



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

基于背景噪声反演的兴蒙造山带阿巴嘎地区地壳S波速度结构

徐荟 吴庆举

Crustal S-wave velocity structure of the Abaga area of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt from ambient noise

Xu Hui, Wu Qingju

引用本文:

徐荟, 吴庆举. 2025. 基于背景噪声反演的兴蒙造山带阿巴嘎地区地壳S波速度结构. *地震学报*[J], 47(1): 54–72. DOI: 10.11939/jass.20230067

Xu H, Wu Q J. 2025. Crustal S-wave velocity structure of the Abaga area of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt from ambient noise. *Acta Seismologica Sinica*[J], 47(1): 54–72. DOI: 10.11939/jass.20230067

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20230067>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于背景噪声的川滇地区勒夫波层析成像

Love wave tomography in Sichuan–Yunnan area from ambient noise

地震学报. 2017, 39(5): 633–647 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.001>

鄂尔多斯及周边区域噪声层析成像研究

Ambient noise tomography in the Ordos block and its surrounding areas

地震学报. 2021, 43(2): 152–167 <https://doi.org/10.11939/jass.20200099>

鄂尔多斯地块北部及邻区Pn波速度结构与各向异性

Pn-wave velocity structure and anisotropy beneath northern Ordos block and its adjacent areas

地震学报. 2020, 42(3): 256–268 <https://doi.org/10.11939/jass.20190137>

青藏高原东北缘噪声层析成像研究

Ambient noise Rayleigh wave tomography in the northeastern Tibetan Plateau

地震学报. 2018, 40(1): 1–12 <https://doi.org/10.11939/jass.20170050>

利用背景噪声格林函数交叉项成像研究台湾地区面波相速度结构

Phase velocity maps of the Taiwan region from the ambient noise tomography of the cross terms in Green's function tensors

地震学报. 2019, 41(3): 302–313 <https://doi.org/10.11939/jass.20180133>

四川地区地震背景噪声特征分析

Characteristics of seismic ambient noise in Sichuan region

地震学报. 2021, 43(5): 533–550 <https://doi.org/10.11939/jass.20200148>

徐荟, 吴庆举. 2025. 基于背景噪声反演的兴蒙造山带阿巴嘎地区地壳 S 波速度结构. 地震学报, 47(1): 54-72. doi: 10.11939/jass.20230067.

Xu H, Wu Q J. 2025. Crustal S-wave velocity structure of the Abaga area of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt from ambient noise. *Acta Seismologica Sinica*, 47(1): 54-72. doi: 10.11939/jass.20230067.

基于背景噪声反演的兴蒙造山带阿巴嘎地区地壳 S 波速度结构*

徐 荟^{1,2)} 吴庆举^{1,2), †}

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100081 中国地震局震源物理重点实验室

摘要 利用布设于兴蒙造山带内蒙古中部阿巴嘎台阵记录的连续背景噪声数据, 获取了研究区内周期为 5—30 s 的瑞雷面波频散, 使用马尔科夫链-蒙特卡洛反演方法建立了阿巴嘎地区地壳高分辨率三维 S 波速度结构. 结果显示, 阿巴嘎和达里诺尔火山区上中下地壳的 S 波速度均呈低速, 且下地壳 30 km 处存在明显的低速区, 推断该处可能为下地壳的岩浆囊及上方岩浆通道. 此外, 阿巴嘎、达里诺尔、达里甘嘎和乌兰哈达火山群在地壳内的低速区都是相互连通的. 结合前人研究结果, 推测出阿巴嘎和达里诺尔火山群的岩浆源区位于上地幔顶部, 并且进一步推测阿巴嘎和达里诺尔火山群的形成是源于区域内地幔热物质上涌, 沿缝合带或断层侵入到地壳诱发了地表火山活动.

关键词 兴蒙造山带阿巴嘎 阿巴嘎火山群 达里诺尔火山群 背景噪声 S 波速度

doi: 10.11939/jass.20230067 **中图分类号:** P315.3 **文献标识码:** A

Crustal S-wave velocity structure of the Abaga area of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt from ambient noise

Xu Hui^{1,2)} Wu Qingju^{1,2), †}

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

2) *Key Laboratory of Earthquake Source Physics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

Abstract: Cenozoic intraplate volcanoes are widely developed in the central part of Inner Mongolia in the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt. These volcanoes are mainly distributed in groups to the west of the Greater Xing'an-Taihang Mountain Gravity Lineament, forming a number of volcanic regions, such as Abaga, Beilike and Dalinor volcanic regions. And these three volcanic regions are connected with the Dariganga volcanic region in southern Mongolia. The origin and dynamic mechanism of these Cenozoic intraplate volcanoes is still a controversial topic. Previous

* 基金项目 国家自然科学基金(41274088, 41674094, 41874112)联合资助.
收稿日期 2023-06-02 收到初稿, 2023-12-06 决定采用修改稿.
作者简介 徐荟, 在读博士研究生, 主要从事背景噪声层析成像以及地壳上地幔结构研究, e-mail: xuhui05206106@126.com; † 通信作者: 吴庆举, 博士, 研究员, 主要从事地震学、地球内部结构以及动力学研究, e-mail: wuqj@cea-igp.ac.cn



studies have mainly proposed the following three mechanisms: lithosphere delamination; upwelling of mantle plume in mantle transition zone; westward subduction of the Pacific plate.

In this study, to further reveal the magma structure and origin of these intraplate volcanoes, a high-resolution 3-D S-wave velocity structure of the crust in the study area was established. Based on the continuous data of the Abaga Array deployed in the central part of Inner Mongolia in the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt, the Rayleigh surface wave dispersion with period range of 5 s to 30 s was obtained. Then the high-resolution 3-D S-wave velocity structure of the crust was further obtained by using the Markov Chain Monte Carlo method. The results show the crustal velocity of the Abaga and Dalinor volcanic group is low, and there is an obvious low velocity zone at about 30 km depth in the lower crust, which may be the magma chamber in the lower crust of the volcanic groups. The results also imply the low velocity in the crust of Abaga volcanic group, Dalinor volcanic group, Dariganga volcanic group and Ulanhada volcanic group are interconnected. According previous results, the magma sources of the Abaga volcanic group and the Dalinor volcanic group are in the uppermost layer of the upper mantle. Furtherly it is speculated that the formation of the Abaga and Dalinor volcanic group is due to the upwelling of hot material in the upper mantle, which invaded the crust along the suture zones or faults.

Key words: The Abaga area of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt; Abaga volcanic group; Dalinore volcanic group; ambient noise; S-wave velocity

引言

内蒙古中部阿巴嘎地区位于兴蒙造山带(Xing'an-Mongolia Orogenic Belt, 缩写为 XMOB)西段。古生代时, 内蒙古中部主要受控于古亚洲洋的演化, 西伯利亚板块和华北板块持续向古亚洲洋俯冲闭合。由于西伯利亚板块和华北板块碰撞后的伸展, 内蒙古中部在中生代发育大量侵入岩、同期火山岩和大型裂谷盆地(肖安成等, 2001; Meng *et al*, 2003; 王涛等, 2007), 二连盆地为其中的裂谷盆地之一。根据盆地基底下白垩统的分布特征, 又可将二连盆地划分为二级构造单元: 五个坳陷(分别为马尼特、乌兰察布、腾格尔、川井、乌尼特坳陷)和四个隆起(分别为巴音宝力格、苏尼特、温都尔庙、东乌珠穆沁隆起)(漆家福等, 2015)(图 1a)。

进入新生代后, 内蒙古中部整体处于伸展构造背景, 广泛发育大陆板内火山(Ho *et al*, 2008, 2013; Fan *et al*, 2014; Chen *et al*, 2015)。新生代火山主要成群分布于大兴安岭—太行山重力梯度带以西, 构成多个火山岩区, 如本研究区(109° — 117° E, 41° — 46° N)内从西北到东南分布的阿巴嘎、贝里克和达里诺尔三个不同的火山岩区(陈生生等, 2011)。这三个火山岩区与蒙古国境内南部达里甘嘎火山岩区相连, 形成了亚洲东部规模最大的新生代板内火山岩区之一(Kononova *et al*, 2002; Ho *et al*, 2008; 陈生生等, 2013; 樊祺诚等, 2015; Chen *et al*, 2015)。从地质构造上看, 阿巴嘎和达里诺尔火山区分别位于北东向的二连浩特—贺根山缝合带和索伦山—林西缝合带与北西向阿巴嘎—赤峰断裂的交会处(罗修泉, 陈启桐, 1990), 火山锥主要沿二连浩特—贺根山缝合带和索伦山—林西缝合带分布(图 1b)。迄今为止, 对于我国东部新生代板内火山的起源和动力学机制已有多种解释机制, 主要分为以下三种: ① 岩石圈拆沉(Zhao *et al*, 2014); ② 地幔过渡带的地幔柱上涌(Kuritani *et al*, 2013);

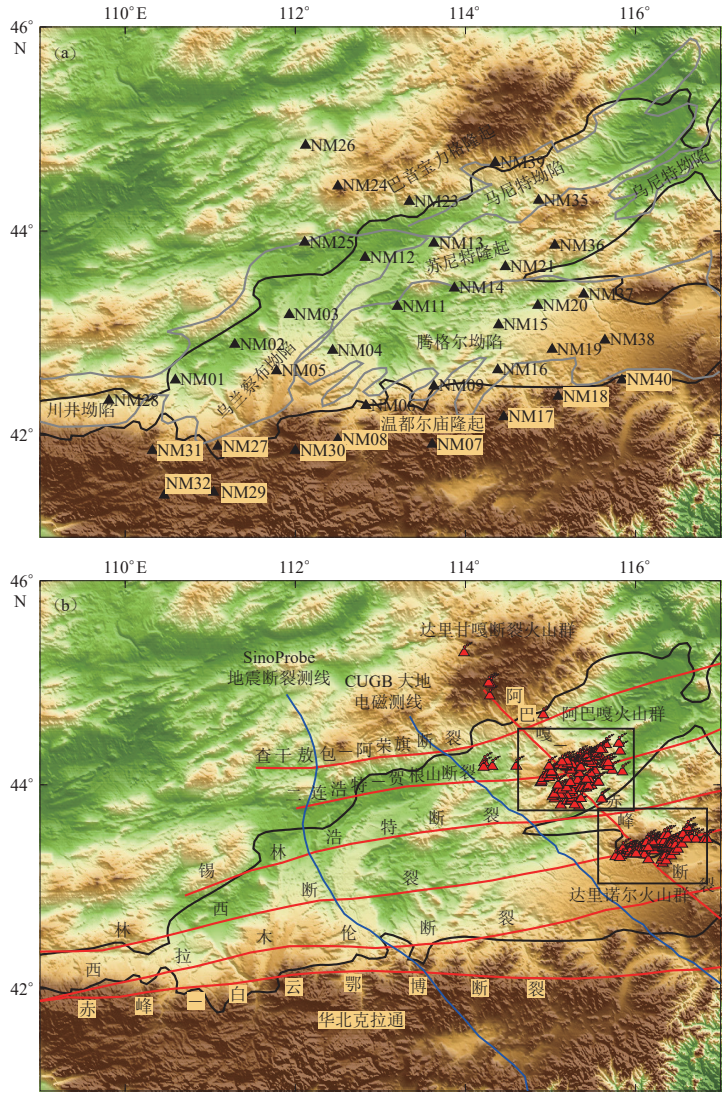


图 1 研究区台站分布(a)和区域构造图(b)

图(a)中黑色三角形表示台站,黑色线表示二连盆地,灰色线是二连盆地构造单元(漆家福等, 2015),下同;图(b)中红线为缝合带和断裂(Xiao *et al.*, 2003),红色火山符号表示新生代火山群(Ye *et al.*, 2020),蓝色线是 SinoProbe 反射地震测线(Zhang *et al.*, 2014b)和中国地质大学(北京)(CUGB)大地电磁测线(Ye *et al.*, 2020)

Fig. 1 Distribution map of seismic stations (a) and Tectonic map (b)

In Fig. (a) the black triangles represent stations which were deployed in this study, the black line denotes Erlian Basin, the grey line denotes tectonic units of Erlian Basin (Qi *et al.*, 2015), the same below; In Fig. (b) the red lines denote suture lines and faults (Xiao *et al.*, 2003), the red volcanic symbols denote the Cenozoic volcanic groups (Ye *et al.*, 2020), the blue lines are the Sino-Proberreflection seismic profile (Zhang *et al.*, 2014b) and the the magnetotelluric profile of CUGB (Ye *et al.*, 2020)

③ 太平洋板块的向西俯冲(Zou *et al.*, 2003; Chu *et al.*, 2013).

以往对内蒙古中部阿巴嘎地区的壳幔结构研究较少,且基本集中在其南部的华北及其北部邻区(Tang *et al.*, 2013; Bao *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2021)、本文研究区东部的东北地区(张风雪等, 2013; 张广成等, 2013; 潘佳铁等, 2014a, b; Tao *et al.*, 2014; Zhang

et al, 2014a; Guo *et al*, 2015, 2016, 2018)以及本研究区西部的蒙古中南部地区(何静等, 2014; 张风雪等, 2014; 潘佳铁等, 2015; 余大新等, 2015, 2016; 强正阳等, 2016; He *et al*, 2016, 2017, 2019; Qiang *et al*, 2017; Zhang *et al*, 2017; Liu *et al*, 2022). 区内有两条测线, SinoProbe 测线经过内蒙古中部但未经过阿巴嘎和达里诺尔火山区(李文辉等, 2014; 李英康等, 2014; Zhang *et al*, 2014b; 龚辰等, 2016). 2017 年至 2018 年中国地质大学(北京)布署了中蒙边境至阿巴嘎旗及东南延伸至华德县的大地电磁测线, 测线经过阿巴嘎和达里诺尔火山区, 建立了从地表到上地幔的二维电阻率模型, 对阿巴嘎和达里诺尔火山群下的上升通道和岩浆源进行了成像(Ye *et al*, 2020). 还有一系列基于 NECESSArray 数据的壳幔结构研究覆盖到内蒙古中部阿巴嘎地区(Tao *et al*, 2014; Guo *et al*, 2015, 2016, 2018; Li *et al*, 2016; Liu *et al*, 2016, 2017), 提出了中国东北地区岩石圈次地幔对流模型, 认为太平洋俯冲板块地幔过渡带上地幔物质上涌至长白山火山诱发了长白山和松辽盆地的上地幔局部对流, 而松辽盆地软流圈流动又引起来了阿巴嘎火山下的局部软流圈上升流. 但是 NECESSArray 台阵位于阿巴嘎火山群的边缘地区, 对阿巴嘎地区板内火山的形成提供的约束有限. 2013 年 1 月至 2015 年 7 月, 中国地震局地球物理研究所在阿巴嘎地区开展了宽频带流动地震台阵观测, 利用台阵获得的连续观测数据, 开展了一系列的壳幔结构研究, 如背景噪声和地震事件面波相速度成像(Hou *et al*, 2019, 2023)、接收函数研究(何静等, 2018)和壳幔各向异性(强正阳, 吴庆举, 2019; 强正阳等, 2019). 何静等(2018)接收函数结果显示阿巴嘎火山地区地壳薄而地壳平均波速比高, 认为这可能是火山下方上地幔铁镁质物质底侵入下地壳所致. 强正阳和吴庆举(2019)观测到阿巴嘎火山区纯无效分裂结果, 认为该区域可能存在地幔热物质上涌.

本研究拟基于高密度覆盖兴蒙造山带阿巴嘎地区的宽频带密集流动台阵观测数据, 利用背景噪声互相关获得的瑞雷面波频散信息, 建立研究区高分辨率的地壳三维 S 波速度结构, 进一步揭示探索区域内板内火山在地壳内的岩浆结构和成因.

1 数据和方法

1.1 内蒙古阿巴嘎台阵

本文使用的地震数据集为内蒙古阿巴嘎台阵记录的连续背景噪声数据. 中国地震局地球物理研究所 2013 年 1 月至 2015 年 7 月在内蒙古阿巴嘎地区布设了 36 个地震宽频带流动观测台站, 位置如图 1a 所示. 其中, 11 个台站使用了 CMG-3ESPC 地震计, 3 个台站使用了 CMG-3T 地震计, 20 个台站使用了 Trillium-120PA 地震计, 其余 2 个台站为港震 BBVS-60 地震计.

1.2 利用背景噪声数据测量相速度

1) 计算互相关函数并叠加. 单台数据预处理采用 Bensen 等(2007)提出的流程. 对每个台站的所有三分量连续数据按天分割, 减采样到 1 Hz, 去除线性趋势、平均值和仪器响应, 带通滤波, 并归一化处理(绝对平均归一化方法)和谱白化. 在预处理之后, 计算所有台站对间垂直分量(ZZ)的互相关函数. 为了提高瑞雷波的信噪比, 首先将每日 ZZ 互相关函数按时间顺序排序, 每 5 天线性叠加一次. 然后, 使用时频相位叠加(time-frequency domain phase weighted stacking, 缩写为 tf-PWS)方法(Li *et al*, 2018)对得到的互相关函数进一步叠加, 该方法在提高信噪比方面比线性叠加更有效. 最后, 为了降低噪声源分布不均匀的影响, 将互相关波形的因果信号和非因果信号进行叠加得到对称分量波形. 图 2 为部分 ZZ 互相关函数的

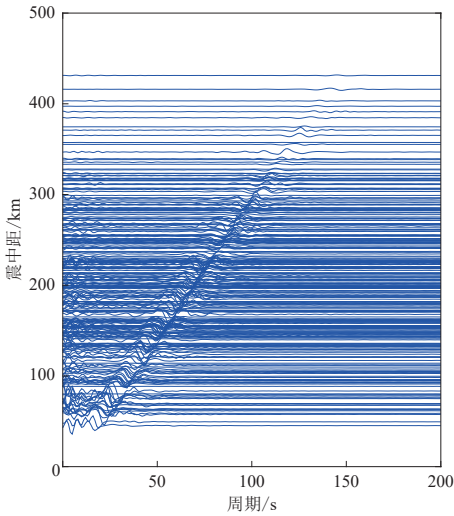


图2 台站对间垂直分量(ZZ)的互相关函数的对称分量波形

Fig. 2 Symmetrical component of the cross-correlation functions of vertical components (ZZ) between stations

surface wave tomography, 缩写为 FMST) 方法 (Kennett *et al*, 1988; Rawlinson, Sambridge, 2004a, b) 作棋盘分辨率测试. 试验采用不同网格大小对研究区进行划分, 分别对几个代表性周期进行测试, 对不同周期使用了该周期的区域平均速度作为速度初始模型, 速度扰动量均设置为 ± 0.1 km/s, 同时在理论射线走时中加入标准差为 0.05 s 的高斯噪声. 当网格尺寸为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 时, 除了台阵覆盖边缘外的区域, 初始模型的速度值和扰动量在 5—30 s 周期内均得到了最好的恢复 (图 5). 此时可以分辨的异常体大小为 $1^\circ \times 1^\circ$, 成像结果中大于 $1^\circ \times 1^\circ$ 的速度异常才是比较可信的, 也表明在反演中将研究区域划分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格大小是合适的. 然后使用 FMST 方法, 采用与棋盘分辨率试验相同的正则化参数和 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的反演网格进行 5—30 s 周期相速度的二维层析成像.

1.3 瑞雷波相速度反演 S 波速度

本研究使用马尔科夫链-蒙特卡洛 (Markov Chain Monte Carlo, 缩写为 MCMC) 方法 (Bodin *et al*, 2012; Afonso *et al*, 2013) 对相速度进行反演, 得到了各台站下方的一维 S 波速度模型. 误差函数 $M(m)$ 定义为:

对称分量波形.

2) 提取瑞雷波相速度频散曲线, 得到互相关函数的对称分量波形后, 使用频率时间分析 (frequency-time analysis, 缩写为 FTAN) (Dziewonski *et al*, 1969, Bensen *et al*, 2007) 和相位匹配滤波 (Herrin, Goforth, 1977) 来估计瑞雷波相速度. 在所有台站对间垂直分量 ZZ 互相关波形中, 只选择台间距大于 3 倍波长且信噪比大于 10 的 ZZ 互相关波形来测量相速度. 图 3 为经过筛选后的频散曲线 (5—35 s). 图 4a—g 为本研究区内 5—35 s 周期的射线覆盖, 其中 5—30 s 周期射线覆盖较好 (图 4a—f), 有超过 200 条射线路径 (图 4h).

3) 作棋盘分辨率测试和瑞雷波相速度层析成像. 在给出相速度的层析结果之前, 需要进行相应的分辨率估计, 以确定合适的反演网格大小, 并评估其恢复实际模型的能力. 本文采用快速行进面波成像 (fast marching

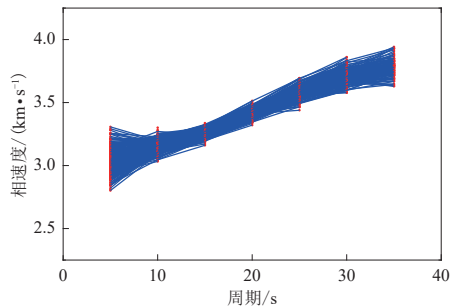


图3 测量得到的瑞雷波相速度频散曲线(5—35 s)

Fig. 3 The measured Rayleigh wave phase velocity dispersion curves at periods of 5–35 s

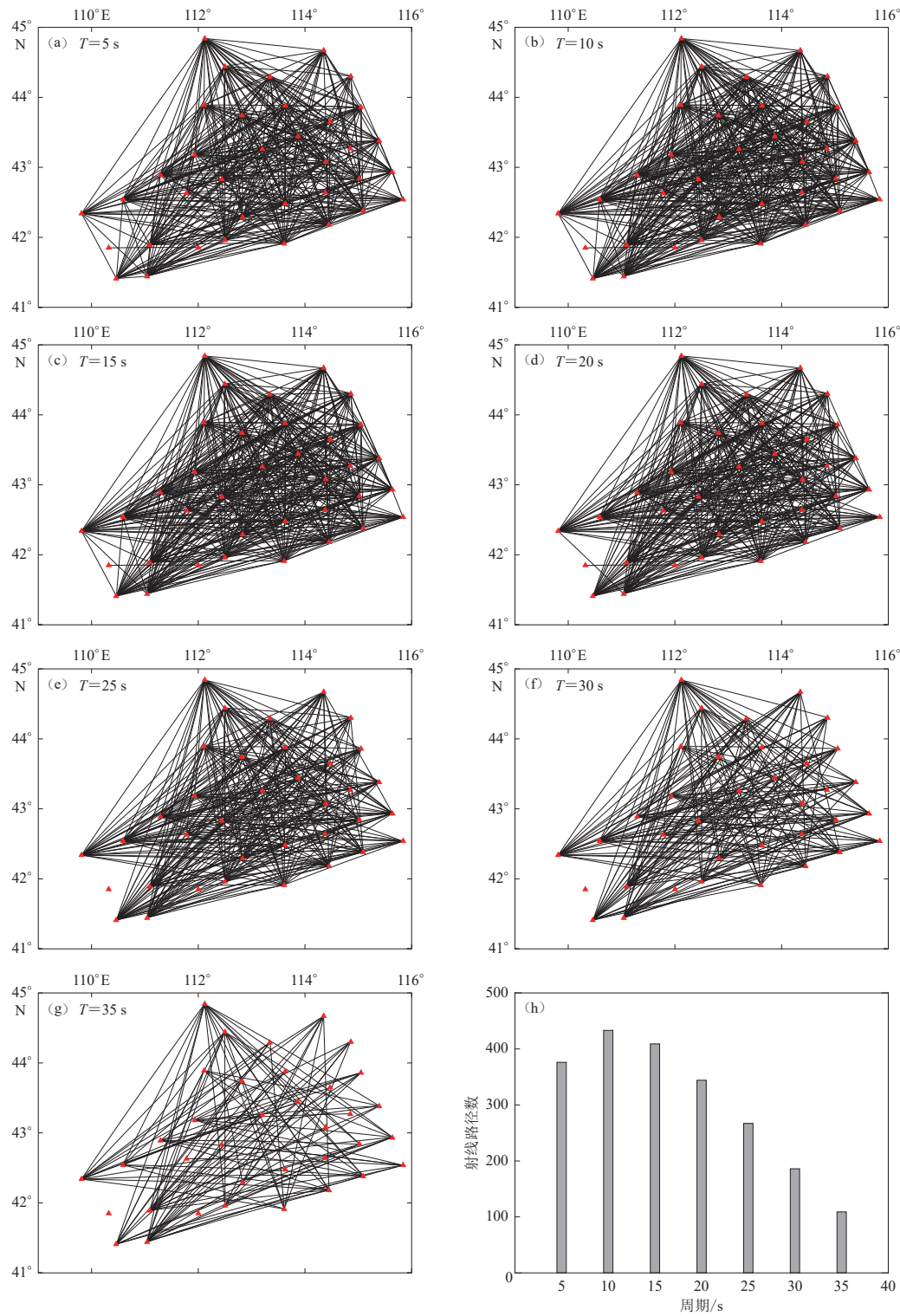


图 4 不同周期(5—35 s)(a-g)射线路径分布和各周期射线路径数目(h)

Fig. 4 The ray paths distribution and the number of ray paths (h) at differnt periods (5–35 s)(a–g)

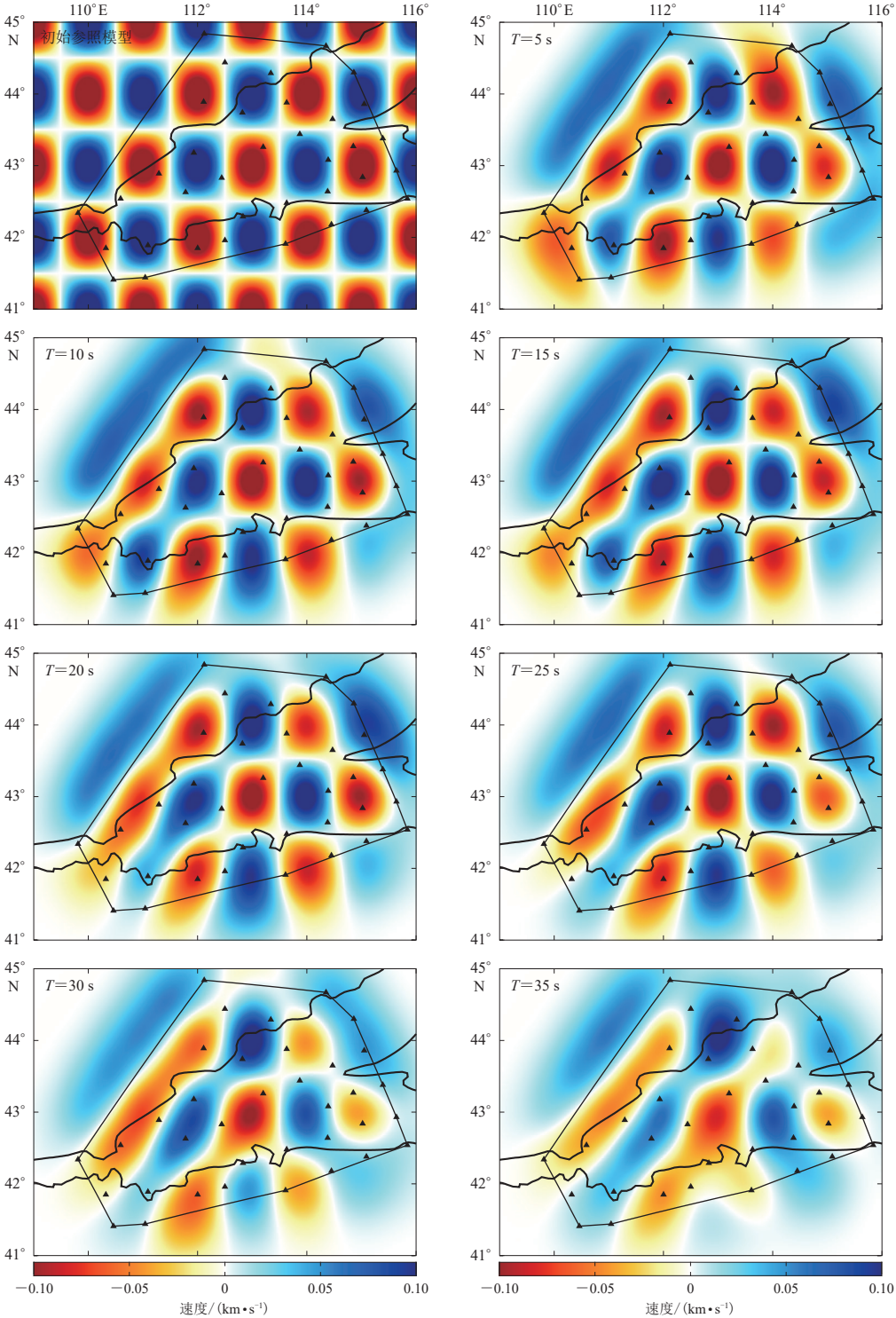


图 5 不同周期(5—35 s)相速度棋盘分辨率测试图

Fig. 5 Checkerboard resolution test of phase velocity for periods from 5 s to 35 s

$$M(m)=\frac{1}{\sigma_1^2N}\sum_{i=1}^N[\text{PH}_i(m)-\text{PH}_i^{\text{obs}}]^2, \tag{1}$$

式中, PH_i^{obs} 为观测到的第 i 个周期的相速度, $\text{PH}_i(m)$ 为 MCMC 方法生成的试验模型 m 第 i 个周期的相速度, N 为相速度测量的周期数. 由于数据集的不确定度 σ_1 通常难以确定, 因此我们将其作为未知参数处理, 在反演时也对其进行了反演. 对于给定的模型, 使用 Computer Programs in Seisology (Herrmann, Ammon, 2004) 中的方法来计算瑞雷波相速度.

我们假设了一个各向同性的速度模型, 并将每个台站下的一维速度模型分为三层: 沉积层、结晶地壳层和上地幔层. 假设沉积层内的 S 波速度 v_s 随深度线性增加, 则可以通过三个参数来确定沉积层内的 v_s : 顶部 v_s 、底部 v_s 和层厚 h . 沉积物中的平均沉积波速比 v_p/v_s 作为第四个参数. 初始沉积层厚度取自 CRUST 1.0 模型. 在沉积层中, v_p 由 v_s 和 v_p/v_s 的乘积计算, 密度 ρ 由 Gardner 定律 (Gardner *et al.*, 1974) 进一步计算:

$$\rho=1.74\sqrt[4]{v_p}. \tag{2}$$

在结晶地壳中, v_s 速度结构由 5 个参数表示, 即 4 个 B 样条和地壳厚度. 初始地壳厚度取自何静等 (2018) 基于接收函数的结果. 上地幔速度结构由 4 个 B 样条曲线定义. 在结晶地壳和上地幔中, v_p 和密度 ρ 根据 Brocher 定律 (Brocher, 2005) 计算:

$$v_p=0.9409+2.0947v_s-0.8206v_s^2+0.2683v_s^3-0.0251v_s^4; \tag{3}$$

$$\rho=1.6612v_p-0.4721v_p^2+0.0671v_p^3-0.0043v_p^4+0.000106v_p^5. \tag{4}$$

地壳和上地幔的初始 v_s 基于 PREM 模型 (Dziewonski, Anderson, 1981), 在 200 km 以下速度设定为常数. 本研究使用的瑞雷波相速度的最长周期为 30 s, 根据瑞雷波相速度对 S 波速度的敏感核 (图 6), 可以解析深度约 45 km 的速度结构. 但由于相速度对莫霍速度约束不好, 本研究区莫霍深度为 33—45 km (何静等, 2018), 所以我们只解析可靠的深度在 30 km 以上的地壳速度结构. 共使用 13 个参数确定每个台站下的一维速度结构, 这些参数的采样空间如表 1 所示.

对于每个台站, 首先随机生成 10 万个模

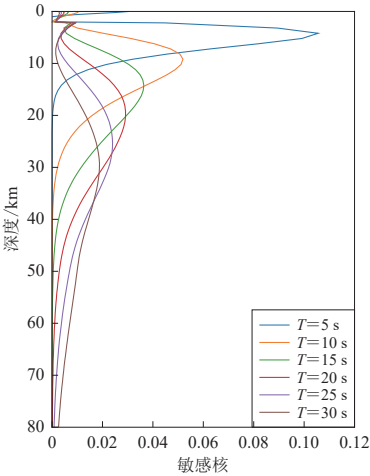


图 6 不同周期的瑞雷波相速度对 S 波速度的敏感核曲线
Fig. 6 Sensitivity kernels to S-wave velocity for Rayleigh wavephase velocities at different periods

表 1 模型参数的采样空间
Table 1 Sample ranges of model parameters

沉积层			地壳层厚度/km	4个B样条系数/(km·s ⁻¹)		不确定度 σ_1
厚度/km	顶、底部 v_s /(km·s ⁻¹)	波速比		地壳	上地幔	
$m_0\pm0.5^{①}$	0—3.0 ^②	1.8—3.0	$m_0\pm3^{③}$	3.1—4.4 ^④	4.0—5.4 ^⑤	10 ⁻⁴ —10 ⁻¹

注: 表中数据 ① 和 ② 参考 CRUST 1.0, ③ 参考何静等 (2018), ④ 和 ⑤ 参考 Dziewonski 和 Anderson (1981).

型. 根据式(1)计算模型的误差, 最后选择误差最小的 2 000 个模型来估计最终的反演结果, 即取这 2 000 个模型的平均值和标准差作为最终的一维模型和模型不确定度.

2 结果

2.1 背景噪声相速度结果

采用与棋盘分辨率试验相同的正则化参数和 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的反演网格进行 5—30 s 周期相速度的二维层析成像, 成像结果如图 7 所示.

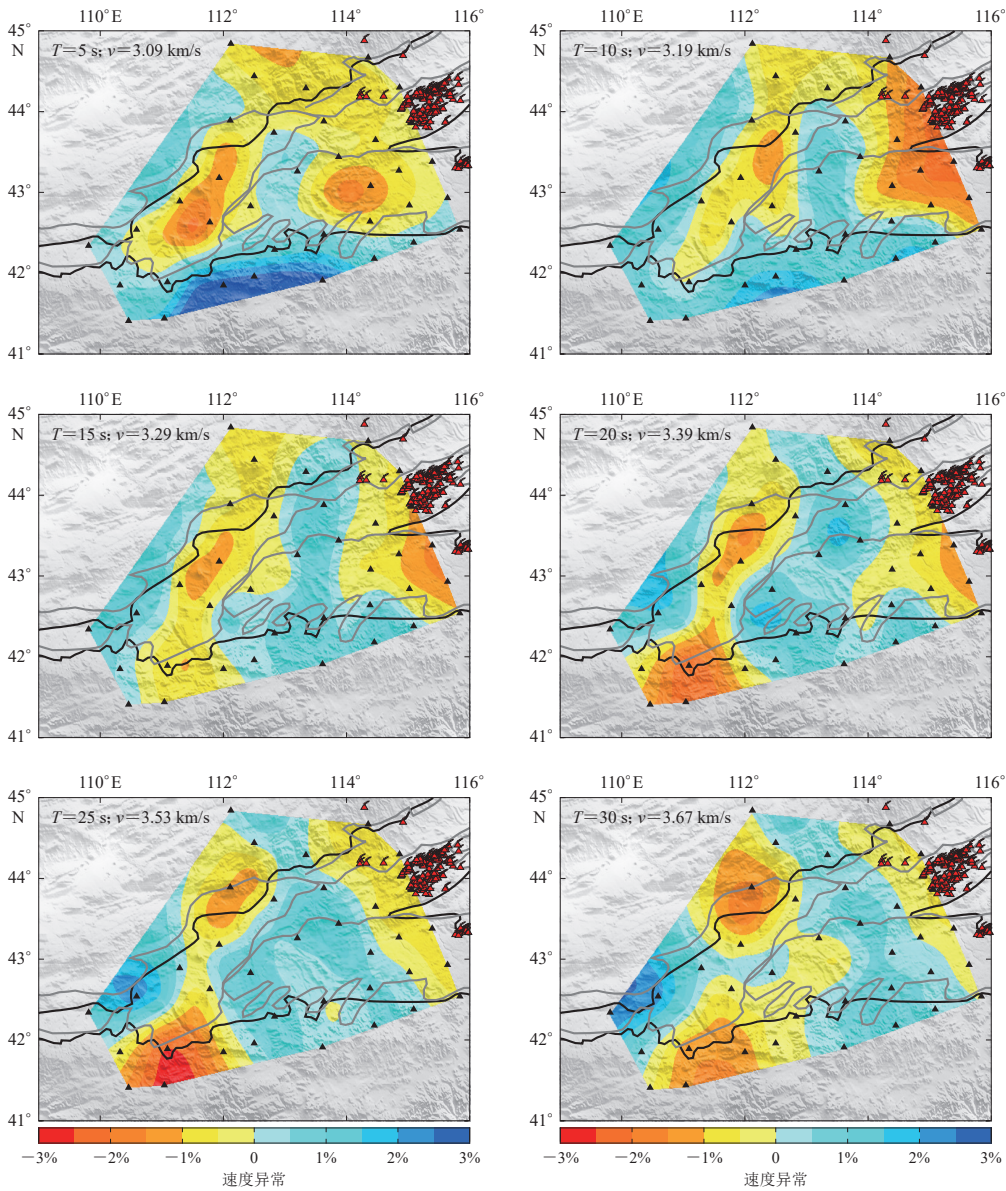


图 7 不同周期(5—30 s)相速度异常分布图, 左上方标注了周期 T 和平均速度 v

Fig. 7 Distribution maps of phase velocity anomaly for periods from 5 s to 30 s. The average velocity v of each period T is marked at the upper left

5—10 s 短周期的瑞雷波相速度反映的是本区域浅表(5—15 km)的 S 波速度的平均情况,与地表的沉积层和结晶基底的分布有关,与地表地质情况吻合得非常好.马尼特拗陷、腾格尔拗陷和乌兰察布拗陷呈低速,尤以腾格尔拗陷速度最低.苏尼特隆起、巴音宝力格隆起和温都尔庙隆起呈高速,其中温都尔庙隆起速度最高.

10—20 s 中周期的瑞雷波相速度主要反映了中下地壳(15—30 km)的 S 波速度结构,随着周期增大,相速度分布受浅表地质构造的影响逐渐减小,逐渐表现出与短周期不同的特性.阿巴嘎火山群所处的马尼特拗陷和达里诺尔火山群所处的腾格尔拗陷速度仍呈低速,且低速区域明显按照火山群区域分布.乌兰察布拗陷的低速异常区域逐渐向西南扩展至温都尔庙隆起.苏尼特隆起的高速异常区域逐渐增大,向北扩展至阿巴嘎火山群所处的马尼特拗陷和乌兰察布拗陷之间.

20—30 s 长周期的相速度异常主要反映下地壳底部至上地幔顶部(30—45 km)的 S 波速度结构特征,相速度分布受浅表地质构造的影响继续减小.研究区域内显著的低速异常仍集中在乌兰察布拗陷及其向西南扩展至温都尔庙隆起、阿巴嘎火山群和达里诺尔火山群.随着周期增大,乌兰察布拗陷向西南扩展至温都尔庙隆起的低速异常的范围及强度逐渐增大,阿巴嘎火山群和达里诺尔火山群低速异常的中心逐渐向东迁移.

2.2 三维 S 波速度结果

首先,我们采用第 1.3 小节所述的反演方法,反演每个台站下的一维 S 波速度剖面.图 8 为位于腾格尔拗陷的台站 NM38 的一维速度反演剖面.在莫霍面以上 S 波速度可能出现的范围很窄, S 波速度的后验概率密度函数显示了一个约束良好的 S 波速度剖面(图 8a).图 8b 说明了测量的相速度可以用最可能模型很好地拟合.然后,收集所有一维 S 波速度剖面,并进行线性插值,以建立从地表延伸至 30 km 深度的三维 S 波速度模型.

上地壳 5—15 km 最显著的特征是与地表地质情况明显相关的 S 波低速和高速(图 9a-c).

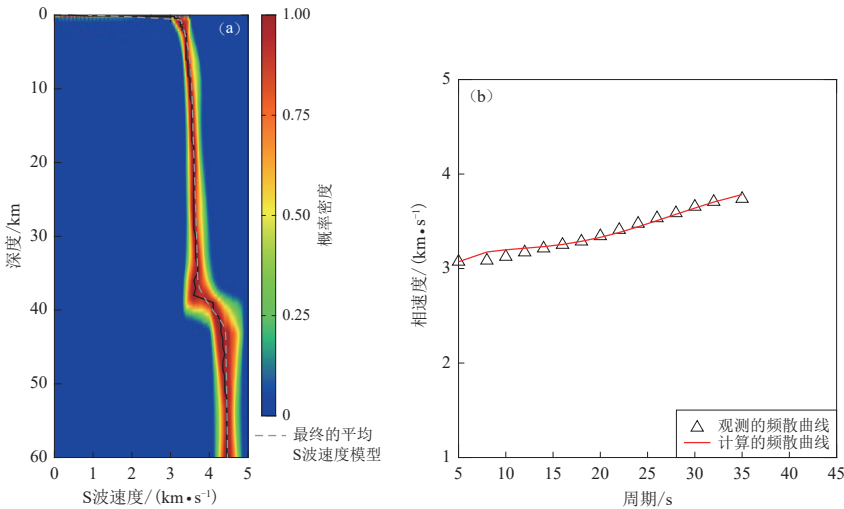


图 8 台站 NM38 一维反演实例

(a) 一维 S 波速度模型; (b) 瑞雷波相速度频散

Fig. 8 An example of inversion at station NM38

(a) The 1-D S wave velocity model; (b) The Rayleigh wave phase velocity dispersions

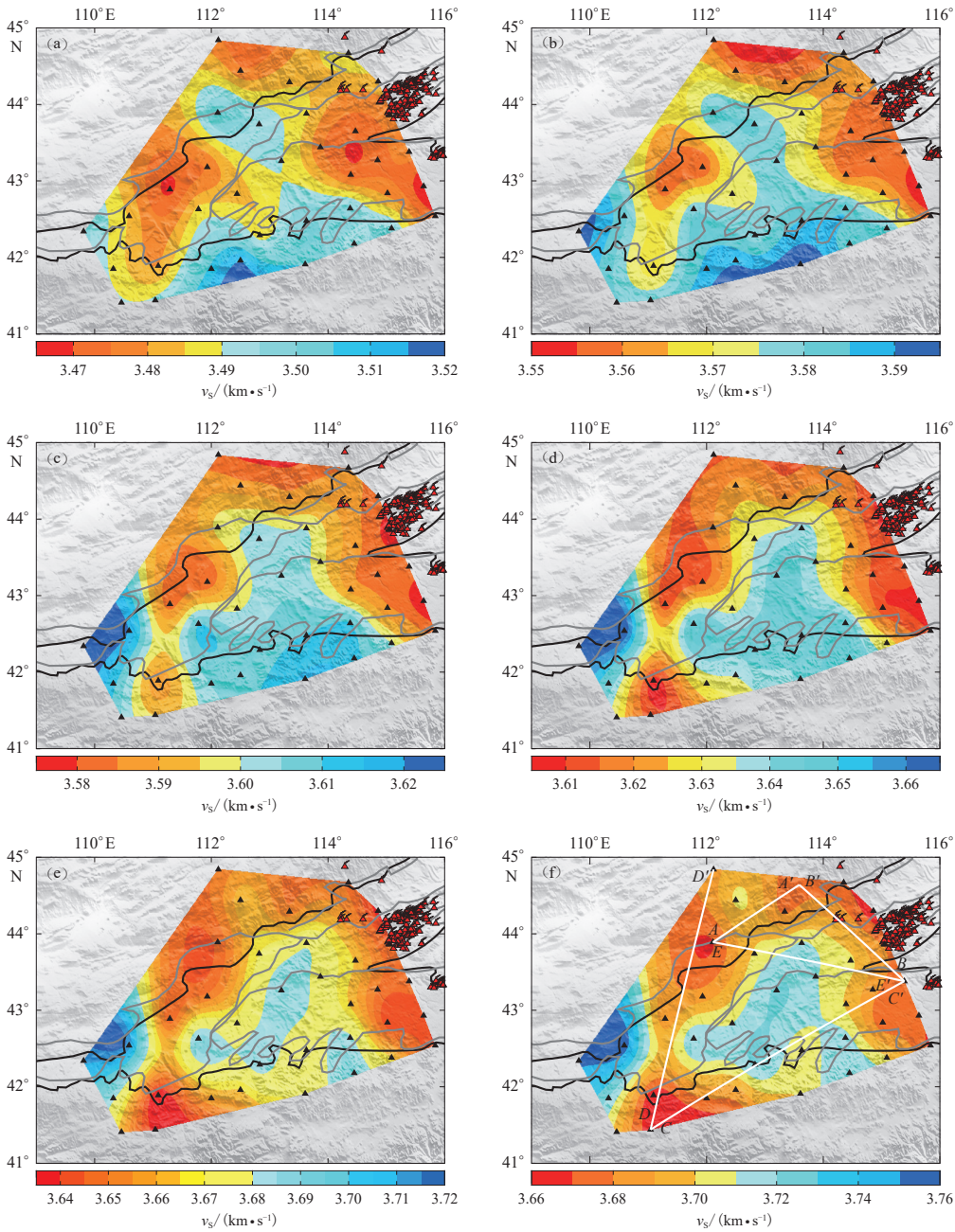


图 9 不同深度(1—30 km) S 波速度分布图

(a) 深度=5 km; (b) 深度=10 km; (c) 深度=15 km; (d) 深度=20 km; (e) 深度=25 km;
(f) 深度=30 km, 图中白线为图 10 中 S 波垂直剖面位置

Fig. 9 Maps of v_s at depths from 1 km to 30 km

(a) depth=5 km; (b) depth=10 km; (c) depth=15 km; (d) depth=20 km; (e) depth=25 km; (f) depth=30 km,
The white lines in Fig. (f) denote the locations of the vertical profiles presented in Fig. 10

从西向东, 首先在乌兰察布坳陷出现明显的低速; 第二个明显的低速出现在马尼特坳陷; 第三个明显的低速出现在腾格尔坳陷; 而温都尔庙隆起出现明显的高速。

中下地壳 15—30 km 的速度变化规律非常相似(图 9c-f)。在中下地壳, 可观察到四个主要的低速异常。第一个低速异常出现在位于巴音宝力格隆起的台站 NM25 附近; 第二个低速异常位于温都尔庙隆起的台站 NM29 附近; 第三个低速异常与阿巴嘎火山区附近的火山带有关; 第四个低速异常与达里诺尔火山区附近的火山带有关。随着周期的增大, 上述四个低速区的低速范围逐渐增大并且相连。

3 讨论

研究区从西北到东南存在阿巴嘎、贝里克和达里诺尔三个不同的火山岩区, 阿巴嘎和达里诺尔火山岩区广泛分布多期熔岩台地和数百个大小不一的火山锥。位于阿巴嘎和达里诺尔火山群之间的贝里克火山区最小, 未发现火山锥, 区内火山的岩性以玄武岩为主。这些火山岩区向北西方向延伸入蒙古国境内南部, 与达里甘嘎火山岩区相连。

S 波速度垂直剖面显示, 阿巴嘎和达里诺尔火山区从上地壳到中下地壳 S 波速度均呈 1% 左右的相对低速, 且下地壳 30 km 处存在明显低速区(图 10a, b, c, e)。结合何静等(2018)基于接收函数的结果, 显示这两个火山区 v_p/v_s 较高, 暗示这两个火山区下方的地壳存在部分熔融, 推测可能是下地壳的岩浆囊及上方岩浆通道。位于巴音宝力格隆起的台站 NM25 附近中下地壳存在明显低速异常区, 且该处 v_p/v_s 高, 推测其为部分熔融的地壳岩浆囊。但因为其上地壳不存在 S 波低速异常, 推测未在其上方地壳中形成岩浆上升通道(图 10a, d, e)。台站 NM25 附近的台站 NM26 下方的中上地壳呈低速, 且与台站 NM25 下方的地壳岩浆囊有一定连通性(图 10d), 结合该处较高的 v_p/v_s 比, 推测台站 NM26 下方中上地壳存在部分熔融, 岩浆来源可能来自于台站 NM25 下方的岩浆囊。而位于温都尔庙隆起的台站 NM29 附近下方中下地壳存在另一个显著的低速区(图 10c, d), 结合该处较高的 v_p/v_s 比, 推测其下方的中下地壳内存在一个范围很大的岩浆囊, 岩浆活动局限于中地壳以下, 这与该处地表没有火山岩出现一致。从 S 波速度平面分布图和速度剖面图还可以看出, 地壳内四个低速区之间有一定的连通性, 其中台站 NM25 附近低速区和两火山区内低速区的延伸趋势可以推测出阿巴嘎、达里诺尔和达里甘嘎火山区的地壳低速是相连的, 台站 NM29 附近低速向西南方向的乌兰哈达火山区延伸, 这暗示阿巴嘎、达里诺尔和乌兰哈达火山区的地壳低速也是相连的。

地壳速度结构方面, 中国地震科学台阵探测项目 ChinArray 三期一阶段在华北克拉通中部布置的流动台阵(Huang *et al.*, 2021), 该台阵覆盖了本台阵的大部分区域, 且分辨率与本台阵大体相同。Huang 等(2021)的 S 波速度结果与本文结果对比可以看出: ① 其在本研究区内的平均绝对 S 波速度与本研究基本相同, 由于受火山影响, 本研究区中下地壳 S 波速度绝对值与华北克拉通中部相比整体偏低; ② 其在本研究区内的 S 波速度扰动量与本研究也大致相同, 较华北克拉通中部小。NECESSArray 台阵覆盖了二连盆地 116°E 以东的区域, 本研究台阵覆盖了二连盆地 116°E 以西的区域, 两速度结果进行对比显示, NECESSArray 利用面波反演 S 波速度结果(Guo *et al.*, 2015, 2016, 2018; Li *et al.*, 2016)显示兴蒙带中下地壳以低速为主, 且在 32 km 深处变得最强烈, 其中达里诺尔火山区不是低速; NECESSArray 的噪声伴随成像结果(Liu *et al.*, 2017)显示兴蒙造山带包括达里诺尔火山区中下地壳均呈低速; 本台阵利

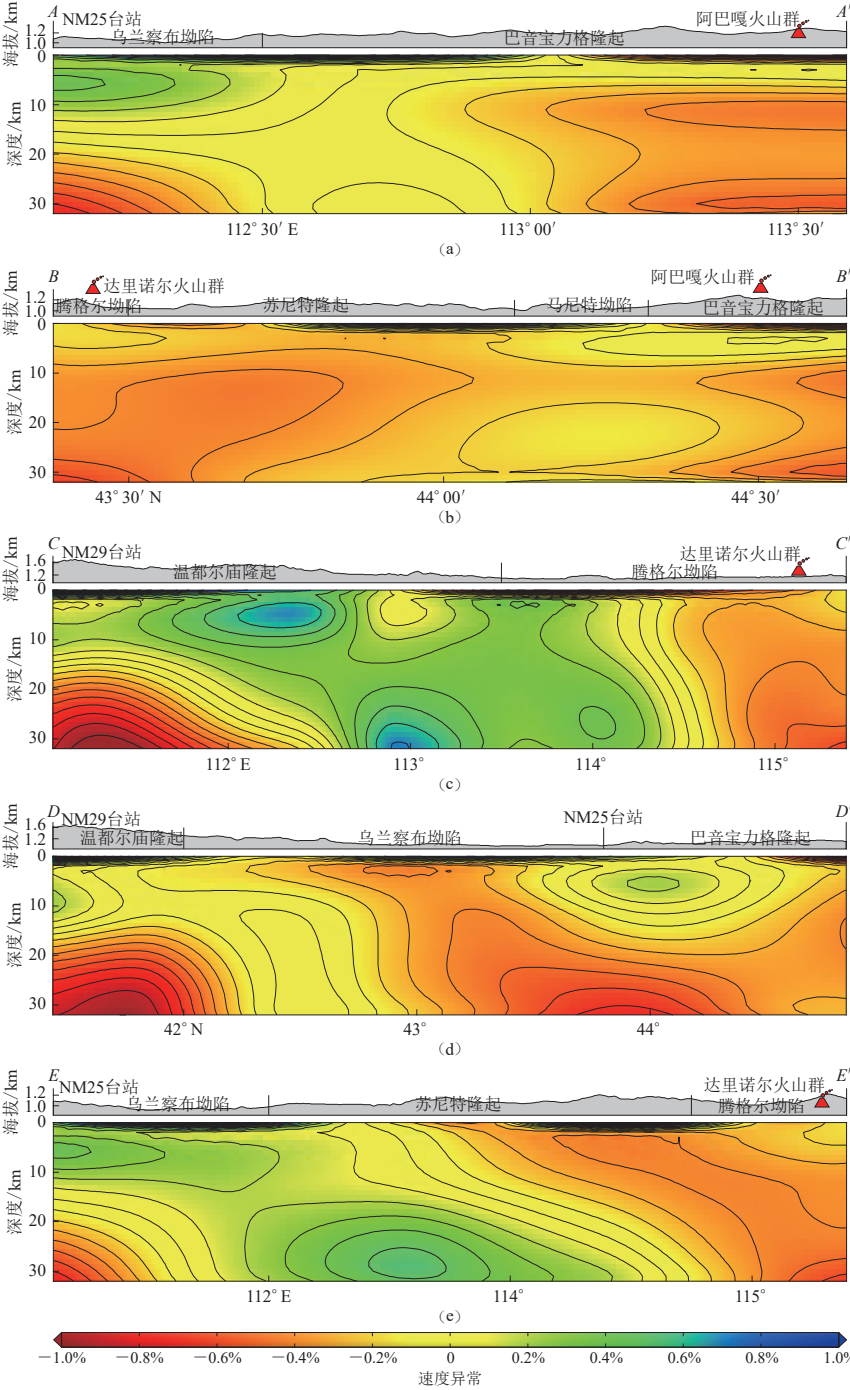


图 10 S 波速度模型垂直剖面(剖面位置见图 9f)

Fig. 10 Vertical sections of the S-wave velocity model, the location of which are indicated by white lines in Fig. 9f

用天然地震面波反演的 S 波速度结构(Hou *et al.*, 2023)显示阿巴嘎和达里诺尔火山区中下地壳均为低速异常; NECESSArray 噪声伴随成像和本台阵天然面波反演的 S 波速度结构与本研究结果更加相符, 由于 NECESSArray 台阵面波反演分辨率只能达到 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 且达里诺尔火山区位于台阵边缘, 所以达里诺尔火山区低速不能很好地分辨出来, 而 NECESSArray 噪声伴随成像得益于伴随层析成像的三维传播效应, 减少了波前愈合引起的误差, 分辨出了达里诺尔火山区中下地壳低速. Ye 等(2020)开展大地电磁探测, 获得了阿巴嘎和达里诺尔火山下方的电阻率结构, 在达里诺尔火山区下地壳圈定了两个低阻异常, 解释为下地壳岩浆囊的反映, 阿巴嘎火山区未发现明显低阻体. 本研究显示阿巴嘎火山群下地壳低速异常与达里诺尔火山群下地壳低速异常相连接, 达里诺尔火山群下地壳存在解释为岩浆囊的高导异常, 暗示两火山群岩浆具有同源性, 阿巴嘎火山区未发现高导体, 可能反映阿巴嘎火山岩浆囊的缺失或其尺度超出了分辨范围.

地幔速度结构方面, Huang 等(2021)的 S 波速度结果显示, 相较于中下地壳, 本研究区所在的阴山—燕山造山带上地幔顶部 40 km 左右低速异常明显增强. NECESSArray 的 S 波速度结果(Guo *et al.*, 2015, 2016, 2018)显示阿巴嘎和达里诺尔火山下方的低速异常延伸到约 160 km 深度. 大地电磁测深剖面结果(Ye *et al.*, 2020)显示地幔 50—150 km 左右存在大规模低阻区, 两个火山群下均存在与地幔相连接的岩浆通道, 这表明两个火山群都是地幔热物质的上涌作用形成的. 地球化学方面的研究认为阿巴嘎组钾质火山岩可能是金云母石榴子石二辉橄榄岩低程度部分熔融的产物, 而石榴子石将岩浆源区深度限定在了 80—120 km (张祥信等, 2019). 因此本文推测阿巴嘎和达里诺尔火山群的上地幔顶部存在 S 波速度低速异常, 该低速异常是火山群的岩浆源区. 强正阳和吴庆举(2019)在阿巴嘎火山区、达里诺尔火山区、台站 NM25 附近和台站 NM29 附近观测到 SKS 的无效分裂现象, 说明在此四处存在热地幔物质上涌. 何静等(2018)研究显示阿巴嘎和达里诺尔火山区薄地壳和高波速比值, 也支持了火山下方地幔岩浆铁镁质物质底侵作用侵入地壳这一推论. 体波成像研究结果(Zhang *et al.*, 2017)显示阿巴嘎火山与蒙古高原的达里甘嘎火山之间在过渡带间断面附近存在低速结构, 认为由于太平洋板块俯冲导致上地幔热物质上涌到岩石圈底部形成一个大的热源, 在岩石圈较薄的地区使得上地幔部分熔融进而诱发了地表岩浆活动.

综合以上分析, 我们推测阿巴嘎和达里诺尔火山群都是地幔热物质上涌作用形成的. 从地质构造上看, 这两个火山群分别位于北东向的二连浩特—贺根山缝合带和索伦山—林西缝合带与北西向阿巴嘎—赤峰断裂的交会处. 因此进一步可推测出由于新生代研究区整体处于伸展的构造背景, 火山区下方地幔热物质上涌沿缝合带或断层侵入地壳, 进而诱发了阿巴嘎和达里诺尔火山群的地表火山活动.

4 结论

基于兴蒙造山带阿巴嘎地区布设的内蒙古阿巴嘎台阵 36 个宽频带流动观测台站记录的连续背景噪声数据, 利用背景噪声成像反演了阿巴嘎地区地壳高分辨率三维 S 波速度模型. 本文的速度模型为研究兴蒙造山带板内火山在地壳内的岩浆结构和成因提供了新的证据. 结果显示, 兴蒙造山带新生代板内火山群(阿巴嘎、达里诺尔、达里甘嘎和乌兰哈达)下方的地壳和上地幔内存在低速体, 这些低速体之间存在一定的连通性. 阿巴嘎和达里诺尔火山区上中下地壳 S 波均呈 1% 左右相对低速, 且下地壳 30 km 处存在明显低速区. 结合基于接收

函数获得的此处的高波速比,推测可能是下地壳的岩浆囊及上方岩浆通道.综合前人研究结果,我们推测阿巴嘎和达里诺尔火山群的岩浆源区在上地幔顶部,并且进一步推测阿巴嘎和达里诺尔火山群的形成是源于火山区上地幔热物质上涌,沿缝合带或断层侵入地壳从而诱发了地表火山活动.

美国莱斯大学的李国良博士为本文提供了数据处理程序,审稿专家为本文提出了宝贵的意见,作者在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 陈生生,樊祺诚,赵勇伟,史仁灯. 2013. 内蒙古贝力克玄武岩地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, **29**(8): 2695–2708.
- Chen S S, Fan Q C, Zhao Y W, Shi R D. 2013. Geochemical characteristics of basalts in Beilike area and its geological significance, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **29**(8): 2695–2708 (in Chinese).
- 陈生生,樊祺诚,赵勇伟,隋建立. 2011. 内蒙古贝力克玄武岩台地火山地质及成因探讨[J]. 地震地质, **33**(2): 430–439.
- Chen S S, Fan Q C, Zhao Y W, Sui J L. 2011. Geological characteristics and genesis of basalt platform in Beilike, Inner Mongolia[J]. *Seismology and Geology*, **33**(2): 430–439 (in Chinese).
- 樊祺诚,赵勇伟,陈生生,李霓,隋建立. 2015. 大兴安岭—太行山重力梯度带以西的第四纪火山活动[J]. 矿物岩石地球化学通报, **34**(4): 674–681.
- Fan Q C, Zhao Y W, Chen S S, Li N, Sui J L. 2015. Quaternary Volcanic Activities in the West of the Daxing'anling–Taihangshan gravity lineament[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, **34**(4): 674–681.
- 龚辰,李秋生,叶卓,张洪双,李文辉,贺传松,李英康. 2016. 远震P波接收函数揭示的张家口(怀来)—中蒙边境(巴音温多尔)剖面地壳厚度与泊松比[J]. 地球物理学报, **59**(3): 897–911.
- Gong C, Li Q S, Ye Z, Zhang H S, Li W H, He C S, Li Y K. 2016. Crustal thickness and Poisson ratio beneath the Huailai-Bayinonder profile derived from teleseismic receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(3): 897–911 (in Chinese).
- 何静,吴庆举,张瑞青,雷建设. 2018. 利用接收函数研究兴蒙造山带阿巴嘎地区的地壳结构[J]. 地球物理学报, **61**(9): 3676–3688.
- He J, Wu Q J, Zhang R Q, Lei J S. 2018. Crustal structure beneath the Abaga area of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt using teleseismic receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(9): 3676–3688 (in Chinese).
- 何静,吴庆举,高孟潭,张瑞青,余大新,Ulziibat M, Demberel S. 2014. 利用接收函数方法研究蒙古中南部地区地壳结构[J]. 地球物理学报, **57**(7): 2386–2394.
- He J, Wu Q J, Gao M T, Zhang R Q, Yu D X, Ulziibat M, Demberel S. 2014. Crustal structure and Poisson ratio beneath the central and southern Mongolia derived from receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(7): 2386–2394 (in Chinese).
- 李文辉,高锐, Randy K, 李秋生,侯贺晟,李英康,张世红. 2014. 华北克拉通北缘(怀来—苏尼特右旗)地壳结构[J]. 地球物理学报, **57**(2): 472–483.
- Li W H, Gao R, Randy K, Li Q S, Hou H S, Li Y K, Zhang S H. 2014. Crustal structure of the northern margin of North China Craton from Huailai to Sonid Youqi profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(2): 472–483 (in Chinese).
- 李英康,高锐,姚丰涛,米胜信,李文辉,熊小松,高建伟. 2014. 华北克拉通北缘—西伯利亚板块南缘的地壳速度结构特征[J]. 地球物理学报, **57**(2): 484–497.
- Li Y K, Gao R, Yao Y T, Mi S X, Li W H, Xiong X S, Gao J W. 2014. Crustal velocity structure from the northern margin of the North China Craton to the southern margin of the Siberian plate[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(2): 484–497 (in Chinese).
- 罗修泉,陈启桐. 1990. 内蒙古新生代玄武岩年代学初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, **9**(1): 37–46.
- Luo X Q, Chen Q T. 1990. Preliminary study on geochronology for Cenozoic basalts from Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologi-*

- ca et Mineralogica, 9(1): 37–46 (in Chinese).
- 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 [J]. 地球物理学报, 57(7): 2077–2087.
- Pan J T, Li Y H, Wu Q J, Yu D X. 2014a. 3-D S-wave velocity structure of crust and upper-mantle beneath the northeast China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(7): 2077–2087 (in Chinese).
- 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 [J]. 地球物理学报, 57(3): 812–821.
- Pan J T, Wu Q J, Li Y H, Yu D X. 2014b. Ambient noise tomography in northeast China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(3): 812–821 (in Chinese).
- 潘佳铁, 吴庆举, 李永华, 余大新, 高孟潭, Ulziibat M, Demberel S. 2015. 蒙古中南部地区噪声层析成像 [J]. 地球物理学报, 58(8): 3009–3022.
- Pan J T, Wu Q J, Li Y H, Yu D X, Gao M T, Ulziibat M, Demberel S. 2015. Ambient noise tomography in central-south Mongolia[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(8): 3009–3022 (in Chinese).
- 漆家福, 赵贤正, 李先平, 杨明慧, 肖扬, 于福生, 董越崎. 2015. 二连盆地早白垩世断陷分布及其与基底构造的关系 [J]. 地学前缘, 22(3): 118–128.
- Qi J F, Zhao X Z, Li X P, Yang M H, Xiao Y, Yu F S, Dong Y Q. 2015. The distribution of Early Cretaceous faulted-sags and their relationship with basement structure within Erlian basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 118–128 (in Chinese).
- 强正阳, 吴庆举. 2019. 利用剪切波分裂研究内蒙古阿巴嘎地区上地幔各向异性 [J]. 地球物理学报, 62(7): 2510–2526.
- Qiang Z Y, Wu Q J. 2019. Upper mantle anisotropy beneath Abag area in Inner Mongolia from shear wave splitting[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(7): 2510–2526 (in Chinese).
- 强正阳, 吴庆举, 何静, 李永华. 2019. 内蒙古阿巴嘎地区地壳方位各向异性研究 [J]. 地球物理学报, 62(8): 2946–2958.
- Qiang Z Y, Wu Q J, He J, Li Y H. 2019. Crustal azimuthal anisotropy beneath Abag area in Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(8): 2946–2958 (in Chinese).
- 强正阳, 吴庆举, 李永华, 何静, 高孟潭, Ulziibat M, Demberel S. 2016. 蒙古中南部地区地壳各向异性及其动力学意义 [J]. 地球物理学报, 59(5): 1616–1628.
- Qiang Z Y, Wu Q J, Li Y H, He J, Gao M T, Ulziibat M, Demberel S. 2016. Crustal anisotropy beneath central-south Mongolia and its dynamic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(5): 1616–1628 (in Chinese).
- 王涛, 郑亚东, 张进江, 王新社, 曾令森, 童英. 2007. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义 [J]. 地质通报, 26(9): 1154–1166.
- Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, Wang X S, Zeng L S, Tong Y. 2007. Some problems in the study of Mesozoic extensional structure in the North China craton and its significance for the study of lithospheric thinning[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1154–1166 (in Chinese).
- 肖安成, 杨树锋, 陈汉林. 2001. 二连盆地形成的地球动力学背景 [J]. 石油与天然气地质, 22(2): 137–145.
- Xiao A C, Yang S F, Chen H L. 2001. Geodynamic background on formation of Erlian Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 22(2): 137–145 (in Chinese).
- 余大新, 吴庆举, 王鹏, 叶庆东, 潘佳铁, 高孟潭. 2016. 蒙古中南部地区基于天然地震的勒夫波相速度层析成像 [J]. 地震学报, 38(1): 41–52.
- Yu D X, Wu Q J, Wang P, Ye Q D, Pan J T, Gao M T. 2016. Love wave phase velocity tomography in the south-central Mongolia from earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 38(1): 41–52 (in Chinese).
- 余大新, 吴庆举, 李永华, 潘佳铁, 张风雪, 何静, 高孟潭, Ulziibat M, Demberel S. 2015. 蒙古中南部地区面波相速度层析成像 [J]. 地球物理学报, 58(1): 134–142.
- Yu D X, Wu Q J, Li Y H, Pan J T, Zhang F X, He J, Gao M T, Ulziibat M, Demberel S. 2015. Rayleigh wave tomography of the phase velocity in the central and southern Mongolia[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(1): 134–142 (in Chinese).
- 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 [J]. 地球物理学报, 56(8): 2690–2700.
- Zhang F X, Wu Q J, Li Y H. 2013. The traveltime tomography study by teleseismic P wave data in the Northeast China area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(8): 2690–2700 (in Chinese).
- 张风雪, 吴庆举, 李永华, 高孟潭, Ulziibat M, Sukhbaatar U, Demberel S. 2014. 蒙古中南部地区的上地幔 P 波速度结构 [J].

地球物理学报, **57**(9): 2790–2801.

- Zhang F X, Wu Q J, Li Y H, Gao M T, Ulziibat M, Sukhbaatar U, Demberel S. 2014. The P wave velocity structure of the upper mantle beneath the Central and Southern Mongolia area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(9): 2790–2801 (in Chinese).
- 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[J]. *地球物理学报*, **56**(12): 4084–4094.
- Zhang G C, Wu Q J, Pan J T, Zhang F X, Yu D X. 2013. Study of crustal structure and Poisson ratio of NE China by H - κ stack and CCP stack methods[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(12): 4084–4094 (in Chinese).
- 张祥信, 高永丰, 雷世和. 2019. 内蒙古中部苏尼特左旗地区阿巴嘎组火山岩地球化学特征及成因[J]. *地质通报*, **38**(4): 643–655.
- Zhang X X, Gao Y F, Lei S H. 2019. Geochemistry and petrogenesis of the volcanic rocks from the Abaga Formation in Sonid Left Banner, central Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, **38**(4): 643–655 (in Chinese).
- Afonso J C, Fullea J, Griffin W L, Yang Y, Jones A G, Connolly J A D, O'Reilly S Y. 2013. 3-D multiobservable probabilistic inversion for the compositional and thermal structure of the lithosphere and upper mantle. I: *A priori* petrological information and geophysical observables[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **118**(5): 2586–2617.
- Bao X W, Song X D, Li J T. 2015. High-resolution lithospheric structure beneath Mainland China from ambient noise and earthquake surface-wave tomography[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **417**: 132–141.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, Levshin A L, Lin F, Moschetti M P, Shapiro N M, Yang Y. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. *Geophys J Int*, **169**(3): 1239–1260.
- Bodin T, Sambridge M, Tkalcic H, Arroucou P, Gallagher K, Rawlinson N. 2012. Transdimensional inversion of receiver functions and surface wave dispersion[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **117**(B2): B02301.
- Brocher T M. 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(6): 2081–2092.
- Chen S S, Fan Q C, Zou H B, Zhao Y W, Shi R D. 2015. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of late Cenozoic basalts from the Abaga area, Inner Mongolia, eastern China[J]. *J Volcanol Geoth Res*, **305**: 30–44.
- Chu Z Y, Harvey J, Liu C Z, Guo J H, Wu F Y, Tian W, Zhang Y L, Yang Y H. 2013. Source of highly potassic basalts in northeast China: Evidence from Re-Os, Sr-Nd-Hf isotopes and PGE geochemistry[J]. *Chem Geol*, **357**: 52–66.
- Dziewonski A, Bloch S, Landisman M. 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **59**(1): 427–444.
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference Earth model[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **25**(4): 297–356.
- Fan Q C, Chen S S, Zhao Y W, Zou H B, Li N, Sui J L. 2014. Petrogenesis and evolution of Quaternary basaltic rocks from the Wulanhada area, North China[J]. *Lithos*, **206-207**: 289–302.
- Gardner G H F, Gardner L W, Gregory A R. 1974. Formation velocity and density: The diagnostic basics for stratigraphic traps[J]. *Geophysics*, **39**(6): 770–780.
- Guo Z, Chen Y J, Ning J Y, Yang Y J, Afonso J C, Tang Y C. 2016. Seismic evidence of on-going sublithosphere upper mantle convection for intra-plate volcanism in Northeast China[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **433**: 31–43.
- Guo Z, Wang K, Yang Y J, Tang Y C, 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]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **123**(3): 2410–2425.
- Guo Z, Chen Y J, Ning J Y, Feng Y G, Grand S P, Niu F L, 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[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **416**: 1–11.
- He J, Wu Q J, Sandvol E, Ni J, Gallegos A, Gao M T, Ulziibat M, Demberel S. 2016. The crustal structure of south central Mongolia using receiver functions[J]. *Tectonics*, **35**(6): 1392–1403.
- He J, Sandvol E, Wu Q J, Gao M T, Gallegos A, Ulziibat M, Demberel S. 2017. Attenuation of regional seismic phases (Lg

- and Sn) in Eastern Mongolia[J]. *Geophys J Int*, **211**(2): 979–989.
- He J, Li Y H, Sandvol E, Wu Q J, Du G B, Zhang R Q, Yu D X, Liu H L, Lei J S, Huang J P. 2019. Tomographic P_n velocity and anisotropy structure in Mongolia and the adjacent regions[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(4): 3662–3679.
- Herrin E, Goforth T. 1977. Phase-matched filters: Application to the study of Rayleigh waves[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **67**(5): 1259–1275.
- Herrmann R B, Ammon C J. 2004. *Surface Waves, Receiver Functions and Crustal Structure*[M/OL]. [2023–04–05]. https://www.eas.slu.edu/eqc/eqc_cps/CPS330/cps330c.pdf.
- Ho K S, Liu Y, Chen J C, Yang H J. 2008. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of late Cenozoic Abaga basalts, Inner Mongolia; Implications for petrogenesis and mantle process[J]. *Geochem J*, **42**(4): 339–357.
- Ho K S, Ge W C, Chen J C, You C F, Yang H J, Zhang Y L. 2013. Late Cenozoic magmatic transitions in the central Great Xing'an Range, Northeast China: Geochemical and isotopic constraints on petrogenesis[J]. *Chem Geol*, **352**: 1–18.
- Hou J, Wu Q J, Yu D X, Ye Q D. 2019. Crustal and upper mantle structure beneath Abaga area in Inner Mongolia revealed by Rayleigh-wave phase velocity tomography[J]. *Earthquake Science*, **32**(5/6): 207–220.
- Hou J, Wu Q J, Yu D X, Ye Q D, Zhang R Q. 2023. Study on surface-wave tomography in Abaga volcanic area, Inner Mongolia[J]. *Front Earth Sci*, **11**: 1131393.
- Huang X, Ding Z F, Ning J Y, Niu F L, Li G L, Wang X C, Xu X M. 2021. Sedimentary and crustal velocity structure of Trans-North China Orogen from joint inversion of Rayleigh wave phase velocity and ellipticity and some implication for Syn-rift volcanism[J]. *Tectonophysics*, **819**: 229104.
- Kennett B L N, Sambridge M S, Williamson P R. 1988. Subspace methods for large inverse problems with multiple parameter classes[J]. *Geophys J Int*, **94**(2): 237–247.
- Kononova V A, Kurat G, Embey-Isztin A, Pervov V A, Koeberl C, Brandstätter F. 2002. Geochemistry of metasomatised spinel peridotite xenoliths from the Dariganga Plateau, South-eastern Mongolia[J]. *Miner Petrol*, **75**(1): 1–21.
- Kuritani T, Kimura J I, Ohtani E, Miyamoto H, Furuyama K. 2013. Transition zone origin of potassic basalts from Wudalianchi volcano, northeast China[J]. *Lithos*, **156–159**: 1–12.
- Li G L, Niu F L, Yang Y J, Xie J. 2018. An investigation of time-frequency domain phase-weighted stacking and its application to phase-velocity extraction from ambient noise's empirical Green's functions[J]. *Geophys J Int*, **212**(2): 1143–1156.
- Li G L, Chen H C, Niu F L, Guo Z, Yang Y J, Xie J. 2016. Measurement of Rayleigh wave ellipticity and its application to the joint inversion of high-resolution S wave velocity structure beneath northeast China[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **121**(2): 864–880.
- Liu H L, Byrnes J S, Bezada M, Wu Q J, Pei S P, He J. 2022. Variable depths of magma genesis in the North China Craton and Central Asian Orogenic Belt inferred from teleseismic P wave attenuation[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **127**(3): e2021JB022439.
- Liu Y N, Niu F L, Chen M, Yang W C. 2017. 3-D crustal and uppermost mantle structure beneath NE China revealed by ambient noise adjoint tomography[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **461**: 20–29.
- Liu Z K, Huang J L, Yao H J. 2016. Anisotropic Rayleigh wave tomography of Northeast China using ambient seismic noise[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **256**: 37–48.
- Meng Q R, Hu J M, Jin J Q, Zhang Y, Xu D F. 2003. Tectonics of the late Mesozoic wide extensional basin system in the China-Mongolia border region[J]. *Basin Res*, **15**(3): 397–415.
- Qiang Z Y, Wu Q J, Li Y H, Gao M T, Demberel S, Ulzibat M, Sukhbaatar U, Flesch L M. 2017. Complicated seismic anisotropy beneath south-central Mongolia and its geodynamic implications[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **465**: 126–133.
- Rawlinson N, Sambridge M. 2004a. Multiple reflection and transmission phases in complex layered media using a multistage fast marching method[J]. *Geophysics*, **69**(5): 1338–1350.
- Rawlinson N, Sambridge M. 2004b. Wave front evolution in strongly heterogeneous layered media using the fast marching method[J]. *Geophys J Int*, **156**(3): 631–647.
- Tang Y C, Chen Y J, Zhou S Y, Ning J Y, Ding Z F. 2013. Lithosphere structure and thickness beneath the North China Craton from joint inversion of ambient noise and surface wave tomography[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **118**(5): 2333–2346.

- Tao K, Niu F L, Ning J Y, 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[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **398**: 48–57.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, **22**(6): 1069.
- Xu H R, Luo Y H, Yang Y J, Shen W S, Yin X F, Chen G X, Yang X Z, Sun S D. 2020. Three-dimensional crustal structures of the Shanxi rift constructed by Rayleigh wave dispersion curves and ellipticity: Implication for sedimentation, intraplate volcanism, and seismicity[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(11): e2020JB020146.
- Ye G F, Fu H, Jin S, Wei W B. 2020. Magnetotelluric study of the mechanism of the Abaga and Dalinor volcanic groups in Central Inner Mongolia, China[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **308**: 106570.
- Zhang F X, Wu Q J, Grand S P, Li Y H, Gao M T, Demberel S, Ulziiibat M, Sukhbaatar U. 2017. Seismic velocity variations beneath central Mongolia: Evidence for upper mantle plumes?[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **459**: 406–416.
- Zhang R Q, Wu Q J, Sun L, He J, Gao Z Y. 2014a. Crustal and lithospheric structure of Northeast China from S-wave receiver functions[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **401**: 196–205.
- Zhang S H, Gao R, Li H Y, Hou H S, Wu H C, Li Q S, Yang K, Li C, Li W H, Zhang J S, Yang T S, Keller G R, Liu M. 2014b. Crustal structures revealed from a deep seismic reflection profile across the Solonker suture zone of the Central Asian Orogenic Belt, northern China: An integrated interpretation[J]. *Tectonophysics*, **612-613**: 26–39.
- Zhao Y W, Fan Q C, Zou H B, Li N. 2014. Geochemistry of Quaternary basaltic lavas from the Nuomin volcanic field, Inner Mongolia: Implications for the origin of potassic volcanic rocks in Northeastern China[J]. *Lithos*, **196-197**: 169–180.
- Zou H B, Reid M R, Liu Y S, Yao Y P, Xu X S, Fan Q C. 2003. Constraints on the origin of historic potassic basalts from northeast China by U-Th disequilibrium data[J]. *Chem Geol*, **200**(1/2): 189–201.