中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 5 期: 778 ~ 795
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

进 展

长白山火山区深部结构探测的研究进展与展望

陈棋福[1,2,3*], 艾印双[1,2,3], 陈赟[2,4]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球和行星物理重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029
* E-mail: chenqf@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2018-01-30; 收修改稿日期: 2018-10-16; 接受日期: 2018-11-07; 网络版发表日期: 2019-03-21
国家自然科学基金项目(批准号: 41474041和41774058)和中国科学院战略性先导科技专项B类项目(编号: XDB18000000)资助

摘要 文章较系统地梳理了针对长白山火山区开展的地球物理观测和探测研究情况, 概述了地壳和上地幔结构探测研究的主要进展, 即长白山火山下方地壳和上地幔中存在与火山岩浆系统相关的低速低阻体, 长白山火山在成因机制上与西太平洋板块俯冲活动密切相关. 在此基础上, 指出了深入探测研究方面待解决的科学问题, 包括中国和朝鲜半岛开展联合探测研究, 火山岩浆囊三维分布和流变性的多学科精细探测研究, 以及长白山火山潜在喷发危险的科学评估和动态监测系统建设等.

关键词 长白山火山, 深部结构, 地球物理探测

1 引言

长白山(朝鲜称白头山)火山区坐落于中朝边境(图1), 包括以长白山天池、望天鹅和胞胎山火山3个主要喷发中心的长白山火山群、龙岗火山群以及图们江火山岩区等(樊祺诚等, 2007; 刘嘉麒等, 2015). 其中的长白山火山是一座规模巨大的板内层状复式火山(刘嘉麒等, 2015), 曾发生过多次大规模喷发, 约在公元946年的"千年大喷发"被认为是有记载的全球最大规模的火山喷发之一(Wei等, 2013; 刘嘉麒等, 2015; Iacovino等, 2016; Oppenheimer等, 2017), 其喷出的火山灰甚至在格陵兰地区的冰芯中都有记录(Sun等, 2014). 在"千年大喷发"之后, 长白山火山至少在1668、1702、1903年有发生过火山喷发活动的记录(Chu等, 2011; Xu等, 2012; Wei等, 2013; 魏海泉, 2014), 被认为是中国最具潜在灾害性喷发危险的活火山(刘若新等, 1992, 1999; 洪汉净等, 2007; 魏海泉, 2014; 刘嘉麒等, 2015). 2002~2005年间长白山天池火山区的地震活动明显增加(吴建平等, 2005, 2007; Xu等, 2012), 并出现了一些特殊的火山构造地震事件(明跃红等, 2006, 2007), GPS和水准测量及温泉的火山气体组份观测等(胡亚轩等, 2004; 高玲等, 2006; 洪汉净等, 2007; Liu等, 2011; Xu等, 2012)都显示长白山火山在2002~2005年出现强烈扰动, 似乎证实和加剧了其再次喷发的潜在可能性(洪汉净等, 2007; 杨清福和薄景山, 2007; Stone, 2010, 2011; Xu等, 2012; 魏海泉, 2014; 刘嘉麒等, 2015). 如图

中文引用格式: 陈棋福, 艾印双, 陈赟. 2019. 长白山火山区深部结构探测的研究进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 778–795, doi: 10.1360/N072018-00040
英文引用格式: Chen Q-F, Ai Y, Chen Y. 2019. Overview of deep structures under the Changbaishan volcanic area in Northeast China. Science China Earth Sciences, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9300-1

© 2019 《中国科学》杂志社

1所示, 长白山火山区在构造上位于东北裂谷系最外侧的敦化-密山断裂以东地区, 受东北亚构造体系制约, 与西太平洋板块俯冲(参见图1所示的俯冲板片等深线和深源地震活动)密切相关(刘嘉麒等, 2015). Lei等(2013)在对包括长白山火山区在内的中国主要火山区深部地幔结构的总结中, 认为长白山火山的形成主要与太平洋板块深俯冲至中国东北下方, 并在地幔转换带内滞留、脱水及其导致的热物质上涌等动力学过程相关. 故约120km外发生的朝鲜核爆事件(Hong等, 2016)和西太平洋板块俯冲带上方发生2011年日本东北近海9.0级大地震(Lei等, 2013; Liu G M等, 2017), 对长白山火山的影响也受到关注. 潜在的喷发危险及西太平洋构造活动增强对长白山火山的可能影响, 也促使长白山火山监测预警系统建设项目的提出(杨清福等, 2013a, 2013b).

对于远离板块边界的长白山火山活动, 经典板块构造理论无法解释其成因机制, 对长白山火山地下结构及其深部动力学研究, 可以加深我们对分布于东亚地区, 乃至全球大陆板块内部的火山和岩浆活动机制的认识. 长白山火山区受到国内外的广泛关注(Zhao和Liu, 2010; Stone, 2010, 2011; Lei等, 2013; Hong等, 2016; 朴成哲等, 2016; 马学英等, 2016), 本文较系统地梳理了针对其开展的地球物理观测, 在此基础上概述了其深部结构的地球物理探测研究进展, 并指出了值得深入研究的若干问题.

2　长白山火山区的地球物理探测

长白山火山的地球物理观测早在1985年就开始围绕天池火山进行, 1985~1991年由安图地震观测站于每年6~9月进行季节性的单台地震、水温和水氡观测, 1992~1996年由吉林省地震局布设3~5个流动地震台进行1~2个月的观测, 1999年6月长白山天池火山观测站正式投入观测(杨清福和薄景山, 2007). 正式投入观测的长白山天池火山监测系统由地震、形变、水化学和电磁观测等组成, 包括11个固定地震台、15个GPS流动观测点、2条流动短水准测量线和在4个温泉点测量CO_2、CH_4、He、H_2、O_2、N_2等气体组分和泉水温度, 以及在中心台开展地震、电磁与石英伸缩仪、数字水管倾斜仪和垂直摆倾斜仪形变监测(杨清福等, 2013a; 刘国明等, 2011), 其主要观测点位分布见图2.

除了图2所示的长白山天池火山连续观测系统外, 中国地震局系统在1995~1999年对长白山天池火山岩浆系统地开展了地球物理探测研究. 汤吉等(1997, 2001)于1995年7~8月和1997年7~8月围绕长白山天池火山口开展大地电磁测深探测, 分别完成了15个测点和46个测点的野外观测工作(参见图3的蓝色五边形点, 右下角为清晰展示图). 张先康等(2002)于1998年7~9月围绕天池火山地区开展了三维深地震测深研究(参见图3), 观测系统包括2条长约300km的纵测线(L1和L2)、2条辅助纵测线(L3和L4)和一个包围天池火山口大约50km×80km的三维地震台阵, 200台三分量数字或模拟地震仪(图3红圆点)沿着这4条测线和台阵内布设, 接收位于测线和台阵周围9个炮点(图3红五角星)上进行的9次吨级井下爆破所激发的地震波. 1998~1999年中国地震局地球物理勘探中心和美国纽约州立大学宾汉顿分校合作(Hetland等, 2004), 在长白山火山区布设了19个宽频带地震台(参见图1标示PASSCAL-XI的台, 含图外的丹东、辽阳和铁岭的3个台)进行地震观测. 在2002~2005年天池火山区地震活动明显增加期间, 吴建平等(2003, 2005, 2007)分别在2002、2003和2005年夏季加密布设的流动地震台点见图2中蓝色三角所示(Wu等, 2009). 而针对外媒称长白山天池火山近期有可能喷发的言论(仇根根等, 2014), 国土资源部于2012年6~10月跨过天池火山口布测了一条大地电磁测深测量剖面(参见图3右下角清晰展示的红十字), 对火山口下方深部电性结构重新进行了探测研究(仇根根等, 2014); 2012年8月至2014年9月还布设31套短周期地震仪(参见图3绿菱形)进行火山地震活动的密集观测, 却没有检测到天池火山区地震活动水平有明显变化.

在涵盖长白山火山区的较大区域内(图1), 基于不同尺度研究需要先后布设了280多套的宽频带流动地震台. 为约束太平洋俯冲板片的几何形态及研究东北地区地壳伸展和火山作用的起因, 中美日三方合作在东北地区布设了由127个流动地震台组成的NECESSArray(the NorthEast China Extended SeiSmic Array, 图1中黑菱形), 台间距约70~80km, 观测时间为2009年9月至2011年8月(Tang等, 2014; Tao等, 2014). 2010年8月、2011年10月和2012年7月先后完成布设的探测深俯冲的中国东北地震台阵(NECsaids台阵, NorthEast China seismic array to investigate deep subduction, 图1

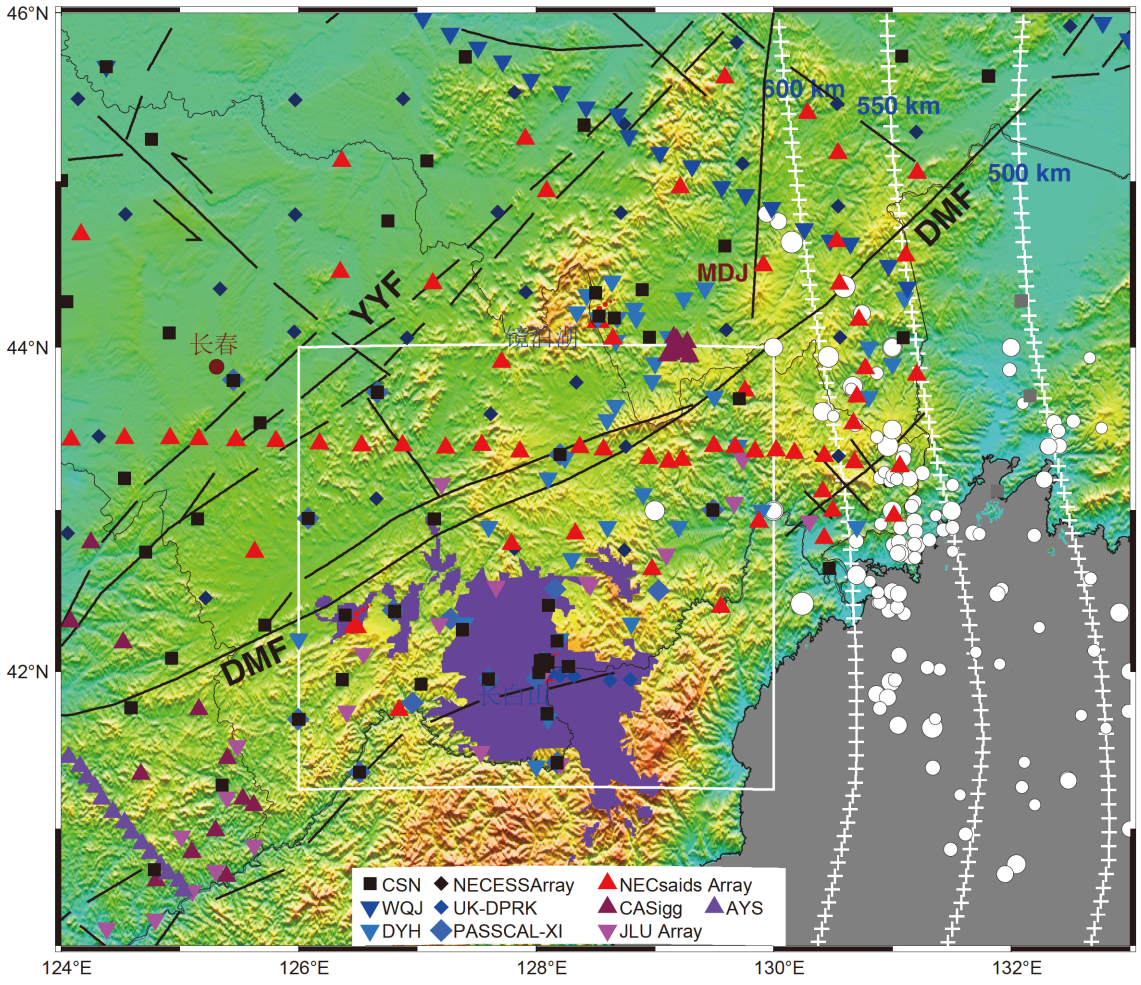

图 1　长白山火山区附近构造简图及地震台站分布示意图

黑方块为固定地震台, 正反三角和菱形为流动地震台(具体图例含义见正文说明). 紫色展布区为长白山火山玄武岩分布范围示意, 带拖尾的红三角为龙岗火山和镜泊湖火山活动示意点. 白圆点为ISC目录(www.isc.ac.uk)给出的震源深度≥300km和震级≥4.0的深震震中, 白十字线为太平洋俯冲深度的示意线, 黑线为断裂, YYF和DMF分别表示依兰-伊通断裂和敦化-密山断裂

中红三角)共60个台, 由与西太平洋深俯冲相垂直和平行的2条测线和空间散布的流动台组成, 2条测线的台间距约20~35km, 散布台与固定地震台的台间距约70km, NECsaids台阵的台共同观测至2014年10月后留下22个台持续观测, 其中的20个台观测到2017年9月初截止(Wang等, 2016). 图1中棕红色三角为中国科学院地质与地球物理研究所布设的流动地震台(Ai等, 2008; Xu和Zhao, 2009), 图1中紫色三角为艾印双研究组在2016年10月新布设的流动地震观测剖面的部分台, 图1中右上角的蓝色倒三角为吴庆举研究组布设的2条流动地震观测剖面的部分台(张风雪等, 2013, 2014), 图1中淡蓝色倒三角为段永红研究组布设的流动台(段永红等, 2005; Duan等, 2009), 图1中粉红色倒三角为吉林大学布设的流动台(Tian等, 2016).

长白山火山坐落于中朝边界(参见图1的火山玄武岩分布), 其中的胞胎山火山主要喷发中心更位于朝鲜境内, 但上述有关长白山火山深部结构的地球物理探测都在中国境内开展, 在朝鲜境内唯一的地震探测研究来自英国、美国和朝鲜的联合地震观测研究(Kyong-Song等, 2016), 即在2013年8月朝鲜境内的火山区布设了6个宽频流动地震台(参见图3的白色菱形和图1标UK-DPRK的蓝色菱形).

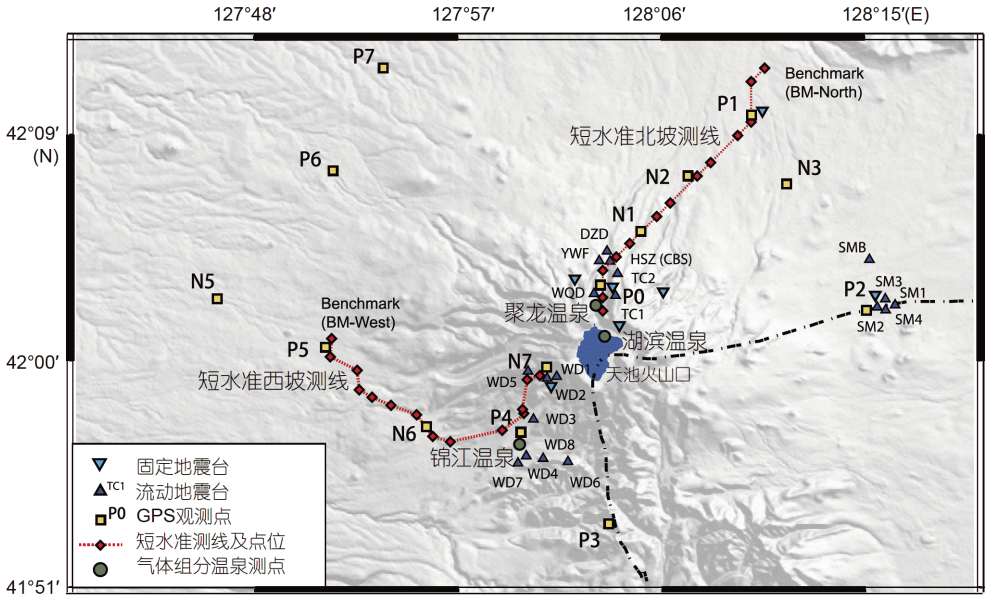

图 2　长白山天池火山监测系统分布示意图

据Xu等(2012)修改

3　地壳和岩石圈地幔结构

3.1　电性结构

地下电阻率对介质的温度、含水和熔融状态较为敏感，大地电磁测深是探测火山区深部岩浆囊的有效方法之一. 汤吉等(2001)利用图3所示伞状分布的61个测点资料，对长白山天池火山区的大地电磁测深研究，结果(参见图4a)表明整个区域电性水平不均匀性较严重, 由浅到深存在多个低阻体和电性的高梯度带, 分别对应于不同深度的异常结构和断裂; 浅部(5km以上)的几处低阻体可能与天池水体、温泉和地下热水聚集有关，而在长白山天池及其以北和以东地区，约从12km向下延伸至最深达45km深处的低阻体可能对应地下岩浆囊，推测岩浆囊可能向深部继续延伸(汤吉等, 1997). 仇根根等(2014)利用长约100km的北偏东向大地电磁测深观测剖面(图3十字测线)，获得的结果在电性不均匀性、由浅到深存在多个低阻体等主要特征方面与汤吉等(2001)的结果相似，但局部(主要是天池往北7~20km处下方低阻体和高阻体的形态)有所不同(参见图4b). 仇根根等(2014)探测结果表明在天池火山口下方存在明显的直立型岩浆通道，岩浆通道在下方约5~8km位置形成关闭; 在火山口下方往北方向附近, 在埋深位置约7km 深处存在一个明显的与岩浆通道对接的低阻体, 推测其可能是地表浅部发育的岩浆囊; 在长白山山门附近C07~C09号测点和C04~C05号测点之间, 在埋深约7~17km处发现近直立型低阻带，该低阻带与深部低阻体相连，推测其可能是由深部岩浆沿着薄弱的断裂构造带向上运移所形成；从天池火山口南约20km处往北方向，在埋深13~30km壳内广泛发育明显的低阻异常体, 推测其可能是活动的岩浆囊.

3.2　P波速度结构

张先康等(2002)利用图3所示的人工地震测深系统，发现长白山天池火山口下方9km深度至下地壳存在一倒三角状低速体，勾画出长白山天池火山区“活动”的岩浆系统分布状态：9~15km为岩浆分布的主要位置，近南北走向分布，南北延伸80~90km，东西向宽度为30~40km左右；15km至下地壳岩浆分布横向尺度较小, 显示出岩浆自上地幔侵入地壳的“痕迹”; 在深度小于8~9km的地壳浅部, 岩浆的分布范围更小一些, 似乎集中在天池火山口稍偏北的南北方向上，可能反映了岩浆喷发过程中的传输通道. 王夫运等(2002)应用一种可同时获得地壳上地幔二维速度结构和界面形态的地震走时反演算法，对图3所示的L1剖面反演得到与张先康等(2002)基本类似的天池火山岩浆系统，显示出壳内反射界面和莫霍面一致呈下凹形态，幅度

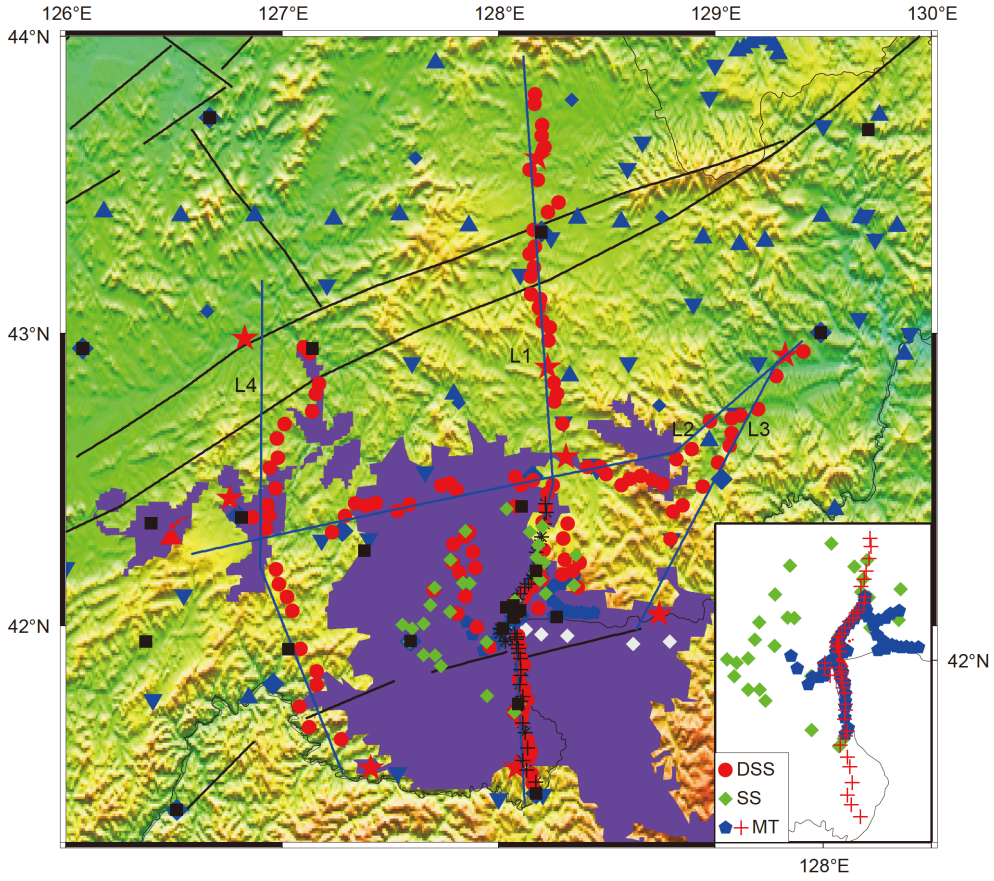

图 3　长白山火山人工地震、大地电磁测深测点及短周期地震仪分布示意图

红圆点, 人工地震观测点位置; 蓝色五边形和"+", 大地电磁测深测点; 绿菱形, 短周期地震仪分布位置. 据张先康等(2002)、汤吉等(2001)、仇根根等(2014)汇编. 图中的固定地震台和宽频流动地震台例见图1, 红五角星为人工地震测深的爆破点, 标L1~L4的蓝线为4条观测测线

2~6km不等(参见图5a). 杨卓欣等(2005)利用该深地震测深系统所采集的反射P波走时资料, 通过三维层析成像反演确认了张先康等(2002)的结果, 即天池火山口下方壳内岩浆现今仍以"活动"的状况存在, 下地壳或更深的地方存在岩浆囊; 但认为壳内岩浆系统可能是呈北北东方向展布的, 推测下地壳或更深的岩浆囊可能位于天池火山口以西, 而不在天池火山口的正下方. Song等(2007)运用与王夫运等(2002)相同方法对图3所示的2条主剖面(L1和L2), 进行P波速度结构精细反演得到与杨卓欣等(2005)较为相近的结果, 认为与长白山火山相关的低速体位于天池火山口北30~60km, 南北展布约30~75km, 东西最多宽35km, 位于地下10~25km处(参见图5b).

除了以上所述人工地震探测获得的地壳P波速度结构, 长白山火山区的壳幔P波速度结构多来自于全球尺度或大区域远震层析成像的反演结果(如Zhao, 2004; Lei和Zhao, 2005; Huang和Zhao, 2006; Wei等, 2012, 2015; Chen C等, 2017), 近震层析成像的结果较为少见. 冯晅等(2013)基于图1所示吉林大学布设的16个宽频流动台拾取的2008~2010年173个近震P波到时, 以及吉林省台网12个固定台拾取的1990~2008年566个近震P波到时数据, 反演了水平方向0.5°×0.5°网格划分的长白山及邻区深至40km的地壳和上地幔顶部三维P波速度结构, 结果证实了长白山火山区岩浆囊的存在, 推测岩浆囊的位置位于火山口的西南方向, 岩浆囊在10~20km深度呈近北东走向, 在20~40km呈南北走向. 以及Zhao等(2009)和田有等(2011)收集了中国华北和东北周围地区645个地震台, 1980~2005年记录的4802个近震或区域地震到时49799条与1980~2002年记录的9599个远震到时239519条, 以及从牡丹江、北

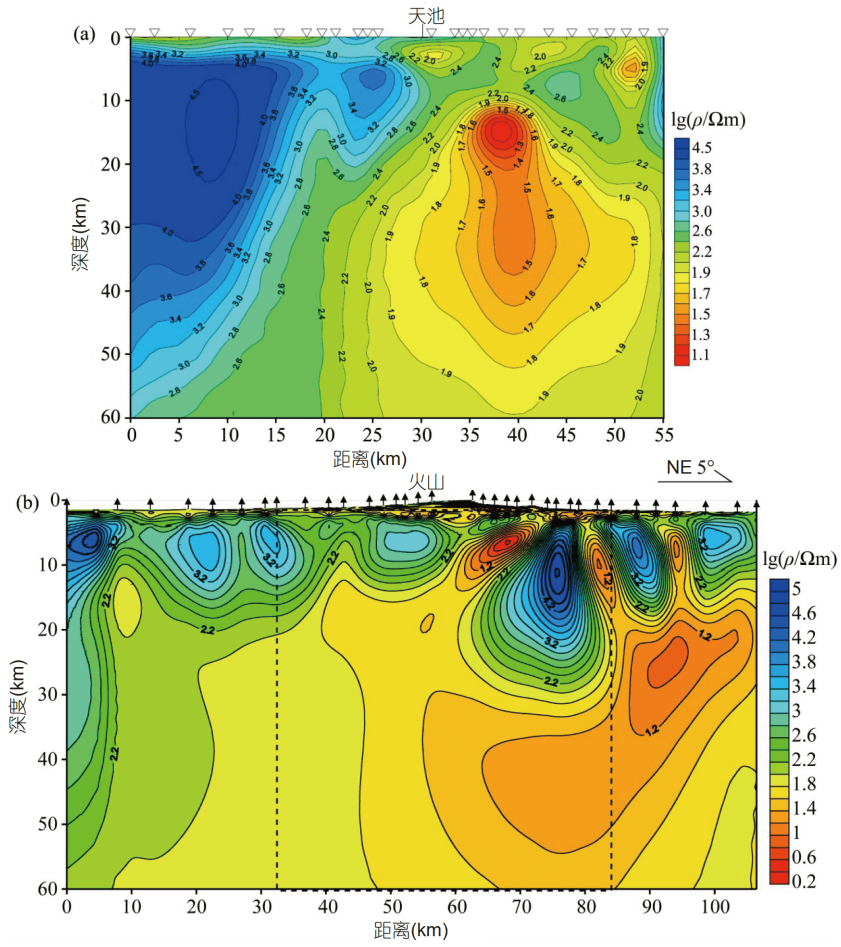

图 4　大地电磁测深反演结果大致对比图

(a) 汤吉等(2001)结果; (b) 仇根根等(2014)结果. 据仇根根等(2014)

京和海拉尔3个CDSN台站和图1所示长白山火山区19个PASSCAL-XI临时地震台波形记录图上读取的548个高质量地震P波到时资料(赵大鹏等, 2004; Lei和Zhao, 2005), 反演得到水平方向0.8°×0.8°和深度方向上以20~80km为节点间距的P波速度模型, 表明长白山火山区的地壳上地幔中存在显著的低速异常. 该低速异常深达410km左右, 且在地幔转换带中存在高速异常, 说明长白山火山的形成与滞留的太平洋俯冲板片上方大地幔楔内的湿热软流圈物质上涌有关.

3.3　S波速度结构

刘志等(2005)对图3所示的L1测线资料运用与王夫运等(2002)同样的方法反演了P波和S波速度结构, 得到的S波速度分布与P波速度在局部有所差异, 但总体趋势相一致的结果, 特别是在天池火山下同样存在一明显呈倒三角状的低S波速度分布. 对图1所示的PASSCAL-XI台, Hetland等(2004)和段永红等(2005)通过接收函数反演得到的台站下方S波速度结构, 表明在少量几个长白山火山区附近台站下方地壳内部存在明显的S波低速层, 与张先康等(2002)的P波速度结构大体一致.

Wu等(2009)和吴建平等(2009b))以2002~2005年夏季所布流动台(参见图2所示)和长白山固定地震台CBS的远震记录, 通过接收函数反演获得的S波速度结构, 展现出天池火山区地壳内部存在明显的S波低速层, 在离天池火山口较近的WQD台附近, 低速层顶部埋深约8km, 厚度近20km; 而在距离天池火山北部50km的EDO台地壳中没有明显的低速层; 火山区S波

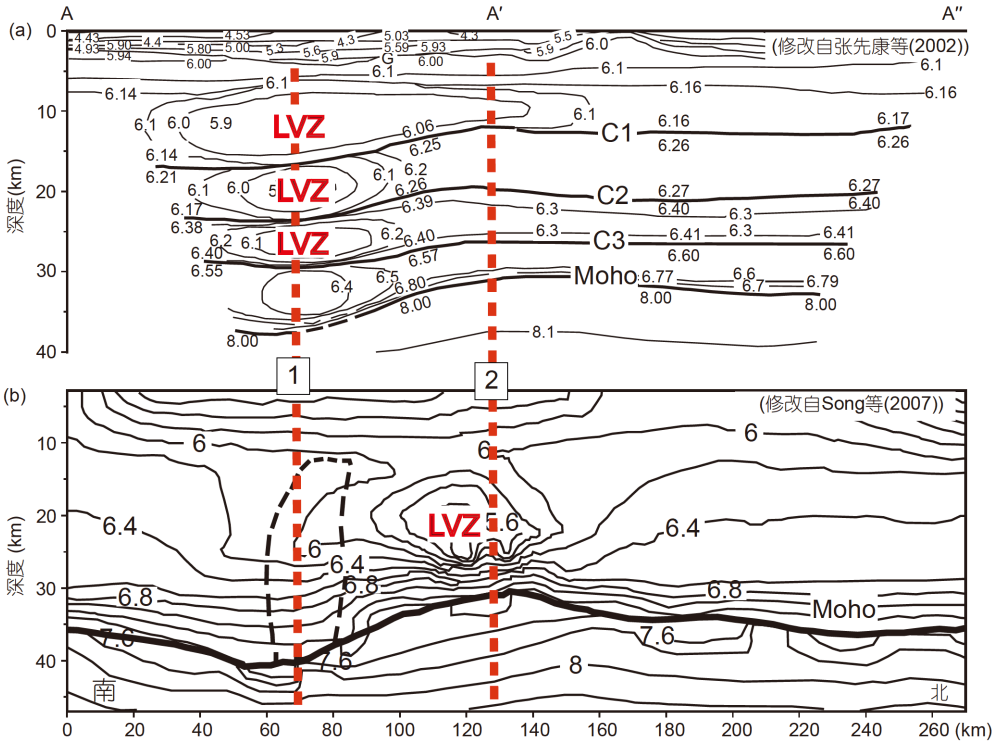

图 5　人工地震探测获得的L1测线P波速度结构对比

(a) 张先康等(2002)结果; (b) Song等(2007)结果. 据Choi等(2013)修改

速度结构总体表现出距离天池越近, 地壳的V_P/V_S越大, 低速层的厚度和幅度增加的特征, 表明天池火山口附近地壳内部存在高温物质或岩浆囊. CBS台站不同方位的接收函数及反演结果表明近地表低速层厚度以及莫霍面深度随方位存在变化, 近地表低速层在南部方向明显较厚, 莫霍面深度在南部天池火山口方向存在小幅度抬升, 推测天池火山口下方可能存在上地幔与地壳内部岩浆囊之间物质交换的通道.

Li等(2012)基于中国东北地区6个区域固定地震台网记录的地震面波数据, 利用连续小波变换法提取Rayleigh波15~60s的群速度及相速度, 进一步反演得到其可分辨尺度的S波速度结构, 并没有在长白山火山区地壳中观测到低速异常, 但在上地幔存在明显的低速异常. 潘佳铁等(2014a)联合利用噪声成像方法得到8~30s周期的瑞雷波群速度和相速度频散资料与天然地震36~145s周期瑞雷波群速度频散资料, 反演得到的200km深度内的三维壳幔S波速度结构, 也显示长白山火山下方仅上地幔顶部有较明显的低速异常. Kim等(2017)使用图1所示的PASSCAL-XI 19个台和NECESSArray的26个台及MDJ固定台的垂直分量连续波形记录进行背景噪声相关分析, 采用变维贝叶斯反演(transdimensional Bayesian inversion)得到深至100km、网格为0.25°×0.25°的S波速度结构, 展现出长白山火山下方地壳较厚(~40km)和中下地壳(20~40km)的S波相对高速图像. 但Guo等(2015)使用2009年9月至2011年8月布设的NECESSArray流动台阵127个台和7个固定台的地震背景噪声记录通过互相关获得的面波相速度, 以及NECESSArray119个台提取的远震接收函数, 采用噪声面波相速度和接收函数联合反演获得的水平方向0.5°×0.5°网格划分的地壳和上地幔顶部S波速度结构, 展示出长白山地区上地壳表现为高速分布, 下地壳至上地幔顶部存在低速异常. Guo等(2016)进一步使用NECESSArray流动台阵127个台和120个固定台记录, 通过背景噪声成像方法得到的6~40s相速度图, 以及双平面波法提取的远震面波20~140s相速度图, 利用蒙特卡罗非线性技术反演得到地表至上地幔200km的剪切波速度结构, 则在长白山地区中上地壳整体呈现出高速异常, 仅长白山火山区在中地壳存在

较弱的低速, 长白山地区下地壳的大部也为高速异常, 而上地幔内最明显的速度异常是长白山地区沿着郯庐断裂带北北东向大范围连续的低速异常带, 该低速异常一直延伸到200km. Kang等(2016)主要依据NECESSArray台阵多种互补的三种地震数据(包括背景噪声和地震面波频散结果、接收函数、瑞利波振幅比), 通过贝叶斯蒙特卡罗联合反演得到的地壳和上地幔S波速度结构, 则显示出上地幔最明显的低速异常位于长白山火山地区, 该低速异常沿着依兰伊通断裂和敦化密山断裂向东北方向延伸. 而Fu等(2016)使用NECESSArray台阵和固定地震台共269个台的远震切向分量记录, 采用双平面波法获得了Love波20~125s相速度图, 并反演得到地表至上地幔115km的SH波速度结构, 则呈现出长白山地区下地壳至上地幔内的显著低速异常. 王武和陈棋福(2017)利用图1所示的NECsaids台阵60个流动台和67个固定地震台的多年连续观测数据, 应用地震背景噪声成像反演方法得到的分辨尺度在35km或更小的深达50km的S波速度结构, 表明长白山火山下方的9~30km深度范围内存在着明显低速异常区并有向下延伸趋势, 结果与三维人工地震测深得到的低速体范围(张先康等, 2002)大体一致, 极可能是长白山火山的地壳岩浆囊; 在龙岗火山下方12~30km深度范围内存在较弱的低速区, 可能代表火山喷发后的残留物.

3.4　面波速度

潘佳铁等(2014b)利用159个固定台和27个流动台的背景噪声波形连续记录, 得到了2204条路径上的瑞雷波群/相速度频散曲线, 反演得到分辨达2°×2°周期8~30s的瑞雷波群速度和相速度高低速分布特征很相似, 在主要反映研究区浅表速度变化的8s周期图上长白山呈现出较明显的高速, 而长白山区在中长周期未显示较明显的异常. 但付媛媛和高原(2016)利用东北地区122个宽频固定地震台近18个月记录得到的背景噪声频散曲线, 获得的Rayleigh和Love波周期为8~35s相速度分布, 则表明长白山火山区在上地壳出现强度较弱的低速异常, 中地壳的低速异常却逐渐增强, 下地壳至上地幔顶部存在低速异常. 而Liu等(2016)利用2009年9月至2011年8月布设的NECESSArray流动台阵和固定台得到的背景噪声频散曲线, 反演得到的5~50s瑞利波各向同性相速度及方位各向异性图像, 也展现出长白山火山周围相速度的相对低速异常. 田原等(2017)利用中国东北地区较均匀分布的48个固定台2007~2011年记录的M_W≥5.5远震波形数据, 结合双台法获取的面波频散曲线及NECESSArray流动台阵得到的背景噪声相速度频散曲线, 反演得到的8~160s瑞利波各向同性相速度及16~160s方位角各向异性图像, 则表明长白山火山有明显的从8~160s的连续的低速(尽管低速位置在100s以后有明显的向北北东方向的移动), 在40s以上的周期范围内长白山火山区都是整个区域内相速度值最低的地方; 且五大连池、哈拉哈和阿巴嘎火山在60~100s范围内的低速"根"通过松辽盆地下方各向异性为北西-南东向的低速结构与东部长白山火山的低速"根"相连, 并推测中国东北的新生代火山可能均与长白山火山下方的热地幔上涌有关.

3.5　地壳间断面

段永红等(2003)利用图3所示的深地震测深系统采集的Pg波资料反演得到: (1) 长白火山区沉积盖层很薄, 地表速度在研究区北部与南部有所差别, 表明地表层的沉积物质有所不同; (2) 长白火山区结晶基底深度总体变化不大, 大部分地区为2.0~3.0km, 最深处(约4.0km)位于二道白河-池西之间和天池火山口下, 这二处均为低速区但形成原因不同, 二道白河-池西可能是地质构造上的坳陷区, 而天池火山口下则可能是由火山喷发物填充所致; (3) 速度横向变化剧烈和基底深度突变的地区均与断层穿过的剖面位置相对应.

张成科等(2002)由图3所示的L1剖面资料反演得到, 长白-敦化深地震测深剖面的Moho面与C_1、C_2、C_3界面起伏明显, 变化情况大体一致, 天池附近埋深最深, 敦化附近次之, 松江镇附近最浅. 天池附近的C_1、C_2、C_3界面分别为17、23、29km, 松江镇附近分别为11、19、26km; Moho面由松江镇附近的31km, 向南急剧加深至天池附近约为39km, 向北缓慢加深至敦化附近为33km左右; 松江镇附近下方存在着上地幔隆起, 其隆起幅度相对天池附近下方达7km左右. 对图1所示的PASSCAL-XI长白山火山区台, Hetland等(2004)和段永红等(2005)通过接收函数分析得到基本相同的Moho面深度. Song等(2007)得到的2条主剖面(L1和L2)Moho面约35km, 在天池火山口下方加厚到约40km, 而在低速体下方则减薄为约30km.

Kyong-Song等(2016)对朝鲜境内架设的近东西向

6个宽频地震台, 通过接收函数H-κ分析得到了5个台的结果, 天池附近20km范围内2个台的Moho面为39km (波速比>1.87), 天池60km之外2个台的Moho面为35km (波速比~1.76), 与中国境内人工地震测深的结果(张成科等, 2002; 刘志等, 2005; Song等, 2007)一致. 吴建平等(2009)由H-κ方法得到的结果, 显示天池火山口附近地壳厚度介于33~34.5km, 距离天池火山口15km的双目峰和50km的二道镇附近地壳厚度在30.5~31.5km左右, 不同台站得到的地壳厚度最大相差4km; 在大多数台站的波形叠加图中莫霍面附近存在多个极值点, 可能与地壳内部以及莫霍面附近介质的复杂性有关; V_P/V_S值在火山口附近较大, 而天池火山北部50km的EDO台则明显减小; 而接收函数反演得到的速度结构揭示火山口附近地壳厚度约36km, 比H-κ方法得到的地壳厚度偏大, 比人工地震测深得到的结果略小(张先康等, 2002). 深地震测深和接收函数分析得到的长白山火山地区地壳厚度较厚的结果, 也为后续的较大区域H-κ分析所证实(张广成等, 2013; 王开燕等, 2015; 朱洪翔等, 2017).

3.6 介质结构特性

刘志等(2005)由反演得出P波和S波速度结构计算的L1剖面泊松比分布显示: (1) 地表以下尤其是天池火山口附近有深达5km的高泊松比层, 应为低剪切应力的火山灰盖层; (2) 在天池火山口下的上地壳范围内有一条状高泊松比异常, 其位置与长白山天池火山区上地壳三维速度层析成像(赵金仁等, 2003)的波速比扰动分布异常区几乎相同, 这一高泊松比(波速比)条带应为热物质上涌或喷发通道; (3) 天池火山口下的地壳低速体内有一宽约30km、高约12km的高泊松比异常区, 其泊松比值高于周围介质8%左右, 应为高温熔融岩石介质, 即岩浆囊; 在其上方直至上地壳顶部有一高泊松比条带, 代表了热物质上移的通道; 在其下部高泊松比区域, 局部深达莫霍面形成了地幔热物质底侵的可能通道.

Choi等(2013)基于全球重力场EGM2008数据集, 以地质和地球物理探测结果(张先康等, 2002; 张成科等, 2002; Song等, 2007)为约束, 对长白山火山周围地区的三维地壳密度建模结果表明, 长白山天池、望天鹅和胞胎山等火山区的布格重力异常是最低的, 并将这种重力异常归因于火山区的Moho深度最深、低波速和低密度、浅表低密度火山岩分布、未探测到的新岩浆房的存在等. Choi等(2013)模拟给出了前人未探测到的长白山天池、望天鹅和胞胎山火山岩浆囊, 长白山天池下方的岩浆囊位于地表10km之内, 平均厚度为5km, 密度约为2350kg m^{-3}. 但Choi等(2013)的三维密度建模结果并不能证实Song等(2007)和Hetland等(2004)给出的在天池火山口北约70km处存在的低速体. Choi等(2013)还推测上新世以来的长白山火山活动具有从东南的朝鲜东海岸向西北迁移的路径.

尾波Q_c值结构研究(Wu等, 2006)揭示天池火山口附近Q_c值比外围地区明显偏低, 甚至较世界上其他典型火山区的Q值低, 显示出长白山天池火山附近尾波的强烈衰减可能与浅层岩浆囊引起的高温有关. 高金哲等(2007)从1999~2005年间CBS台记录到的480多个火山地震中, 基于空间分布挑选信噪比较高的94个震级为0.6~3.7的地震记录, 依据S波单次反散射模型测算了长白山天池火山区的尾波Q_c值, 获得尾波Q_c值与频率的关系为$Q_c=(47\pm2)f^{(0.74\pm0.01)}$, 也显著低于世界上其他典型火山区, 暗示着在长白山天池火山区地下介质似乎有很高的非均匀性, 佐证了长白山天池下方地壳范围内可能存在岩浆囊的结论. 而Zhao等(2010)利用中国东北地区分布较为稀疏的中国地震台网和全球地震台网共20个台记录的区域地震记录, 反演获得的大区域1°×1°分辨网格的Lg波Q_{Lg}值结构, 表明长白山区具有相对高的Q_{Lg}值. Zhao等(2015)以2006年、2009年和2013年朝鲜核爆的观测资料为基础, 建立的中国东北和朝鲜半岛地区宽频带高分辨率的上地幔顶部Pn波衰减模型, 发现长白山火山分布与上地幔顶部P波的强烈衰减区相对应.

4 地幔结构

全球和区域不同尺度的地震层析成像结果(如Zhao, 2004; Huang和Zhao, 2006; Fukao和Obayashi, 2013; Wei等, 2012, 2015; Chen C等, 2017)普遍展现出长白山火山区下方地幔转换带突出的高速异常和地幔转换带以上的广泛低速异常, 表明太平洋俯冲板片停滞在长白山火山下方的地幔转换带中. 但因不同研究所用的地震台站分布和资料多少与反演方法的差异, 以及反演结果的可信分辨率和解释角度方面都存在差别, 不同研究者给出的长白山火山区地幔结构在细节

上必然会有所不同, 这里主要对近年来的区域性探测研究结果进行概述.

4.1　地震波速结构

Lei和Zhao(2005)、赵大鹏等(2004)利用图1所示长白山火山区19个PASSCAL-XI临时地震台站和3个CDSN台站(牡丹江、北京和海拉尔)记录的68个远震波形图上读取的548个高质量震源P波到时资料, 反演得到水平方向2°×2°和深度方向上以90~200km为节点间距的P波速度模型, 表明长白山火山下深至400km存在明显的低速异常, 而在地幔转换带中存在高速异常, 并提出长白山火山形成的大地幔楔(BMW, 认为长白山火山是与太平洋俯冲板块在地幔转换带中的滞留和深部脱水等过程密切相关的一种弧后板内火山(赵大鹏等, 2004). Lei和Zhao(2005)的跨越长白山火山南北向和东西向剖面上的显著速度扰动异常意味着, 深部上涌的热物质到达约180km深度分别由南向北和由东往西上涌至长白山火山(参见图6). 而在3.2节提到的Zhao等(2009)和田有等(2011)的地壳上地幔反演结果与Lei和Zhao(2005)大体相似, 但跨越长白山火山东西向速度扰动剖面所展示的低速体形态的方向性不强, 而南北向剖面展示的低速体形态类似(参见图6). 但Duan等(2009)基于8个固定台和53个流动台记录的186个远震事件到时数据, 反演得到的P波速度结果, 也展示长白山火山下方明显类似的低速异常, 但具体形态又有所差异且约在100km深度处断开, 而在龙岗火山南部的低速异常从地表延伸到200km后转向北出现在龙岗火山下方200~380km深处. Wei等(2012)利用较Huang和Zhao(2006)更多的中国区域台网和全球台网观测报告震相及一些流动台的震相拾取数据, 反演得到的三维P波成像结果展现了长白山火山和龙岗火山下深至300km处的明显低速异常, 与Huang和Zhao(2006)和Fukao和Obayashi(2013)得到的明显低速异常出现深度相当. 张风雪等(2013, 2014)反演得到东北地区下方深达800km的P波和S波速度结构, 以及Wei等(2015)和Chen C等(2017)分别反演得到的东亚和东北亚的P波和S波速度结构, 也都展现出形态稍有不同的长白山火山下方低速异常体图像. 而Tang等(2014)基于NECESSArray台阵和约140个固定台站拾取的S波相对走时和P波到时数据, 采用有限频层析成像得到的S波和P波速度结构, 表明长白山火山下存在一个从地表一直延伸到地幔转换带下方的地震波低速异常体, 并结合三维地震波形拟合结果提出了下地幔热物质穿过地幔转换带中滞留的太平洋俯冲板片"空缺"上涌在浅部减压熔融导致长白山火山形成的模型.

4.2　地幔转换带滞留的太平洋俯冲板片

对于研究者大都认为的西太平洋俯冲作用于东亚大陆问题(张国伟等, 2011)的最重要地球物理依据, 即滞留在地幔转换带的太平洋俯冲板片认识, 主要来自分辨率有限的地震层析成像结果(如Fukao等, 1992; Zhao, 2004; Huang和Zhao, 2006; Li和van der Hilst, 2010; Zhao等, 2011; Wei等, 2012, 2015; Fukao和Obayashi, 2013; Chen C等, 2017)和三重震相或SS前驱波对地幔转换带(如Tajima等, 2009; Wang和Niu, 2010; Gu等, 2012; Zhang等, 2012; Li等, 2013, 2016; Takeuchi等, 2014; Wang等, 2014; Dokht等, 2016)的有限约束信息, 以及接收函数的分析结果(如Ai等, 2003; Li和Yuan, 2003; Liu等, 2015; Tian等, 2016; Zhang等, 2016; 崔辉辉等, 2016; 王新, 2016)等. 有关西太平洋俯冲动力作用与中国东北地区新生代火山成因机制的相关探讨, 与三方面的研究内容密切相关, 即俯冲的太平洋板片是停滞在地幔转换带内向西伸展, 还是穿透660km间断面直接进入下地幔? 太平洋俯冲滞留板片在长白山火山下方是否存在空缺? 太平洋俯冲滞留板片向西延伸多远?

关于中国东北下方地幔转换带中存在太平洋俯冲滞留板片的认识, 首先来自地震层析成像结果(参见Fukao等, 1992), 且为各种尺度的地震层析成像结果所确认(如Zhao, 2004; Lei和Zhao, 2005; Huang和Zhao, 2006; Li和van der Hilst, 2010; Zhao等, 2011; Wei等, 2012; Fukao和Obayashi, 2013; Tang等, 2014; Chen C等, 2017), Wei等(2015)新近反演结果展示出S波成像的太平洋俯冲滞留板片厚度较P波成像刻划的薄. 而接收函数研究表明中国东北下方的深俯冲板片形态较为复杂, Niu和Kawakatsu(1996)和Ai等(2003)均发现东北地区下方660km间断面附近可能存在与非橄榄岩相变有关的多重间断面, Li和Yuan(2003)针对所发现的660km间断面局部下沉提出太平洋俯冲板片可能穿透660km间断面进入下地幔这一有待探讨的问题. Li等(2008)的S-P转换波研究表明中国东北部下方660km间断面深度自东向西(130.8°E~131.4°E)从660km增至680km,

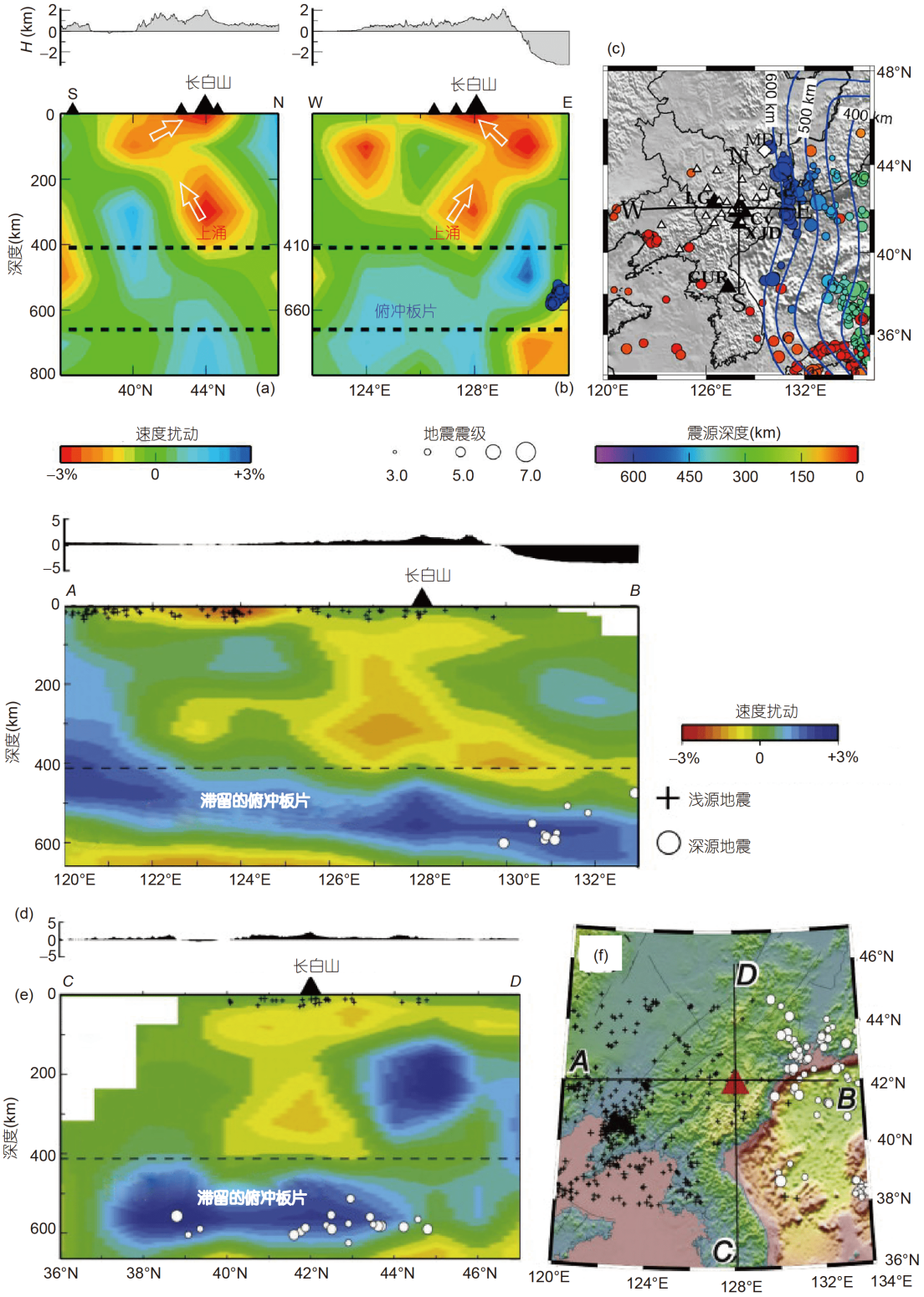

图 6　跨越长白山火山的P波速度剖面结果对比

(a)~(c) Lei和Zhao(2005); (d)~(f) Zhao等(2009). 据Lei等(2013)

Niu(2014)基于S-P转换波研究则给出俯冲板片穿透660km间断面进入下地幔的解释图像，Tian等(2016)给出的长白山火山下方上地幔结构和动力学解释图像也展示出俯冲板片穿透660km间断面进入了下地幔. Zhang等(2012，2016)和高占永等(2015)的三重震相波形模拟研究和接收函数分析研究，则认为俯冲到中国东北地区下方的西北太平洋板块在较小区域范围内出现660km间断面的较大深度下沉，可能暗示着俯冲板片穿透660km间断面直接进入了下地幔，并推测西北太平洋俯冲板块可能并未大面积停滞于地幔转换带之中. 而王新(2016)和Chen等(2016)最近综合利用密集布设的NECsaids台阵和NECESSArray的流动台与固定地震台数据，通过接收函数及其波形模拟研究得到的地幔转换带精细结构，观测到了很可能代表太平洋俯冲板片的上界面和下界面，展现出太平洋板块俯冲进入地幔转换带之前部分的厚度约为90km，俯冲板片进入地幔转换带后滞留平躺部分的厚度增厚为约140km.

针对Tang等(2014)远震层析成像得出的长白山火山下方太平洋俯冲滞留板片存在“空缺”(gap or hole)问题，Chen C等(2017)汇集了中国、韩国和日本三国的固定地震台及NECESSArray流动台记录的近震和远震到时数据，通过区域震和远震及联合成像反演测试，得到的层析成像结果并不支持俯冲滞留板片存在“空缺”的结论. Takeuchi等(2014)利用NECESSArray流动台和日本F-Net固定台的三重震相记录，反演得到的P波速度结构似乎也看不出俯冲滞留板片存在空缺，而Dokht等(2016)利用远震的SS前驱波波形模拟得到的长白山火山附近地幔转换带结构信息则不足以分辨是否存在俯冲板片“空缺”的图像. 但Tao等(2018)由全波形反演得到的高精度三维P波和S波速度结果，则显示出与Tang等(2014)成像得出的相似结构特征，即长白山火山下存在由下地幔延伸至地表的窄低速带.

有关俯冲至中国东北下方的太平洋滞留板片在地幔转换带西延多远的问题，区域层析成像结果(Huang和Zhao, 2006; Li和van der Hilst, 2010)展示的西边界大约到达大兴安岭-太行山重力梯度带，从Fukao和Obayashi(2013)的全球有限频层析成像模型似乎可看到向西延伸至靠近阿巴嘎火山下方，由Wei等(2012)三维P波成像结果所推测的西边界(参见Liu X等，2017)大体与Fukao和Obayashi(2013)展示的相当. 但Liu等(2015)接收函数成像得到的地幔转换带结果则表明，在东北南部(约从双辽穿过阿巴嘎火山剖面附近)可能并不存在太平洋俯冲滞留板片. 而Li等(2013)利用主要分布在华北地区固定地震台站的三重震相观测记录，推断的太平洋俯冲滞留板片的西边界大约远至118°E.

4.3　SKS分裂研究结果

受地震观测台站和资料局限，前人在中国东北地区开展的各向异性研究工作较少(强正阳和吴庆举，2015). 对于长白山附近地区，除了有较长期数字地震观测的牡丹江(MDJ)、长春(CN2)和延边(YNB)等少数几个固定地震台有反映幔源各向异性的SKS分裂结果(见常立军等，2009及相关文献)外，仅Li和Niu(2010)与Chen H C等(2017)分别给出了稍多些的固定地震台和NECESSArray流动台的SKS分裂结果，结果显示的快波极化方向普遍指向NW-SE，与区域岩石圈的扩张变形方向一致(Li和Niu，2010；强正阳和吴庆举，2015；Chen H C等，2017). Li和Niu(2010)在长白山天池火山口约60km范围内的CBT、FST、MJT 3个固定台提取的SKS分裂快慢波延迟时间均不超过0.4s，将它们归为无效分裂(null)的结果，并结合Huang和Zhao(2006)层析成像得到的低速体异常认为是局部的软流圈物质侵入而导致. 而Chen H C等(2017)在距天池火山口不到100km处的NE3B和NE3C流动台及不到200km稍远处都检测到明显的各向异性，与Li和Niu(2010)在距离140~190km处固定台检测到的明显各向异性较为一致.

4.4　长白山火山的成因机制

目前关于长白山火山下的地幔岩浆起源问题，还存在很大的争议(雷建设等，2018；Guo等，2018). 全球地震层析成像(如Fukao等，1992；Fukao和Obayashi，2013；Zhao，2004；以及雷建设等，2018中的相关文献)和大尺度绝对走时区域层析成像结果(Huang和Zhao，2006；Wei等，2012，2015；Li和van der Hilst，2010；Chen等，2015；Chen C等，2017)显示，长白山火山下方的地幔转换带中存在明显连续的高波速异常，普遍将该高波速异常解释为滞留在地幔转换带中的俯冲太平洋板块，而上地幔中的柱状低波速异常可能代表了由于板块深俯冲滞留脱水而造成的热物质上涌，而上地幔中的柱状低波速异常可能代表了由于板块深俯冲滞留脱水而造成的热物质上涌(Zhao，2004；Lei和Zhao，2005)，

进而认为长白山火山及中国东北火山的深部起源与太平洋板块深俯冲形成的“大地幔楔”(Big Mantle Wedge, BMW)结构(Zhao, 2004; Lei和Zhao, 2005; Zhao等, 2011; Lei等, 2013)动力学有关

Tang等(2014)根据其远震相对走时体波成像结果展示的长白山下方低波速异常区及解释为地幔转换带的太平洋俯冲滞留板片存在“空缺”, 并结合三维地震波形拟合结果提出了长白山火山深部成因的不同模型, 即与地幔转换带下方的热物质通过滞留的太平洋俯冲板片空缺上涌, 在上地幔浅处减压熔融形成长白山火山的机制. Guo等(2016)结合Tang等(2014)体波成像得到的长白山下方低波速异常区与前面3.3所述背景噪声和远震面波联合反演得到的剪切波速度结构, 进而提出了解释中国东北兴蒙造山带阿巴嘎火山和哈拉哈火山活动起源的局部地幔对流模型, 即长白山火山下方来自地幔过渡带的上地幔上涌可能造成了东北地区上地幔的局部对流, 长白山下方的低速异常为对流的上升一环, 而松辽盆地下的高速异常是这一环流下降的一环, 松辽盆地下方的地幔向下对流可能又引发了西部大兴安岭软流圈更次一级的局部对流, 局部软流圈上涌导致兴蒙造山带的阿巴嘎和哈拉哈火山活动. Guo等(2018)利用Guo等(2016)提取的Rayleigh波相速度6~140s频散曲线和与Tang等(2014)几乎相同的远震S波相对走时数据, 进一步开展的面波和体波联合成像反演, 得到了从地表至800km深度的三维S波速度模型, 成像结果支持Tang等(2014)的长白山火山源自于地幔转换带或更深处上涌的热物质. 而雷建设等(2018)通过总结前人体波在地幔转换带中的成像结果, 并结合接收函数、高温高压实验、数值模拟与岩石地球化学研究结果, 不支持长白山火山以西的地幔转换带存在低波速异常指示的板块“空缺”和地幔转换带“减薄”的认识, 且考虑到波形拟合结果可能受多因素影响, 认为长白山火山的深部起源与太平洋板块深俯冲至中国东北松辽盆地与大兴安岭交界处形成的“大地幔楔”结构动力学相关.

刘嘉麒等(2015)对比分析造成新生代日本海两侧(中国东北和日本岛)火山活动相似的原因, 认为日本海两侧相似的火山活动虽然受到西太平洋板块俯冲的影响, 但决不能成为其主导因素, 而是以松辽-冀中为中心的裂谷扩张作用和以日本海盆为中心的弧后扩张作用控制着本区的火山活动和地质的发展. 张茂亮、郭正府和刘嘉麒等(Zhang等, 2015)在岩石学和地球化学研究的基础上, 认为由于欧亚板块和太平洋板块之间平均汇聚速率发生变化, 导致中国东北晚新生代板内火山的岩浆底侵和随后喷发的地球动力学过程可能是岩石圈扩张和小规模热物质上涌导致, 给出了长白山、龙岗和镜泊湖火山活动与太平洋板块后撤导致岩石圈扩张相关的成因模型. Kim等(2016)使用NECESSArray流动台及韩国、日本和中国台湾可用的地震台资料, 以及中国东北3个区域固定台网的连续波形记录进行贝叶斯背景噪声成像, 得到了东北亚地区的瑞雷波群速度和相速度结构, 并采用Zhang等(2015)的板块后撤导致弧后扩张的相关模型来解释中国东北和朝鲜半岛的板内火山成因.

5 结论与展望

经过30年左右的地球物理观测和多学科不同尺度的研究, 对长白山火山区深部结构的探测工作已取得了显著的进展和一些普遍的共识, 但也存在不少的差异, 在深入探测研究方面还存在不少待解决的问题. 这些共识和问题可以概括为如下几点.

(1) 普遍认为长白山火山下方地壳和上地幔中存在与火山岩浆系统相关的低速低阻体, 相关的低速体可深至地幔转换带的410km界面处. 但由于使用的观测资料、分析研究方法和反演成像分辨率的不同, 导致对低速体的具体分布位置和展布形态还存在差异.

(2) 长白山火山在成因机制上与西太平洋板块俯冲活动密切相关, 但具体的主控因素则有不同的观点, 还有待于深入研究并结合岩石地球化学等研究结果进行相应的地球动力学模拟来验证不同的东北亚板内火山成因机制.

(3) 对位于中朝边界的长白山火山区深部结构的认识, 绝大多数是来自中国一侧的地球物理探测研究或大区域甚至全球尺度的地震成像反演结果, 极其缺乏朝鲜境内的探测研究结果, 急需在朝鲜半岛和中国开展联合的探测研究工作.

(4) 长白山火山区下方岩浆囊具体的三维分布形态, 还有待多学科联合开展精细的探测研究, 包括可有效描述地下介质流变性和构造变形的地震各向异性研究, 可精细区分地下深处小尺度构造或介质变化的反演成像方法和观测系统, 如大区域的重力测量(马学

英等, 2016)和GNSS测量与高密度地震台阵探测, 以及多种资料的联合反演成像与多学科的联合解释等.

(5) 长白山火山潜在喷发危险的科学评估与动态监测, 对比分析长白山火山2002~2005年强烈扰动活动前后的大地电磁探测结果(仇根根等, 2014)和地震成像反演结果(王武和陈棋福, 2017), 因所依据的观测资料和反演方法前后不一, 所得出结果是否确实反映了地下岩浆系统的运移(仇根根等, 2014)或没有可分辨的变化(王武和陈棋福, 2017)也有待于深入的探测研究, 建设可实时监测火山岩浆囊动态变化的综合观测系统也是十分必要的.

致谢　感谢评审专家的建设性修改意见使本文得以充实.

参考文献

常立军, 王椿镛, 丁志峰. 2009. 中国东部上地幔各向异性研究. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1169–1178

崔辉辉, 周元泽, 石耀霖, 王晓冉, 李国辉. 2016. 华北克拉通东部滞留板块下方低速异常的地震三重震相探测. 地球物理学报, 59: 1309–1320

段永红, 张先康, 杨卓新, 张成科, 赵金仁, 潘纪顺. 2003. 长白山天池火山区基底结构研究. 地震地质, 25: 501–508

段永红, 张先康, 刘志, 原秦喜, 徐朝繁, 王夫运, 方盛明, 杨卓欣. 2005. 长白山-镜泊湖火山区地壳结构接收函数研究. 地球物理学报, 48: 352–358

樊祺诚, 隋建立, 王团华, 李霓, 孙谦. 2007. 长白山火山活动历史岩浆演化与喷发机制探讨. 高校地质学报, 13: 175–190

冯晅, 迟唤昭, 刘财, 田有, 柳云龙, 郑确. 2013. 长白山及邻区地壳、上地幔顶部三维速度结构. 吉林大学学报(地球科学版), 43: 983–992

付媛媛, 高原. 2016. 东北地区背景噪声的Rayleigh和Love波相速度层析成像. 地球物理学报, 59: 494–503

高金哲, 刘杰, 桑成良, 张洪艳, 华卫. 2007. 长白山天池火山地区的尾波Q值估计. 中国地震, 23: 400–409

高玲, 上官志冠, 魏海泉, 武成智. 2006. 长白山天池火山近期气体地球化学的异常变化. 地震地质, 28: 358–366

高占永, 张瑞青, 吴庆举, 张广成. 2015. 中国东北地区下方660km间断面研究. 地震学报, 37: 711–721

洪汉净, 吴建平, 王庆良, 李克, 赵慈平, 上官志冠, 杨清福, 张恒荣, 刘国明. 2007. 中国火山危险性等级与活动性分类. 地震地质, 29: 447–458

胡亚轩, 王庆良, 崔笃信, 李克, 郑传芳. 2004. 长白山火山区几何形变的联合反演. 大地测量与地球动力学, 24: 90–94

雷建设, 赵大鹏. 2004. 长白山火山的起源和太平洋俯冲板块之间的关系. 地球科学进展, 19: 364–367

雷建设, 赵大鹏, 徐义刚, 樊祺诚, 米琦, 杜沫霏, 鲁明文. 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: 13–22

刘国明, 杨景奎, 王丽娟, 孙纪财. 2011. 长白山火山活动状态分析. 矿物岩石地球化学通报, 30: 393–399

刘嘉麒, 陈双双, 郭文峰, 孙春青, 张茂亮, 郭正府. 2015. 长白山火山研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 34:710–723

刘若新, 李继泰, 魏海泉, 许东满, 郑祥身. 1992. 长白山天池火山——一座具潜在喷发危险的近代火山. 地球物理学报, 35: 661–655

刘若新, 樊祺诚, 魏海泉, 李霓. 1999. 中国活火山研究. 地质论评, 45 (增刊): 3–15

刘志, 张先康, 王夫运, 段永红, 赖晓玲. 2005. 用地震走时反演计算长白山天池火山区二维地壳泊松比. 地震学报, 27: 324–331

马学英, 滕吉文, 刘有山, 董兴朋, 宋鹏汉. 2016. 长白山火山区壳幔物性结构与深部物理场特征. 地球物理学进展, 31: 1973–1985

明跃红, 苏伟, 房立华. 2006. 长白山天池火山地震类型及火山活动性的初步研究. 中国地震, 22: 56–63

明跃红, 吴建平, 苏伟, 房立华, 王未来. 2007. 长白山天池火山区的谐频事件. 地震地质, 29: 492–501

潘佳铁, 李永华, 吴庆举, 余大新. 2014a. 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: 2077–2087

潘佳铁, 吴庆举, 李永华, 余大新. 2014b. 中国东北地区噪声层析成像. 地球物理学报, 57: 812–821

朴成哲, 金东旭, 赵日元, 金守哲, 金仁哲. 2016. 白头山火山渣锥的岩浆演化研究. 岩石学报, 32: 3214–3224

强正阳, 吴庆举. 2015. 中国东北地区北部上地幔各向异性及其动力学意义. 地球物理学报, 58: 3540–3552

仇根根, 裴发根, 方慧, 杜炳锐, 张小博, 张鹏辉, 袁永真, 何梅兴, 白大为. 2014. 长白山天池火山岩浆系统分析. 地球物理学报, 57: 3466–3477

汤吉, 刘铁胜, 江钊, 赵国泽, 王继军, 詹艳. 1997. 长白山天池火山地区大地电磁测深初步观测. 地震地质, 19: 164–170

汤吉, 邓前辉, 赵国泽, 李文军, 宣飞, 晋光文, 白登海, 詹艳, 梁竞阁, 蒲兴华, 王继军, 李国深, 洪飞, 马明志, 陈风学. 2001. 长白山天池火山区电性结构和岩浆系统. 地震地质, 23: 191–200

田原, Legendre C P, 周彤, 韩建刚, 吴梦羽, 赵里, 宁杰远. 2017. 中国东北地区高精度相速度层析成像及其构造意义. 地球物理学报, 60: 1659–1675

田有, 刘财, 冯晅. 2011. 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, 54: 407–414

王夫运, 张先康, 杨卓欣. 2002. 用地震走时反演长白山天池火山地区的二维地壳结构. 地震学报, 24: 144–152

王开燕, 刘丹, 柳俊茹, 艾印双. 2015. 东北地区地壳结构研究. 地球物理学进展, 30: 61–69

王武, 陈棋福. 2017. 长白山火山区地壳S波速度结构的背景噪声成像. 地球物理学报, 60: 3080–3095

王新. 2016. 西北太平洋俯冲区上地幔过渡带的地震学研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学

魏海泉. 2014. 长白山天池火山. 北京: 地震出版社. 448

吴建平, 明跃红, 刘一鸣, 齐胜福, 袁松涌. 2003. 2002年8月20日长白山天池火山小震震群研究. 地震地磁观测与研究, 24: 1–8

吴建平, 明跃红, 张恒荣, 苏伟, 刘一鸣. 2005. 2002年夏季长白山天池火山区的地震活动研究. 地球物理学报, 48: 621–628

吴建平, 明跃红, 张恒荣, 刘国明, 房立华, 苏伟, 王未来. 2007. 长白山天池火山区的震群活动研究. 地球物理学报, 50: 1089–1096

吴建平, 明跃红, 苏伟, 房立华, 王未来. 2009b. 长白山火山区壳幔S波速度结构研究. 地震地质, 31: 584–597

杨清福, 薄景山. 2007. 长白山天池火山的研究现状与展望. 自然灾害学报, 16: 133–139

杨清福, 高金哲, 刘俊清, 盘晓东, 温洪涛, 张羽. 2013a. 长白山天池火山预警系统建设架构(Ⅰ)——火山监测网络建设. 自然灾害学报, 22: 112–119

杨清福, 冯启民, 张羽, 温洪涛, 刘俊清, 盘晓东. 2013b. 长白山天池火山监测预警系统建设架构(Ⅱ)——火山预警平台建设. 自然灾害学报, 22: 110–115

杨卓欣, 张先康, 赵金仁, 杨健, 段玉玲, 王帅军. 2005. 长白山天池火山区三维地壳结构层析成像. 地球物理学报, 48: 107–115

张成科, 张先康, 赵金仁, 刘宝峰, 张建狮, 杨卓欣, 海燕, 孙国伟. 2002. 长白山天池火山区及邻近地区壳幔结构探测研究. 地球物理学报, 45: 812–820

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: 2690–2700

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: 88–101

张广成, 吴庆举, 潘佳铁, 张风雪, 余大新. 2013. 利用H-κ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: 4084–4094

张国伟, 郭安林, 董云鹏, 姚安平. 2011. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学. 地学前缘, 18: 1–12

张先康, 张成科, 赵金仁, 杨卓欣, 李松林, 张建狮, 刘宝峰, 成双喜, 孙国伟, 潘素珍. 2002. 长白山天池火山区岩浆系统深部结构的深地震测深研究. 地震学报, 24: 135–143

赵大鹏, 雷建设, 唐荣余. 2004. 中国东北长白山火山的起源: 地震层析成像证据. 科学通报, 49: 1439–1446

赵金仁, 张先康, 杨卓欣, 张成科, 王夫运, 张建狮, 刘宝峰, 段玉玲, 王帅军. 2003. 长白山天池火山区上地壳三维速度层析成像. 地球物理学报, 46: 796–802

朱洪翔, 田有, 刘财, 冯晅, 杨宝俊, 刘才华, 刘廷, 马锦程. 2017. 中国东北地区高分辨率地壳结构: 远震接收函数. 地球物理学报, 60: 1676–1689

Ai Y S, Zheng T Y, Xu W W, He Y M, Dong D. 2003. A complex 660 km discontinuity beneath northeast China. Earth Planet Sci Lett, 212: 63–71

Ai Y S, Zheng T Y, Xu W W, Li Q. 2008. Small scale hot upwelling near the North Yellow Sea of eastern China. Geophys Res Lett, 35: L20305

Chen C, Zhao D, Tian Y, Wu S, Hasegawa A, Lei J, Park J H, Kang I B. 2017. Mantle transition zone, stagnant slab and intraplate volcanism in Northeast Asia. Geophys J Int, 209: 68–85

Chen H C, Niu F L, Obayashi M, Grand S, Kawakatsu H, Chen Y S, Ning J Y, Tanaka S. 2017. Mantle seismic anisotropy beneath NE China and implications for the lithospheric delamination hypothesis beneath the southern Great Xing'an range. Earth Planet Sci Lett, 471: 32–41

Chen M, Niu F, Liu Q, Tromp J, Zheng X. 2015. Multiparameter adjoint tomography of the crust and upper mantle beneath East Asia: 1. Model construction and comparisons. J Geophys Res-Solid Earth, 120: 1762–1786

Chen Q F, Wang X, Li J. 2016. Imaging the subducting Pacific slab beneath Northeast China with dense seismic array. Beijing: AOGS 13th Annual Meeting

Choi S, Oh C W, Götze H J. 2013. Three-dimensional density modeling of the EGM2008 gravity field over the Mount Paekdu volcanic area. J Geophys Res-Solid Earth, 118: 3820–3836

Chu K S, Tsuji Y, Baag C E, Kang T S. 2011. Volcanic eruptions of Mt. Baekdu (Changbai) occurring in historical times. Bull Earthq Res InstUniv Tokyo, 86: 11–27

Dokht R M H, Gu Y J, Sacchi M D. 2016. Waveform inversion of SS precursors: An investigation of the northwestern Pacific subduction zones and intraplate volcanoes in China. Gondwana Res, 40: 77–90

Duan Y H, Zhao D P, Zhang X K, Xia S H, Liu Z, Wang F Y, Li L. 2009. Seismic structure and origin of active intraplate volcanoes in Northeast Asia. Tectonophysics, 470: 257–266

Fu Y V, Gao Y, Li A, Li L, Shi Y, Zhang Y. 2016. Origin of intraplate volcanism in northeast China from Love wave constraints. J Geophys Res-Solid Earth, 121: 8099–8112

Fukao Y, Obayashi M, Inoue H, Nenbai M. 1992. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone. J Geophys Res, 97: 4809–4822

Fukao Y, Obayashi M. 2013. Subducted slabs stagnant above, penetrating through, and trapped below the 660 km discontinuity. J Geophys Res-Solid Earth, 118: 5920–5938

Gu Y J, Okeler A, Schultz R. 2012. Tracking slabs beneath northwestern Pacific subduction zones. Earth Planet Sci Lett, 331-

332: 269–280

Guo Z, Chen Y J, Ning J, Feng Y, Grand S P, Niu F, Kawakatsu H, Tanaka S, Obayashi M, Ni J. 2015. High resolution 3-D crustal structure beneath NE China from joint inversion of ambient noise and receiver functions using NECESSArray data. Earth Planet Sci Lett, 416: 1–11

Guo Z, Chen Y J, Ning J, Yang Y, Afonso J C, Tang Y. 2016. Seismic evidence of on-going sublithosphere upper mantle convection for intra-plate volcanism in Northeast China. Earth Planet Sci Lett, 433: 31–43

Guo Z, Wang K, Yang Y, Tang Y, Chen Y J, Hung S H. 2018. The origin and mantle dynamics of quaternary intraplate volcanism in Northeast China from joint inversion of surface wave and body wave. J Geophys Res-Solid Earth, 123: 2410–2425

Hetland E A, Wu F T, Song J L. 2004. Crustal structure in the Changbaishan volcanic area, China, determined by modeling receiver functions. Tectonophysics, 386: 157–175

Hong T K, Choi E, Park S, Shin J S. 2016. Prediction of ground motion and dynamic stress change in Baekdusan (Changbaishan) volcano caused by a North Korean nuclear explosion. Sci Rep, 6: 21477

Huang J L, Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J Geophys Res, 111: B09305

Iacovino K, Ju-Song K, Sisson T, Lowenstern J, Kuk-Hun R, Jong-Nam J, Kun-Ho S, Song-Hwan H, Oppenheimer C, Hammond J O S, Donovan A, Liu K W, Kum-Ran R. 2016. Quantifying gas emissions from the “Millennium Eruption” of Paektu volcano, Democratic People’s Republic of Korea/China. Sci Adv, 2: e1600913

Kang D, Shen W, Ning J, Ritzwoller M H. 2016. Seismic evidence for lithospheric modification associated with intracontinental volcanism in northeastern China. Geophys J Int, 204: 215–235

Kim S, Tkalčić H, Rhie J, Chen Y. 2016. Intraplate volcanism controlled by back-arc and continental structures in NE Asia inferred from transdimensional Bayesian ambient noise tomography. Geophys Res Lett, 43: 8390–8398

Kim S, Tkalčić H, Rhie J. 2017. Seismic constraints on magma evolution beneath Mount Baekdu (Changbai) volcano from transdimensional Bayesian inversion of ambient noise data. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 5452–5473

Kyong-Song R, Hammond J O S, Chol-Nam K, Hyok K, Yong-Gun Y, Gil-Jong P, Chong-Song R, Oppenheimer C, Liu K W, Iacovino K, Kum-Ran R. 2016. Evidence for partial melt in the crust beneath Mt. Paektu (Changbaishan), Democratic People’s Republic of Korea and China. Sci Adv, 2: e1501513

Lei J S, Zhao D. 2005. P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast Asia. Tectonophysics, 397: 281–295

Lei J S, Xie F R, Fan Q C, Santosh M. 2013. Seismic imaging of the deep structure under the Chinese volcanoes: An overview. Phys Earth Planet Inter, 224: 104–123

Li C, van der Hilst R D. 2010. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltime tomography. J Geophys Res, 115: B07308

Li X, Yuan X. 2003. Receiver functions in northeast China-implications for slab penetration into the lower mantle in northwest Pacific subduction zone. Earth Planet Sci Lett, 216: 679–691

Li J, Chen Q F, Vanacore E, Niu F. 2008. Topography of the 660-km discontinuity beneath northeast China: Implications for a retrograde motion of the subducting Pacific slab. Geophys Res Lett, 35: L01302

Li J, Niu F. 2010. Seismic anisotropy and mantle flow beneath northeast China inferred from regional seismic networks. J Geophys Res, 115: B12327

Li J, Wang X, Wang X, Yuen D A. 2013. P and SH velocity structure in the upper mantle beneath Northeast China: Evidence for a stagnant slab in hydrous mantle transition zone. Earth Planet Sci Lett, 367: 71–81

Li J, Tosi N, Maierova P, Yuen D A. 2016. Evidence from caustics waveform modelling for long slab thickening above the 660-km discontinuity under northeast Asia: Dynamical implicaiton. AGU Monograph, 211: 5–18

Li Y H, Wu Q J, Pan J T, Sun L. 2012. S-wave velocity structure of northeastern China from joint inversion of Rayleigh wave phase and group velocities. Geophys J Int, 190: 105–115

Liu G M, Yang J, Wang L, Sun J C. 2011. Analysis of Tianchi volcano activity in Changbai mountain, NE China. Global Geol, 14: 45–53

Liu G M, Li C, Peng Z, Li X, Wu J. 2017. Detecting remotely triggered microseismicity around Changbaishan Volcano following nuclear explosions in North Korea and large distant earthquakes around the world. Geophys Res Lett, 44: 4829–4838

Liu X, Zhao D, Li S, Wei W. 2017. Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications. Earth Planet Sci Lett, 464: 166–174

Liu Z, Niu F, Chen Y J, Grand S, Kawakatsu H, Ning J, Tanaka S, Obayashi M, Ni J. 2015. Receiver function images of the mantle transition zone beneath NE China: New constraints on intraplate volcanism, deep subduction and their potential link. Earth Planet Sci Lett, 412: 101–111

Liu Z, Huang J, Yao H. 2016. Anisotropic Rayleigh wave tomography of Northeast China using ambient seismic noise. Phys Earth Planet Inter, 256: 37–48

Niu F. 2014. Distinct compositional thin layers at mid-mantle depths beneath northeast China revealed by the USArray. Earth Planet Sci

Lett, 402: 305–312

Niu F, Kawakatsu H. 1996. Complex structure of mantle discontinuities at the tip of the subducting slab beneath northeast China: A preliminary investigation of broadband receiver functions. J Phys Earth, 44: 701–711

Oppenheimer C, Wacker L, Xu J, Galván J D, Stoffel M, Guillet S, Corona C, Sigl M, Di Cosmo N, Hajdas I, Pan B, Breuker R, Schneider L, Esper J, Fei J, Hammond J O S, Büntgen U. 2017. Multi-proxy dating the 'Millennium Eruption' of Changbaishan to late 946 CE. Quat Sci Rev, 158: 164–171

Song J L, Hetland E A, Wu F T, Zhang X K, Liu G D, Yang Z X. 2007. P-wave velocity structure under the Changbaishan volcanic region, NE China, from wide-angle reflection and refraction data. Tectonophysics, 433: 127–139

Stone R. 2010. Is China's riskiest volcano stirring or merely biding its time? Science, 329: 498–499

Stone R. 2011. Vigil at North Korea's Mount Doom. Science, 334: 584–588

Sun C, Plunkett G, Liu J, Zhao H, Sigl M, McConnell J R, Pilcher J R, Vinther B, Steffensen J P, Hall V. 2014. Ash from Changbaishan Millennium eruption recorded in Greenland ice: Implications for determining the eruption's timing and impact. Geophys Res Lett, 41: 694–701

Tajima F, Katayama I, Nakagawa T. 2009. Variable seismic structure near the 660 km discontinuity associated with stagnant slabs and geochemical implications. Phys Earth Planet Inter, 172: 183–198

Takeuchi N, Kawakatsu H, Tanaka S, Obayashi M, Chen Y J, Ning J, Grand S P, Niu F, Ni J, Iritani R, Idehara K, Tonegawa T. 2014. Upper mantle tomography in the northwestern Pacific region using triplicated *P* waves. J Geophys Res-Solid Earth, 119: 7667–7685

Tang Y C, Obayashi M, Niu F, Grand S P, Chen Y J, Kawakatsu H, Tanaka S, Ning J, Ni J F. 2014. Changbaishan volcanism in northeast China linked to subduction-induced mantle upwelling. Nat Geosci, 7: 470–475

Tao K, Niu F, Ning J, Chen Y J, Grand S, Kawakatsu H, Tanaka S, Obayashi M, Ni J. 2014. Crustal structure beneath NE China imaged by NECESSArray receiver function data. Earth Planet Sci Lett, 398: 48–57

Tao K, Grand S P, Niu F. 2018. Seismic structure of the upper mantle beneath Eastern Asia from full waveform seismic tomography. Geochem Geophys Geosyst, 19: 2732–2763

Tian Y, Zhu H, Zhao D, Liu C, Feng X, Liu T, Ma J. 2016. Mantle transition zone structure beneath the Changbai volcano: Insight into deep slab dehydration and hot upwelling near the 410 km discontinuity. J Geophys Res-Solid Earth, 121: 5794–5808

Wang B S, Niu F. 2010. A broad 660 km discontinuity beneath northeast China revealed by dense regional seismic networks in China. J Geophys Res, 115: B06308

Wang T, Revenaugh J, Song X. 2014. Two-dimensional/three-dimensional waveform modeling of subducting slab and transition zone beneath Northeast Asia. J Geophys Res-Solid Earth, 119: 4766–4786

Wang X, Chen Q, Li J, Wei S. 2016. Seismic sensor misorientation measurement using *P*-wave particle motion: An application to the NECsaids array. Seismol Res Lett, 87: 901–911

Wei H Q, Liu G, Gill J. 2013. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: Implications for possible future eruptions. Bull Volcanol, 75: 706

Wei W, Xu J, Zhao D, Shi Y. 2012. East Asia mantle tomography: New insight into plate subduction and intraplate volcanism. J Asian Earth Sci, 60: 88–103

Wei W, Zhao D, Xu J, Wei F, Liu G. 2015. *P* and *S* wave tomography and anisotropy in Northwest Pacific and East Asia: Constraints on stagnant slab and intraplate volcanism. J Geophys Res-Solid Earth, 120: 1642–1666

Wu J P, Jiao W J, Ming Y H, Su W. 2006. Attenuation of coda waves at the Changbaishan Tianchi volcanic area in Northeast China. Pure Appl Geophys, 163: 1351–1368

Wu J P, Ming Y H, Fang L H, Wang W L. 2009. S-wave velocity structure beneath Changbaishan volcano inferred from receiver function. Earthq Sci, 22: 409–416

Xu J, Liu G, Wu J, Ming Y, Wang Q, Cui D, Shangguan Z, Pan B, Lin X, Liu J. 2012. Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: A precursor of a future eruption? Geophys Res Lett, 39: L16305

Xu P, Zhao D. 2009. Upper-mantle velocity structure beneath the North China Craton: Implications for lithospheric thinning. Geophys J Int, 177: 1279–1283

Zhang M, Guo Z, Cheng Z, Zhang L, Liu J. 2015. Late Cenozoic intraplate volcanism in Changbai volcanic field, on the border of China and North Korea: Insights into deep subduction of the Pacific slab and intraplate volcanism. J Geol Soc, 172: 648–663

Zhang R, Wu Q, Li Y, Romanowicz B. 2012. Lateral variations in *SH* velocity structure of the transition zone beneath Korea and adjacent regions. J Geophys Res, 117: B09315

Zhang R, Gao Z, Wu Q, Xie Z, Zhang G. 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

Zhao D. 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics. Phys Earth Planet Inter, 146: 3–34

Zhao D, Tian Y, Lei J, Liu L, Zheng S. 2009. 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, 173: 197–206

Zhao D, Liu L. 2010. Deep structure and origin of active volcanoes in China. Geosci Front, 1: 31–44

Zhao D, Yu S, Ohtani E. 2011. East Asia: Seismotectonics, magmatism and mantle dynamics. J Asian Earth Sci, 40: 689–709

Zhao L F, Xie X B, Wang W M, Zhang J H, Yao Z X. 2010. Seismic *Lg*-wave *Q* tomography in and around Northeast China. J Geophys Res, 115: B08307

Zhao L F, Xie X B, Tian B F, Chen Q F, Hao T Y, Yao Z X. 2015. *Pn* wave geometrical spreading and attenuation in Northeast China and the Korean Peninsula constrained by observations from North Korean nuclear explosions. J Geophys Res-Solid Earth, 120: 7558–7571

(责任编委: 杨顶辉)