

# 2013年云南洱源 $M_s$ 5.5 地震序列不同地震观测台网地震定位结果对比分析\*

李涛<sup>1</sup>, 付虹<sup>1♣</sup>, 姜金钟<sup>1</sup>, 徐兴倩<sup>2</sup>

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 云南农业大学, 云南 昆明 650201)

**摘要:** 基于云南地震台网和“喜马拉雅计划”台阵探测项目流动台阵所记录到的波形资料, 分3种情况对2013年云南洱源  $M_s$  5.5 地震进行重新定位: 第一种仅利用云南地震台网数据进行定位, 第二种仅利用流动台阵数据进行定位, 第三种是综合云南地震台网和流动台阵数据, 并结合波形互相关双差定位法进行定位。研究结果显示: 在水平方向上, 这3种情况得到的地震震中优势分布方向大致相同, 与乔后—维西断裂 NNW 走向一致, 但后2种情况所得到震中分布更集中, 呈现的条带状更明显; 在深度分布方面, 后2种情况得到的震源深度比仅用云南地震台网资料进行双差定位得到的深度浅, 且更加集中; 在残差方面, 结合波形互相关的双差定位法得到的震源位置估算误差在 EW 向、NS 向、UD 向最小。这表明台站密度更大, 布局更合理, 得到的定位结果误差明显降低, 无论在水平方向还是深度方向分布都更为集中。

**关键词:** 双差定位; 波形互相关; 云南地震台网; 流动台阵; 洱源地震序列

**中图分类号:** P315.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2018)01-0055-09

## 0 引言

高精度的地震定位可以更好地揭示地震序列的空间分布特征, 探讨地震与断裂构造之间的关系和地震成因。Waldhauser 和 Ellsworth (2000) 提出了一种定位精度相对较高的相对定位方法——双差地震定位法, 该方法对一定空间范围内的地震进行组对, 再使用地震对的走时差进行定位, 这在很大程度上消除了介质横向不均匀造成的路径效应, 从而获得较高精度的相对空间位置分布, 因此已得到广泛应用 (Waldhauser *et al*, 2001, 2002, 2004; 杨智娴等, 2003, 2004a, b; 李志海等, 2004; Okada *et al*, 2005; 王小平等, 2005; 黄媛等, 2006; 冯建刚, 2008; 朱艾斓等, 2008; 陈翰林等, 2009; 刘文邦等, 2011; 房立华等, 2011)。

2013年3月3日13时41分15秒, 云南省大理州洱源县发生了  $M_s$  5.5 地震, 之后于4月17日再次发生  $M_s$  5.0 地震。对于此次地震, 云南地震台网记录到大量观测数据, 为深入研究该区域的构造环境提供了重要条件。此外, 由中国地震局

地球物理研究所承担的“喜马拉雅计划”台阵探测一期项目在云南省地区布设的流动台站(以下简称流动台阵)也记录到了此次地震序列。本文基于2套台网记录的地震波形资料, 首先对2013年洱源地震序列分别进行双差定位, 在此基础上, 综合云南地震台网和流动台阵的资料, 并结合波形互相关进行重新定位, 讨论3种情况下定位结果之间的差异。

## 1 地震序列概况

2013年3月3日0时52分16秒, 云南省大理州洱源县(26.16°N, 99.97°E)发生了  $M_L$  3.6 地震, 随后形成序列活动, 并于同日13时41分15秒以及4月17日9时45分56秒分别发生  $M_s$  5.5 和  $M_s$  5.0 地震。该地震序列共造成了云南洱源、云龙、漾濞等地60 000余人受灾, 20多人受伤, 2 500多间房屋不同程度的受损。

截至2013年5月31日, 云南地震台网共记录到该序列地震共1 300多次(包括单台276次), 其中  $M_L$  0.0~0.9 地震837次,  $M_L$  1.0~1.9 地震

\* 收稿日期: 2017-06-13.

基金项目: 云南省地震局传帮带项目“C2-2014003”资助.

♣ 通讯作者: 付虹(1963-), 研究员, 主要从事地震综合预报等研究. E-mail: ynfuhong@qq.com.

423 次,  $M_L 2.0 \sim 2.9$  地震 78 次,  $M_L 3.0 \sim 3.9$  地震 16 次,  $M_L 4.0 \sim 4.9$  地震 1 次,  $M_L 5.0 \sim 5.9$  地震 2 次 (图 1)。

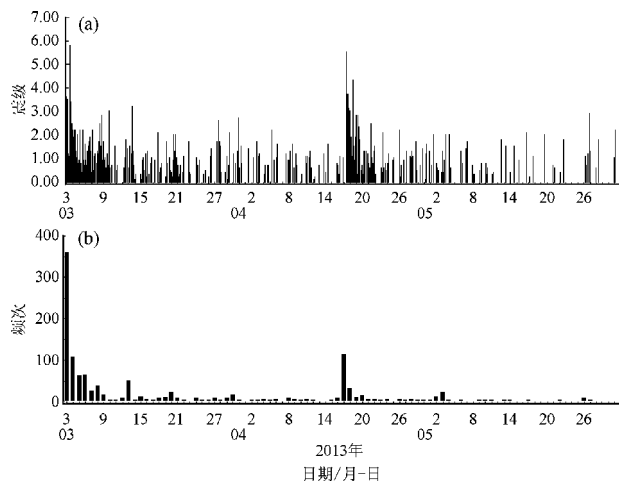


图 1 2013 年洱源地震序列  $M_L \geq 0$  地震  $M-t$  图 (a),  $N-t$  图 (b)

Fig. 1  $M-t$  diagram (a) and  $N-t$  diagram (b) for Eryuan  $M_L \geq 0$  earthquake sequence in 2013

## 2 资料与速度模型选取

### 2.1 资料选取

由于受台阵观测资料的限制, 本文仅选取了 2013 年 3 月 3 日至 4 月 30 日发生的 298 次  $M_L \geq 1.0$  交切地震进行重新定位, 其中,  $M_L 1.0 \sim M_L 1.9$  地震 227 次,  $M_L 2.0 \sim M_L 2.9$  地震 58 次,  $M_L 3.0 \sim M_L 3.9$  地震 10 次,  $M_L 4.0 \sim M_L 4.9$  地震 1 次,  $M_L 5.0 \sim M_L 5.9$  地震 2 次。重新定位所用台站的震中距均在 300 km 以内 (图 2), 其中, 云南地震台网固定台站 32 个, 震中距最小的是 EYA 台, 约为 30 km, 流动台阵 100 个, 震中距最小的是双涧台, 约为 15 km。

双差定位时, 需给定 P 波和 S 波的权重值。P 波震相为初至波, 读数精度较高, 而 S 波震相不易识别, 加之人为因素的影响, 使得其到时的读取精度比 P 波震相要低, 所以在实际操作过程中对 P 波和 S 波赋予不同的权重值。本文选取的震相均为 300 km 以内的近震震相, 数据相对可靠, 因此设定 P 波和 S 波的权重值分别为 1.0 和 0.8。在挑选地震时, 保证每个地震至少有 4 个震相记录, 地震对之间的最大距离为 10 km, 地震对使用的最大震

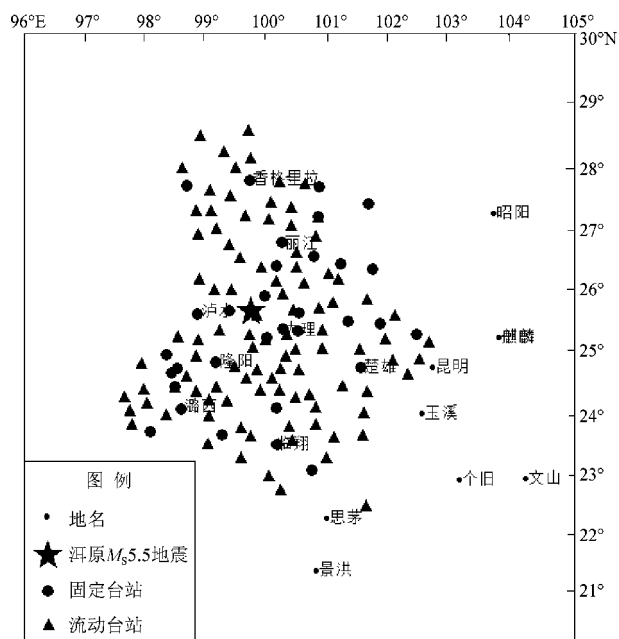


图 2 用于重新定位的震中距 300 km 以内地震台站分布

Fig. 2 Distribution of seismic stations with epicenter distance of  $\leq 300$  km for relocation

相对的数目为 20, 事件对与台站间的最大距离参数 (MAXDIST) 为 200 km。

### 2.2 速度模型

黄媛等 (2006) 认为双差定位虽然可以在一定程度上消除路径效应, 但仍需要可靠的速度结构作为参数。本研究所采用的分层速度模型参考了胡鸿翔等 (1986) 的爆破地震研究结果。该模型共分为 5 层, 各层速度如表 1 所示, 波速比  $V_p/V_s$  的值根据李永华等 (2009) 利用洱源台接收函数  $H-k$  方法得到的结果, 设为 1.75。

表 1 双差定位采用的速度模型

Tab. 1 The velocity model used in double-difference location

层序号	深度/km	P 波速度/ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	0.28	4.30
2	13.61	5.93
3	33.50	6.30
4	42.90	6.60
5	80.00	7.75

## 3 洱源序列定位结果

### 3.1 云南地震台网双差定位结果

计算时采用共轭梯度法求解方程, 并进行 2 轮

迭代, 第一轮 8 次迭代由地震的初始位置和先验权重开始, 第二轮的 7 次迭代采用标准差的 5 倍作为截断值, 通过反复迭代, 舍去残差大于截断值的震相数据, 并用上一次迭代的结果更新震源位置、残差和偏导数矩阵, 每次迭代得到的残差作为下一次迭代的加权函数, 直到得到稳定的解。

基于以上计算, 使用双差定位法对 298 次地震进行精确定位后, 得到了 263 次事件的定位结果, 为原始选取地震的 88%。图 3 为重新定位前后的地震震中分布图, 从图中可以看到, 该地震序列发生于维西—乔后断裂的左侧, 余震的分布整体沿 NNW 向展布, 与维西—乔后断裂的走向一致。重

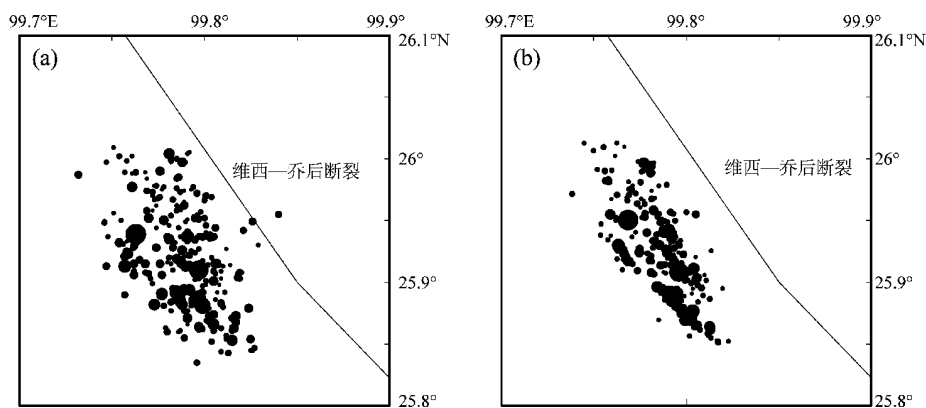


图 3 云南地震台网资料双差定位前 (a)、后 (b) 震中分布

Fig. 3 Epicenter distribution before (a) and after (b) double difference relocation by using data from Yunnan Seismic Network

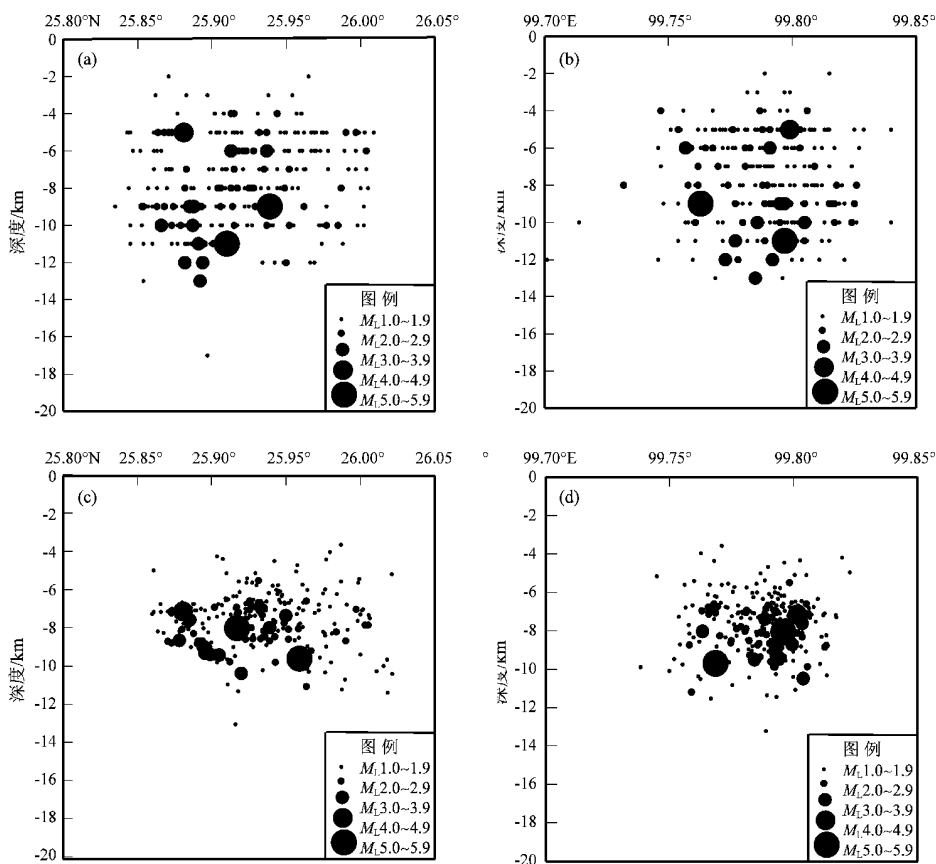


图 4 云南地震台网资料双差定位前 (a、b)、后 (c、d) 震源深度分别沿经纬度方向的投影

Fig. 4 The focal depth distribution along the latitude and longitude direction before (a, b) and after (c, d) double difference relocation by using data from Yunnan Seismic Network

新定位后, 外围地震向内收敛, 震中分布更加集中, 优势分布更为明显。

为分析地震深度分布情况, 将地震震源深度沿纬度和经度方向进行投影, 所得结果见图 4。其中图 4a、b 为云南地震台网原始定位震源深度分布, 图 4c、d 为双差定位后的震源深度分布。通过对比可以看出, 双差定位后地震震源深度明显收敛。为了更加清楚, 做了重新定位前后的地震震源深度分布直方图 (图 5)。从图 5a 中可以看出, 重新定位前, 震源深度分布较为零散, 分布在 2 ~ 14 km 的范围内, 以 5 ~ 12 km 最多, 而双差定位后, 深度集中分布在 6 ~ 10 km 范围内, 形成明显的优势分布层 (图 5b)。这与赵小艳和付虹 (2014) 的研究结果相同。

重新定位后, 走时残差均方根由原来的 0.21 s 降为 0.05 s, 震源位置的平均估算误差 (2 倍标准差) 在 EW 向为 0.262 km, NS 向为 0.294 km, UD 向为 0.375 km。图 6 为 EW 向、NS 向、UD 向误差统计结果, 90% 以上地震误差在 100 ~ 400 m。

### 3.2 流动台阵双差定位结果

三维速度模型下的双差定位方法数值实验显示, 台网布局、震相识别误差以及所使用的一维速度模型等因素均对双差定位结果有一定的影响; 另外, 双差定位方法所使用的初始地震目录对最终定位结果也有很大的影响 (闫俊岗等, 2013), 因此用密集台站得到的观测报告所给出的精定位结果应该比云南地震台网给出的结果可信度要高。“喜马拉雅计划”台阵探测项目在云南省地区布设的密

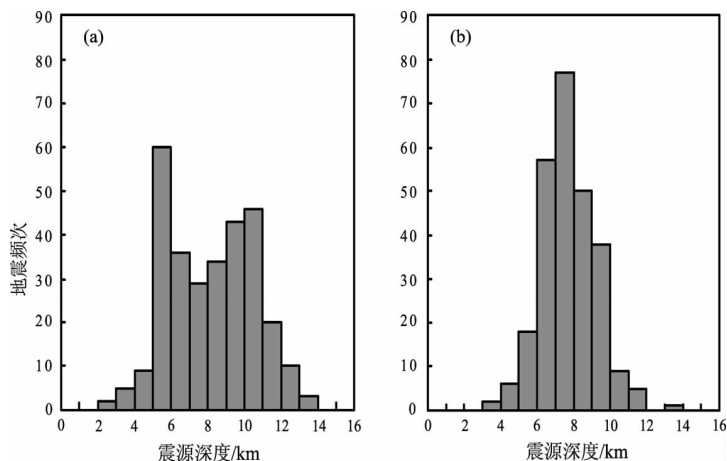


图 5 云南地震台网资料双差定位前 (a)、后 (b) 震源深度分布柱状图

Fig. 5 The histogram of focal depth before (a) and after (b) double - difference relocation by using data from Yunnan Seismic Network

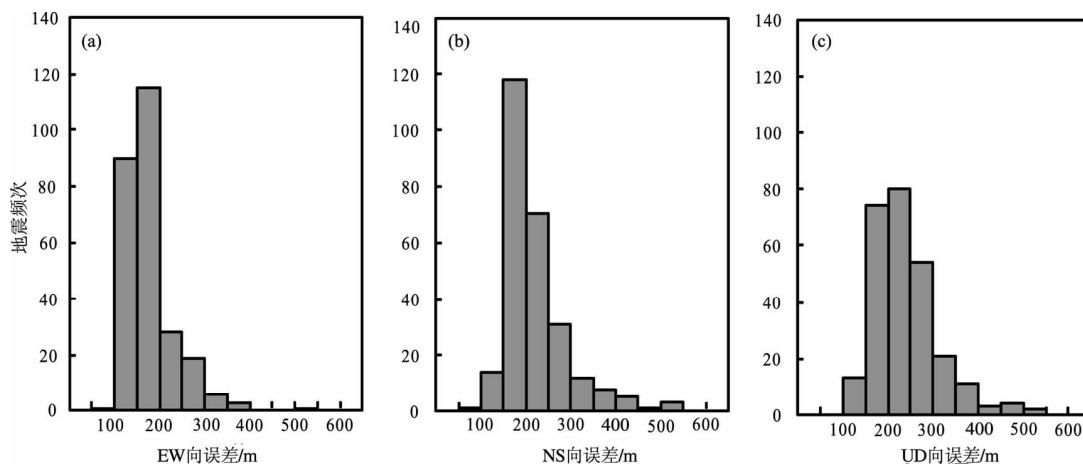


图 6 云南地震台网资料的双差定位结果误差统计

Fig. 6 Relocation error statistics of double - difference location result by using the data from Yunnan Seismic Network

集流动台站, 为 2013 年 3 月洱源地震序列的精确定位提供了重要条件, 也为深入研究该区域地震地质环境提供了可能。由于数据量大, 为了方便与台网定位结果进行比较, 所使用地震事件与台网精确定位所用事件相同。

计算时采用共轭梯度法求解方程, 进行 2 轮迭

代, 每轮进行 8 次, 直到得到稳定的解。通过计算最终得到了 280 次事件的定位结果, 为原始选取地震的 93.3%。图 7 为重新定位前后的地震震中分布图, 对比云南地震台网定位结果 (图 3) 可以看出, 两者得到的震中分布格局大致相同, 这说明云南地震台网初始定位结果是较为可靠的。

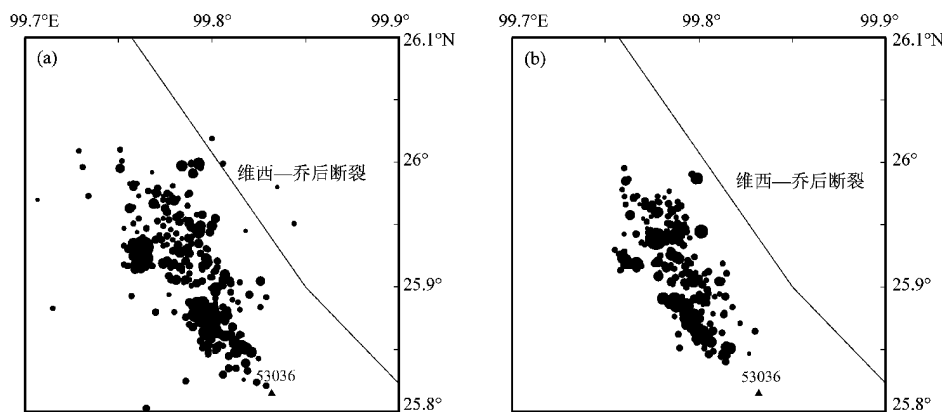


图 7 流动台阵资料双差定位前 (a)、后 (b) 震中分布

Fig. 7 Epicenter distribution before (a) and after (b) double-difference relocation by using data from flow temporary array

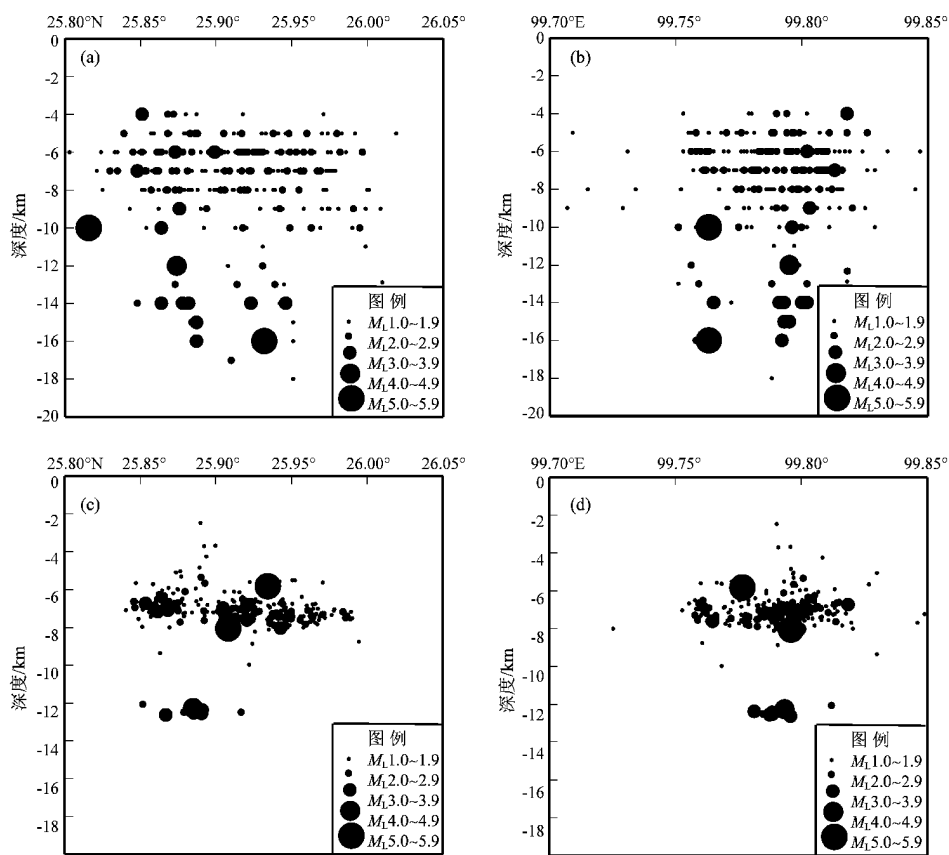


图 8 流动台阵资料双差定位前 (a、b)、后 (c、d) 深度分别沿经纬度方向的投影  
Fig. 8 The focal depth distribution along the latitude and longitude directions before (a, b) and after (c, d) double-difference relocation by using data from flow temporary array

将地震震源深度沿纬度和经度方向进行投影, 得到结果见图 8。作重新定位前后的地震震源深度分布直方图 (图 9), 从图 8、9 中可以看出, 重新定位前, 震源深度分散在 4~18 km, 主要分布在 5~11 km, 双差定位后, 深度明显收敛, 主要分布在 5~8 km, 其中以 6~8 km 最具优势。

重新定位后, 走时残差均方根由 0.197 s 降为 0.05 s, 震源位置的平均估算误差 (2 倍标准差) 在 EW 向为 0.226 km, NS 向为 0.236 km, UD 向为 0.24 km。图 10 为 EW 向、NS 向、UD 向误差统计结果, 可以看出 90% 以上地震误差分布在 150~300 m。

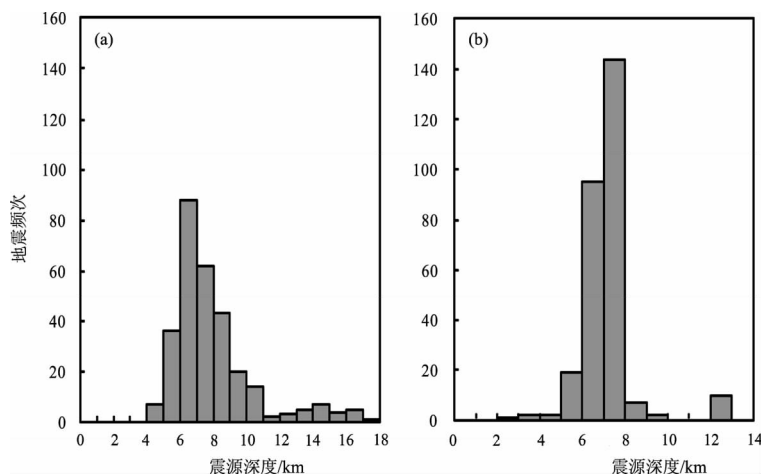


图 9 流动台阵资料双差定位前 (a)、后 (b) 震源深度分布柱状图

Fig. 9 The histogram of focal depth before (a) and after (b) double-difference relocation by using data of flow temporary array

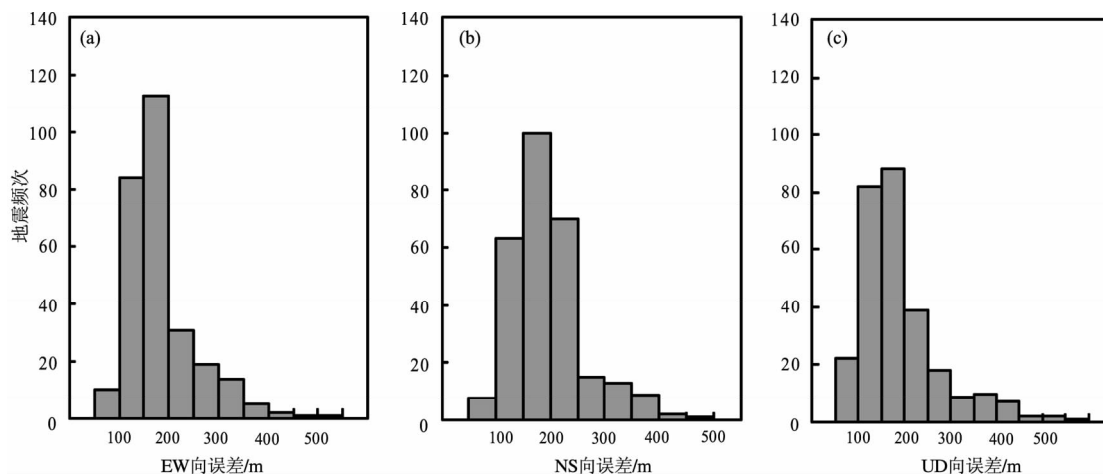


图 10 流动台阵资料的双差定位结果误差统计

Fig. 10 Relocation error statistics of double-difference location result by using the data of flow temporary array

### 3.3 结合波形互相关的双差定位结果

鉴于人工拾取到时震相比较多依赖于工作人员的经验, 难免会出现偏差甚至误标的情况, 通过波形互相关技术对 P 波震相到时进行校正, 可以获取更加准确的到时数据, 进而很大程度上解决传统方法中速度结构不够准确造成地震定位的矢量分散问题, 使定位精度高达几十米甚至几米, 因此在国内

外都得到了广泛的运用。如在对北加州 Hayward 断层区域的地震定位 (Waldhauser, Ellsworth, 2000), 对 2008 年汶川地震 (黄媛, 2006) 等研究中, 波形互相关方法都显示出其可行性和优越性。本文综合了前文中所使用的云南地震台网和流动台阵的波形数据, 并利用结合波形互相关的双差定位法对序列进行重新定位, 得到了 270 次事件的

定位结果，为原始选取地震的 90.6%（图 11）。重新定位后的序列 NNW 向优势分布明显，与维西—乔后断裂走向一致，分布特征与使用流动台阵数据得到的结果（图 7b）基本相同。

将地震震源深度沿纬度和经度方向进行投影，得到震源深度分布结果如图 12 所示，另作震源深度分布直方图（图 13）。从图 13 中可以看出重新定位后，地震震源深度主要分布在 6 ~ 10 km，其中又以

7 ~ 9 km 最为明显。

重新定位后，走时残差均方根由原来的 0.185 s 降为 0.043 s，震源位置的平均估算误差（2 倍标准差）在 EW 向为 0.118 km，NS 向为 0.141 km，UD 向为 0.214 km。图 10 为 EW 向，NS 向，UD 向误差统计结果，可以看出 EW 向，NS 向误差 85% 以上集中在 50 ~ 150 m，UD 向误差主要集中在 100 ~ 300 m。

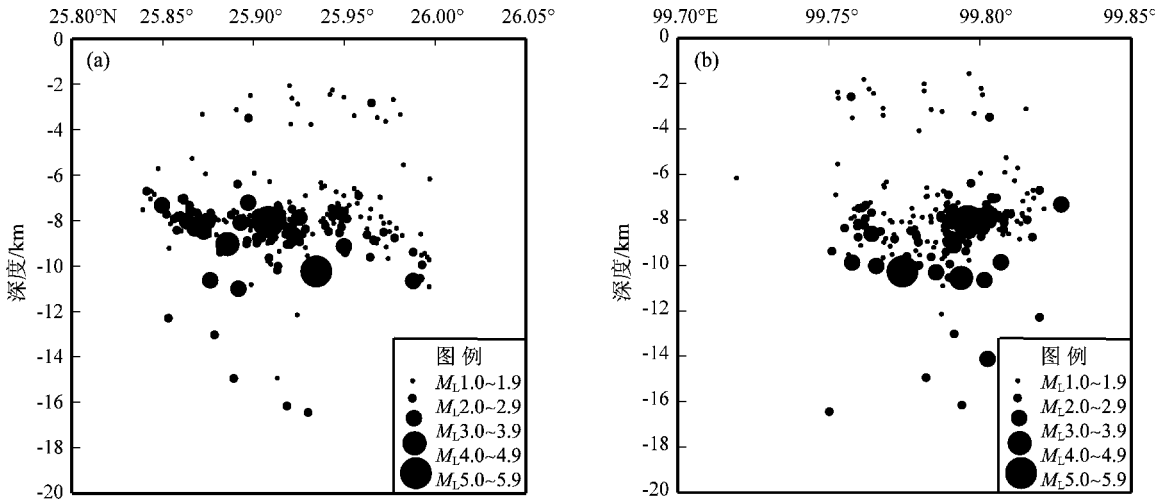


图 12 结合波形互相关双差定位的震源深度沿纬度 (a) 和经度 (b) 方向的投影  
Fig. 12 The focal depth projection along altitude (a) and longitude (b) by doubles difference method combined with waveform cross – correlation technique

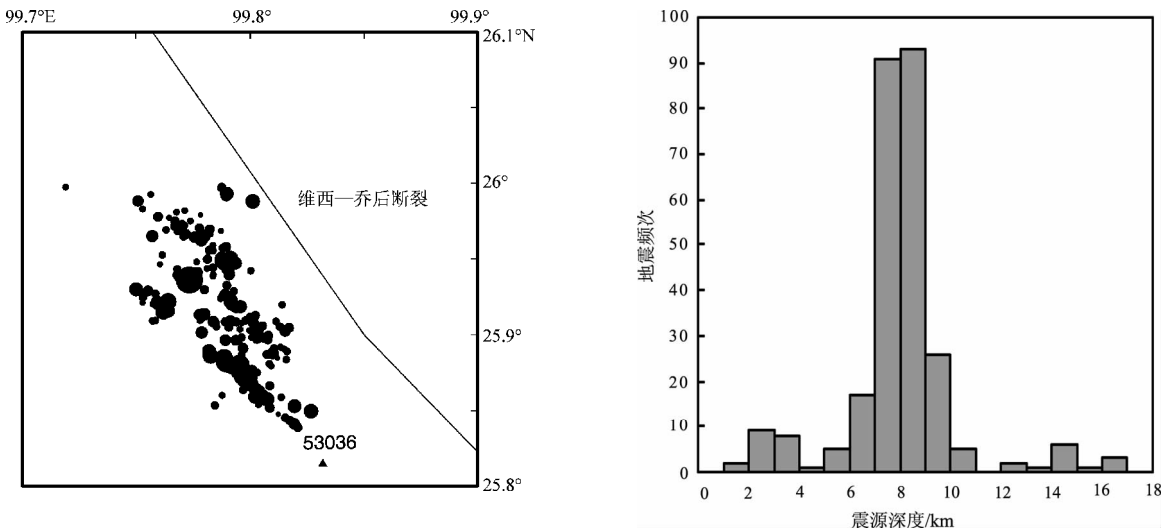


图 11 结合波形互相关双差定位的震中分布图  
Fig. 11 Epicenter distribution by using doubles difference method combined with waveform cross – correlation technique

图 13 结合波形互相关双差定位震源深度分布图  
Fig. 13 The focal depth distribution by using doubles difference method combined with waveform cross – correlation technique

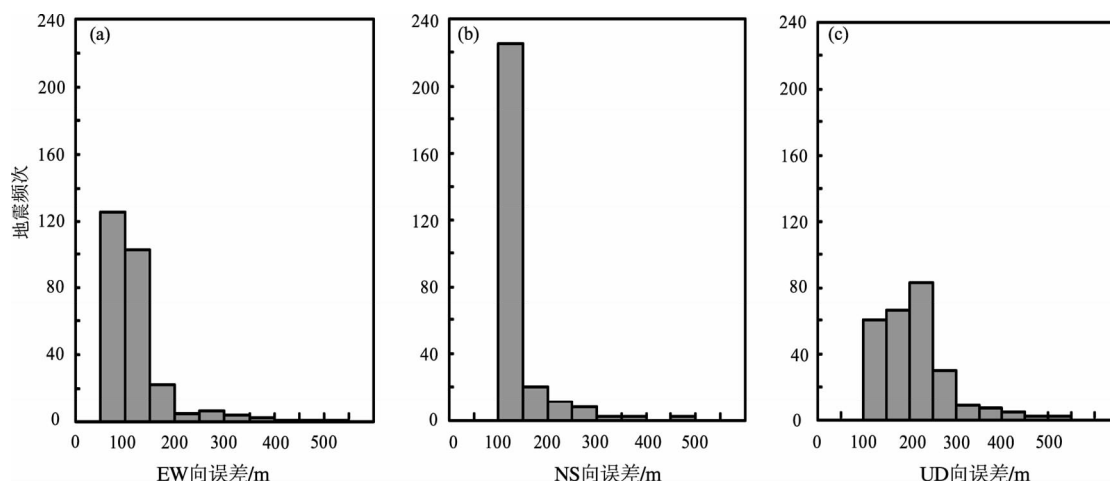


图 14 结合波形互相关的双差定位结果误差统计

Fig. 14 Relocation error statistics by using doubles difference method combined with waveform cross-correlation technique

## 4 结论和讨论

基于云南地震台网和流动台阵的资料,分3种情况对2013年洱源 $M_s5.5$ 地震序列进行了双差定位,结果显示:

(1) 重定位前后,在水平方向上地震均分布在维西—乔后断裂的左侧,且优势分布方向与维西—乔后断裂的走向一致,为NNW向。但用流动台阵资料进行双差定位并综合云南地震台网和流动台阵资料,结合波形互相关方法得到的震中分布相比仅用云南地震台网得到的震中分布更为集中,优势分布方向更明显。

(2) 对于相同的地震目录,用云南地震台网资料进行双差定位得到的定位事件是263个,为原始选取地震的88%;用流动台阵资料得到的定位事件是280次,为原始选取地震的93.3%;综合云南地震台网和流动台阵资料,并结合波形互相关双差定位法得到的定位事件是270次,为原始选取地震的90.6%。

(3) 震源深度投影显示,云南地震台网定位震源深度主要分布在6~10 km,流动台阵定位结果85%以上集中在6~8 km,结合波形互相关的双差定位法得到的震源深度主要是7~9 km,后两者的震源深度相对前者较浅,且更加集中。这说明近台记录参与联合反演更有利于震源深度的确定。

(4) 用云南地震台网资料进行双差定位,走时残差均方根由原来的0.21 s降为0.05 s,震源位

置平均估算误差在EW向、NS向、UD向分别为0.262 km、0.294 km、0.375 km,90%以上分布在100~400 m;用台阵资料进行双差定位,走时残差均方根由原来的0.197 s降为0.05 s,震源位置平均估算误差在EW向、NS向、UD向分别为0.226 km、0.236 km、0.24 km,90%以上分布在150~300 m;结合波形互相关双差定位法进行定位,走时残差均方根由原来的0.185 s降为0.043 s,震源位置平均估算误差在EW向、NS向、UD向分别为0.118 km、0.141 km、0.214 km,85%以上集中在50~150 m,UD向主要集中在100~300 m。第3种情况的定位误差相比前两种情况明显降低,说明定位效果最好。

综合以上分析认为:近台记录的增加,密集的台站分布,并结合波形互相关技术进行双差定位,得到的地震震中分布更为集中,优势方向更为明显,且测定误差无论在水平方向还是垂直方向都显著降低,这为提高该区震情的判断及掌握断层活动情况提供了基础。

感谢中国地震局地球物理研究所“中国地震科学探测台阵数据中心”为本研究提供地震波形数据。

## 参考文献:

- 陈翰林,赵翠萍,修济刚,等. 2009. 龙滩水库地震精定位及活动特征研究[J]. 地球物理学报, 52(8): 2035-2043.
- 房立华,吴建平,张天中,等. 2011. 2011年云南盈江 $M_s5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. 地震学报, 33(2): 262-267.



- 冯建刚. 2008. 利用双差地震定位法对民乐—山丹地震序列重新定位[J]. 西北地震学报, 30(1): 62–65.
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J]. 地球物理学报, 29(2): 133–144.
- 黄媛, 杨建思, 张天中. 2006. 2003 年新疆巴楚—伽师地震序列的双差法重新定位研究[J]. 地球物理学报, 49(1): 162–169.
- 李永华, 吴庆举, 田小波, 等. 2009. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 52(1): 67–80.
- 李志海, 赵翠萍, 王海涛, 等. 2004. 双差地震定位法在北天山地区地震精确定位中的初步应用[J]. 内陆地震, 18(2): 146–153.
- 刘文邦, 王培玲, 马玉虎, 等. 2011. 2009 年青海大柴旦 6.4 级地震序列的双差法重新定位研究[J]. 高原地震, 23(1): 24–26.
- 王小平, 王燕纹, 李慧民. 2005. 结合双差地震定位法及台阵技术对江苏张家港地震序列进行精确定位[J]. 内陆地震, 19(3): 258–264.
- 闫俊岗, 王利兵, 谭青. 2013. 初始震源深度对双差地震定位深度的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 33(增刊1): 41–44.
- 杨智娴, 陈运泰, 郑月军, 等. 2003. 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[J]. 中国科学: 地球科学, 33(B4): 129–134.
- 杨智娴, 陈运泰. 2004a. 用双差定位法再次精确测定 1998 年张北—尚义地震序列的震源参数[J]. 地震学报, 26(2): 115–119.
- 杨智娴, 于湘伟, 郑月军, 等. 2004b. 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.
- 赵小艳, 付虹. 2014. 2013 年洱源  $M_s5.5$  和  $M_s5.0$  地震发震构造识别[J]. 地震学报, 36(4): 640–650.
- 朱艾澜, 徐锡伟, 刁桂苓, 等. 2008. 汶川  $M_s8.0$  地震部分余震重新定位及地震构造初步分析[J]. 地震地质, 30(3): 759–768.
- Okada T, Hasegawa A, Suganomata J, *et al.* 2005. Aftershock distribution and 3D seismic velocity structure in and around the focal area of the 2004 mid Niigata prefecture earthquake obtained by applying double-difference tomography to dense temporary seismic network data[J]. Earth Planet Space, 57(5): 435–440.
- 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 Am, 90(6): 1353–1368.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2002. Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake location[J]. J Geophys Res, 107: 1–15.
- Waldhauser F, Schaff D, Richards P G, *et al.* 2004. Lop Nor revisited: Nuclear explosion locations, 1976–1996 from double-difference analysis of regional and teleseismic data[J]. Bull Seism Soc Am, 94: 1879–1889a.
- Waldhauser F. 2001. HypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations[R]. US Geological Survey Open-file Report, 113.

## Comparison of Locations Results for the 2013 Yunnan Eryuan $M_s5.5$ Earthquake Sequence from Different Seismic Networks

LI Tao<sup>1</sup>, FU Hong<sup>1</sup>, JIANG Jinzhong<sup>1</sup>, XU Xingqian<sup>2</sup>

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, Yunnan, China)

### Abstract

Based on data recorded by Yunnan Seismic Network and temporary array of Himalaya Plan Array Detection Project, we relocated the 2013 Eryuan  $M_s5.5$  earthquake sequence for three situations by using double-difference earthquake location method, such as only using data recorded by Yunnan Seismic Network and temporary array of Himalaya Plan Array Detection Project, and using data of two networks combined with waveform cross-correlation. The results show that, in horizontal direction, the dominant direction of epicenter distribution for three situations is the same, and all of them are consistent with the NNW strike orientation of Weixi-Qiaohou fault, but the location results of the two later situations are more concentrated and the ribbon distribution are more pronounced. In the vertical direction, the depth for the two later situations is shallower than that which are calculated using data of permanent networks only. The residual errors of E-W, N-S and U-D for the third situation are minimal. It means that the measurement deviations of earthquake locations are reduced obviously owing to the larger density and more reasonable layout of stations, and the location results are more concentrated in both horizontal and vertical directions.

**Keywords:** double-difference earthquake location; waveform cross-correlation; Yunnan Seismic Network; temporary array; Eryuan earthquake sequence