s(H, \kappa) = \omega_1 r(t_1) + \omega_2 r(t_2) - \omega_3 r(t_3).$$

对在一定范围内的  $H$  和  $\kappa$  进行扫描, 得到最大振幅位置, 即为所求的地壳厚度与波速比 (Zhu and Kanamori, 2000; 何静等, 2014; 张广成等, 2013).

扫描结果的误差可以通过叠加结果最大振幅位置的平滑度得到: 利用叠加函数的泰勒展开, 并且忽略高阶项, 可以得到  $H$  和  $\kappa$  的误差估计:

$$\sigma_H^2 = 2\sigma_s / \frac{\partial^2 s}{\partial H^2},$$

$$\sigma_\kappa^2 = 2\sigma_s / \frac{\partial^2 s}{\partial \kappa^2}.$$

其中,  $\sigma_s$  为目标函数的估计方差.

2015年6月至2017年5月,在国家自然科学基金的资助下,中国地震局地球物理研究所在中国东北诺敏河火山群地区架设了43套宽频带地震仪,开展了为期近两年的连续数据观测.本文利用该地震观测台站数据,截取震级大于5.0,震中距为 $30^\circ \sim 95^\circ$ ,共计1135个远震地震事件,开展接收函数研究.图2为选取的地震事件分布图,从图中可以看出,远震事件的后方位角在各个方位的分布较为理想.本文中,高斯系数选取3.0,Ps, PpPs, PpSs+PsPs震相的权重分别取为0.6、0.3、0.1,利用 $H-\kappa$ 方法(Zhu and Kanamori, 2000),得到火山区各个台站下方的地壳厚度( $H$ )与 $V_P/V_S$ 比( $\kappa$ ).图3为 $H-\kappa$ 扫描叠加得到的地壳厚度与波速比.

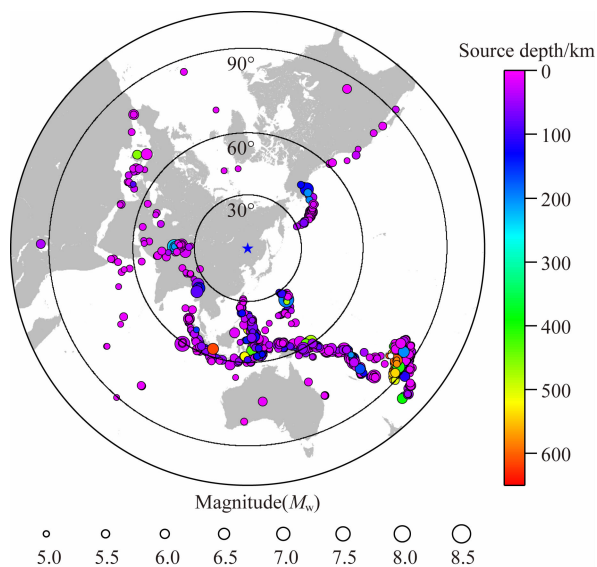


图2 远震事件分布图

Fig. 2 Distribution map of teleseismic events used in this study

## 2 结果与讨论

通过 $H-\kappa$ 方法得到了研究区42个台站下方的地壳厚度和波速比(表1).通过对研究区台站下方地壳厚度与波速比统计(图4)得出,研究区的地壳厚度区间为32~38 km,主要集中于33~36 km(图4a),测量误差介于1.1~3.4 km,平均误差2.1 km;研究区地壳波速比变化范围为1.74~1.80(图4b),测量误差介于0.03~0.10,平均误差0.06.

### 2.1 地壳厚度分布

从图4a可以看到,研究区的地壳厚度变化范围为32~38 km.前人的研究表明,研究区东南边的松

表1 各台站地壳厚度及波速比

Table 1 Crustal thickness and  $V_P/V_S$  ratio beneath each station by  $H-\kappa$  stacking

台站	纬度( $^\circ$ N)	经度( $^\circ$ E)	$H$ (km)	$\sigma H$ (km)	$\kappa$	$\sigma(\kappa)$
XM01	51.3	125.0	34.9	2.60	1.75	0.07
XM02	50.9	126.0	35.6	2.20	1.74	0.06
XM03	51.1	124.2	33.5	1.50	1.79	0.04
XM04	50.7	125.2	34.4	2.20	1.80	0.06
XM05	50.6	122.9	35.5	2.30	1.77	0.06
XM06	50.5	124.9	33.5	2.90	1.78	0.09
XM07	50.8	123.7	32.9	1.60	1.76	0.05
XM08	50.1	121.8	37.5	2.60	1.74	0.05
XM09	50.3	123.4	33.6	1.80	1.77	0.05
XM10	50.2	124.3	34.0	2.00	1.77	0.06
XM12	50.2	123.0	34.9	2.20	1.75	0.06
XM13	50.1	122.6	35.4	1.80	1.76	0.05
XM14	49.8	122.1	35.5	1.90	1.78	0.05
XM15	49.9	123.6	34.4	2.00	1.77	0.06
XM16	49.9	123.9	33.9	2.20	1.77	0.06
XM17	49.8	124.4	32.9	1.70	1.82	0.05
XM18	49.7	124.0	33.1	1.50	1.81	0.05
XM19	49.7	123.5	34.5	3.00	1.78	0.08
XM20	49.6	123.9	33.5	1.90	1.80	0.06
XM21	49.6	124.8	33.1	1.90	1.79	0.08
XM22	49.6	123.1	34.5	1.60	1.79	0.05
XM23	49.5	123.7	35.0	1.80	1.75	0.05
XM24	49.6	124.0	34.0	2.00	1.77	0.06
XM25	49.4	124.3	33.5	1.60	1.79	0.05
XM26	49.4	123.9	33.5	2.60	1.80	0.07
XM29	49.5	122.5	36.5	1.90	1.75	0.05
XM30	49.5	121.4	36.0	2.50	1.84	0.06
XM31	49.3	123.4	35.0	2.10	1.77	0.06
XM32	49.2	123.7	34.1	1.70	1.80	0.04
XM33	49.2	124.1	33.6	1.80	1.82	0.05
XM34	49.2	124.6	33.5	2.90	1.78	0.08
XM35	49.1	122.2	37.5	1.40	1.75	0.03
XM36	49.0	122.8	36.5	2.70	1.75	0.07
XM37	49.0	123.3	34.5	1.60	1.79	0.05
XM38	49.0	123.8	33.6	1.60	1.80	0.05
XM39	48.9	124.3	33.5	1.80	1.76	0.05
XM40	48.7	123.4	34.5	3.20	1.79	0.09
XM41	48.7	122.9	36.9	3.30	1.75	0.10
XM42	48.5	122.1	37.0	2.60	1.76	0.07
XM43	48.5	123.7	34.0	1.30	1.76	0.04
XM44	48.5	123.1	35.1	1.10	1.76	0.03
XM45	48.2	122.3	35.4	3.40	1.77	0.09

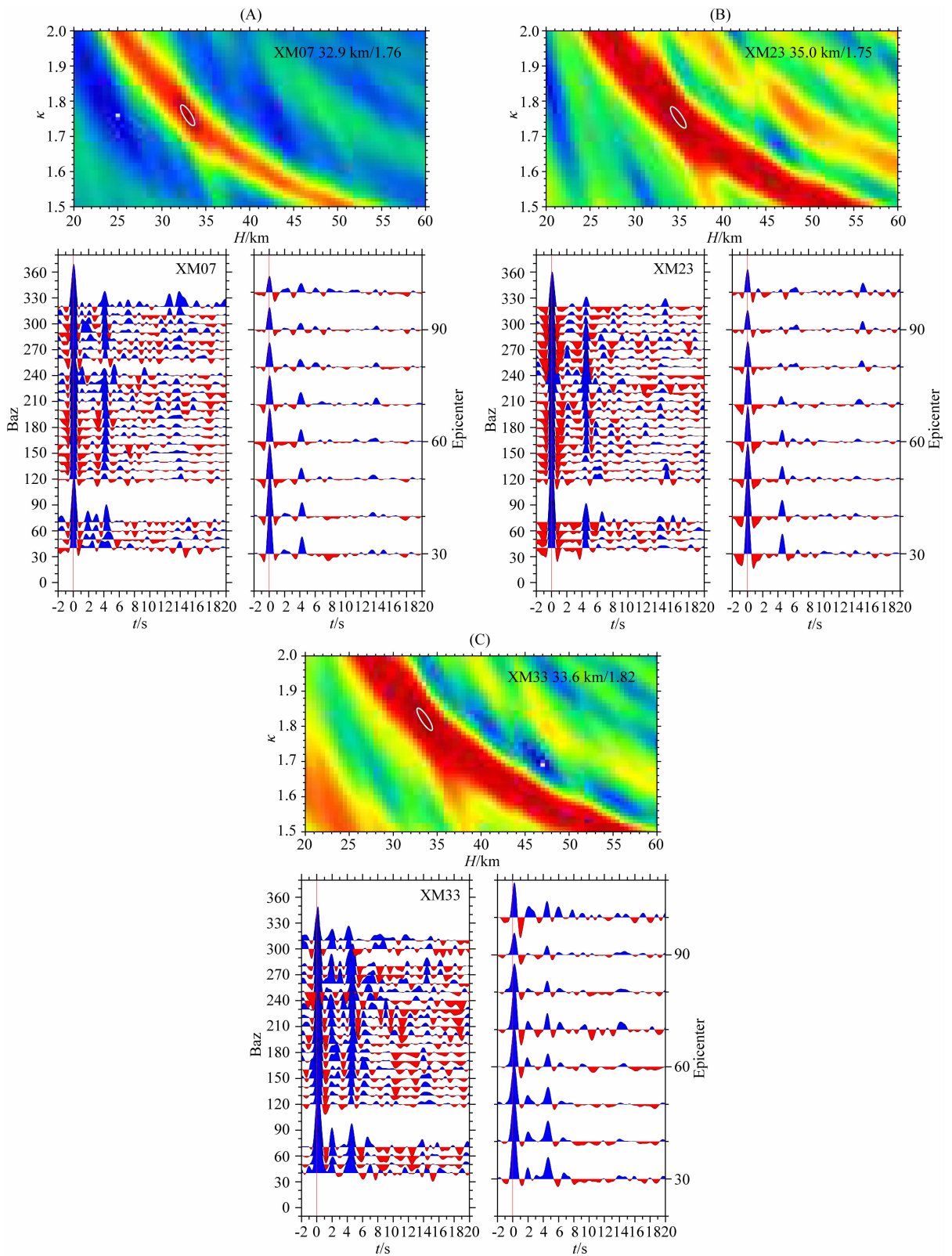


图3 地壳厚度与  $V_p/V_s$  估计,按照后方方位角与震中距叠加的接收函数  
(台站 XM07, XM23, XM33)

Fig. 3 Estimation of crustal thickness and  $V_p/V_s$  ratio using  $H-\kappa$  stacking method

Diagrams below represent for the Receiver Functions, which are stacked according to different back azimuths and epicenters  
(Station XM07, XM23 and XM33).

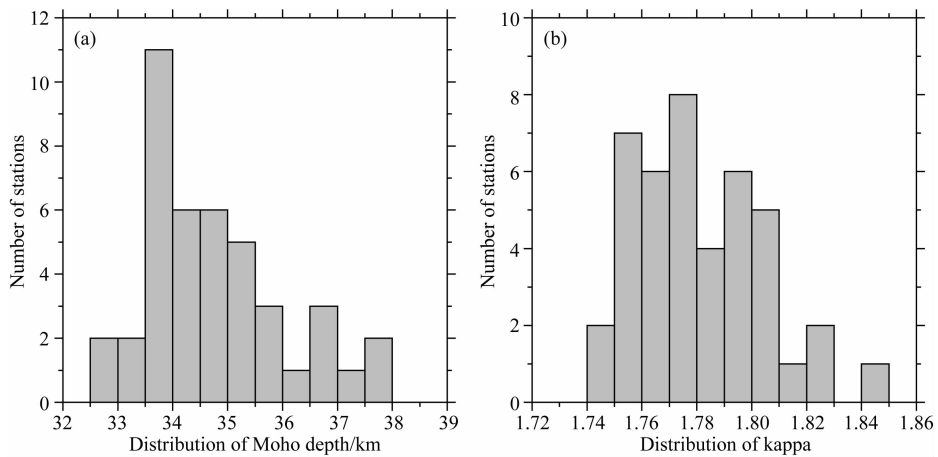


图 4 研究区地壳厚度(a)和波速比统计(b)

Fig. 4 The statistic of crustal thickness and  $V_p/V_s$  ratio

辽盆地北缘地壳厚度在 31 km 左右,西部的大兴安岭褶皱带北部地壳厚度大于 40 km (Guo et al., 2015, 2014; Tao et al., 2014; 张广成等, 2013),研究区的地壳厚度值介于两者之间过渡区域。

由于研究区处于东北地区的盆山过渡区,地形高差较大,因此考虑扣除地形对莫霍变化的影响(图 5, 6, 7)。从台站地壳厚度结果的横向分布上来看,研究区地壳厚度最薄区域位于诺敏河火山群东侧,整体上呈现 N-S 状或 NNW-SSE 带状分布。地壳在条带两翼逐渐增厚,在研究区西南部达到最大值 38 km。地壳厚度较薄区域构成带状分布的延展方向与二克山—五大连池—科洛火山带一致,与南北重力梯度线并不完全重合,存在一定的夹角。

我们选取垂直火山带走向的地震台站构成横切剖面 Aa(图 5),利用横跨南北重力梯度线的地震台站组成剖面 Bb(图 5),关注莫霍面在火山分布带和南北重力梯度线附近的变化。从图 6 中可以看到, Aa 剖面的西南两个靠近重力梯度线台站的地壳厚度大于 35 km;靠近火山带区域的台站地壳厚度减薄至 33 或 34 km;到测线最北边台站下方地壳厚度又增厚至 35 km。测线上的台站下方莫霍面深度虽然总体上变化不大,但是火山区附近明显呈现一个减薄的趋势,并且这个趋势一直延伸至测线的东北段,全长近 300 km。

Bb 剖面上莫霍面最浅处 33 km,最深处达到近 38 km。对比于 Aa 剖面, Bb 剖面的起伏较大,剖面的东段 100 km 范围内,莫霍面深度在 35 km 之上;剖面的西段地壳增厚至近 38 km。测线上的高程变化体现相同的变化趋势,东部的海拔较低,西部的海拔增高至 1000 m 以上,表现为西高东低的地形起

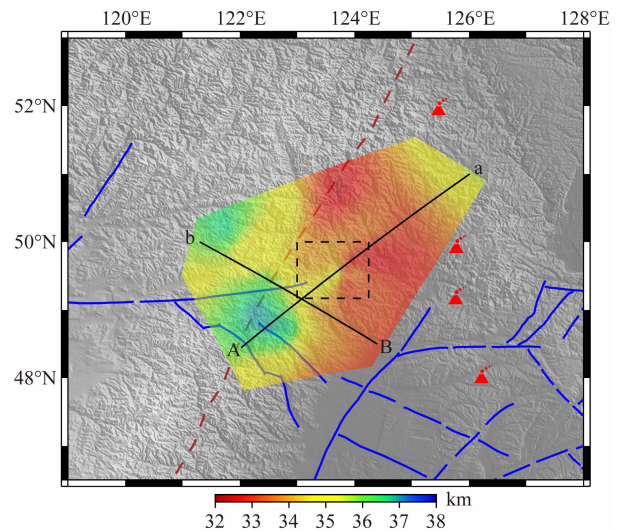


图 5 扣除地形影响后研究区地壳厚度分布

黑色虚线表示火山群区域,黑色实线为后文纵向剖面位置,红色虚线表示重力梯度线;蓝色实线为断层分布。

Fig. 5 Crustal thickness from  $H-\kappa$  stacking

Black dash lines imply for distribution of NMH volcano group, and black solid lines represent the vertical slices. Red dash line is North-South Gravity Line. Blue lines represent faults.

伏,在南北重力梯度线附近的地壳厚度呈现显著的增厚。

前人的研究表明,在松辽盆地下方,岩石圈厚度为 90~100 km,较薄的岩石圈可能暗示着东北地区的岩石圈发生了减薄和消减(Li et al., 2012; 潘佳铁等, 2014)。而这个减薄的作用范围不仅仅限于岩石圈地幔,中国东北地区自晚中生代以来,岩石圈经受了长时间的拉张作用,同时代地幔物质持续地上涌,地壳发生了一定规模的减薄作用。在南北重力梯度线以西的大兴安岭地区,地下 60~100 km 都表现为较为明显的高速(Li et al., 2012),地幔岩浆的

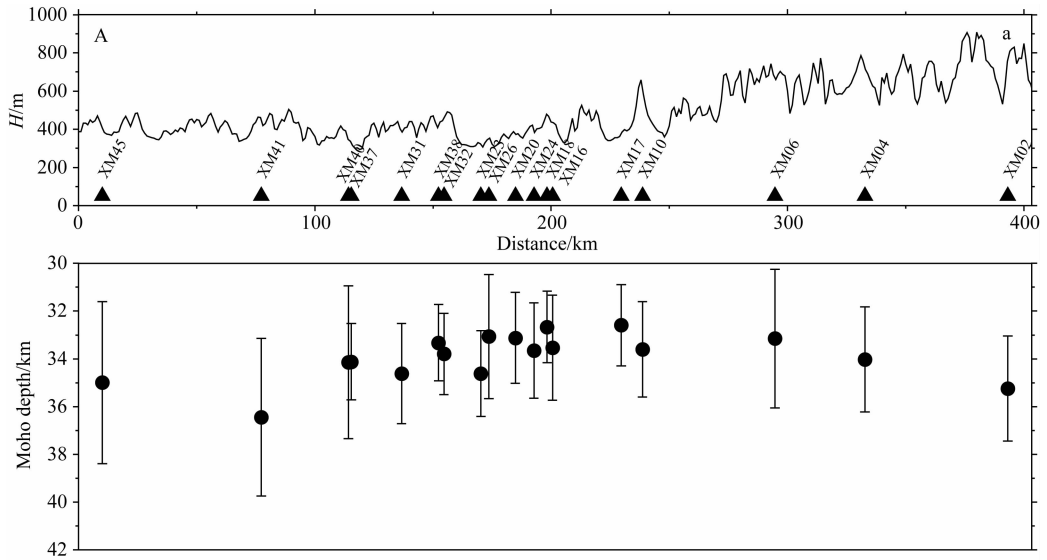


图 6 测线 Aa 下方莫霍面深度变化

短棒为叠加结果误差.

Fig. 6 Moho depth along the profile Aa

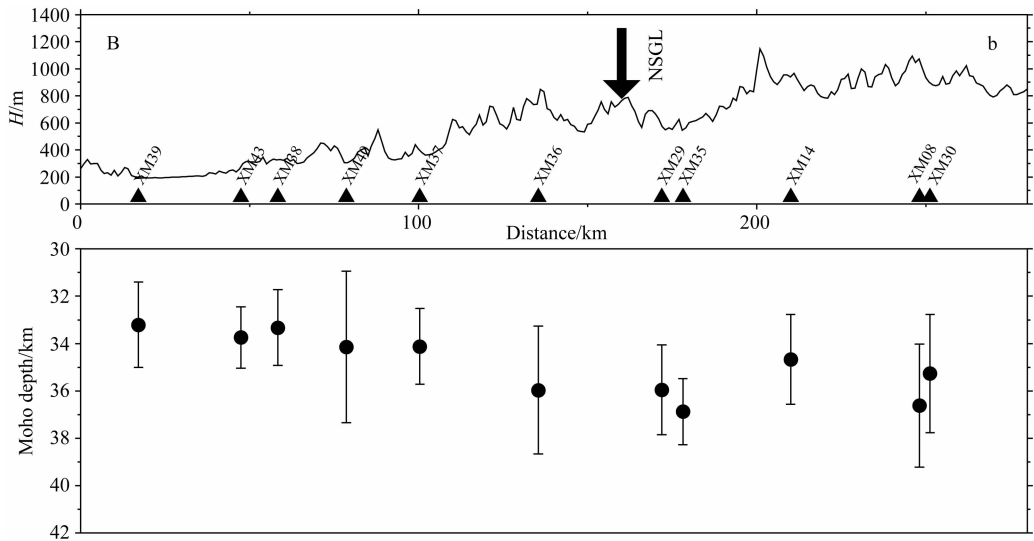
Error bars represent for uncertainties of  $H-\kappa$  stacking.

图 7 测线 Bb 下方莫霍面深度变化

短棒为叠加结果误差.

Fig. 7 Moho depth along the profile Bb

Error bars represent for uncertainties of  $H-\kappa$  stacking.

上涌作用并未显著影响到兴蒙造山带以西的地区;从图 5 看,地壳减薄的趋势沿着二克山—五大连池—科洛火山组成的火山带向北西西方向而去.

## 2.2 波速比分布

研究区的  $V_p/V_s$  比值从 1.74 变化至 1.84, 平均值为 1.78 左右, 与全球地壳波速比持平 (Zandt and Ammon, 1995). 从图 8 可以看到明显的横向变化: 在火山区的东侧波速比明显升高, 在靠近火山带的区域波速比达到了 1.80 以上; 在研究区的西北、东

南方向波速比较低, 最小值下降至 1.74.

若不考虑台站 XM30 的结果 (图 8), 在南北重力梯度带西侧的波速比较东侧要高, 1.78 以上的波速比分布于重力梯度带东侧, 且高波速比一直向东北方向延伸至研究区的东北部, 与测线 Aa 上较浅地壳具有对应关系, 构成一条高波速比异常带. 在高波速比异常带的西北方向, 存在一个高波速比异常的延伸, 该延伸与研究区北部的小古里河火山在空间位置上接近. 地壳内波速比的大小与地壳组分存

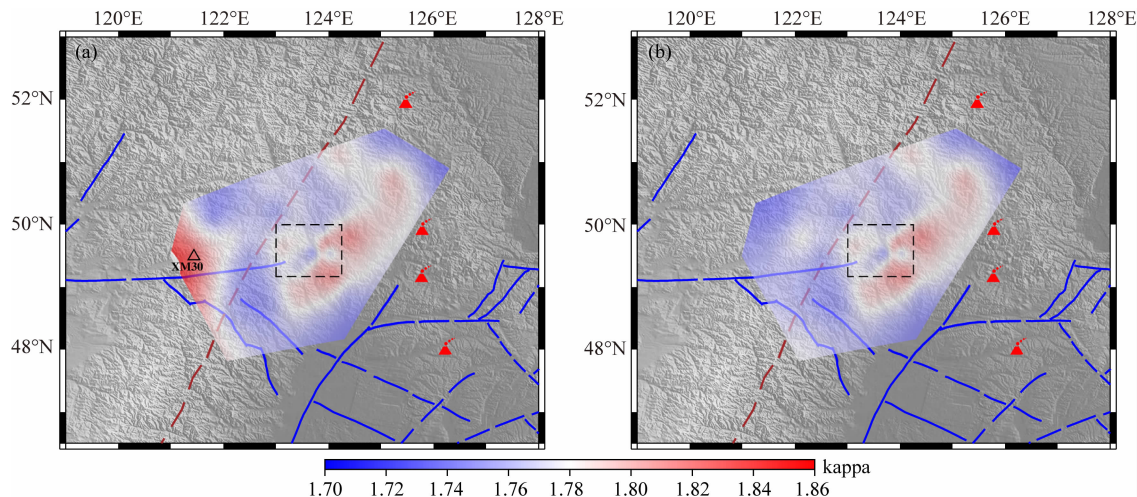


图 8 研究区波速比分布(a)与去除 XM30 结果后的波速比分布(b)

黑色虚线表示火山群区域,红色虚线表示重力梯度线;蓝色实线为断层分布。

Fig. 8  $V_p/V_s$  ratio from  $H-\kappa$  stacking (a) and the result regardless of station XM30 (b)

Black dash lines imply for distribution of NMH volcano group. Red dash line is North-South Gravity Line.

Blue lines represent faults.

在密切联系 (Ji et al., 2009). 从岩石成分上说, 波速比取决于地壳中  $\text{SiO}_2$  的含量, 因此对于下地壳岩石组别来说, 酸性、中性及基性成分对应的波速比差异较大, 基性的地壳岩石组分会使得波速比大于 1.81 (Christensen, 1996). 从矿物组分上来说, 波速比主要对岩石中石英的含量较为敏感, 镁铁质矿物的增加会导致波速比的升高 (Tarkov and Vavakin, 1982).

研究区高波速比条带可能暗示了该区域存在幔源物质上涌或者热物质底侵作用. 前人岩石地球化学的研究结果表明, 诺敏河火山群玄武岩与其东部的五大连池火山具有很强的相似性 (李霓等, 2012; 樊祺诚等, 2008, 2012; 赵勇伟等, 2013; 马保起等, 2006). 推测诺敏河火山群可能与以五大连池为中心的火山带具有相同的岩浆来源与形成机制. 地震学研究表明, 在东北地区下地壳与上地幔广泛存在低速异常 (Guo et al., 2014, 2015, 2016; Kang et al., 2016; Li et al., 2012, 2016a, b; Liu et al., 2017; Tang et al., 2014; Tao et al., 2014; Zhang et al., 2012, 2014, 2016; Zhao et al., 2009; 张风雪等, 2013, 2014; 潘佳铁等, 2014), 低速异常分布可能代表了热物质向上运移的通道. SKS 分裂得到的上地幔各向异性结果显示在靠近诺敏河火山群中心的区域呈现多个纯无效分裂结果 (强正阳和吴庆举, 待发表), 暗示该区域存在岩石圈拆沉或者地幔热物质的垂向运动 (Li et al., 2017; Long et al., 2010; Qiang et al., 2017). 同期远震有限频体波成像的结果也表明在火

山群区域内 100 km 深度表现为低速异常, 同时在研究区的东北方位靠近火山带的位置存在部分低速异常 (张风雪, 私人交流), 研究区低速异常仅现于 100 km 深度之上 (张风雪等, 2013, 2014).

与周围台站的波速比普遍都小于 1.75 形成鲜明对比, 位于研究区最西部的 XM30 台站的波速比达到了 1.84, 是所有台站结果的最大值. XM30 号台站架设于内蒙古乌尔旗汗镇煤田 59 煤场附近, 岩石实验结果表明煤的泊松比普遍高于 0.3, 甚至可接近 0.4 (Ai and Li, 2013), 通过泊松比与波速比的计算公式得到对应的波速比大于 1.87. 在含煤地层的影响下, 地壳波速较周围地壳高. 因此, XM30 台站的高波速比推测与台站下方的含煤地层有关.

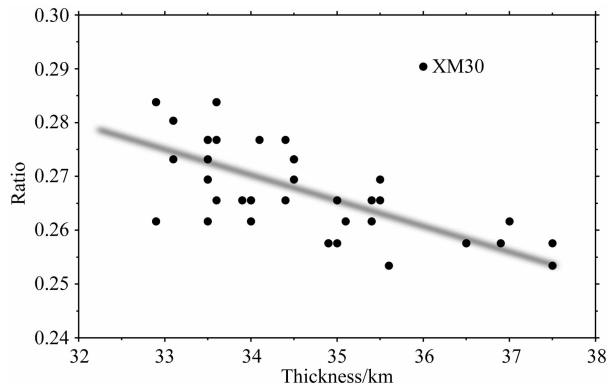


图 9 研究区地壳厚度与泊松比关系

Fig. 9 Correlation between crustal thickness and Poisson's ratio



### 2.3 地壳厚度与泊松比关系

泊松比和波速比存在正相关的对应关系,根据公式  $\sigma = 0.5[1 - 1/(\kappa^2 - 1)]$  可以计算各个台站测量得到的泊松比.图 9 表明,研究区内台站下方地壳内泊松比随着地壳厚度的减小而增加,即两者存在负相关的关系,地壳厚度与泊松比之间可能暗含着大陆构造演化过程的信息(嵇少丞等, 2009).地壳厚度和泊松比之间的负消长关系已经发现出现在中国拉萨块体、羌塘地体、松潘—甘孜地体及印支地块等地区,但以上地区出现地壳厚度与泊松比负相关关系是在地壳构造挤压缩短的背景下,拆沉作用造成地壳中基性岩石相对减少,从而使得地壳泊松比增加(Ji et al., 2009),这种解释不适用于东北地区的地质构造环境.

中国华北地区在伸展构造下,随着地壳整体厚度减少,伴随局部压力骤减而在上地幔部分熔融产生的玄武岩浆底侵到上方的深部地壳,从而增加了地壳内基性岩浆的体积分数,地壳波速比与地壳厚度将会呈现负相关关系(Ji et al., 2009; 嵇少丞等, 2009),东北地区与华北地区在构造环境上具有一定程度的相似性.综合 SKS 分裂结果及地震成像研究结果,诺敏河火山地区明显较薄的地壳与较高的波速比暗示该地区可能发生过地壳减薄作用与地幔热物质上涌,地震成像的证据并不支持地幔柱上涌机制的板内火山成因(张风雪等, 2014, 2013).从地球化学研究结果来看,诺敏河火山玄武岩具有与五大连池火山岩相似的地球化学特征(樊祺诚等, 2012; 赵勇伟等, 2013),两者在岩浆来源上具有一定的联系(李霓等, 2012; 樊祺诚等, 2008, 2012; 赵勇伟等, 2013; 马保起等, 2006),通过对五大连池火山及诺敏河火山的地球化学微量元素测定认为富钾岩石圈地幔的拆沉作用触发热物质上涌形成了东北的钾质火山带(Zhao et al., 2014a, b).中国东北地区在早白垩期间,由于俯冲板块的转向,岩石圈的构造环境由挤压转为拉张环境(Wang et al., 2006),地壳发生减薄.与此同时,诺敏河—二克山—五大连池—科洛火山带地区岩石圈地幔发生拆沉,触发大规模的玄武岩岩浆底侵作用(Meng, 2003; Wu et al., 2002; Zorin, 1999b),岩浆上涌在地壳内部形成岩浆囊系统(夏林圻, 1990; 邵济安和张文兰, 2008; 詹艳等, 2006).当镁铁质岩浆底侵至下地壳时,地壳中镁铁质随之增加,波速比升高,造成了地壳厚度与波速比的负相关关系.

研究区各个台站  $H-\kappa$  扫描叠加结果中并未出

现多重极值点的情况,地壳厚度误差平均值为 2.1 km,相对地壳厚度而言误差较小,未见大尺度壳幔过渡结构.可能发生的岩浆底侵作用对下地壳的改造能否形成大尺度壳幔过渡带还需要进一步的证据来验证.

### 3 结论

本文利用在兴蒙造山带诺敏河火山群地区的 P 波接收函数,通过  $H-\kappa$  扫描叠加方法,得到了该地区的地壳厚度与波速比分布,结果表明:

研究区地壳厚度为 32~38 km,地壳厚度在空间上与火山带分布具有较好的一致性;沿着火山带延展方向具有较薄的地壳厚度.同时,南北重力梯度线作为一条重要的地震学分界线,重力梯度带线附近地区地壳厚度具有明显差异性.研究区的波速比为 1.74~1.78,在空间上与地壳厚度变化具有一定的吻合性;高波速比主要集中于靠近钾质火山带地区,向诺敏河火山和小古里河火山延展.从地壳厚度与波速比特征上的空间分布上来看,诺敏河火山与东部的二克山—五大连池—科洛火山具有相似的地球物理学特征,自晚中生带以来,东北地区经历了大规模的岩石圈拉张,富钾岩石圈地幔拆沉触发热物质上涌,造成了岩石圈减薄,岩浆沿着北北西走向的火山带上涌至岩石圈并底侵入地壳,在诺敏河地区进一步喷发.研究区台站地壳厚度与波速比呈现负相关关系为以上推论提供了进一步的证据.

**致谢** 感谢参与台站仪器布设、维护、数据收集的全体人员.感谢两位审稿专家对本文的修改意见,使得文章更加严谨、流畅.本文图件由 GMT 绘制(Wessel et al., 2013).

### References

- Ai C, Li Y W. 2013. The model for calculating elastic modulus and Poisson's ratio of coal body. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, 2013, 6: 36-43.
- Christensen N I. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101 (B2): 3139-3156, doi: 10.1029/95JB03446.
- Fan Q C, Sui J L, Zhao Y W, et al. 2008. Preliminary study on garnet peridotite xenolith of Quaternary volcanic rocks in middle Daxing'an Mountain Range. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 24 (11): 2563-2568.
- Fan Q C, Zhao Y W, Sui J L, et al. 2012. Studies on Quaternary volcanism stages of Nuomin river area in the Great Xing'an Range: Evidence from petrology, K-Ar dating and volcanic

- geology features. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 28(4): 1092-1098.
- Farmer G L, Glazner A F, Manley C R. 2002. Did lithospheric delamination trigger late Cenozoic potassic volcanism in the southern Sierra Nevada, California?. *GSA Bulletin*, 114(6): 754-768, doi: 10.1130/0016-7606(2002)114<0754:DLDTLC>2.0.CO;2.
- Guo Z, Cao Y L, Wang X G, et al. 2014. Crust and upper mantle structures beneath Northeast China from receiver function studies. *Earthquake Science*, 27(3): 265-275, doi: 10.1007/s11589-014-0076-x.
- Guo Z, Chen Y J, Ning J Y, et al. 2015. High resolution 3-D crustal structure beneath NE China from joint inversion of ambient noise and receiver functions using NECESSArray data. *Earth and Planetary Science Letters*, 416: 1-11, doi: 10.1016/j.epsl.2015.01.044.
- Guo Z, Chen Y J, Ning J Y, et al. 2016. Seismic evidence of ongoing sublithosphere upper mantle convection for intra-plate volcanism in Northeast China. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 31-43, doi: 10.1016/j.epsl.2015.09.035.
- He J, Wu Q J, Gao M T, et al. 2014. Crustal structure and Poisson ratio beneath the central and southern Mongolia derived from receiver functions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(7): 2386-2394, doi: 10.6038/cjg20140732.
- Holbrook W S, Gajewski D K, Krammer A, et al. 1988. An interpretation of wide-angle compressional and shear wave data in southwest Germany; Poisson's ratio and petrological implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B10): 12081-12106.
- Hunt A C, Parkinson I J, Harris N B W, et al. 2012. Cenozoic volcanism on the Hangai dome, central Mongolia; geochemical evidence for changing melt sources and implications for mechanisms of melting. *Journal of Petrology*, 53(9): 1913-1942, doi: 10.1093/petrology/egs038.
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91(1-2): 181-193, doi: 10.1017/S0263593300007367.
- Ji S C, Salisbury M H. 1993. Shear-wave velocities, anisotropy and splitting in high-grade mylonites. *Tectonophysics*, 221(3-4): 453-473.
- Ji S C, Wang Q, Yang W C. 2009. Correlation between crustal thickness and poisson's ratio in the North China craton and its implication for lithospheric thinning. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 324-330.
- Ji S C, Wang Q, Salisbury M H. 2009. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson's ratio. *Tectonophysics*, 463: 15-30, doi: 10.1016/j.tecto.2008.09.007.
- Kang D, Shen W S, Ning J Y, et al. 2016. Seismic evidence for lithospheric modification associated with intracontinental volcanism in Northeastern China. *Geophysical Journal International*, 204(1): 215-235, doi: 10.1093/gji/ggv441.
- Kuritani T, Kimura J I, Ohtani E, et al. 2013. Transition zone origin of potassic basalts from Wudalianchi volcano, northeast China. *Lithos*, 156-159: 1-12, doi: 10.1016/j.lithos.2012.10.010.
- Langston C A. 1977. The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(4): 1029-1050.
- Lei J S, Zhao D P. 2005. P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast Asia. *Tectonophysics*, 397(3-4): 281-295, doi: 10.1016/j.tecto.2004.12.009.
- Lei J S, Zhao D P. 2006. Global P-wave tomography: On the effect of various mantle and core phases. *Phys. Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 154(1): 44-69, doi: 10.1016/j.pepi.2005.09.001.
- Lei J S, Zhao D P, Xu Y G, et al. 2018. Is there a gap in the stagnant Pacific slab in the mantle transition zone under the Changbaishan volcano? *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 34(1): 13-22.
- Lei J S, Xie F R, Fan Q C, et al. 2013. Seismic imaging of the deep structure under the Chinese volcanoes; An overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 224: 104-123, doi: 10.1016/j.pepi.2013.08.008.
- Li G L, Chen H C, Niu F L, et al. 2016a. Measurement of Rayleigh wave ellipticity and its application to the joint inversion of high-resolution S wave velocity structure beneath northeast China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(2): 864-880, doi: 10.1002/2015JB012459.
- Li N, Zhang L Y, Zhao Y W, et al. 2012. Genesis of potassic minerals in the Xiaogulihe-Keluo-Wudalianchi-Erkeshan volcanic rock belt, Northeast China and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 28(4): 1173-1180.
- Li S L, Guo Z, Chen Y J. 2017. Complicated 3D mantle flow beneath Northeast China from shear wave splitting and its implication for the Cenozoic intraplate volcanism. *Tectonophysics*, 709: 1-8, doi: 10.1016/j.tecto.2017.04.015.
- Li Y H, Wu Q J, Pan J T, et al. 2012. S-wave velocity structure of northeastern China from joint inversion of Rayleigh wave phase and group velocities. *Geophysical Journal International*, 190(1): 105-115, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05503.x.
- Li Z W, Ni S D, Zhang B L, et al. 2016b. Shallow magma chamber under the Wudalianchi Volcanic Field unveiled by seismic imaging with dense array. *Geophysical Research Letters*, 43(10): 4954-4961, doi: 10.1002/2016GL068895.
- Liu Q Y, Kind R, Li S C. 1996. Maximal likelihood estimation and nonlinear inversion of the complex receiver function spectrum ratio. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 39(4): 500-511.
- Liu Y N, Niu F L, Chen M, et al. 2017. 3-D crustal and uppermost mantle structure beneath NE China revealed by ambient noise adjoint tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 461: 20-29, doi: 10.1016/j.epsl.2016.12.029.
- Long M D, Benoit M H, Chapman M C, et al. 2010. Upper mantle anisotropy and transition zone thickness beneath southeastern

- North America and implications for mantle dynamics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(10): Q10012, doi: 10.1029/2010GC003247.
- Ma B Q, Lu H F, Wang X D, et al. 2006. Preliminary study on the volcanic eruption era of Nuomin River in Daxinganling. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 26(2): 295-296.
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract?. *Tectonophysics*, 369(3-4): 155-174, doi: 10.1016/S0040-1951(03)00195-1.
- Pan J T, Li Y H, Wu Q J, et al. 2014. 3-D S-wave velocity structure of crust and upper-mantle beneath the northeast China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(7): 2077-2087, doi: 10.6038/cjg20140705.
- Park J. 2000. Receiver functions from multiple-taper spectral correlation estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6): 1507-1520.
- Qiang Z Y, Wu Q J. 2019. Lithosphere deformation of Nuomin River volcano in northeast China; Evidence from shear wave splitting. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), doi:10.6038/cjg2019M0134. in Press.
- Qiang Z Y, Wu Q J, Li Y H, et al. 2017. Complicated seismic anisotropy beneath south-central Mongolia and its geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 126-133, doi: 10.1016/j.epsl.2017.02.035.
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299-307, doi: 10.1038/364299a0.
- Shao J A, Zhang W L. 2008. The evolving rift belt—Wudalianchi volcanic rock belt. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 15(6): 241-250.
- Tang Y C, Obayashi M, Niu F L, et al. 2014. Changbaishan volcanism in northeast China linked to subduction-induced mantle upwelling. *Nature Geoscience* 7(6): 470-475, doi: 10.1038/ngeo2166.
- Tao K, Niu F L, Ning J Y, et al. 2014. Crustal structure beneath NE China imaged by NECESSArray receiver function data. *Earth and Planetary Science Letters*, 398: 48-57, doi: 10.1016/j.epsl.2014.04.043.
- Tarkov A P, Vavakin V V. 1982. Poisson's ratio behaviour in various crystalline rocks: application to the study of the Earth's interior. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 29(1): 24-29.
- Wang F, Zhou X H, Zhang L C, et al. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1-2): 179-198, doi: 10.1016/j.epsl.2006.09.007.
- Wessel P, Smith W H F, Scharroo R, et al. 2013. Generic mapping tools: improved version released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(45): 409-410.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. 2002. A-type granites in northeastern China; age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1-2): 143-173, doi: 10.1016/S0009-2541(02)00018-9.
- Wu Q J, Li Y H, Zhang R Q, et al. 2007. Wavelet modelling of broad-band receiver functions. *Geophysical Journal International*, 170(2): 534-544.
- Xia L Q. 1990. On the evolution of volcanic magma from Wudalianchi, China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 6(1): 13-29.
- Zandt G, Ammon C J. 1995. Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio. *Nature*, 374(6518): 152-154, doi: 10.1038/374152a0.
- Zhan Y, Zhao G Z, Wang J J, et al. 2006. Crustal electric conductivity structure for Wudalianchi volcanic cluster in the Heilongjiang province, China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 22(6): 1494-1502.
- Zhang F X, Wu Q J, Li Y H. 2013. The traveltimes tomography study by teleseismic P wave data in the Northeast China area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(8): 2690-2700, doi: 10.6038/cjg20130818.
- Zhang F X, Wu Q J, Li Y H. 2014. A traveltimes tomography study by teleseismic S wave data in the Northeast China area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(1): 88-101, doi: 10.6038/cjg20140109.
- Zhang F X, Wu Q J, Grand S P, et al. 2017. Seismic velocity variations beneath central Mongolia; Evidence for upper mantle plumes?. *Earth and Planetary Science Letters*, 459: 406-416, doi: 10.1016/j.epsl.2016.11.053.
- Zhang G C, Wu Q J, Pan J T, et al. 2013. Study of crustal structure and Poisson ratio of NE China by H-K stack and CCP stack methods. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(12): 4084-4094, doi: 10.6038/cjg20131213.
- Zhang M, Suddaby P, Thompson R N, et al. 1995. Potassic volcanic rocks in NE China; geochemical constraints on mantle source and magma Genesis. *Journal of Petrology*, 36(5): 1275-1303, doi: 10.1093/ptrology/36.5.1275.
- Zhang R Q, Wu Q J, Li Y H, et al. 2012. Lateral variations in SH velocity structure of the transition zone beneath Korea and adjacent regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B9): B09315, doi: 10.1029/2011JB008900.
- Zhang R Q, Wu Q J, Sun L, et al. 2014. Crustal and lithospheric structure of Northeast China from S-wave receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 401: 196-205, doi: 10.1016/j.epsl.2014.06.017.
- Zhang R Q, Gao Z Y, Wu Q J, et al. 2016. Seismic images of the mantle transition zone beneath Northeast China and the Sino-Korean craton from P-wave receiver functions. *Tectonophysics*, 675: 159-167, doi: 10.1016/j.tecto.2016.03.002.
- Zhao D P. 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs; insight into deep Earth dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(1-2): 3-34, doi: 10.1016/j.pepi.2003.07.032.
- Zhao D P, Maruyama S, Omori S. 2007. Mantle dynamics of

- Western Pacific and East Asia; Insight from seismic tomography and mineral physics. *Gondwana Research*, 11(1-2): 120-131, doi: 10.1016/j.gr.2006.06.006.
- Zhao D P, Tian Y, Lei J S, et al. 2009. Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia; Role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(3-4): 197-206, doi: 10.1016/j.pepi.2008.11.009.
- Zhao Y W, Fan Q C, Bai Z D, et al. 2008. Preliminary study on quaternary volcanoes in the Halaha River and Chaoer River area in Daxing'an mountain range. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 24(11): 2569-2575.
- Zhao Y W, Fan Q C. 2011. Characteristics of lithospheric mantle beneath the Great Xing'an Range; Evidence from spinel peridotite xenoliths in the Halaha river and Chaoer river area. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 27(10): 2833-2841.
- Zhao Y W, Fan Q C, Bai Z D, et al. 2013. Quaternary volcanism in the Nuomin River and Kuile River area of the Greater Hinggan Mountains. *Science China Earth Sciences*, 56(2): 173-181.
- Zhao Y W, Fan Q C, Zou H B, et al. 2014a. Geochemistry of Quaternary basaltic lavas from the Nuomin volcanic field, Inner Mongolia; Implications for the origin of potassic volcanic rocks in Northeastern China. *Lithos*, 196-197: 169-180, doi: 10.1016/j.lithos.2014.03.011.
- Zhao Y W, Li N, Fan Q C, et al. 2014b. Two episodes of volcanism in the Wudalianchi volcanic belt, NE China; Evidence for tectonic controls on volcanic activities. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285: 170-179, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.08.016.
- Zhu L P, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B2): 2969-2980.
- Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306(1): 33-56, doi: 10.1016/S0040-1951(99)00042-6.
- Zou H B, Reid M R, Liu Y S, et al. 2003. Constraints on the origin of historic potassic basalts from northeast China by U-Th disequilibrium data. *Chemical Geology*, 200(1-2): 189-201, doi: 10.1016/S0009-2541(03)00188-8.
- 樊祺诚, 隋建立, 赵勇伟等. 2012. 大兴安岭诺敏河第四纪火山岩分期: 岩石学、年代学与火山地质特征. *岩石学报*, 28(4): 1092-1098.
- 何静, 吴庆举, 高孟潭等. 2014. 利用接收函数方法研究蒙古中南部地区地壳结构. *地球物理学报*, 57(7): 2386-2394, doi: 10.6038/cjg20140732.
- 嵇少丞, 王茜, 杨文采. 2009. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义. *地质学报*, 83(3): 324-330.
- 雷建设, 赵大鹏, 徐义刚等. 2018. 长白山火山下方地幔转换带中滞留的俯冲太平洋板块存在空缺吗?. *岩石学报*, 34(1): 13-22.
- 李霓, 张柳毅, 赵勇伟等. 2012. 我国东北小古里河—科洛—五大连池—二克山火山带钾质矿物成因及地质意义. *岩石学报*, 28(4): 1173-1180.
- 刘启元, Kind R, 李顺成. 1996. 接收函数复谱比的最大或然性估计及非线性反演. *地球物理学报*, 39(4): 500-511.
- 马保起, 卢海峰, 旺小东等. 2006. 大兴安岭诺敏河火山喷发时代的初步研究. *第四纪研究*, 26(2): 295-296.
- 潘佳铁, 李永华, 吴庆举等. 2014. 中国东北地区地壳上地幔三维 S 波速度结构. *地球物理学报*, 57(7): 2077-2087, doi: 10.6038/cjg20140705.
- 强正阳, 吴庆举. 2019. 中国东北诺敏河火山岩石圈变形: 来自剪切带分裂的证据. *地球物理学报*, doi:10.6038/cjg2019M0134. 待发表.
- 邵济安, 张文兰. 2008. 演化中的裂谷带——五大连池火山岩带. *地学前缘*, 15(6): 241-250.
- 夏林圻. 1990. 论五大连池火山岩浆演化. *岩石学报*, 6(1): 13-29.
- 詹彪, 赵国泽, 王继军等. 2006. 黑龙江五大连池火山群地壳电性结构. *岩石学报*, 22(6): 1494-1502.
- 张风雪, 吴庆举, 李永华. 2013. 中国东北地区远震 P 波走时层析成像研究. *地球物理学报*, 56(8): 2690-2700, doi: 10.6038/cjg20130818.
- 张风雪, 吴庆举, 李永华. 2014. 中国东北地区远震 S 波走时层析成像研究. *地球物理学报*, 57(1): 88-101, doi: 10.6038/cjg20140109.
- 张广成, 吴庆举, 潘佳铁等. 2013. 利用 H-K 叠加方法和 CCP 叠加方法研究中国东北地区地壳结构与泊松比. *地球物理学报*, 56(12): 4084-4094, doi: 10.6038/cjg20131213.
- 赵勇伟, 樊祺诚, 白志达等. 2008. 大兴安岭哈拉哈河—淖尔河地区第四纪火山活动初步研究. *岩石学报*, 24(11): 2569-2575.
- 赵勇伟, 樊祺诚. 2011. 大兴安岭岩石圈地幔特征——哈拉哈河—淖尔河橄榄岩捕虏体的证据. *岩石学报*, 27(10): 2833-2841.
- 赵勇伟, 樊祺诚, 白志达等. 2013. 大兴安岭诺敏河—奎勒河地区第四纪火山活动研究. *中国科学: 地球科学*, 43(9): 1464-1473.

(本文编辑 汪海英)

## 附中中文参考文献

- 樊祺诚, 隋建立, 赵勇伟等. 2008. 大兴安岭中部第四纪火山岩中石榴石橄榄岩捕虏体的初步研究. *岩石学报*, 24(11): 2563-2568.