



## 索伦-西拉木伦缝合带中段及周边区域面波层析成像

冯 梅, 安美建, 侯贺晟, 范桃园, 臧虎临

### The Lithospheric Structure of the Middle Solonker-Xar Moron Suture by Surface-wave Tomography

FENG Mei, AN Meijian, HOU Hesheng, FAN Taoyuan, and ZANG Hulin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2022.061>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于面波频散的三维横波速度方位各向异性层析成像方法

Method on 3D Tomography of S-wave Velocity Azimuthal Anisotropy by Using Surface-wave Dispersion Curves

CT理论与应用研究. 2020, 29(4): 381–397

#### 潜水波层析成像速度建模技术在鄂尔多斯黄土塬区的应用研究

Diving Wave Tomography and Reflection Tomography for PSDM Velocity Model Building of Complex Depth Imaging in Loess Tableland Area of Western Edge of Ordos Basin

CT理论与应用研究. 2021, 30(4): 417–424

#### 基于三维层状介质模型地震层析成像正演网格研究

The Study of Seismic Tomography Forward Grid Based on 3D Layered Media Model

CT理论与应用研究. 2018, 27(1): 1–8

#### 改进Moser方法二维初至波走时层析成像正演研究

Forward Modeling of 2D First Arrival Traveltime Tomography Using Moser Method

CT理论与应用研究. 2018, 27(1): 9–17

#### 天然源面波技术在城市工程勘察中的应用效果分析

The Application of Natural Source Surface Wave Technology in Urban Engineering Investigation

CT理论与应用研究. 2020, 29(6): 651–662

#### 黏弹性介质中瑞雷波有限差分数值模拟与波场分析

Finite-difference Modeling and Wave-field Analysis of Rayleigh Surface Wave in Viscoelastic Media

CT理论与应用研究. 2019, 28(2): 153–166



关注微信公众号，获得更多资讯信息

冯梅, 安美建, 侯贺晟, 等. 索伦-西拉木伦缝合带中段及周边区域面波层析成像[J]. CT理论与应用研究, 2023, 32(1): 1-14. DOI:[10.15953/j.ctta.2022.061](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2022.061).

FENG M, AN M J, HOU H S, et al. The Lithospheric Structure of the Middle Solonker-Xar Moron Suture by Surface-wave Tomography[J]. CT Theory and Applications, 2023, 32(1): 1-14. DOI:[10.15953/j.ctta.2022.061](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2022.061). (in Chinese).

# 索伦-西拉木伦缝合带中段及周边区域面波层析成像

冯梅<sup>✉</sup>, 安美建, 侯贺晟, 范桃园, 咸虎临

中国地质科学院, 北京 100037

**摘要:** 索伦-西拉木伦缝合带中段及周边区域先后经历了古生代古亚洲洋闭合、中生代蒙古鄂霍茨克洋闭合和中新生代太平洋俯冲等构造复合叠加, 导致该区深部构造异常复杂。本研究从该区近年来累积的宽频地震探测资料的地震面波和环境噪音互相关格林函数中提取瑞雷波群速度频散, 并据此反演区域尺度的三维横波速度。结果发现: 区域地壳厚度横向变化不大, 松辽盆地和下辽河盆地地壳比大兴安岭薄, 地壳厚度与地形吻合表明这些地区基本达到重力均衡状态; 而辽东隆起和渤海湾盆地地壳厚度与地形高度呈反相关, 表明这些地区可能仍处于构造改造过程中。在80 km深度之下, 波速分布则呈现与索伦-西拉木伦缝合带走向近似平行的东西向展布。以索伦-西拉木伦缝合带为界, 南北两侧横波速分布复杂程度明显不同且南侧的东西两部分复杂程度也不同。这些结果表明区域受太平洋俯冲体系冲破程度存在明显差异, 同时索伦-西拉木伦缝合带以南可能仍有古亚洲洋板片残留。

**关键词:** 面波层析成像; 三维横波速度; 索伦-西拉木伦缝合带; 华北克拉通; 中亚造山带东段

DOI:[10.15953/j.ctta.2022.061](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2022.061) 中图分类号: P 315 文献标识码: A

索伦-西拉木伦缝合带被认为是中国东北微陆块群与华北克拉通的拼合界限, 代表了古亚洲洋最终闭合位置<sup>[1-3]</sup>。该缝合带中段将中亚造山带东段(含大兴安岭和松嫩地块)与华北克拉通(含燕山造山带)连在一起(图1)。大兴安岭和松嫩地块是古生代古亚洲洋构造域、中生代蒙古-鄂霍茨克洋构造域、以及中新生代环太平洋构造域相关作用叠加最显著的地区<sup>[4]</sup>(图1), 华北克拉通东部(含燕山造山带)则以与中新生代环太平洋构造域密切相关的构造作用为主<sup>[5-9]</sup>。可见, 索伦-西拉木伦缝合带南北两侧经历的构造演化有所不同。如今, 中国南北重力梯度带贯穿了缝合带两侧, 在北部表现为大兴安岭与松辽盆地的盆山转换, 在南部为太行山与华北平原的盆山转换<sup>[10]</sup>。这表明, 缝合带南北两侧在较近时期受到了相似的构造改造(图1)。

复杂的构造作用使得索伦-西拉木伦缝合带中段及周边区域不但地表构造复杂, 其深部结构也非常复杂。前人在该区大量的二维深部探测研究<sup>[11-16]</sup>明确了, 华北克拉通东北部的岩石圈受到了与中新生代环太平洋俯冲相关的减薄改造。但在此之前古生代末期, 该区曾经历了古亚洲洋的闭合, 当时板块聚合的痕迹是否在深部还存在? 后续中新生代构造作用对其改造情况如何? 显然, 只有对区域岩石圈结构的横向和垂向变化特征进行三维揭示, 才有助于对这些科学问题的回答。

为解决以上科学问题, 本文对索伦-西拉木伦缝合带中段及南北两侧区域进行三维地震面波层析成像, 获取该区岩石圈三维横波速度模型, 并对该区深部构造特征和成因机制等进行一定的分析。

## 1 数据及分析处理

影响面波层析成像可靠性的因素包括数据方位分布的均匀性以及面波信号频率含量。数据方位分布越均匀, 横向分辨率越好, 可靠性越高。高频(短周期)面波信号频率主要分辨浅部, 而

收稿日期: 2022-04-10。

基金项目: 国家自然科学基金(利用高覆盖宽频地震观测研究南美大陆岩石圈三维结构(41974051)); 中国地质调查项目(黑吉蒙关键区带深部地质调查(DD20221643-2); 松嫩地块及周缘关键区带深部地质调查(DD20190010))。

低频（长周期）可分辨深部。最低信号频率越低（周期越长），垂向探测深度越大。为了提高研究区面波层析成像分辨率和探测深度，我们既对具有低频（长周期）信号特征的地震事件面波波形资料进行分析，也对具有高频（短周期）信号特征的环境噪音面波资料进行了提取。由于可提取的最长周期地震面波信号受制于其最大传播距离（即震中距或台站间距）<sup>[17]</sup>，所以这里以研究区为中心，分析了更大范围内的地震台站记录，以期获得更多长周期面波资料。

本研究主要使用位于华北和东北地区的 IRIS 共享地震台站、中国地震台阵中心共享的移动地震台站<sup>[18]</sup>（彩色三角）以及中国地震局数据备份中心<sup>[19]</sup>提供的固定地震台站（黑三角）在 2003 年至 2011 年期间的记录的地震波形资料（图 2（a））。其中绿三角为中国科学院地质与地球物理研究所 2003 年以来在华北克拉通北部部署的不同批次的宽频地震探测剖面（NCISP）<sup>[20-21]</sup>；浅蓝三角为 2009 年至 2011 年中国地震局地球物理研究所在中国华北克拉通与兴蒙-吉黑造山带部署的地震观测台阵<sup>[22-23]</sup>；蓝三角为中国地震局与美国和日本联合开展的 NECESSAarray 台阵<sup>[24]</sup>。由于本文主要利用基阶瑞雷面波群速度作为观测进行三维横波速度层析成像，所以只对垂直分量的面波波形资料进行分析。

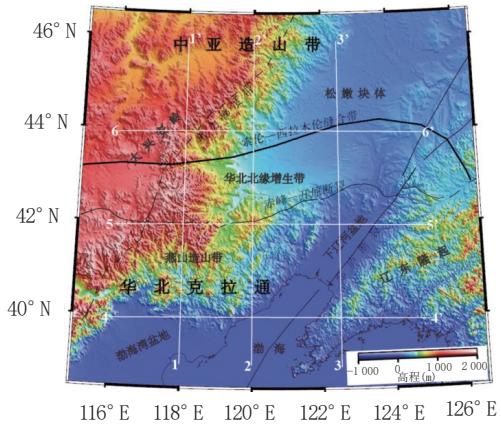
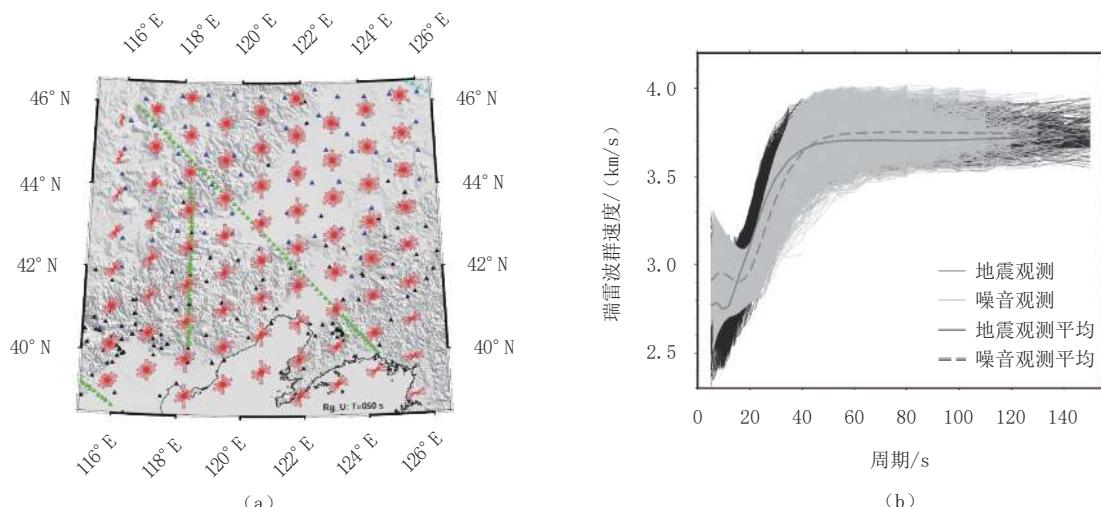


图 1 研究区地形和构造简图。白线表示图 6 显示的横波速度剖面位置

Fig. 1 Topography and tectonics of the study area. White lines indicate locations of S-velo-city transects to be shown in Fig. 6



注：(a) 地震台站（三角）以及 50 s 周期的数据方位分布（玫瑰图）；(b) 地震事件（细黑线）和环境噪音（细灰线）波频散观测及其区域平均（粗灰线、虚线）。玫瑰图中扇形半径与每 30° 方位间隔内的观测数量成正比；扇形半径越长，该方位观测数量越大；玫瑰图越接近于圆形，表示观测数据方位分布越均匀。

图 2 地震台站和数据分布情况  
Fig. 2 Seismic stations and data

对于地震事件面波资料，为了提高数据利用率，并没有单纯依据震级对数据进行筛选，而是同时考虑震级、震中距和信噪比等因素综合对数据进行筛选。在利用环境噪音提取面波格林函数时，我们对研究区内所有连续记录时长不少于 1 年的降采样波形数据进行台站间互相关计算，提取各台站间的格林函数。在互相关计算之前进行数据预处理<sup>[25]</sup>：对原始波形剔除仪器响应、去趋势和去平均处理，然后采样率降至 1 sps 并按每个文件为 4 h 的时长进行截取；对截取的波形先后进行时间域移动绝对平均均一化（running-absolute-mean normalization）以及频率域白噪音化处理对地震事件

信号进行了压制。提取到的台站间格林函数在时间域通常表现出一定的对称性，对应于噪音面波的正向和反向传播。这里把正向和反向格林函数的叠加作为台站间平均格林函数。对这些地震事件面波和从环境噪音中提取的台站间格林函数，借助地震学程序包<sup>[26]</sup>中有关软件，利用多重滤波及相位匹配滤波技术进行面波频散曲线的提取。所有面波频散分析均采用自动处理与人工质量核查相结合的方式，以确保观测数据质量的可靠性。

图3显示了两条相似路径的地震面波和噪音格林函数的时频分析实例。提取到的两条频散曲线具有较高的相似度，但也存在一些差别，两条频散相同周期之间波速的细小差别可能与两者的传播路径长短（即采样区域）不完全一致有关。地震面波频散周期范围（< 55 s）略小于噪音格林函数（< 70 s），可能与该地震震级不大有关。

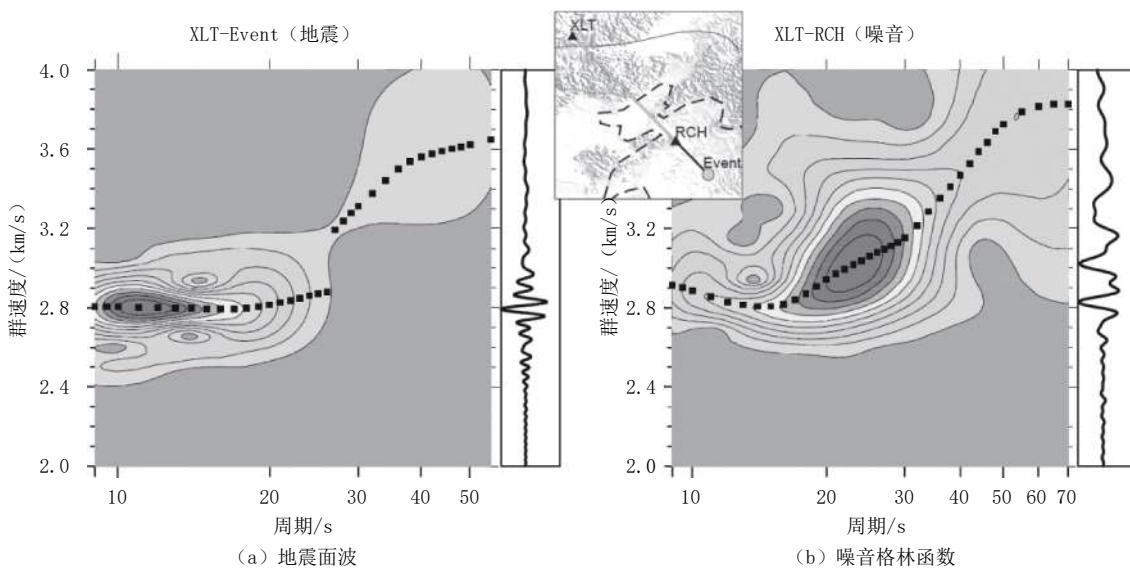


图3 相似路径(插图)的地震面波(a)和噪音格林函数(b)时频分析实例

Fig. 3 Example of group-velocity dispersion analysis for earthquake surface wave (a) and noise Green's function (b) with similar travelling paths (inset map)

密集震群波形可能相互叠加，较近地震或较强噪音也可影响目标事件波形，震中位置可能存在较大偏差，这些因素均可影响面波拾取的可靠性。所以我们计算了所有观测群速度各自周期的均值和标准差 $\sigma$ ，然后剔除所有在相应周期两倍标准差( $\pm 2\sigma$ )之外的观测群速度。

震中距或台站间距不同的观测中提取的面波频散曲线的频率含量不同，所以不同频率(周期)数据在整个研究区的分布也不相同。图2(a)显示周期50 s的观测数据的方位分布玫瑰图。该图显示穿过每个 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 二维网格内的所有观测数据以每 $30^\circ$ 方位间隔的50 s观测数据量。图中相应方位扇形半径与数据量成正比，最短半径对应的观测数据量为1，最大半径对应的观测数据量为588，各方位平均观测数量为70。玫瑰图越接近于圆形，该网格点的数据方位分布越均匀(即各个方位均有一定量的观测)。为了避免过密的玫瑰图之间的重叠，图2(a)只抽样显示部分网格点的玫瑰图。由于部分移动观测台站以线状分布且地震多来自于西太平洋俯冲带，致使所有数据中南北和北东方位的观测分布优于北西方位(玫瑰图半径在北西方向偏短)，但多数玫瑰图在各个方位均有观测数据。所以研究区观测数据量和方位分布整体较好，为本文的三维层析成像提供了可靠的数据保障。

图2(b)显示了偏差小于两倍标准差的地震事件面波(细黑线)和噪音面波(细灰线)频散曲线及各自平均观测曲线(粗黑线和虚线)。整体而言，周期在5~150 s之间的瑞雷波群速度观测数量比较可观，周期大于100 s的面波观测中地震事件的贡献更大(细黑线多于细灰线)，但周期小于40 s的面波观测中环境噪音的贡献更大(细灰线多于细黑线)。地震事件和噪音的平均频散曲线整体

相差不大，表明两种观测能较一致地反映区域平均结构，两者细小的差别主要源于环境噪音面波可靠性更好、且采样区域小于地震事件面波采样区域，这样更有助于反映小尺度结构变化。故此本文同时利用地震事件面波和环境噪音面波观测进行三维层析成像，既可以提取可靠的区域平均结构、也可以获取反映更多细节的精细结构。

## 2 三维地震面波层析成像方法

面波层析成像反演三维结构通常是先对各周期频散依次进行基于水平离散网格点的二维面波层析成像，以此获得每个离散网格的区域化面波频散；然后分别对各网格的区域化频散曲线进行一维横波速度垂直剖面反演；最后将所有一维横波速度剖面按照二维网格位置拼合成为三维横波速度模型<sup>[27-29]</sup>。但是由于面波观测对于区域的覆盖通常并不均匀，部分地区观测覆盖密集而其他地区观测覆盖可能比较稀疏，使得面波层析成像反演通常是一个病态反演问题。对于病态反演问题，通常需要引入正则化约束来稳定反演并生成三维空间分布趋于合理的模型参数<sup>[30-31]</sup>。

但是上述先二维再一维的面波层析成像方法只能先引入横向（水平方向）、再引入纵向（垂直方向）的正则化约束，这可能会引起最终三维模型横向和垂向结构的不协调。所以，我们采用了由 Feng 等<sup>[32]</sup>首先提出后经 An 等<sup>[33]</sup>和 Feng 等<sup>[34]</sup>改进以后的单步直接利用面波频散观测反演三维横波结构的面波层析成像方法，该方法允许同时加入横向和纵向正则化约束以生成具有水平和垂直方向协调的三维横波速度结构模型。此外，该方法还允许使用更接近于真实的三维横波速度参考模型，可以大大降低层析成像反演问题的非线性程度，该方法在三维面波各向异性研究中也已经被成功应用<sup>[35]</sup>。

地震面波频散观测（群速度或相速度）与横波速度  $\beta$  存在非线性关系，牛顿迭代法是求解非线性方程的重要方法之一，具有二阶收敛性，可以使一个非线性反演仅仅几次迭代迅速收敛至最优解<sup>[36]</sup>，故这里采用牛顿迭代方法。每次迭代中，三维面波层析成像反演问题可以表示为<sup>[32]</sup>：

$$\begin{pmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{G} \\ \lambda \mathbf{L} \end{pmatrix} \Delta \boldsymbol{\beta}, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{d}$  是与面波频散相关的观测数据矢量； $\mathbf{G}$  是包含面波传播路径和面波与横波速度偏微分等信息的大型稀疏的观测矩阵； $\Delta \boldsymbol{\beta}$  是相对于三维参考模型  $\boldsymbol{\beta}_0$  的横波速度扰动矢量，是待求未知量； $\mathbf{L}$  是正则化约束矩阵； $\lambda$  是平衡正则化与观测在反演中权重的系数，这里由 Morozov 的差异原则来选取<sup>[37]</sup>。对公式（1）进行反演可以得到横波速度相对于参考模型的扰动  $\Delta \boldsymbol{\beta}$ ，然后可得反演模型  $\boldsymbol{\beta}$  ( $= \boldsymbol{\beta}_0 + \Delta \boldsymbol{\beta}$ )。将模型  $\boldsymbol{\beta}$  作为新的参考模型，利用公式（1）进行下一次迭代反演，可以得到更好的解。

层析成像中最常用的正则化约束是使模型参数一阶梯度（经向、纬向和垂向）最小的平坦约束（flatness）<sup>[31]</sup>。但最新研究表明，当参考模型中存在不可靠不连续面时，平坦约束会阻碍观测对该不可靠结构的矫正<sup>[38]</sup>。所以这里采用了 An<sup>[38]</sup>建议的基于参考模型的自适应平坦约束  $\mathbf{L}$ ，该正则化约束可以明显改善反演模型中不连续面附近的横波速度结构，更快得到理想结果。一维面波反演测试表明，使用非常差的初始参考模型时，使用普通平坦时需要 10 多次迭代才能收敛，而自适应平坦约束则只需 4 次迭代即收敛，且最终结果更接近于真实模型。

越接近于真实的初始三维参考模型可以极大地降低层析成像问题的非线性程度，降低收敛至最优解所需的迭代反演次数。为此我们采用了 CRUST 1.0<sup>[39]</sup>的地壳横波速度和 IASP 91<sup>[40]</sup>的地幔横波速度构建了三维参考模型。由于远震接收函数对于波速界面的敏感性<sup>[41]</sup>比地震面波优越<sup>[42-43]</sup>，我们依据区域内前人接收函数得到的地壳厚度值<sup>[44-46]</sup>对参考模型中相应位置的莫霍面上下的壳幔速度进行了调整。

为了确保反演结果不受误差过大观测的影响，在每一次迭代反演之前，我们首先进行先导反演，将拟合误差大于两倍拟合误差均方根的观测去除，然后再进行正式迭代反演。在采用更接近于真实的三维参考模型、可更好改善模型的自适应正则化约束、快速收敛的牛顿迭代方法共同作用下，第

2 次迭代反演模型相对于第 1 次迭代反演模型的改善不再显著, 所以这里我们采用第 2 次迭代反演模型作为最终结果。

根据地震面波观测数量、空间分布情况以及周期范围等信息, 研究区被离散划分为经向和纬向均为  $0.3^\circ$  间隔的水平网格。考虑到地震面波对横波速度的垂向分辨率随着深度的增加而减弱<sup>[47]</sup>, 垂向网格间距设置为随深度增加而增加。深度  $0\sim 30$ 、 $30\sim 80$ 、 $80\sim 200$  以及  $200\sim 260$  km 的垂向网格间距分别为 3、5、10 和 20 km。

### 3 分辨率评估

检测板测试是评估层析成像空间分辨率的简单而有效的手段。在检测板测试中, 首先创建具有一定结构特征的波速模型, 再用实际的观测矩阵  $\mathbf{G}$  进行正演计算合成理论观测数据; 然后在合成数据中加入一定的随机误差并进行反演计算; 最后把反演模型与输入模型进行对比, 根据给定结构特征的恢复程度来判断观测系统对模型的空间分辨能力。以往二维加一维的分步层析成像方法通常只对不同周期面波进行二维横向分辨率测试, 这里采用的单步直接三维层析成像方法则可以同时对横向和垂向分辨率进行检测, 所以我们在输入模型中设置了正负波速异常在横向和垂向均交替分布的三维检测板样式(图 4), 波速异常幅值设为  $\pm 0.4$  km/s。合成数据随机误差幅值取值于真实反演中不同周期的拟合误差(平均约为 0.08 km/s)。

不同周期地震面波对横波速度的敏感度(分辨能力)随深度的变化而变化<sup>[47]</sup>, 所以这里设置了 3 组尺寸不同的检测板分别进行了测试, 结果见图 4。图 4(a) 显示了检测板异常尺寸在经度、纬度和深度方向上分别为  $1.2^\circ \times 1.2^\circ \times (15\sim 40)$  km 的输入模型及其反演输出结果。对比 15 km 深度的水平切片的输入与输出模型, 可以看出反演模型很好地恢复了检测板样式, 表明反演模型在该深度对该尺寸异常具有可靠分辨率。

从剖面 1-1' 垂直切片来看, 反演模型在 60 km 及以下深度的分辨率变得非常有限(图 4(a) 剖面 1-1' 虚线之下的部分)。可见反演模型在地壳内部对尺寸为  $1.2^\circ \times 1.2^\circ \times (15\sim 40)$  km 的异常具有较可靠的分辨率。图 4(b) 所示的检测板异常尺寸为  $1.8^\circ \times 1.8^\circ \times (20\sim 60)$  km, 略大于图 4(a) 所示检测板异常尺寸。深度 30 km 的水平切片和剖面 2-2' 的垂直切片显示, 反演模型在约 100 km 以上(图 4(b) 剖面 2-2' 虚线之上的部分)对该尺寸异常有较可靠的分辨率。而当检测板异常尺寸进一步加大至  $2.4^\circ \times 2.4^\circ \times (30\sim 70)$  km 时(图 4(c)), 深度 80 km 的水平切片上的检测板能被很好地恢复。剖面 3-3' 的垂直切片上的检测板形态虽然在深部被一定程度地扭曲, 但正负相间的分布特征直到 160 km 深度依然能被较好地恢复。所以反演模型对于尺寸为  $2.4^\circ \times 2.4^\circ \times (30\sim 70)$  km 的异常的分辨率可延伸至 160 km 深度。

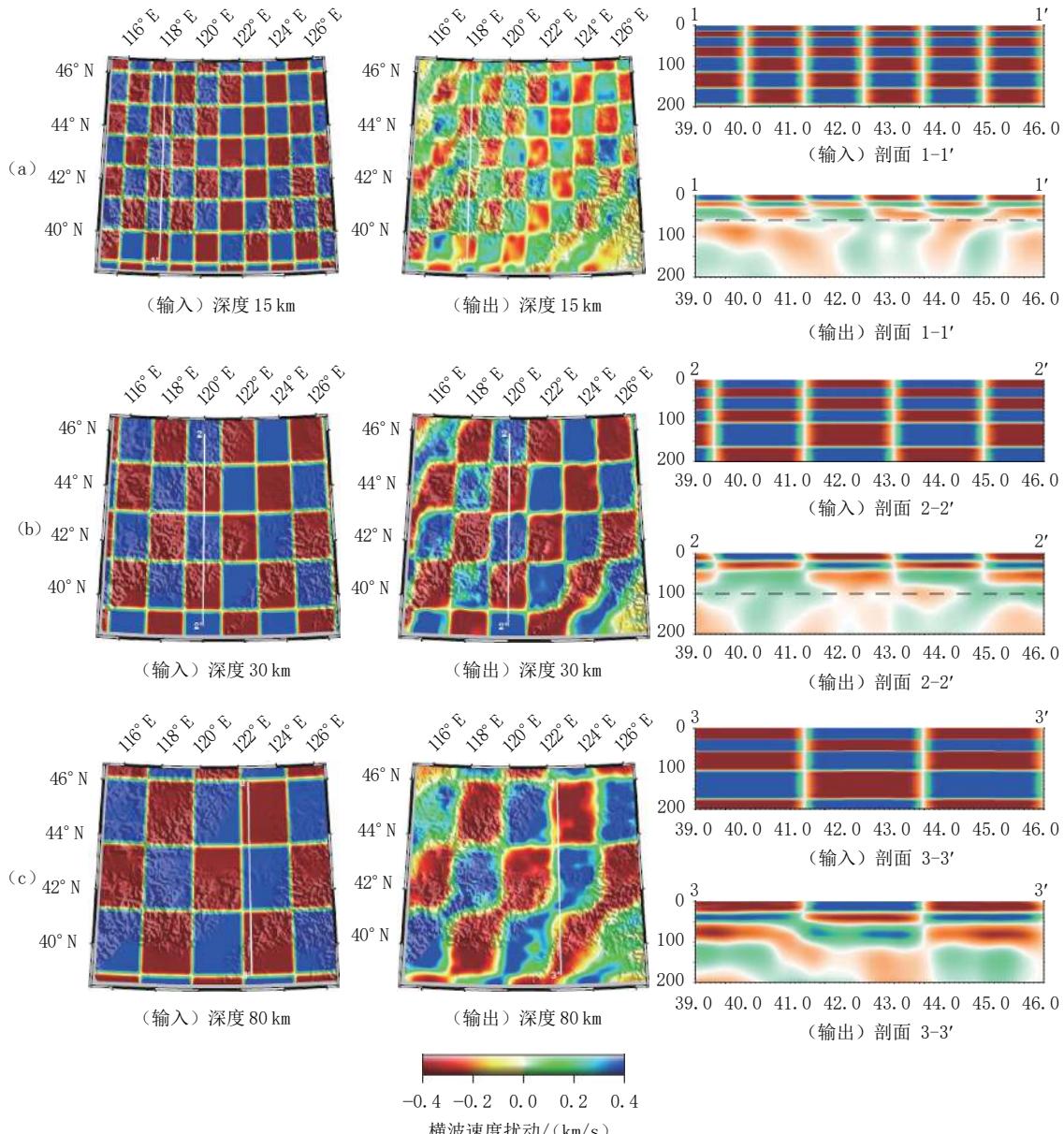
对比图 4 三组不同异常尺寸的检测板测试结果可以看出, 反演模型的空间分辨率随深度的增加而减小。此外, 3 组测试的垂直剖面结果还显示, 反演结果对输入模型异常幅值存在不同程度的低估(即比输入模型异常幅值偏小), 而且低估程度随深度的增加而加重。所以在后续反演结果的讨论中, 我们将侧重关注波速异常极性(正或负)的空间分布, 而不是波速异常绝对值大小。

### 4 结果及讨论

图 5 显示实际反演得到的三维横波速度模型在 9、35、80 和 120 km 深度的水平切片。由于面波自身特性和垂向平坦正则化的作用, 反演模型中一个深度的波速也包含了一定的相邻深度的信息。研究区内的渤海湾盆地和松辽盆地分别为新生代和中生代沉积盆地<sup>[48]</sup>, 沉积物厚达 10 km<sup>[49]</sup>, 所以图 5(a) 中 9 km 深度横波速度异常形态分布主要反映沉积层在横向分布的变化。沉积物通常比基岩表现出更低的横波速度<sup>[50]</sup>, 所以低速越强表明沉积更厚。

从图 5(a) 波速切片可以看出, 最低的速度(红色)集中分布在松辽盆地东北部(松嫩地块), 下辽河盆地和渤海湾盆地, 而且整体呈北东向条带状分布。盆地的沉积分布走向与盆地两侧的大兴

安岭、太行山和辽东隆起（长白山）的走向基本平行，也与西太平洋俯冲前缘基本平行。暗示该区地壳浅部结构可能与西太平洋俯冲的直接或远程作用相关。



注：(a) 异常尺寸为  $1.2^\circ \times 1.2^\circ \times (15 \sim 40 \text{ km})$ ；(b) 异常尺寸为  $1.8^\circ \times 1.8^\circ \times (20 \sim 60 \text{ km})$ ；(c) 检测板尺寸为  $2.4^\circ \times 2.4^\circ \times (30 \sim 70 \text{ km})$ 。注为“深度”和“剖面”的子图分别表示不同深度水平切片和穿过不同剖面的垂直切片。水平切片中白线为相应垂直剖面位置。

图 4 三维检测板分辨率测试结果

Fig. 4 Results of 3D checkerboard resolution tests

研究区平均地壳厚度介于 30~40 km 之间<sup>[12, 23, 44~46, 51~52]</sup>，所以图 5 (b) 中 35 km 横波波速切片主要反映下地壳或上地幔顶部结构，其中，高速可能意味着该位置处于地幔中，而低速意味着仍处于地壳中，或者说，波速高值（蓝色）指示地壳厚度偏薄，波速低值（绿色）指示地壳厚度偏厚。图 5 (b) 的典型特征是，整个松辽盆地和下辽河盆地的波速高于其西侧的大兴安岭和燕山造山带，表明负地形的松辽盆地和下辽河盆地地壳厚度比大兴安岭和燕山造山带薄，或者说，地壳底界面与地形基本呈镜像关系。这表明该地区的地壳大体处于重力均衡状态。但研究区东南地区却有所不同，比如辽东隆起虽然地形偏高但波速也偏高（地壳可能偏薄），而渤海湾盆地虽然地形很低但波速也偏低（地

壳偏厚), 即暗示这两个地区地壳尚未达到重力均衡状态, 这可能意味着对渤海湾和辽东隆起的最后一次构造改造较晚且较强, 致使地壳尚未调整到均衡状态。此外, 该深度波速异常形态仍然以北东向展布为特征, 与 9 km 深度所反映的上地壳顶部波速展布特征相似, 表明研究区整个地壳由浅及深均受到同一个动力环境的较彻底的改造。

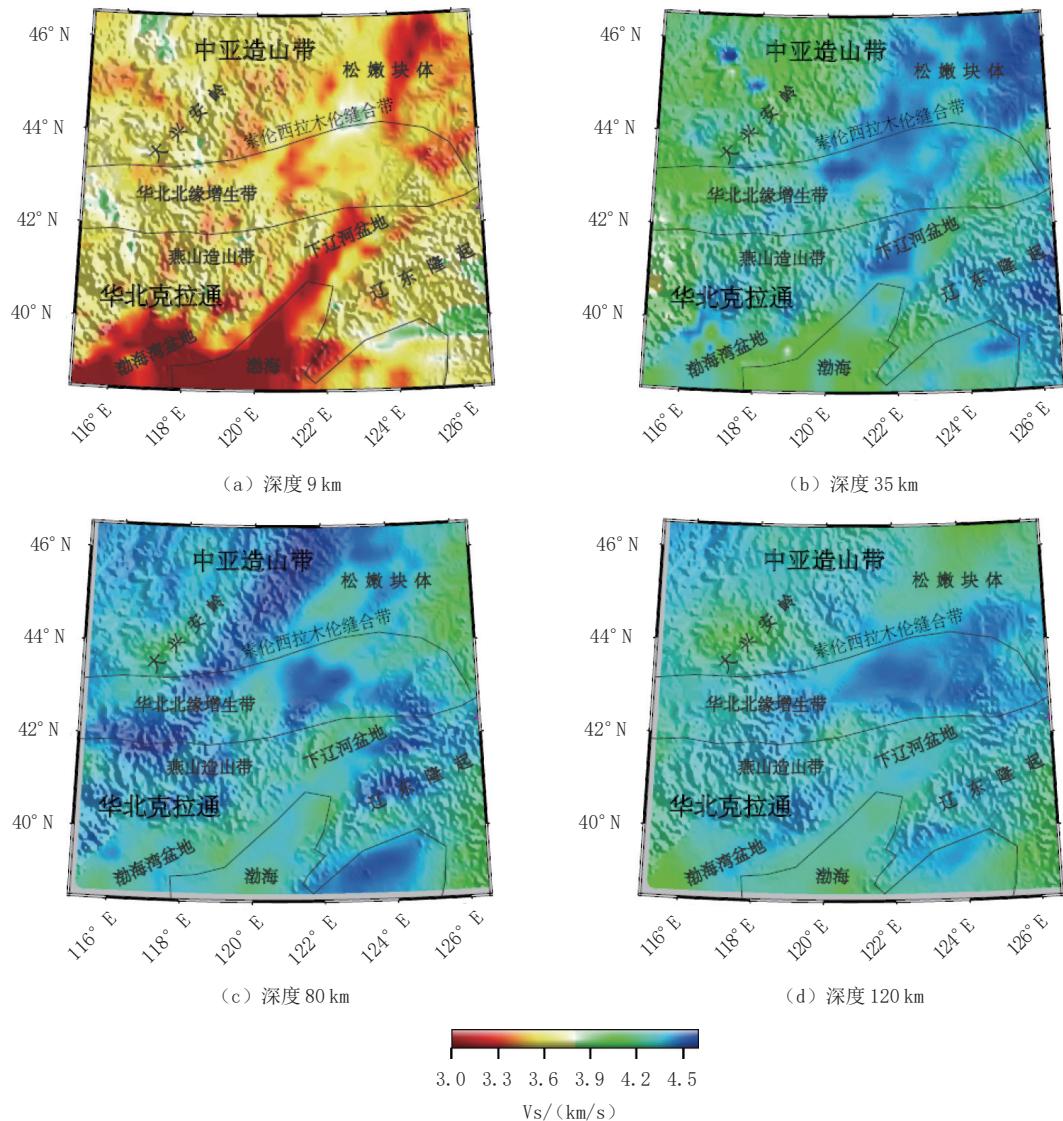


图 5 不同深度横波速度水平切片

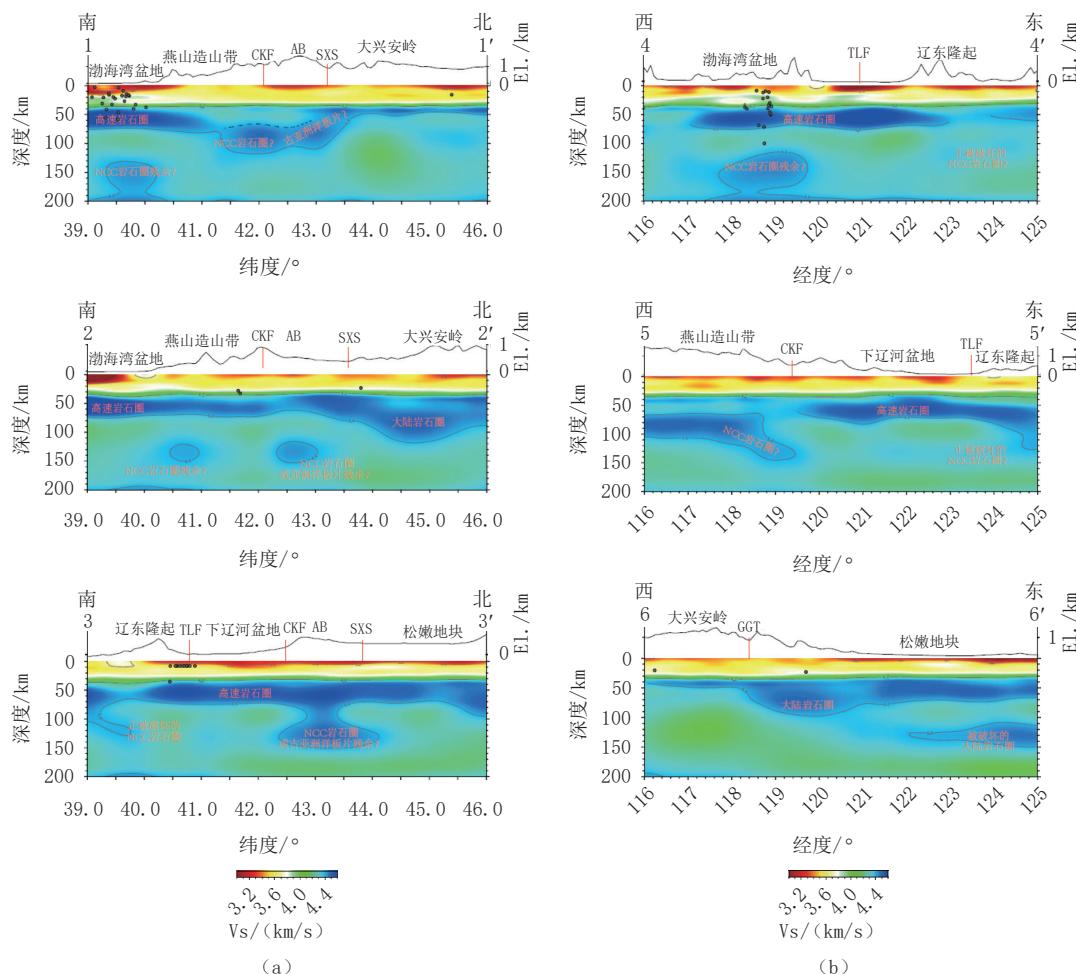
Fig. 5 Horizontal slices of S-wave velocity at different depths

地震热学<sup>[53]</sup>和地震 S 波接收函数<sup>[12, 22, 54]</sup>研究结果显示研究区岩石圈厚度横向变化显著, 基本介于 70~200 km 之间, 所以 80 km 和 120 km 深度横波速度切片主要反映岩石圈上地幔结构。在上地幔中, 岩石圈物质通常表现出比软流圈物质更高的波速, 所以这两个深度的高速和低速分别指示处于岩石圈和软流圈之中。对于同一深度而言, 高速越强指示岩石圈强度越大(或岩石圈越厚), 反之越弱(或岩石圈越薄)。80 km 深度切片(图 5(c))显示索伦-西拉木伦缝合带北侧沿大兴安岭与松嫩地块之间的盆山转换带存在非常明显的北东向展布高速带, 预示该区岩石圈较强或者较厚, 及该区域上地幔可能经历了与地壳相关的北东向构造改造。

但研究区中的华北克拉通部分在该深度并没有表现出稳定克拉通所具有的横向均匀分布的高速特征, 却表现出复杂的异常分布特征, 不但在渤海湾盆地和下辽河盆地表现出了相对低速特征, 而

且在索伦-西拉木伦缝合带以南地区（华北克拉通东北部及华北北缘增生带）的高速体均呈边界模糊的块状分布，不再具有明显的北东向展布特征。这表明华北克拉通东北部及其北缘增生带的上地幔强度或岩石圈厚度存在明显横向不均匀性，且上地幔与地壳可能经历了程度不同的构造变形和改造。到 120 km 深度，研究区的高速主要以成片的形式分布在索伦-西拉木伦缝合带以南地区，且该高速片区的北边界几乎与索伦-西拉木伦缝合带的东西走向一致。表明该深度上地幔的构造展布特征与西太平洋俯冲体系相关的近北东向展布的特征完全不同，暗示华北北缘增生带及其附近上地幔在中新世代的改造可能不彻底，致使仍保留了部分古生代末期古亚洲洋闭合时的构造形态或痕迹。

图 6 (a) 显示了 3 条垂直于主要构造线的南北向剖面 (1-1', 2-2' 和 3-3') 的横波速度垂向切片。由南向北，3 条剖面均依次穿过了燕山造山带，华北北缘增生带 (AB)，索伦-西拉木伦缝合带 (SXS)，大兴安岭或松嫩地块。如果以 3.3 km/s 等速线代表与沉积相关的低速层底界面，那么图 6 (a) 各剖面中低速层分布与研究区主要沉积盆地对应良好。依据低速层的厚度可以看出渤海湾盆地具有最厚的沉积覆盖物 (剖面 1-1' 和 2-2')，其次是下辽河盆地 (剖面 3-3')，松辽盆地西部沉积相对最薄 (剖面 3-3')。此外，新沉积物的压实和固结成岩效果一般比老沉积物差，所以新沉积物通常比老沉积物具有更低的横波速度。而图 6 (a) 显示的新生代渤海湾盆地沉积层的低速强度的确比中生代松辽盆地大，证实我们成像结果的合理性和可靠性。



注：剖面顶部为放大的地形；黑圈为 1964 年以来 EHB 目录中在该区的地震<sup>[35]</sup>；地表红竖线为构造或缝合线；CKF = 赤峰-开原断裂；TLF = 鄂尔多斯断裂带；SXS = 索伦-西拉木伦缝合带；AB = 华北大北缘增生带；GGT = 重力梯度带；NCC = 华北克拉通。

图 6 横波速度垂向切片 (剖面位置见图 1 白线所示)

Fig. 6 Vertical slices of S-wave velocity (transect locations are indicated as white lines in Fig. 1)

接收函数得到的台站下方莫霍面位置大致与本文三维模型中的 4.2 km/s 等速面深度接近。如果以该等速面作为地壳与地幔的分界面, 那么图 6(a) 中 3 条剖面穿过区域的莫霍面起伏并不显著, 地壳厚度大致在 31~35 km 之间变化, 这与前人通过接收函数提取的区域地壳厚度在 30~40 km 之间变化的结果基本吻合<sup>[12, 23, 44~46, 51~52]</sup>。图 6(a) 所示的地壳厚度的细小变化也呈现出一些区块特征, 比如剖面 2-2' 显示地形最低的渤海湾盆地的地壳厚度在各自的剖面上不仅不是最薄的, 反倒是较厚的, 最厚处几乎达到了约 40 km。在地形较高的辽东隆起的地壳厚度并不厚, 与区域平均的 33 km 基本持平(剖面 3-3')。这意味着渤海湾盆地和辽东隆起这两个区域的地壳尚未达到重力均衡状态, 即该区可能经历了较近的构造改造。图 6(a) 中黑色圆圈表示 1964 年以来 EHB 目录中在该区的地震震中<sup>[55]</sup>。地震的发生是对区域构造活动或岩石圈变形调整的直接反映。图 6(a) 中地震主要发生在渤海湾盆地和辽东隆起附近, 且部分地震发生在深部的岩石圈上地幔内, 证实该区正在经历岩石圈尺度的构造改变, 这与我们通过层析成像结果得出的该区正在经历或经历过较新的构造改变的结论非常吻合。

图 6(a) 中各剖面地壳以下的上地幔波速表现出明显的分段和分层特征。从岩石圈向软流圈过渡地震波速会明显下降, 所以岩石圈地幔中最大波速负梯度所在深度通常被当作地震学岩石圈与软流圈分界面 (LAB)<sup>[56~57]</sup>; 也有部分研究采用经验波速值的等速面对 LAB 进行定义<sup>[58~59]</sup>。如果将最大负梯度(与图中 4.4 km/s 等速面位置接近)看作岩石圈与软流圈边界的话, 可以看出研究区内岩石圈形态横向变化非常剧烈。西部的剖面 1-1' 的上地幔从南向北表现为特征明显不同的 3 段, 南段以渤海湾盆地为主, 北段以大兴安岭为主; 南段的渤海湾盆地之下除了具有速度很高、延伸到深度约 75 km 的岩石圈以外, 还在 130~200 km 深度之间存在一个与上层岩石圈分离的高速体。

虽然华北克拉通东部(含渤海湾盆地)古老岩石圈在显生宙被破坏并形成了华北裂谷盆地, 但燕山地区却并不是裂谷盆地且地表有大片太古代岩石出露<sup>[60~61]</sup>。在 130~200 km 显示的高速特征更进一步说明, 其岩石圈被破坏的程度可能远不及华北盆地, 故此, 我们推测下层高速体可能与古老华北克拉通岩石圈残余相关。从整个剖面来看, 渤海湾之下的上地幔高速非常强, 即可能存在比周围区域密度较高的岩石。鉴于此, 上文提及渤海湾浅部结构并未达到重力均衡, 那么有可能部分均衡来自于岩石圈地幔。

剖面 1-1' 的中段包括燕山造山带北部到索伦-西拉木伦缝合带(SXS)附近。在该段多数区域莫霍之下的波速值比南北两段低, 在约 70~120 km 才表现为更明显的高速。从该段整体来看, 该高速层呈现以索伦-西拉木伦缝合带(SXS)为起点, 明显向南俯冲, 然后在赤峰-开原断裂(CKF)附近转变成近水平展布。赤峰-开原断裂被认为是华北克拉通北部边界, 再考虑到上文(地幔波速水平切片)结果支持华北北缘增生带及其附近上地幔可能仍保留了部分古生代末期古亚洲洋闭合时的构造形态或痕迹, 故此推测具有南向俯冲形态的高速层可能反映古亚洲洋俯冲板片残余, 而赤峰-开原断裂以南的燕山造山带下方的近水平高速层可能是华北克拉通岩石圈。

在剖面 1-1' 北段(大兴安岭), 地幔中以 4.4 km/s 等速线圈定的高速层非常薄, 但其下方整体呈现出弱高速, 可能表明该区岩石圈整体偏厚但强度偏弱。中国岩浆岩分布图<sup>[48]</sup>显示大兴安岭有大量古生代和中生代岩浆岩出露, 但新生代岩浆岩较缺乏, 意味着该区最后一次强烈构造活动可能发生在中生代而不是新生代。那么该区强度偏弱的高速上地幔可能与中生代古亚洲洋和蒙古鄂霍茨克洋俯冲及板片残余有关。

位于研究区中部的剖面 2-2' 显示了一些与剖面 1-1' 相似的特征。渤海湾盆地同样具有速度很高、延伸深度约 75 km 的高速岩石圈。在燕山造山带和华北北缘增生带下方约 120~160 km 深度存在两个与上层岩石圈分离的高速体, 该高速体强度略弱于上层高速层。而以索伦-西拉木伦缝合带为界, 其北侧的大兴安岭之下高速层厚度达 120 km。燕山造山带属于华北克拉通, 其下方的高速块体与剖面 1-1' 中类似, 可能反映华北克拉通岩石圈残余。而位于索伦-西拉木伦缝合带以南华北北缘增生带之下的高速体则既可能反映华北克拉通残余, 也可能与古亚洲洋俯冲板片残余有关。剖面北侧大兴安

岭较厚的高速层可能意味着该区岩石圈没有受到像索伦-西拉木伦缝合带以南地区那样强烈的岩石圈构造破坏作用。

位于研究区东部的剖面 3-3' 普遍存在一层延伸至至少约 75 km 深度的高速层，该高速层底界面只在辽东隆起和剖面最北端出现了起伏，该剖面最北端，即松嫩地块与大兴安岭盆山转换带附近，高速层起伏与地表地形呈镜像关系，暗示该盆山转换带附近处于重力相对均衡的状态。该盆山转换带在剖面 2-2' 也呈现类似形态，这意味着，中国最典型的南北重力梯度带东北部分多处于相对均衡、构造相对稳定的状态。该剖面另一个典型的特征是在辽东隆起和华北北缘增生带下方存在两个与上覆高速层尚未完全分离的高速体，形成一种岩石圈正在被破坏或发生分离的影像。辽东隆起隶属于华北克拉通，所以该区下沉的高速体可能反映正在被破坏/减薄的华北克拉通，而华北北缘增生带下方正在被拆离的高速体规模明显比辽东半岛下方的大，它可能既包含华北克拉通岩石圈，也包含古亚洲洋俯冲板片残余。

图 6 (b) 显示了 3 条平行于主要构造线的东西向剖面 (4-4', 5-5' 和 6-6') 的横波速度垂向切片。3 条剖面显示区域岩石圈结构同样存在明显的东西向变化，而且与南北向剖面呈现稳定一致的结构特征，包括：渤海湾盆地之下可能与华北克拉通岩石圈残余相关的深层高速体；辽东隆起下方正在被改造的厚而弱的岩石圈；下辽河盆地下方约 75 km 厚的高速岩石圈等等。

考虑到中国东北和华北的岩石圈被中生代以来由太平洋俯冲触发的大规模热侵蚀不同程度地破坏，以上上地幔深部结构明显的横向差异则表明，由太平洋俯冲引发的热侵蚀作用存在明显的横向不均匀性。

## 5 结论

索伦-西拉木伦缝合带中段及周边区域面波层析成像结果显示，研究区横波速度在地壳和 80 km 以上的岩石圈上地幔多以北东向条带状分布，而在 80 km 深度以下，则以与索伦-西拉木伦缝合带走向近似平行的东西向展布。这表明，华北北缘增生带及其附近上地幔在中新生代的改造可能不彻底，致使仍保留了部分古生代末期古亚洲洋闭合时的构造形态或痕迹。

以索伦-西拉木伦缝合带为界，其南侧的上地幔岩石圈相对复杂，而北侧却相对均匀。在该缝合带南侧各地区中，渤海湾盆地、燕山造山带和大兴安岭与燕山造山带之间的华北北缘增生带的上地幔复杂程度大于辽东隆起、松嫩地块与下辽河盆地之间的华北北缘增生带。

以往研究表明中国东北和华北的岩石圈被中生代以来由太平洋俯冲触发的大规模热侵蚀不同程度地破坏。本研究结果显示，以索伦-西拉木伦缝合带为界的南北两侧所经受的破坏程度不同，而南侧区域内部，其东西也不同。这说明了由太平洋俯冲触发的热侵蚀作用存在明显的横向不均匀性。

## 参考文献

- [1] FU W, HOU H S, GAO R, et al. Lithospheric structures of the central Solonker-Xar Moron-Changchun-Yanji suture (Inner Mongolia) revealed by a deep seismic reflection profile[J]. *Tectonophysics*, 2021, 817: 229043.
- [2] LIU Y J, LI W M, FENG Z Q, et al. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2017, 43: 123-148.
- [3] WILDE S A. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo-Asian Ocean closure versus Paleo-Pacific plate subduction: A review of the evidence[J]. *Tectonophysics*, 2015, 662: 345-362.
- [4] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 1-28.  
PAN G T, XIAO Q H, LU S N, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 1-28. (in Chinese).
- [5] ZHU R X, XU Y G. The subduction of the West Pacific plate and the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 1340-1350.

- [6] GUO Z, WANG K, YANG Y J, et al. The origin and mantle dynamics of quaternary intraplate volcanism in Northeast China from joint inversion of surface wave and body wave[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(3): 2410–2425.
- [7] TANG Y C, OBAYASHI M, NIU F L, et al. Changbaishan volcanism in Northeast China linked to subduction-induced mantle upwelling[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(6): 470–475.
- [8] LU M W, LEI J S, ZHAO D P, et al. SKS Splitting measurements in NE China: New insights into the Wudalianchi intraplate volcanism and mantle dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2020, 125(3): e2019JB018575.
- [9] FAN X L, CHEN Q F. Seismic constraints on the magmatic system beneath the Changbaishan volcano: Insights into its origin and regional tectonics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124(2): 2003–2024.
- [10] DENG Y F, XU Y G, CHEN Y. Formation mechanism of the North–South gravity lineament in Eastern China[J]. *Tectonophysics*, 2021, 818: 229074.
- [11] CHEN L, JIANG M M, YANG J H, et al. Presence of an intralithospheric discontinuity in the central and western North China Craton: Implications for destruction of the craton[J]. *Geology*, 2014, 42(3): 223–226.
- [12] CHEN L. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S- and P-receiver function migration[J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173(3): 216–227.
- [13] CHEN L, TAO W, ZHAO L, et al. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267: 56–68.
- [14] ZHAO L, ZHENG T Y, CHEN L, et al. Shear wave splitting in Eastern and Central China: Implications for upper mantle deformation beneath continental margin[J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 2007, 162: 73–84.
- [15] ZHENG T Y, ZHU R X, ZHAO L, et al. Intralithospheric mantle structures recorded continental subduction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(B3).
- [16] ZHENG T Y, HE Y M, YANG J H, et al. Seismological constraints on the crustal structures generated by continental rejuvenation in Northeastern China[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 14995.
- [17] FENG M, ASSUMPÇÃO MARCELO S, Van der LEE S. Group-velocity tomography and lithospheric S-velocity structure of the South American continent[J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 2004, 147(4): 315–331.
- [18] 中国地震科学台阵. 中国地震科学探测台阵波形数据[DB/OL]. 中国地震局, 2006. DOI:10.12001/ChinArray. Data. ChinArray. China seismic array waveform data[DB/OL]. China Earthquake Administration, 2006. DOI://10.12001/ChinArray. Data. (in Chinese).
- [19] 中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心. 地震波形数据[DB/OL]. 中国地震局. DOI: 10.11998/SeisDmc/SN.
- [20] TANG Q S, CHEN L. Structure of the crust and uppermost mantle of the Yanshan Belt and adjacent regions at the northeastern boundary of the North China Craton from Rayleigh wave dispersion analysis[J]. *Tectonophysics*, 2008, 455(1): 43–52.
- [21] 危自根, 陈凌, 杨小林. 辽东台隆、燕山带和兴蒙造山带台站下方地壳厚度和平均波速比( $V_p/V_s$ )的横向变化及其构造意义[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(11): 2799–2808.
- WEI Z G, CHEN L, YANG X L. Transverse variations of crustal thickness and VP/VS ratio under the stations in the Liaodong anteclise-Yanshan belt-Xingmeng orogenic belt and their tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(11): 2799–2808. (in Chinese).
- [22] ZHANG R Q, WU Q J, SUN L, et al. Crustal and oblique lithospheric structure of Northeast China from S-wave receiver functions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 401: 196–205.
- [23] 张广成, 吴庆举, 潘佳铁, 等. 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[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(12): 4084–4094. DOI:10.6038/cjg20131213.
- ZHANG G C, WU Q J, PAN J T, et al. Study of crustal structure and Poisson ratio of NE China by H-K stack and CCP stack methods[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(12): 4084–4094. DOI:10.6038/cjg20131213. (in Chinese).
- [24] TAO K, NIU F L, NING J Y, et al. Crustal structure beneath NE China imaged by NECESS-Array receiver function data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 398: 48–57.
- [25] BENSON G D, RITZWOLLER M H, BARMIN M P, et al. Processing seismic ambient noise data to obtain

- reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(3): 1239–1260.
- [26] HERRMANN R B. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research[J]. *Seismological Research Letters*, 2013, 84(6): 1081–1088.
- [27] SHAPIRO N M, RITZWOLLER M H. Monte-Carlo inversion for a global shear-velocity model of the crust and upper mantle[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 151: 88–105.
- [28] 黄忠贤, 李红谊, 胥颐. 南北地震带岩石圈 S 波速度结构面波层析成像[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1121–1131. DOI:[10.6038/cjg20130408](https://doi.org/10.6038/cjg20130408).
- HUANG Z X, LI H Y, XU Y. Lithospheric S-wave velocity structure of the North-South seismic belt of China from surface wave tomography[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1121–1131. DOI:[10.6038/cjg20130408](https://doi.org/10.6038/cjg20130408). (in Chinese).
- [29] 苏伟, 彭艳菊, 郑月军, 等. 青藏高原及其邻区地壳上地幔 S 波速度结构[J]. *地球学报*, 2002, 23(3): 193–200.
- SU W, PENG Y J, ZHENG Y J, et al. Crust and upper mantle shear velocity structure beneath the Tibetan Plateau and adjacent areas[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2002, 23(3): 193–200. (in Chinese).
- [30] LEVENBERG K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944, 2: 164–168.
- [31] TIKHONOV A N. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization[J]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1963, 151(3): 501–504.
- [32] FENG M, AN M J. Lithospheric structure of the Chinese mainland determined from joint inversion of regional and teleseismic Rayleigh-wave group velocities[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: B06317.
- [33] AN M J, WIENS D A, ZHAO Y, et al. S-velocity model and inferred Moho topography beneath the Antarctic plate from Rayleigh waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(1): 359–383.
- [34] FENG M, AN M J, MECHIE J, et al. Lithospheric structures of and tectonic implications for the central-east Tibetan plateau inferred from joint tomography of receiver functions and surface waves[J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 223(3): 1688–1707.
- [35] 冯梅, 安美建. 基于面波频散的三维横波速度方位各向异性层析成像方法[J]. *CT 理论与应用研究*, 2020, 29(4): 381–397. DOI:[10.15953/j.1004-4140.2020.29.04.01](https://doi.org/10.15953/j.1004-4140.2020.29.04.01).
- FENG M, AN M J. Method on 3D tomography of S-wave velocity azimuthal anisotropy by using surface-wave dispersion curves[J]. *CT Theory and Applications*, 2020, 29(4): 381–397. DOI:[10.15953/j.1004-4140.2020.29.04.01](https://doi.org/10.15953/j.1004-4140.2020.29.04.01). (in Chinese).
- [36] GASS S I, FU M C. Newton's method[M]. Boston, MA: Encyclopedia of Operations Research and Management Science, Springer US, 2013: 1051–1051.
- [37] MOROZOV V A. Methods for solving incorrectly posed problems[M]. New York: Springer-Verlag, 1984: 1–257.
- [38] AN M J. Adaptive regularization of the reference model in an inverse problem[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2020, 177(10): 4943–4956.
- [39] LASKE G, MA Z T, MASTERS G, et al. A new global crustal model at  $1 \times 1$  degrees[OL]. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>, 2012.
- [40] KENNEDY B L N, ENGDAHL E R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification[J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105: 429–465.
- [41] 查小惠, 吕坚, 鲍志诚, 等. 接收函数 H-k 叠加方法研究综述[J]. *CT 理论与应用研究*, 2020, 29(3): 369–379. DOI:[10.15953/j.1004-4140.2020.29.03.14](https://doi.org/10.15953/j.1004-4140.2020.29.03.14).
- ZHA X H, LV J, BAO Z C, et al. A review of H-k stack method of receiver function[J]. *CT Theory and Applications*, 2020, 29(3): 369–379. DOI:[10.15953/j.1004-4140.2020.29.03.14](https://doi.org/10.15953/j.1004-4140.2020.29.03.14). (in Chinese).
- [42] 安美建, 冯梅, 赵琳. 地震层析成像中的不确定性[J]. *CT 理论与应用研究*, 2009, 18(2): 24–32.
- AN M J, FENG M, ZHAO L. Uncertainties in seismic tomography[J]. *CT Theory and Applications*, 2009, 18(2): 24–32. (in Chinese).
- [43] 冯梅, 安美建. 反演模型分辨率的估算方法[J]. *CT 理论与应用研究*, 2013, 22(4): 587–604.
- FENG M, AN M J. How to determine spatial resolution for an inverse problem[J]. *CT Theory and Applications*, 2013, 22(4): 587–604. (in Chinese).
- [44] LI Y H, GAO M T, WU Q J. Crustal thickness map of the Chinese mainland from teleseismic receiver functions[J]. *Tectonophysics*, 2014, 611: 51–60.

- [45] HE R Z, SHANG X F, YU C Q, et al. A unified map of Moho depth and Vp/Vs ratio of continental China by receiver function analysis[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199(3): 1910–1918.
- [46] FENG M, AN M J, DONG S W. Tectonic history of the Ordos block and Qinling orogen inferred from crustal thickness[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 210(1): 303–320.
- [47] FENG M, AN M J, Van der LEE S. Region-related features of crustal and upper-mantle velocity structure of the Chinese mainland detected by surface waveform modeling[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2008, 21(2): 118–126.
- [48] 中国地质调查局. 中华人民共和国 1:250 万数字地质图说明书[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004.
- China Geological Survey. 1:2 500 000 geological map of China[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2004. (in Chinese).
- [49] SONG Y, STEPASHKO A, LIU K Y, et al. Post-rift tectonic history of the Songliao basin, NE China: Cooling events and post-rift unconformities driven by orogenic pulses from plate boundaries[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(3): 2363–2395.
- [50] 冯梅, 安美建. 中国大陆上地壳剪切波速结构[J]. *地震学报*, 2007, 20(4): 359–369.
- FENG M, AN M J. Middle and upper crust shear-wave velocity structure of the Chinese mainland[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 20(4): 359–369. (in Chinese).
- [51] 高延光, 李永华. 中国东北-华北地区地壳厚度与泊松比及其地质意义[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2): 166–176.
- GAO Y G, LI Y H. Crustal thickness and Vp/Vs in the Northeast China-North China region and its geological implication[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(2): 166–176. (in Chinese).
- [52] 张凯文, 陈棋福, 陈赟. 接收函数揭示的兴蒙造山带西南部的地壳结构特征[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(4): 1–21.
- ZHANG K W, CHEN Q F, CHEN Y. Crustal structure beneath the southwestern Xing'an-Mongolia orogenic belt revealed by receiver function analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(4): 1–21. (in Chinese).
- [53] AN M J, SHI Y L. Lithospheric thickness of the Chinese continent[J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 2006, 159: 257–266.
- [54] HE Y, CHEN Q F, CHEN L, et al. Distinct lithospheric structure in the Xing'an-Mongolian orogenic belt (submitted)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022.
- [55] ENGLDAHL E R, Van der Hilst R D, BULAND R. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, 88: 722–743.
- [56] FREDERIKSEN A W, BOSTOCK M G, CASSIDY J F. S-wave velocity structure of the Canadian upper mantle[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 124: 175–191.
- [57] Van der LEE S. High-resolution estimates of lithosphere thickness from Missouri to Massachusetts, USA[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 15–23.
- [58] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 646–664.
- ZHU J S, CAO J M, CAI X L, et al. High resolution surface wave tomography in East Asia and West Pacific marginal seas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(5): 646–664. (in Chinese).
- [59] ZHU J S, CAI X L, CAO J M, et al. Lithospheric structure and geodynamics in China and its adjacent areas[J]. *Geology in China*, 2006, 33(4): 793–802.
- [60] HUANG X A, BI Z W, DEPAOLO D J. Sm-Nd isotope study of early Archean rocks, Qianan, Hebei Province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(4): 625–631.
- [61] ZHAO G C, WILDE S A, CAWOOD P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2001, 107(1): 45–73.

# The Lithospheric Structure of the Middle Solonker-Xar Moron Suture by Surface-wave Tomography

FENG Mei<sup>✉</sup>, AN Meijian, HOU Hesheng, FAN Taoyuan, ZANG Hulin

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract:** The middle section of the Solonker-Xar Moron suture and its surrounding areas have successively been affected by the closure of the Paleo-Asian Ocean during the Paleozoic, the closure of the Mongolian-Okhotsk Ocean during the Mesozoic, and the subduction of the Pacific Ocean plate since the Meso-Cenozoic, resulting in very complex, deep structures in this area. We conducted a regional-scale three-dimensional S-wave velocity tomographic study of the area. To do this, we used surface waves from earthquake data and ambient noise data recorded in recent years. The lithospheric tomographic model shows that the regional crustal thickness does not vary considerably, but the crust in the Songliao and the Lower Liaohe basins is thinner than that in the Daxing'an Mountains. The fact that the crustal thickness remains consistent with changes in topography indicates that these areas have reached gravitational equilibrium. However, the crustal thickness of the Liaodong uplift and the Bohai Bay Basin is inversely related with topography, indicating that these areas may still be in a tectonically active state. At depths greater than 80 km, the S-wave velocities spread in an east-west direction approximately parallel to the Solonker-Xar Moron suture. The complexity of the upper-mantle velocity distribution to the north of the Solonker-Xar Moron suture differs significantly from that to its south. Furthermore, south of the Solonker-Xar Moron suture, the complexity of the velocity distribution in the east differs considerably from that in the west. This implies that the destruction resulting from the Pacific Ocean subduction system varies significantly within the study region, and remnants of the paleo-Asian ocean slab may still exist in the south.

**Keywords:** surface wave tomography; 3D S-wave velocity; Solonker-Xar Moron suture; North China Craton; eastern segment of the central Asian orogenic belt



**作者简介:** 冯梅<sup>✉</sup>, 女, 博士, 中国地质科学院研究员, 主要从事地震学、地球动力学方面的基础和应用研究, E-mail: [mei\\_feng\\_cn@163.com](mailto:mei_feng_cn@163.com)。