

李哲, 郑勇. 2022. 山西裂谷带北部地壳速度结构双差成像及其发震构造分析[J]. 地震研究, 45(4): 509–516, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0055.

Li Z, Zheng Y. 2022. Double-difference imaging of crustal velocity structure in the northern Shanxi Rift Valley and its seismogenic tectonic analysis[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(4): 509–516, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0055.

# 山西裂谷带北部地壳速度结构双差成像 及其发震构造分析\*

李 哲, 郑 勇\*

(中国地质大学(武汉) 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 山西裂谷带是华北克拉通差异性破坏的过渡区域, 其结构和发震构造对于认识该区域的动力学机制和发震机制具有重要意义。通过地震双差层析成像方法对山西裂谷带北部地壳速度结构进行成像, 得到该区域的速度结构图像及发震构造。结果显示: ①山西裂谷带北部地震震源深度较浅, 断裂构造复杂; 在地壳浅部, 速度异常与地形构造相吻合; ②在中下地壳, 速度结构开始主要受到火山下方物质的影响, 呈现部分低速异常; ③在山西裂谷带两侧, 太行山脉相较于吕梁山脉有着更浅的山根, 吕梁山脉北端下方存在明显的高速异常, 可能与华北克拉通的差异性破坏存在关系。

**关键词:** 山西裂谷带; 地壳速度结构; 双差层析成像; 发震构造

**中图分类号:** P315.24      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2022)04-0509-08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0055

## 0 引言

山西裂谷带是华北克拉通的主要组成部分, 认识其地壳速度结构和发震构造对于认识华北克拉通的破坏有着重要的意义。GPS 结果显示: 在山西裂谷带北部, 断层活动主要为右旋走滑, 由西向东右旋走滑分量逐渐减弱, 尤其是在裂谷带东侧, 情况十分复杂, 沿断层开始表现出相对挤压, 平均挤压量为 1 mm/a; 在其南部, 虽然断层的主要活动仍为右旋走滑, 但主要集中于断裂内部, 与构造走向基本一致, 平均滑移量大于 1.5 mm/a (王秀文, 杨国华, 2017)。从地壳厚度上来看, 山西裂谷带南北区域也存在差异: 在

南部运城盆地附近地壳厚度约为 37 km, 而在北段大同盆地, 尤其是在西部吕梁山脉区域, 地壳厚度可以达到 42 km (Chen *et al*, 2021)。与北厚南薄的地壳结构所不同, 地震的震源深度则表现为: 北部地震震源深度较浅, 集中在 10 km, 而在南部地震震源深度较深, 约为 20 km (宋美琴等, 2012; Dou *et al*, 2021)。面波成像结果显示山西裂谷带中下地壳速度结构存在明显差异, 在南北两端表现为相对低速, 中部则表现为与西华北克拉通接近的高速异常 (Bao *et al*, 2013)。山西裂谷带南北两段的岩石物性、结构特征和发震构造如此明显的差异 (Tang *et al*, 2013) 显示出南北两段在构造背景和形成机制上存在差异。Ai 等 (2019a, b) 认为山西裂谷带

\* 收稿日期: 2022-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金 (41874053、42030108、41731072) 和中央高校基本业务费 (162301132637) 联合资助。

第一作者简介: 李 哲 (1997-), 硕士研究生在读, 主要从事发震区域地震层析成像研究。

E-mail: 20151001635@cug.edu.cn.

♣ 通讯作者简介: 郑 勇 (1978-), 教授, 主要从事发震区域地震层析成像、震源物理性质研究。

E-mail: zhengyong@cug.edu.cn.

南部主要受到青藏高原对于鄂尔多斯块体的旋转挤压,因此引起山西裂谷带南部的被动拉张,而在其北部,则受到大同火山下方地幔物质上涌的影响。这些研究虽然给出了山西裂谷带地区的结构和可能的动力学机制,但是主要集中于对下地壳和地幔的研究,而与地震关系更为紧密的中上地壳结构则缺乏高分辨率成像结果。

结合地震信号,研究中上地壳的精细结构及地震的精细位置,一直是地震学研究的主要目标。为了提高地震定位的精度,Waldhauser 和 Ellsworth (2000) 提出了双差定位的方法,用于地震定位。但是由于该方法仅能确定地震的位置,地震走时的正演计算仍然依赖于初始模型。在断层、火山等地震高发区域,地震速度结构往往十分复杂,简单的初始模型并不能很好地反映地下真实的结构信息,因此在进行地震定位的同时,需提供一个高精度的地壳速度模型。Zhang 和 Thurber (2003) 在双差定位的基础上提出可以同时反演地下速度结构和震中位置的双差层析成像方法,不仅降低了速度模型误差对地震定位精确度的影响,而且精确的地震位置也可以减小震中的走时误差,提高地下速度结构精度 (Um, Thurber, 1987; Zhang, Thurber, 2006; 周茜茜等, 2020)。

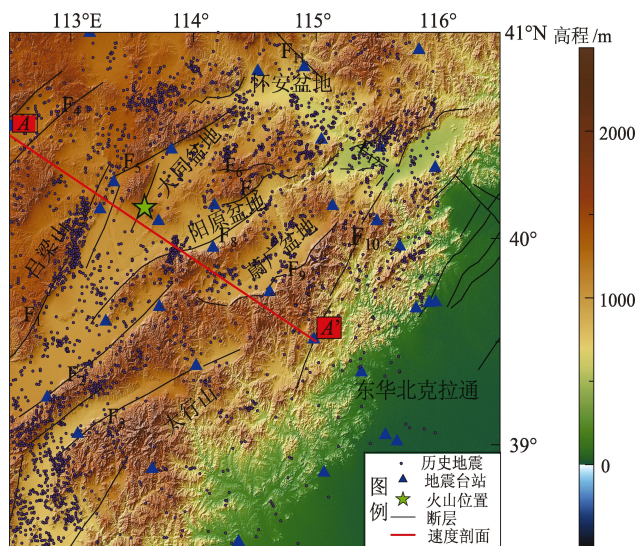
由于地壳速度结构是研究地震发震构造、分析区域构造背景的关键性依据,而双差层析成像方法在地震发震区域有着良好分辨能力,因此本文使用双差层析成像方法对山西裂谷带北部地壳速度结构进行成像,并讨论这一区域的发震构造和速度结构之间的关系。

## 1 数据和方法

双差定位是将相邻地震结为地震对,利用地震对之间地震波的相对到时,对地震位置进行定位。使用地震对到时残差数据,可以消除源区外相似路径上的速度模型误差对地震定位的影响。与双差定位方法类似,双差层析成像方法假设相邻地震到同一台站的射线路径相似。通过基于射线理论的伪弯曲算法,计算地震的理论到时 (Um, Thurber, 1987),将理论到时与实际观测数据相减

得到绝对到时残差。再对相邻地震的绝对到时残差进行计算,得到相对到时残差。双差成像方法采用阻尼最小二乘算法,以总走时残差  $L_2$  范数最小为目标函数 (Paige, Saunders, 1982),使用双差数据 (绝对到时残差和相对到时残差) 对震源区域的地下速度结构和地震位置同时进行多次迭代反演,可以得到精确的地震相对位置和地下三维速度结构,对于地壳的速度结构特别是发震区域有着很好的分辨能力 (Zhang, Thurber, 2003, 2006)。

近几十年来山西裂谷带发生了较多的中小地震,为利用双差成像研究该区域的地壳结构和发震构造提供了良好的基础。本文选取研究区域 2009—2020 年中国地震台网记录到的 3 460 个地震 (图 1),其中 P 波震相 39 388 个, S 波震相 38 909 个。为了保证数据的准确度,将地震震相拟合合成直线,选取震中距 200 km 范围内误差小于 5 s 的震相记录,如图 2 所示。选取间距小于 10 km,且观测数大于 4 个的地震结为地震对,共得到 346 501 个地震对。



F<sub>1</sub>: 口泉断裂; F<sub>2</sub>: 恒山山前断裂; F<sub>3</sub>: 五台山山前断裂;  
F<sub>4</sub>: 岱海南断裂; F<sub>5</sub>: 天镇—阳高断裂; F<sub>6</sub>: 怀安盆地  
南缘断裂; F<sub>7</sub>: 阳原盆地北缘断裂; F<sub>8</sub>: 阳原盆地南缘  
断裂; F<sub>9</sub>: 蔚广断裂; F<sub>10</sub>: 孙庄子—乌龙岗断裂;  
F<sub>11</sub>: 洗马林断裂; F<sub>12</sub>: 新保安—沙城断裂

图 1 研究区台站和地震分布

Fig. 1 The distribution of seismic stations and earthquakes in the study area

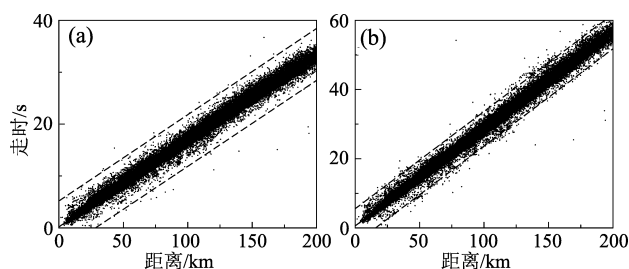


图2 Pg波(a)和Sg波(b)地震走时曲线

Fig. 2 Travel-time curves of Pg-wave (a) and Sg-wave (b)

初始模型和网格选取对于反演结果的可靠性和分辨率具有较为重要的影响。本文选取 Ustc1.0 速度模型作为初始模型 (Xin *et al.*, 2019), 设置水平方向网格大小为  $0.1^\circ$ , 深度分别为 -3、0、2、4、8、12、16、20、30、40 和 60 km, 使用阻尼最小二乘法对研究区域进行反演。为了保证反演结果的可靠性和合理性, 本文将不同反演参数组合, 根据 L 型曲线搜索最佳控制参数, 最终选取阻尼因子为 300、圆滑因子为 30 (图3)。

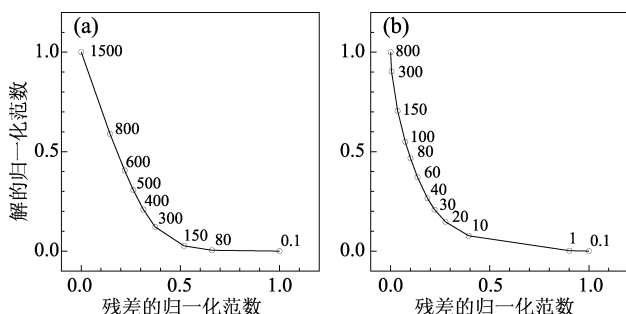


图3 选择阻尼因子(a)和圆滑因子(b)的折中曲线

Fig. 3 Trade-off curves of the damper factor (a) and the smooth factor (b)

反演前后理论地震到时残差变化显示, 反演后地震走时均方根残差由 1.251 s 下降到 0.261 s (图4), 反演后走时误差明显降低, 且呈现正态分布的特点。使用  $0.4^\circ$  大小的异常体对速度结构进行棋盘检测, 可以发现地震主要集中的 8 km 和 12 km 的深度上, 反演区域有着较好的恢复度 (图5)。在其它深度, 由于地震射线分布不足, 只有部分区域有着良好的恢复能力。一般情况下, 反演网格内地震射线长度相对网格中心偏导总和

(DWS), 可以用来反映反演区域的数据分布程度。在本文只选取  $DWS > 300$ , 反演结果可靠的区域进行讨论。

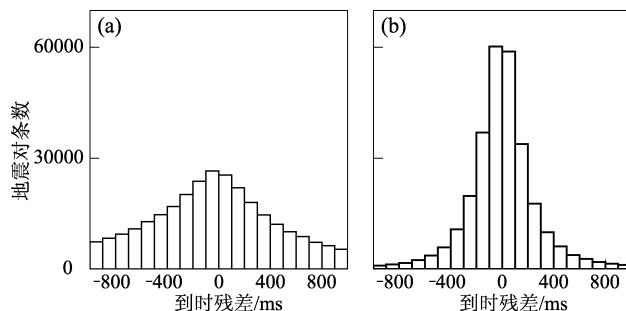


图4 反演前(a)、后(b)地震到时残差直方图

Fig. 4 Arrival-time residual histograms before (a) and after (b) inversion

## 2 结果分析

### 2.1 山西裂谷带下方低速异常

山西裂谷带下方地壳浅层速度结构和地表地形特征有良好的对应关系 (图6)。在 0 和 4 km 深度上, 无论 P 波还是 S 波, 在研究区域中部存在连续的、明显的低速异常, 该速度异常分布范围与山西裂谷带的分布范围一致 (图 6a-1, a-2, b-1, b-2)。在低速异常的两侧, 存在着相对高速异常, 高速异常在地形上对应着太行山脉和吕梁山脉。随着深度的增加, 在 8 km 的深度上, 低速异常逐渐减弱 (图 6a-3, b-3)。在 12 km 及以下深度, 山西裂谷带下方低速异常逐渐消失。低速异常分为两部分, 北部主要集中于大同盆地 ( $40.5^\circ\text{N}$ ,  $113.5^\circ\text{E}$ ), 而南部则分布于太行山脉 ( $38.5^\circ \sim 40.5^\circ\text{N}$ ), 原有的高速范围减小 (图 6a-4, a-5, b-4, b-5)。在更深的深度上, 低速异常连接成一个整体 (图 6a-6, b-6)。

### 2.2 吕梁山脉下方高速异常

成像结果显示, 吕梁山脉下方存在明显的高速异常: 在 0 ~ 8 km 深度内, 高速异常主要存在于口泉断裂的北段 ( $40.2^\circ\text{N}$ ,  $113.2^\circ\text{E}$ ) (图 6a-1 ~ a-3, b-1 ~ b-3), 在 12 km 深度高速异常主要分布在口泉断裂以西 ( $40^\circ\text{N}$ ,  $113^\circ\text{E}$ ) 和恒山断裂的南部 ( $39^\circ\text{N}$ ,  $113^\circ\text{E}$ ) (图 6a-4, b-4), 而在 16 km 和 20 km 深度上, 口泉断裂以西的高速异

常转变为低速异常 ( $40^{\circ}\text{N}$ ,  $113^{\circ}\text{E}$ ) (图 6a-5, b-5, a-6, b-6), 高速异常主要分布于恒山断裂、口泉断裂的南部 ( $39^{\circ}\text{N}$ ,  $113^{\circ}\text{E}$ ) (图 6a-4, b-4)。随着深度的增加, 吕梁山脉下方的高速异常逐渐向南迁移, 表明基岩的深度由北向南逐渐加深。

### 2.3 研究区东北角低速异常

在研究区东北角存在明显的低速异常 ( $41^{\circ}\text{N}$ ,

$114.8^{\circ}\text{E}$ ), 整体成 NW 走向, 与怀安裂谷走向一致。与低速异常相邻还存在着明显的高速异常。高速异常存在于整个中上地壳 (图 6b-2 ~ b-5)。从  $DWS$  分布来看 (图 6 白色实线), 这一区域射线分布较好。检测板在不同深度都有一定的恢复能力 (图 5a-3 ~ a-6, b-3 ~ b-6), 说明波速异常区域并非是由于反演所致, 而是来自于地下异常结构。

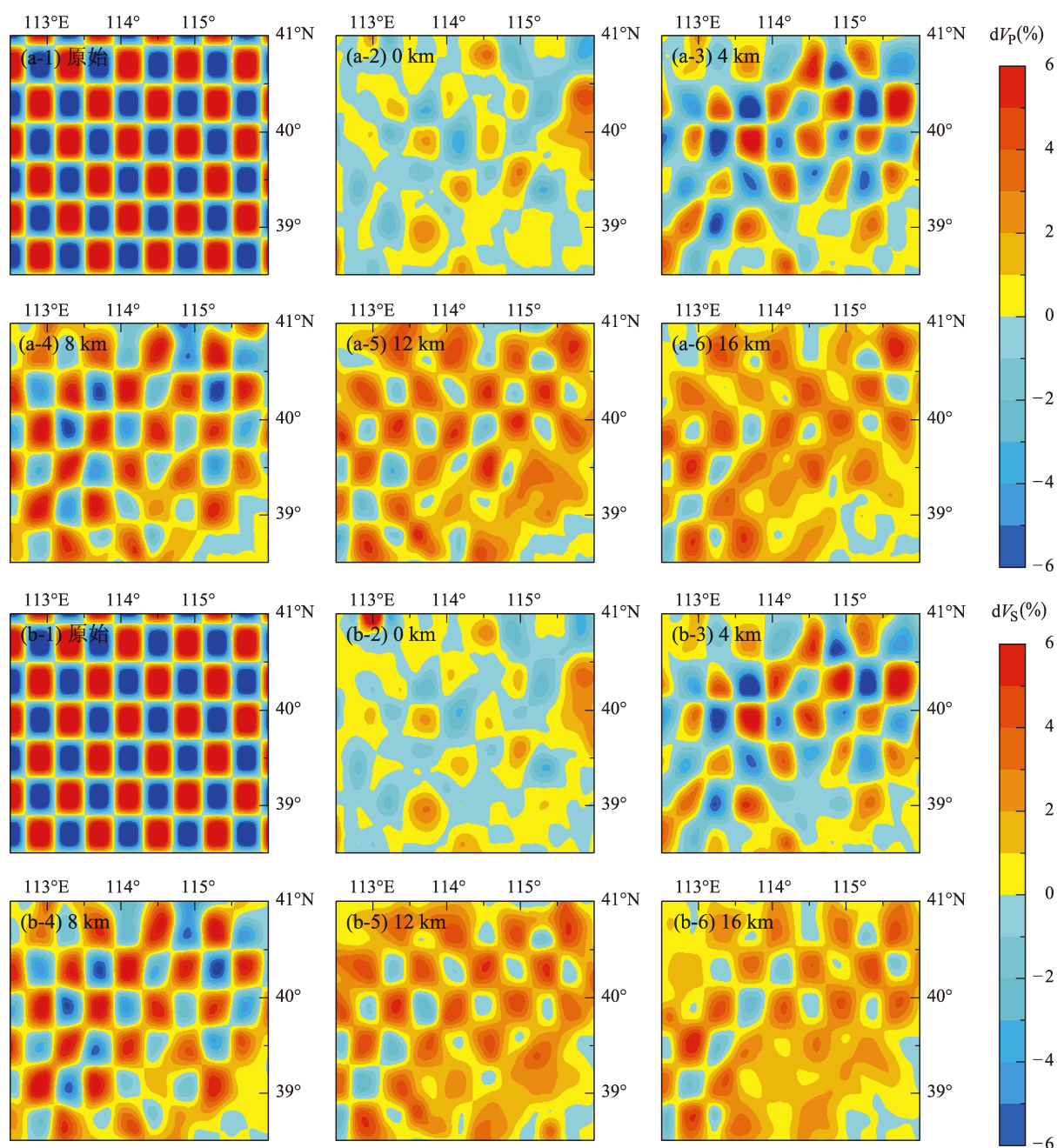


图 5  $V_p$  波 (a) 和  $V_s$  波 (b)  $0.4^{\circ}$  速度异常不同深度的棋盘检测

Fig. 5 The checkerboard test of the velocity anomaly of P-wave (a) and S-wave (b) with  $0.4^{\circ}$  sized anomalous body at different depths



## 2.4 华北平原低速异常

图6显示,在研究区右下角存在一个明显稳定的低速异常,位于华北平原的下方,与地形有着良好的对应关系,在整个上地壳都表现为相对低速。在20 km的深度,低速异常转变为高速异常。这可能暗示了东华北克拉通遭到了破坏,地壳减薄,但是由于地震位置和台站分布的影响,这一区域分辨能力不足,在此不做过多的讨论。

## 2.5 地震位置分布

山西裂谷带北部地震主要分布在0~20 km深度内,地震沿断层走向分布。不同深度层位,地震的空间分布存在差异,近地表地震主要分布在天镇—阳高断裂和口泉断裂附近(图6a-1, b-1)。在4~16 km深度,地震数目增多,在山西裂谷内部沿断层分布。在20 km深度,地震逐渐减少,集中分布于研究区南部的恒山断裂南段、

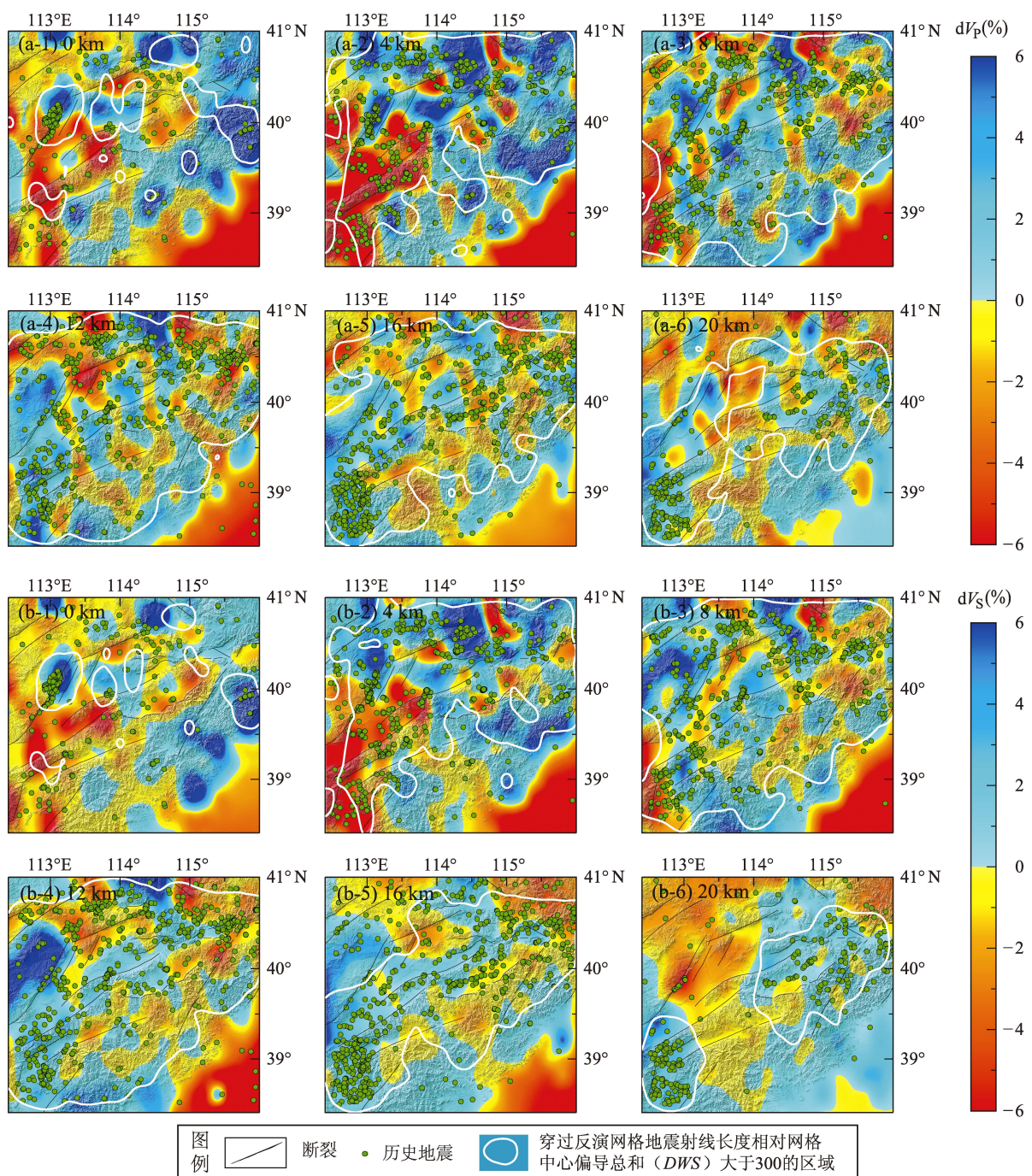


图6 P波(a), S波(b)水平层位速度结构(断层构造与图1相同)

Fig. 6 Horizontal velocity structure of P-wave (a) and S-wave (b) (faults are shown in Figure 1)

五台山断裂南段, 以及北部的孙庄子乌龙沟断裂附近 (图 6a-6, b-6)。

### 3 讨论

相比远震 P 波和背景噪声层析成像 (Bao *et al.*, 2013; Lei, 2012), 近震体波层析成像对于地壳结构有着更好的分辨能力。因此本文通过双差层析成像方法, 利用近震体波震相到时数据反演得到了山西裂谷带北部的中上地壳速度结构。本文得到的速度结构整体形态上与前人研究结果较为一致, 都表现出山西裂谷带内部的低速异常被太行山脉和吕梁山脉下方的高速异常所包围。在细部结构上存在差异, 本文结果与背景噪声层析成像得出的山西裂谷带内部单一的低速异常结果有所不同 (Ai *et al.*, 2019a, b; Dou *et al.*, 2021; Bao *et al.*, 2013)。本文的体波层析成像结果解析地壳浅部区域更多细节特征, 发现山西裂谷带内部存在多个离散的高速异常: 在阳高断裂北部、阳原南断裂、怀安南断裂下方的地壳速度结构中都存在相对的高速异常, 这些高速异常仅仅分布在中上地壳, 并且与地形有着良好的对应关系。这些高速异常体可能与山西裂谷带内部的拉张盆地间的挤压关系有关。震源机制给出的应力场分

布以及 GPS 观测得出的地壳运动都表明, 山西裂谷带北部盆地之间存在相对挤压 (Middleton *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018), 这种挤压作用不仅导致盆地间的挤压褶皱, 也可能导致了中上地壳的高速异常现象。

在吕梁山脉北部存在明显的剪切波高速异常 (图 7), 这种异常相较于太行山脉下方的高速异常更为显著, 延伸深度也更深。这表明吕梁山脉的上地壳强度相对太行山脉更高, 可能和山西裂谷带两侧的差异性破坏有关。在地壳厚度方面, 吕梁地区的地壳深度与鄂尔多斯块体较为接近, 约为 43 km; 而太行山脉下方地壳厚度仅为 36 km (Chen *et al.*, 2021)。这种速度结构和地壳厚度上的差异可能与太平洋板块的俯冲有关, 太行山脉的山根构造可能已经由于太平洋板片的俯冲作用遭到了破坏, 而吕梁山脉仍然保留古老克拉通的构造特征。但本文反演的深度比较浅, 而太平洋板块俯冲作用更多的体现在深部的构造上, 因此, 太行山脉山根破坏的机制和过程仍然需要更多的研究。

从发震构造和地震分布来看, 山西裂谷带北部地震主要的震源深度为 0~20 km, 相比约 47 km 的莫霍面深度, 该区域的地震分布较浅 (He *et al.*, 2021), 这可能意味着山西裂谷带北部的浅层构造

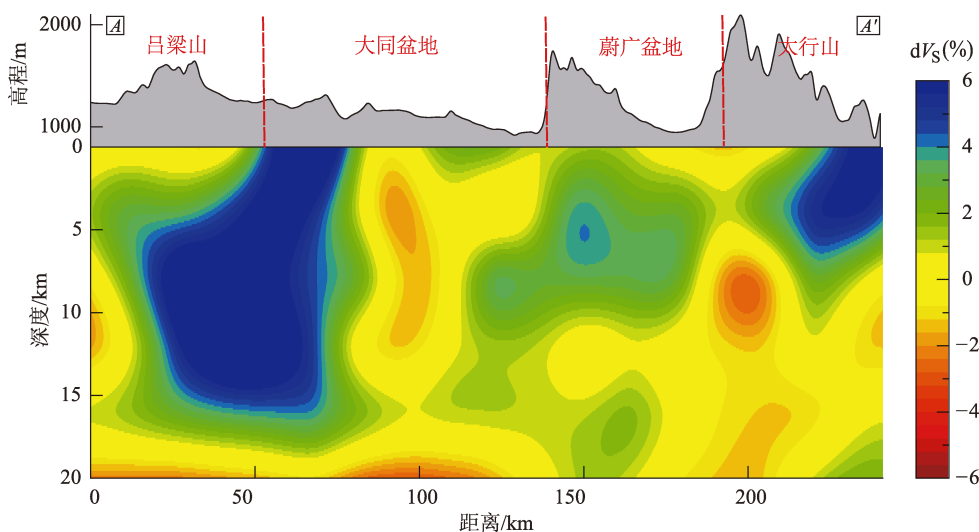


图 7 沿剖线的地形起伏及剖线下方 S 波速度剖面 (剖面的水平投影对应图 1 中 AA' 线段, 红色虚线划分不同的次级块体)

Fig. 7 Topography along the profile and S - wave velocity below the profile (horizontal projection of the profile corresponds to the AA' line segment in Figure 1, with the red dashed line dividing the different sub - blocks)



时间形成相对较早,中下地壳相对较软,难以积累较大的应力,这可能与山西裂谷带的拉张构造的形成过程有较密切的关系。从本文成像结果可以发现,山西裂谷带北部速度结构在较浅层位上表现为构造裂谷特征,在地形较高的区域表现为高速异常,而在盆地中则表现为低速异常,随着深度的增加,低速异常主要位于大同盆地下方。He等(2021)对大同火山速度精细结构成像也印证了本文的结果,火山下方的低速异常主要分布在12 km以下。Lei(2012)通过远震体波反演,发现了山西裂谷带北部下方存在岩石圈尺度的低速异常。因此我们认为造成山西裂谷带北部的地震的震源深度较裂谷中南部更浅的原因是软流圈热物质的上涌。软流圈热物质的上涌,改变了中下地壳的构造环境,难以积累足够的应力产生地震,使得地震的震源深度相较于裂谷南部更浅,这在速度结构上表现为相对低速。

## 4 结论

本文通过双差层析成像方法得出了山西裂谷带中上地壳精细层析成像结构。在上地壳,层析成像速度结果与地形有着很好的相关性。随着深度的增加,低速异常主要集中在大同盆地下方,这反映了山西裂谷带北部可能受到大同火山下方物质上涌的影响,这也是该区域地震活跃且地震分布较浅的主要原因。在山西裂谷内部,还存在多个断裂盆地,盆地间的相对挤压,形成离散的高速异常。在山西裂谷两侧,西部的吕梁山脉相较于东部的太行山脉有更深的山根,这可能与华北克拉通差异性破坏存在关系。

本文使用中国地震科学中心的地震目录数据和由中国科学技术大学张海江教授提供的 tomoDD 程序,制图全部通过 Generic Mapping Tools (GMT) 完成,在此表示感谢。

## 参考文献:

- 宋美琴,郑勇,葛粲,等. 2012. 山西地震带中小震精确位置及其显示的山西地震构造特征[J]. 地球物理学报, 55(2): 513–525.
- 王秀文,杨国华. 2017. 利用 GPS 资料研究山西裂谷带的水平形变[J]. 大地测量与地球动力学, 37(11): 1101–1104.
- 周茜茜,陈强,张一君,等. 2020. 基于近震 P 波走时的南加州地区速度结构层析成像[J]. 地震研究, 43(4): 674–679.
- Ai S, Zheng Y, He L, *et al.* 2019a. Joint inversion of ambient noise and earthquake data in the Trans – North China Orogen: On – going lithospheric modification and its impact on the cenozoic continental rifting [J]. *Tectonophysics*, 763(5): 73–85.
- Ai S, Zheng Y, Riaz M S, *et al.* 2019b. Seismic evidence on different rifting mechanisms in Southern and Northern Segments of the Fenhe – Weihe Rift Zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(1): 609–630.
- Bao X, Song X, Xu M, *et al.* 2013. Crust and upper mantle structure of the North China Craton and the NE Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 369–370: 129–137.
- Chen Y, Chen J, Li S, *et al.* 2021. Variations of crustal thickness and average  $V_p/V_s$  ratio beneath the Shanxi Rift, North China, from receiver functions[J]. *Earth, Planets and Space*, 73(1): 200.
- Dou L, Yao H, Fang L, *et al.* 2021. High – resolution crustal velocity structure in the Shanxi Rift Zone and its tectonic implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 64(5): 728–743.
- He L, Guo Z, Chen Y J, *et al.* 2021. Seismic imaging of a magma chamber and melt recharge of the Dormant Datong Volcanoes[J]. *Earth and Space Science*, 8(12): e2021EA001931.
- Lei J. 2012. Upper – mantle tomography and dynamics beneath the North China Craton[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B6): DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JB009212>.
- Li P, Liao L, Liu P, *et al.* 2018. Numerical simulation of relationship between stress field evolution and historical strong earthquakes in the Shanxi Seismic Zone[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5A): 2389–2407.
- Middleton T A, Elliott J R, Rhodes E J, *et al.* 2017. Extension rates across the northern Shanxi Grabens, China, from Quaternary geology, seismicity and geodesy[J]. *Geophysical Journal International*, 209(2): 535–558.
- Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8(1): 43–71.
- Tang Y J, Zhang H F, Santosh M, *et al.* 2013. Differential destruction of the North China Craton: A tectonic perspective[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 71–82.
- Um J, Thurber C H. 1987. A fast algorithm for two – point seismic ray tracing[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(3): 972–986.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double – difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6): 1353–1368.
- Xin H, Zhang H, Kang M, *et al.* 2019. High – resolution lithospheric velocity structure of Continental China by double-difference seismic

- travel – time tomography [ J ]. Seismological Research Letters, 90 ( 1 ) : 229 – 241.
- Zhang H, Thurber C H. 2003. Double – difference tomography: The method and its application to the Hayward Fault, California [ J ]. Bulletin of the Seismological Society of America, 93 ( 5 ) : 1875 – 1889.
- Zhang H, Thurber C. 2006. Development and applications of double – difference seismic tomography [ J ]. Pure and Applied Geophysics, 163 ( 2 – 3 ) : 373 – 403.

## Double – difference Imaging of Crustal Velocity Structure in the Northern Shanxi Rift Valley and Its Seismogenic Tectonic Analysis

LI Zhe, ZHENG Yong

( *Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China* )

### Abstract

The Shanxi Rift Zone is a transitional region of differential disruption located in the central part of the North China Craton. In the northern part of the Rift there are more active tectonic movements due to the influence of the Datong Volcanic Belt, and the Rift's structures including the seismogenic structure are important for understanding the dynamical and seismogenic mechanisms of the region. In this paper, the velocity structure of the crust and seismogenic structures in the northern Shanxi Rift Valley is imaged by the Seismic Double – difference Tomography. It is found that: ① The seismogenic depth in the northern Shanxi Rift is shallow and the fracture structure is complex. In the shallow part of the crust, the velocity anomaly coincides with the topographic structure; ② In the middle and lower crust, the velocity structure mainly influenced by the material below the volcanoes features some low velocity anomalies; ③ On one side of the Shanxi Rift, the Taihang Mountains have shallower roots compared with the Luliang Mountains on the other side, and there are obvious high velocity anomalies below the northern end of the Luliang Mountains. This may be related to the differential disruption of the North China Craton.

**Keywords:** the Shanxi Rift; crustal velocity structure; the Double – difference Tomography; seismogenic tectonic