

李涛、付虹、徐甫坤, 2018, 2015年5月云南双柏 M_L 4.1地震活动机理初探, 中国地震, 34(2), 337~349.

2015年5月云南双柏 M_L 4.1地震活动机理初探

李涛¹⁾ 付虹¹⁾ 徐甫坤²⁾

1) 云南省地震局, 昆明市北辰大道148号 650224

2) 云南天文台, 昆明 650216

摘要 2015年5月19日9时58分, 云南双柏、峨山一带出现密集的小震活动, 并于6月14日发生 M_L 4.1地震, 形成显著的震群事件。本文利用双差定位法对该震群进行精定位, 结果显示, 重新定位后震中分布优势方向更明显, 主要沿绿汁江南段断裂呈 NNE 向分布, 震源深度为 6~12km, 其中, 又以 8~10km 最具优势。与原始数据相比, 重定位后残差明显减小, 走时残差平方和由原来的 0.303s 降为 0.034s, 震源位置估算误差在 EW 方向平均为 0.21km, 在 NS 方向平均为 0.173km, 在垂直方向平均为 0.175km; 利用广义极性振幅技术 (GPAT) 方法, 计算得到了 24 个 $M_L \geq 2.5$ 地震的震源机制解, 结果显示, 此次震群的震源机制类型绝大部分表现为正断性质, 与该区历史地震多为走滑的结果有所差异。结合震区附近的龙门水库蓄水水位和该震群的频度-震级关系分析认为, 双柏震群活动与水库蓄水过程密切相关, 该震群的发生是龙门水库水体载荷加载而引起正断层产生错动的结果。

关键词: 双柏地震 双差定位法 震源机制解 发震机理

[文章编号] 1001-4683(2018)02-0337-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

在初始构造应力场中, 流体对局部地震活动的触发起着重要的作用, 人为因素导致的空隙流体压力变化, 例如水库蓄水或深部加压注水等均可能诱发地震 (Aki et al, 1982; Talwani et al, 1984; 刁守中等, 1990; Zond et al, 1997; Phillips, 2000; Gupta, 2002)。虽然水库蓄水产生的附加应力很小, 不能使完整岩体产生破坏, 但是巨大体积的蓄水可以使库底水压增加, 流体载荷通过水体重力对库区地下岩体的加载, 可以促使已有初始应力的突然释放, 进而改变库区原有应力的平衡状态, 并触发地震。近几十年来, 随着国内外大型水库的兴建, 已有许多水库蓄水诱发地震的例子 (胡先明, 2004; 陈翰林等, 2009; 马文涛等, 2013; 陈俊华等, 2013; 张永久等, 2013)。

2015年5月19日9时58分, 云南双柏、峨山一带发生了 M_L 2.1地震, 之后出现密集的小震活动, 并于6月14日发生 M_L 4.1地震, 形成显著的震群事件。该震群位于南华扭动褶皱区东缘, 该区域以 NNW 向为长轴的褶皱和部分倾伏背斜为主, 区内断裂并不发育, 附近主要有 NW 向的楚雄建水断裂以及近 NS 向的绿汁江断裂和易门断裂 (苏有锦等, 2001)。距

[收稿日期] 2017-06-13; [修定日期] 2017-11-10

[项目类别] 云南省地震局传帮带项目 (C2-2014003) 资助

[作者简介] 李涛, 女, 1986年生, 工程师, 主要从事地震监测工作。E-mail: litao313@126.com

该震群 10km 的范围内有一龙门水库(图 1),该水库地处峨山县大龙潭乡以他斗村地界,属于绿汁江上梯级电站,坝高 28.5m,库容 620 万 m^3 ,自 2015 年 5 月 20 日开始蓄水并试行发电,且水位迅速达到 1021m。鉴于此次双柏震群活动与龙门水库蓄水在时间上存在明显的相关性,因此,研究此次震群的活动特征,并进一步研究水库地震发生的环境及机理十分重要。而龙门水库库区地震事件的精确定位是以上研究的基础,为提高定位的精度和质量,本文利用双差定位法对此次震群进行了精定位,并结合震源机制解,探讨该震群活动的孕育过程和发震机理。

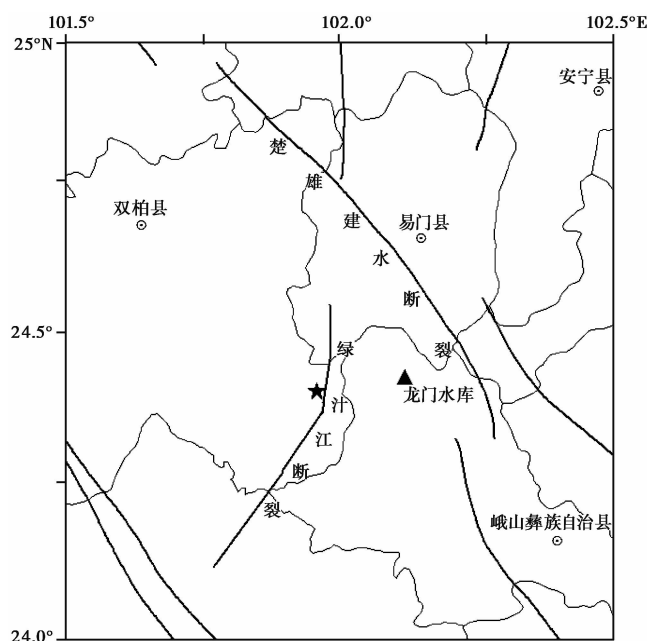
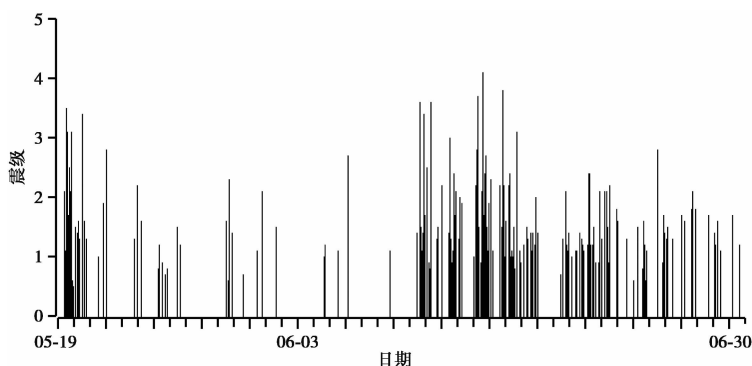


图 1 双柏震群及龙门水库的位置
五角星为双柏震群;三角形为龙门水库

1 地震活动概况与水库蓄水过程

1.1 地震活动概况

2015 年 5 月 19 日 9 时 58 分,云南双柏县、峨山县、易门县的交界处发生 $M_L 2.1$ 地震,同日,又发生 4 次 $M_L \geq 3.0$ 地震。从时间分布(图 2)来看,该震群经历了 2 个明显的地震密集期:一是自 5 月 19 日起,地震活动频繁,20 日之后地震次数明显减少;二是 6 月 10 日起,发生多次 $M_L \geq 3.0$ 地震,之后 2、3 级地震持续活跃,并于 6 月 14 日发生 $M_L 4.1$ 地震,3 级地震持续到 6 月 17 日,之后开始出现衰减,但 1、2 级地震仍持续活动。截至 6 月 30 日,云南地震台网一共记录到该区 $M_L > 0$ 地震 356 次(含单台记录 201 次)(图 1),其中, $M_L 0.0 \sim 0.9$ 的 82 次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 的 211 次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 的 48 次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 的 14 次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 的 1 次,最大震级地震为 2015 年 6 月 14 日 15 时 38 分发生的 $M_L 4.1$ 地震(24.415°N , 101.968°E),其微观震中位于双柏县东南的安龙堡附近。

图 2 2015 年双柏震群 $M_L > 0$ 地震 $M-t$ 图

1.2 水库蓄水过程

龙门水库自 2015 年 5 月 20 日开始蓄水,图 3 给出了水库蓄水水位与双柏震群的日频次、地震震级之间的关系。由图 3 可见,水库蓄水后,水位迅速上升,从 1021m 升至 1037m,5 月 27 日出现小幅回落,随后缓慢上升,并于 6 月 8 日达到最高水位 1038.5m,之后,水位在升降交替的过程中呈现总体下降的趋势。 $M_L > 0$ 地震日频次统计结果(图 3(a))显示,伴随水位的升降变化,双柏震群出现了 2 次比较明显的地震活动高频次过程,第 1 次是 5 月 19 日水位迅速上涨初期,共发生地震 46 次,之后,随着水位缓慢上升,地震频次明显减少。6 月 8 日龙门水库蓄水达到最高水位,随后,6 月 10 日地震又开始密集发生,出现第 2 次地震高频次活动,并于 6 月 14 日出现最高频次 67 次,之后,地震活动逐渐减弱。从水位和地震震级间的关系(图 3(b))可以看出,该震群经历了 2 次比较明显的能量释放过程。自 5 月 19 日,随着水位的升高,震级逐渐减小,直至 6 月 10 日左右开始增大,并于 6 月 14 日发生该震群的最大震级地震,即 M_L 4.1 地震,之后,震级又逐渐减小。

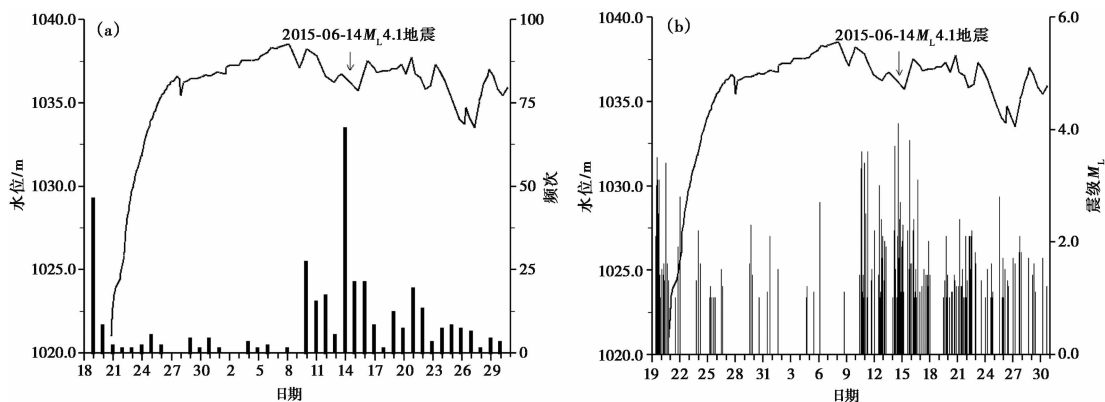


图 3 2015 年 5 月 18 日~6 月 30 日龙门水库蓄水与地震活动间的关系

(a) 水库水位与地震日频次间的关系;(b) 水库水位与地震震级 M_L 间的关系

由图 3 可见,此次双柏震群与龙门水库蓄水活动间有明显的时空相关性,是一次与水库蓄水过程直接相关的震群活动。整体来看,震群活动与水位变化较大的时段在时间上具有

同步性,且主要发生在水位处于下降期的卸载时段内。这可能是水库迅速蓄水导致库水的荷载作用加强,使得原有的应力平衡状态被打破,能量释放而产生地震的。为了进一步探索该震群的发震机理,笔者首先对地震进行精确定位,以便为后续研究提供较高精度的定位结果。

2 地震定位

2.1 双差定位方法

双差地震定位方法是 Waldhauser 等(2000)提出的一种研究丛集地震定位的有效方法,该方法使用地震对的走时差进行定位,最大限度地减小了速度模型对定位结果的影响。其基本原理为:如果 2 个地震震源之间的距离小于事件到台站的距离和速度不均匀的尺度,那么,则认为震源区与该台站之间的整个射线路径几乎相同。此时,在某个台站观测到的 2 个事件的走时差来自于事件之间的高精度的空间偏移。该方法不要求有主地震,适用于比主事件地震定位法空间跨度更大的地震群体,同时消除了主地震定位精度对待定地震定位精度的影响,因此,已被国内外地震学家广泛应用到实际的地震定位中(Waldhauser, 2001; Waldhauser et al, 2002、2004; 杨智娴等, 2003、2004a、2004b; 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; 刘文邦等, 2011; 房立华等, 2011)。

2.2 台站分布及资料

本文挑选了 2015 年 5 月 19 日~6 月 30 日至少被 3 个台站记录到的 155 次 $M_L > 0.0$ 地震,这些地震共有 P 波初至震相 1287 个, S 波震相 1146 个,本文只选取震中距 $\leq 300\text{km}$ 的 43 个台站(图 4)所记录到的 2165 个震相进行重新定位。

2.3 速度模型的选取

地震波速度模型对地震定位精度的影响很大,对地壳结构认识越精细,则地震定位精度越高。双差定位方法能够很好地克服横向不均匀性的影响,对地壳速度模型的依赖性相对较小,因此,本文采用水平分层速度模型。郑钰等(2008)曾利用川滇速度模型、中西部速度模型、PREM 模型和 AK135 速度模型对 2007 年云南普洱 6.4 级地震进行重新定位,从重定位事件的个数、平均残差的角度来考虑,PREM 模型相对比较好。因此,本文采用 PREM 速度模型。该模型共分为 6 层,各层速度如表 1 所示,波速比 v_p/v_s 设为 1.73。

2.4 定位计算

一般情况下,初至 P 波震相的读数精度高于 S 波,但本研究中地震震中距较小,震相比较单一, S 波的读数精度几乎不会受到影响。因此,计算过程中对 P 波、S 波读数分别赋予 1.0、0.7 的权重值。

在计算过程中,事件对与台站间的最大距离参数(MAXDIST)取 200km,采用共轭梯度法求解方程。进行 2 轮迭代,第 1 轮的 8 次迭代由地震的初始位置和先验权重开始,第 2 轮的 7 次迭代采用标准差的 3 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,直至得到稳定的解。

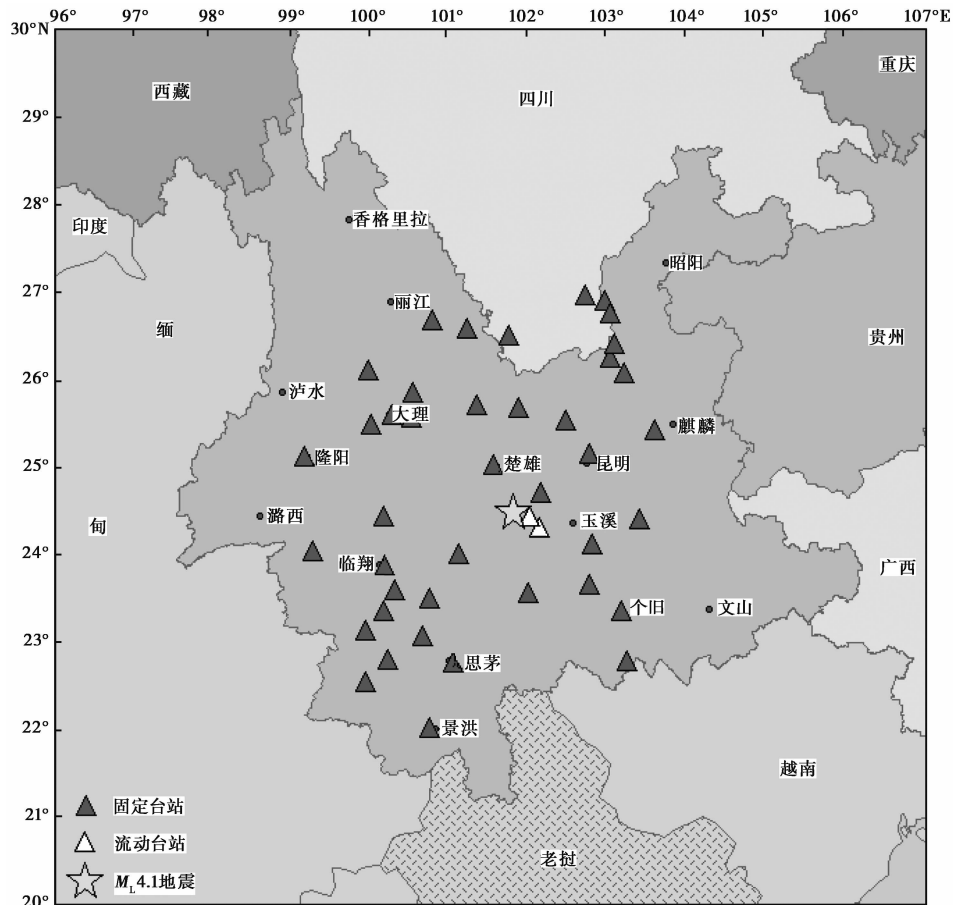


图 4 用于重新定位的震中距 $\leq 300\text{km}$ 的台站分布
黑色三角形为云南台网固定台;空心三角形为云南省地震局 2015 年 6 月 19 日在震区布设的 2 个流动台,其分别为安龙堡 (ALB) 台、富良棚 (FLP) 台;黄色五角星为 M_L 4.1 地震

2.5 定位结果分析

重新定位后,得到 142 个事件的震源位置,为原来地震的 91.6%。据此作出定位前后的地震空间分布图(图 5)。由图 5 可见,该震群发生于绿汁江断裂带南段的北端,其分布特征与该断裂的走向一致。重定位前后,地震的总体分布格局变化不大,这说明台网的初步定位结果在水平方向上已很精确,但经过双差定位得到的地震震中分布更加集中,外围少数地震被舍弃,并有向内收敛的趋势,呈现出明显的 NNE 优势分布方向。

为了分析地震的深度分布情况,笔者将地震分别沿经度和纬度方向进行投影(图 6)。

表 1 双差定位采用的速度模型

层序号	深度/km	P 波速度/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	0.0	1.45
2	3.0	5.80
3	15.0	6.80
4	24.4	8.11
5	71.0	8.08
6	80.0	8.20

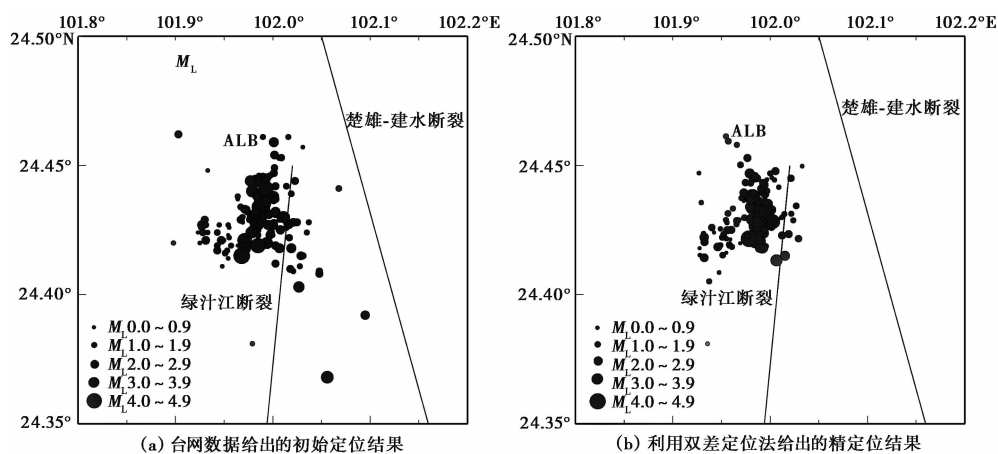
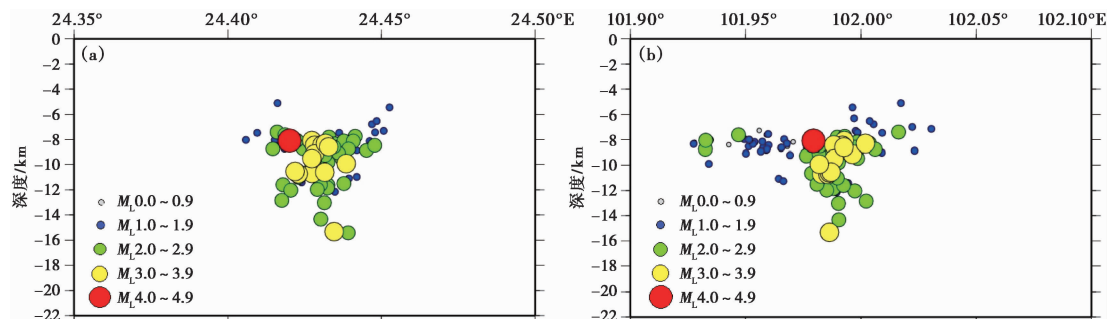
图5 双柏震群 $M_L > 0.0$ 地震重新定位前后的震中分布

图6 震源深度沿纬度方向(a)与经度方向(b)的投影

由图6所示的深度投影以及深度分布柱状图(图7)可见,双差精定位前后,地震的震源深度分布发生了变化。精确定位之前,深度为4~12km,且总体较为零散;而精确定位之后,深度优势分布在6~12km,其中,又以8~10km范围内更为明显。

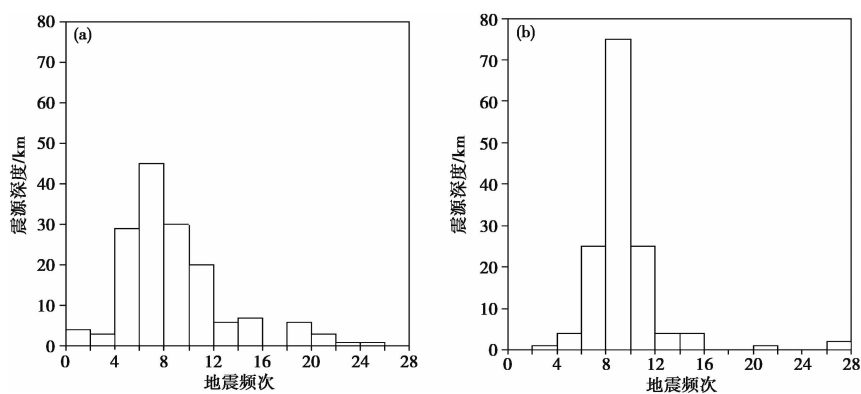


图7 双差定位前(a)、后(b)震源深度分布

2.6 误差分析

经过上述精确定位后,该地震序列走时残差平方和由原来的 $0.303s$ 降为 $0.034s$,得到的震源位置估算误差(2 倍标准偏差)在 EW 方向平均为 $0.210km$,在 NS 方向平均为 $0.173km$,在垂直方向平均为 $0.175km$ (图 8)。由图 8 可见,3 个方向上的定位误差基本为 $100\sim 300m$ 。

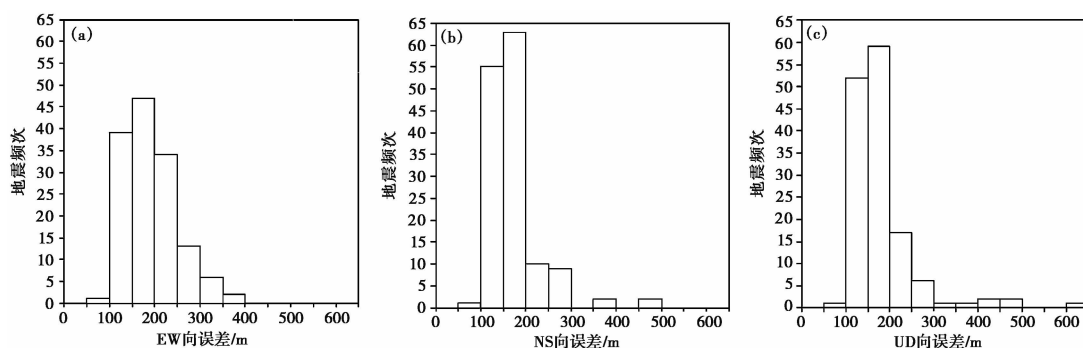


图 8 重定位后 EW 方向(a)、NS 方向(b)和 UD 方向(c)误差

3 $M_L \geq 2.5$ 地震震源机制解

3.1 方法原理

由于受小地震激发的能量有限、高频信号随震中距衰减快等因素的影响,在一般的地震台网中,能够清晰地记录小地震事件的台站数量仍非常有限。因此,在现有观测条件下,运用经典的初动-振幅类方法准确求解小地震的震源机制一直是一个棘手的问题。

在综合考虑现有方法优、缺点的基础上,严川等(2014)提出了一种地方、区域地震震源机制的非线性反演技术——广义极性振幅技术(GPAT)。该方法是对现有初动-振幅类方法的一般化,也是对包括远震震源机制反演在内的所有地震震源机制反演方法的一般化。因为该方法不仅考虑 P 波初动的极性,同时也包括了任何一个或多个振幅的极性,所采用的震相也不再局限于 P 波、S 波或面波,而是所有能在地震波记录上识别出来的震相的最大振幅都被采用。另外,它不但适合于地方地震、区域地震,也适合于远场地震。也就是说,根据 GPAT 的技术原理,三分向记录的任何极性信息和振幅资料都可被利用,且地震不分震级大小,都可用该方法来求解震源机制。与现有方法不同,该方法以观测波场与合成波场的相似性为准则,以观测矢量与合成矢量的相关系数为目标函数,并采用变步长网格搜索技术求解该目标函数,既保证了解的精度,又保证了解的稳定。从逐一考虑、综合考虑台站布局、台站数目、随机噪声、震中位置误差、震源深度误差和速度模型误差的数值实验结果来看,广义极性振幅技术是可行的,具有良好的抗干扰能力,这里不再赘述其原理。

3.2 计算结果

本文选取震中距 $100km$ 范围内的 5 个台站(YIM、CUX、TOH、YUJ 和 ZHY)所记录的波形资料,运用 GPAT 技术对 2015 年 5 月 19 日~6 月 30 日间的 28 次 $M_L \geq 2.5$ 地震进行反演,最终得到了 24 次地震的震源机制解(图 9)。由图 9 可见,该震群绝大部分地震的震源机制表现为正断性质,虽然震源机制并不完全相似,但可以确定的是,这些地震都是受拉张作用而发生的。24 次正断性质的震源机制中,大致分为比较典型的 3 类,第 1 类节面走向近似

NE-SW 向,如第 1、5、9、10、18、19、20 号地震;第 2 类节面走向近似 NW-SE 向,如第 17、21 号地震;第 3 类节面走向近似 N-S 向,如第 2、8、14 号地震。第 1 类震源机制所占的比例相对较高,节面 NE-SW 向的分布特征与震中的优势分布方向相同,表明这些地震可能由 NE-SW 向的断裂活动引起。

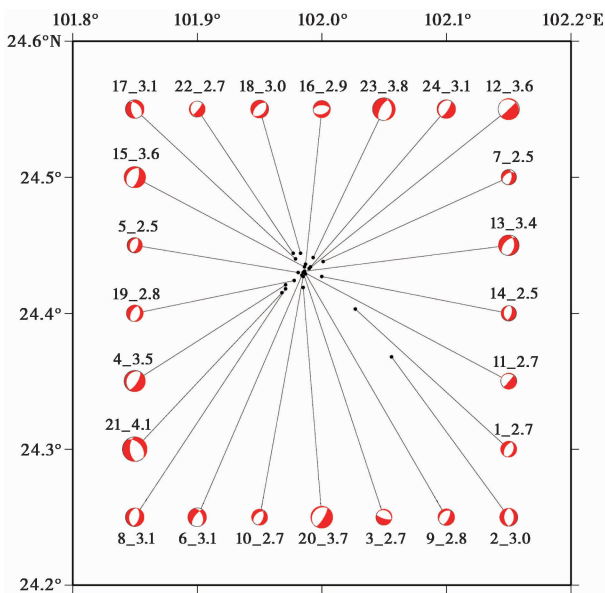


图 9 双柏震群 24 次 $M_L \geq 2.5$ 地震震源机制解

黑色圆圈为 24 次 $M_L \geq 2.5$ 地震震中;所得震源机制解前面的数字为地震序号,后面为 M_L 震级

图 10 为图 9 中第 20 号地震的详细结果。由图 10 可见,观测资料与合成资料的相关系数达 99.5%,说明本文的反演结果是准确可靠的。

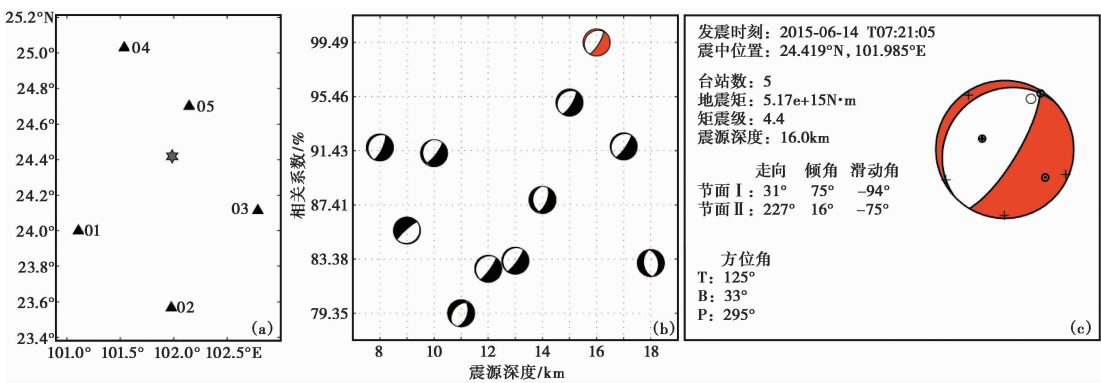


图 10 第 20 号地震的反演结果

图(a)为计算震源机制所使用的台站分布及震中位置,六角形为震中,三角形为台站;图(b)为目标函数值(相关系数)随震源深度的变化,红色沙滩球为最佳结果;图(c)为震源机制解详细结果

对所得到的震源机制解参数 P 轴、T 轴的方位角每 10°间隔内频数归一化分布(图 11)。由图 11 可见,P 轴方位主要表现为 NW 向,T 轴方位主要表现为 NWW 向。

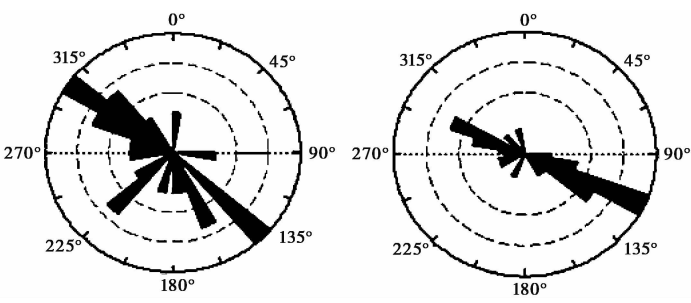


图 11 P 轴(左)、T 轴(右)方位角分布

本文搜集整理了 2000 年以来楚雄区域($24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $101^{\circ}\sim 102.4^{\circ}\text{E}$)内 18 次 $M\geq 3.0$ 历史地震的震源机制解,图 12 为震源机制空间分布图。由图 12 可见,18 次地震中,仅 2008 年 10 月 27 日武定 $M3.0$ 地震为正断型地震,2009 年 7 月 10 日姚安 $M5.2$ 地震和 2012 年 11 月 10 日富民 $M3.9$ 地震为逆断型地震,其余 15 次均为纯走滑型地震。

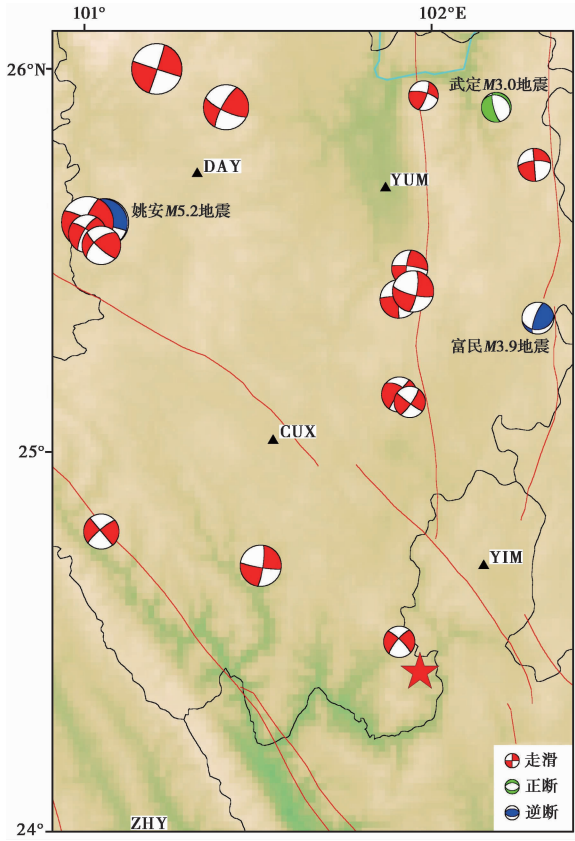


图 12 2015 年双柏地震震区附近的历史地震震源机制空间分布
红色五角星为双柏 $M_L4.1$ 地震震中

结合本文得到的结果可知,此次震群的震源机制类型与历史地震有所差异,P 轴、T 轴走向较历史地震优势分布方向有所偏转,这些变化表明该地区应力在背景应力不变的情况下

可能有所调整。

4 发震机制分析

4.1 地质概况

新构造期,中国大陆主应力方向发生重要调整,滇藏地区成为主要的构造活跃区。来自周邻板块不同方向的推挤力,通过红河断裂、小金河-龙门山断裂、鲜水河-小江断裂等大型深断裂剪切运动的调节,位于印支地块、扬子地块、松潘-甘孜地块之间的川滇菱形块体成为应力集中区和重要构造转换部位。楚雄盆地位于扬子板块西南缘川滇菱形块体南部的滇中次级块体,由红河断裂、小金河-龙门山断裂和小江断裂所围限,这3条深大断裂在中、新生代发生多次走滑运动,在楚雄盆地形成NW、SN、NE向3组扭动断裂系统(杨庆道等,2014)。

此次双柏震群发生于楚雄盆地的中部(图13中红色五角星处),即川滇菱形块体的东南部,在地质构造体系中处于云南山字型构造西翼内侧马蹄形盾地北部,西翼受青、藏、滇、缅“歹”字型构造东支中段的影响,构造活动性加强,NW向断裂、褶皱发育,主压应力为SW-NE向;东北部为川滇经向构造体系绿汁江断裂带,发育着近SN向褶皱、断裂以及派生“入”字型断裂;而中、北部为反时针旋卷构造。双柏震群震区位于南华扭动褶皱区东缘,以NNW向

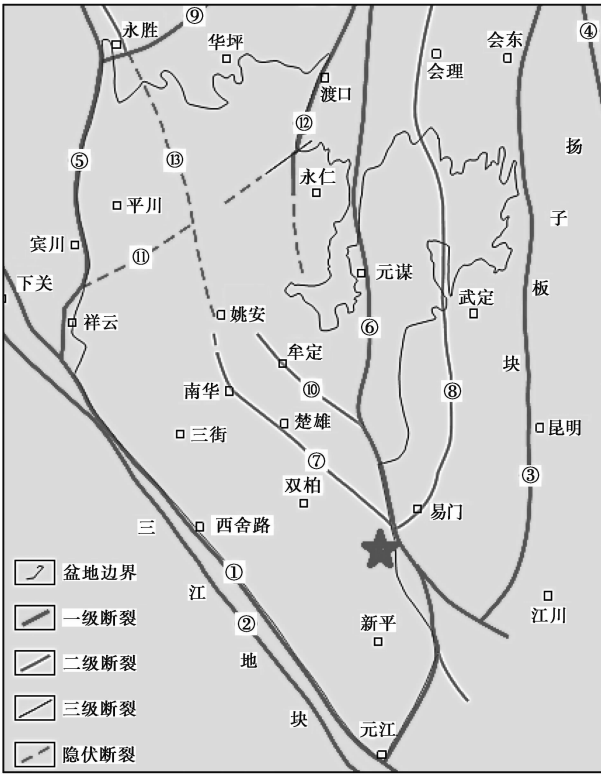


图 13 楚雄盆地主要断裂分布

①红河断裂;②哀牢山断裂;③普渡河断裂;④小江断裂;⑤程海断裂;⑥绿汁江断裂;⑦楚雄-蒙自断裂;⑧易门断裂;⑨普河断裂;⑩牟定断裂;⑪宾川断裂(隐伏);⑫猛虎断裂;⑬石羊断裂(隐伏)。红色五角星为双柏震群的参考位置

为长轴的褶皱和部分倾伏背斜为主,区内断裂并不发育,附近主要有 NW 向的楚雄-蒙自断裂及近 NS 向的绿汁江断裂、易门断裂(苏有锦等,2001)。此次双柏震群发生于近 SN 向的绿汁江断裂附近,该断裂倾角 65° ,断面倾向 E,属于正断层。

4.2 震群发震机制分析

已有研究表明,水库地震的发生不仅与库水加卸载过程有关,而且还与水库库容、构造地质条件、水文地质条件、岩性条件、应力条件等因素有关(Pradeep et al, 1984; Evelyn, 1988; 丁原章, 1989; 李安然等, 1992; 杨主恩等, 1995; Simpson et al, 1998; Chen et al, 1998)。据统计,双柏震群震区 50km 内历史地震活动水平偏低,小震活动较少。但自龙门水库迅速蓄水后,库区附近的地震活动水平显著增强。由地震频次、地震震级与龙门水库蓄水水位间的对应关系可知,此次双柏震群活动与龙门水库的蓄水在时间、空间上都存在相关性。伴随水位的升降变化,双柏震群出现了 2 次比较明显的地震活动高频次过程,第 1 次是水位迅速上涨初期,第 2 次则出现在水位达到最高后第 2 天。这类地震在水库开始蓄水后很快就发生,主要分布在水库附近,震级较低,成群活动,且与水库水位的变化密切相关,属于快速响应型的水库诱发地震。

水库诱发地震是由于水库蓄水引起库区已有初始应力的突然释放而发生的。近年来,滇南地区小震平静及中强震缺震现象显著,说明该区域的应力积累可能已经处于较高水平。本文计算得到的震源机制解大多是正断层,震群的震中位于正断层的上盘,结合震中附近的断层性质分析认为,此次双柏震群可能是在区域高应力背景下,由于龙门水库蓄水,水载荷重量增加,垂直应力加载作用引起的安龙堡附近小断裂带上构造应力调整而触发的构造地震。

5 结论与讨论

(1)对云南双柏地区 2015 年 5 月 19 日~6 月 30 日发生的、至少被 3 个台站记录到的 155 次 $M_L > 0.0$ 地震进行重新定位,获得了 142 次地震重新定位的震源参数。结果显示,双柏地震序列主要发生在安龙堡附近的一条 NNE 向小断裂的北端,优势分布方向与该断裂走向一致。经过双差定位后,定位精度得到了很大的提高,走时残差平方和由原来的 0.303s 降为 0.034s,得到的震源位置估算误差(2 倍标准偏差)在 EW 方向平均为 0.210km,在 NS 方向平均为 0.173km,在垂直方向平均为 0.175km。震源深度分布也发生了变化,精定位之前,深度优势分布为 4~12km;精定位之后,优势分布为 6~12km,绝大部分分布在 8~10km 内。

(2)震源机制解显示,此次震群的震源机制类型与历史地震有所差异,绝大部分地震表现为正断性质。24 次正断性质的震源机制中,大致分为比较典型的 3 类,第 1 类节面走向近似 NE-SW 向,如第 1、5、9、10、18、19、20 号地震;第 2 类节面走向近似 NW-SE 向,如第 17、21 号地震;第 3 类节面走向近似 N-S 向,如第 2、8、14 号地震。第 1 类震源机制所占的比例相对较高,节面 NE-SW 向的分布特征与震中的优势分布方向相同,表明这些地震可能是由 NE-SW 向的断裂活动引起的。

(3)由地震频次、地震震级与龙门水库蓄水水位间的对应关系可知,此次双柏震群活动与龙门水库的蓄水在时间、空间上都存在相关性。水库蓄水初期,地震活动增强,在水位迅速上升的过程中,地震频次、强度逐渐减弱。2015 年 6 月 10 日起,水位在升降过程中呈下降

趋势,此时地震开始密集发生,地震频次、强度较之前明显增强。可见,双柏震群活动可能是在区域高应力背景下龙门水库蓄水的库水载荷加载作用引起安龙堡附近小断裂带上构造应力调整而触发的构造地震。

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,地球物理学报, **52**(8), 2035~2043.
- 陈俊华、姚运生、吴海波等,2013,2012年10月31日三峡库区 M_L 3.8 小震群研究,大地测量与地球动力学, **33**(2), 31~34.
- 刁守中、蒋海昆、徐学炎,1990,山东胜利油田角 07 井注水地震序列的演化及其机制,地震学报, **12**(4), 399~406.
- 丁原章,1989,水库诱发地震,北京:地震出版社.
- 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,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,西北地震学报, **30**(1), 62~65.
- 胡先明,2004,大桥水库诱发地震前的小震群,四川地震, (2), 36~41.
- 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,地球物理学报, **49**(1), 162~169.
- 李安然、张飞飞、张柯,1992,从新丰江水库地震的环境条件讨论水库诱发地震的研究及其预测,华南地震, **12**(3), 88~94.
- 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,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,高原地震, **23**(1), 24~26.
- 马文涛、蔺永、苑京立等,2013,水库诱发地震的震例比较与分析,地震地质, **35**(4), 914~929.
- 苏有锦、秦嘉政,2001,川滇地区强地震活动与区域新构造的关系,中国地震, **17**(1), 24~34.
- 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,内陆地震, **19**(3), 258~264.
- 严川、徐力生,2014,一种地方与区域地震震源机制反演技术:广义极性振幅技术(一)——原理与数值实验,地球物理学报, **57**(8), 2555~2572.
- 杨庆道、郭朝斌、王伟锋,2014,楚雄盆地扭动构造及其演化,油气地质与采收率, **21**(6), 15~21, 111~112.
- 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,中国科学, **33**(增刊), 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,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,地震学报, **26**(1), 19~29.
- 杨主恩、林传勇、高振寰等,1995,东江水库诱发地震的地震地质背景研究,地震地质, **17**(3), 241~252.
- 张永久、谢蓉华、张致伟,2013,瀑布沟水库区域小震重新定位与地震性质研究,地震地质, **35**(1), 113~124.
- 郑钰、杨建思,2008,双差算法的剖析及参数对定位的影响,地震地磁观测与研究, **29**(3), 85~93.
- 朱艾斓、徐锡伟、刁桂苓等,2008,汶川 M_s 8.0 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析,地震地质, **30**(3), 759~768.
- Aki K, Fehler M, Aamodt R L, et al, 1982, Interpretation of seismic data from hydraulic fracturing experiments at the Fenton Hill, New Mexico, Hot Dry Rock Geothermal Site, J Geophys Res, **87**(NB2), 936~944.
- Chen L Y, Pradeep T, 1998, Reservoir-induced seismicity in China, Pure Appl Geophys, **153**, 133~149.
- Evelyn A R, 1988, Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level, J Geophys Res, **93**(3), 2107~2124.
- Gupta H K, 2002, A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquake in Koyna, India, Earth Sci Rev, **58**(3-4), 279~310.
- 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, Earth Planet Space, **57**, 435~440.
- Phillips W S, 2000, Precise Microearthquake Locations and Fluid Flow in the Geothermal Reservoir at Soultz-sous-Forêts, France, Bull Seismol Soc Am, **90**(1), 212~228.
- Pradeep T, Steve A, 1984, Pore press diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity, Pure Appl Geophys, **122**, 947~

- 965.
- Simpson D W, leith W S, Scholz C H, 1998, Two types of reservoir-induced seismicity, *Bull Seismol Soc Am*, **78**(6), 2025~2040.
- Talwani P, Acree S, 1984, Pore press diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity, *Pure Appl Geophys*, **85**(122), 947~965.
- Waldhause F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull Seismol Soc Am*, **90**(6), 1353~1368.
- Waldhause F, 2001, HypoDD-A program to compute double-difference hypocenter locations, US Geological Survey Open-file Report, 113.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2002, Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake location, *J Geophys Res*, **3**, 1~15.
- Waldhauser F, Schaff D, Richards, et al, 2004, Lop Nor revisited: Nuclear explosion locations, 1976~1996, from double-difference analysis of regional and teleseismic data, *Bull Seismol Soc Am*, **94**, 1879~1889.
- Zond back M D, Harjes H P, 1997, Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9km depth at the KTB deep drilling site, Germany, *J Geophys Res*, **102**(B8), 18477~18491.

A Preliminary Study of Mechanism for the 2015 Shuangbai $M_L 4.1$ Earthquake

Li Tao Fu Hong

Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

Abstract A notable earthquake swarm occurred near the Shuangbai and Eshan area and its activities continue since 09:58, May 19, 2015. The largest magnitude is $M_L 4.1$ which occurred on June 14. We relocated this swarm by using hypoDD method. It has been shown that: the earthquake swarm distributed along the Lvzhijiang fault, and the dominant direction of relocated aftershocks is more obvious than before. The focal depths are at 6~12km, and 8~10km underground is the dominate layer where earthquakes can occur more easily. In comparison with original data, the RMS average value of arrival residual decreases from 0.303s to 0.034s, and the average error is 0.21km in EW direction, 0.13km in NS direction and 0.175km in vertical direction. We calculated the focal mechanisms for earthquakes with magnitudes larger than $M_L 2.5$ by using an inversion technique for focal mechanisms of local and regional earthquake, named Generalized Polarity and Amplitude Technique (GPAT), and 24 results were obtained in the end. The results show that the main type of focal mechanisms for this swarm is normal, and this is not the same as before. On the basis of the water level of the Longmen reservoir dam and the frequency and magnitude of the earthquakes, we suggest that the activities of this swarm are closely related with the process of reservoir impounding. This swarm is the result of a normal fault movement which was caused by the reservoir impounding.

Key words: Shuangbai earthquake; hypoDD method; Focal mechanisms solution; Seismogenic mechanism