赵小艳、韩立波、苏有锦等,2013,2011年云南盈江 M₈5.8地震序列重定位,中国地震,29(4),438~447。

2011 年云南盈江 M_s 5.8 地震序列重定位

赵小艳¹⁾ 韩立波²⁾ 苏有锦¹⁾ 刘自凤¹⁾

1) 云南省地震局,昆明市北辰大道 842 号 650091

2) 中国地震局地球物理研究所,北京 100081

摘要 利用云南数字地震台网和腾冲火山台网记录的 2011 年 1~12 月震相数据,采用 Hypo2000、HypoDD 定位方法对 2011 年盈江 M_s5.8 地震序列的前震、余震进行了重新定位。定 位结果显示地震分布较定位前更为集中。前震活动主要沿大盈江断裂呈 NE 走向分布。余震 呈共轭分布:一支沿大盈江断裂呈 NE 向分布,另一支沿垂直于大盈江断裂的隐伏错断呈 SSE 向分布。余震分布存在着稀疏段落,可能对应着前震主要破裂区域。

关键词:地震定位 盈江地震序列 共轭地震

[文章编号] 1001-4683 (2013) 04-0438-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

滇西地区地处青藏高原东南边缘,东与川滇菱形块体相接,西北与印度板块的东北触 角相邻,是我国大陆构造活动强烈且强震频发地区之一。滇西地区主要分布着 NW 向、NE 向和 SN 向等 3 组活动断裂带(图 1)。NE 向断裂主要位于澜沧江断裂以西地区,该组断裂 大体以等间距平行展布,断裂性质以左旋走滑为主,断裂活动导致了一系列新第三纪、第 四纪断陷盆地的形成,并沿断裂带呈串球状分布。第四纪以来该组断裂的活动性开始加 强,断裂运动以左旋走滑兼具张性为主,错断了不同的地质体和地貌单元(谢富仁等, 2001)。

滇西的盈江地区地处喜马拉雅山南延横断山脉的西南端,为高黎贡山支系西南余脉构成的山地,地质构造复杂,为云南地震多发区域(季建清等,2000)。2008年以来,该地区连续发生了3组4次*M*_s5.0以上地震,即2008年3月21日*M*_s5.0,8月20、21日*M*_s5.0,*M*_s5.9和2011年3月10日*M*_s5.8地震。其中,2011年3月10日盈江*M*_s5.8地震造成25人死亡和134人重伤,经济损失超过23亿元^①。房立华等(2011)在震后迅速利用双差定位法对此次地震主震及余震进行了精确定位,发现余震分布呈现两个优势方向,一支沿大盈江断裂呈 NE 向分布,另一支则沿大盈江断裂中段和北东段的错断分布。Lei 等(2012b)利用云

[[]收稿日期] 2013-03-29; [修定日期] 2013-05-19

[[]项目类别] 国家"十二五"科技支撑计划(2012BAK19B01-07)资助

[[]作者简介] 赵小艳,女,1982年生,主要从事地震预测研究工作。E-mail:staryan82108@ sina.com 通讯作者:韩立波,男,副研究员,E-mail:chinakkmm@ gmail.com

① 云南省地震局,2011,2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级地震灾害直接损失评估报告

南数字地震台网以及临时地震台站的数据对该序列进行了精定位,结果也显示了明显的共 轭破裂特征;Lei等(2012a)还通过对小滇西地区的速度成像分析了盈江地震的可能成因, 认为盈江地震是由与火山有关的热物质上涌引起的。赵小艳等(2012)也对 2011 年盈江地 震序列 M_s≥4.0 地震震源机制解进行了研究,初步讨论了发震构造。这些成果丰富了对于 此次地震的认识,但对于前震、主震、余震之间的关系仍缺乏综合的分析,本文旨在借助重新 定位后地震的时空分布来讨论三者之间的关系。



图 1 2008 年以来滇西地区地震序列震中分布及构造背景

1 方法与资料

1.1 方法

高精度的定位能更加准确显示地震序列的空间分布和发震构造,使得分析地震活动的 三维空间分布特征、地震分布与断裂构造活动的关系,进而探讨地震活动的成因成为可能。 本文中首先用 Hypo2000 定位方法(Klein,1978)对 2011 年 3 月 10 日盈江 M_s5.8 地震序列 进行了绝对定位。其原理是首先计算近场特定模型下的走时表,再通过走时反演确定地震 的震中位置和深度。经该方法定位后给出的震源位置比"月报"、"速报"目录给出的初始震 源位置精度更高。随后用双差法(Waldhauser et al,2000)进行相对定位。其原理是通过计 算一组丛集的地震中的 2 个地震之间的走时差来进行精确定位。该方法用信号的走时差反 演震源位置,能够有效地消除震源至台站之间的共同传播路径效应,因受速度模型的影响较 小,因而能得到较为准确的定位结果。双差地震定位法反演的是一组丛集地震中的每个地 震相对于该丛集的矩心的相对位置,因受速度模型、台站分布、震相数据质量等影响,时间丛 矩心容易出现整体性的偏差。故一般在双差定位前,需要首先获得较为准确的初始位置。 为此,本文首先用 Hypo2000 方法给出比"速报"、"月报"目录相对精确的初始位置,以减小 定位误差。

1.2 资料

2011 年盈江 M_s5.8 地震序列持续时间较长,本文收集了云南地震台网中心 2011 年1~12 月的震相数据(97.8°~98.1°E,24.6°~24.8°N)。由于震中距越远,波形记录中各种反射、折射震相叠加,导致震相到时越难以精确读取。因此,在挑选震相时只选用了2级以上地震、震中距在 200km 范围内共计 18 个台站的震相数据,以保证震相读取以及定位结果的可靠性。

在进行双差定位计算时,需要确定 P、S 波的先验权重。由于 S 波震相不易识别,使得其 走时读取精度要比 P 波震相低很多,所以在实际操作中分别对 P 波、S 波到时赋予 1.0、0.25 的权重。在挑选地震时,保证每个地震至少有 6 个震相记录。事件对之间的最大距离为 15km,事件对使用的最大震相对的数目为 50,每一个事件相邻的最大数目为 10 个。按照上 述标准,共计挑选出了符合条件的 748 次 2.0≤*M*≤5.8 地震,共计 10273 条 P、S 波震相数 据。

由于震相数据较多,迭代计算时采用共轭梯度法。共采用6组迭代,每组迭代20次,阻 尼值设为80。前2组迭代时,不施加约束条件;后4组迭代中,不断降低标准偏差的倍数, 舍去残差大于截断值的震相数据,以降低定位的误差。每次迭代利用上次迭代的结果更新 震源位置、残差和矩阵,将每一次迭代得到的残差大小作为下一轮迭代的加权函数,经过多 次迭代,直到得到稳定解。

1.3 模型

现有的关于盈江地区的分层速度模型研究结果并不多。大多数区域人工地震测深及速度结构反演研究主要集中于与盈江相邻的腾冲地区。由于腾冲地区为著名的火山区,区内具有显著的上地幔顶部低速度异常的特征,上地壳内存在与岩浆有关的热物质,故上地壳和上地幔均有大面积的低速层(赵慈平,2008;Zhao et al,2004)。而盈江与腾冲相距 70km,并无直接的研究结果表明盈江地区也存在低速层。2011 年盈江 5.8 级地震发生后,房立华等(2011)参考了胡鸿翔等(1986)的人工地震测深等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。本文的 Hypo2000 和 HypoDD 定位中,同样采用了该速度模型。

2 地震序列重定位

2.1 序列重定位结果

经过上述重定位后,最终得到了 2011 年 3 月 10 日盈江 M_s5.8 地震序列 728 个事件的 震源位置,其中包含 313 个前震和 414 个余震。重新定位后,走时均方根残差由定位前的 0.7216 s 降为 0.1159 s;东西向、南北向和垂直向定位平均误差分别为 0.4956、0.4954、 0.8491km。利用云南地震台网月报目录给出了定位前的震中分布情况(图 1)。精定位之前,地震分布分散,无法看出地震的优势分布方向。定位后的震中和震源深度分布有显著变 化。主震震中位置为 24.724°N、97.862°E,这一结果与房立华等(2011)的结果相近,而震源 深度为 11.7km,则介于房立华等(2011)与 Lei 等(2012b)的结果之间。

余震分布呈现两个优势方向,一支沿大盈江断裂呈 NEE 向分布,另一支沿着近似垂直 于大盈江断裂的 SE 向错断呈 SSE 向分布。这一分布特征与房立华等(2011)以及 Lei 等 (2012b)结果一致。Lei 等(2012b)据此推测沿 SSE 向存在着隐伏断层。图 2 给出了 2011 年盈江 5.8 级地震不同时段内余震震中分布,由图 2 可见,主震发生后早期的余震优先破裂 方向为 SSE 方向,这一结果与房立华等(2011)的结果略有不同,而 Lei 等(2012b)虽给出了 两天内的余震分布,却未给出其随时间的变化特征。重定位结果也显示,主震后仅仅 5 分钟 发生的 M4.7 地震发生在主震东南(图 2 (a)),在垂直于大盈江断裂的断层之上。另外,从 余震分布来看,沿大盈江断裂带 97.9°E 附近存在着余震稀疏段落。研究表明,余震多发生 在主震主要破裂区周围,这似乎暗示了主震的主要破裂区位于破裂起始点 NE 方向,即破裂 沿大盈江断裂向 NE 向传播,因而造成了盈江县城巨大的破坏,这与震后灾害调查给出的烈 度分布也一致。



图 2 2011 年盈江 5.8 级地震不同时段内余震震中分布图

圆点表示余震震中,圆点的不同颜色随天数增加由蓝变红;黑色曲线表示大盈江断裂;黑色五角星表示用双差定位方 法确定的主震震中位置;色标表示距离每次起始时间的时间差(起始时间在每幅图的左上角)

图 3 给出了 2011 年盈江 5.8 级地震前震中分布情况。由图 3 可见,前震主要沿大盈江 断裂带分布,没有出现共轭分布现象。这一情形与通常共轭地震表现出的前震活动与主震 破裂共轭的特征(张四昌,1991)并不一致。从 2011 年 1 月 1 日起前震沿大盈江断裂带向 NE 迁移的趋势在 Lei 等(2012a)的结果中也有所体现。97.9°E 附近出现了小震密集区,正 好为余震分布稀疏区域。分析认为,出现余震稀疏段可能是因为 1 月 1 日~3 月 9 日的前 震已造成此段充分破裂,因此余震直接跳过此段往 NE 向破裂。

图 3 2011 年盈江 5.8 级地震前震震中分布图 圆点表示地震震中;黑色实线表示大盈江断裂。

图 4 为前震与余震震源深度分布。从图中可见,2011 盈江 5.8 级地震序列前震、余震 深度多集中在 10km 附近。考虑到主震的深度定位结果为 11.7km,这说明前震与余震的深度分布也多围绕着主震。

图 5 给出了 21 次 $M_L \ge 3.5$ 地震的震源机制解、原始目录给出的地震震中以及重新定位 后的震中等。可以看出,重新定位后的 21 次 $M_L \ge 3.5$ 地震震中位置更加集中,21 次地震 中有 19 次地震沿着大盈江断裂带走向呈 NEE 向展布,无震中完全重叠现象。而原始目录 给出的震中有一半的地震重叠在一起,震中图上只能分辨出 11 个地震。可见,精定位结果

展示的较大地震的空间分布更符合真实的构造特征。

图 5 盈江地震序列 21 次 M_L≥3.5 地震震中分布 灰色圆为精定位后的震中,圆圈大小与震级成正比;黑色实心圆为主震;黑色加号为原始目录给 出的震中,加号大小与震级成正比;黑实线为大盈江断裂;黑色虚线为剖面位置示意

利用滑动角来判断震源机制类型(即发震断层的错动性质),其判定标注为:45°~135° 为逆冲型;-135°~-45°为正断型;其余为走滑型。表1给出了这21个地震的一个断层面 的走向、倾角、滑动角等参数(由这3个值可以得到另一节面及P、T、N轴参数)以及震源机 制类型。由表1可见,除2011年3月10日13时03分*M*_L4.7地震外,其他20次地震都为 纯走滑型地震,都具有 NNE-SSW 向近水平的 P轴。从空间分布特征来看(图5),其中沿大 盈江断裂带走向的19次地震均为单一的走滑型地震;大盈江断裂带共轭方向绝大多数地震 震级小于*M*_L3.5,受台站分布影响无法给出理想的震源机制解结果,仅有2次较大地震得到 了震源机制解结果,其中1次为正走滑地震。由于震例偏少,仅有的1次与众不同的震源机 制结果并不一定表明大盈江共轭方向的错断断层具有不同的运动性质。另外,本文计算的 震源机制解倾角也分布在 60°~80°,与大盈江断裂带的倾角较陡(55°~75°)(安晓文等, 2009)的特征相吻合。

2.2 余震优势破裂方位的确定

Lutz (1986)及Lutz 等 (1995)从概率格点分布的概念出发,提出了在有限空间范围内基于二维小震分布检测可能的线性构造(破裂迹线)、并测量其优势分布方位的定量方法。如图 6 (d)所示,在二维空间中以主震位置为原点,以正北方向为 0°,顺时针方向统计不同方位内的余震频次 $n(\theta)$ 。 $n(\theta)$ 峰值对应的 θ 即余震的优势分布即优势破裂方位。根据 $n(\theta)$ 随 θ 分布的峰值特征可粗略判定序列破裂形式:①单侧破裂 ($n(\theta)$ 单峰分布);②双侧破裂

(n(θ) 双峰分布,两峰之间大约相差 180°);③共轭破裂(双峰分布,两峰之间大约相差 90°);(4) 其它更复杂的破裂形式。

表1

2011 年盈江地震序列 $M_1 \ge 3.5$ 地震震源机制解

序号	日期 (年-月-日)	发震时刻 (时:分:秒)	震级	精定位深度 (km)	走向 (°)	倾角 (°)	滑动角 (°)	震源机制 类型
1	2011-01-01	15:31:58	4.6	12.333	231	71	7	走滑
2	2011-01-01	20:58:12	3.5	12.834	247	58	17	走滑
3	2011-01-02	07:33:34	4.8	11.884	232	73	9	走滑
4	2011-01-02	07:44:30	4.0	13.767	230	67	12	走滑
5	2011-01-02	12:16:01	3.5	12.851	349	68	6	走滑
6	2011-01-14	22:50:34	4.3	11.678	243	72	12	走滑
7	2011-01-15	02:12:06	3.5	12.130	221	72	16	走滑
8	2011-02-01	15:11:20	4.8	14.653	249	78	10	走滑
9	2011-02-03	19:21:09	3.5	12.648	293	66	9	走滑
10	2011-02-05	15:54:19	3.9	13.527	219	65	17	走滑
11	2011-02-07	04:09:30	3.5	14.258	249	58	10	走滑
12	2011-02-08	02:47:09	3.9	11.567	178	62	10	走滑
13	2011-02-09	05:49:04	3.7	9.840	240	65	- 9	走滑
14	2011-02-13	12:51:39	3.9	12.743	213	81	15	走滑
15	2011-03-10	12:58:10	5.8	11.666	248	77	19	走滑
16	2011-03-10	13:03:56	4.7	11.884	211	68	- 51	正断
17	2011-03-10	20:41:36	4.5	12.379	259	85	17	走滑
18	2011-03-10	20:42:35	4.1	13.187	244	49	2	走滑
19	2011-04-01	06:54:27	4.1	15.950	244	80	- 19	走滑
20	2011-08-31	00:23:50	4.3	15.322	250	84	19	走滑
21	2011-09-06	14:18:50	3.6	12.333	242	34	11	走滑

对于由速报目录给出定位结果的地震,根据目前的地震定位精度, θ 以 10°为间隔进行统计;精定位后的 θ 可以适当减小,本文取 θ =2°。如图 6(a)所示 2011 年盈江 5.8 级地震余震序列分布优势方向集中在 71°、147°,为双峰的共轭分布;而前震则表现出单峰的单侧破裂特征。

3 讨论和结论

本文利用 hypo2000 方法和 hypoDD 方法对 2011 年 3 月 10 日盈江 M_s5.8 地震序列进行 了重新定位。定位结果显示地震分布较定位前更为集中。前震活动主要沿大盈江断裂呈 NE 走向分布。余震呈共轭分布:一支沿大盈江断裂呈 NE 向分布,另一支沿垂直于大盈江 断裂的隐伏错断呈 NNW 向分布。余震主要分布在主震破裂区域外,而前震则在此区域有 集中现象。

根据断裂的活动情况,大致可以将大盈江断裂分为3段:北东段(梁河盆地边缘断裂)、 中段(盈江盆地边缘断裂)和南西段(盈江盆地边缘至缅甸),彼此呈左阶羽列式排列。这3 段断裂的连接处发生同步轴状弯曲位错(安晓文等,2009;常祖峰等,2011)。本次盈江5.8 级地震发生在大盈江断裂带中段与北东段的交界部位。本文定位结果显示出大部分余震分 布在大盈江断裂中段与北东段的交界部位,主震东南向出现了余震集中区,与分布在大盈江 断裂带走向的余震形成了共轭,这一结果与房立华等的(2011)结果一致。该交界部位可能

(a) 全部序列优势分布方位;(b) 前震优势分布方位;(c) 余震优势分布方位;(d) 确定余震优势分布方位示意图

是由于大盈江断裂带的左旋运动在中段、北东段连接处作用,导致交界部位出现了错断断 层。大盈江断裂为左旋走滑,且两段之间为左阶羽列式排列,使得交界部位处于拉伸状态 (虢顺民等,1999)。从4级以上地震震源机制解来看,此次地震序列中唯一的正断型地震 就是发生在此处,说明交界部位性质较为破碎,有利于余震的发生,从而使得2011年盈江地 震余震分布出现了共轭现象。

值得注意的是,本次盈江 5.8 级主震前震中区发生了 5 次 4 级以上地震,最大 4.8 级, 而这些 4 级地震的余震并没有形成类似于 5.8 级地震余震的共轭分布。这似乎表明尽管大 盈江断裂带中段、北东段交汇处介质较为破碎,但这些地震还不足以在该区触发地震。关于 在共轭断裂触发地震的量级以及触发地震的数量或许是一个值得研究的科学问题。 相对稳定状态。2011年盈江 5.8 级地震余震序列发生共轭破裂后,震区地震活动逐渐正常衰减,也验证了这种现象。

致谢:本文得到了中国地震局地球物理研究所蒋长胜博士的指导。中国科学院测量与地球物理研究 所郑勇博士、谢祖军博士、葛粲博士为本研究提供了美国圣路易斯大学朱露培先生的 CAP 方法反演程序。 中国地震局监测预报司预报管理处马宏生博士、中国地震台网中心周龙泉博士、中国地震局地震预测研究 所邵志刚博士提出诸多有益建议,四川省地震局张致伟在画图方面也给予了帮助,在此一并致谢。

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,地震地质,32(2),193~197。

常祖峰、陈刚、余建强,2011,大盈江断裂晚更新世以来活动的地质证据,地震地质,33(4),877~888。

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,地震学报,33(2),262~267。

冯希杰、苏刚、麻水歧,1993,中国大陆共扼破裂强震,内陆地震,7(3),225~233。

- 號顺民、向宏发、徐锡伟等,1999,滇西大盈江断裂带晚第四纪活动的初步研究,见:中国地震局地质研究所,活动断裂研 究(7),北京:地震出版社。
- 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,地球物理学报,29(2),133~144。
- 季建清、钟大赉、张连生,2000,滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学、及对青藏高原东南部块体运动的意义,地质科学, 35(3),336~349。
- 苏刚、冯希杰、麻水歧,1992,局部地区强震活动中止的可能标志一共轭破裂,国际地震动态,(7),1~5。

谢富仁、苏刚、崔效锋等,2001,滇西南地区现代构造应力场分析,地震学报,23(1),17~23。

张四昌,1991,中国共轭地震构造研究,中国地震,7(2),69~76。

- 赵慈平,2008,腾冲火山区现代幔源氦释放特征及深部岩浆活动研究,博士论文,北京:中国地震局地质研究所。
- 赵小艳、韩立波、龙锋,2012,2011 年盈江序列 $M_{\rm s}$ ≥4.0 地震震源机制解与发震构造研究,地震研究,45(4),352~359。
- Klein F W, 1978, Hypocenter location program HYPOINVERSE Part I: Users guide to versions 1, 2, 3 and 4. U S Geol Surv, Open-File Rept, 78 ~ 694.
- Lei J S, Xie F R, Mishra O P, et al, 2012a, The 2011 Yingjiang, China, Earthquake: A Volcano-Related Fluid-Driven Earthquake? Bull Seis Soc Am, 102 (1), 417 ~ 425.
- Lei J S, Zhang G W, Xie F R, et al, 2012b, Relocation of the 2011 M5. 8 Yingjiang, China, earthquake sequence and its tectonic implications, Earthq Sci, 25, 103 ~ 110.
- Lutz T M, 1986, An analysis of the orientation of large-scale crustal structures: a statistical approach based on areal distributions of point-like features, J Geophys Res, **91** (B1), 421 ~ 434.
- Lutz T M, Gutmann J T, 1995, An improved method for determining and characterizing alignments of point-like features and its implications for the Pinacate volcanic field, Sonora, Mexico, J Geophys Res, 100 (B9), 17659 ~ 17670.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California, Bull Seis Soc Am, **90**(6), 1353 ~ 1368.
- Zhao C P, Shangguan Z G, Cheng K H, et al, 2004, Conceptual model of hydrothermal explosion in Rehai Geothermal Field, Tengchong Volcanic-Geothermal Area, southwest China, Earthquake Research, 27 (suppl.), 101 ~112.

Relocation of $M_s 5.8$ event of the 2011 Yingjiang earthquake sequence

Zhao Xiaoyan¹⁾ Han Libo²⁾ Su Youjin¹⁾ Liu Zifeng¹⁾

1) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650024, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract On the basis of earthquake phases recorded by the Yunnan Digital Seismic Network and the Tengchong volcano broadband seismic instruments in January ~ December, 2011 and the location results by Hypo2000 absolute location methods as the initial value, we obtained the locations of the foreshocks and aftershocks of $M_s 5.8$ Yingjiang sequence with double-difference location method. Our results show that the relocated aftershocks have a conjugate characteristic: earthquakes dominantly occurred along the Dayingjiang fault in ENE direction and another extended toward the SSE along a blind fault which was vertical to the Dayingjiang fault. The seismicity gap of aftershocks happens to be the foreshocks intensive areas.

447