

2014年云南鲁甸6.5级地震序列重定位研究*

徐甫坤, 李 静, 苏有锦

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 利用云南省测震台网的连续波形数据及震相报告, 使用川滇三维速度结构对2014年云南鲁甸6.5级地震进行重新定位, 并使用双差定位方法对2014年8月3~13日期间的地震序列进行重定位, 共获得882次地震的定位结果, 定位残差由0.59 s下降为0.33 s, 定位精度得到改善。结果表明, 余震分布明显呈现两个优势方向, 分别为NNW向及NEE向分支, NNW向分支为主要的余震分布区域, 与包谷垭—小河断裂相近, 其东南端很有可能跨过昭通—鲁甸断裂, 展布长度约15 km。结合地质等方面资料, 认为本次地震的发震断层应为包谷垭—小河断裂, 主破裂区应为NNW向分支展布区域, 且序列分布的南端和东侧区域可能存在危险性。

关键词: 云南鲁甸6.5级地震; 双差定位法; 昭通—鲁甸断裂; 包谷垭—小河断裂

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0515-08

0 引言

据中国地震台网测定, 2014年8月3日16时30分, 云南省昭通市鲁甸县发生6.5级地震, 震中位置(27.1°N, 103.3°E), 震源深度12 km, 极震区烈度达到IX度。截至8月13日24时, 云南省地震台网记录到余震1 364次, 其中4.0~4.9级地震5次, 3.0~3.9级地震49次, 最大余震4.2级。

鲁甸地震发生在昭通—鲁甸断裂的西侧, 震中距鲁甸县城西南约23 km。中国地震局地球物理研究所(2014a)震源机制解和中国台网中心(2014)提供的美国哈佛大学快速震源机制解显示该地震为走滑型地震。但当地地质构造较为复杂, 云南地震台网初定位显示, 地震序列成NW向条带分布于昭通—鲁甸断裂西侧, 在主震附近也有部分余震呈NEE向或近EW向分布, 表现出一定的共轭特征。而此次地震震级较小(矩震级为6.1), 破裂很难穿透地表, 从地震现场调查来看, 也确实并未发现明显的地表破裂, 这些给确定发震断层造成了一定困难。对于这样的中强地震, 可以结合余震的展布和震源机制解等来判定发震断层的性质。地震序列重定位结果能为分析断层的地

下形状、确定发震断层和分析地震的发震机理提供重要参考(房立华等, 2013; Balfour, Cassidy, 2012), 特别是针对这些没有明显地表破裂的中强地震。本文利用“川滇地区三维走时表”和“三维速度模型”对主震进行了重定位, 并使用双差定位方法对余震序列进行了重定位研究。本文基于云南省地震台网编目组提供的震相报告, 使用双差定位方法, 对余震序列进行重定位研究, 并对此次地震的发震构造进行了讨论。

1 主震重定位

考虑到双差定位方法是一种相对定位方法, 定位的结果可能出现整体性的位置偏移(房立华等, 2011), 笔者利用云南省地震台网中心的连续波形数据, 对主震的震相进行了分析。使用的台站除云南省的测震台站外, 还包含贵州、四川、广西以及西藏的部分台站, 另外, 下关小孔径台网的彩凤台和象鼻台亦参与定位, 具有基本的方位覆盖, 对本次地震的震中确定具有较好的约束作用。

本文地震定位使用的软件为中国地震台网通用的MSDP软件, 使用的速度模型为地震行业科技专项“川滇地区地震走时表编制”的研究成果

* 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 云南省地震局科技人员传帮带项目和云南省人民政府“十项措施”监测预报项目(JCYB-20080601-3)联合资助。

“川滇地区三维速度模型”(LOC3D),使用的定位算法为单纯形法。笔者使用了 56 个地震台站的波形数据,选择信噪比高、震相清楚、方位覆盖较好的波形记录进行震相标注,并对震中距超过 400 km 的台站只取 P 波到时参与定位。重新定位后的主震位置为 (27.10°N, 103.39°E),震源深度 9.5 km。水平和垂直方向的定位误差分别为 1.00 km 和 1.78 km。

2 资料选取及参数设定

本文利用双差定位方法,对鲁甸地震序列(云南省地震速报目录,空间范围为 26.8°~27.3°N, 103.1°~103.6°E)进行重新定位。在震中距 200 km 范围内共有 29 个台站参与定位,其中包括云南省测震台网中 10 个测震台、四川区域台网 6 个测震台、贵州区域台网 2 个测震台、另有昭通地震台网 3 个测震台、中国地震局地球物理所所属巧家台阵 5 个台,以及鲁甸地震后,云南省地震局在震中附近架设的 3 个流动测震台,台站分布与震中位置如图 1 所示。采用云南省地震编目系统提供的观测报告,8 月 3 日至 13 日 24 时该序列共包含 1 364 个地震事件,其中有 1 132 个事件有震相记录。172 次地震无初始震源深度,约占地震总数的 15%。设定每次事件参与计算的地震震相记录不少于 5 个,挑选出符合条件的 1 098 个事件参与计算,共有 13 899 条震相数据。

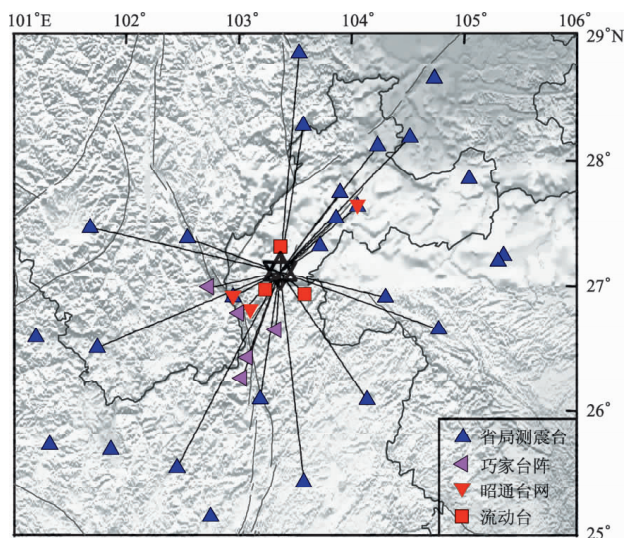


图 1 参与重定位的台站分布图

Fig. 1 Distribution of stations used in relocation

利用云南测震台网获取的连续波形数据,从 49 次 $M_L \geq 3.0$ 地震事件中选择信噪比高、震相清楚的地震波形记录,使用互相关方法获取较为精确的震相到时数据,共获得 21 209 对互相关记录(其中, P 波震相 18 409 对, S 波震相 2 800 对)参与重定位计算。

双差定位方法(Waldhauser, Ellsworth, 2000; Balfour *et al.*, 2012; 杨智娴等, 2004; 黄媛, 2008; 房立华等, 2011, 2013; 宋美琴等, 2012; 蔡妍等, 2014)是目前广泛使用的丛集地震精定位方法,相比绝对定位方法,该方法在很大程度上可以消除速度结构不均匀性引起的定位误差,可较大幅度地提高地震之间相对位置的精度,用于活动断层的精细结构研究。在地震定位问题中,震源深度的精确确定最为困难,其受地震波走时影响极大。尤其对于震中距大于 30 km 的台站,直达波走时对震源深度变化不敏感,是造成震源深度精确确定的一个主要原因,对于震源深度的确定目前还没有完全有效的方法(黄媛, 2006)。速度模型在地震定位中,尤其是在震源深度的确定中具有重要作用,双差定位方法采用相对走时差数据,很好的克服了速度横向不均匀性的影响(吕鹏等, 2011),但水平分层速度模型仍对定位结果存在较大影响(Waldhauser, Ellsworth, 2000; 李丽等, 2011),本文采用多个速度模型尝试计算的结果也反映了这点,因此需要选用最接近真实地壳的速度模型。

云南地区地壳速度结构的变化非常显著(苏有锦等, 1999, 王椿镛等, 2002; 马宏生等, 2008),前人运用多种方法对云南地区地壳速度结构进行了大量的研究,其中人工测深方法能给出测点较精确的速度结构。近 20 多年来,云南地区先后实施过多次人工测深工程,得到了多条人工地震测深剖面的观测结果(王椿镛等, 2002),很多学者根据观测结果和速度反演获得了云南地区 25 个测点的水平速度结构(林中洋等, 1993; 胡鸿翔, 高世玉, 1993)。本次地震距离丽江—攀枝花—者海剖面(熊绍柏等, 1993)最近,距离者海测点(26.50°N, 103.42°E)约 60 km,故选用者海测点的速度模型结果。模型共分 6 层,每层的顶界面深度依次为 0.0、2.0、5.0、20.0、36.5 和 57.0 km,对应的层速度依次为 5.50、5.63、5.80、6.20、6.50 和 7.75 km/s,波速比设定为 1.73。

3 重定位结果

采用以上参数对鲁甸6.5级地震序列8月3日16时至8月13日24时的1 098次地震事件进行重新定位, 共获得主震和897次余震的震源位置参数。由于地震数量较多, 采用LSQR迭代算法进行计算, 重定位后的南北向平均误差为0.9 km, 东西向平均误差为0.8 km, 深度误差为1.5 km; 序列中心位置相对定位前南北向偏移0.2 km, 东西向偏移0.0 km, 深度偏移1.1 km。与重定位前相

比, 地震分布具有明显的集中性, 较好地勾勒出地震的集中分布特征。

鲁甸6.5级地震发生后, 中国地震局地球物理所(2014b)利用双差定位算法, 迅速给出发震后44小时的序列展布, 显示余震整体呈NNW向展布, 并认为在主震附近也存在近NEE向的余震分布, 但较为分散。本文选取参考剖面时参考了该结果, 参考节面的选取与其存在一定差异, 详细定位结果图2所示, 图中断层引自闻学泽等(2013), 震源机制解结果为CAP反演方法获得, 数据由中国地震局地球物理所韩立波提供^①。

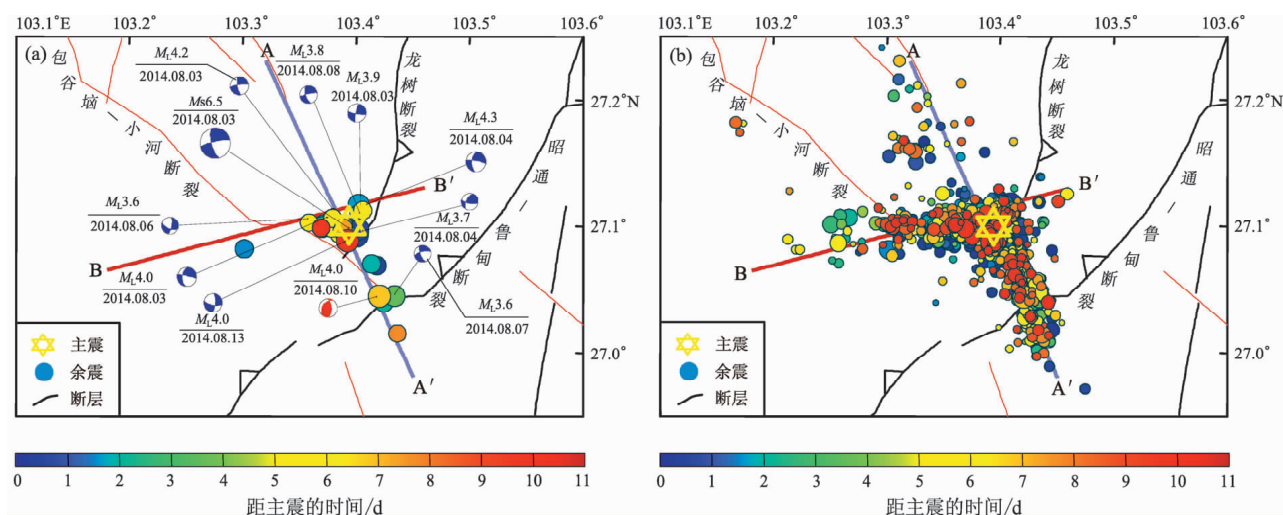


图2 重定位后的序列震中分布图

(a) $M_L \geq 3.0$ 地震分布; (b) 所有地震震中分布

Fig. 2 The distribution of sequences after relocation

(a) distribution of $M_L \geq 3.0$ earthquakes; (b) distribution of all earthquakes

(1) 图2a为46次 $M_L \geq 3.0$ 地震震中分布, 除分布在西侧的两个地震外, 其余地震整体呈NNW向展布, 并存在两个主要分布区域, 一个在主震附近, 集中分布了34次地震; 另一个位于东南侧, 龙树断裂以南、昭通—鲁甸断裂附近区域, 有10次地震分布在该区域内。两个区域之间存在一个约2.5 km的空段, 位于包谷垭—小河断裂与龙树断裂的交汇部位。

余震分布集中在主震附近(图2b), 并勾勒出与附近断层(闻学泽等, 2013)相近的展布形态。北侧地震较少, 且较为分散; 中段(主震附近)西侧由包谷垭—小河断裂横贯而过, 东侧由龙树

断裂限制, 由南往北看, 呈一个倒三角形; 南侧则沿着近北西向的包谷垭—小河断裂延伸至昭通—鲁甸断裂附近。

(2) 余震分布呈现两个优势方向(图2b)。一支沿NNW方向展布(图中AA'参考线), 与包谷垭—小河断裂方向相近, 为主要的余震分布区域, 余震的数量和强度均较高。该分支上地震分布集中, 呈条带状。北段位于龙树断裂及包谷垭—小河断裂以北区域, 地震在北端分布较少且分散, 靠近中段集中于主震周边区域, 至东南段末端则在昭通—鲁甸断裂南侧有少量地震分布, 很可能已跨过昭通—鲁甸断裂, 集中分布的余震展

① 韩立波. 2014. 鲁甸地震震源机制解.

布约 15 km。另一支呈 NEE 向分布 (图中 BB' 参考线), 东端截止于龙树断裂附近, 西端延伸至包谷垭一小河断裂西侧, 地震主要分布于主震西侧, 除去主震附近区域, 分支上仅有 2 次 3 级以上地震, 最大震级 3.2, 地震强度和频次均低于前一支, 地震分布也相对分散。从整体分布看, 主震位于两个分支的交汇区域, 两支分支均主体位于主震的单侧区域。

(3) 震源深度分布特征显示 (图 3): 余震震源深度主要集中在 9~15 km 范围。

(4) 图 4 为序列的震源深度沿 NNW 方向和 NEE 方向的分布, 参考节面的位置如图 2 所示。上部的图为地震个数沿着参考节面的分布, 统计

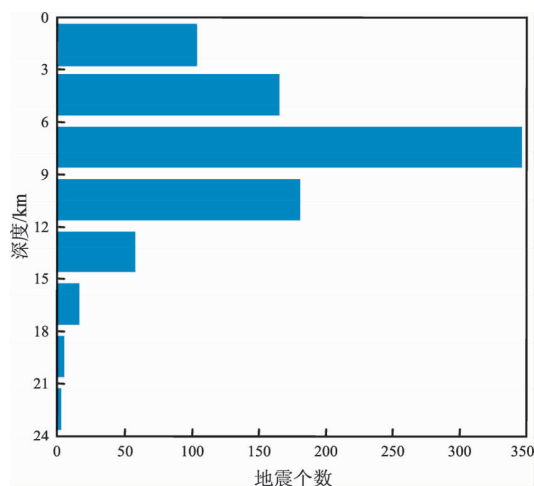


图 3 震源深度分布柱状图

Fig. 3 Histogram of the distribution of focal depth

窗长为 1 km, 滑动长度为 1 km。用红色曲线标出了参考的断层面位置, 虚线表示断层底部的可能深度, 断层引自闻学泽等 (2013)。从 NNW (图 4a) 及 NEE (图 4b) 两个参考剖面角度看: 余震集中分布在主震附近, 且大致勾勒出断层的产状; 序列深度则呈现大部分余震的震源深度浅于主震深度、较小余震的震源深度浅于较大余震的特征。主震位于序列破裂区底部, 可能表征主震的初始破裂点位于深部, 然后向浅部发展 (张广伟等, 2014; 刘成利等, 2014)。NNW 分支由主震开始, 往北段 (A) 方向深度迅速变浅, 破裂至 3 km 左右时, 深度已在 9 km 以内, 再往北则仅有地震零散分布, 未显示出集中性; 往南段 (A') 方向深度逐渐变浅, 至龙树断裂附近地震明显减少, 再往南则再次增多, 余震分布与昭通断裂的深部倾向一致, 有少量地震在昭通断裂南侧分布 (图 4a)。8 月 10 日的 M_L 4.1 地震位于昭通断裂与龙树断裂的深部交汇部位, 深于局部的其他地震, 反映该地震为本次序列中昭通断裂上的一次显著地震事件。NEE 分支的震源深度沿剖面由西 (B) 往东 (B') 呈逐渐加深的趋势, 至主震东侧达到最深, 且地震数量迅速减少, 可能为受龙树断裂约束的作用 (图 4b)。由图 2 所示闻学泽等 (2013) 的研究成果, 龙树断裂与该分支呈一定角度斜交, 自主震附近开始即有约束作用, 图中所示参考线为龙树断裂与 BB' 参考面的交线。另外自主震发生后余震有向地表迁移的趋势。

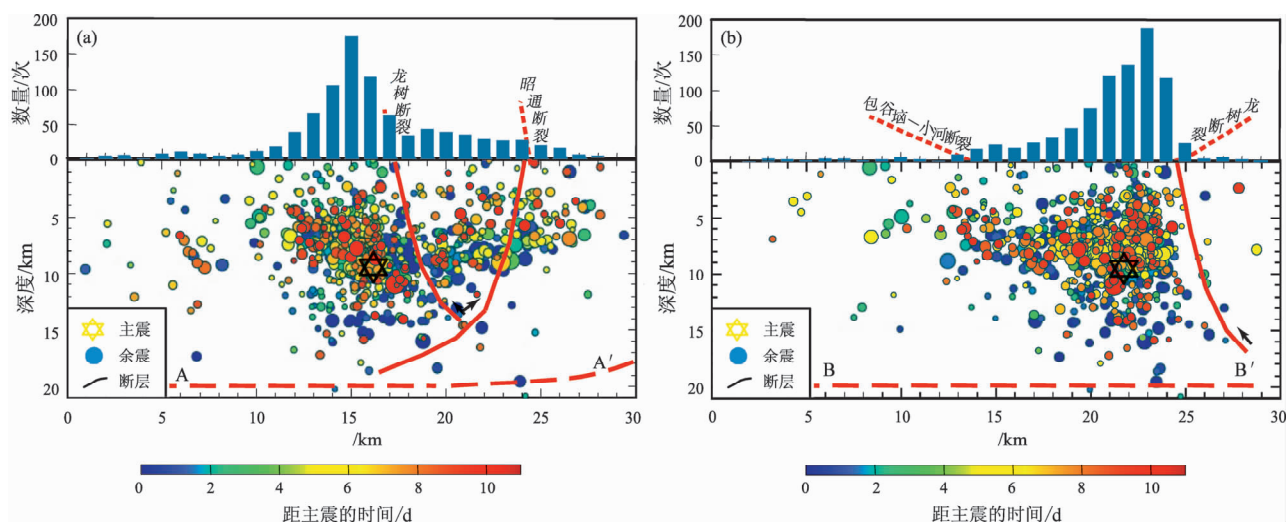


图 4 地震序列的震源深度沿 NNW (a) 和 NEE 方向 (b) 的分布

Fig. 4 Distribution the focal depth of earthquake sequence in NNW (a) and NEE (b)

(5) 从时间演化角度: 余震分布呈现明显的时空交替变化特征(图5)。主震发生后2 d内, 余震迅速散列分布, 呈现出两个优势方向分布格局, 在各个方向均有地震分布, 南段达到昭通—鲁甸断裂附近, 西段则跨过包谷垭—小河断裂, 但NEE方向上地震的震级和频度均远低于NNW分支, 主震位于两个优势分布的交叉部位。第3~

6天, 余震分布较为集中, 活动强度整体有所降低, 而在两个分支的端点处未明显降低, 向外存在一定的扩展。第7~9天, 余震活动有明显起伏, 南段昭通—鲁甸断裂附近发生地震, 同时北侧区域的地震活动也有明显增加。第10~11天(截至8月13日24时)活动再次变低。整个余震序列呈现活跃—平静—活跃交替的变化特征。

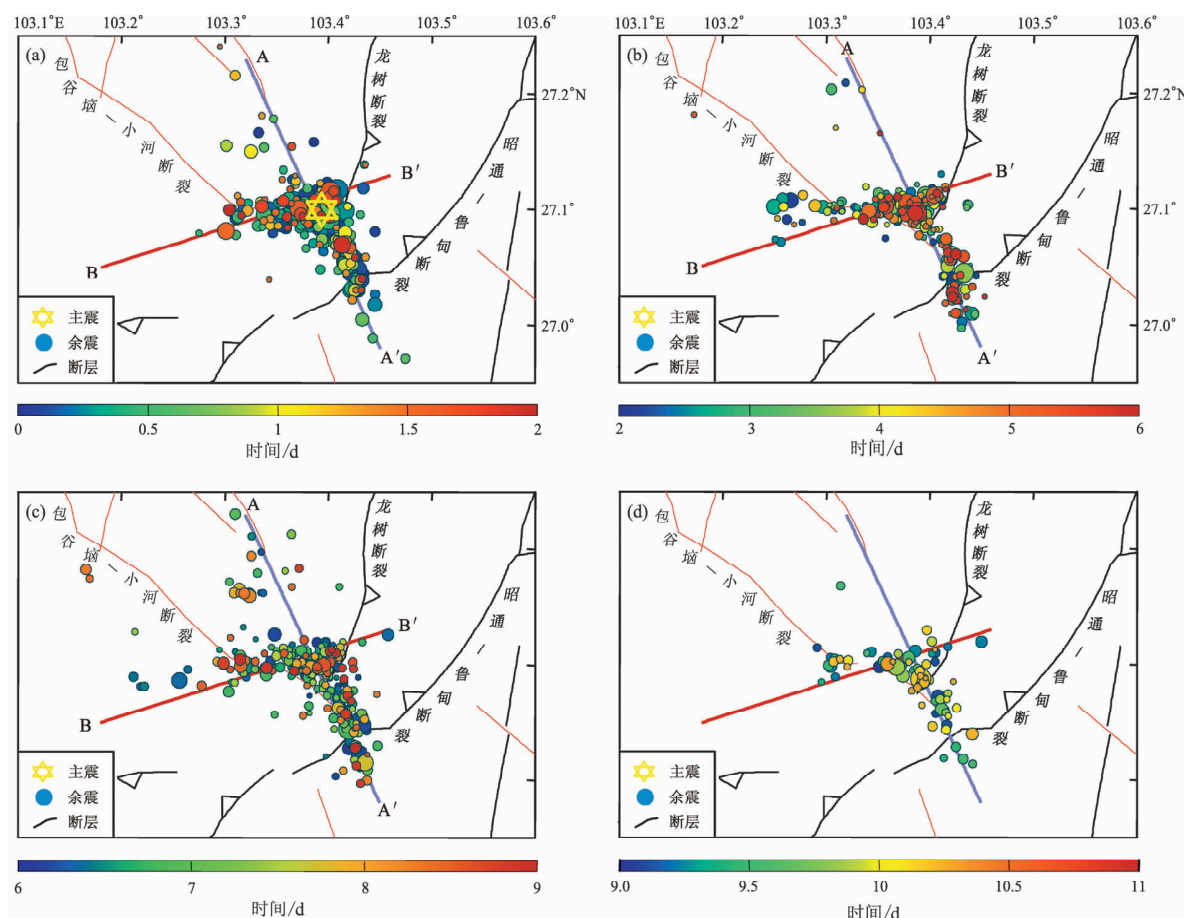


图5 重定位后不同时间的余震震中分布图

(a) 第0~2天; (b) 第3~6天; (c) 第7~9天; (d) 第10~11天

Fig. 5 Epicentre distribution of aftershocks at different time after relocation

(6) 考虑不同速度模型的影响, 在鲁甸震区附近还有昭通、西昌测点以及平均速度模型共3组可用数据, 不同速度模型定位得到的结果存在一个整体性的位置差异, 反映水平分层速度模型对双差定位结果整体性的位置偏移有明显影响; 而不同速度模型得到的序列事件间的相对位置基本一致。另外, 不同测点的速度结构数据的差异反映了附近区域速度结构的复杂性, 马宏生等(2008)利用P波反演得到的分层扫描结果显示,

地震区域即存在明显的速度梯度, 缺乏震区的速度结构数据, 可能是导致定位结果差异的原因。但是从讨论发震构造及断层结构的角度, 更重要的是序列的展布形状, 因此这个整体性的差异对讨论结果造成的影响是可以忽略的。

4 讨论

本文利用云南台网的震相资料, 采用双差定

位方法获得了 2014 年 8 月 3 日至 13 日 24 时云南鲁甸 6.5 级地震序列共 882 次地震的高精度定位结果。重定位后,震相走时的均方根残差平均值由 0.59 s 降低为 0.33 s,震源位置的南北向平均误差为 0.9 km,东西向平均误差为 0.8 km,深度误差为 1.5 km;序列中心位置相对定位前南北向偏移 0.2 km,东西向偏移 0.0 km,深度偏移 1.1 km。与定位前的地震相比,双差重定位后的地震均方根残差明显降低,序列的定位精度得到较好改善。

关于主震的震源位置和深度,不同研究机构给出的结果略有差异,水平位置基本一致,而震源深度差异较大。云南省测震台网及中国地震台网的定位深度为 12 km,刘成利等(2014)利用波形数据反演破裂过程得到的破裂起始位置为 11 km,张广伟等(2014)和王未来等(2014)利用双差定位获得的深度分别为 13.3 km 及 15 km。结果的差异可能是因为震区附近台站较为稀疏,在震中距 100 km 范围仅有云南台网的昭通、巧家、贵州威宁及四川普格 4 个台站,最近的为相距约 41 km 昭通台。笔者基于三维速度模型的地震定位结果是震中位于(27.10°N, 103.39°E),震源深度 9.5 km,与以上结果基本一致。

根据中国地震局地质研究所(2014)的分析结果,鲁甸地震的发震断层为 NNW 向的包谷垭—小河断裂,为 NEE 向的昭通—鲁甸断裂系下属的 NNW 向次级走滑断层,本次地震初步判定为左旋走滑地震。但该地区断裂复杂,周围展布着 NE 向的昭通—鲁甸断裂、龙树断裂、以及近 NW 向的包谷垭—小河断裂等多条构造(图 2),从地表构造形迹看,震中区属多方向构造汇合部位,构造的汇合、交切提供了应力集中的构造条件。由于地震未造成明显的地表破裂,因此对发震构造需要结合多种手段进一步讨论。

重定位得到的余震成条带状集中分布,分布呈现两个优势方向。一支沿 NNW 向展布,地震数量和强度均较高,方向与中国地质研究所(2014)给出的分析结果一致,条带主要分布在昭通—鲁甸断裂的西侧,且往东南方向跨过昭通—鲁甸断裂;另一分支沿 NEE 方向,地震数量和强度均稍小。地震破裂区是地震时沿发震断裂带同震错动

面(破裂面)在地面的垂直投影,指示了地震破裂的位置、尺度及其与发震构造的关系(闻学泽等,2013)。故从余震分布的频度及强度可以得出,NNW 方向约 15 km 的条带区域应为本次地震的主要破裂区。

昭通—鲁甸断裂呈右阶雁列连贯分布,走向近 NE,为昭通—莲峰断裂带之分支断裂,昭通—莲峰断裂带是在早期形成的 NE 向逆冲—推覆构造带的基础上,新生代进一步发展而成的、两条相对独立的大型逆冲右旋走滑活动断裂带(闻学泽等,2013),近 NW 向分段展布的包谷垭—小河断裂为切割该断裂带的次级横向断裂,具有左旋走滑性质。鲁甸地震的极震区附近发育 NE 及 NW、近 EW 向三组断裂,其中北东向的昭通—鲁甸断裂为主体构造,其余两组为次级构造。鲁甸地震及其序列位于北东向昭通—鲁甸断裂带与断续分布的北西向次级断裂组(含包谷垭—小河断裂)的交汇地区^①。从地貌形态上,震区河谷深切,形成深达数百米的多条“V”型谷,东侧 NE 向河谷与昭通—鲁甸断裂一致,西北边的 NW 向河谷与包谷垭—小河断裂一致,而在极震区附近存在断续、但清晰可见西侧近 EW 向的包谷垭—小河断裂一段、以及由龙头山镇至牛栏江堰塞湖的 NNW 向河谷地貌。这与图 2 中的包谷垭—小河断裂在极震区附近的断裂结构基本一致(存在约 30°的差异),结合地震破裂区的分布,认为可将此 NW 向的次级构造包谷垭—小河断裂一段作为本次地震的发震构造,构造应力的集中积累主要环绕此构造,其他的构造起着配合和辅助作用。

在 NNW 分支的南端、昭通—鲁甸断裂南侧亦有一部分余震分布(图 2b、图 4),这与中国地震局(2014)发布的烈度分布图中 IX 度区范围一致。而按闻学泽等(2013)的研究成果,在昭通—鲁甸断裂南侧亦存在一条连通至会泽—彝良断裂的、呈弧形的次级走滑断裂,其北端隔着昭通—鲁甸断裂与包谷垭—小河断裂相望,预示着二者存在连通的可能性。如果深部存在这样的连通结构、或本次地震已将昭通—鲁甸断裂贯穿,则该区有发生震群性地震的构造条件。另外,在主震的北侧和东侧区域地震分布较少且强度较低,

① 谢英情. 2014. 鲁甸 6.5 级地震构造背景探讨.

后续余震并未向这两处进一步扩展,这些地方或者是较为软弱的区域,难以积累足够的应力形成地震,或者是较为坚硬的区域,目前正在闭锁积累能量过程,其未来地震序列发展趋势需做更多工作进一步探究。

本文所用震相观测报告来自云南省测震台网,地质、地表考察资料来自谢英情高级工程师。成文过程得到了韩立波博士、苏有锦研究员和付虹研究员的指导;皇甫岗研究员、谢英情高级工程师、申波高级工程师、金明培高级工程师在地质方面给予指导;孟令媛博士、赵小艳工程师在绘图方面也提出了诸多有益建议,在此一并致谢。

参考文献:

- 蔡妍,吴建平,房立华,等. 2014. 鄂尔多斯东缘地震重定位及拉张盆地过渡区的地震分布特征[J]. 地球物理学报, 57(4): 1079-1090.
- 房立华,吴建平,王未来,等. 2013. 四川芦山 $M_s 7.0$ 地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, 58.
- 房立华,吴建平,张天中,等. 2011. 2011年云南盈江 $M_s 5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. 地震学报, 33(2): 262-227.
- 胡鸿翔,高世玉. 1993. 滇西地区地壳浅部基底速度细结构研究[J]. 中国地震, 9(4): 356-363.
- 黄媛. 2008. 结合波形互相关技术的双差算法在地震定位中的应用探讨[J]. 国际地震动态, (4): 29-34.
- 李丽,刘剑,付虹. 2011. 澜沧—耿马地区中小地震精确定位研究[J]. 地震研究, 34(4): 482-487.
- 林中洋,胡鸿翔,高世玉,等. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征[J]. 地震学报, 15(4): 427-440.
- 刘成利,郑勇,熊熊,等. 2014. 利用区域宽频带数据反演鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震震源破裂过程[J]. 地球物理学报, 57(9): 3028-3037.
- 吕鹏,丁志峰,朱露培. 2011. 结合波形互相关的双差定位方法在2008年汶川地震余震序列中的应用[J]. 地震学报, 33(4): 407-419.
- 马宏生,张国民,周龙泉,等. 2008. 川滇地区中小地震重新定位与速度结构的联合反演研究[J]. 地震, 28(2): 29-38.
- 宋美琴,郑勇,葛繁,等. 2012. 山西地震带中小震精确定位及其显示的山西地震构造特征[J]. 地球物理学报, 55(2): 513-525.
- 苏有锦,刘祖荫,蔡民军,等. 1999. 云南地区强震分布的深度地球介质背景[J]. 地震学报, 21(3): 313-332.
- 王椿镛,Mooney W. D.,王溪莉,等. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 24(1): 1-16.
- 王未来,吴建平,房立华,等. 2014. 2014年云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报, 57(9): 2042-3051.
- 闻学泽,杜方,易桂喜,等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景[J]. 地球物理学报, 56(10): 3361-3372.
- 熊绍柏,郑晔,尹周勋,等. 1993. 丽江—攀枝花—海地一带地壳结构及其构造意义[J]. 地球物理学报, 36(4): 434-443.
- 杨智炯,于湘伟,郑月娟,等. 2004. 中国中西部地区地震的重新定位和三维地壳速度结构[J]. 地震学报, 26(1): 19-29.
- 张广伟,雷建设,梁姗姗,等. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震序列重定位与震源机制研究[J]. 地球物理学报, 57(9): 3018-3027.
- 中国地震局. 2014. 中国地震局发布云南鲁甸 6.5 级地震烈度图[EB/OL]. (2014-08-03) [2014-08-30]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/478/20140807085249557322083/index.html>.
- 中国地震局地球物理研究所. 2014a. 2014年8月3日云南省昭通市鲁甸县 $M_s 6.5$ 地震[EB/OL]. [2014-08-30] <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/270724.shtml>.
- 中国地震局地球物理研究所. 2014b. 余震精定位结果[EB/OL]. (2014-08-06) [2014-08-30]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100821/100831/20140806194301400994421/index.html>.
- 中国地震局地质研究所. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸 6.5 级地震发震断层分析[EB/OL]. (2014-08-06) [2014-08-30]. [http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/云南鲁甸6_5级地震发震断层分析\(徐所\).pdf](http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/云南鲁甸6_5级地震发震断层分析(徐所).pdf).
- 中国地震台网中心. 2014. 美国哈佛大学(HRV)快速震源机制解[EB/OL]. (2014-08-03) [2014-08-30]. http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data/hrv_qcmt.jsp.
- Balfour N. J., Cassidy J. F., Dosso S. E.. 2012. Identifying active structures using double-difference earthquake relocations in southwest British Columbia and the San Juan Islands, Washington[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(2): 639-649.
- Waldhauser F., Ellsworth W.. 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California[J]. BSSA, 90(6): 1353-1368.

Relocations of Yunnan Ludian $M_s6.5$ Earthquake Sequences in 2014

XU Fu-kun, LI Jing, SU You-jin

(*Earthquake Administration of Yunnan province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

Using the continues waveform data and phase report in Yunnan Seismic Network, we relocated the Ludian $M_s6.5$ mainshock by using the 3D velocity model in Yunnan-Sichuan region and got the location of epicenter was (103.39E, 27.10N), and the focal depth was 9.5 km. Then we relocated the earthquake sequences from Aug. 3 to Aug. 13 in 2014 by using the double-difference relocation algorithm and obtained location results of 882 earthquakes, and the residual reduced from 0.51 s to 0.31 s finally. The result reveals that the distribution of aftershocks presents an asymmetric conjugate shape in NNW and NEE directions. The NNW branch is the main distribution area of aftershocks with length of about 15 km which is closed to the Baogunao-Xiaohe Fault, its southeast end most likely cross the Zhaotong-Ludian Fault. Combing with the geological materials, we propose that the seismogenic fault of Ludian $M_s6.5$ earthquake should be the Baogunao-Xiaohe Fault, the main rupture is the distribution area of NNW branch, and the south and eastern area of the earthquake sequence might exist further rupture in future.

Key words: Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake; double-difference relocation algorithm; Zhaotong-Ludian Fault; Baogunao-Xiaohe Fault