

闫 睿, 万永革, 黄骥超, 等. 晋冀豫交界地震定位和一维速度模型研究[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 54–61. [YAN Rui, WAN Yongge, HUANG Jichao, et al. Earthquake Positioning and 1D Velocity Model Research in the Juncture of Shanxi, Hebei, and Henan Provinces[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 54–61.]

## 晋冀豫交界地震定位和一维速度模型研究

闫 睿<sup>1, 2</sup>, 万永革<sup>1</sup>, 黄骥超<sup>1</sup>, 李 祥<sup>1</sup>, 崔华伟<sup>1</sup>, 高熹微<sup>1</sup>

(1. 防灾科技学院, 河北 三里河 065201; 2. 河南省地震局洛阳地震台, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 采用最小一维速度模型方法, 基于 2008 到 2014 年间河南及其周边台网记录的晋冀豫交界地区 165 次地震的 994 个 P 波到时资料, 对该地区的震中和 P 波一维速度结构进行联合反演, 得到相对稳定的 P 波最小一维速度模型、台站走时校正值, 重新定位后的地震位置更加集中在林县断裂和磁县断裂交界及其附近, 且地震分布与断层的走向一致。得到的台站校正正值在山区多为正, 表明地下有低速物质, 而在 AY、YON、XX、PY、QF 处台站校正值为负, 表明地下有高速物质。

**关键词:** 地震定位; 最小一维速度模型; 晋冀豫交界地区; 台站校正

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 01-0054-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.01.009

## Earthquake Positioning and 1D Velocity Model Research in the Juncture of Shanxi, Hebei, and Henan Provinces

YAN Rui<sup>1,2</sup>, WAN Yongge<sup>1</sup>, HUANG Jichao<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>,  
CUI Huawei<sup>1</sup>, GAO Xiwei<sup>1</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;

2. Central Seismic station of Luoyang, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** Based on the 994 P wave arrival times of 165 earthquakes occurred in Henan province and its neighboring area recorded by the Henan seismic network and 1D velocity model method, the paper got a relatively stable P wave 1d Minimum velocity model, stations correction and accurate earthquake through simultaneous inversion of epicenter and 1D P-wave velocity structure. The results show that earthquakes concentrated in the Linxian fault and Cixian fault, and earthquakes distribution is consistent with the strike of fault; station correction value are mostly positive in the mountains, indicating that there are low-speed material underground the mountains, while in AY, YON, XX, PY, QF station correction value is negative, indicating that the ground has high-speed material.

**Keywords:** Earthquake relocation; The minimum 1D velocity model; The Juncture of Shanxi; Hebei and Henan Provinces; Station corrections

收稿日期: 2016-01-22

基金项目: 汶川地震前后的应力场时空演化研究(项目编号: 41674055)

作者简介: 闫 睿(1990-), 男, 在读硕士, 主要从事地震监测和构造应力场研究工作。

E-mail: 836171609@qq.com.

## 0 引言

地震定位是地震学研究的一个基本问题,在地震预报、工程地震、地球结构、以及地壳应力场分析中都是一个必要的基础,高精度地震定位一直是人们长期关注的重点。早期地震定位方法主要是几何作图法,其历史可以追溯到地震仪问世的年代<sup>[1]</sup>,计算定位起源于1912年,由德国物理学家 Geiger 提出<sup>[2]</sup>,随着计算方法和计算机技术的发展,定位方法得到发展。地震波速度结构的反演是地震学的经典问题,精准的速度模型是许多研究的基础性资料<sup>[3]</sup>。速度结构研究主要可分为一维速度结构和三维速度结构研究,一维速度结构主要用大量地震资料的走时曲线计算。地震波速度结构研究的难点是速度结构和震源位置的耦合问题,两者会互相影响其误差和准确性<sup>[4]</sup>。为了解决地震波速度结构和地震定位的耦合性问题,在 Geiger 定位方法的基础上,1976年 Crosson<sup>[4]</sup>首次提出了震源参数和速度结构联合反演方法,将速度结构与震源参数同时作为未知参数进行反演,由此弥补选取速度模型引起的误差,并得到了广泛的应用。Kissling<sup>[5]</sup>等在1994年提出可基于走时残差均方根最小作为目标函数进行一维速度结构和震源位置的联合反演方法,即“最小一维模型法”。于湘伟等<sup>[6]</sup>在2010年用此方法反演了京津唐地区中上地壳的一维速度结构;其反演后的数据

方差和均方根残差有显著改善。王伟君等<sup>[7]</sup>在云南大姚震中区域也用 Kissling 的方法进行速度结构研究,残差明显下降;赵旭<sup>[8]</sup>采用此方法在国内进行了区域速度结构研究,结果显示,最小一维速度模型较大地降低了地震走时残差,定位精度也有了很大提高。

晋冀豫交界地区分布着磁县断裂、安阳断裂及林县断裂等(图1)。磁县断裂是华北地震区一个次级构造单元的边界<sup>[9]</sup>,以太行山山前断裂带的邯鄲断裂为界,其西为新生代的太行山隆起区,以东为华北平原凹陷区,磁县断裂的走向为 NWW<sup>[10]</sup>。林县地区处于太行山隆起区的南部,断裂走向为 NNE,林县断裂为林县地震活动的一个重要地质背景。这些断裂地质构造较为复杂,历史上曾多次发生强震或中强震,具有中强地震的发生背景。

## 1 最小一维模型法概述

地震产生的地震波走时是台站坐标  $s$ , 震源参数  $h$  (包括发震时间和地理坐标) 和速度模型  $m$  的非线性函数。

$$t_{obs}=f(s,h,m) \quad (1)$$

通常来说,震源参数和速度结构都是未知的,如果只有台站位置及其到时已知,无法直接求解式(1)。假设有一个先验速度模型,可以从假定的

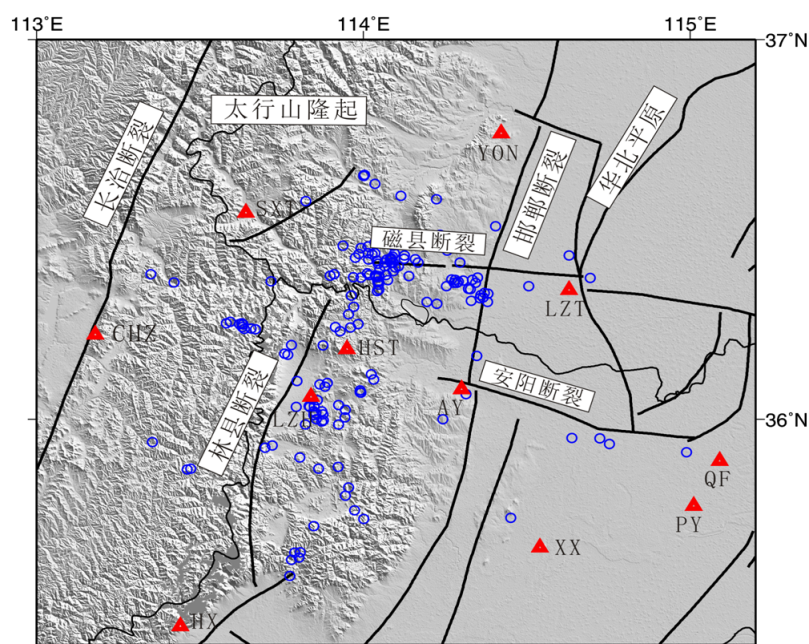


图1 震中与台站分布

Fig.1 Distribution of epicenters and stations

震源射线追踪至台站处,并计算出理论到时( $t_{\text{calc}}$ )。观测到时和理论到时之间的差值,定义为走时残差( $t_{\text{res}}$ )。要计算震源和速度结构参数的修正值,需要知道观测走时对所有参数的依赖关系。对公式(1)进行一阶泰勒展开,得到走时残差和震源修正值( $\Delta h_k$ )及速度修正值( $\Delta m_i$ )的线性关系:

$$t_{\text{res}} = t_{\text{obs}} - t_{\text{cal}} = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e \quad (2)$$

以矩阵形式表达,震源和速度模型参数的关系可以写成:

$$t = Hh + Mm + e = Ad + e \quad (3)$$

上式中,走时残差向量  $t$ ; 走时对震源参数的偏微分矩阵  $H$ ; 震源参数修正值向量  $h$ ; 走时对速度模型参数的偏微分矩阵  $M$ ; 速度模型参数修正值向量  $m$ ; 走时误差向量  $e$ , 包含观测走时测量误差、台站位置误差造成的理论走时误差、速度模型和震源不当造成的误差以及非线性近似误差等; 偏微分矩阵  $A$ ; 震源修正值和模型参数修正值向量  $d$ 。

最小一维模型方法基本计算过程为:在参考已有信息的基础上,首先选取不同的速度模型作为初始模型,同时反演震源参数、速度模型和台站校正;然后在初始模型的基础上将层厚进行细分,加密层数,把经过反复计算得到走时均方根残差最小的一维速度模型作为最后求得的“最小

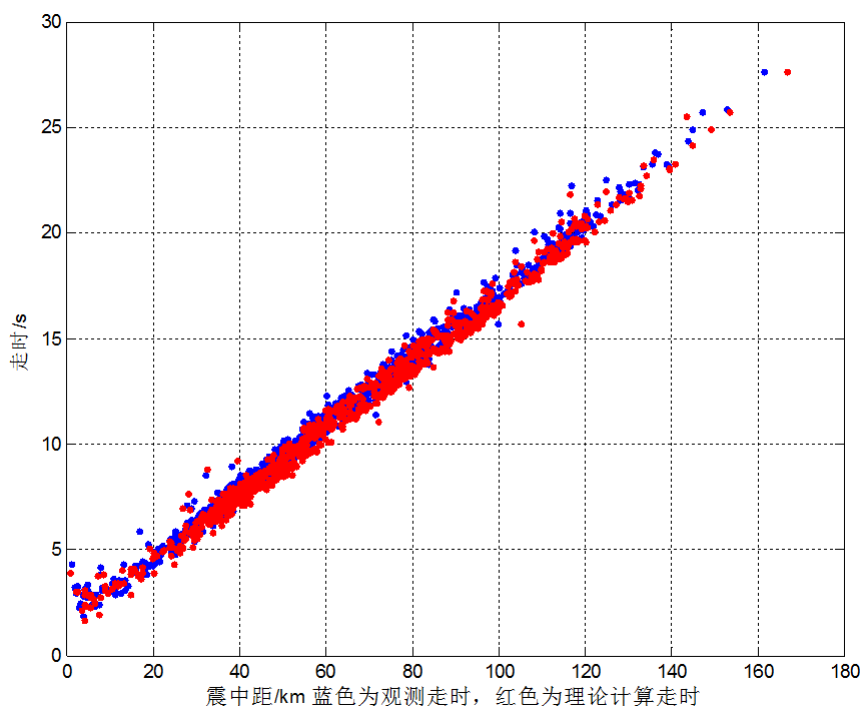
一维速度模型”。选取不同的速度模型反复计算旨在求得多值解空间中的全局最小速度模型,避免陷入局部最小。

## 2 资料选取

本文研究的区域范围为  $35.4^{\circ} \sim 37^{\circ} \text{N}$ ,  $113.0^{\circ} \sim 115.2^{\circ} \text{E}$ 。“十五”建成的河南数字地震台网 2007 年 12 月通过验收,2008 年 1 月正式投入运行。对于网缘地震,使用兄弟省份的共享台站资料。本研究共选取了 11 个对区域中地震约束较好的台站数据进行计算。为保证数据可靠性和较好的反演效果我们通过以下标准选择地震事件:(1)方位空区小于  $180^{\circ}$  的地震事件;(2)每个地震至少有 3 个台站记录;(3)剔除观测走时曲线中散度较大的震相,选择符合震中距走时曲线的地震(图 2)。通过 3 步挑选,最终挑选出 2008 到 2014 年间河南及其周边台网记录到的晋冀豫交界地区 165 次地震的 994 个直达波到时资料(图 2)。

## 3 最小一维速度模型计算

为获得该区域的最小一维速度模型,参考以往对该地区研究工作中得到的速度信息,最终选取了 3 个初始速度模型,模型 1:邵学钟等<sup>[1]</sup>



(蓝色点为观测的  $P_g$  波走时,红色点为理论  $P_g$  波走时。理论  $P_g$  波走时的速度模型采用邵学钟等 (1993) 的结果)

图 2 震相走时曲线

Fig.2 Travel time curve of seismic phase

在邢台震源区及相邻地区的地壳速度结构研究结果;模型 2:基于 crust2.0 的地壳速度模型;模型 3:根据陈立华<sup>[12]</sup>给出的华北地区速度模型。在反演过程中,当计算满足下列条件时迭代终止:①震源位置,台站校正值、速度值均没有很大变化;②走时均方根残差相对于第一次重新定位后的结果明显地减小。我们对 3 种不同的初始速度模型

分别进行 20 次迭代,获得的输出速度模型如图 3 所示。模型 1 的走时均方根残差从 0.683 降到了 0.234,模型 2 从 0.557 降到了 0.218,模型 3 从 1.206 降到 0.222。由 3 种速度模型的走时均方根残差随迭代次数的变化图(图 4)可以看出模型 2 的走时均方根残差在趋于稳定后最小。所以将模型 2 的输出模型作为最小一维速度模型(表 1)。

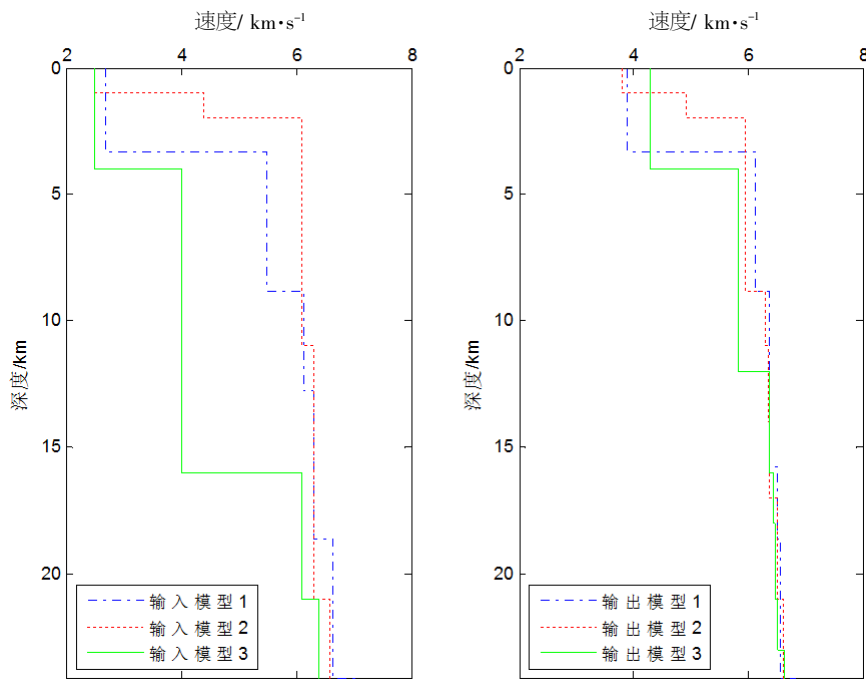


图 3 3 种不同的 P 波初始速度模型及输出模型

Fig.3 Initial and output velocity model of three different P waves

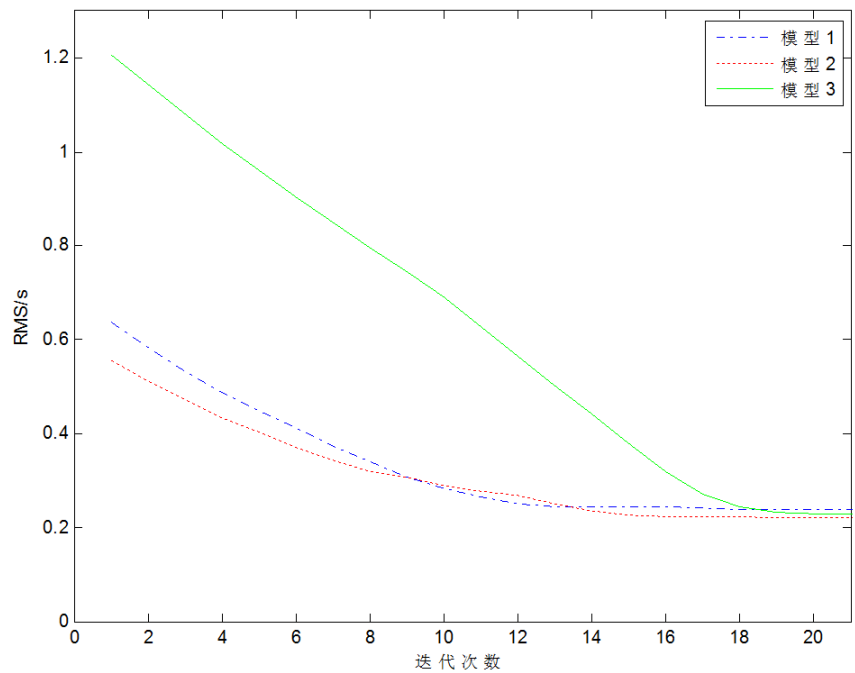


图 4 速度模型对应走时均方根残差随迭代次数的变化

Fig.4 Variation of travel time RMS residuals of velocity model

表 1 初始模型与最小一维速度模型速度对比

Table 1 The contrast between the initial velocity model and minimum 1D velocity model

深度/km	初始速度模型/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	最小一维速度模型速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
0	2.50	3.80
1	4.40	4.92
2	6.10	5.96
5	6.10	5.96
8.80	6.10	6.30
11.00	6.30	6.35
14.00	6.30	6.36
17.00	6.30	6.51
21.00	6.60	6.61
31.00	6.60	6.82

把模型 2 经过 20 次迭代得到的最小一维速度模型与初始速度模型比较发现(表 1)，0~1 km 之间速度高于初始模型约 1.3 km/s，1~2 km 时速度减少 0.52 km/s，2~5 km 处速度值增加 0.14 km/s，5~8.8 km 速度增加 0.2 km/s。8.8~11km 速度基本没变，增加 0.05 km/s，11~14 km 深度速度增加了 0.06 km/s，14~17 km 增加了 0.21 km/s，17~21 km 深度速度增加 0.01 km/s。浅层速度模型与最小一维速度模型相差 1.3 km/s，速度约束能力较差，可能是浅层地壳速度变化的影响被台站校正所补偿；5~21 km 之间速度值变化较小，速度约束能力较

强。平均直达波射线垂直长度为 12km。反演后的数据方差和走时均方根残差都有明显的改善，数据方差由 0.955 降为 0.151s<sup>2</sup>，走时均方根残差由 0.557 降为 0.218s。说明计算得到的最小一维速度模型要好于原始一维速度模型(图 5)。

4 地震定位结果

重定位结果较原定位结果向西移动但整体没有较大变化(图 6)，可能是因为我们选取的直达波 p 波震相平均深度较浅、每个地震直达波记录的台

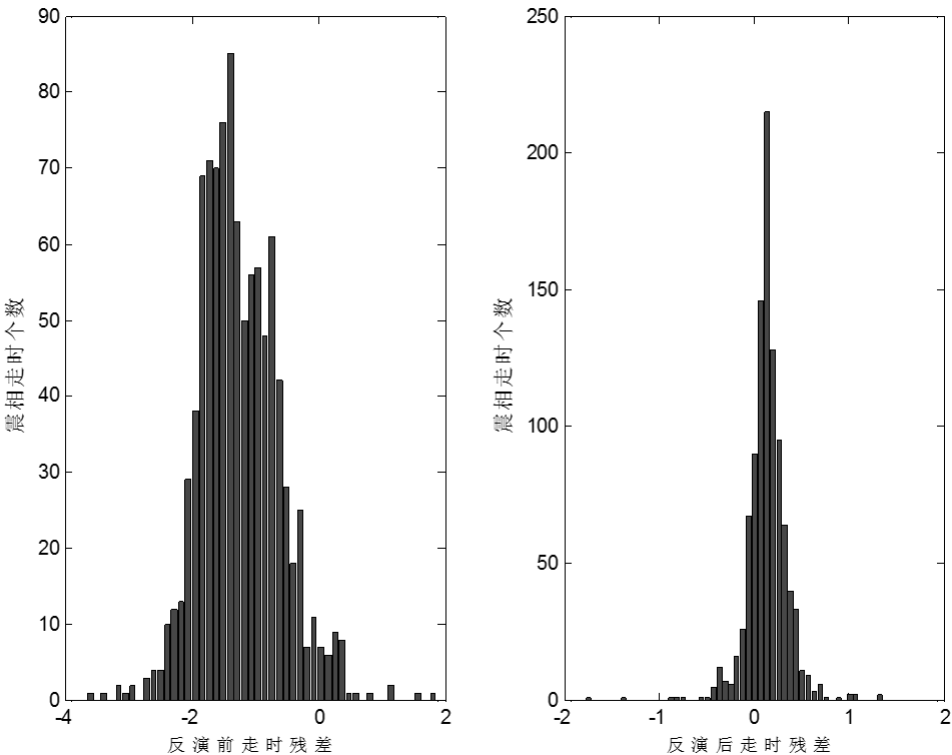


图 5 模型 1 反演前后震相走时残差分布图

Fig.5 Distribution of travel time RMS residual before and after the inversion of model 1



站数较少,因此无法获取更深处地震波速度信息(图7)。从地震重新定位前后震中分布图(图6)看出定位后地震更加集中在林县断裂和磁县断裂交界及其附近,靠近林县断裂的地震呈NNE分布,而靠近磁县断裂的地震呈NWW分布,磁县地区出现较为密集的地震,地震的分布整体与该区域的地质构造特征一致,这从一个侧面说明重定位后地震在经度、纬度方向上定位精度都有提高。

## 5 台站校正

由于本研究采用均匀一维模型进行地震定位和速度结构反演,介质横向不均匀性对反演结果

的影响最终归结到台站校正项上,因此台站校正正值反映了速度模型与横向不均匀速度模型之间的差异,台站校正值的正、负分别对应台站布设地区速度异常的高低。不同的台站校正值表征出晋冀豫交界地区速度结构的横向不均匀性。我们获得的台站校正范围为 $-0.40\sim 0.16\text{s}$ (表2)。从表2中可以看出AY、QF、XX、PY、YON、HST等6个台站所在的区域校正值为负,表明该区域存在高速异常。其余台站校正值为正值,表明其台站所在的区域存在低速异常。从图8可以看出LZT台站所在区域的延迟与周围台站不符,其所在区域近地表为低速异常,分析其可能由断层交汇挤压破裂造成。

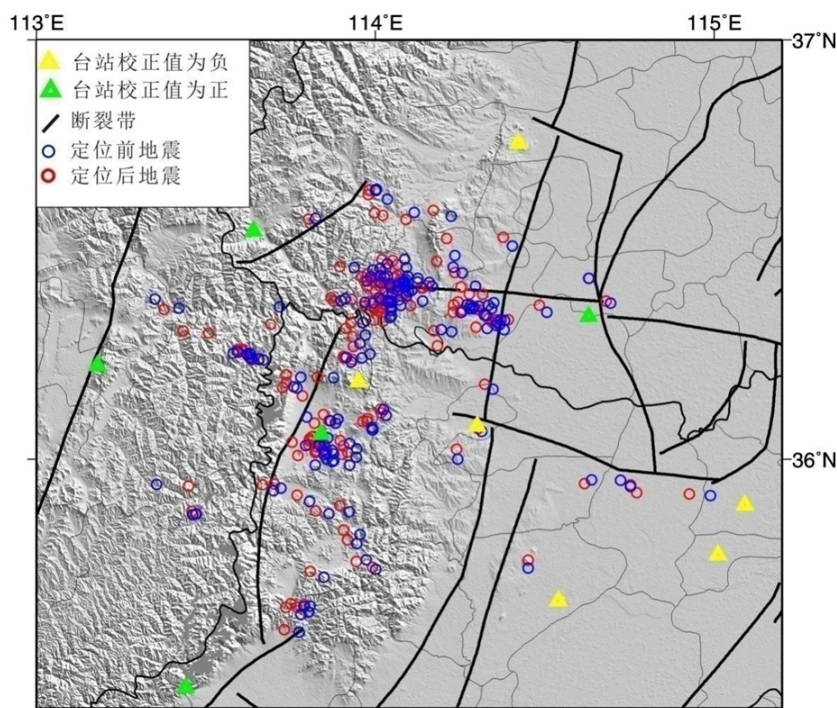


图6 精定位前后震中分布图

Fig.6 Distribution of earthquakes before and after relocating

## 6 结语

通过 Kissling 提出的计算最小一维速度模型方法,利用河南台网及邻近区域的观测走时资料,确定了晋冀豫交界区最小的一维速度模型。

使用最小一维速度模型可以减轻横向速度不均匀性对地震定位产生的影响,从而有效地提高地震定位的精度。本研究利用p波震相数据反演晋冀豫交界地区一维速度模型:根据先验信息建立了3种初始速度模型,进行反演得出三个输出模型,然后对比3种输出模型的走时均方根残差,选择走时均方根残差最小的速度模型作为最小一

维速度模型。

重定位后的地震走时残差有较大的降低,同时其降低的幅度有限,说明采用的一维速度模型结构近似真实的地壳结构仍然过于简化,需用更复杂更合理的速度模型进行联合定位,才能期望得到更高精度的结果。另外地震深度和震相的选择限制了速度结构的深度。我们选取的直达波p波震相平均深度较浅,因此无法获取更深处地震波速度信息。地震重定位结果较原定位结果没有明显变化,地震主要集中在林县断裂和磁县断裂交界及其附近(图6)。靠近林县断裂的地震呈NNE分布,而靠近磁县断裂的地震则呈NWW分

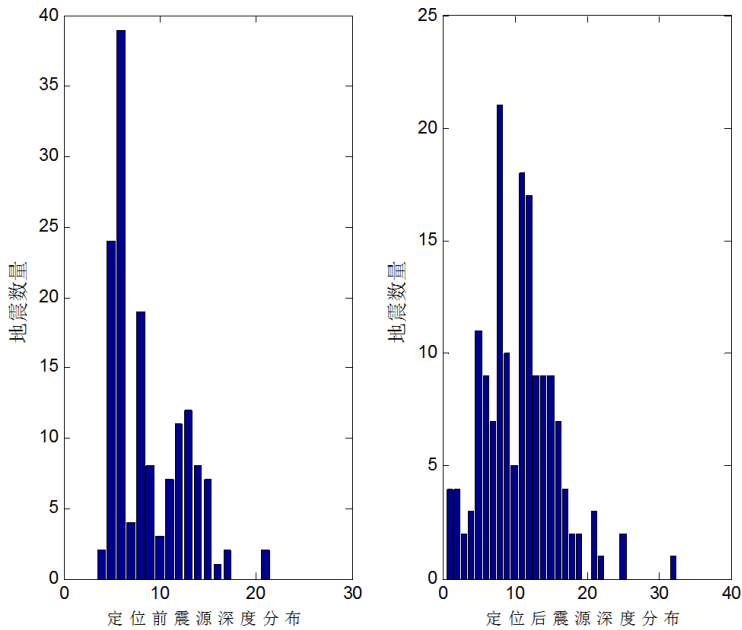


图 7 重定位前后震源深度分布图  
Fig.7 Distribution of focal depth before and after relocating

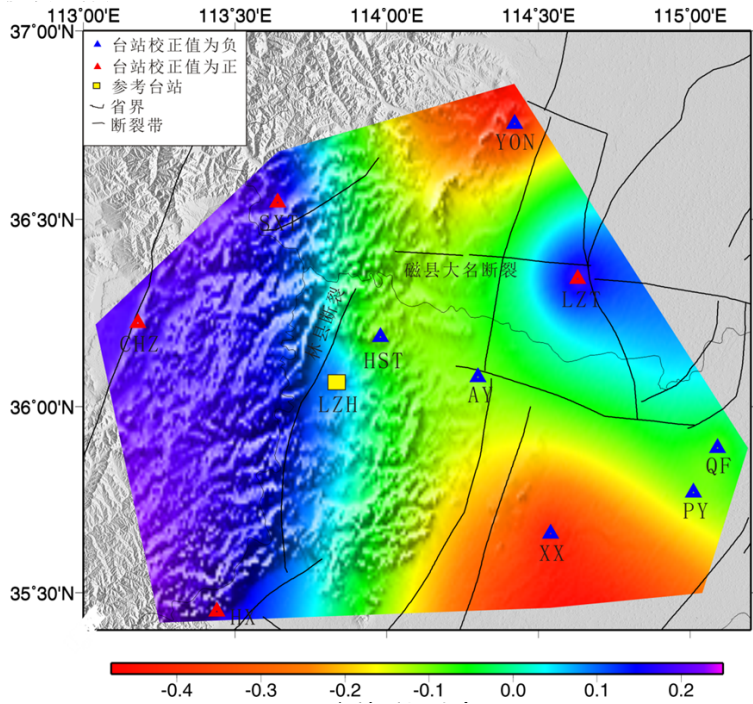


图 8 台站延迟分布图  
Fig.8 Distribution of stations delay

表 2 台站校正值

Table 2 Stations correction value

台站名	校正值/s	台站名	校正值/s
XX	-0.40	LZH	0.00
PY	-0.18	SXT	0.16
QF	-0.18	LXT	0.16
HX	0.16	YON	-0.40
CHZ	0.16	HST	-0.18
AY	-0.18		

布,磁县地区出现了较为密集的地震,地震的分布整体与该区域的地质构造特征一致,定位后的震源深度集中分布在8~15 km,历史上该地区发生过7.5级的大震(公元1830年,震中为36.4°N, 114.2°E);刁桂苓<sup>[18]</sup>研究表明,磁县历史大地震区持续有小地震发生,是大震区长期活动的一种表现,属于震源体附近地壳的继承性活动。本文得到的中小震地震分布与断层的走向分布一致,也证明了反演结果的可靠性。

反演得到的台站校正值得反映了晋冀豫交界地区地表速度的横向不均匀性,获得的台站校正范围为-0.40~0.16 s(表2);从表2中可以看出AY、QF、XX、PY、YON、HST6个区域校正值为负,表明该区域近地表速度为高速异常。剩余台站校正值为正值,表明其台站所在的区域为低速异常。其中LZT台站与周围台站延迟不同,其所在区域近地表显示为低速异常,可能由断层交汇挤压破裂造成。

#### 参考文献:

- [1] 杨文东,金星,李山有,等.地震定位研究及应用综述[J].地震工程与工程振动,2005,25(1):15-20.
- [2] Geiger, L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only [J]. Bull.St. Louis.Univ., 1912, 8(1): 56-71.
- [3] 李 铂,崔鑫,叶庆东,等.山东地区地震波一维速度模型研究[J].华北地震科学,2012,30(4):1-6.
- [4] Crosson, R. Crustal structure modeling of earthquake data, Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters [J]. Geophys. Res, 1976, 81(17): 3 036-3 046.
- [5] KisslingE, WL El lsworth, D Eberhart - Phillips, et al. Initial reference models in local earthquake tomography.J. Geophys.Res., 1994, 991 (B10): 19 635-19 646.
- [6] 于湘伟,陈运泰,张怀.京津唐地区地壳三位P波速度结构与地震活动性分析[J].地球物理学报,2010,53(8):1 817-1 828
- [7] 王伟君,陈 凌,陈棋福,等.2003年大姚地震震中区的速度结构和衰减结构[J].地球物理学报,2007,50(3):770-779.
- [8] 赵 旭,李 强,蔡晋安.三峡库首区最小一维速度模型研究[J].大地测量与地球动力学,2007,27(专刊):1-7.
- [9] 李 皓,潘 晖,温 超,等.磁县断裂带的活动和地震活动特征[J].华北地震科学,2013,31(2):29-34.
- [10] 江娃利,张英礼.河北磁县北北西向南山村-岔口活动断裂带活动特征与1830年磁县地震[J].地震地质,1996,18(4):349-357.
- [11] 邵学钟,张家茹,章思亚,等.邢台地震区深部构造背景的地震转换波探测和研究[J].地球物理学报,1993,36(5):609-619.
- [12] 陈立华,宋仲和.华北地区地壳上地幔P波速度结构[J].地球物理学报,1990,33(5):540-547.
- [13] 王小娜,于湘伟,章文波,等.龙门山断裂带南段地壳一维P波速度结构[J].地震研究,2015,38(1):16-24.
- [14] 万永革,李鸿吉.遗传算法在确定震源位置中的应用[J].地震地磁观测与研究,1995,16(6):1-7.
- [15] 万永革,李清河,李鸿吉.用遗传算法确定三维横向不均匀介质中的近震震源位置[J].西北地震学报,1997,19(2):7-14.
- [16] 万永革,刘瑞丰,李鸿吉.用遗传算法反演京津唐地区的三维地壳结构和震源位置[J].地震学报,1997,19(6):623-633.
- [17] 万永革,盛书中,程万正,等.考虑到时误差的地震定位算法及其在四川地区2001-2008年地震定位的应用[J].地震地质,2012,3(1):1-10.
- [18] 刁桂苓,张四昌,赵 军,等.用现今小地震研究历史强震的震源断层——以1830年河北磁县7.5级地震为例[J].地震地质,1999,21(2):121-126.
- [19] 吕子强,肖兰喜,许萍.濮阳地震集中区地震精定位及其预测意义[J].华北地震科学,2008,26(2):12-15.
- [20] 刘福田.震源位置和速度结构的联合反演—理论和方法[J].地球物理学报,1984,27(2):167-175.
- [21] 平建军,曹肃朝,张清荣,等.华北某些额地区地震活动特征的研究[J].地震,2003,23(3):105-112.
- [22] 郑建常,顾瑾平,张元生.联合反演研究华北地区三位速度结构[J].地球物理学进展,2007,22(6):1 706-1 714.
- [23] 郑建常,吕子强,许 萍,等.濮阳小震集中区发震机理分析与讨论[J].中国地震,2013,29(1):11-25.
- [24] 张小涛,韩丽萍,张新东,等.河北邯郸-邢台地区波速比和泊松比分布特征研究[J].西北地震学报,2012,34(1):84-87.
- [25] 张小涛,吕坚,马广庆,等.双差地震定位法在邯郸-邢台地区地震精确定位中的初步应用[J].地震研究,2008,31(1):37-41.
- [26] 张小涛,韩丽萍,王晓山,等.晋冀鲁豫交界地区震源位置及震源区速度结构的联合反演[J].地震,2011,31(4):26-35.
- [27] 莘海亮,方盛明,李 稳.豫北及邻区地震双差法重新定位研究[J].大地测量与地球动力学,2011,31(6):63-68.
- [28] 李 强,赵 旭,蔡晋安,等.三峡水库坝址及邻区中上地壳p波速度结构[J].中国科学,2009,39(4):427-436.