

张帆, 贾宝金, 赵艳红, 等. 2017 年 8 月 9 日新疆精河 6.6 级地震的震源区域地壳结构和发震断裂几何特征分析[J]. 华南地震, 2020, 40(1): 29–34. [ZHANG Fan, JIA Baojin, ZHAO Yanhong. Analysis of Crustal Structure and Seismogenic Fault Geometry in the Focal Region of the Jinghe M6.6 Earthquake in Xinjiang on August 9th, 2017[J]. South China journal of seismology, 2020, 40(1): 29–34]

2017 年 8 月 9 日新疆精河 6.6 级地震的震源区域地壳结构和发震断裂几何特征分析

张 帆¹, 贾宝金², 赵艳红¹

(1. 内蒙古自治区地震局, 呼和浩特 010051; 2. 乌拉浩特地震台, 内蒙古 乌兰浩特 137400)

摘要: 使用中国地震台网观测报告, 选取 2017 年 8 月 9 日新疆精河 6.6 级地震余震序列的震相数据, 应用双差层析成像方法获得震源区域三维地壳速度结构和地震重新定位结果。层析成像结果显示余震序列发生在高低速过渡区, 震源区域存在低速层, P 波和 S 波速度在震源区域东南侧低, 西北侧高。基于地震重新定位结果, 结合高斯牛顿法和模拟退火算法拟合发震断层, 分析断层的几何特征, 推测发震构造为走向近东西, 倾角向南的逆冲断层。

关键词: 双差层析成像; 新疆精河 6.6 级地震; 发震断层; 速度结构

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2020)01-0029-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.01.04

Analysis of Crustal Structure and Seismogenic Fault Geometry in the Focal Region of the Jinghe M6.6 Earthquake in Xinjiang on August 9th, 2017

ZHANG Fan¹, JIA Baojin², ZHAO Yanhong¹

(1. Inner Mongolia Autonomous Region Seismological Bureau, Hohhot 010051, China;

2. Ulaht seismic station, ulaht 137400, China)

Abstract: Using the observation report of Chinese Seismic Network, seismic phase data of aftershock sequence of Jinghe M6.6 earthquake in Xinjiang was drawn, and the 3D crustal velocity structure and seismic relocation results are obtained by using the double difference tomography. The results show that the aftershock sequence occurs in the high and low velocity transition zone, and a low velocity layer exists in the source region; the P wave and the S wave velocity are lower in the southeast of the source region, and higher in the northwest side. Based on the results of seismic relocation, combined with Gauss Newton method and simulated annealing algorithm, the geometric characteristics of the seismogenic fault are analyzed. It is inferred that the seismogenic structure is a thrust fault with south dip angle and near east-west direction strike angle.

Keywords: Double differential tomography; Jinghe M6.6 earthquake; Seismogenic fault; Velocity structure

收稿日期: 2019-10-31

基金项目: 内蒙古自治区地震局局长基金(2018ZD02); 中国地震局监测、预测、科研三结合课题(170608)

作者简介: 张 帆(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震学预测方法研究。E-mail: spacelessness@163.com.

通信作者: 贾宝金(1971-), 男, 本科, 工程师, 主要从事地震台站管理和运维。E-mail: 1637072207@qq.com.

0 引言

地震层析成像通过反演地震观测数据来获得地球内部物理参数的空间分布,为探测地球内部不同尺度的非均匀结构提供了重要的信息,提供了认识地震的孕育、发生、发展以及其深部过程的途径,已经发展成研究地球内部非均匀结构和动力学过程的最重要的工具^[1],地震波到时层析成像反映的地震与活动断裂及地质构造之间的相关关系^[2],对研究地震成因、未来强震预测具有重要的意义。双差层析成像方法^[3]中引入在定位方面比较先进的双差地震定位方法^[4]避免了常规地震定位中的弥散现象,可应用于获得的震源区精细速度结构,为揭示震源区介质性质及地震发生的深部环境研究提供了更为可靠的信息^[5],因此广泛应用于重要断裂带和强震震源区域的地壳结构研究^[6-9]。

根据中国地震台网中心测定,北京时间 2017 年 8 月 9 日 7 时 27 分,新疆精河发生 6.6 级地震,震中位置 44.3°N, 82.9°E,震源深度 11 km。本文使用中国地震台网观测报告,提取直达波的到时数据,使用双差层析成像方法获得新疆精河 6.6 级地震震源区域的三维速度结构和余震序列的重新定位结果,根据波速的分布特征,对震源区域介质特征分析,根据重新定位结果,拟合发震断层面,对发震断层的几何特征和发震构造做出推测。

1 原理和方法

双差层析成像方法运用绝对走时和相对走时来实现震源参数和三维速度结构的联合反演。此方法采用网格节点法进行模型参数化,将空间划分为三维网格节点,采用伪弯曲射线追踪法找到地震波的最小走时路径,并计算理论走时及走时对震源位置和慢度的偏导数,联合使用绝对走时、双差走时数据进行反演。其中双差数据主要用于确定震源区的精细结构,绝对走时数据主要确定震源区以外区域的速度结构。此方法采用阻尼最小二乘分解算法求解,在三个方向采取相同的光滑权重对模型进行光滑约束,多次迭代直至得到稳定的解。在反演的过程中,先赋予绝对走时较高的权重,在一维速度模型的基础上,建立一个比较大区域的三维速度结构的结果,经过迭代之后,将绝对走时的权重降低,增加差分数据的权重,以提高震源区速度结构的分辨率。

地震震源 i 到观测台站 k 的地震波观测到时

与理论到时之间的残差 r_k^i 与震相到时对震源位置和速度模型的微扰有可表示为:

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

其中, T_k^i 是震源 i 到台站 k 的观测到时, $\Delta \tau^i$ 是震源 i 的发震时刻, u 为慢度, ds 为射线路径的线元, (x_1, x_2, x_3) 为震源位置坐标, 式(1)中最后一项为慢度扰动在震源 i 到观测台站 k 路径的积分。

地震 i 和 j 到台站 k 的走时残差之差(双差)表示为

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

当两次地震的距离很小时,射线路径相同,式(2)的积分项可以抵消。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。

根据成丛小震发生在大震断层面及其附近的原则,将模拟退火算法和高斯—牛顿算法结合起来,寻求 1 个平面,使所有小震震源位置到该平面距离的平方和最小,从而可以求解主震断层面走向、倾角、位置及其误差,在此基础上考虑区域构造应力参数,还可以估计在已求得的断面上的滑动角,目前已在唐山地震序列的研究中得到了非常可靠的结果^[10]。

2 构造背景和数据

本次地震震中位于库松木契克山前断裂附近,该断裂为全新世活动断裂,性质为右旋逆断,走向 EW。该断裂是位于北天山西段北缘的一条边界断层,同时也是一条区域性的活动断层,按其活动性特征由西向东可划分为东、中、西 3 段。其中,东段东起基普克一带,向西经乌拉斯泰、乌兰特尔干、扫子木图至龙口以西的阿沙勒河西岸,总体走向 300°~310°,全长约 50 km,由 4 条走向 280°~290°的断层斜列组合而成,单条断层的长度 9~13 km,断层面倾向 S,主要表现为逆断层性质^[10]。

选取 2017 年 8 月 7 日至 2017 年 10 月 11 日在新疆精河 6.6 级地震余震区(434°N~44.5°N, 82°E~83.5°E)记录的定位地震的直达波到时数据。观测报告中人工拾取的震相数据可能存在拾取错误或误差较大等问题,根据时距曲线来剔除一些明

显的异常数据,剔除误差5 s 以上的数据,从而剔除了较显著的异常数据,并保留大部分数据。经过 Ph2dt 脚本预处理后,最后选取了由 12 个台站记录的 288 条天然地震的资料,包含 1824 条 P 波到时数据、1784 条 S 波到时数据,以及 61 424

条相对到时数据。图 1 为精河地震序列和台站的射线图,同时给出了经度方向和纬度方向的射线投影。图 2 给出原始报告的震级和震源深度频次图,余震序列的深度范围为 0~20 km,震级范围为 M_L 1.5~5 级。

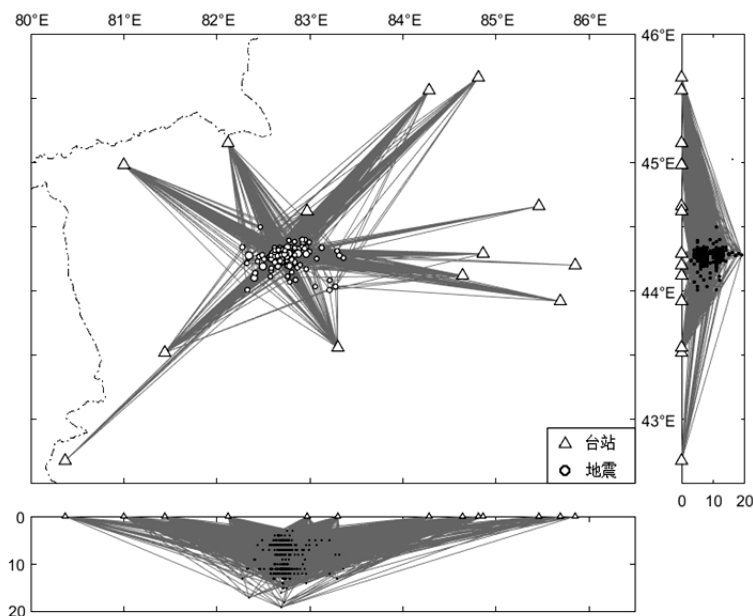


图 1 地震序列和台站射线图

Fig.1 Ray map of earthquake sequence and stations

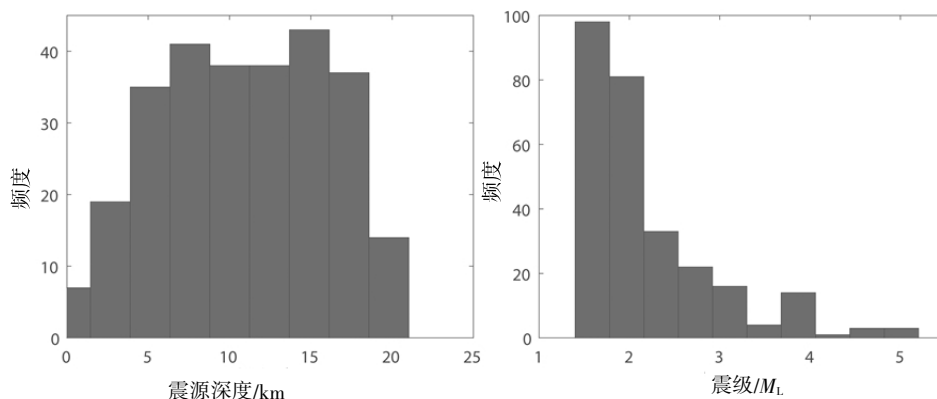


图 2 震级和深度频次

Fig.2 Frequency diagram of magnitude and depth

3 双差层析成像

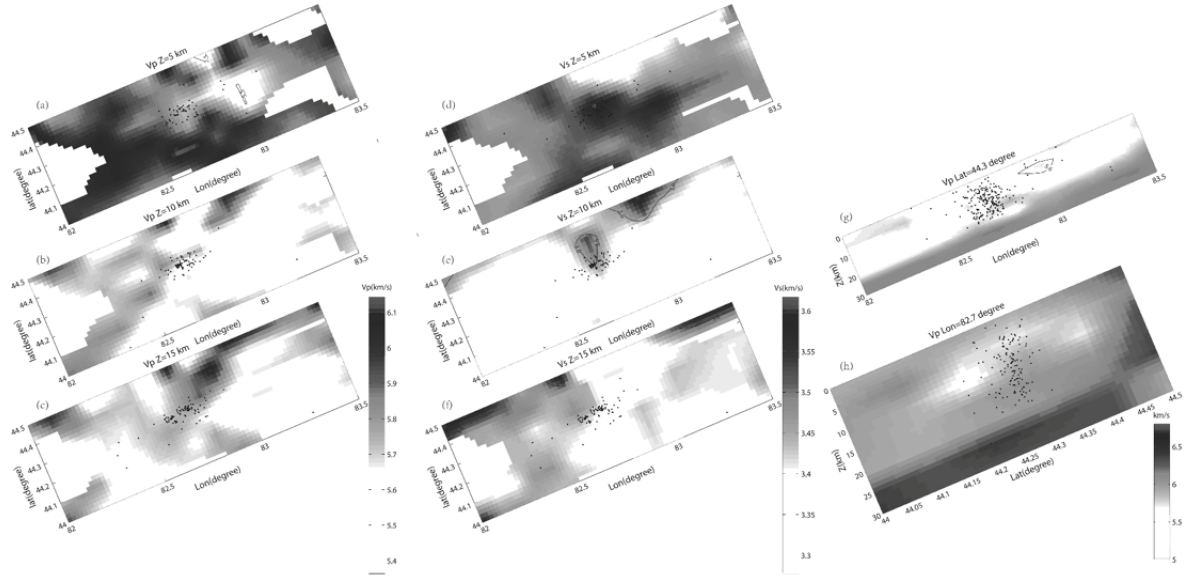
在研究区域按经度和纬度设置反演网格点,经度和纬度方向网格节点间距 0.1° ,深度方向垂直向下,网格节点间距 5 km。初始模型对层析成像结果有较大影响,3400 走时表的西部部分适用于新疆地区,本文中层析成像的初始模型选取了根据 3400 走时表推算的速度模型^[11]。阻尼因子和平滑权重的选取对反演结果的稳定性有着较大影响,经过权衡分析^[12],选取阻尼因子和平滑权重分别为 70 和 200。速度结构反演的可靠性主要通过 DWS

值来判定,DWS 值对每一段射线路径进行了距离加权,其反映的模型周围的相对射线密度比仅用射线总和更具可靠性^[13],研究表明当 DWS 大于 100 时,反演的结果具有较可靠^[14]。

图 3 给出层析成像的结果,其中 P 波和 S 波的分布图中删去了 DWS 低于 100 的区域。P 波空间分布(图 3(a)~(c))和 S 波速度空间分布(图 3(d)~(f))均显示出余震序列发生在高速区域和低速区域的交界处,震源区域的西北侧波速高于东南侧,波速分布和构造相关,东南侧为山脉,西北

侧为盆地, 低速区与山脉对应, 高速区有盆地对应。比较三个深度的 P 波速度和 S 波速度可知, 震源区域存在低速层, 深度 5 km 处的 P 波和 S 波速度高于 10 km 和 15 km 处。沿经度方向的剖面图(图 3(g))显示, 余震序列东侧存在低速区域, 该区域有少量余震分布, 推测该区域是地壳的薄

弱位置, 受主震的应力触发而发生一系列小震。沿纬度方向的剖面(图 3(h))显示, 余震序列位于深度 10~20 km 的低速区域, 该区域中间波速较两侧高, 推测为余震应力释放的主要区域。已有研究认为地震集中区域位于高速体内相对低速区域, 小震集中区域可能是低速区域^[15]。



((a)~(c)为 5 km、10 km 和 15 km 的 P 波速度分布;(d)~(f)为 5 km、10 km 和 15 km S 波速度分布;
(g)为 44.3°N 处沿经度的剖面图;(h)为 82.7°E 处沿纬度的剖面图)

图 3 层析成像结果

Fig.3 Tomography results

图 4 给出重新定位结果和两个方向的深度投影, 重新定位结果在 X、Y 和 Z 三分向的平均误差

为 1.38 km、1.32 km 和 2.9 km, 平均走时均方根残差 0.36 s, 余震主要分布主震的西南侧, 呈东西向带状分布。

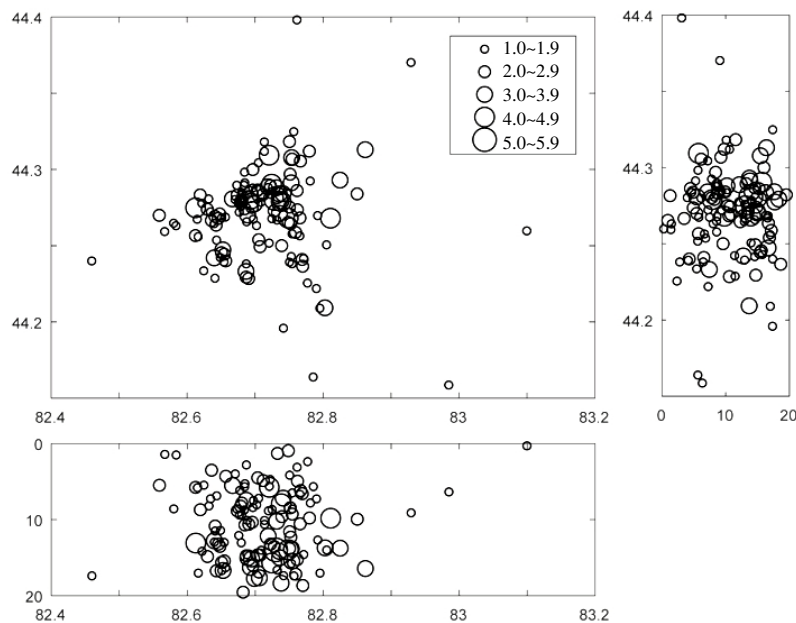


图 4 重新定位结果

Fig.4 Relocation results

4 震源断层拟合和发震构造分析

精河 M_s 6.6 地震的矩震级 M_w 约为 6.3。断层节面 I 走向 76° ，倾角 44° ，滑动角 80° ；节面 II 走向 269° ，倾角 47° ，滑动角 99° ；其中，节面 I 为发震断层，波形拟合的最佳质心深度为 $23\text{ km}^{[16]}$ 。

结合地震序列优势长轴走向(近东西向)和主震震源机制解选取矩形区域的余震，使用高斯牛

顿法和模拟退火算法对断层面进行拟合，得到断层面的走向为 79.1° ，倾角为 75.2° ，标准差分别为 1.45 和 1.34。震源断层拟合的结果也和震源机制解节面 I 一致。图 5 给出断层面拟合结果三维图，结果显示余震呈近东西向分布，断层面底部向南侧倾斜，结合震源机制解反演结果，推测南倾的节面为发震断层，此次地震的发震构造为逆冲推覆断层。

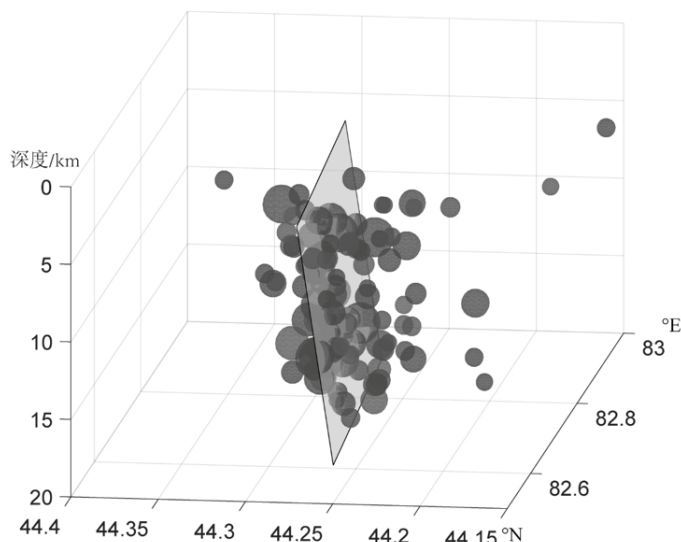


图 5 重新定位结果和断层拟合

Fig.5 Relocation result and fault fitting

图 6 给出 2017 年 8 月 9 日至 2017 年 10 月 11 日余震序列的时空演化描述，在主震发生 3 d 内，

余震分布较集中，之后向西侧和南侧发展，断裂两侧余震发育不平衡，南侧余震较多，符合推覆体断层面上盘易发生地震的特征。

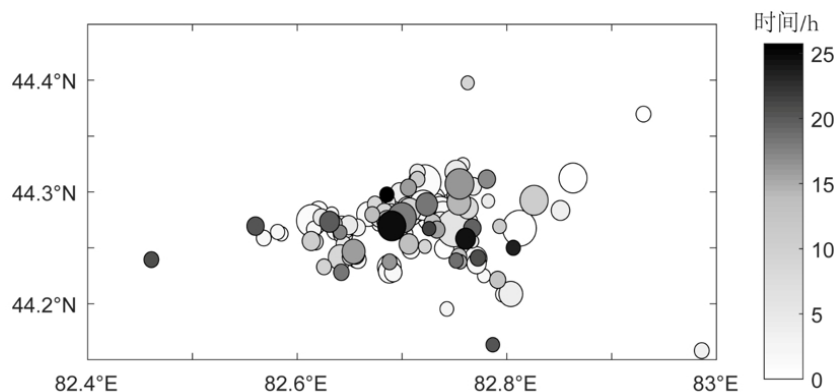


图 6 余震序列时空演化

Fig.6 Space-time evolution of aftershock sequences

5 结语

使用中国地震台网观测报告资料，提取的新疆精河 6.6 级地震序列的震相数据，应用双差层析成像方法获得了震源区域的三维速度结构和重新

定位结果。层析成像结果显示，余震序列发生在高速区域和低速区域的交界处，震源区域的西北侧波速高于东南侧，震源区域存在低速层，P 波和 S 波速度在震源区域的东南侧偏低，西北侧偏高。

基于地震重新定位结果，结合高斯牛顿法和

模拟退火算法拟合发震断层, 获得的断层面的走向和倾角。重定位结果显示余震呈近东西向分布, 拟合得到的断层面面向南侧倾斜, 推测此次地震发震构造为逆冲断层, 走向为近东西向, 西北侧为下盘, 东南侧为上盘。发震初期余震分布较集中, 之后向西侧和南侧发展, 断裂两侧余震发育不均衡, 南侧余震较多, 符合推覆体断层上盘易发生地震的特征。

参考文献:

- [1] 董兴朋, 滕吉文. 青藏高原东北缘远震 P 波走时层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(05): 420-428.
- [2] 张杰, 沈小七, 王行舟, 等. 利用层析成像的结果探讨安徽及邻区中强地震深部构造背景[J]. 中国地震, 2005, 21(3): 350-359.
- [3] Zhang H, Thurber C H. Double-difference tomography: the method and its application to the hayward fault, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(5): 1875-1889.
- [4] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double -difference earthquake location algorithm; method and application to the northern hayward fault, california [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90 (90): 1353 - 1368.
- [5] Zhang H, Thurber C. Adaptive mesh seismic tomography based on tetrahedral and Voronoi diagrams: application to Parkfield, California [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2005, 110(B4): 225-243.
- [6] 于湘伟, 陈运泰, 张怀. 京津唐地区中小地震重新定位[J]. 地震学报, 2010, 32(3): 257-269.
- [7] 王小娜, 于湘伟, 章文波. 芦山震区地壳三维 P 波速度精细结构及地震重定位研究 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1179-1193.
- [8] 邓文泽, 陈九辉, 郭飏, 等. 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, 2014, 57(4): 1101-1110.
- [9] 万永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 793-804.
- [10] 陈建波, 沈军, 李军, 等. 北天山西段库松木契克山山前断层新活动特征初探 [J]. 西北地震学报, 2007, 29(4): 335-340.
- [11] 陈向军, 上官文明, 宋秀青, 等. 新疆全区和分区地壳速度模型的分析[J]. 中国地震, 2014, 30(2): 178-187.
- [12] Eberhartphillips D. Three -dimensional velocity structure in northern California Coast Ranges from inversion of local earthquake arrival times [J]. Lancet, 1986, 76(8864): 1025-1052.
- [13] Thurber C, Eberhart-Phillips D. Local earthquake tomography with flexible gridding [J]. Computers & Geosciences, 1999, 25(7): 809-818.
- [14] Scarfi L, Giampiccolo E, Musumeci C, et al. New insights on 3D crustal structure in Southeastern Sicily (Italy) and tectonic implications from an adaptive mesh seismic tomography [J]. Physics of the Earth & Planetary Interiors, 2007, 161(1): 74-85.
- [15] 王霞, 宋美琴, 王亮, 等. 口泉断裂及其邻近地区的地壳速度结构[J]. 地震地质, 2015, 37(4): 939-952.
- [16] 姜祥华, 韩颜颜, 杨文, 等. 2017 年精河 M_s 6.6 地震序列及震源特征初步分析[J]. 中国地震, 2017(4): 682-693.