

王长在,吴建平,房立华等. 玉树地震震源区速度结构与余震分布的关系. 地球物理学报, 2013, 56(12):4072-4083, doi:10.6038/cjg20131212.

Wang C Z, Wu J P, Fang L H, et al. The relationship between wave velocity structure around Yushu earthquake source region and the distribution of aftershocks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(12):4072-4083, doi:10.6038/cjg20131212.

玉树地震震源区速度结构与余震分布的关系

王长在,吴建平,房立华,王未来

中国地震局地球物理研究所,北京 100081

摘 要 利用玉树震区 21 个应急流动地震台站和青海省地震台网固定地震台站的观测数据,采用双差层析成像方法,对 2010 年 4 月 14 日至 6 月 15 期间发生的地震进行了重定位,并反演得到了玉树地震震源区的三维速度结构. 重定位结果揭示余震主要沿 NW 向成窄带状分布在断层的两侧,表明脆性破裂应力释放主要集中于一个狭窄的区域内. 在西北端,余震偏离玉树—甘孜断裂分布,在 SW 向也有分布,推测可能与南西向次级断裂有关. 双差层析成像得到的速度结构在浅部与地表地质构造相一致,中上地壳的速度结构显示巴颜喀拉地块为高速异常,羌塘地块为低速异常. 玉树地震余震分布与特定的速度结构存在相关性:主震发生在高低速过渡带偏高速体的一侧,余震主要分布在高速体外围,高速体内部几乎没有余震分布. 一般说来,中上地壳的高速体通常具有较高的强度,可以积累较强的孕震能量. 主震发生后,高速体内积累的弹性能量向周边释放,可能是导致高速体周边余震发生的主要原因.

关键词 玉树地震,双差层析成像,地震重定位,玉树—甘孜断裂

doi:10.6038/cjg20131212

中图分类号 P315

收稿日期 2013-04-15,2013-09-28 收修定稿

The relationship between wave velocity structure around Yushu earthquake source region and the distribution of aftershocks

WANG Chang-Zai, WU Jian-Ping, FANG Li-Hua, WANG Wei-Lai

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract Using travel time data from 21 temporary seismic stations and the permanent stations of Qinghai Seismological Network, we obtained precise relocation of earthquake sequence and 3D seismic velocity structure around Yushu focal area by double-difference tomography. To ensure the accuracy of the phases, the seismic events downloaded from the Data Management Center of China National Seismic Network were re-processed. The result of aftershock relocation shows that the earthquake sequence has a banding distribution along NW in both sides of the fault, which reveals horizontal lineations of hypocenters that define the narrow regions on the fault where stress is released by brittle failure. At the northwest end the aftershocks are distributed not only along the Yushu-Garzê fault, but also along the direction vertical to the fault. It reveals an intersecting fault. The result of 3D seismic velocity structure showed that shallow velocity structure has good correlation with surface geology. The velocity structure of middle crust shows that Bayan Har block is characterized by high velocity, Qiangtang block is imaged as a low

基金项目 地震行业专项(201308013)、国家科技支撑计划(2012BAK19B01)、中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB11B06)和基本业务专项(DQJB12C05, DQJB10B04)联合资助.

作者简介 王长在,1982年生,助理研究员,主要从事地震精定位、近震层析成像及地震监测研究. E-mail: wangchangzai@cea-igp.ac.cn

velocity region. The result of earthquake location and seismic velocity structure shows that the high-low velocity anomaly has certain control action to the aftershock distribution. The mainshock occurred in the transition zone between low and high velocity bodies. Most aftershocks appear to be distributed on the periphery of the high-velocity body. There are rarely earthquakes in the high-velocity body. The high-velocity body reflects the more brittle and competent parts of the crust, which are capable of sustaining greater seismogenic energy. The seismogenic energy in the high-velocity body was released into the surroundings after the mainshock, which leads to many aftershocks in the surrounding areas.

Keywords Yushu earthquake, Double-difference tomography, Earthquake relocation, Yushu-Garzê fault

1 引言

2010年4月14日07时49分37秒(北京时间),我国青海省玉树县发生了 $M_s7.1$ 级地震.根据中国地震台网测定,震中位于 $33.2^\circ\text{N}, 96.6^\circ\text{E}$,震源深度14 km.截至2010年5月9日15时00分玉树地震共记录到余震1712个,其中 $6.0\sim 6.9$ 级地震1个.此次地震导致了2698人遇难,经济损失达到8000亿.是继汶川地震之后又一次有极大社会影响的地震事件.

地震发生之后,许多学者对此次地震的地质背景、发震构造、发震机理等方面进行了研究,取得了许多重要的研究成果^[1-6].Wang等利用近场和远震数据,估算了2010年玉树 $M_s7.1$ 级地震的破裂速度,并反演得到了断层面上的静态滑动量分布^[7].Tobita等利用PALSAR干涉测量数据,得到了2010年玉树地震断层模型和同震变形特征^[8].

为加强余震监测和震源区的深部结构研究,主震发生之后,青海省地震局在余震区布设了7个流动地震台站,中国地震局地球物理研究所在附近布设了14个流动地震台站.这21个流动地震台站与周围的固定台站组成了一个比较好的小孔径台网,提高了地震定位的精度,为进行精定位及震源区速度结构研究提供了宝贵的数据.本文利用这批数据,应用双差层析成像方法,得到了精定位结果和震源区速度结构,并探讨了玉树—甘孜断裂的展布形态,速度结构与余震分布的关系,为更深入地了解发震构造提供了基础信息.

2 区域地质概况

玉树震区处于青藏高原东缘,在巴颜喀拉地块

与羌塘地块交界的金沙江缝合带附近(图1).青藏高原东部由6个地块以及中间以5条缝合线相隔,自北而南分别为:祁连—阿尔金缝合带,祁连山山体,青海南山及北淮阳断裂带,东昆仑—柴达木山体,东昆仑—阿尼玛卿缝合带,松潘—甘孜—可可西里山体,金沙江印支期缝合带,羌塘山体,班公湖—怒江缝合带,拉萨山体,雅鲁藏布江喜马拉雅期缝合带和喜马拉雅山体^[9].青藏高原5条狭长的缝合带是各时期洋盆消减和地体碰撞的结果.缝合带的时代由北向南依次变新,显示了亚洲大陆逐渐向南增生.印度次大陆亚洲大陆碰撞,使雅鲁藏布江一带的特提斯残余海最终封闭,并开始了缓慢的分阶段的构造运动及地面隆升过程^[10].自中新世中晚期开始,青藏高原内部发生了较大范围区域性的走滑运动,地壳内发生了东向水平运动和垂直隆升运动,从而青藏高原内部的构造块体逐渐被挤出,沿东昆仑断裂带、玉树—甘孜—鲜水河断裂带、嘉黎断裂带等边界断裂带向青藏高原东缘滑移.伴随这些块体运动,青藏高原7级以上强震(例如2001年昆仑山口 8.2 级地震、2010年 $M7.1$ 级玉树地震)主要沿大型块体边界断裂带分布.

甘孜—玉树断裂西起青海治多县那王草曲塘,经当江、玉树、邓柯、玉隆,至四川甘孜县城南,全长约500 km.断裂整体呈北西向展布,仅在当江附近走向北西西,断层倾向以北东为主(仅挡拖一带倾向南西),倾角 $70^\circ\sim 85^\circ$.甘孜—玉树断裂带在第四纪的强烈活动,造成了新沉积物的强烈变形.根据探槽揭露,这种新沉积物的变形大多显示了脆性破裂的特点,是断裂带上古地震形变的证据^[11].玉树地震震区位于巴颜喀拉地块南边界,周围断裂构造发育,其中以北西向左旋走滑的断裂为主.区域地震活动与活动断裂构造关系密切,6级以上地震主要分布在晚第四纪以来活动断裂附近.其中这次玉树 $M7.1$

资料来实现三维波速结构和震源参数的联合反演. 该方法首先采用网格节点法进行模型参数化, 通过划分空间三维网格节点, 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, 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. 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, 给 P 波绝对走时的权重为 1.0, 给予差分数据 P 波的权重为 0.1. 可以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, 在几次迭代之后, 将绝对走时的权重降低为 0.1, 差分数据的权重增加为 1.0, 以提高震源区速度结构的分辨率. 在迭代过程中, 通过调整阻尼值, 使方程求得的解稳定, 获得震源区重定位和速度结构的结果.

该方法联合使用绝对走时和相对走时, 因此在震源区外可以得到与传统层析成像相同的结果, 由于增加了双差方程, 从而能够反演震源区精细的速度结构及地震重新定位结果, 因此可以揭示比传统方法更多的细结构信息^[19].

4 余震资料选取及反演模型的建立

4.1 资料选取

2010 年 4 月 14 日玉树 M7.1 级地震发生后, 由于流动地震台的布设, 在一定程度上弥补了固定地震台站分布的缺陷, 从而为我们对震源区的研究提供了宝贵的数据及资料. 利用中国地震局地球物理研究所数据备份中心^[20]和中国地震局地球物理研究所震后架设的流动地震台站提供的波形数据, 选取 2010 年 4 月 14 日到 2010 年 6 月 15 日期间 $M \geq 1.0$ 级地震的事件波形, 进行了震相拾取和地震初定位. 选择的每个地震至少被 4 个台站记录到, 最终有 1108 个地震事件参与反演, 其中参加反演的 P 波绝对到时 6437 个, 反演的 S 波绝对到时 5035 个, 相对到时资料 P 波 33550 个, S 波 28539 个, 参与的台站有 30 个. 台站分布见图 2.

在研究区域, 建立坐标系: X 轴垂直于余震方向, Y 轴平行于余震方向(图 3), 坐标原点为 106.06°E、25.56°N. 在 X 方向的水平网格节点划分为 -488.0, -60.0, -40.0, -20.0, 0.0, 20.0, 40.0, 60.0,

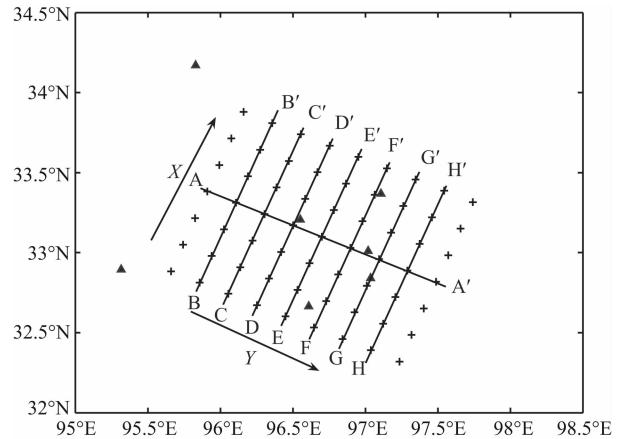


图 3 反演网格分布图

图为平面网格划分, “+”表示划分的网格节点, 三角形代表台站, X, Y 代表建立的坐标方向.

Fig. 3 Grid map of tomography

Triangle denotes stations. The coordinate system (X, Y) shown in this figure is used throughout this study.

499.0 km; 在 Y 方向划分为 -488.0, -80.0, -60.0, -40.0, -20.0, 0.0, 20.0, 40.0, 60.0, 499.0 km; 在 Z 方向(垂直向下)划分为 -150.0, 0.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 449.0 km.

4.2 初始速度模型建立

为确定玉树周围地区的地壳厚度和波速比, 选取了青海省地震局玉树地震台站在 2007 年 1 月 1 日至 2010 年 1 月 1 日观测期间, 在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 震中距范围内, 震级在 6 级以上的波形数据, 采用最大熵反褶积方法^[21]提取远震体波接收函数. 提取过程中采用的高斯滤波系数为 2.5, 水准量系数为 0.01. 经过严格的挑选, 最终获得了 233 条高质量的接收函数. 将地震事件的震中距和深度转换到水平层慢度, 以 0.001 的慢度步长对接收函数进行叠加, 得到各慢度范围内的平均接收函数. 对玉树台站的多道平均接收函数进行叠加搜索, 获得此台站下方的平均地壳厚度及泊松比值. 结果表明, 玉树台站附近地壳厚度约为 70 km, 波速比 1.72.

本文反演采用的初始模型参考了该地区人工地震观测的结果^[22-23]. 表 1 给出了 P 波初始速度模型. 表中的上界面深度表示在分层速度模型中各层的顶面深度, 其层厚度为下一个上界面深度与该上界面深度之差, 左侧为该层对应的速度值. 海平面以上部分与第一层的速度相同. 地壳厚度和波速比根据玉树台的接收函数 H-K 叠加结果给出 P 波速度与 S 波速度的比值为 1.72, 地壳厚度为 70 km.

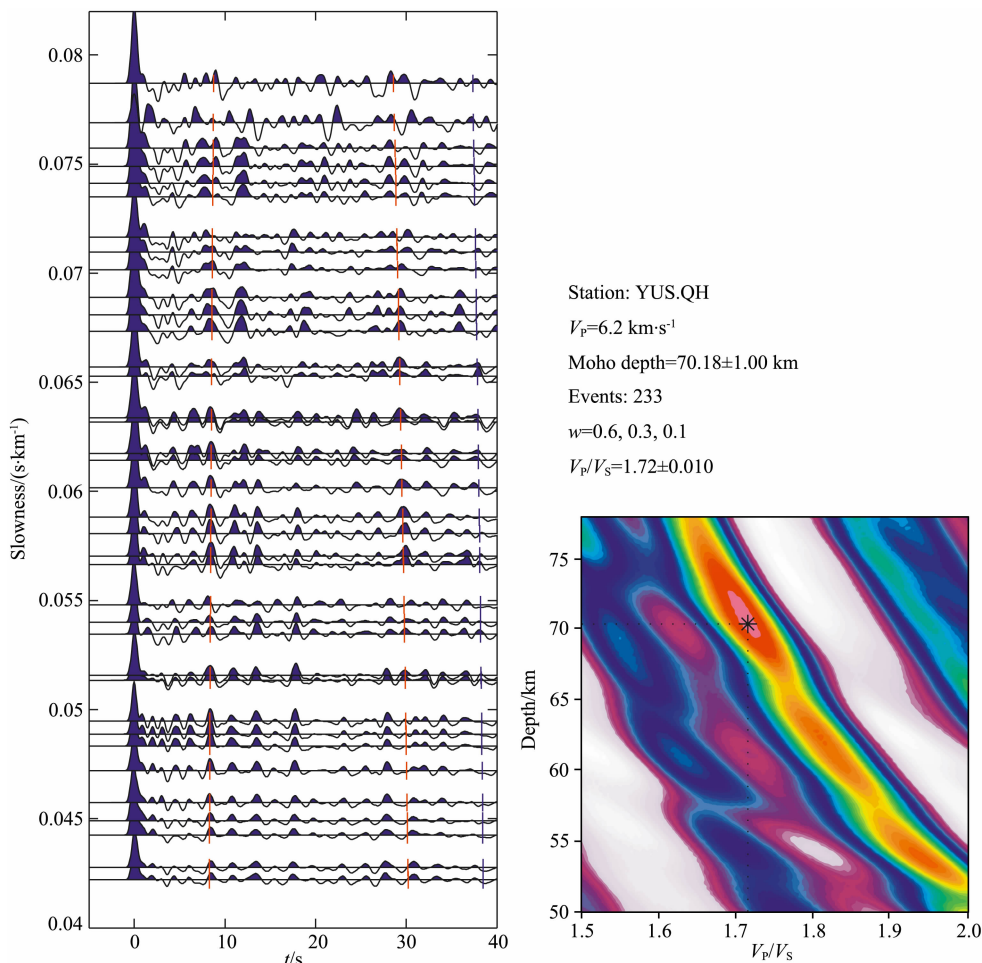


图 2 玉树地震台叠加结果

Fig. 2 The results of H-K stacking of Yushu station

表 1 玉树地区 P 波初始速度结构

Table 1 Initial P wave velocity structure of Yushu

P 波速度 (km/s)	上界面深度 (km)	P 波速度 (km/s)	上界面深度 (km)
5.30	0.00	5.85	20.00
5.79	5.00	6.10	25.00
6.01	10.00	6.19	30.00
5.92	15.00		

5 双差层析成像的结果与讨论

5.1 余震定位结果

共 1108 次地震参加重新定位, 最终获得 995 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 0.5 s 降为了 0.1 s, 通过对观测到时和理论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 0.3 km, 在 N—S 方向平均为 0.3 km, 在垂直方向平均为 0.5 km.

图 4a、4b 分别为玉树地震序列地震定位前后的结果. 初定位结果显示余震分布相对分散, 重定位后的结果显示余震沿 NW 向成窄条状分布在断层的两侧, 清晰地勾勒出地震活动图像, 揭示了脆性破裂应力释放主要集中于一个狭窄的区域内. 余震分布表明在西北端 96.2° 左右, 余震不完全沿甘孜—玉树断裂分布, 而在甘孜—玉树断裂垂直方向也有分布. 分析认为在该位置可能存在一条与甘孜—玉树断裂相垂直的次级断裂. 周荣军等^[24]研究表明, 玉树—甘孜断裂在西北端 96.2° 左右, 断裂发生了错断, 断裂并不是在原来的位置继续向北西向, 而是断裂向南西向偏移了 10 多公里. 可能正是这一与甘孜—玉树断裂相垂直的次级断裂的某个历史时期的错动, 导致了玉树—甘孜断裂在这一位置发生偏移.

刘超等^[25]利用全球地震台网的宽频带地震波形资料, 采用 P 波波形快速反演方法得到的震源机制解, 反演得出, 这次地震的矩震级为 $M_w 7.0$, 是一次典型的左旋走滑型地震, 并判定这次地震事件

的发震断层为玉树断层,走向 119° 、倾角 83° 、滑动角 -2° 。余震的展布方向为 119° 与主震的发震断层吻合。

余震深度分布剖面图(图 5)表明,初始定位震源深度主要分布在 $3\sim 15$ km 之间,在 $5\sim 10$ km 之间出现了明显的横向排列。重定位之后,地震主要分布在 $2\sim 30$ km 之间,从西北到东南($-60\sim 60$ km)震源深度总体上由深变浅,在西北端($-60\sim -30$ km)绝大部分余震震源深度分布在 $10\sim 20$ km 之间,并与($-30\sim 60$ km)那一段在深度变化上有一个明显的区别。图 5b 为 Li 等^[26]利用 SAR、光学成像、地震体波等反演得到的断层几何特征和滑动量分布。该结果也显示出主震的破裂过程位移最大的部分(图中为深颜色部分),一部分位于主震破裂点附近,另一部分位于距离破裂点 30 km 左右的位置,并且滑动量总体上从西北(0 km)到东南方向(45 km)呈现从深到浅破裂过程,即应力在西北方向主要是在深部的调整,而到东南方向主要是浅部的应力释放。而在(-30 km 到 -60 km),震源深度较深,可能为其他次级断层破裂导致的。

5.2 反演得到的速度结构

5.2.1 速度结构的解释

三维速度结构反演结果的精度通常用节点周围射线的空间分布来进行评估。Thurber 和 Phillips 定义 DWS(Derivative Weight Sum)反映一个模型参量周围平均的相对射线密度,考虑了射线节点到节点的距离加权以及此节点周围射线长度,因此在反映射线密度方面,DWS 比不加权的射线总和更有优势^[27]。双差层析成像方法评估解的可靠性,就是通过 DWS 值来进行评估的,许多研究者验证当 $DWS > 100$ 时,得到的结果具有较高的可靠性^[28-29]。图 6、图 7 为应用双差层析成像方法反演得到的速度结构。其中被白线包围的部分为 $DWS > 100$ 的区域,认为得到的速度结构结果可靠,垂直剖面图中色标均表示绝对速度,为了方便在同一个水平面对比速度变化,水平层析成像的色标表示速度的扰动量。

深度为 $z=1$ km 和 $z=3$ km 浅层速度结构结果显示玉树县城附近均位于高速异常体内,在玉树县城西南侧存在一明显的低速体异常,该区域地质图表明玉树县城主要位于碳酸岩盐的基岩区域,故表

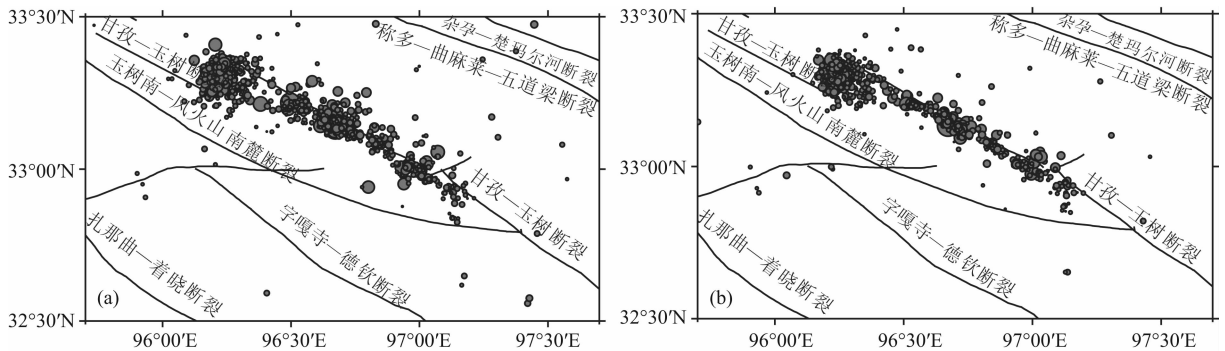


图 4 (a)重定位前地震分布;(b)重定位后地震分布

绿点表示地震,黑线为断裂。

Fig. 4 (a) Distribution of earthquakes before relocation; (b) Distribution of earthquakes after relocation

Dots denote the aftershocks, black lines show the location of the large fault.

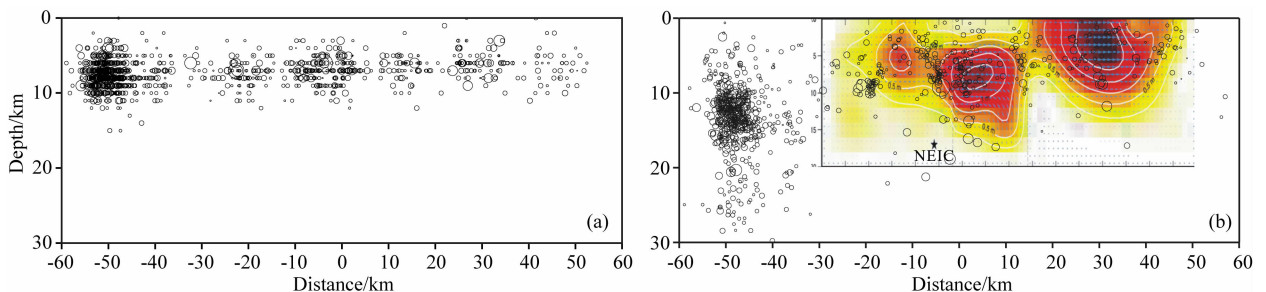


图 5 (a)重定位前余震深度分布;(b)重定位后余震深度分布及 Li 等^[26]反演得到的断层面上静态滑动量分布

Fig. 5 (a) Distributions of aftershock sequences before earthquake relocation; (b) Distributions of aftershock sequences

after earthquake relocation. The slip distribution is from an inversion by Li et al. ^[26]

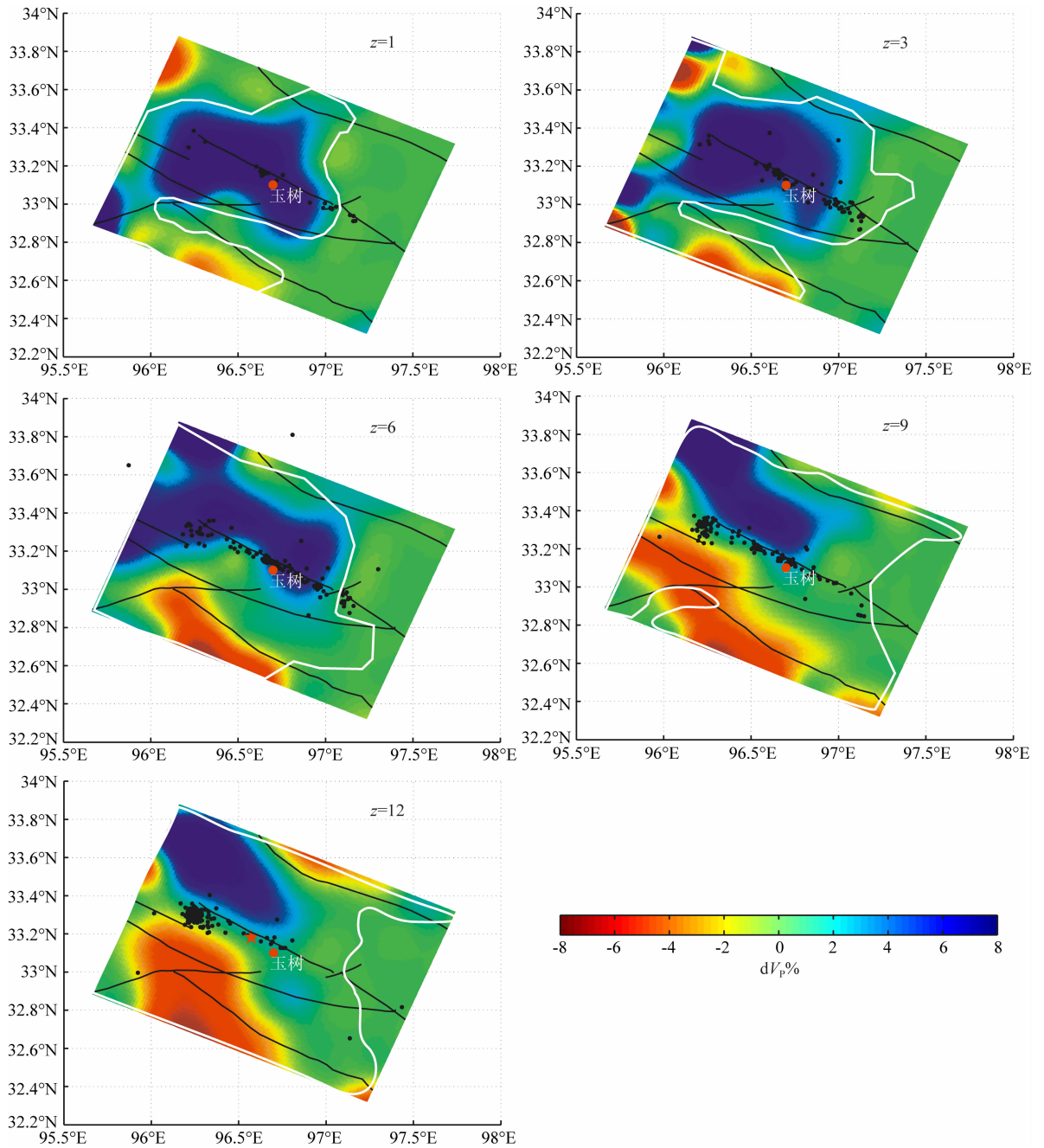


图 6 深度为 1 km、3 km、6 km、9 km 和 12 km 的水平层析成像结果

黑线为断裂, 黑点为地震事件, 白色实线包围的区域为 DWS 值大于 100 区域, 距离水平层上下分别为 1.5 km 深度范围内的地震事件。

Fig. 6 Horizontal section of P-wave velocity perturbations at depth of 1 km, 3 km, 6 km, 9 km, and 12 km by tomoDD. The black lines show the location of the fault, dot denote the aftershocks, the region surrounded by the solid white line shows the region of DWS value more than 100. Seismic events between 1.5 km above and below the given depth are included.

现为高速异常体区域, 在玉树县城西南侧有一片较大区域的第四纪沉积层, 与其对应的位置表现为明显的低速异常体. 上述地表地质特征与浅层速度结构的一致性, 在一定程度上佐证了双差层析成像较高的分辨率和可靠性.

玉树震区处于巴颜喀拉地块与羌塘地块交界的

金沙江缝合带附近, 玉树—甘孜断裂为巴颜喀拉地块南边界. 因此玉树—甘孜断裂的北部具有巴颜喀拉地块性质, 南侧代表了羌塘地块特征. 深度为 $z=6$ km、 $z=9$ km 和 $z=12$ km 速度结构结果显示, 在中上地壳巴颜喀拉地块表现为高速体异常, 羌塘地块表现为低速异常. 玉树—甘孜断裂处于高低速异

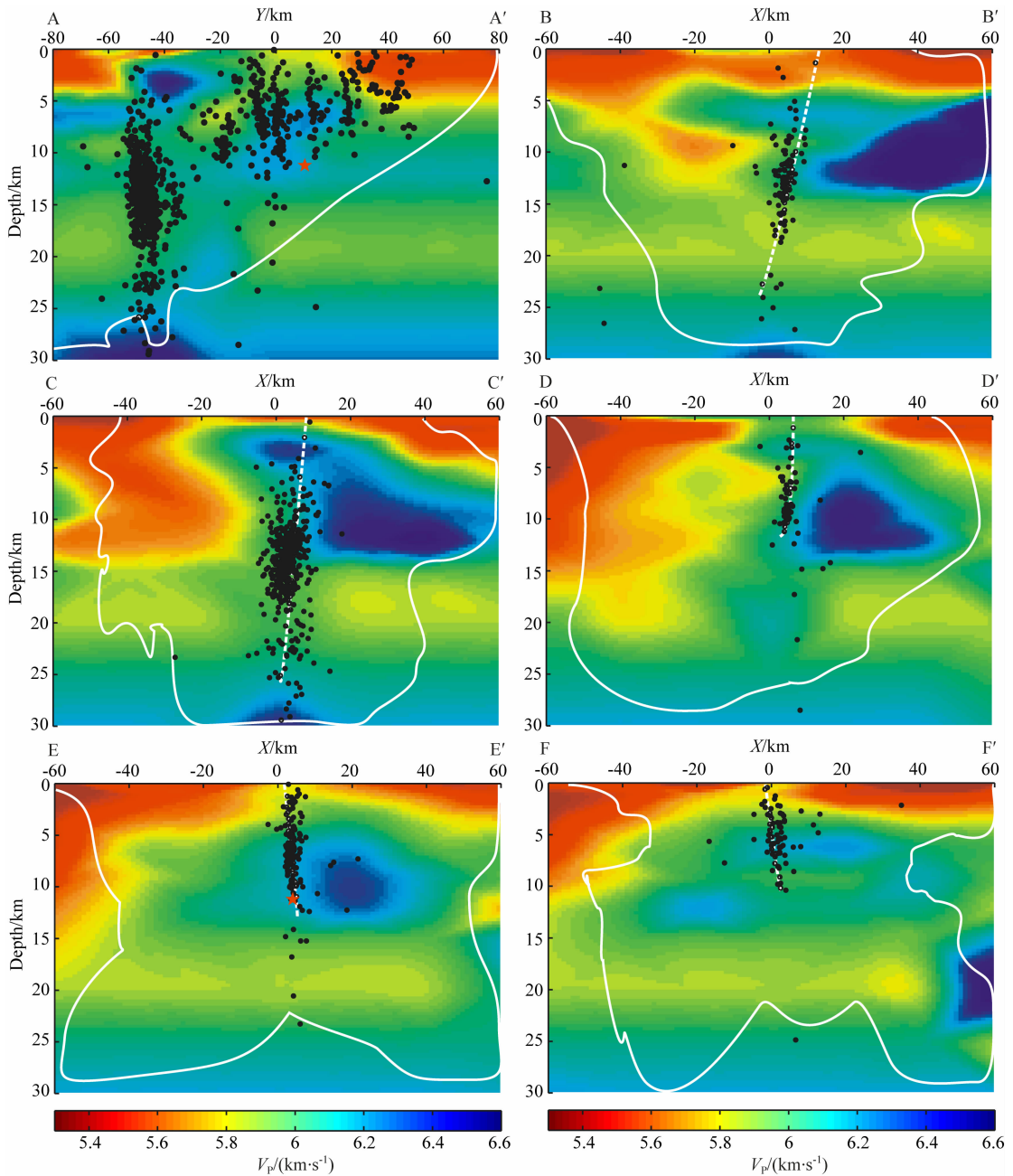


图7 AA'、BB'、CC'、DD'、EE'、FF'深度剖面的速度结构图像

黑点表示余震分布,红色五星为主震。白色虚线为推测断层位置,白色实线包围的区域为DWS值大于100区域。震源位置剖面给出的是离剖面10 km距离内的地震。

Fig. 7 Vertical cross-sections of V_p along lines AA', BB', CC', DD', EE', and FF'

Dots denote the aftershocks, stars denote epicenters of the main shock. The white dotted line indicates earthquake fault, the region surrounded by the solid white line shows the region of DWS value more than 100. The location profile shows the earthquakes within 10 km from the profile.

常过渡带区域。

5.2.2 余震分布与速度结构的关系

深度为9 km和12 km水平层析成像结果显示玉树—甘孜断裂的东北侧主要呈现为高速体异常,西南侧表现为低速体异常,余震主要分布在高速低速过渡带区域。主震(即地震的初始破裂点)发生在NWW—SEE向的高速体与低速体过渡带区域并偏

向高速体一侧,这一位置往往是应力集中的部位,可能导致大地震的发生。

AA'剖面结合BB'、CC'剖面的速度结构结果显示在玉树—甘孜断裂西北端(AA'剖面即坐标-60~-30 km位置),在深度为3~8 km附近存在一个较大范围的高速体异常,余震主要发生在这一高速异常体的下方。一般高速体代表较坚硬的岩体,震后应

力调整时,由于受到前方及上方该坚硬岩体的阻挡,从而应力在这一位置向共轭方向和向下调整,导致了共轭方向和下方的岩石破裂,随后在该位置发生了一次 M5.7 级中强地震,之后又发生了大量余震,且余震深度分布较深,推测为共轭方向次级断层的破裂。

国内外研究发现,层析成像得到的高速异常体代表地震发生的凹凸体^[30-32]。一般认为高速体与地壳的较脆、较强部分岩体有关,这些部分能够积累更大的孕震能量。Kato 等人研究日本新潟县中部 M_w6.6 级地震时,发现发生在断层附近的大部分余震分布在高速体的外围^[32]。图 7 垂直于断层方向的 BB'、CC'、DD'、EE' 和 FF' 剖面显示余震均分布在高速体的外围,在高速体内几乎没有地震分布。推测中上地壳的高速体通常具有较高的强度,可以积累较强的孕震能量,主震发生后,高速体内积累的弹性能量向周边释放,可能是导致高速体周边余震发生的主要原因。

速度结构剖面图均显示了在地壳中 18~25 km 深度范围内存在一低速层,与姜枚等的人工探测剖面结果基本一致^[22]。Huang 和 Zhao 研究表明,大地震发生在高低速交界部位偏于高速区的一侧,震源下方存在的低速异常体可能促进了地震成核^[33-34]。产生这一现象的原因可能是低速体难以积累能量,却易于传递能量,足够尺度的高速块体有可能积累足以引发大地震的应变能。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,容易发生破裂,易于释放应力,因而容易引发大的地震。

结合震源区速度结构与余震分布推测了断层面(图 7 中白色虚线所示)的产状, BB' 剖面显示断层倾向南西,倾角接近 80°,穿过主震的 CC' 剖面,断层倾向南西,倾角接近 85°, DD' 剖面断层倾向南西,倾角接近 90°、EE' 剖面断层倾向北东,倾角接近 85°和 FF' 剖面断层倾向北东,倾角接近 80°。综上所述在震源区的玉树—甘孜断裂,从西南到东北方向,倾向由南西向逐渐反转为北东向,其中反转的位置在 EE' 剖面附近。

5.2.3 结果的分辨率及可靠性分析

为了检验速度结构反演的可靠性及空间分辨率,我们进行了恢复性试验,恢复性试验方法的基本原理是:根据层析成像反演获得的三维速度模型,计算与实际观测数据相同的各震相的理论走时,将计算获得的理论走时作为观测值,基于初始模型,反演

新的三维速度模型,通过对比新旧三维速度模型的差异,可以了解成像结果的可靠性。恢复性试验中采用的阻尼系数和光滑约束系数与利用实际资料进行反演时完全相同,因此可以较好评估模型空间分辨率。这种恢复性试验来检测模型空间分辨率的方法被广泛应用^[35-38]。

图 8 给出了玉树地震余震区速度结构的恢复性试验结果,恢复性试验结果与用实际资料反演得到的三维速度结构相比,总体上可以得到良好的恢复,速度异常的形态基本相同,只是部分异常体的幅度有较小的差异。恢复性试验结果表明,利用现有的地震、台站得到的观测数据,可以较好地揭示该震源区中上地壳的速度结构。

6 结 论

应用双差层析成像方法反演得到了玉树地震余震的重新定位结果。重定位结果显示余震主要沿 NW 向成窄带状分布在断层的两侧,但是在断层西北端(经度为 96.2°附近),余震偏离玉树—甘孜断裂分布,在 SW 向也有分布,推测可能与南西向次级断裂有关。地震定位结果纵剖面显示从主震发生的位置到玉树县城,呈现出震源深度从深到浅的变化过程,在玉树县城附近发生的余震较浅,表明玉树—甘孜断裂在玉树县城附近主要是浅层破裂。

反演得到的浅层速度结构显示玉树县城位于高速异常体内,玉树县城西南侧存在一明显的低速体异常,该区域地表地质资料表明玉树县城主要位于碳酸岩盐的基岩区域,在玉树县城西南侧有一片较大区域的第四纪沉积层。说明了该地表地质特性与浅层速度结构的一致性。6 km 以下的速度结构表明巴颜喀拉地块表现为高速体异常,羌塘地块表现为低速体异常,玉树—甘孜断裂处于高低速过渡带附近。速度结构的剖面图均显示了在地壳 18 km 到 25 km 深度范围内存在一低速层。

穿过主震的水平切片和纵剖面显示,高低速体的存在对余震的分布有一定的控制作用:主震发生在高速体与低速体过渡带区域并偏向高速体一侧,这一位置往往是应力集中的部位,可能导致大地震的发生。速度结构其他各剖面显示表明大部分余震分布在高速体的外围,在高速体内几乎没有地震分布。这意味着高速体内积累的弹性能量并未在高速体内释放,而是在周围环境释放。

震源区的速度结构表明由于受到前方及上方坚

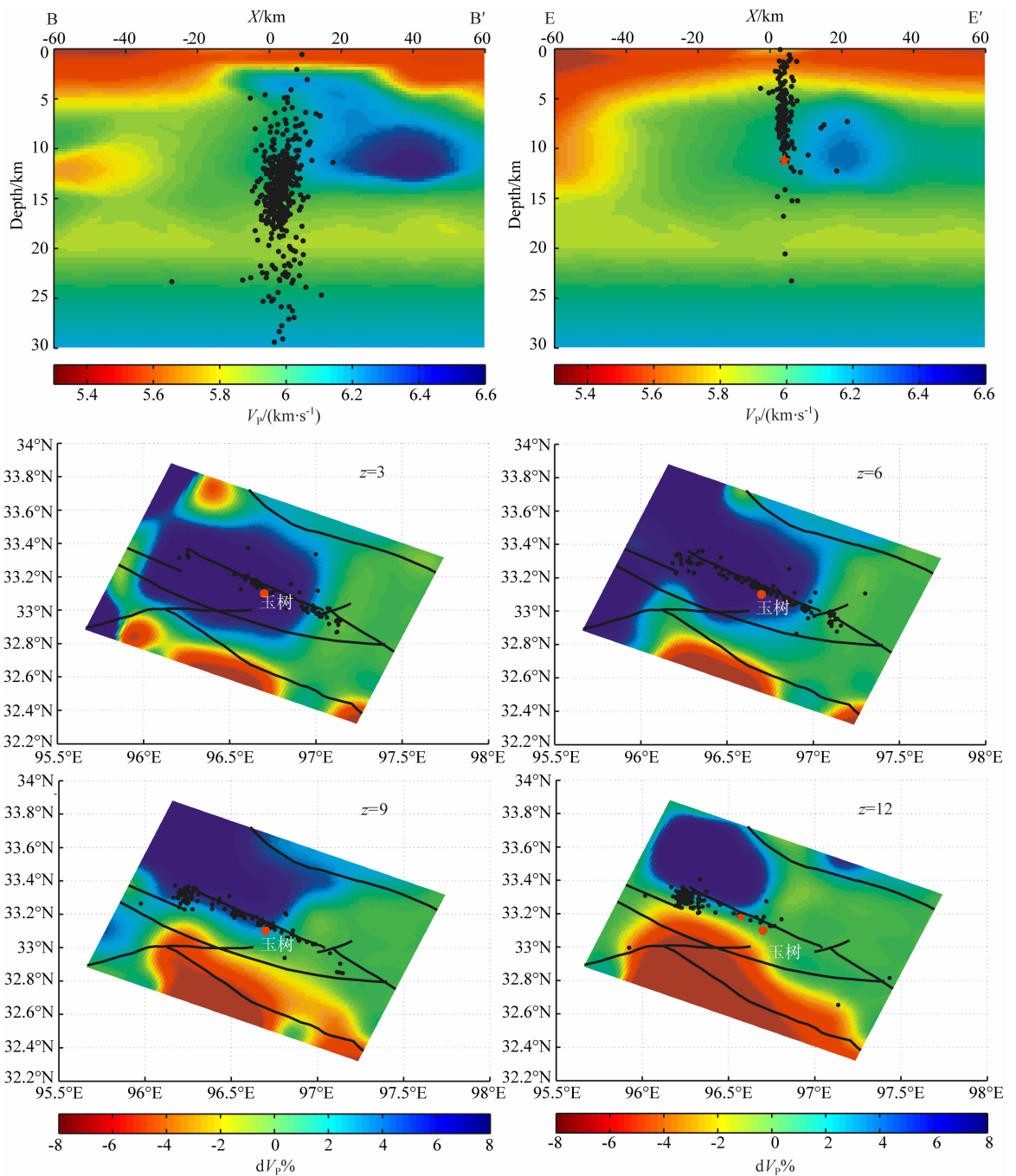


图 8 BB' EE' 剖面 and 深度为 3、6、9、12 km 速度结构水平切片恢复性试验的结果
 Fig. 8 Results of RRT test along profile BB' and EE'; Plan view of dV_p % image
 at depths of 3, 6, 9, and 12 km from RRT test

硬岩体的阻挡,导致了共轭方向和下方的岩石破裂,发生了一次 $M_{5.7}$ 级中强地震,随后产生了大量余震.这就解释了余震不沿 NW 向分布,而在垂直方向分布,余震深度分布在西侧比东南侧要深一些的原因.

根据速度结构和重定位结果推测出从东北到西南方向断层倾角发生了从缓到陡再缓的变化过程,

其中在 EE' 剖面附近断层的倾向从南西向反转为北东向.

致谢 感谢张海江博士提供 tomoDD 程序,感谢中国地震台网中心和中国地震局地球物理研究所数据备份中心提供震相数据和波形数据.感谢郑秀芬研究员在数据分析上给予的帮助和张天中研究员、蒋长胜博士、彭汉书博士在方法、讨论方面给予的指导.

参考文献(References)

- [1] Lin A, Jia D, Rao G, et al. Recurrent morphogenic earthquakes in the past millennium along the strike-slip Yushu fault, Central Tibetan Plateau. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2011, 101(6): 2755-2764.
- [2] Pei S P, Chen Y S J. Link between seismic velocity structure and the 2010 M_s 7.1 Yushu earthquake, Qinghai, China; evidence from aftershock tomography. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2012, 102(1): 445-450.
- [3] Zha X J, Dai Z Y. Fault geometry and slip distribution of the 2010 Yushu earthquakes inferred from inSAR measurement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2011, 101(4): 1951-1958.
- [4] 刘云华, 单新建, 屈春燕等. 青海玉树 M_s 7.1 级地震地表形变场特征研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2010, 40(10): 1310-1320.
- Liu Y H, Shan X J, Qu C Y, et al. Earthquake deformation field characteristics associated with the 2010 Yushu M_s 7.1 earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences* (in Chinese), 2010, 40(10): 1310-1320.
- [5] 陈正位, 杨攀新, 李智敏等. 玉树 7.1 级地震断裂特征与地震地表破裂带. 第四纪研究, 2010, 30(3): 628-631.
- Chen Z W, Yang P X, Li Z M, et al. Characteristics of M_s 7.1 Yushu earthquake fault and the surface rupture. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2010, 30(3): 628-631.
- [6] 张勇, 许力生, 陈运泰. 2010 年 4 月 14 日青海玉树地震破裂过程快速反演. 地震学报, 2010, 32(3): 361-365.
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. Fast inversion of rupture process for 14 April 2010 Yushu, Qinghai, earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2010, 32(3): 361-365.
- [7] Wang D, Mori J. The 2010 Qinghai, China, Earthquake: A moderate earthquake with supershear rupture. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2012, 102(1): 301-308.
- [8] Tobita M, Nishimura T, Kobayashita T, et al. Estimation of coseismic deformation and a fault model of the 2010 Yushu earthquake using PALSAR interferometry data. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307(3-4): 430-438.
- [9] 李建彪, 甘卫军, 冉勇康等. 青藏高原东部构造块体的运动学及形变特征分析. 西北地震学报, 2006, 28(2): 97-103.
- Li J B, Gan W J, Ran Y K, et al. Analysis on kinematics and deformation characteristic of tectonic blocks in Eastern Tibet Plateau. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 2006, 28(2): 97-103.
- [10] 李金臣, 潘华, 张志中. 青海玉树 7.1 级地震构造背景. 国际地震动态, 2010, (5): 1-5.
- Li J C, Pan H, Zhang Z Z. The seismotectonic setting of Yushu $M7.1$ earthquake in Qinghai Province. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2010, (5): 1-5.
- [11] 彭华, 马秀敏, 白嘉启等. 甘孜玉树断裂带第四纪活动特征. 地质力学学报, 2006, 12(3): 295-304.
- Peng H, Ma X M, Bai J Q, et al. Characteristics of Quaternary activities of the Garzê-Yushu fault zone. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2006, 12(3): 295-304.
- [12] 王未来, 吴建平, 房立华等. 2010 年玉树 M_s 7.1 地震及其余震的双差定位研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2013, 42(7): 1037-1046.
- Wang W L, Wu J P, Fang L H, et al. Relocation of the Yushu M_s 7.1 earthquake and its aftershocks in 2010 from HypoDD. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56(2): 182-191.
- [13] 刁桂苓, 王晓山, 高国英等. 以震源机制类型划分汶川、玉树地震构造块体归属. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1778-1783.
- Diao G L, Wang X S, Gao G Y, et al. Tectonic block attribution of Wenchuan and Yushu earthquakes distinguished by focal mechanism type. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1778-1783.
- [14] Waldhauser F, Ellsworth W. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2000, 90(6): 1353-1368.
- [15] 杨智娴, 陈运泰, 郑月军等. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用. 中国科学(D 辑), 2003, 33(S1): 129-134.
- Yang Z X, Chen Y T, Zheng Y J, et al. Accurate relocation of earthquakes in central-western China using the double difference earthquake location algorithm. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(S2): 181-188.
- [16] 黄媛, 杨建思, 张天中. 2003 年新疆巴楚伽一师地震序列的双差法重新定位研究. 地球物理学报, 2006, 49(1): 162-169.
- Huang Y, Yang J S, Zhang T Z. Relocation of the Bachu-Jiashi, Xinjiang earthquake sequence in 2003 using the double-difference location algorithm. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(1): 162-169.
- [17] 张天中, 武巴特尔, 黄媛等. 近台资料对近震相对定位算法的影响. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1123-1130.
- Zhang T Z, Wu B T R, Huang Y, et al. Effect of the data recorded at nearby stations on earthquake relative location. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(4): 1123-1130.
- [18] Zhang H J, Thurber C. Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2003, 93(5): 1875-1889.
- [19] 王长在, 吴建平, 房立华等. 2009 年姚安地震序列定位及震源区三维 P 波速度结构研究. 地震学报, 2011, 33(2): 123-133.
- Wang C Z, Wu J P, Fang L H, et al. Relocation of aftershocks of the 2009 Yaoan M_s 6.0 earthquake and 3-D P wave velocity structure around its source region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2011, 33(2): 123-133.
- [20] Zheng X F, Yao Z X, Liang J H, et al. The role played and opportunities provided by IGP DMC of China National Seismic Network in Wenchuan earthquake disaster relief and

- researches. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2010, 100(5B): 2866-2872, doi 10. 1785/0120090257.
- [21] 吴庆举, 田小波, 张乃铃等. 计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法. *地震学报*, 2003, 25(4): 382-389.
Wu Q J, Tian X B, Zhang N L, et al. Receiver function estimated by maximum entropy deconvolution. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, 25(4): 382-389.
- [22] 姜枚, 王有学, 钱辉等. 造山的高原——青藏高原及其邻区的宽频地震探测与地壳上地幔结构. 北京: 地质出版社, 2009: 58-85.
Jiang M, Wang Y X, Qian H, et al. Orogenic Plateau-Broadband Seismic Investigations of Crust and Upper Mantle Structure in the Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Areas (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2009: 58-85.
- [23] 王夫运, 张成科, 段永红等. 玉树强震区地壳结构与深部孕震环境探测研究. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集, 2011: 97-98.
Wang F Y, Zhang C K, Duan Y H, et al. Study on crustal structure and seismogenic condition of Yushu strong earthquake zone (in Chinese). Twenty-Seventh Annual Meeting Symposium of the Chinese Geophysical Society, 2011: 97-98.
- [24] 周荣军, 马声浩, 蔡长星. 甘孜—玉树断裂带的晚第四纪活动特征. *中国地震*, 1996, 12(3): 250-260.
Zhou R J, Ma S H, Cai C X. Late Quaternary active features of the Ganzi-Yushu fault zone. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1996, 12(3): 250-260.
- [25] 刘超, 许力生, 陈运泰. 2010年4月14日青海玉树地震快速矩张量解. *地震学报*, 2010, 32(3): 366-368.
Liu C, Xu L S, Chen Y T. Quick moment tensor solution for 14 April 2010 Yushu, Qinghai, earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2010, 32(3): 366-368.
- [26] Li Z H, Elliott J R, Feng W P, et al. The 2010 M_w 6.8 Yushu (Qinghai, China) earthquake: Constraints provided by InSAR and body wave seismology. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116(B10), doi: 10. 1029/2011JB008358.
- [27] Thurber C, Eberhart-Phillips D. Local earthquake tomography with flexible gridding. *Comput. Geosci.*, 1999, 25(7): 809-818.
- [28] Thurber C H, Brocher T M, Zhang H J, et al. Three-dimensional P wave velocity model for the San Francisco Bay region, California. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112(B07), doi: 10.1029/2006JB004682.
- [29] 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. *Phys. Earth Planet Inter.*, 2007, 161(1-2): 74-85.
- [30] Michael A J, Eberhart-Phillips D. Relations among fault behavior, subsurface geology, and three-dimensional velocity models. *Science*, 1991, 253(5020): 651-654.
- [31] Chiarabba C, Amato A. V_p and V_p/V_s images in the M_w 6.0 Colfiorito fault region (central Italy): A contribution to the understanding of seismotectonic and seismogenic processes. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(B5), doi 10. 1029/2001JB001665.
- [32] Kato A, Miyatake T, Hirata N. Asperity and barriers of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake revealed by highly dense seismic observations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2010, 100(1): 298-306.
- [33] Huang J, Zhao D. Crustal heterogeneity and seismotectonics of the region around Beijing, China. *Tectonophysics*, 2004, 385(1-4): 159-180.
- [34] 黄金莉, 赵大鹏, 郑斯华. 川滇活动构造区地震层析成像. *地球物理学报*, 2001, 44(S1): 127-136.
Huang J L, Zhao D P, Zheng S H. Seismic tomography of the Sichuan-Yunnan active tectonic region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, 44(S1): 127-136.
- [35] 雷建设, 赵大鹏, 苏金蓉等. 龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震震源机理. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 339-345.
Lei J S, Zhao D P, Su J R, et al. Fine seismic structure under the Longmenshan fault zone and the mechanism of the large Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(2): 339-345.
- [36] Okada T, Hasegawa A, Suganomata J, et al. Imaging the heterogeneous source area of the 2003 $M_6.4$ northern Miyagi earthquake, NE Japan, by double-difference tomography. *Tectonophysics*, 2007, 430(1-4): 67-81.
- [37] Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, 2005, 97(B13): 19909-19928.
- [38] 吴建平, 杨婷, 王未来等. 小江断裂带周边地区三维P波速度结构及其构造意义. *地球物理学报*, 2013, 56(7): 2257-2267.
Wu J P, Yang T, Wang W L, et al. Three dimensional P-wave velocity structure around Xiaojiang fault system and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(7): 2257-2267.

(本文编辑 何 燕)