

刘巧霞, 杨卓欣, 莘海亮等. 玉树 $M_s7.1$ 级地震部分余震重新定位及发震构造分析. 地球物理学报, 2012, 55(1):146-154, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.014.

Liu Q X, Yang Z X, Xin H L, et al. Relocation of Yushu $M_s7.1$ earthquake aftershocks and discussion on seismogenic structure. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(1):146-154, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.014.

玉树 $M_s7.1$ 级地震部分余震重新定位及发震构造分析

刘巧霞¹, 杨卓欣^{1*}, 莘海亮¹, 李 源², 沙成宁³

1 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

2 河南省地震局, 郑州 450016

3 青海省地震局, 青海 810001

摘 要 综合利用玉树震区应急流动台站观测数据和青海地震台网固定台站观测数据, 依据最新的人工地震宽角反射/折射剖面的速度模型, 采用 Hypo2000 地震定位法, 对 2010 年 4 月 18 日至 4 月 29 日期间玉树震区发生的部分余震进行了重新定位. 重新定位后, 震源位置的水平和垂直方向平均误差分别为 1.35 km 和 4.68 km, 走时残差为 0.49 s. 震源深度分布范围为 1.48~19.85 km, 平均震源深度为 10.28 km. 定位研究表明: 玉树地震余震沿北西-南东向的甘孜-玉树断裂带的北支, 即玉树-隆宝断裂分布, 长约 97 km. 余震分布特征在主震(微观震中)两侧存在差异, 可能反映了两侧构造特征存在差异. 截止到 4 月 29 日, 主震东南仍是应力的主要释放区域, 余震强度大且活动密集的区域位于主震东南距主震约 5 km、横向范围约 20 km. 主震破裂区的大部分应力在主震过程中得以释放, 主震时应力未释放的区域成为主要的余震分布区. 余震的连续发生可能已造成主震破裂区相互连通, 且破裂范围向西北方向扩展. 玉树主震及余震的发震构造为甘孜-玉树断裂的北支, 即玉树-隆宝断裂段, 断层性质为北东倾向的高角度左旋走滑断层. 发震断层的倾角和宽度在帮洞两侧有所不同, 帮洞以东发震断层宽度约为 12 km, 倾角约为 83° ; 而帮洞以西发震断层宽度约为 6.5 km, 断层倾角约减缓为 63° .

关键词 玉树 $M_s7.1$ 地震余震, Hypo2000 地震定位法, 重新定位, 余震空间分布特征, 发震构造

DOI:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.014

中图分类号 P315

收稿日期 2011-01-24, 2011-10-09 收修定稿

Relocation of Yushu $M_s7.1$ earthquake aftershocks and discussion on seismogenic structure

LIU Qiao-Xia¹, YANG Zhuo-Xin^{1*}, XIN Hai-Liang¹, LI Yuan², SHA Cheng-Ning³

1 *Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China*

2 *Henan Seismological Bureau, Zhengzhou 450016, China*

3 *Qinghai Seismological Bureau, Qinghai 810001, China*

Abstract Using the data recorded by both movable and fixed digital seismic monitoring networks in Qinghai province as well as the latest crustal velocity model determined with seismic wide angle reflection/refraction profile, a part of the Yushu earthquake aftershocks occurred from April 18 to 29, 2010, were relocated accurately by means of Hypoinverse-2000 location algorithm. After relocation, the vertical and horizontal average errors are 1.35 km and 4.68 km, respectively and the root-mean-square residual error of the travel time is 0.49s. The focal depth range is 1.48~

基金项目 国家自然科学基金面上项目(41040002)资助. 中国地震局地球物理勘探中心科技论著 201101.

作者简介 刘巧霞, 女, 1983 年生, 工学硕士. 现任中国地震局地球物理勘探中心助理工程师, 主要从事地震定位、地震波层析成像方法研究. E-mail: llqxx@126.com.

*** 通讯作者** 杨卓欣, 女, 中国地震局地球物理勘探中心副研究员, 主要从事地震波层析成像方法研究及应用工作. E-mail: yzx531@sohu.com

19.85 km, and the average focal depth is 10.28 km. The results show that the Yushu earthquake aftershocks are mostly distributed along the northern segment of NW-SE trending Garzê-Yushu fault zone, i. e. Yushu-Longbao fault with a length about 97 km. On the two sides of the principal earthquake (micro epicenter), the aftershock distribution presents different characteristics, which may suggest the different structural features. The densest aftershock area with higher strength, which is about 5 km from the main shock and its range is about 20 km, lay on the southeast of the main shock. Until April 29, the southeast of the main shock is still the major area of stress release. During the occurrence of main shock, much of the stress of the main shock rupture zone is released and the regions where the stress is not released became the major areas with aftershocks taking place. Continuous occurrence of aftershocks may have led to the main shock rupture zone connected to each other, and the rupture extended toward the northwest. The seismogenic fault of Yushu main shock and aftershocks is the northern branch of Garzê-Yushu fault zone, i. e. Yushu-Longbao fault, which dips to northeast with high-angle left-lateral strike-slip. The seismogenic fault dip angle and the fault width are different on the two sides of Bangdong. On the east of Bangdong, the dip angle and the fault width are about 83 degree and 12 km respectively while on its west, the fault width is about 6.5 km and the dip angle descends to 60 degree.

Keywords Aftershocks of Yushu $M_s7.1$ earthquake, Hypo2000, Relocation of aftershocks, Spatial distribution characteristic of aftershocks, Seismotectonics

1 引 言

2010年4月14日07时49分37秒,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.此次地震造成了严重的人员伤亡和财产损失,是继2008年5.12汶川地震之后又一次有极大社会影响的地震事件.玉树地震发生在青藏高原羌塘地块与巴颜喀拉地块交接处的金沙江缝合带上,发震断层为巴颜喀拉块体南边界的甘孜—玉树断裂,倾角近于直立,左旋走滑性质^[1].甘孜—玉树断裂规模巨大,是一条晚第四纪强烈活动的左旋走滑断裂,历史上曾发生过多强烈地震^[2-5].此次地震发生后,众多学者从不同的研究领域探究其发震机理,并取得一系列重要研究成果^[6-18].玉树 $M_s7.1$ 级地震是一次以单侧破裂为主的地震事件,破裂扩展的优势方向为震中的东南方向.地震破裂主要发生在走向 119° 、倾角 83° 、长约 $60\sim 80$ km、宽约30 km的断层面上.震中西北方向破裂长度约10 km,震中东南方向破裂长度约 $50\sim 70$ km^[8-9].玉树地震发生后,余震不断,截止2010年4月30日,共发生余震1126次.对余震序列的精确定位是获得余震空间分布特

征和震源区深部发震构造特征的有效途径.但仅使用固定地震台站资料进行余震序列的重新定位,常常会因为台站数量较少以及分布上的不尽合理等因素而导致定位结果存在较大的不确定性.如果将小区域流动台网余震监测资料和固定台网观测资料相结合,则由于流动台网针对性强、布局较为合理,因而能够提高定位的精度.

中国地震局地球物理勘探中心地震应急观测组在玉树地震发生后的4月18至4月29日期间,在震中区布设了30台PDS-3数字地震仪对余震序列进行观测.与此同时段,中国科技大学也在震区布设了6个临时台站.另外,青海省地震局和中国地震局地球物理研究所架设的7个实时传输台于4月17日陆续开始传输.流动台站的架设,弥补了震区固定地震台站稀少、个别台站因遭到地震破坏而无法正常工作等缺陷,从而使包括速度和精度在内的余震监测能力得到大幅提高.另外,应急流动台站较为密集地分布在震区附近,有利于重新定位时对地震震源深度和位置进行有效控制.本文利用这些流动台站观测数据,并结合固定台站余震监测数据,采用Hypo2000定位方法对玉树地震部分余震进行了重新定位,获得了更加精确的余震序列空间分布图像,对余震分布特征和震区深部发震构造进行了讨论.

2 定位数据资料

2.1 观测数据及台站分布

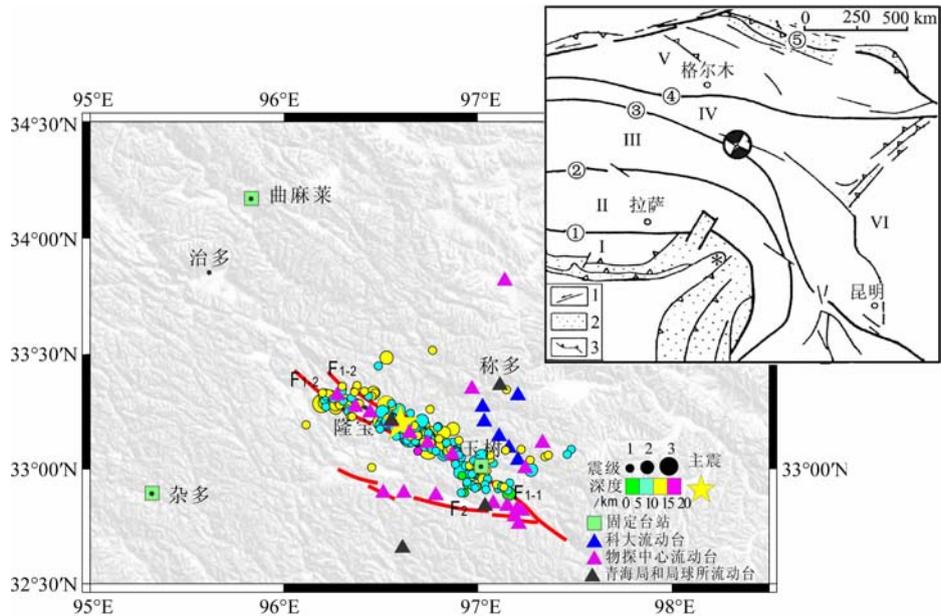
此次定位使用的数据为 2010 年 4 月 18 至 4 月 29 日期间监测到的余震,由三部分组成:一部分来源于中国地震局地球物理勘探中心在玉树震源区布设的 30 个流动台站记录到的余震数据(此次定位去掉了 3 个记录不清楚和过于偏远的地震台站)和中国科技大学布设的 6 个流动台站记录到的余震数据;另一部分来源于青海省地震局和地球物理研究所布设的实时传输流动台网中 4 个台站的观测数据;第三部分资料来源于青海地震台网 3 个固定台站的观测数据.由于环境和交通的不便,在震区西部架设流动台站非常困难,区域固定台站的加入能够弥补震区西部流动台站资料的缺乏.本次定位共使用了 40 个观测台站、应急流动地震台站和固定地震台站构成的观测台网,对余震区形成了良好的方位

覆盖(图 1),从而能够保证定位的精度和准确性.

2.2 直达波震相到时的拾取

本研究采用 SAC2000 地震波形分析软件,人工拾取应急流动台站记录到的直达波 Pg 和 Sg 震相到时.流动台站监测到的 2 级以上地震事件地震波形记录较好,可以比较清楚地识别直达波 Pg 和 Sg 震相到时(图 2),但震级在 1.0~1.9 范围内的地震波形记录背景噪音较大,震相不易识别,因此在识别震相的时候根据具体台站的波形记录清晰程度进行了取舍.震相拾取完毕后,采用和达曲线检验数据,去掉偏离和达曲线较远的台站,确保数据真实可靠(图 3).

经过震相识别及一致性检测,最终挑选出研究区内 4 月 18 日至 4 月 29 日期间、震相记录清楚、台站记录大于等于 4、且台站对地震有较好覆盖关系的 1 级以上地震事件 214 个,对这些地震进行重新定位.其中 3.0~3.9 级地震 8 个,2.0~2.9 级地震 51 个.



F_{1-1} 和 F_{1-2} 组成甘孜—玉树断裂的北支,即玉树—隆宝断裂,其中 F_{1-1} 为玉树—擦西江卡断裂, F_{1-2} 为擦西江卡—隆宝断裂; F_2 为甘孜—玉树断裂的南支,即巴塘—上拉秀断裂^[10].插图为青藏高原东部构造背景(据文献^[19]修改).1,大型走滑断层;2,高原边缘挤压带;3,逆冲断层;I,喜马拉雅地块;II,藏北地块;III,羌塘地块;IV,巴彦喀拉地块;V,柴达木地块;VI,扬子地块;①雅鲁藏布缝合带;②班公—怒江缝合带;③金沙江缝合带;④东昆仑缝合带;⑤西昆仑—祁连山缝合带.

North branch of Garzê-Yushu fault is composed of F_{1-1} (Yushu-Chaxijiangka fault) and F_{1-2} (Chaxijiangka-Longbao fault); F_2 is south branch of Garzê-Yushu fault, Batang-Shanglaxiu fault^[10]. The inset is sketch of geologic settings in the eastern Tibetan Plateau^[19]. 1, Major strike-slip fault; 2, Peripheral compressional tectonic zone of the plateau; 3, Thrust fault; I, Himalaya block; II, North Tibetan block; III, Qiangtang block; IV, Bayan Har block; V, Qaidam block; VI, Yangtze block; ① Yarlung Zangbo suture; ② Bangong-Nujiang suture; ③ Jinshajiang suture; ④ Eastern Kunlun suture; ⑤ Western Kunlun-Qilan suture.

图 1 重新定位前余震震中位置与观测台网分布关系

Fig. 1 Distribution of epicenters before relocation relative to the earthquake observation stations

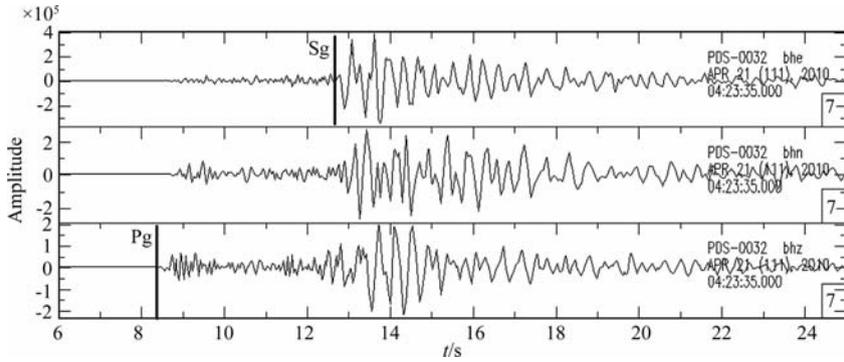


图 2 地震波形记录及震相识别

图中波形为 2010 年 4 月 21 日 4 时 23 分 38.6 秒发生的 3.8 级余震地震波形。

Fig. 2 Seismograms and seismic phase identification

Seismic waveform records of M_s 3.8 occurred at 4:23:38.6 on April 21, 2010.

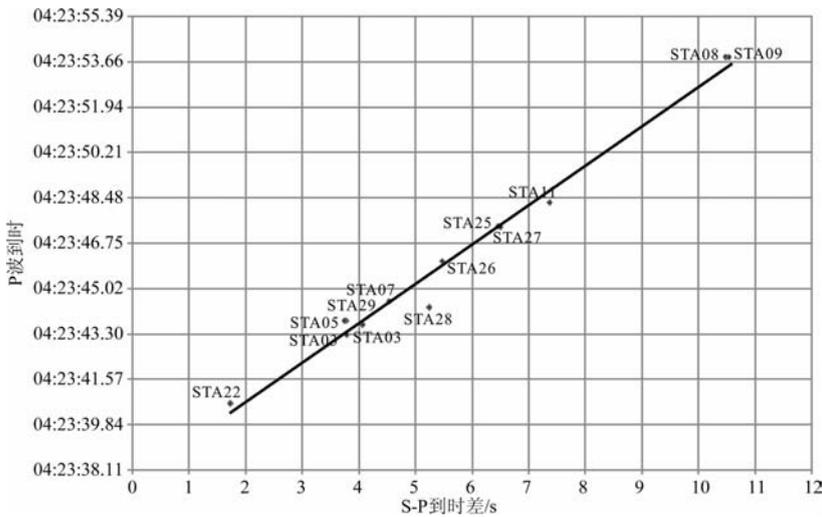


图 3 和达曲线法检测各观测台站震相一致性

图中检测震相的地震与图 2 中记录的 3.8 级余震对应。

Fig. 3 Consistency detection of seismic phase using Wadachi method

The earthquake in phase consistency test corresponds to the one in Fig. 2.

3 余震重新定位

3.1 Hypo2000 地震定位法

Hypoinverse 定位方法是 Fred W. Klein 在 Geiger 定位法的基础上发展起来的一种单事件绝对定位方法。1981 年, Klein 对线性定位法做了一些修改, 使它适应于 135 km 之内的近场定位问题。其基本原理是首先计算近场特定模型下的走时表, 通过走时反演确定地震的震中位置和深度。Klein 在 Hypo71 的基础上增加了用于梯度层的定位算法和分区模型算法, 在初始模型处各层的厚度和速度参数可作适当调整。2002 年正式发布 HYPOINVERSE-2000 1.0 版, 用它来代替早期所有的版本, 该版本增加了“Y2000”数据格式及相应的处理功能。2007 年发布 HYPOINVERSE-2000 1.1 版, 主要增加了修订发

震时刻的功能, 并对一些命令细节进行了完善和补充^[20]。该方法最大的优点是: 可以考虑比较复杂的地下结构状况, 可以在震中附近地区设置多达 10 个梯度层结构的模型。这样就可以依据地质体的赋存位置和范围分别设定不同的地下层参数, 特别适合于近场定位。

3.2 定位使用的速度模型

在地震定位中, 除了震相识别和震相到时的读取精度及台网布局外, 地震震源区的地壳速度模型也是影响定位准确性的关键因素, 因而地壳速度模型的选取至关重要。本研究参考中国地震局地球物理勘探中心穿过玉树震区实施的主动源宽角反射/折射探测剖面结果¹⁾(剖面位置见图 4a), 给出定位

1) 中国地震局地球物理勘探中心. 玉树震区宽角反射/折射探测研究报告. 2011

采用的速度模型如表 1 所示.

表 1 定位采用的地壳速度模型

Table 1 Velocity model used in relocation

层序号	深度/km	P 波速度/(km · s ⁻¹)
1	0	4.30
2	4.5	5.25
3	14.5	5.75
4	24.0	5.85
5	36.0	6.20
6	76.0	6.65
7	80.0	8.00

4 定位结果分析

依据表 1 的速度模型,采用 Hypo2000 地震定位法,对挑选出的 214 个地震进行了重新定位.重定位后,震源位置的水平和垂直方向平均误差分别为 1.35 km 和 4.68 km,走时残差为 0.49 s.

图 4、图 5 分别给出了重新定位前后的余震震中分布和余震震源深度沿甘孜—玉树断裂带走向 A-A' 剖面的分布情况.

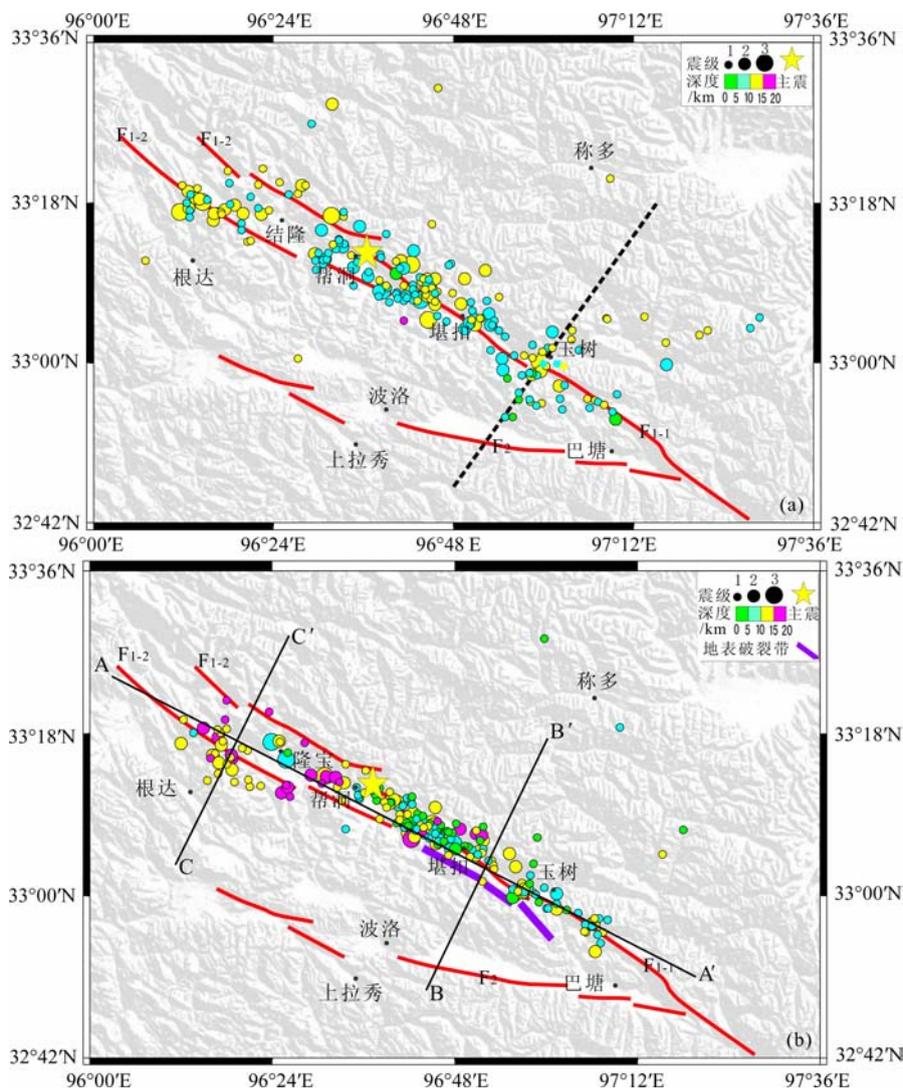


图 4 余震震中分布及震源深度剖面位置

(a) 定位前震中分布图; (b) 定位后震中分布图. 图中 F₁₋₁, F₁₋₂, F₂ 的含义同图 1; (a) 和 (b) 中的地震事件是一一对应的; (a) 中黑色虚线为玉树震区主动源宽角反射/折射探测剖面位置.

Fig. 4 Distribution of aftershock epicenters and the location of focal depth section

(a) Distribution of aftershock epicenters before relocation; (b) Distribution of aftershock epicenters after relocation. Meanings of F₁₋₁, F₁₋₂ and F₂ are same as in Fig. 1. Seismic event in (a) and (b) is one-to-one correspondence; The black dotted line in (a) stands for deep seismic sounding profile through Yushu earthquake area.

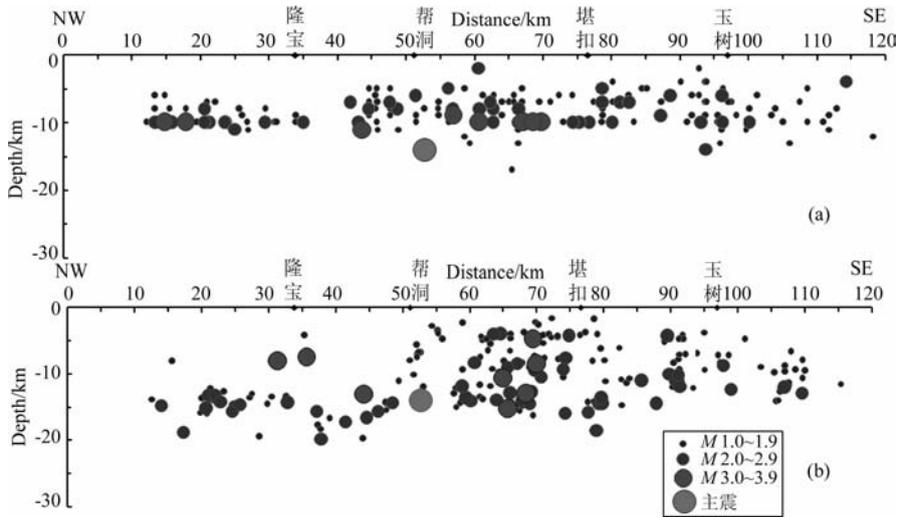


图 5 沿甘孜—玉树断裂走向的震源深度剖面(剖面位置见图 4b 中 A-A')

(a) 定位前震源深度分布;(b) 定位后震源深度分布。(a) 和 (b) 中的地震事件是一一对应的。

Fig. 5 Contrast of the two focal depth sections along the trend of Garzê-Yushu fault before and after aftershocks relocation (Section location is shown in Fig. 4b A-A')

(a) Distribution of focal depth before relocation; (b) Distribution of focal depth after relocation.

Seismic event in (a) and (b) is one-to-one correspondence.

4.1 余震空间分布特征分析

由图 4 可见,重新定位后,余震震中分布的条带性更加明显,均沿甘孜—玉树断裂的北支(F_{1-1} 、 F_{1-2})分布,南支(F_2)几乎无余震活动.这一余震分布格局与主震和余震过程中区域应力场的变化,即北支断裂积累了很大的应力,而南支断裂上应力积累较小有关^[15].同时也表明甘孜—玉树断裂的北支是玉树 7.1 级地震的发震构造.

由图 5 可见,定位前震源深度集中在 0~15 km,并且在 10 km 处有很明显的条带性,地震事件在深度剖面上分辨率很差,经统计有 34% 的地震震源深度为 10 km.出现这种情况的原因是固定台网对地震进行定位时,由于观测台站分布偏远或有记录的地震台站数过少而无法对地震进行重新定位计算,在这种情况下,定位系统会根据甘—青走时表查出一个对应的震源深度值,而不是经过反演计算得出的.因而这样的震源深度不准确,对研究发震构造无意义.重新定位后的震源深度分布范围为 1.48~19.85 km,地震在深度剖面上的分辨率得到明显加强.以帮洞为界,其西北方向余震的优势深度约 15 km,整体上比其东南方向余震震源深度更加集中,且深度偏深.这种深度上的差异可能与沿甘孜—玉树断裂带走向地壳厚度自西北向东南有所减薄有关^[21].

定位后的余震分布图像(图 4b、图 5b)显示,沿甘孜—玉树断裂带,余震震中分布长度约 97 km,在主震(微观震中)的西北和东南两个方向均有分布.

在主震的西北,有个别震级大于 3.0 的余震,余震分布较为均匀,震中分布长度约 38 km;在主震的东南,震中分布长度约 59 km,在距主震约 5 km 处,存在一个余震最密集且较大震级集中的区域,其震中分布范围约 20 km.余震分布特征在主震东南和西北两侧存在差异,主震东南的余震活动范围、密度和强度总体上大于主震西北,表明主震两侧断裂特征存在差异.将余震分布投影到断层静态滑动量分布图^[8]上(图 6)可见,余震分布特征与静态滑动量分布特征具有相似之处,即主震造成的最大强度破裂分布在主震东南距主震一定的距离范围内,而主震之后的余震,其强度最高且密度最大的区域仍然位于主震东南距主震一定的距离范围内.表明截止 4 月 29 日,主震东南仍是应力的主要释放区域.不同之处是,在主震破裂区静态滑动量大的区域,余震分布并不多且震级较小;余震主要分布在滑动量较小甚至为零的区域,表明主震破裂区的大部分应力在主震过程中得以释放,主震时应力未释放的区域成为余震活动的主要区域.由图 6 易见,余震的连续发生可能造成主震破裂区相互连通,且破裂范围向西北方向发生扩展.

4.2 发震构造分析

在精确定位后获得的余震空间分布图像的基础上,本文对玉树地震的深部发震构造进行了分析.余震空间分布特征显示(图 4b、5b),以主震为界,两侧的余震分布特征存在着差异,结合甘孜—玉树断裂

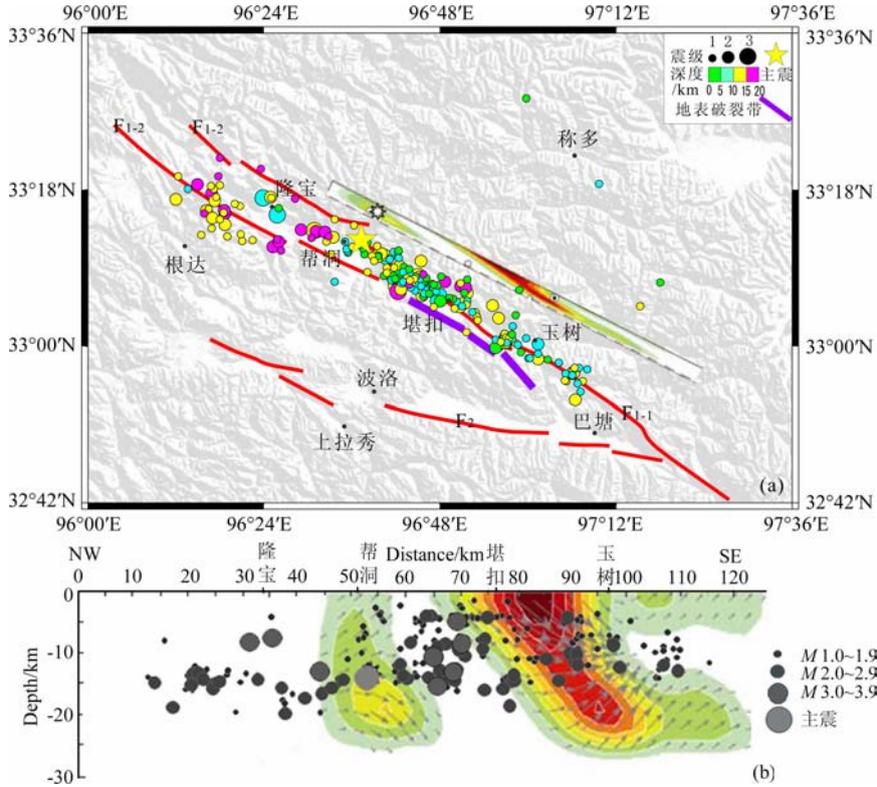


图 6 余震空间分布与玉树地震破裂过程关系

(a)断层面和静态滑动量分布在地面上的投影^[8]与重新定位后余震震中分布的关系;(b)静态滑动量分布^[8]与余震震源深度分布的关系。

Fig. 6 Relationship between rupture process of the Yushu earthquake and spatial distribution of aftershocks

(a) Relationship between projection of rectangular fault plane and static slip distribution on the ground surface^[8] and distribution of aftershock epicenters after relocation; (b) Relationship between static final slip distribution^[8] and focal depth distribution.

北支更为详细的分段情况(图 1)^[10],以帮洞为界将余震带分为两段,帮洞以东余震段大致对应甘孜—玉树断裂北支的玉树—擦西江卡断裂段(F₁₋₁),帮洞以西余震段大致对应于擦西江卡—隆宝断裂段(F₁₋₂).与这两个余震段对应的、垂直于甘孜—玉树断裂带走向的震源深度剖面 B-B'和 C-C'见图 7,其中 B-B'和 C-C'剖面位置见图 4b.由图 7 中震源深度由浅至深的延伸趋势可见,余震震源分布所反映的结构面具有高角度、倾向北东的特征.结合甘孜—玉树断裂地表破裂考察、震源破裂过程、主震震源机制等研究结果^[8-12,15-17],推测玉树主震及余震的发震断层为北东倾向的高角度左旋走滑断层,如图 7 中红色虚线所示.为了进一步了解发震断层,对发震断层的倾角和宽度作了初步测定:测量出红色虚线与水平面之间的夹角,将它作为该段发震断层的倾角,并根据图上尺寸和比例尺测算出余震带分布的宽度,近似作为发震断层的宽度.按照这种测算方法得出帮洞以东段发震断层宽度约为 12 km,倾角约为 83°(图 7a);帮洞以西段发震断层宽度约为 6.5 km,断层倾角减缓为 63°(图 7b).

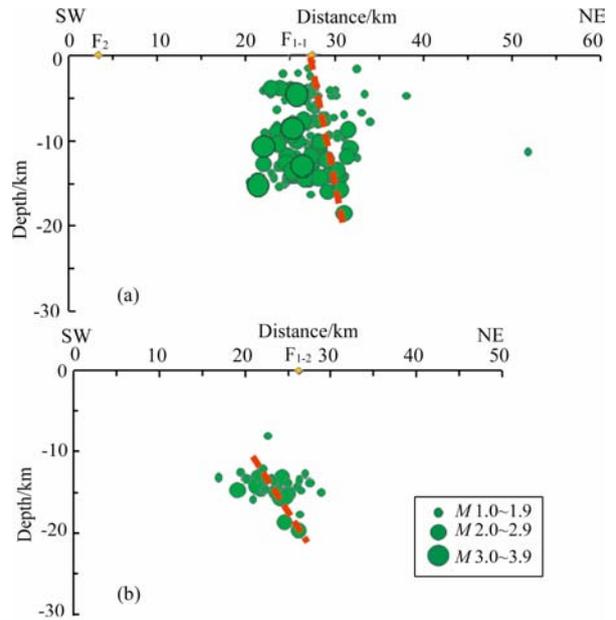


图 7 垂直甘孜—玉树断裂走向的震源深度剖面及断层构造解释

(a)剖面 B-B';(b)剖面 C-C'.图中虚线表示推测断层的展布形态。
Fig. 7 Focal depth sections perpendicular to the trend of Garzê-Yushu fault and fault tectonic interpretation (a) Section B-B'; (b) Section C-C'. Red dashed line represents the spread form of constructive fault.

5 结 论

本文利用流动台站余震监测资料和青海省固定地震台网观测资料,采用玉树震区最新的深地震测深剖面地壳速度模型,对 2010 年 4 月 18 日至 2010 年 4 月 29 日期间发生的、震级在 1.0~3.9 级范围内的 214 个余震进行了重新定位。结合地质及地球物理等研究成果,对定位结果进行了分析,得出以下结论:

(1)余震重定位后,震中沿甘孜—玉树断裂北支呈更加集中的条带状分布;震源深度的分辨率明显提高。余震空间分布特征在主震(微观震中)两侧存在差异,反映了两侧断裂构造特征存在差异。

(2)截止 2010 年 4 月 29 日,主震东南仍是主要的应力释放区,余震强度高及活动密集的区域位于主震东南距主震约 5~25 km 的范围内。

(3)主震破裂区的大部分应力在主震过程中得以释放,余震主要分布在主震时应力未释放的区域,连续的余震活动可能已造成主震破裂区相互连通,且破裂范围向西北方向扩展。

(4)玉树主震及余震的发震构造为甘孜—玉树断裂北支,即玉树—隆宝断裂段,断层性质为北东倾向的高角度左旋走滑断层。发震断层倾角和宽度在主震两侧存在不同,帮洞以东发震断层为玉树—擦西江卡断裂段,该段断层宽度约为 12 km,倾角约为 83° ;帮洞以西发震断层为擦西江卡—隆宝断裂段,断层宽度约为 6.5 km,倾角约减缓为 63° 。

(5)由于本文所使用的资料仅为主震后 4 月 18—29 日期间的余震事件,资料的有限使得在对发震构造形态的推测上,尤其是对主震西北的擦西江卡—隆宝断裂形态的推测上存在一定程度的不确定性。更加准确的推测结果应建立在丰富的、经精确定位的余震事件基础之上。

致 谢 中国地震局地球物理勘探中心、青海省地震局及中国地震局地球物理研究所地震应急观测人员不畏艰险,克服重重困难,为本研究提供了宝贵的流动台站监测数据;本文研究过程中得到了青海省地震局、中国科学院测量与地球物理研究所郑勇副研究员、物探中心王夫运主任,嘉世旭,段永红,徐朝繁研究员以及田晓峰博士的帮助和支持;审稿专家肯定了本文的研究价值并提出了建设性的修改意见,使本文得以顺利发表,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 中国地震局地质研究所. 玉树 7.1 级地震震区地震构造分析. <http://www.eq-igl.ac.cn>, 2010[2011-01-05]. Institute of Geology, China Seismological Bureau. Analysis of source area seismotectonics of Yushu $M_s 7.1$ earthquake. <http://www.eq-igl.ac.cn>, 2010[2011-01-05].
- [2] 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(4): 251-260. 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(4): 250-260.
- [3] 闻学泽, 徐锡伟, 郑荣章等. 甘孜—玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(S1): 199-208. Wen X Z, Xu X W, Zheng R Z, et al. Average slip-rate of the Garze-Yushu fault and ruptures of the recent large earthquakes. *Science in China Series D: Earth Sciences* (in Chinese), 2003, 33(S1): 199-208.
- [4] 闻学泽, 黄胜睦, 江在雄. 甘孜—玉树断裂带的新构造特征与地震危险性估计. 地震地质, 1985, 7(3): 23-32. Wen X Z, Huang S M, Jiang Z X. Neotectonic features of the Ganzi-Yushu fault zone and assessment of its earthquake risk. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1985, 7(3): 23-32.
- [5] 李闯峰, 刑成起, 蔡长星等. 玉树断裂活动性研究. 地震地质, 1995, 17(3): 218-224. Li M F, Xing C Q, Cai C X, et al. Research on activity of Yushu fault. *Seismology and Geology* (in Chinese), 17(3): 218-224.
- [6] 倪四道, 王伟涛, 李丽. 2010 年 4 月 14 日玉树地震: 一个有前震的破坏性地震. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2010, 40(5): 535-537. Ni S D, Wang W T, Li L. The April 14th, 2010 Yushu earthquake, a devastating earthquake with foreshocks. *Science in China Series D: Earth Sciences* (in Chinese), 2010, 40(5): 535-537.
- [7] 李金臣, 潘华, 张志忠. 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 $M_s 7.1$ earthquake in Qinghai province. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2010, (5): 1-5.
- [8] 张勇, 许力生, 陈运泰. 2010 年青海玉树地震震源过程. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2010, 40(7): 819-821. Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. Source process of the 2010 Yushu, Qinghai, $M_s 7.1$ earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences* (in Chinese), 2010, 40(7): 819-821.
- [9] 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), 32(3): 361-365.
- [10] 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.
Cheng Z W, Yang P X, Li Z M, et al. Characteristics of $M_s7.1$ Yushu earthquake fault and the surface rupture. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 628-631.
- [11] USGS. USGS Centroid Moment Solution. <http://earthquakeusgs.gov/earthquake/eqinthenews/2010/vacp/neicvacpcomt.php>, 2010. 4. 14[2011-01-05].
- [12] 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, 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.
- [13] 许力生, 邸海滨, 冯万鹏等. 2010 年青海玉树 $M_s7.1$ 级地震近断层地面运动估计. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1366-1373.
Xu L S, Di H B, Feng W P, et al. Estimation of the fault-near ground motion of the 2010 Yushu, Qinghai, $M_s7.1$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6): 1366-1373.
- [14] 常利军, 丁志峰, 王椿镛. 2010 年玉树 7.1 级地震震源区横波分裂的变化特征. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2613-2619.
Chang L J, Ding Z F, Wang C Y. Variations of shear wave splitting in the 2010 Yushu $M_s7.1$ earthquake region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(11): 2613-2619.
- [15] 陈立春, 王虎, 冉康勇等. 玉树 $M_s7.1$ 级地震地表破裂与历史大地震. 科学通报, 2010, 55(13): 1200-1205.
Chen L C, Wang H, Ran K Y, et al. Surface rupture of Yushu, Qinghai, $M_s7.1$ earthquake and big earthquakes in history. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2010, 55(13): 1200-1205.
- [16] 刘云华, 单新建, 屈春燕等. 青海玉树 $M_s7.1$ 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 $M_s7.1$ earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences* (in Chinese), 2010, 40(10): 1310-1320.
- [17] 张永双, 马寅生, 胡道功等. 玉树地震地表破裂调查与灾后重建避让选址研究. 地质学报, 2010, 84(5): 593-605.
Zhang Y S, Ma Y S, Hu D G, et al. Investigation and research on the surface rupture of the Yushu earthquake and reconstruction site selection. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2010, 84(5): 593-605.
- [18] 任俊杰, 谢富仁, 刘冬英等. 2010 年玉树地震的构造环境、历史地震活动及其复发周期估计. 震灾防御技术, 2010, 5(2): 228-233.
Ren J J, Xie F R, Liu D Y, et al. Study of tectonics, seismicity and recurrence interval of Yushu 2010 earthquake, Qinghai Province. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 2010, 5(2): 228-233.
- [19] 汪一鹏. 青藏高原活动构造基本特征. //中国地震局科技发展司《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究理论与应用 6. 北京: 地震出版社, 1998:135-144.
Wang Y P. Principal features of the active tectonics in Tibetan Plateau. //China Earthquake Administration, Technology Development Division, Research on Active Fault Editorial Committee. Active Faults Research Theory and Application-6. Beijing: Seismological Press, 1998:135-144.
- [20] Klein F W. User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a FORTRAN Program to Solve for Earthquake Location and Magnitudes, version 1.1. U. S. Geol. Surv. Open File Rep., 02-171, 2007.
- [21] 王有学, 钱辉. 青海东部地壳速度结构特征研究. 地学前缘, 2000, 7(4): 568-579.
Wang Y X, Qian H. Study of crustal velocity structure in east Qinghai. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2000, 7(4): 568-579.

(本文编辑 胡素芳)