

# 2014年云南盈江 $M_s$ 6.1 地震前后 序列分布差异研究<sup>\*</sup>

徐甫坤, 张彦琪, 苏有锦

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 利用云南测震台网提供的波形数据及观测报告, 采用 LOC3D 速度模型对 2014 年 5 月 30 日云南盈江  $M_s$  6.1 地震主震进行了精定位, 用双差定位法对 2014 年 5 月 24 日至 6 月 30 日期间的余震进行了重新定位。结果显示: 地震序列分布显示出较为精细的几何结构, 5 月 24 日盈江  $M_s$  5.6 地震序列与 5 月 30 日  $M_s$  6.1 地震序列的空间分布具有较大差异, 反映为震群型地震, 且  $M_s$  5.6 地震序列后期的余震存在向未来的  $M_s$  6.1 地震的震源集中的时空演化特征。

**关键词:** 盈江地震; 双差重定位; 余震分布; LDC3D 速度模型

**中图分类号:** P315.72      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2015)04-0525-10

## 0 引言

据中国地震台网中心测定, 2014 年 5 月 24 日 4 时 49 分 21 秒, 云南省德宏傣族景颇族自治州盈江县发生  $M_s$  5.6 地震 (以下简称  $M_s$  5.6 地震), 震中 ( $25.0^\circ\text{N}$ ,  $97.8^\circ\text{E}$ ), 震源深度 12 km; 2014 年 5 月 30 日 9 时 20 分 50 秒, 该地区再次发生  $M_s$  6.1 地震 (以下简称  $M_s$  6.1 地震), 震中 ( $25.0^\circ\text{N}$ ,  $97.8^\circ\text{E}$ ), 震源深度 12 km。这两次地震构成震群序列, 5 月 30 日的  $M_s$  5.6 地震序列可能对  $M_s$  6.1 地震的孕育发生具有重要的指示意义; 云南测震台网的定位结果显示,  $M_s$  6.1 地震前后的序列分布具有明显差异, 且存在一定相关性, 进一步分析其时空分布特征可为地震序列后期可能的强震活动预判提供依据。

盈江地处腾冲—龙陵地震带和缅甸弧地震带之间的过渡地带, 夹于冈底斯—念青唐古拉褶皱系 (I 级)、伯舒拉岭—高黎贡山褶皱带 (II 级)、铜壁关褶皱束 (III 级)、与泸水—陇川褶皱束 (III 级) 及古永—盏西褶皱束 (III 级) 间。由于处在特提斯—喜马拉雅构造域东南段构造线明显转折的部位, 自晚元古代以来古大洋向其北部和东部地台的长期挤压和俯冲, 加之各时期主应力方向

的不断变化, 使该地区构造极其复杂, 区内众多大断裂纵横交错, 地质构造十分复杂 (张智等, 2006)。西侧缅甸境内有右旋走滑的近北南向实皆断裂, 北部有喜马拉雅东构造结, 东部有龙陵—澜沧新生断裂, 南部有一系列北东向断裂 (如大盈江断裂) 等全新世活动断裂。

震区内新构造运动强烈而复杂, 主要发育有 NE 向、NS 向和 NNE 向 3 组断裂构造, 代表性断裂为大盈江断裂、苏典—盈江断裂和卡场—大竹寨断裂 (张彦琪等, 2014)。该区自 2008 年以来中强地震活跃, 相继发生了 2008 年 3 月 21 日  $M_s$  5.0 地震 (大盈江断裂)、2008 年 8 月 20 日  $M_s$  5.0 地震、8 月 21 日  $M_s$  5.9 地震 (苏典—盈江断裂) 和 2011 年 3 月 10 日  $M_s$  5.8 地震 (大盈江断裂)。从构造的角度看, 自 2008 年以来该区“群震”现象可能与其所处的特殊构造位置有关, 但本次  $M_s$  5.6、 $M_s$  6.1 地震距大盈江断裂约 43 km、距苏典—盈江断裂约 16 km, 且附近地形地貌较为复杂, 震区具体构造特征尚不明确, 需进一步研究。

高精度的定位能更加准确显示地震序列的空间分布, 使我们能更好地分析地震活动的三维空间分布特征、地震分布与震区构造的关系, 进而为确定发震断层和分析地震的发震机理定提供重

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-04-20.

基金项目: 中国地震局·震情跟踪课题 (2015010109) 和云南省地震局青年科技人员传帮带项目联合资助。

要参考(房立华等, 2013; Balfour *et al.*, 2012)。本文利用“川滇地区三维走时表”和“三维速度模型”对地震进行了重定位, 然后利用 2014 年 10 月 7~31 日云南省测震台网波形数据及震相观测报告, 采用双差重定位方法对盈江地震及其余震序列进行重新定位, 探讨本次地震序列的时空分布特征。

## 1 研究方法 with 数据

### 1.1 双差重定位方法

双差重定位方法(Waldhauser, Ellsworth, 2000, 2002)是一种针对丛集地震精定位的相对定位方法, 经过重定位后的地震的相对位置具有较好的空间分布特征。尤其该方法被它用于地震序列的重定位中, 可以更好地反映地震破裂区的几何形态, 描述发震断层的特征, 已在大量震例中得到广泛应用。余震序列的双差定位结果, 已被证明能够较好地反映断层破裂的延展范围(黄媛, 2008; 房立华等, 2011, 2013; Lei *et al.*, 2012, 2014; 王未来等, 2014; 张广伟等, 2014; 徐甫坤等, 2014)。双差重定位方法通过将一定空间范围内的地震事件两两组对, 对某组对事件( $i, j$ )在台站 $k$ 上的某个震相, 定义其双重残差为两个事件的走时残差( $r_k^i, r_k^j$ )之差(Waldhauser and, Ellsworth, 2000, 2002)为

$$dr_k^{ij} = r_k^i - r_k^j \equiv (t_k^i - t_k^j) - (T_k^i - T_k^j). \quad (1)$$

其中,  $t_k^i$  及  $T_k^i$  分别为台站 $k$ 记录的事件 $i$ 的观测走时及计算走时。式(1)表明双重残差等价于组对事件的到时差的残差。经过数学迭代, 通过求解使双重残差最小时对应的到时差作为组对事件间的相对距离。

当组对事件中两个事件间的距离远小于事件到台站间的距离或速度非均匀性尺度时, 两个事件具有相近的传播路径, 传播路径上速度结构的误差对定位的影响可以忽略, 双重残差只受其相对位置影响, 于是式(1)可近似表示为事件震源参数偏移量的线性方程组:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j. \quad (2)$$

其中,  $\Delta m = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau)$  为 4 维震源参数偏移

量。于是地震定位问题变为: 以观测走时  $t_k^i$  及  $t_k^j$  为初始条件, 求解偏移量  $\Delta m^i$  及  $\Delta m^j$ , 使双重残差  $dr_k^{ij}$  最小, 获得的解即为最优解。该方法使用相对走时残差来修正地震位置, 能够有效抵消传输路径对定位结果的影响, 获得更高精度的地震相对位置。

### 1.2 速度模型

速度模型在地震定位中尤其是地震深度的确定中具有重要作用, 双差重定位方法采用相对走时差数据, 很好的克服了传输路径中速度横向不均匀性的影响(吕鹏等, 2011), 但震区的水平分层速度模型仍对重定位结果存在较大影响(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。人工测深方法能给出较精确的速度结构, 中国地震局和其他协作单位先后于 1982 及 1987 年在云南及邻区实施了滇深 82 工程、滇深 86-87 工程等野外人工地震测深(DSS)工作, 获得了遮放—宾川(胡鸿翔等, 1986; 白志明, 王椿镛, 2004; 张中杰等, 2005)、洱源—江川(胡鸿翔等, 1986; 张智等, 2007)和孟连—马龙(白志明, 王椿镛, 2004)、丽江—者海(熊绍柏等, 1993)和思茅—中甸(胡鸿翔, 1993; 林中洋等, 1993; 张智等, 2006)5 条地震测深剖面的速度结构(苏有锦等, 1999; 白志明等, 2003; 熊小松等, 2009)。这些测线呈网状相互交叉, 穿越云南地区一系列的重要断裂和主要构造单元(白志明, 王椿镛, 2003), 提供了宝贵的参考数据, 对确定水平分层速度模型起着关键作用。

盈江地震位于波密—腾冲褶皱系(早加里东褶皱带)内, 现有的关于盈江地区的分层速度模型研究结果并不多, 大多数研究主要集中于与其相邻的腾冲地区, 且两个地区的速度结构可能存在较大差异(赵小艳等, 2013)。DSS 中的遮放—宾川测线大致沿龙陵断裂分布, 其西南端位于波密—腾冲褶皱系(早加里东褶皱带)与三江褶皱系的交界地带(陈炳蔚等, 1987; 白志明, 王椿镛, 2004), 与盈江地区属于同一构造单元, 且与本次地震空间上最为接近。2011 年盈江  $M_s 5.8$  地震发生后, 房立华等(2011)参考 DSS 结果建立了该区域分层速度结构模型, 对地震序列进行了快速精定位; 对该地震的后续研究(赵小艳等, 2013; 黄浩, 付虹, 2014)亦采用了该模型, 并获得了较准确的重定位结果。本次地震位于 2011 年盈

江  $M_s5.8$  地震震中西北约 40 km, 两次地震震中距离相近, 故使用该结构模型对本次地震进行重定位, 模型共分 7 层, 每层的顶界面深度分别是 0、1、14、18、30、38 和 60 km, 对应的层速度分别为 5.0、6.1、6.4、6.6、7.2、8.0 和 8.1 km/s, 波速比设定为 1.76 (图 1)。

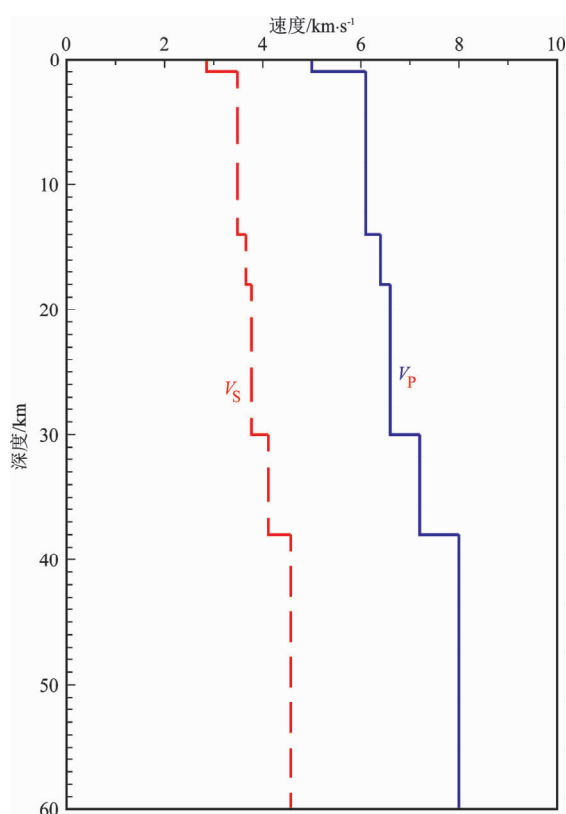


图 1 本文研究使用的速度结构

Fig. 1 The velocity structure used in this paper

### 1.3 数据选择

根据云南地震速报目录, 2014 年 5 月 24 日 0 时至 6 月 30 日 24 时, 震区 ( $97^\circ \sim 99^\circ \text{E}$ ,  $24^\circ \sim 26^\circ \text{N}$ ) 共记录到  $M_L \geq 1.0$  地震 5 834 次, 其中 3.0 ~ 3.9 级 223 次, 4.0 ~ 4.9 级 14 次, 5.0 级以上地震 3 次, 这 3 次 5.0 级以上地震分别为 5 月 24 日 4 时 49 分 21 秒  $M_s5.6$  地震、5 月 30 日 9 时 20 分 13 秒  $M_s6.1$  地震以及 5 月 30 日 9 时 20 分 50 秒  $M_s5.1$  地震。本地震序列可分为两个阶段 (图 2), 第一个阶段为  $M_s5.6$  地震至  $M_s6.1$  地震之前时段, 第二个阶段为  $M_s6.1$  地震之后的时段。由云南测震台网定位结果, 第一个阶段的余震分布以北东向分布为主, 第二个阶段以近北南向分布为主, 两个阶段的余震分布存在明显差异。为方便讨论, 将第一个阶段内的地震简称为“ $M_s5.6$  地震序列”, 第二个阶段称为“ $M_s6.1$  地震序列”。

2014 年 5 月 24 日盈江  $M_s5.6$  地震前, 震中附近 200 km 范围内共有 11 个正常运行的台站参与定位, 其中包括云南数字测震台网 7 个台、腾冲火山台网 3 个台及缅甸密支那 (MYI) 台。其中箐口台 (QKT) 距离震中最近, 震中距为 57 km, 近震台站较少; 台站主要分布有震中东侧, 震中西侧仅有 MYI 台一个台站 (图 3a), 其中断层数据采用邓起东等 (2002, 2003) 研究结果, 方位角覆盖较弱。 $M_s5.6$  地震发生后, 云南省地震局在震中附近架设了卡场 (KAC)、勐弄 (MNO) 及惜马 (XIM) 3 个短周期流动测震仪, 于 5 月 26 日 10 时 48 分开始参与地震定位, 其中 KAC 及 MNO 两个台均位于余震区内; 2014 年 5 月 30 日盈江  $M_s6.1$

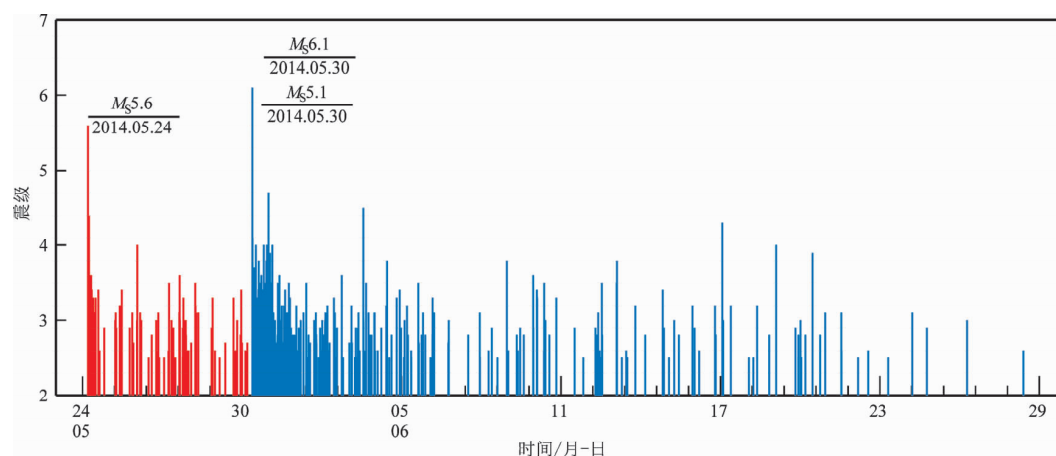


图 2 2014 年 5 月 24 日 0 时至 6 月 30 日 24 时盈江  $M_L \geq 2.5$  地震序列  $M-t$  图

Fig. 2  $M-t$  diagram of the Yingjiang  $M_L \geq 2.5$  earthquake sequence from 0 a. m. on May. 24 to 24 p. m. on Jun. 30, 2014

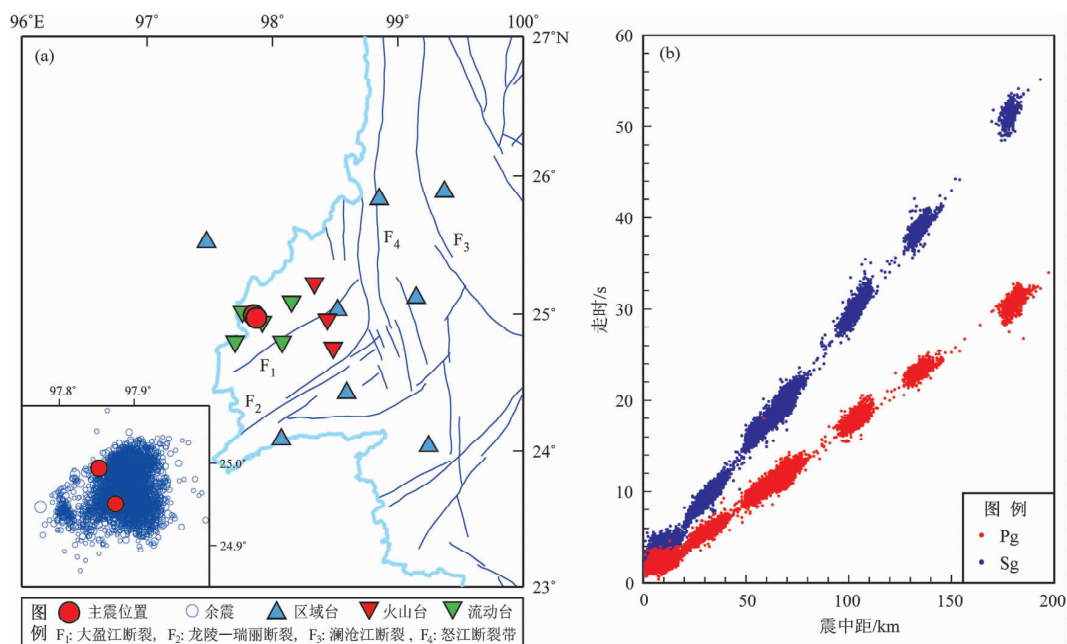


图3 双差重定位使用台站、序列分布 (a) 以及 P、S 波震相走时 (b)

Fig. 3 Distribution of the stations and aftershocks (a) used in double difference location method and travel time of P and S waves (b)

地震发生后,再次其设了盏西(ZHX)及新城(XIC)两个流动短周期测震仪,并于5月31日22时41分开始参与地震定位。至此震区50 km范围内共有5个测震仪参与定位,明显改善了台网对震区的监测能力。

使用的震相数据为云南省测震台网编目提供的震相报告,为确保震相的可靠性,对震相报告进行了筛选,按照以下原则筛选出符合要求的地震事件:对每次地震事件,要求参与定位的台站不少于4个、震中距在200 km内,且震相数不少于6个。共筛选出4 594次 $M_L \geq 1.5$ 地震参与重定位计算(图3a中左下角),获得P波到时36 618条、S波到时32 742条,由其走时曲线(图3b)可见,震相走时的离散度小,原始震相观测报告具有较高的可靠性。

## 2 地震重定位

由于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,2011,2013),为探讨地震序列与断层的位置关系,还需要准确的参考地震的位置。笔者利用云南省测震台网中心的波形数据,对5月30日 $M_s 6.1$ 地震进行重新定

位,使用的软件为MSDP软件,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“川滇地区三维速度模型”(LOC3D)。

利用由云南省测震台网中心提供的波形数据,选择信噪比高、震相清楚、方位覆盖较好的台站

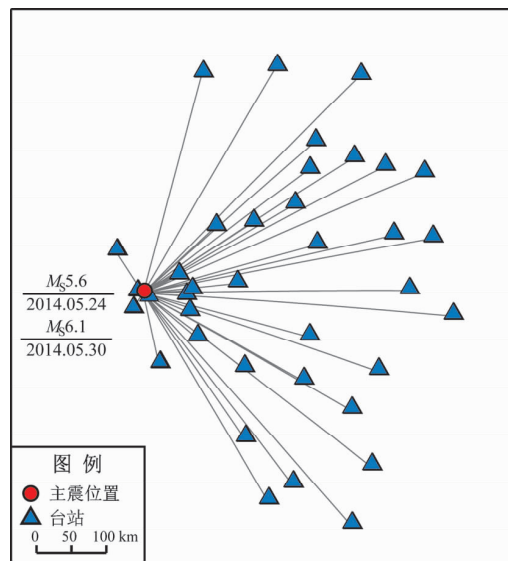


图4 采用LOC3D重定位使用的台站分布及重定位后的震中位置

Fig. 4 Distribution of stations used to relocation by LOC3D and the location of the epicenter of mainshock after relocation

波形进行震相检查及标注,对地震的震相进行了分析。参与定位的台站分布如图4所示,共有37个台站的63条震相参与定位,其中Pg震相25条、Pn震相24条、Sg震相14条。在MSDP软件上使用LOC3D速度模型对地震进行重新定位,重新测定后的地震发震时刻为2014年5月30日9时20分13.321秒,震中位于(24.994°N, 97.853°E),震源深度17.597 km,经度、纬度和深度方向的定位误差分别为0.9 km、0.7 km和0.9 km。与震相报告中的地震位置(25.038°N, 97.799°E)、震源深度12 km水平位置接近,但深度增加约5.6 km。

### 3 重定位结果

进行序列重定位前,以主震重定位后的位置为参考位置,根据采用LOC3D模型确定的地震位置(图)与震相报告中的地震位置的差异,对所有地震的初始位置进行了整体性平移,并作为重定位的初始位置(房立华等,2011)。

设定组成事件对的最大距离为10 km、最小震相对为8对,经过事件组对后,共挑选出4 284次地震,组成56 354对事件对,共有331 326对P波及281 726对S波震相参与重定位计算。初始数据沿经度、纬度和深度方向的定位残差分别为0.6、0.7及0.8 km,走时残差为240 ms。

经过双差重定位后共得到4 163次地震的震源位置参数,沿纬度方向、经度方向和深度方向的定位残差分别为0.16 km、0.16 km和0.21 km,

走时残差为65 ms。与初始定位结果相比,重定位计算明显提高了震源相对位置的定位精度,且重定位后的震中分布形态具有明显的集中性。

重定位后,  $M_s6.1$  地震震中位置(24.974°N, 97.881°E),震源深度为17.5 km,与重定位前基本一致;而  $M_s5.6$  地震的震源深度为23.6 km,相比重定位前增加了6.6 km,这可能是由该地震发生前震中附近台站较少、台网定位精度较低所致。

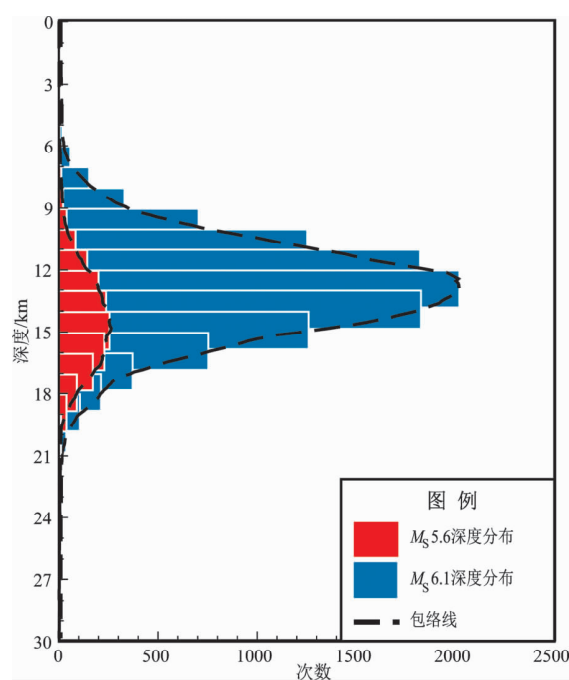


图5 重定位后地震序列震源深度分布图

Fig. 5 The focal depth distribution of the earthquake sequences after relocation

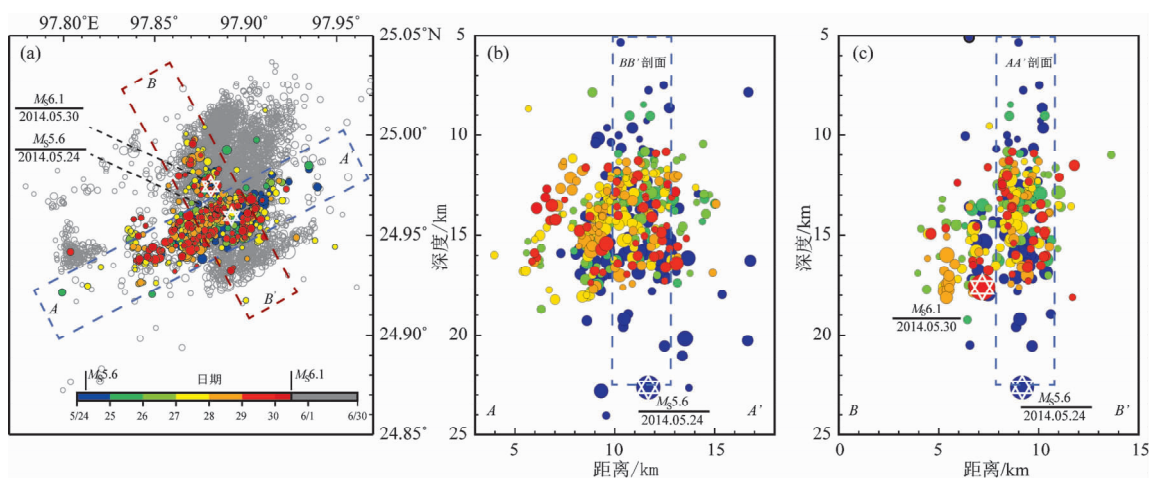


图6 重定位后的地震序列在水平面上的分布(a),沿AA'剖面(b)和沿BB'剖面(c)的投影

Fig. 6 Distributions of the sequences after relocation on horizontal plane (a), and the projection of focal depth along AA' and (b) and BB' (c) profiles



按窗长 3 km 统计震源深度的分布,发现  $M_s6.1$  地震前后的震源深度分布存在明显差异(图 5):  $M_s5.6$  地震序列的震源深度分布集中在 13 ~ 17 km 内,峰值出现在 15 km 左右;而  $M_s6.1$  地震序列的震源深度分布集中在 11 ~ 15 km 内,峰值出现在 13 km 左右。表明  $M_s6.1$  地震后的余震分布相对  $M_s5.6$  地震序列有所变浅。

从重定位结果可以看出,重定位后的序列分布与云南省测震台网的初定位结果(图 3a)基本一致,但具有较为集中的分布特征,而且  $M_s6.1$

地震前后的余震分布具有明显差异(图 6a),故以  $M_s6.1$  地震为参考时间点,将其分为 5 月 24 日 ~ 30 日( $M_s5.6$  地震序列)和 5 月 30 日 ~ 6 月 30 日( $M_s6.1$  地震序列)两个时段讨论。

$M_s5.6$  地震序列的优势分布方向为北东向(图 6a),参考余震分布选取北东向的  $A-A'$  剖面及北西向的  $B-B'$  剖面;在水平面上,  $A-A'$  剖面为优势分布方向,分布区域长约 8 km,宽约 3 km;由深度剖面可见(图 6b),余震的震源深度分布主要集中在 8 ~ 20 km,  $M_s5.6$  地震位于整个余震区

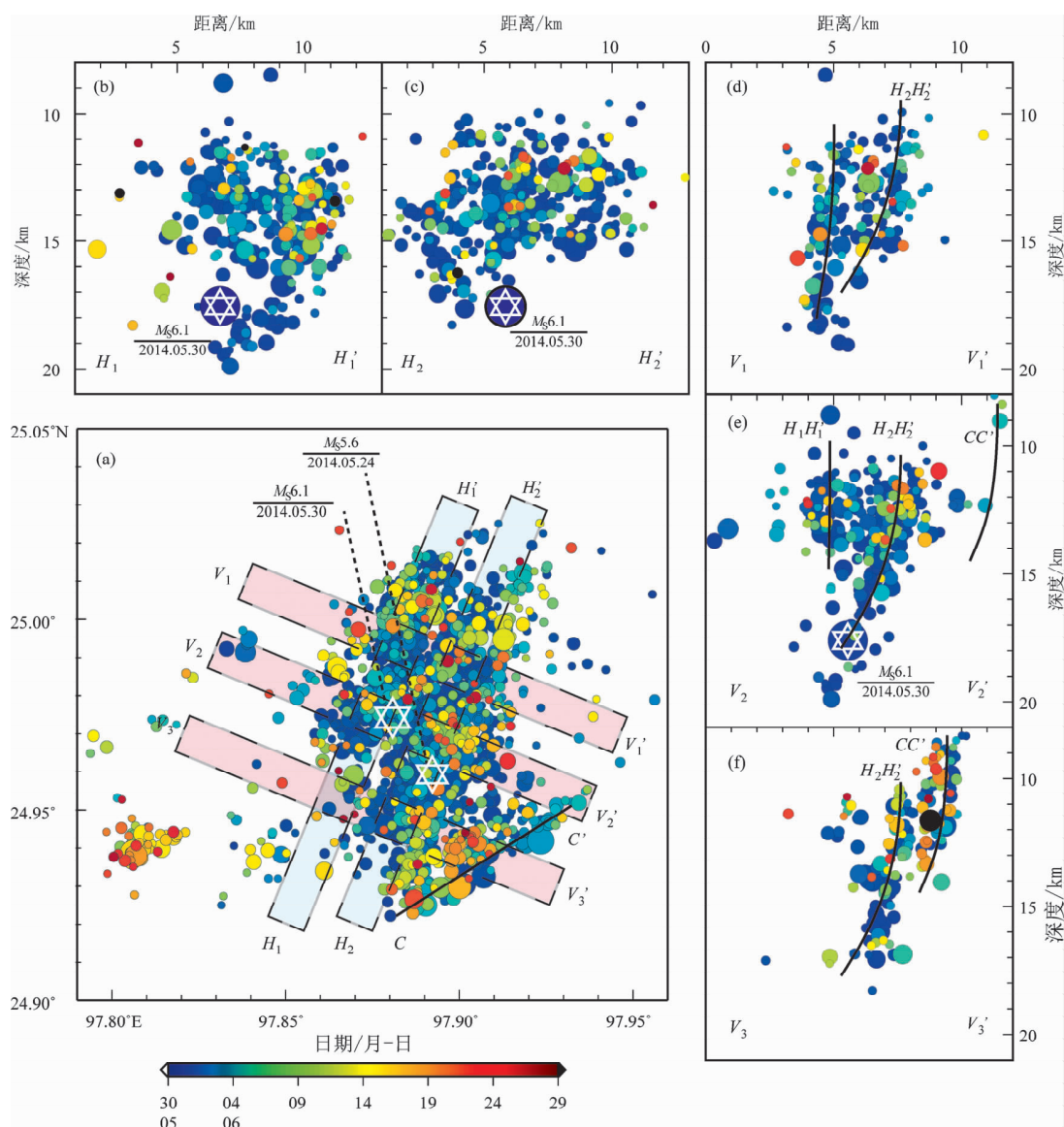


图 7  $M_s6.1$  地震序列中  $M_L \geq 2.0$  地震的水平分布及其深度剖面(深度剖面中黑线为余震集中分布显示的可能的破裂面)

Fig. 7 The horizontal distribution and depth profile of  $M_L \geq 2.0$  earthquakes of  $M_s6.1$  sequences (the black lines in the depth profile are the possible rupture planes implied by the centralized distribution of aftershocks)

底部,其震源深度显著深于其他地震,在深度剖面上呈近竖直分布;另外,该序列还存在一个北西方向的分支( $B-B'$ 剖面)(图6c),该分支位于 $M_s5.6$ 地震附近,与优势分布正交,其余震数量较少,但深度集中在13~18 km,明显低于 $A-A'$ 剖面上的地震;值得一提的是,5月31日 $M_s6.1$ 地震发生于该分支的底部。

$M_s6.1$ 地震序列的优势分布方向为近南北向(图7),与 $M_s5.6$ 地震序列存在明显差异(图6a),余震分布在南端为北北西向,至北端转为北北东向,整体呈弧状分布(图7a),其南北向长度约12 km,东西向宽度约6 km。由余震分布在北北东方向(图7b、c)及北西西方向(图7d、e、f)上的投影,可见余震集中分布在 $H_1-H_1'$ 、 $H_2-H_2'$ 及 $C-C'$ 三个细长区域内,这三个区域的走向及余震深度分布均存在明显差异:(1)东南角的 $C-C'$ 区域呈北东走向,区域内地震的震源深度集中在8~14 km,明显浅于其他区域(图7f);(2) $H_1-H_1'$ 区域呈北北东走向,长约7 km,沿

北北东向的剖面(图7b)显示其南端的余震的震源深度集中在11~15 km,至北端则增加至20 km左右,整体呈南浅北深、略向西倾的几何形状;(3) $H_2-H_2'$ 区域呈北北东走向,与 $H_1-H_1'$ 平行,水平间隔约1.5 km,但其余震的深度分布与 $H_1-H_1'$ 相反,在南端集中在10~18 km,至北端集中在10~15 km(图7c),整体呈南深北浅、略向西倾的几何形状。

另外,由北西西方向的剖面(7d、e、f)可以看出:(1) $H_1-H_1'$ 、 $H_2-H_2'$ 及 $C-C'$ 三个细长区域上的余震剖面均略向西倾, $M_s6.1$ 地震位于 $H_1-H_1'$ 及 $H_2-H_2'$ 两个北北东向在深部的交汇部位;(2)三个区域的余震深度分布存在明显差异,东南端北东走向的 $C-C'$ 区域的深度最浅, $H_1-H_1'$ 及 $H_2-H_2'$ 区域的深度分布大体相近,但在不同段落具有差异: $H_2-H_2'$ 为南深北浅的分布,而 $H_1-H_1'$ 为南浅北深的分布。由以上余震空间分布的特征,推测 $M_s6.1$ 地震的主要破裂区域可能为北北东向的 $H_1-H_1'$ 及 $H_2-H_2'$ 破

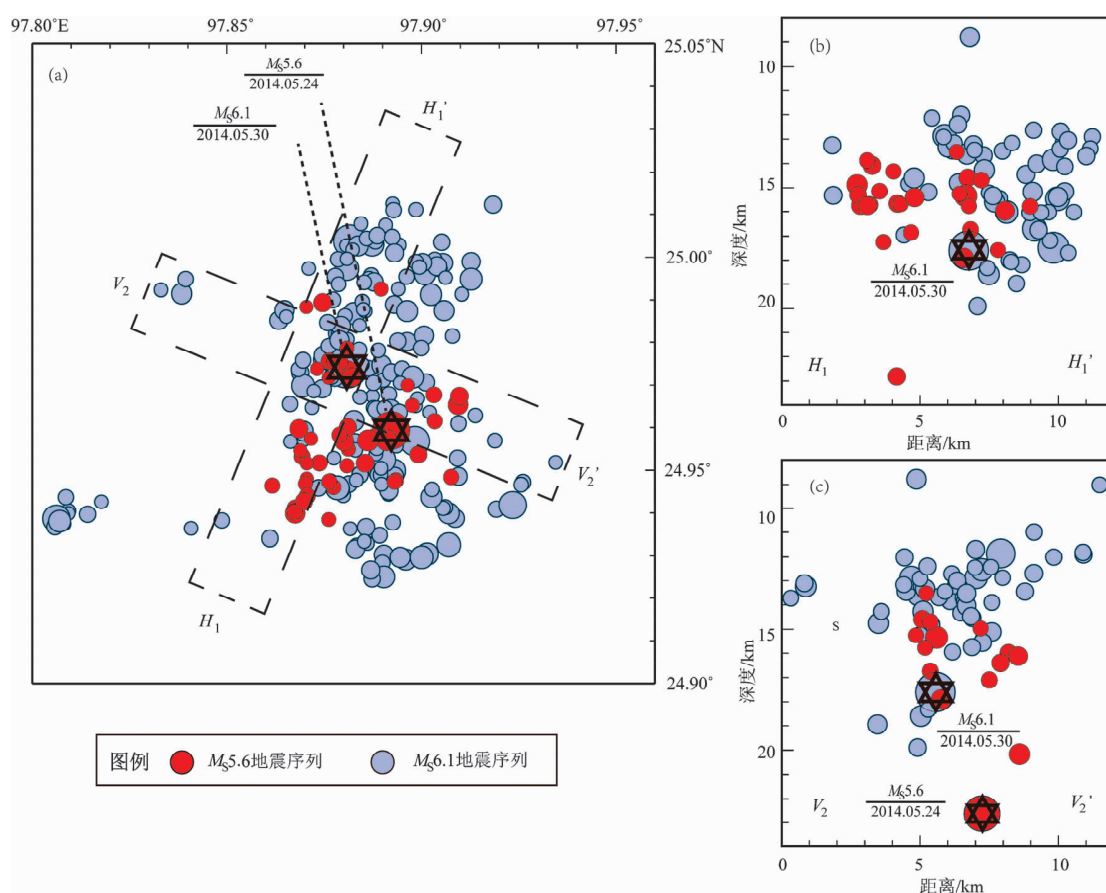


图8  $M_s5.6$ 及 $M_s6.1$ 地震序列分布( $M_L \geq 3.0$ )

Fig. 8 Distributions of  $M_s5.6$  and  $M_s6.1$  earthquake sequences ( $M_L \geq 3.0$ )

裂面,而北东向的  $C-C'$  区域为  $H_2-H_2'$  破裂面衍生的小型破裂。

由图 6、7 可见,  $M_s6.1$  地震序列与  $M_s5.6$  地震序列的空间分布具有明显差异,但从  $M_L \geq 3.0$  余震的整体分布看(图 8),二者又相互补充:  $M_s5.6$  地震序列位于整个序列的中部,  $M_s6.1$  地震序列的展布与其存在重叠,且分布范围更广,二者共同表现为南北向的优势分布;  $M_s6.1$  地震序列的深度剖面存在余震稀疏的区域,其位置与  $M_s5.6$  地震序列吻合,这与 2011 年盈江  $M_s5.8$  地震相似(赵小艳等, 2013),说明这些区域可能已充分破裂。这种分布可能反映  $M_s6.1$  地震序列为在  $M_s5.6$  地震序列基础上产生的新破裂,形成新的空间分布,为破裂的进一步发展和升级。

由震源深度随时间的演化特征(图 9),

$M_s5.6$  地震序列中  $M_L \geq 3.0$  地震的空间分布随时间的演化具有阶段性:早期(5 月 24 日 ~ 25 日)的余震分布较为分散,形成北东向优势分布,在 9 ~ 23 km 深度均有分布,其中大部分地震集中在 14 ~ 18 km 内;5 月 25 ~ 27 日的余震集中在中南段,且深度较浅,以 13 ~ 15 km 为主;5 月 27 ~ 30 日  $M_s6.1$  地震前的余震则表现出一定的趋势性,其在水平面上分布于北东向优势分布的西北侧区域,即未来震中附近,在深度上则逐渐加大,在 5 月 27 日深度分布在 13 ~ 15 km,至 5 月 30 日已逐渐加深到 15 ~ 17 km 范围。由图 6 亦可看到,在序列后期,小震活动以  $M_s6.1$  地震附近区域为主,存在向  $M_s6.1$  地震震中集中的趋势。这种集中趋势可能意味着未来强震附近的破裂开始发生,对  $M_s6.1$  地震具有重要的指示意义。

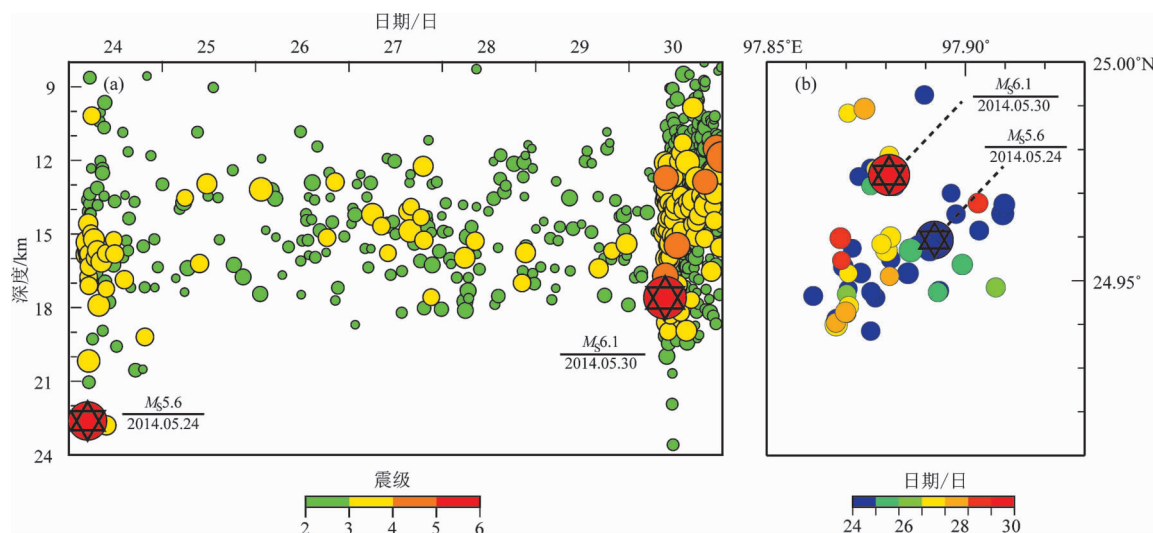


图 9  $M_s5.6$  地震序列在深度 ( $M_L \geq 2.0$ ) (a)、水平面上 ( $M_L \geq 3.0$ ) (b) 随时间的演化分布

Fig. 9 The evolution distribution of  $M_s5.6$  earthquake sequences with time in depth ( $M_L \geq 2.0$ ) (a) and on horizontal plane ( $M_L \geq 3.0$ ) (b)

## 4 讨论与结论

重新测定后的地震发震时刻为 2014 年 5 月 30 日 9 时 20 分 13.321 秒,震中位于 ( $97.853^\circ\text{E}$ ,  $24.994^\circ\text{N}$ ),震源深度 17.597 km。与台网定位结果相比,水平位置接近,但深度增加约 5.6 km,这可能主要由采用的速度模型的差异造成。经过双差重定位后,定位误差明显减小,序列分布具有以下特征:

在水平方向上,余震优势分布为近南北向的

条状区域,南北长约 12 km,东西宽约 6 km;对余震分布在不同方向的投影进一步划分,反映出破裂区更为精细的几何结构,余震主要分布在一个北东向、两个北北东向的 3 个细长区域内,其深度分布具有明显差异。由于震区附近的主要断裂为大盈江断裂、次级的苏典—盈江断裂及措勤—嘉梨断裂(安晓文等, 2009; 张彦琪等, 2014)等走滑型断裂,但与本次地震均有一定距离,而目前对震区的详细构造尚缺乏详细研究,故本次地震序列的余震分布表现出的几何结构与构造的关系不得而知,但这种几何结构可能反映震区的构



造形态为走滑型断裂背景下的花状构造。

将本次地震序列按  $M_s6.1$  地震划分为两个时段, 地震之前的地震归为  $M_s5.6$  地震序列, 之后的地震归为  $M_s6.1$  地震序列, 则两个序列的余震空间分布具有明显差异: 在水平方向上,  $M_s5.6$  地震序列的优势分布为北东向, 而  $M_s6.1$  地震序列呈近南北向的弧状分布, 由3个细长区域共同构成; 在深度上,  $M_s6.1$  地震序列的震源深度略浅于  $M_s5.6$  地震序列; 另外, 余震分布的深度剖面显示,  $M_s6.1$  地震序列分布范围较广, 且与  $M_s5.6$  地震序列存在较大差异。这种分布特征可能表明, 这两个地震属于震群型地震。

另一方面,  $M_s5.6$  地震序列为北东向优势分布, 并存在一个稍小的北西向分支,  $M_s6.1$  地震并未发生在  $M_s5.6$  地震序列的余震主体集中区域, 而是位于其北西向分支底部, 余震区的边缘地带。本次地震东南约40 km的大盈江断裂上曾于2011年发生  $M_s5.8$  地震, 其前震非常丰富(付虹等, 2011),  $M_s5.8$  主震亦位于前震分布的边缘, 断裂的尖端地区(赵小艳等, 2013; 黄浩, 付虹, 2014; 陈佳等, 2014), 与本次地震相似。

从余震分布随时间的演化看,  $M_s5.6$  地震序列中后期的余震存在震源深度逐渐变深、并逐渐向  $M_s6.1$  地震震中集中的趋势, 这种分布及演化趋势可能为  $M_s6.1$  地震将要发生的一种迹象。

对该地震的相关性质尚需结合其他手段做进一步讨论和分析, 但本文的初步研究显示: 本次地震序列的空间分布具有较为精细的几何结构,  $M_s5.6$  地震序列可能为  $M_s6.1$  地震的前震序列; 并发现  $M_s5.6$  地震序列后期的余震存在向  $M_s6.1$  地震的震源处逐渐集中的演化规律, 这种演化可能对未来强震的发生具有一定的指示意义。笔者亦期望本文的结果能对进一步的分析研究有所帮助, 粗浅认识可为未来的序列趋势跟踪、尤其是在对未来强震/强余震的预判中提供一定的依据。

本文所用波形及震相数据来自云南测震台网中心, 图件采用 GMT 软件包及 AI 绘制。审稿专家对本文提供了建设性的修改意见; 云南省地震局李静在地震重定位过程中提供了指导。作者谨向以上单位和个人表示由衷的感谢。

#### 参考文献:

安晓文, 常祖峰, 石静芳. 2009. 大盈江断裂西南段晚第四纪活动研

究[J]. 地震研究, 32(2): 193–198.

白志明, 王椿镛. 2003. 云南地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究[J]. 地震学报, 25(2): 117–127.

白志明, 王椿镛. 2004. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究[J]. 地球物理学报, 47(2): 257–267.

陈炳蔚, 王恺元, 刘万熹, 等. 1987. 怒江—澜沧江—金沙江地区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 204.

陈佳, 杨军, 叶泵, 等. 2014. 2011年盈江  $M_s5.8$  地震前震及余震序列双差定位研究[J]. 国际地震动态, 4(424): 6–10.

邓起东, 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. 2013. 四川芦山  $M_s7.0$  级地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, 58(20): 1901–1909.

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.

付虹, 黄浩, 李丽, 等. 2011. 2011年3月10日云南盈江 5.8 级地震序列研究[J]. 地震研究, 34(4): 414–420.

胡鸿翔, 高世玉. 1993. 滇西地区地壳浅部基底速度细结构的研究[J]. 中国地震, 9(4): 356–363.

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.

黄浩, 付虹. 2014. 结合波形互相关的双差定位方法在 2011 年盈江地震序列中的应用[J]. 地震研究, 37(2): 210–215.

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.

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的研究[J]. 地震学报, 15(4): 427–440.

吕鹏, 丁志峰, 朱露培. 2011. 结合波形互相关的双差重定位方法在 2008 年汶川地震余震序列中的应用[J]. 地震学报, 33(4): 407–419.

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.

王未来, 吴建平, 房立华, 等. 2014. 2014 年鲁甸  $M_s6.5$  地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报, 57(9): 2042–3051.

熊绍柏, 郑晔, 尹周勋, 等. 1993. 丽江—攀枝花—者海地带二维地壳结构及其构造意义[J]. 地球物理学报, 36(4): 434–444.

熊小松, 高锐, 李秋生, 等. 2009. 深地震测深揭示的华南地区莫霍面深度[J]. 地球学报, 30(6): 774–786.

徐甫坤, 李静, 苏有锦. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震序列重定位研究[J]. 地震研究, 37(4): 515–522.

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.

张彦琪, 范柱国, 陈坤华, 等. 2014. 2011 年盈江 5.8 级地震构造及地震活动特点分析[J]. 地震研究, 37(3): 390–398.

张智, 徐春明, 孟补在, 等. 2007. 洱源—江川宽角地震剖面的地壳反射特征[J]. 地球物理学报, 50(4): 1082–1088.

张智, 赵兵, 张晰, 等. 2006. 云南思茅—中甸地震剖面的地壳结构[J]. 地球物理学报, 49(5): 1377–1384.

张中杰, 白志明, 王椿镛, 等. 2005. 三江地区地壳结构及动力学意义: 云南遮放—宾川地震反射/折射剖面的启示[J]. 中国科学(D辑), 35(4): 314–319.

- 赵小艳, 韩立波, 苏有锦, 等. 2013. 2011 年云南盈江  $M_s5.8$  级地震序列重定位[J]. 中国地震, 29(4): 438 – 447.
- 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 ]. Bull. Seism. Soc. Am. , 102(2) : 639 – 649.
- Deng Q. D., Zhang P. Z., Ran Y. K., *et al.* 2003. Basic characteristics of active tectonics of China[ J ]. Sci. China Ser D. , 46(4) : 356 – 372.
- Lei J. S., Zhang G. W., Xie F. R., *et al.* . 2014. The 20 April 2013 Lushan, Sichuan, mainshock, and its aftershock sequence; tectonic implications[ J ]. Earthquake Science, 27(1) : 15 – 25.
- Lei J. S., Zhang G. W., Xie F. R., *et al.* . 2012. Relocation of the 10 March 2011 Yingjiang, China, earthquake sequence and its tectonic implications[ J ]. Earthquake Science, 25(1) : 103 – 110.
- 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.
- 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.

## Research on Difference of Sequence Distribution before and after Yingjiang $M_s6.1$ Earthquake in Yunnan Province in 2014

XU Fu-Kun<sup>1</sup>, ZHANG Yan-Qi<sup>1</sup>, SU You-Jin<sup>1</sup>

(Yunnan Earthquake Administration, Kunming 650204, Yunnan, China)

### Abstract

Aiming on analyzing the temporal and spatial distribution of the sequence before and after the Yingjiang  $M_s6.1$  earthquake in Yunnan on May. 30, 2014, basing on the waveform data recorded by Seismic Network of Yunnan Province and the corresponding observation reports, we relocated the mainshock by using the 3D velocity model of Yunnan and Sichuan provinces (LOC3D), and then relocated the aftershock sequences during May. 24 and June. 30, 2014 by using the double-difference relocation algorithm. The result is showed that the distribution of the sequences revealed the local geometric structure of the rupture region, and there were great difference of the spatial distribution between  $M_s6.1$  earthquake sequence and  $M_s5.6$  earthquake sequence, which indicated that the whole sequence was multiple main shock type. Furthermore the temporal and spatial distribution of later aftershocks of  $M_s5.6$  sequences had a trend of converging to the epicenter of the further  $M_s6.1$  earthquake.

**Key words:** Yingjiang earthquake sequences; the double-difference relocation; distribution of aftershock; LOC3D velocity model