

濮阳地震集中区双差层析成像研究*

吕子强^{1,2}, 郑建常², 张刚², 张书建², 于澄², 颜启²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 利用 2000 ~ 2013 年濮阳地震集中区的地震观测数据, 采用双差层析成像方法, 对地震进行精定位, 并反演了濮阳地震集中区的三维速度结构。结果表明: 小震震源主要位于聊城—兰考主干断裂上, 优势深度集中在 4 ~ 15 km 之间, 与断层的产状吻合; 濮阳地震集中区的速度结构与地质构造有着一定的相关性, 地震大部分发生在高速异常体内, 高速异常体内的脆性介质往往是应力最为集中的地方, 这可能是导致濮阳地震集中区小震发生的主要原因。

关键词: 双差层析成像; 速度结构; 重定位; 濮阳地震集中区

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)02-0255-06

0 引言

濮阳地震集中区处于山东鄄城、河南濮阳的交界地区, 是华北地区地震活动较为集中的区域之一, 主要受北北东走向的聊城—兰考断裂带和北东走向的长垣断裂带控制, 同时该区还有多条次级断裂, 构造特征比较复杂。历史上曾经发生过 1830 年河北磁县 7.5 级地震和 1937 年山东菏泽 7.0 级地震等多次 7 级以上强震。自 1997 年以来, 该区连续发生多次 4 级以上中等地震, 经历了两次小震活动的增强过程, 目前小震活动仍比较活跃。因此构建濮阳地震集中区三维速度结构, 有助于进一步了解该区域的地震活动特征。

地震层析成像是探测地下介质结构和深部断裂活动的重要方法。Zhang 和 Thurber (2003) 在双差定位方法 (Waldhauser, Ellsworth, 2000) 的基础上提出了双差层析成像方法。该方法考虑了介质速度结构在空间范围上的变化, 采用层状网格模型, 因此可以得到更加精确的定位结果。以往的研究结果表明, 利用该方法可得到震源区精细速度结构, 为揭示震源区介质分布及地震发生的深部构造研究提供了更加可靠的信息 (Zhang, Thurber, 2005; 王长在等, 2011, 2013; 邓文泽等, 2014)。本文采用双差层析成像方法, 对濮阳地震集中区的地震序列进行重定位和速度结构的反演, 为该区域的地震危险性判断和地震趋势研究提供一定的参考。

1 资料与方法

双差层析成像方法通过联合绝对走时数据和相对走时数据实现三维速度结构和震源参数的联合反演。假设有两个相邻的地震, 对于第 i 次地震, 台站 k 的观测到时与理论到时差 r_k^i 可近似表示为

$$r_k^i = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau_k^i + \int_i^k \delta u ds. \quad (1)$$

对于符合组对条件的第 j 次地震, 台站 k 同样可以得到上述的残差 r_k^j , 则第 i 和第 j 两次地震在同一台站的到时差之差可以表示为

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau_k^i + \int_i^k \delta u ds - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j - \Delta \tau_k^j + \int_j^k \delta u ds. \quad (2)$$

通过联合反演就可以得到震源区精细的速度结构及地震重新定位结果。由于该方法联合使用绝对走时和相对走时, 增加了双差方程, 因此相比于传统方法可以揭示更多的精细结构信息。

本文选取濮阳地震集中区有数字记录资料以来的 2000 ~ 2013 年发生的 315 个地震。为了确保震相拾取的准确性, 所选地震震级均大于 1.0 级, 首先对震相数据进行筛选, 依据 P 波、S 波的时距曲线, 剔除有明显错误或数据偏差较大的震相。图 1 给出了本文所使用的震相数据的时距曲线, 同时保证每次地震至少被 4 个台站记录到, 其中参加反演的 P 波绝对到时 2 539 个, 相对到时资料 33 972 个, 参

* 收稿日期: 2014-10-28.

基金项目: 地震星火项目 (XH16024Y; XH15026) 及山东省地震局科研基金及合同制项目联合资助.

与反演的台站有 24 个。台站和地震分布见图 2。

本文反演采用的初始模型参考了该区域以往的研究结果及人工地震观测的结果（嘉世旭等，2001；莘海亮等，2011）。表 1 给出了 P 波速度初始模型。表 1 中的上界面深度表示为分层速度模型中各层的顶面深度，层厚度为下一个上界面深度与该上界面深度之差。海平面以上部分与第一层的速度相同。S 波速度与 P 波速度的比值为 1.72。

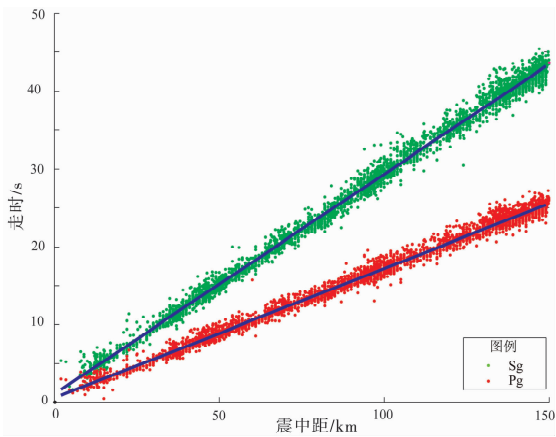


图 1 濮阳地震集中区不同震相的时距曲线
Fig. 1 Travel time – distance curves of different phases in Puyang clustered earthquakes zone

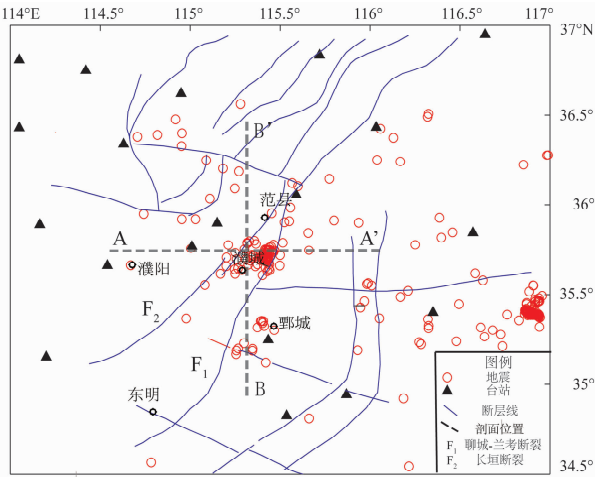


图 2 濮阳地震集中区台站和地震分布图
Fig. 2 Distribution of stations and earthquakes in Puyang clustered earthquakes zone

表 1 濮阳地震集中区速度初始模型

Tab.1 Initial velocity model in Puyang clustered earthquakes zone

上界面深度/km	0.00	4.00	10.00	15.00	20.00	26.00
P 波速度/km · s ⁻¹	3.00	5.4	6.0	6.2	6.5	7.0

2 双差层析成像结果

濮阳地震集中区主要位于东濮凹陷地区，属于第三系裂陷盆地。东濮凹陷地处豫鲁边界，北起范县，南至兰考，西自濮阳，东到东明，为渤海裂谷系向西的分支。它是在结晶变质岩系基底上发育的地台型构造层系，受到新生代地壳水平拉张作用，逐渐裂解断陷而形成的断陷盆地（王婧韞等，2014）。图 3 为濮阳地震集中区主要地质构造图，东濮凹陷夹在鲁西隆起与内黄隆起之间，主要受 NNE 走向的聊城—兰考断裂和长垣断裂控制，其中聊城—兰考断裂带以东为鲁西隆起区，长垣断裂带以西为内黄隆起区。

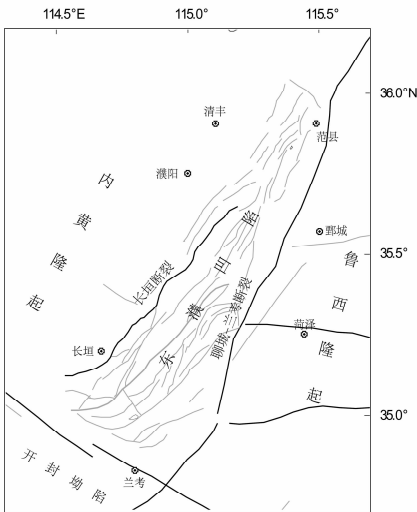


图 3 濮阳地震集中区主要地质构造图
Fig. 3 The main geological map in Puyang clustered earthquakes zone

本文利用双差层析成像方法反演濮阳地震集中区的三维速度结构，对研究区域内的 315 次地震进行重新定位，最终获得 291 次地震的精定位结果，重新定位后均方根残差平均值由原来的 1.19 s 降为 0.59 s，通过对理论到时和观测到时残差的理论估计，震源位置的测定误差在 E – W 方向平均为 0.36 km，在 N – S 方向平均为 0.40 km，在垂直方向平均为 0.49 km。

对比重定位前后的震中分布（图 4），可以看出双差定位后的震中位置更加集中，丛集性较为明显，优势分布方向为 NNE 向，与该区域断层的走向方向基本一致。重新定位后震中主要分布于

聊城—兰考断裂带一侧, 延展范围约 20 km, 地震分布与断层的形态密切相关。胡长和和许坤福 (1991) 认为聊城—兰考断裂带走向 $23^{\circ} \sim 32^{\circ}$, 倾角 $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 据钻孔资料揭露, 该断裂东西两侧上第三系和第四系厚度相差 660 m, 说明该断裂继承性差异运动十分强烈, 这种差异运动可能与该地区小震活动有一定的相关性。

从反演结果看, 绝大部分地震主要集中在深度 15 km 以上, 本文给出上界面深度为 4 km 和 10 km 的速度结构结果。深度为 4 km 和 10 km 速度结构结果基本反映了该地区上地壳速度的横向变化特征, 与该地区的地表构造有着一定的关系。从深度为 4 km 速度结构结果 (图 5a) 可以看出, 内黄

隆起呈现为明显的高速异常, 东濮凹陷呈现为低速异常, 内黄隆起的高速异常有向东“侵入”的特征。从图 5b 同样可以看出, 内黄隆起呈现为高速异常, 高速异常体的形态有一定的收敛, 而东濮凹陷呈现为相对更加明显的低速异常的形态, 可以清楚地显示东濮凹陷的基底特征。该结果与莘海亮等 (2011) 所反演得到的 4 ~ 12 km 深度层的速度结果比较吻合。聊城—兰考断裂带和长垣断裂带介于高低速异常的转换带上, 表明断裂带两侧的介质速度结构存在差异性, 这种差异性可能更有利于应力集中, 从而产生地震。从整体的反演结果来看, 该地区的浅层速度结构与地表构造基本一致。

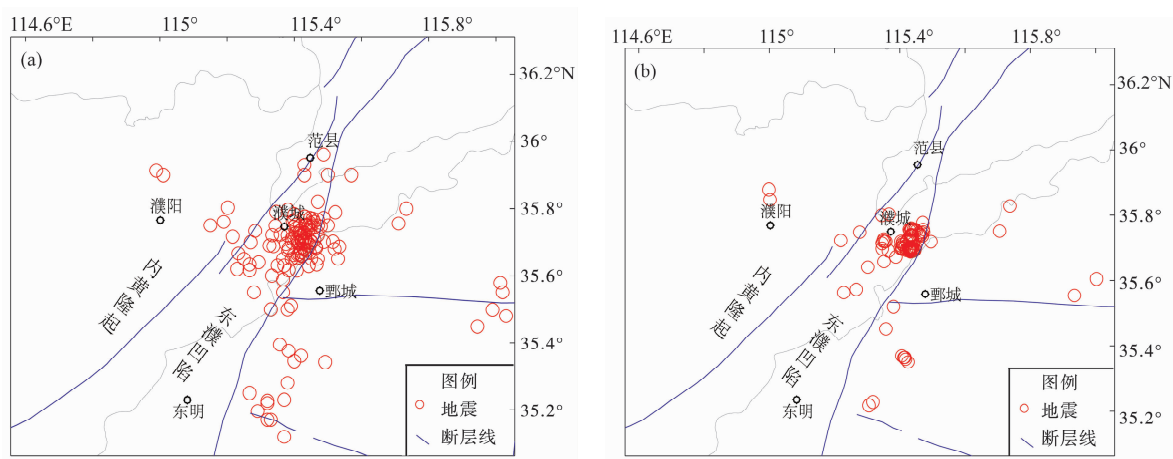


图4 重新定位前 (a)、后 (b) 震中分布图

Fig. 4 Distribution of epicenters before (a) and after (b) relocation

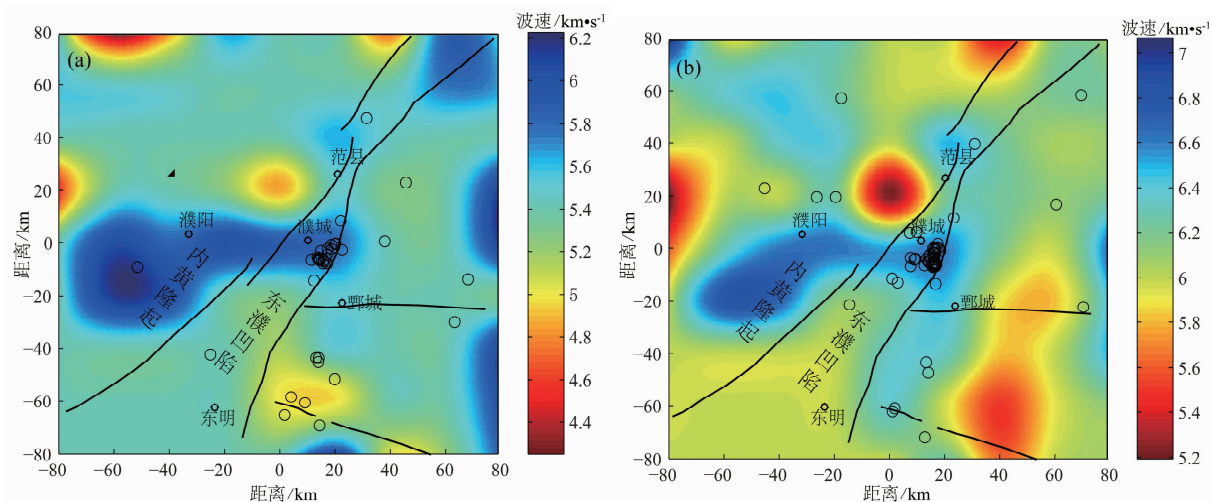


图5 深度为 4 km (a)、10 km (b) 的水平层析成像结果

Fig. 5 Horizontal tomography results at the depth of 4 km (a) and 10 km (b)

3 讨论

濮阳地震集中区内的构造特征和断裂展布与速度结构的横向变化有着较好的对应,聊城—兰考断裂带和长垣断裂带的走向与高低速过渡带的形态比较一致,断裂带两侧的速度存在明显差异。深度为 4 km 和 10 km 的水平层析成像结果显示,地震主要发生在聊城—兰考主干断裂带上,并且处于高速异常体内。一般认为高速体与地下较脆、较强的岩体有关,这些部分能够积累更多的孕震

能量,内黄隆起的高速异常体向东“侵入”特征可能与地震的孕育密切相关。

AA'剖面(图6a)的速度结构显示,内黄隆起的高速异常向东“侵入”聊城—兰考断裂带下方,可能导致聊城—兰考断裂带下方的应力比较集中,从而增强了断层的活动性。从 BB'剖面(图6b)的速度结果可以看出,地震震源处的高低速异常过渡带比较明显,断裂带两侧介质速度结构具有明显的不均匀性,高低速异常体的过渡地带既是应力集中的地方,又是介质相对比较脆弱的地方,这样的环境具备了积累大量应变能的介质条件,容

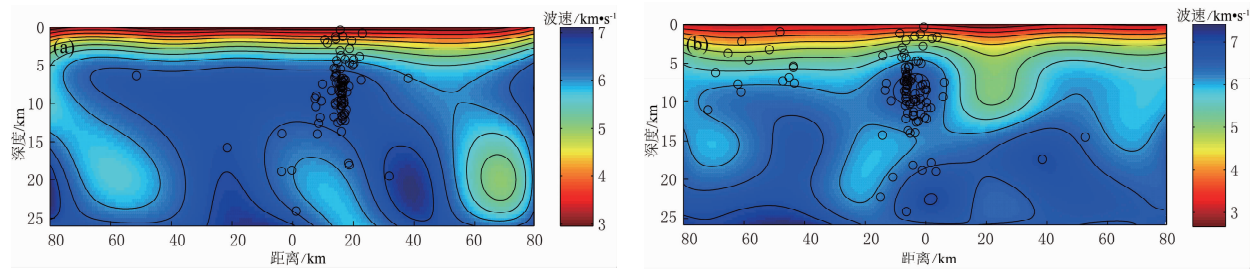


图 6 垂向 AA' (a)、BB' (b) 剖面层析成像结果

Fig. 6 Vertical tomography results of AA' (a) and BB' (b) vertical profile

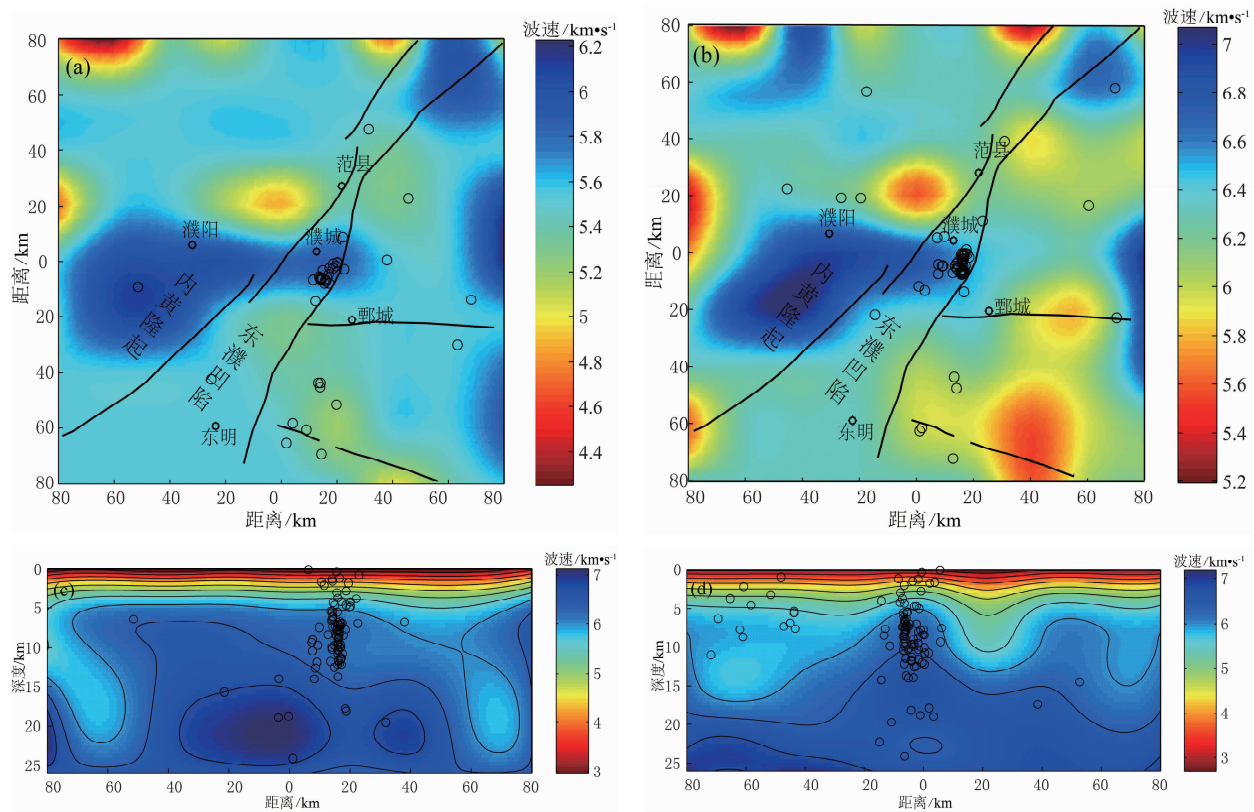


图 7 深度为 4 km (a) 和 10 km (b) 及 AA' (c)、BB' (d) 剖面恢复性实验结果

Fig. 7 Restoring test at the depth of 4 km (a) 10 km (b), and profile of AA' (c) and BB' (d)

易发生破裂释放应力。

从图6可以清楚地看到,地震主要发生在高速异常体内,主要分布在25 km以上,优势深度集中在4~15 km之间,断层的破裂宽度约20 km,地震分布比较密集,显示出断层的倾角比较陡立,这与于平等(2003)认为的聊城—兰考断面上部视倾角约为70°~80°的结果比较接近。对比速度结构与地震分布可以看出,速度结构的不均匀性可能是控制地震分布的主要因素。东濮凹陷发生过 $M \geq 6$ 地震3次,即1502年10月27日濮城 $M 6\frac{1}{2}$ 地震、1937年8月1日菏泽 $M 7.0$ 地震和 $M 6\frac{1}{2}$ 强余震。濮阳地震集中区与1502年濮城 $M 6\frac{1}{2}$ 地震的震源破裂区的范围大致重合,而目前该区域内的地震活动的持续增强过程,可能表明历史地震的断层上又重新积累了一定水平的应变(郑建常等,2013)。

为了进一步检验研究区内成像结果的可靠性及分辨率,利用恢复性实验方法进行验证(Zhao *et al.*, 1992)。采用实际地震资料的反演结果作为恢复性实验的输入模型,可以得到各震相的理论走时,然后将获得的理论走时作为观测值,基于初始模型,反演得到新的成像结果。通过对比新的成像结果和实际地震资料的反演结果,可以反映成像结果的可靠性。图7给出了研究区内的恢复性实验的检验结果。对比恢复性实验结果和实际地震资料的反演结果可以看出,二者速度异常形态非常相似,只有部分异常体的形态和幅值存在较小的差异,这表明成像结果中的主要构造特征是可靠的。

4 结论

本文应用双差层析成像方法反演得到了濮阳地震集中区的速度结构特征,反演结果与该区域的构造特征和断裂展布比较一致。濮阳地震集中区的小震活动主要发生在高速异常体内,地震分

布比较密集。内黄隆起的高速异常体向东“侵入”现象导致了聊城—兰考断裂带处的速度结构的不均匀性,可能致使该区的应力比较集中,这表明速度结构的不均匀性可能是控制该区域地震分布的主要因素。

感谢张海江博士无私地提供双差层析成像程序。

参考文献:

- 邓文泽,陈九辉,郭飏等. 2014. 龙门山断裂带精细速度结构的双差层析成像研究[J]. 地球物理学报, 57(4): 1101–1110.
- 胡长和,许坤福. 1991. 1937年菏泽地震[M]. 北京: 地震出版社.
- 嘉世旭,张先康,方盛明. 2001. 华北裂陷盆地不同块体地壳结构及演化研究[J]. 地学前缘, 8(2): 259–266.
- 王长在,吴建平,房立华等. 2011. 2009年姚安地震序列定位及震源区三维P波速度结构研究[J]. 地震学报, 33(2): 123–133.
- 王长在,吴建平,房立华等. 2013. 玉树地震震源区速度结构与余震分布的关系[J]. 地球物理学报, 56(12): 4072–4083.
- 王婧韞,宋慧利,王正斌等. 2004. 东濮凹陷断裂体系及其意义[J], 石油地球物理勘探, 39(6): 724–729.
- 莘海亮,方盛明,张元生等. 2011. 安阳及邻区三维地壳速度结构研究[J]. 地球物理学进展, 26(5): 1535–1543.
- 于平,杨冬,杨宝俊. 2003. 华北地台聊城—兰考断裂地球物理场基本特征及其构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 33(1): 106–110.
- 郑建常,吕子强,许萍等. 2013. 濮阳小震集中区发震机理分析与讨论[J]. 中国地震, 29(1): 11–25.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm; method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bull Seism Soc AmPr, 93(6): 1353–1368.
- Zhang H, Thurber C H. 2003. Double difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California[J]. Bull Seism Soc AmPr, 93: 1875–1889.
- Zhang H, Thurber C H. 2005. Adaptive mesh seismic tomography based on tetrahedral and Voronoi diagrams: Application to Parkfield, California [J]. J Geophys Res, 110 (B4): B04303, doi: 10.1029/2004JB003186.
- Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. J Geophys Res, 97(B13): 19909–19928.

Research on Velocity Structure in Puyang Clustered Earthquakes Area by Double-difference Tomography

LU Ziqiang^{1,2}, ZHENG Jianchang², ZHANG Gang², ZHANG Shujian², YU Cheng², YAN Qi²

(1. *Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China*)

(2. *Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China*)

Abstract

Using seismic observation data in Puyang clustered earthquakes zone during 2000 and 2013, we obtained the accurate relocation of earthquakes sequence and inversed the 3D seismic velocity structure in the study area by double-difference tomography. The results show that the epicenters of most earthquakes located at the trunk fault of Liaocheng-Lankao Fault and the focus depth of them mainly distributed between 4 km and 15 km. The distributions of the earthquake accorded with the attitude of the fault. The inversed velocity structure had certain relation with the geological structure in the study area, and the earthquake occurs mostly in the high velocity anomaly body. The brittle medium in the high velocity anomaly body always is the location of stress concentration, which is the main reason for frequent small earthquakes in Puyang clustered earthquakes zone.

Key words: double-difference tomography; velocity structure; relocation; Puyang clustered earthquakes zone