

云南省糯扎渡水库蓄水前后地震活动性研究*

曹 颖^{1,2}, 叶建庆², 李丹宁², 付 虹², 李 涛², 周青云²

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 采用2008年6月至2013年10月糯扎渡水库地震台网记录的6300个地震, 对水库蓄水前后的地震活动进行分析, 发现库区蓄水后, 地震频度与水位同步增长, 地震活动显著增强, 表明库区有水库诱发地震发生。蓄水前后的地震活动图像显示, 澜沧江上景谷、双江交界处的小震活动增加最为显著, 采用Hypodd双差相对定位方法对该震群进行了重新定位, 定位后地震在空间上更为丛集, 地震震源深度从0~20 km都有分布。该震群发生在窝拖寨断裂上, 该断裂历史上曾发生过5.3级地震, 因此分析认为, 该震群的发生时间虽与水位相关, 但可能是触发了构造地震, 所以震源深度显现的是构造活动的特征。

关键词: 糯扎渡水库; 地震活动性特征; 水库地震; Hypodd双差定位方法

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)02-0189-07

0 引言

自1931年希腊的马拉松水库4.7级地震后提出水库诱发地震问题后, 20世纪60年代发生过几个具有较大影响的水库地震, 分别为: 1962年中国新丰江水库6.1级地震及1967年印度的柯依那水库6.5级地震, 使得科学家们将水库地震问题作为一个科学问题进行较系统的研究, 许多学者做了大量的探索性研究工作, 使这一学科得到了迅速发展(Gupta, Rastogi, 1976; Gupta, 1985; 丁原章等, 1989)。但水库诱发地震是一个复杂的问题, 受众多条件因素影响, 对水库诱发地震的孕震过程及其机理认识一直存在较大争议, 主要原因是缺乏对水库地震过程及其有关现象的观测研究, 对水库诱发地震机理, 诱发和发展过程研究尚处于推测阶段(毛玉平等, 2007)。不过随着数字地震观测技术诞生和应用, 水库地震的研究也朝着纵深方向推进。Roeloffs(1988)指出引起地震活动的孔压增加与湖水位变化的频度与幅度有关, Simpson等(1988)将大型水库注水后的地震响应类型分为延迟响应和快速响应两种, Pradeep和Acree(1985)研究了这两种响应类型的地震活动特征的差异。

糯扎渡水电站位于云南省普洱市思茅区(左

岸)与澜沧县(右岸)交界处的澜沧江南北向峡谷地段, 设计最大坝高262.5 m, 设计正常蓄水位高程812 m, 水库总库容 $237.03 \times 10^8 \text{ m}^3$, 库长214 km, 水库回水与上游大朝山水电站衔接, 电站下游与景洪水电站相连, 是澜沧江中下流梯级规划中工程规模、调节库容、装机容量和发电量最大的电站, 于2011年11月19日开始蓄水。糯扎渡电站水库地震监测台网于2008年6月建成, 并开始进行地震监测的工作。鉴于水库工程的重要性, 研究水库地震事件的活动特征是很有必要的。本文利用糯扎渡水库台网的基础地震资料对糯扎渡水库蓄水前后的区域地震活动性特征进行对比研究, 为研究水库诱发地震提供科学依据。

1 糯扎渡水库地质构造环境

糯扎渡水电站工程场地位于耿马—澜沧地震带和思茅—普洱地震区2个二级地震带(区)之间, 区域外围控制性的主干断裂有3组近南北向的澜沧江断裂, 北西向的营盘山断裂、普文断裂、木戛—谦迈断裂、澜沧—勐遮断裂(耿马—澜沧断裂南段)、勐满—勐海断裂和北东向的南汀河断裂、澜沧—孟连断裂等。库区构造较发育, 有近南北向的澜沧江断裂, 北西向的帮东断裂、谦六断裂、平掌寨断裂、白马山断裂、酒房断裂、李

* 收稿日期: 2014-07-29.

基金项目: 国家自然科学基金(41174051)及云南省青年地震科学基金(201309)共同资助.

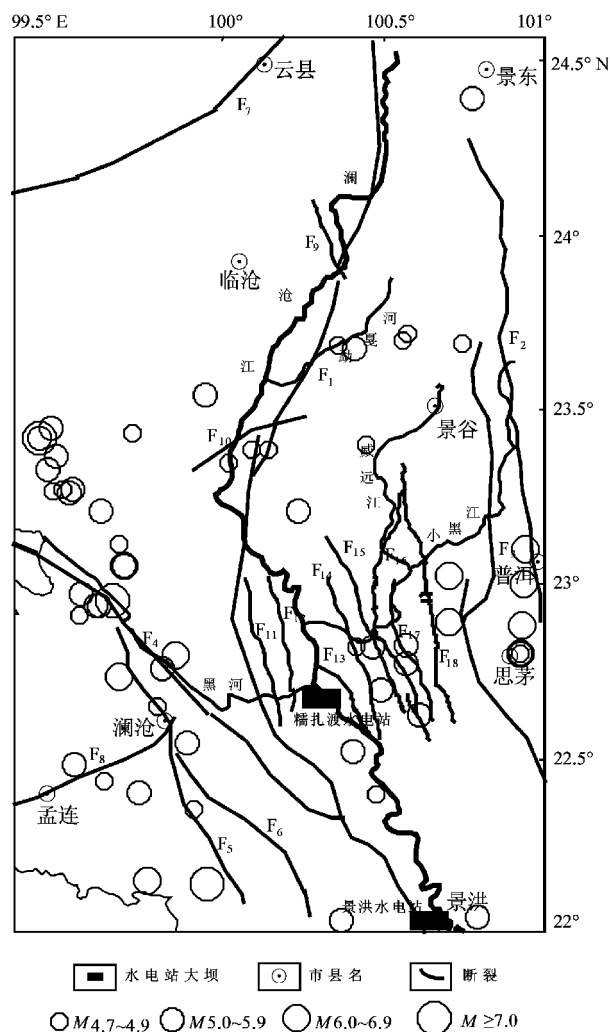
子箐断裂、肖塘断层、麻栗坪断裂、肖塘箐断裂和北东向的窝拖寨断层（图1）。库区主库、各支库的部分库段分布在大范围的碳酸盐岩、块状花岗岩和块状石英闪长岩地区；库区断裂多为逆断或局部逆断性质，大部分的断裂穿越主库或支库，库水淹没断层的现象较普遍^①。

根据区域地质构造资料^{②③}，糯扎渡水电站西部属上芒播褶皱束，有近南北向的小青乃向斜、东西向的龙潭向斜，东部为近南北向的上芒播背斜。在水库的库首段的东侧出露海西晚期混合花岗岩，西侧出露下元古界角闪岩、黑云岩混合岩和花岗闪长质混合岩。库区出露上三叠统花岗岩、砾岩及岩屑砂岩；在外围出露中侏罗统粉沙质泥岩、钙质泥岩。由于库区及周边复杂的地质构造，历史上就是地震多发区，如图1所示。李志祥等（2008）曾采用概率计算方法得出糯扎渡水库蓄水后将发生水库诱发地震，可能的最大震级为5.5级。

2 糯扎渡水库蓄水前后地震活动分析

2.1 资料选取

水库地震的选取范围，目前尚无统一标准，一般按照天然地震活动与诱发地震的空间分布特征来考虑。李永莉等（2012）选取的范围为库区20 km内，也有研究选取库区50 km范围，如毛玉平等（2008）和王绍晋等（2005）对云南漫湾水库和大朝山水库的研究；李家荣（1999）将在水域外20 km范围内引起的异常地震定义为水库诱发地震活动。欧作畿（2005）指出多数水库地震具有以下特点：震中多集中在库坝附近，一般集中分布在水库岸边几千米至十几千米范围内。震源深度较浅，一般在地表下10 km以内，个别达20 km，以4~7 km居多。陈章立小组的最新研究结果认为水库地震具有“双十”特征^④。本文选取从糯扎渡电站库首段到库尾段的澜沧江水域外10 km范围作为研究范围，如图2中黑圈所示，时间段为2008年6月至2013年10月。同时考虑到定位的精度，只选取了使用4个以上台站定位的地震共6 300个，其中糯扎渡水库蓄水前2008年6



F₁: 澜沧江断裂; F₂: 营盘山断裂; F₃: 普文断裂; F₄: 木冕—谦迈断裂; F₅: 澜沧—勐迪断裂; F₆: 勐满—勐海断裂; F₇: 南汀河断裂; F₈: 孟连—澜沧江断裂; F₉: 帮东断裂; F₁₀: 窝拖寨断层; F₁₁: 谦六断裂; F₁₂: 耳掌寨断裂; F₁₃: 白马山断裂; F₁₄: 酒房断裂; F₁₅: 李子箐断裂; F₁₆: 肖塘断裂; F₁₇: 麻栗坪断裂; F₁₈: 肖塘箐断裂

图1 糯扎渡电站水库库区及周边地区地质构造示意图

Fig. 1 The sketch map of geological structure of the Nuozhadu Reservoir and its surrounding areas

月至2011年11月18日773个 $M_L \geq -1.1$ 地震，蓄水后2011年11月19日至2013年10月31日5 527个 $M_L \geq -1.1$ 地震作为研究样本。

① 中国地震局地质研究所，糯扎渡水电站地震工程研究队. 1993. 澜沧江糯扎渡水电站地震安全性评价报告.

② 云南省地质局. 1977. 区域地质调查报告（思茅幅）.

③ 云南省地质局. 1977. 区域地质调查报告（景洪幅）.

④ 摘自2011年水库地震培训班（昆明）PPT.

2.2 地震活动的空间分布

图 2 为研究区在蓄水前和蓄水后的地震震中分布情况。由图 2a 可看出水库蓄水前的三年多时间里的地震分布呈现为零散的自然分布，并且地震数目较少， $M_L \geq 2.0$ 地震也很少，只有 5 个。但和图 2b 对比后可看出，蓄水后的近两年时间内地震明显增多，尤其是库坝区和库区中段，地震活动增加明显，蓄水前研究区内地震有 773 个，而蓄水后有 5 527 个。不仅弱震大量增加，而且 $M_L \geq 2.0$ 地震也有显著的增加，如图 3b 所示。

2.3 地震频度和强度与水位分析

根据 2008 年 6 月至 2013 年 10 月 31 日糯扎渡水库台网的地震资料，无论是蓄水前还是蓄水后，研究区的地震活动以弱震为主，特别是 $M_L 0.0 \sim 0.9$ 级占绝对优势。蓄水前的观测资料表明，研究区地震频度的月平均值为 18.6 次，而蓄水后的月平均值为 239.9 次，是蓄水前的 13 倍。由图 3 可看出蓄水前的月频度普遍小于 50，而蓄水后地震开始活跃。

图 3 为蓄水前后月频度与水位的关系图，糯扎

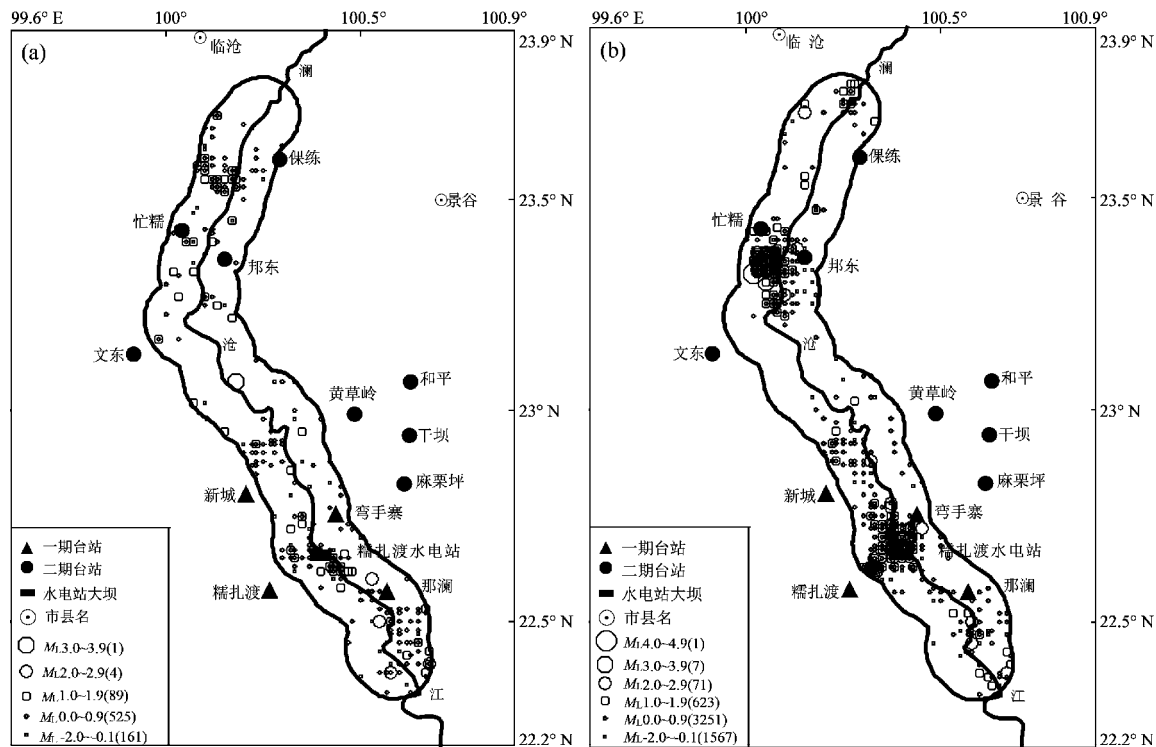


图 2 糯扎渡水库蓄水前 (a)、后 (b) 地震分布图
Fig. 2 The epicenter distribution map before (a) and after (b) the water storage of the Nuozhadu Reservoir

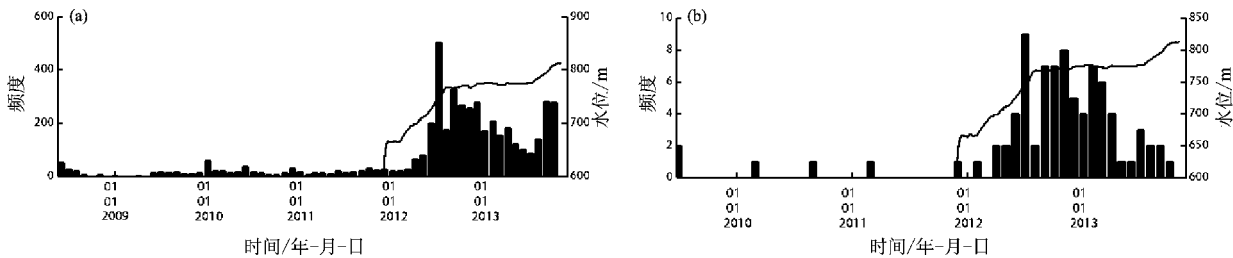


图 3 糯扎渡水库蓄水前后地震月频次与库水位关系图
(a) 研究区所有地震；(b) $M_L \geq 2.0$ 地震
Fig. 3 The relationship between seismic monthly frequency and the water level before and after the water storage of Nuozhadu Reservoir
(a) all the earthquakes in the study area；(b) $M_L \geq 2.0$ earthquakes

渡水库设计蓄水位高程为 812 m, 从 2011 年 11 月 19 日开始蓄水后, 水位一直都在上升, 至 2013 年 10 月至最高水位 811.92 m。糯扎渡水库从 2011 年 11 月 19 日至 2012 年 7 月, 水库水位变化很大, 从 610.33 m 上升至 765 m 左右, 由图 3 可看出, 蓄水初期 2011 年 12 月至 2012 年 3 月地震活动平静, 与蓄水前无差别。随着水位的不断上升地震活动活跃度不断加强, 地震活动频次不断增加, 尤其到了 2012 年 6 月地震频次大幅上升, 2012 年 7 月最为活跃, 月地震频次达到 503。至 2012 年 8 月水库水位上升变缓, 地震活动也相应地变弱, 2012 年 9 月至 2013 年 2 月水位变化都不大, 但在缓慢上升, 由 765 m 上升至 774 m, 地震活动变化也比较活跃。2013 年 3~7 月地震活动呈逐渐下降的趋势, 相对应的水位值在 774 m 左右。2013 年 8 月水位开始明显上升, 至 2013 年 10 月水位由 775 m 上升至 812 m, 地震活动频次也明显活跃。由此可见, 研究区的地震活动频次与水库水位变化具有一定相关性。

图 4 为 $M_L \geq 2.0$ 地震的 $M-t$ 与水位的关系图。由图中可看出蓄水前的 $M_L \geq 2.0$ 地震很少, 只有 5 个, 分布也无规律, 最大为发生在库区中段的 $M_L 3.1$ 地震。蓄水后发生的最大地震为景谷 $M_L 4.5$ 地震, 发震位置在糯扎渡水库库区上游, 这是糯扎渡水库地震台网建成后所发生的最大地震。蓄水后 $M_L \geq 2.0$ 地震有 79 个, 由图 2b 可看出蓄水后的 $M_L \geq 2.0$ 地震大多分布于库坝区及库区上游。如图 4 所示, 蓄水后 $M_L \geq 2.0$ 地震开始增多, 2012 年 6 月至 2013 年 4 月 $M_L \geq 2.0$ 地震尤为密集, 此时间段又可分为 3 个阶段, 即 2012 年 6 月至 2012 年 8 月上旬, 2012 年 9 月中旬至 2013 年 1

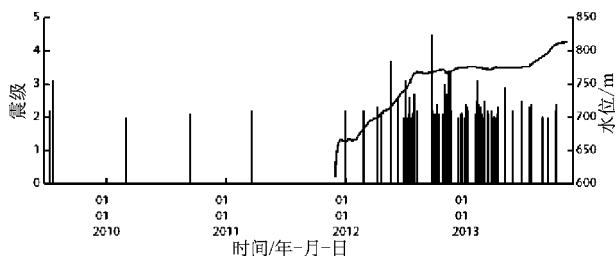


图 4 糯扎渡水库库水位变化与 $M-t$ 图

Fig. 4 The change of water level of the Nuozhadu Reservoir and $M-t$ diagram

月上旬, 2013 年 1 月下旬至 2013 年 4 月。第一阶段糯扎渡水库水位由 725.5 m 上升至 767 m, 第二阶段水位由 767 m 上升至 775 m, 第三阶段水位由 775 m 下降至 771 m, 又上升至 775 m。此 3 个阶段的间隔时间里都没有 $M_L \geq 2.0$ 地震, 水位都保持一个数值上下变化。

综合上述资料分析, 糯扎渡水库蓄水后, 库区的地震活动明显增强, 频度和强度都有显著增加。且地震频度和强度于 2012 年 6 月都明显提高, 虽然糯扎渡水库是从 2011 年 11 月 19 日就开始蓄水, 但水位到达一定高度后、蓄水量达到一定量级后, 地震活动与水位才开始相关。地震频度与强度的明显变化都伴随着水位的变化, 虽然地震并不是都发生在水位变化剧烈的时期, 但是水位都有变化, 所以地震频度及强度的变化和水库水位有一定的对应关系。

3 景谷双江小震群

2012 年 6 月 1 日至 9 月 17 日在云南省景谷县和双江县的交界处持续发生小地震, 随后在 2012 年 9 月 18 日发生了景谷 $M 4.2$ 地震, 将此时段的地震统称为景谷双江小地震群, 该震群的震中分布见图 5a。由于定位结果中的经纬度只保留到小数点后两位, 故在图中呈现为整齐的分散的棋盘形式。

地震事件的精确定位是研究水库地震发生环境及机理的基础, 而深度的精确测定是揭示特定属性的水库体系在库水的动态加载过程中库区下部介质和应力场发生响应的重要“云图”(陈翰林等, 2009)。故选择 Hypodd 双差定位方法对该震群进行了重定位, 为了保障定位结果的可靠性, 所选择的数据为 4 个以上台站定位的地震事件共 991 个。重定位后的震中分布如图 5b 所示, 与初始定位结果相比, 震源位置在重定位后空间分布上更为集中, 更突出其丛集性, 而重定位前的结果则比较分散。重定位前后都可看出此震群主要分布在窝拖寨断裂上, 由图 1 可看出窝拖寨位于糯扎渡水库库区范围内, 据澜沧江糯扎渡水电站地震安全性评价报告^①中指出窝拖寨断裂现今构造活

① 中国地震局地质研究所, 糯扎渡水电站地震工程研究队. 1993. 澜沧江糯扎渡水电站地震安全性评价报告.

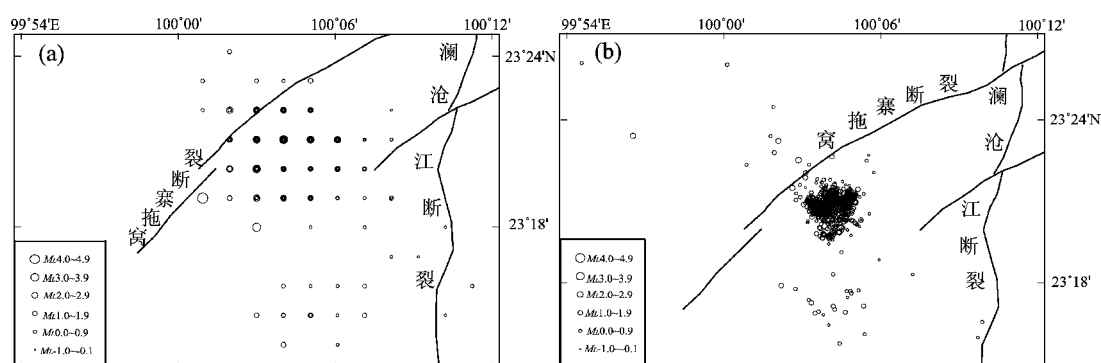


图5 利用Hypodd双差定位方法重定位前 (a) 后 (b) 的景谷—双江小地震群震中分布图
Fig. 5 The epicenter distribution map of the Jinggu-Shuangjiang small earthquake swarm before (a) and after (b) relocation by using the Hypodd double difference location method

动不明显,但沿断层的地震活动有密集成带的现象,并伴有中等强度的地震发生。在云南地区历史地震目录中,自云南台网建成以后,沿窝拖寨断裂的确有密集成带的地震活动发生,并伴有 $M_{4.0} \sim 5.0$ 中等地震发生。图7为选取1986~2008年窝拖寨断裂附近($23^{\circ} \sim 23.5^{\circ}N$, $99.8^{\circ} \sim 100.2^{\circ}E$)的地震事件的 $M-t$ 图及月频度图,从图中可以看出1990年、1992~1994年均有密集的地震活动,且都有一个 $M_{4.0} \sim 5.0$ 中等地震相随。所以此次小震群与之前所查阅的历史地震有着相似的特征,同样是沿着窝拖寨断裂成丛集出现,并伴有一个 $M_{4.2}$ 地震。但是如图7所示,此次震群的最大震级并未超过该地区的本底(历史地震目录中最大的地震为 $M_{5.3}$)。图7b与图3b相比较,可以发现虽然图3b为整个研究区 $M_L \geq 2.0$ 地震的频度,但是两幅图中所示 $M_L \geq 2.0$ 地震发生的频度最大值相差不多,所以月频度也并未超过该地区的本底。

图6a为重定位前的地震震源深度,从图中可以看出深度主要分布在5~10 km,且大部分分布在10 km处,这是因为人工定位软件的设定为如果震源深度 ≤ 5 km,则自动跳至10 km,至2012年10月才进行了修改,深度不再自动给出,所以图中所示序号800以后的地震深度主要分布在0~5 km。由图6b可看出,重定位后的震源深度从0~20 km范围内都有分布,其中8~9 km居多,随时间无太大变化。

由区域地质构造资料^①可知,窝拖寨断裂走向

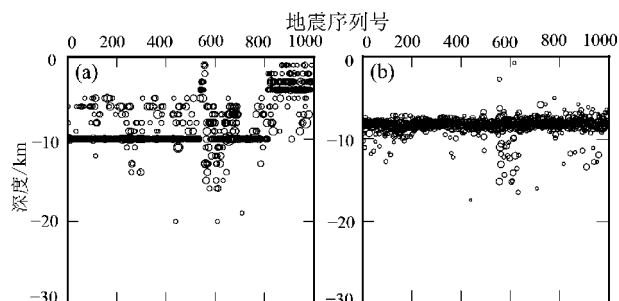


图6 重定位前 (a)、后 (b) 的深度分布图
Fig. 6 The depth distribution before (a) and after (b) the relocation

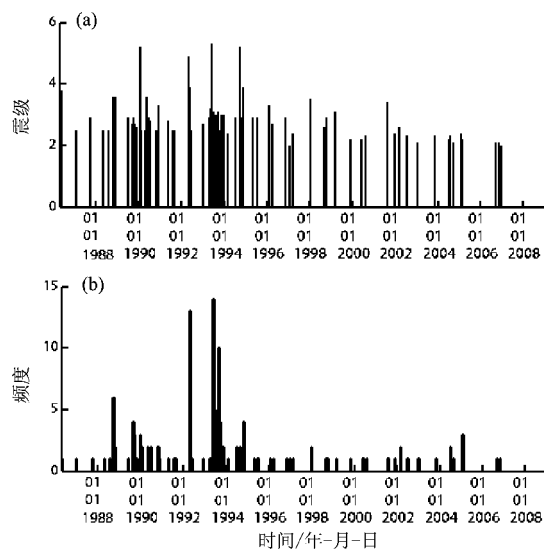


图7 窝拖寨断裂及其附近历史地震
 $M-t$ 图 (a) 与月频度图 (b)
Fig. 7 $M-t$ (a) and monthly frequency diagram (b) of historical earthquake on the Wotuozhai Fault and its surrounding area

① 云南省地质局. 1977. 区域地质调查报告(双江幅).

北东, 倾向南东, 属于逆断层, 由图 5a 可看出震群震中分布区域至断裂仅 2 ~ 5 km, 主要分布在断裂的南边。所以该震群与窝拖寨断裂有一定的关系。所以重定位后的震源深度, 受蓄水影响, 震源深度在 0 ~ 10 km 范围内的分布较多, 但在 10 ~ 20 km 范围内也有分布, 所以这部分地震的出现与窝拖寨断裂有关。

4 结论与讨论

本文研究结果表明, 糯扎渡水库蓄水前后的研究区的地震活动特征有明显差异, 具体表现如下:

(1) 云南省糯扎渡水库在蓄水后, 库区地震大量增加, $M_L \geq 2.0$ 的地震也大幅增加。且地震频度及强度的变化和水库水位的变化有一定的对应关系, 表明蓄水后库区有水库诱发地震发生。

(2) 对蓄水后地震活动表现较强的景谷双江小震群采用 Hypodd 双差定位方法进行重定位, 重定位后的结果相对于人工定位的结果在空间分布上更加集中, 更具有震群的丛集分布特征。且重定位后的震源深度分布为 0 ~ 20 km。其中, 震源深度 8 ~ 9 km 分布最多, 可能是受蓄水影响较大, 结合窝拖寨断裂的产状特征, 震源深度在 10 ~ 20 km 范围内的地震可能与断裂有关。通过查阅云南地区历史地震目录, 自云南台网建成以后, 沿窝拖寨断裂就有密集成带的地震活动发生, 并伴有中等地震发生, 此次震群也具有这些特征。此外小震群的最大震级和 $M_L \geq 2.0$ 地震频度都未超过该地区的本底。综合以上分析认为, 该震群的发生时间虽与水位相关, 但可能是触发了构造

地震, 所以震源深度显现的也是构造活动的特征。

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.
- 丁原章, 常宝琦, 肖安予, 等. 1989. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社.
- 李家荣. 1999. 贵州南盘江天生桥水电站水库地震预测[J]. 贵州地质, 16(4): 336 - 344.
- 李永莉, 赵小艳, 付红. 2012. 小湾水库蓄水前后的水库地震波速比变化初探[J]. 地震研究, 35(4): 464 - 470.
- 李志祥, 毛玉平, 谢建斌, 等. 2008. 糯扎渡水电站水库诱发地震预测[J]. 地震研究, 31(增): 633 - 641.
- 毛玉平, 艾永平, 邵得盛, 等. 2007. 水库地震安全问题分析[J]. 地震研究, 27(3): 253 - 159.
- 毛玉平, 王洋龙, 付虹, 等. 2008. 漫湾和大朝山电站水库诱发地震活动及其构造环境研究[J]. 地震研究, 31(3): 209 - 214.
- 欧作畿. 2005. 水库诱发地震的研究[J]. 云南水利发电, 21(3): 18 - 29.
- 王绍晋, 秦嘉政, 龙晓帆. 2005. 漫湾水库蓄水前后库区地震活动性与构造应力场分析[J]. 地震研究, 28(1): 53 - 57.
- Gupta H. K., Rastogi B. K. 1976. Dams and Earthquakes[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Gupta H. K. 1985. The Present Statue of Reservoir Induced Seismicity Investigation with Special Emphasison Kosyna Earthquake[J]. Tectonophysics, 118: 287 - 279.
- Pradeep T., Acree S. 1985. Pore Pressure Diffusion and the Mechanism of Reservoir-induced Seismicity[J]. Pure Application Geophysics, 122(6): 947 - 965.
- Roeloffs E. A. 1988. Fault Stability Changes Induced beneath a Reservoir with Cyclic Variations in Water Level[J]. Journal of Geophysical Research, 3(93): 2107 - 2124.
- Simpson D. W., Leith W. S., Scholz C. H. 1988. Two Types of Reservoir-induced Seismicity[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 78(6): 2025 - 2040.

Study of Seismicity in Nuozhadu Reservoir Area before and after the Water Storage

CAO Ying^{1,2}, YE Jian-qing², LI Dan-ning², FU Hong², LI Tao², ZHOU Qing-yun²

(1. School of Earth and space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Using 6 300 earthquakes recorded by Nuozhadu Reservoir Seismic Network from Jun. , 2008 to Oct. , 2013, we compared and analyzed the spatial distribution of seismic activity before and after the water storage of the Reservoir, and found that the seismic frequency increased simultaneously with water level, the activity of the earthquakes significantly enhanced after the water storage, which indicated that there occurred the reservoir induced earthquake in the reservoir area. The seismic activity diagram before and after the water storage showed that the activity of small earthquakes increased significantly in the boundary of Jianggu and Shuangjiang in Lancang River. We relocated the Jinggu-Shuangjiang small earthquake swarm by using the Hypodd double location method. The spatial distribution of earthquake centralized after relocation, and the focal depth distributed in 0 ~ 20 km. The earthquake swarm occurred at the Wotuozhai Fault where the $M5.3$ earthquake occurred in history. Although the occurrence time of the earthquake swarm had the relation with water level, they were the tectonic earthquake, which indicated the characteristic of the focal depth showed the tectonic activity.

Key words: Nuozhadu Reservoir; seismic activity characteristic; reservoir earthquake; Hypodd double location method