

# 2015年云南沧源 $M_s$ 5.5 地震序列 分布与演化特征\*

徐甫坤, 刘自凤, 孙楠, 和嘉吉, 赵小艳

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 利用云南测震台网波形数据及观测报告, 结合构造背景及历史地震活动, 从序列活动特征及参数、较大地震的震源机制解及序列精定位等方面分析了2015年3月1日云南沧源  $M_s$  5.5 地震序列的发震构造及序列分布演化特征。结合震源机制解结果及震区构造, 本次地震的发震构造可能为南汀河断裂带(西支)、呈左旋走滑。本次地震的余震活动较弱, 序列随时间衰减较快, 具有明显的阶段性; 双差重定位结果反映其主体破裂区为北北东向、近似竖直的带状区域, 可能为单侧破裂, 且后期的余震呈向浅部及外围区域扩散的趋势。

**关键词:** 云南沧源  $M_s$  5.5 地震; 双差重定位; 南汀河断裂带(西支); 地震序列; 发震构造

**中图分类号:** P315.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)03-0333-08

## 0 引言

据中国地震台网中心测定, 北京时间2015年3月1日18时24分40秒, 云南省临沧市沧源佤族自治县发生  $M_s$  5.5 地震, 微观震中位于  $23.5^\circ\text{N}$ ,  $98.9^\circ\text{E}$ , 震源深度11 km。震后灾害调查结果显示此次地震极震区烈度为 VII 度, 为一次中等强度地震。地震发生后, 正确的震后序列趋势估计及强余震预测尤为重要, 不仅有助于开展地震应急救援、抗震救灾及灾后恢复重建工作的今早开展, 而且对于维护社会生活稳定具有重要意义(赵小艳等, 2014)。

本次地震发生于滇西南地区的中缅边境线附近、南汀河断裂带(西支)上(中国地震局地质研究所, 2015)<sup>①</sup>, 根据历史地震记录(中国地震局监测预报司, 2010), 南汀河断裂带(西支)上的历史地震活动水平较弱, 本次地震为此背景下的一次显著地震事件, 对其序列分布及演化特征的分析及总结显得尤为重要。

地震发生后, 云南省地震局现场工作队在震区布设了由3套数字地震仪组成的小孔径流动数字台网, 并于3月2日18时56分开始并入原有的云

南测震台网参与定位, 提高了现有台网分布对震区的小震监测能力, 为科学研究提供了丰富的地震数据。本文利用该台网记录产出的相关数据, 结合震区的构造背景及历史地震活动情况, 从地震序列活动特征、序列参数、震源机制解及序列空间分布等方面总结了分析本次地震的序列分布及演化特征, 以期能对震后趋势估计及强余震预测提供科学依据。

## 1 地震活动概况

从地震所属的背景构造上, 云南沧源  $M_s$  5.5 地震位于南汀河断裂带(西支)附近(中国地震局地质研究所, 2015)。微观震中位于沧源县芒卡镇, 地表灾害调查显示的极震区烈度为 VII 度, 北东走向, 烈度区由芒卡镇往近北东向延伸至耿马县孟定镇, 宏观震中位于孟定镇<sup>①</sup>。震区地质构造较复杂, 主要发育 NE 向、NW 向及近 NNE 向3组断裂, 其中与本次地震空间位置关系密切的主要断裂是 NE 向南汀河断裂带(图1)。

南汀河断裂带总体走向 NE, 由东、西两支断裂组成<sup>①</sup>。① 西支断裂: 北东端起自云县北东的澜沧江大拐弯附近, 往南西经云县盆地, 至勐旨后

\* 收稿日期: 2015-03-25.

基金项目: 前震识别技术研究(2014020101)及云南省地震局科技人员传帮带项目联合资助。

① 云南省地震局. 2015年3月1日云南沧源 5.5 级地震灾害直接经济损失评估报告(中国灾区)。

沿南汀河延展，于孟定西南沿清水河延伸进入缅甸（王晋南等，2006），走向 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，中国境内长约210 km，②东支断裂：北东端在云县盆地北部的路边田附近交于西支断裂，向南西经幸福、勐永、勐撒、耿马东南侧延伸，至沧源西南延入缅甸，总体走向 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，中国境内长约180 km。

南汀河断裂带（西支）距离本次地震较近，在航、卫片上线性影像十分清晰，沿断裂发育宽达数十至上百米的断层破碎带。断裂沿线断错水系、断错山脊、断错陡坎、洪积扇变形及错位、古地震遗迹等反映断裂新活动的地貌十分发育，反映其第四纪以来的活动十分强烈、以左旋水平运动为主，兼有垂直差异活动。位于断裂南东侧的大寨断裂最大左旋水平错动幅度达3.6 km，其平均速率达 $2.7\text{ mm/a}$ <sup>①</sup>，该段于1941年曾发生耿马、大寨7.0级地震。

据古地震考察，在南汀河断裂带上的云县朱

家村发现全新世以来3次古地震，属破坏性强震，推测震级达7级，其发震时间距今大致5 000 ~ 1 000 a（毛玉平等，1991，杨继登等，1999）。Tapponnier等（2001）认为在红河断裂以西，南汀河断裂带自澜沧江断裂起沿南西方向延伸进入缅甸，尤其西支断裂由北东向逐渐转为近东西向并一直延伸至实皆断裂附近，为一条规模较大的活动断裂。在川滇地区的地块划分中，南汀河断裂带为临沧地块及保山地块两个Ⅱ级地块间的边界断裂（向宏发等，2000；杨婷等，2014）；而按照张培震等（2003）及张国民等（2004，2005）的中国大陆地区活动块体划分，红河断裂以西至缅甸弧区域可划分为滇西块体及滇南块体两个Ⅱ级块体，南汀河断裂带与二者边界缝合带（图1）呈近似正交展布。这些迹象表明，南汀河断裂带可能对附近地区的构造活动起主控作用。

从历史地震活动情况看（图2），震中所在的南汀河断裂带（西支）历史地震活动水平较弱，但附近地区的其他断裂上历史地震活动水平相对较高。

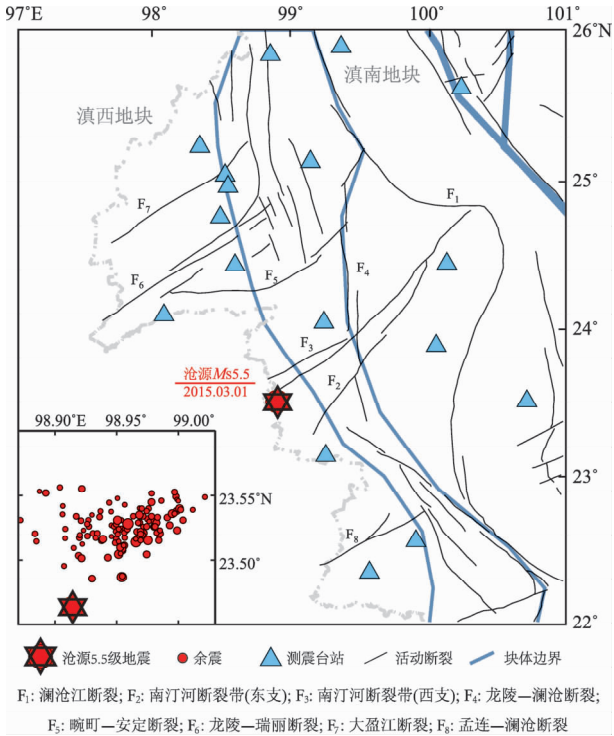


图1 2015年3月1日云南沧源 $M_s5.5$ 地震序列震中与云南测震台网的台站分布

Fig. 1 Distribution of epicentres of Yunnan Cangyuan  $M_s5.5$  earthquake sequence on Mar. 1, 2015, and the stations of Yunnan seismic network

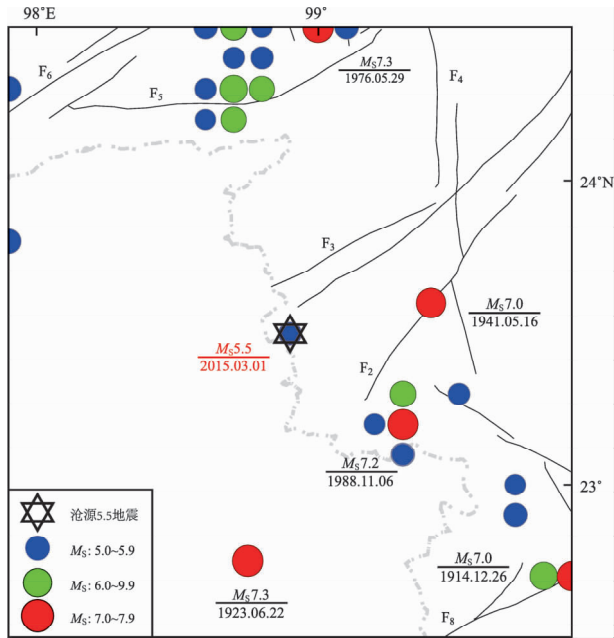


图2 云南沧源 $M_s5.5$ 地震震中附近 $1^{\circ}$ 范围历史地震分布

Fig. 2 Distribution of historical earthquakes in  $1^{\circ}$  area of Yunnan Cangyuan  $M_s5.5$  earthquake

① 云南省地震局. 2015. 2015年3月1日云南沧源5.5级地震灾害直接经济损失评估报告（中国灾区）。

根据中国地震目录（中国地震局监测预报司，2010），自有历史地震记载以来，震中周围  $1.0^\circ$  范围内共记录到 5 级以上地震 37 次，其中 5.0 ~ 5.9 级 25 次、6.0 ~ 6.9 级 7 次、7.0 级以上地震 5 次，这 5 次 7 级地震分别是 1923 年 6 月 22 日缅甸 7.3 级、1941 年 5 月 16 日耿马 7.0 级、1941 年 12 月 26 日澜沧 7.0 级、1976 年 5 月 29 日龙陵 7.3 级及 1988 年 11 月 6 日澜沧—耿马 7.2 级地震。本次地震为南汀河断裂带（西支）在较弱活动背景下的一次显著地震。

2 地震序列活动分析

据云南地震台网测定，截至 2015 年 3 月 6 日 24 时，沧源  $M_s5.5$  地震序列共发生  $M_L \geq 1.0$  地震 132 次，其中 1.0 ~ 1.9 级 97 次，2.0 ~ 2.9 级 27 次，3.0 ~ 3.9 级 4 次，4.0 ~ 5.0 级 3 次，最大余震为 3 月 3 日  $M_s4.5$  地震，其中  $M_L \geq 3.0$  地震序列目录列于表 1。

表 1 地震序列中  $M_L \geq 3.0$  地震目录  
Tab. 1 Catalog of  $M_L \geq 3.0$  earthquakes in sequence

编号	发震时刻		震中位置		深度 /km	震级		地点
	年-月-日	时:分:秒	$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$		$M_L$	$M_s$	
1	2015-03-01	18:24:40	98.91	23.46	5	—	5.8	沧源
2	2015-03-01	18:34:15	98.95	23.49	5	4.1	3.5	耿马
3	2015-03-01	18:36:02	98.99	23.52	17	3.0	2.3	耿马
4	2015-03-01	18:46:28	98.95	23.50	28	3.3	2.6	耿马
5	2015-03-01	20:36:52	98.97	23.51	9	4.5	4.0	耿马
6	2015-03-01	20:37:26	98.98	23.51	9	3.5	2.8	耿马
7	2015-03-02	09:01:13	98.95	23.53	24	3.1	2.4	耿马
8	2015-03-03	17:23:52	98.96	23.53	10	5.0	4.5	耿马

由沧源  $M_s5.5$  地震序列的  $M-t$  图（图 3）可见，余震活动大致可划分为如下几个时段：（1）主震发生后 2 小时内为强余震活动时段，共发生 5 次  $M_L \geq 3.0$  地震；（2）其后为余震波动起伏阶段，接着出现 2 级左右小震的起伏活动；（3）强余震事件，自小震起伏活动后，3 月 3 日发生  $M_s4.5$ （ $M_L5.0$ ）强余震，该地震后至 3 月 4 日之间，存在 1、2 级的小震集中活跃现象，可能为该强余震

后的调整阶段；（4）余震衰减阶段，3 月 4 ~ 6 日的序列以 1、2 级地震起伏活动为主，总体来说余震强度不断降低。该序列地震活动整体表现为局部小震强弱交替、而整体强度及频度均逐渐降低的衰减趋势。

$b$  值和  $p$  值为描述地震序列的两个基本参数，描述了地震序列活动的基本性质（吴开统等，1990），其中  $b$  值为古登堡—里克特（G-R）关系

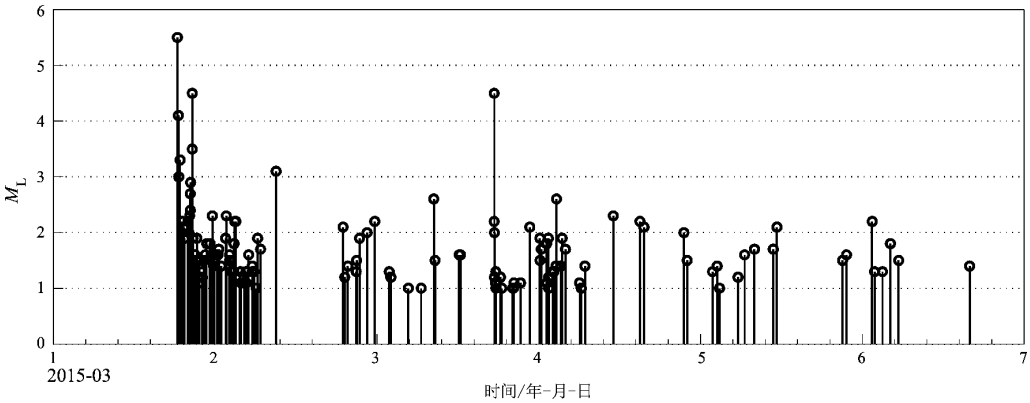


图 3 云南沧源  $M_s5.5$  地震序列  $M-t$  图（除  $M_s5.5$  主震外均为  $M_L$  震级）  
Fig. 3  $M-t$  diagram of the Yunnan Cangyuan  $M_s5.5$  earthquake sequences  
(the magnitudes are  $M_L$  except the  $M_s5.5$  mainshock)

中的系数,描述不同震级地震的相对比例, $p$  值为大森-宇津公式的系数,描述序列的衰减速率。使用 3 月 1 日至 3 月 6 日 24 时的地震目录,设定最小计算震级为  $M_L1.2$ ,使用 ZMAP 软件包 (Wiemer, 2001) 计算序列参数,用最大似然法计算得到序列  $b$  值为 0.61 (图 4a), $p$  值拟合结果为 0.82 (图 4b)。李忠华等 (2000) 使用 1965 ~ 2000 年的震例进行统计,发现云南地区的地震序列的  $p$  值及  $b$  值空间分布存在区域性,在本次地震附近地区的震例的  $p$  值约为 0.89, $b$  值约为 0.65。相对附近区

域的震例,沧源  $M_s5.5$  地震序列目前小震数量偏少,衰减偏慢。

总体来看,云南沧源  $M_s5.5$  地震的余震活动较弱、频度偏低,且序列衰减较快,并存在明显的地震平静时段;另外,本次地震序列还存在一个显著特征,序列中  $M_L\leq 3.5$  的小震数量明显偏少,与 G-R 关系存在偏离 (图 4a)。由于南汀河断裂带 (西支) 在震中附近历史地震活动较弱,难以做历史震例类比,但这种现象无疑是值得关注的。

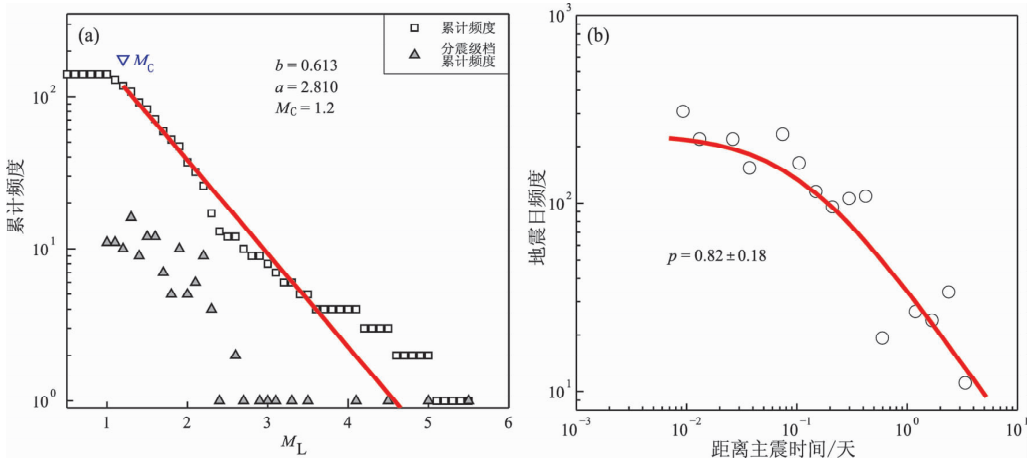


图 4 云南沧源  $M_s5.5$  地震序列  $b$  值 (a) 和  $p$  值 (b)

Fig. 4 Parameters of  $b$  value (a) and  $p$  value (b) of Yunnan Cangyuan  $M_s5.5$  earthquake sequence

3 较大地震震源机制解分析

利用云南数字地震台网记录到的事件波形数据,中国地震局滇西地震预报实验场 (以下简称实验场) 采用 CAP 方法求解得到了沧源  $M_s5.5$  地震主震及其 3 次  $M_s\geq 3.0$  余震震源机制结果<sup>①</sup> (表 2)

(中国地震局地球物理研究所, 2015), 其中 3 次地震为走滑型 (P 轴俯角和 T 轴俯角均小于  $45^\circ$  定义为走滑型, P 轴俯角大于  $45^\circ$  定义为正断型, T 轴俯角大于  $45^\circ$  定义为逆断型), 1 次为正断兼走滑型 (3 月 1 日  $M_s4.0$ )。

该序列余震活动较弱,截止 3 月 9 日 24 时仅发生  $M_s3.0\sim 3.9$  余震 1 次、 $M_s4.0\sim 4.9$  余震 2 次,

表 2 序列中较大地震的震源机制解

Tab. 2 Focal mechanism solutions with large magnituae of the events in sequence

地震事件			节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		结果 <sup>①</sup>
年-月-日	时:分:秒	震级	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	俯角	方位	俯角	
2015-03-01	18:24:40	$M_s5.5$	333	81	159	66	69	10	21	8	288	21	实验场
			69	67	15	33	76	156	20	5	288	25	地球所
2015-03-01	18:34:15	$M_s3.5$	323	74	156	60	67	17	13	5	280	28	实验场
2015-03-01	20:36:52	$M_s4.0$	157	53	-152	50	68	-40	8	43	107	9	实验场
2015-03-03	17:23:53	$M_s4.5$	55	90	-26	145	64	180	7	18	103	18	实验场

①金明培. 2015. 2015 年 3 月 3 日云南沧源  $M_s5.5$  地震震源机制解.

3 次余震中有 1 次（3 月 1 日  $M_s4.0$ ）地震的震源机制为正断兼走滑型，与主震震源机制解差异较大，可能反映出该地震附近区域的拉张分量有所增强，但 3 月 3 日  $M_s4.5$  余震的震源机制与主震又较为一致，震源机制的变化表明区域应力局部有所调整。

结合主压应力轴 P 轴和张应力轴 T 轴方位角玫瑰图（图 5），序列的压应力主轴 P 轴和张应力主轴 T 轴方位角优势分布方向整体较为集中，表明整个区域总体来看依然受控于北北东向挤压、北西西向拉张区域应力作用。

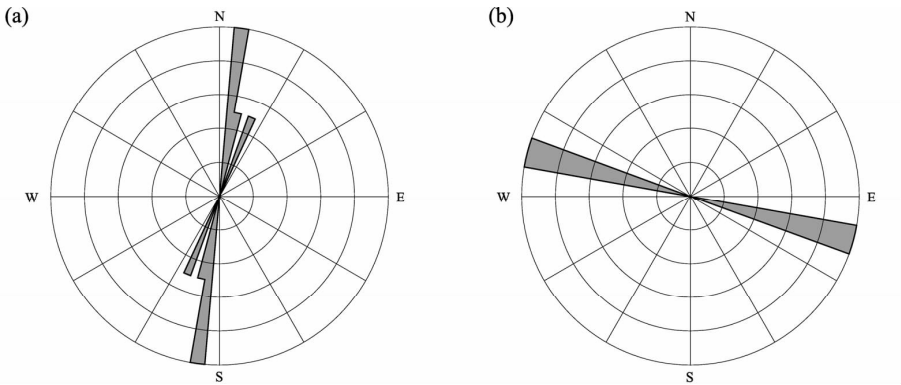


图 5 震源机制解 P (a)、T (b) 轴方位角玫瑰图  
Fig. 5 Rose graphs of azimuths of P (a) and T (b) axis in focal mechanisms

4 双差重定位结果分析

双差重定位方法（Waldhauser, Ellsworth, 2000, 2002）是一种针对丛集地震的相对定位方法，经过重定位后，地震间的相对位置具有较好的空间分布特征，可以更好的反映地震破裂区的几何形态，描述发震构造的特征，已在地震序列的重定位中得到广泛应用（黄媛等，2008；Fang *et al.* 2013；房立华等，2015；王未来等，2014；张广伟等，2014）。本文利用云南数字地震台网的震相报告，采用双差重定位方法对沧源  $M_s5.5$  地震序列进行了重定位，以分析序列的时空演化特征。

考虑到双差重定位方法是一种相对定位方法，对地震的绝对位置不敏感，定位的结果可能出现整体性的位置偏移（房立华等，2011），为探讨地震序列与背景构造的位置关系，还需要准确的参考地震位置。本文利用云南测震台网提供的波形数据及观测报告，利用震中 300 km 范围内台站的震相记录、在 MSDP 定位软件中采用 LOC3D（川滇三维速度模型）对沧源  $M_s5.5$  地震进行了重新定位。然后根据主震重新定位的结果与观测报告中主震震中位置的差异，对区域地震台网的所有地震定位结果进行了整体性的平移。重新测定后的主震发震时刻为 2015 年 3 月 1 日 16 时 24 分 39.22 秒，震中为 (98.951°E,

23.515°N)，深度 19.1 km，水平及垂直定位误差分别为 1.0 km 和 1.4 km。

水平分层速度模型对重定位结果亦存在较大影响（Waldhauser, Ellsworth, 2000），为对本次地震序列进行重定位，确定合适的速度结构尤为重要。人工地震测深方法（DSS）能给出较精确的速度结构，但由于 DSS 剖面据震中较远，本文使用的速度模型参考了胥颐等（2013）的层析成像结果建立，模型共分 8 层，每层的顶界面深度依次为 0、2、7、14、19、25、32 和 40 km，对应的层速度 5.4、5.6、5.8、6.0、6.2、6.4、6.6 及 7.2 km/s，波速比设定为 1.73。

挑选参与计算的事件时按照以下原则：要求参与定位的台站不少于 4 个、震中距在 200 km 内，且每个事件的震相数不少于 6 个。使用到的台站包含云南数字地震台网、流动台网（包括 2014 年 10 月 7 日景谷 6.6 级地震、2014 年 5 月 24 日盈江 5.6、5 月 30 日盈江 6.1 级地震以及本次地震后布设的流动台）、洛扎渡水库台网以及腾冲火山台网共 26 个台网参与定位（图 6），尤其本次地震后架设的 L5311、L5312 及 L5313 等 3 个流动台有效地改善了台网对震区的小震监测能力及对震源深度的约束作用。共挑选出 2015 年 3 月 1 日至 3 月 9 日的 114 个事件参与重定位计算（图 6a 左下角图框所示），其中包含 975 条 P 波及 900 条 S 波到时

数据 (图 6b)。

重定位后共得到 88 次地震的重定位结果如图 7 所示, 图中的六角形和圆圈分别表示重定位后的主震和余震序列。水平及深度定位误差由初始的 4.0 km 及 5.2 km 下降至 0.27 km 及 0.35 km, 时间误差由 1.4 s 降至 0.09 s, 定位精度有明显改善。

由水平面投影看 (图 7a), 序列优势分布方向为 NEE 向, 呈带状分布。按序列分布的优势方向, 分别选取参考长轴方向 AA' 和短轴方向 BB', 序列沿长轴方向展布约 10 km, 短轴方向展布宽度约 3 km。另外, 余震主体分布在  $M_s5.5$  主震的北东侧区域, 显示该地震可能为单侧破裂。

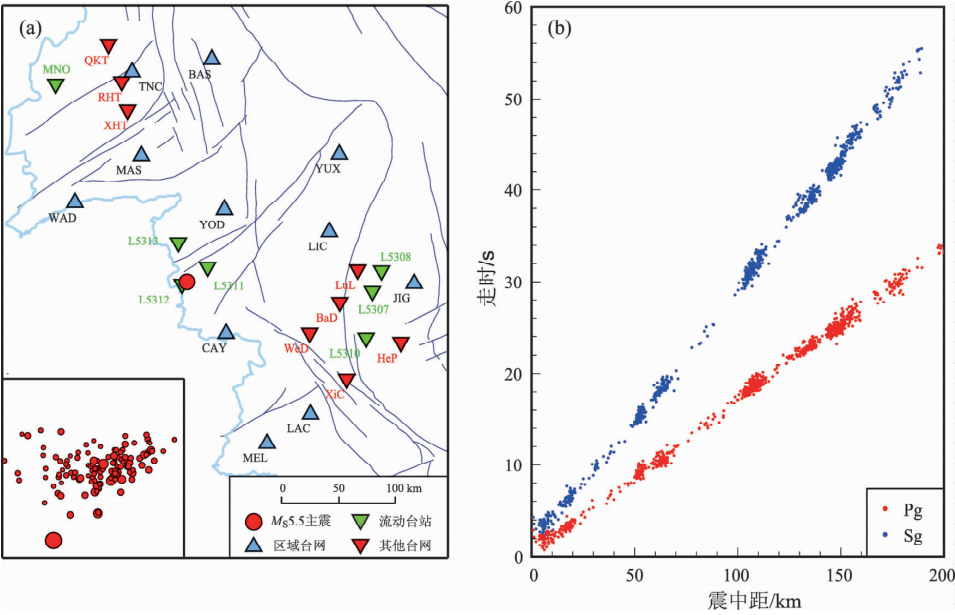


图 6 重定位使用的数据: (a) 台站及地震序列 (左下角) 分布; (b) Pg、Sg 波震相走时  
Fig. 6 Data used in relocation, (a) the distribution of stations and seismic sequences (the left-bottom corner); (b) traveling time curves of Pg and Sg wave

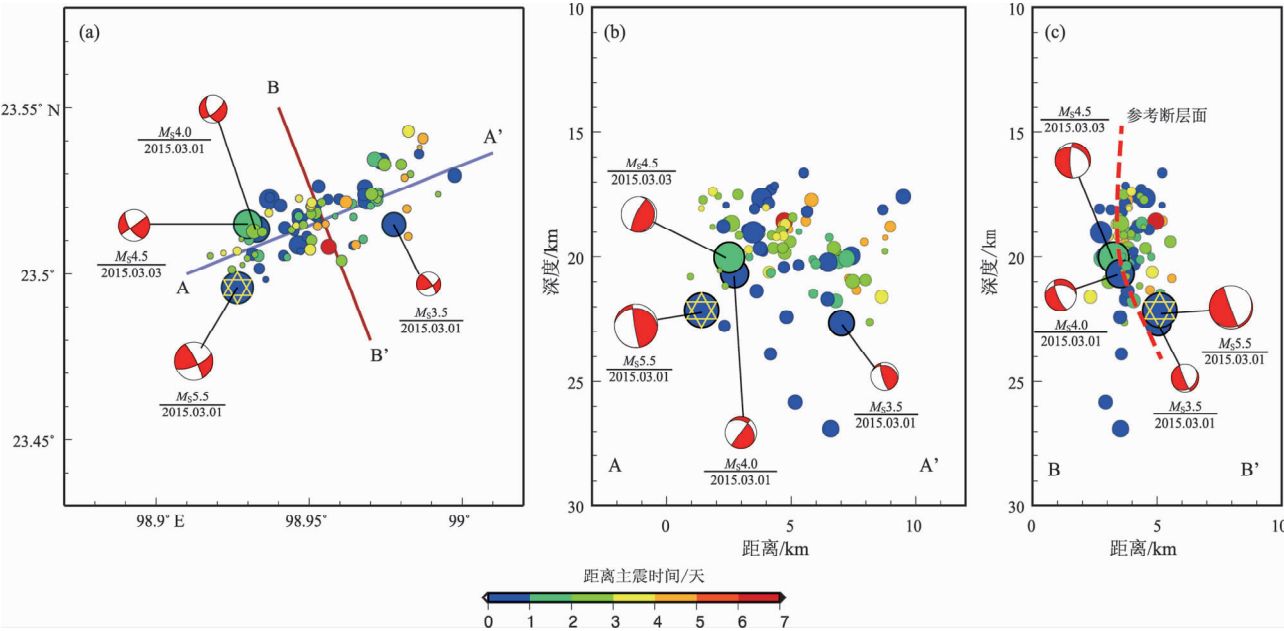


图 7 重定位结果及震源机制解在水平面 (a)、AA' 方向 (b) 及 BB' 方向 (c) 上的投影  
Fig. 7 The distribution of sequences after relocation and the projection of focal mechanisms on horizontal distribution (a), along AA' (b) and BB' (c)



从深度剖面看（图 7b、c），余震的震源深度具有一定的集中性，主震处于序列分布的中下部位置，尤其较大的余震主要集中在主震震源深度附近；序列呈近似竖直状的带状分布特征明显，显示地震主体破裂区应为北北东向近似竖直的带状区域。

为与震源机制解结果对比分析，在重定位后的余震分布图（图 7）中还将 4 次  $M_s \geq 3.0$  地震的震源机制解（表 2，实验场结果）画出，并在两个参考方向的深度剖面上做了相应的投影。可见震源机制解的北东东向节面走向与序列优势分布方向基本相同（图 7a），而在深度剖面上投影后亦与序列在深度剖面上的投影相一致（图 7b、c），说明震源机制解与序列的空间分布较为一致，结合二者可以推测出与主体破裂区相应的断层面。图 7c 中描出了参考断层面在深度上的可能结构，断层面整体为近似竖直向，但由深部的地震的节面走向反映断层面在深部具有一定的倾角。

从余震分布的时间演化上，震后一天的余震分布较为分散，迅速勾勒出主体破裂区域，且在主震的上部及下部均有余震分布，但大体集中在主震附近。后期的余震维持与序列早期相同的格局，但具有明显的向外围地区扩散的趋势：一方面，在东北（A'）区域的小震活动增多，且集中在之前未破裂过的空段上（图 7），从 AA' 深度剖面看，可以发现后期的小震震源深度集中在 3 月 3 日  $M_s4.5$  地震附近，并在空间上与其存在一定的连续性（图 7b）；另一方面，其震源深度也明

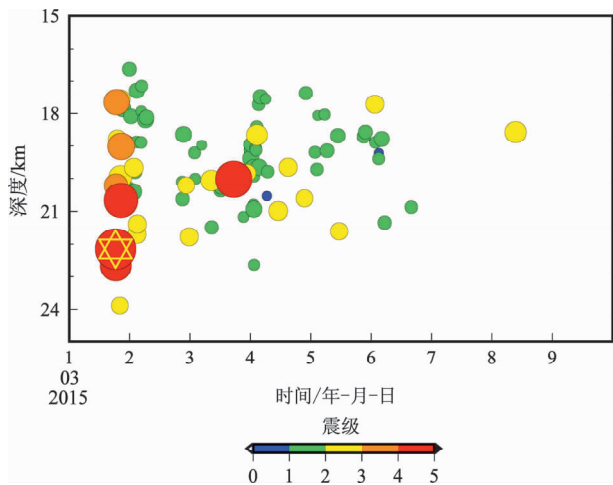


图 8 震源深度随时间的演化

Fig. 8 The temporal variations of the focal depth of sequence

显变浅，主震附近的小震活动变少，3 月 4 日以后的小震深度集中在序列的浅部（图 8）。

综合双差重定位结果与震源机制解，虽重定位后的序列分布与初始目录存在较大差异，但从结合深度剖面的投影看，结合震源机制解能更好地反映出本次地震的破裂特征，结合序列空间分布及震源机制解节面走向，显示本次地震的发震构造面可能为北北东向近似竖直的带状区域，呈左旋走滑特性。

5 讨论与结论

本文利用 2015 年 3 月 1 日云南沧源  $M_s5.5$  地震后至 3 月 9 日间的波形数据及震相报告，结合构造背景及历史地震活动，从序列活动特征及参数、较大地震的震源机制解及序列精定位等方面阐述了本次地震序列跟踪过程中的相关问题，讨论了本次地震的发震构造及序列可能的类型，获得如下认识：

（1）台网定位结果误差较大，这可能与近震台站分布较少有关，但震后架设的流动台明显改善了对余震定位尤其是震源深度的约束，且经过双差重定位后定位精度有明显改善。序列的空间分布显示该地震的主体破裂区可能为北北东向、近似竖直的带状区域，且余震集中分布在主震的东北侧区域，显示可能为单侧破裂模式。

（2）结合较大地震的震源机制解、序列精定位结果及构造背景，本次地震的发震构造可能为南汀河断裂带（西支），发震构造面为近北北东向、近似竖直、呈左旋走滑特征。另外，由极震区烈度分布及精定位结果，本次地震可能为向北东方向的单侧破裂模式。

（3）余震活动随时间的演化表现出明显的阶段性，序列参数显示本地震为主震—余震型的可能性较大。但该序列余震活动强度及频度均较弱，衰减较快，且序列中  $M_L \leq 3.5$  的小震数量明显偏低，与 G-R 关系存在明显偏离。晚期的余震维持与序列早期相同的格局，但具有明显的向浅部及外围区域扩散的趋势。

参考文献：

邓超东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑),32(12):1020-1030.  
房立华,吴建平,王未来,等. 2015. 2014 年新疆于田  $M_s7.3$  级地震序列重定位[J]. 地球物理学报,58(3):802-808.

- 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): 262–227.
- 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.
- 李忠华, 苏有锦, 蔡明军, 等. 2000. 云南地区地震序列的 P 值和 b 值变化特征[J]. 地震, 20(4): 74–78.
- 毛玉平, 张俊昌. 1991. 澜沧—耿马地震发震构造初步研究[J]. 地震研究, 14(1): 9–15.
- 王晋南, 王洋龙, 安晓文, 等. 2006. 南汀河西支断裂北东段最新活动性分析[J]. 地震研究, 29(3): 264–268.
- 王未来, 吴建平, 房立华, 等. 2014. 2014 年云南鲁甸  $M_s6.5$  地震序列的双差重定位[J]. 地球物理学报, 57(9): 2042–3051.
- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 等. 1990. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 124–150.
- 向宏发, 虢顺民, 徐锡伟, 等. 2000. 川滇南部地区活动地块划分与现今运动特征初析[J]. 地震地质, 22(3): 253–264.
- 胥颐, 杨晓涛, 刘建华, 2013. 云南地区地壳速度结构的层析成像研究[J]. 地球物理学报, 56(6): 1904–1914.
- 杨继登, 王世芹. 1999. 中国震例(1986—1988): 1988 年 11 月 6 日云南省澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震[M]. 北京: 地震出版社, 316–343.
- 杨婷, 吴建平, 房立华, 等. 2014. 滇西地区地壳速度结构及其构造意义[J]. 地震地质, 36(2): 392–404.
- 张广伟, 雷建设, 梁姗姗, 等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸  $M_s6.5$  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.
- 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 2004. 中国大陆活动地块与强震活动关系[J]. 中国科学(D 辑), 34(7): 591–599.
- 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. 地球物理学报, 48(3): 602–610.
- 张培震, 邓起东, 马瑾, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D 辑), 33(增刊): 12–20.
- 赵小艳, 韩立波, 徐甫坤, 等. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震序列跟踪分析研究[J]. 地震研究, 37(4): 508–514.
- 中国地震局地球物理研究所. 2015. 2015 年 3 月 1 日云南临沧沧源佤族自治县  $M_s5.5$  地震[EB/OL](2015–03–01)[2015–03–25] <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/271472.shtml>
- 中国地震局地质研究所. 2015. 云南临沧沧源佤族自治县  $M_s5.5$  地震区域地震构造图[EB/OL](2015–03–01)[2015–03–01][2015–03–25] <http://www.eq-igl.ac.cn/upload/images/2015/3/1204219134.jpg>
- 中国地震局监测预报司. 2010. 中国地震目录[M].
- Fang L. H., Wu J. P., Wang W. L., *et al.*. 2013. Relocation of the main-shock and aftershock sequences of  $M_7.0$  Sichuan Lushan earthquake[J]. Chin. Sci. Bull., 58: 3451–3459.
- Tapponnier P., Xu Z. Q., Francoise R., *et al.*. 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 294: 1671–1677.
- 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 locations[J]. J. Geophys. Res., 107, ESE 3–1–3–15.
- Wiemer S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP[J]. Seismological Research Letters, 72(2): 374–383.

## Distribution and Temporal Evaluation Characteristic of Cangyuan $M_s5.5$ Earthquake Sequences in Yunnan in 2015

XU Fu-kun, LIU Zi-feng, SUN Nan, HE Jia-ji, ZHAO Xiao-yan

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

Using waveform data from seismic network of Yunnan province and their corresponding observation report, combined with the tectonic background and historical seismicity, we discussed seismogenic structure and the distribution and temporal evaluation variation of Cangyuan  $M_s5.5$  earthquake sequence in Yunnan on Mar. 1, 2015 from the activity characteristics and parameters of the sequence, the focal mechanism solutions of larger events as well as the accurate relocation analogy etc. Referring to the focal mechanism solutions and the tectonics in epicenter area, we indicated that the seismogenic structure of Cangyuan earthquake is the west branch of Nantinghe Fault which appeared to be a right-lateral strike-slip faulting. It is showed that the seismicity of aftershock sequences remain low, decayed rapidly with time and appeared the obvious phased. The spatial distribution of the sequence which relocated by the double-difference relocation algorithm showed that the main rupture area was a zonal area of NNE, and approximately vertical direction. It seemed to be a unilateral rupture, furthermore, the distribution of the later aftershocks showed the scatter trend to the shallower and outer region of the epicenter.

**Key words:** Cangyuan  $M_s5.5$  earthquake; the double-difference relocation; Nantinghe Fault (west branch); earthquake sequence; seismogenic structure