

冯志仁、程万正、刁桂苓等, 2015, 向家坝水库蓄水期间的地震活动分析, 中国地震, 31 (2), 319 ~ 328。

向家坝水库蓄水期间的地震活动分析

冯志仁¹⁾ 程万正^{1, 2)} 刁桂苓³⁾ 张洪智^{1, 4)} 李万明¹⁾

1) 中国地震局工程力学研究所 哈尔滨市南岗区学府路 29 号 150080

2) 四川省地震局, 成都 610041

3) 河北省地震局, 石家庄 050021

4) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 根据 2008 年 9 月至 2013 年 10 月金沙江下游水库地震台网监测资料, 分析了蓄水期间水库地震影响区的地震活动和震源机制。向家坝水库蓄水 1 年多, 蓄水后库首区 A、B 段的地震活动频次和强度都维持在较低水平。蓄水期间地震活动显著增加, 集中分布在库区 C 段, 并不是蓄水初期地震活动就增加, 与库区 2013 年 6 月启动第二阶段蓄水有一定相关性, 强度在 3 级地震活动水平。增加的地震活动位于近南北走向的翼子坝、玛瑙断裂的中段。这些局部地段蓄水后发生的地震, 其震源的力学机制多为倾滑或正断型, 分析认为部分地震为水库诱发岩溶或塌陷型地震, 多数仍属构造地震。本文结果为水库诱发地震的研究提供了资料和震例。

关键词: 水库地震 向家坝水库 水库蓄水 诱发地震 震源机制

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0319-10

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

20 世纪 70 年代已有关于水库地震的研究成果 (Gupta, H. K, et al. 1976)。之后随数字地震观测技术的发展, 一些国家在大型水库库区及周围设置流动或固定观测台网进行观测研究。先后在美国蒙蒂塞洛 (Monticello)、乔卡西 (Jocassee)、凯奥威 (Keowee) 等, 加拿大马尼克第三 (Manic 3), 前苏联奴列克 (Nurek), 埃及阿斯旺 (Aswan) 等进行的水库地震观测研究表明, 水库诱发地震发生在水库及其周围, 且震源浅 (Chen et al, 2001; Simpson et al, 1981、1990; Leblanc et al, 1978)。

水库地震的研究历史不长, 主要侧重于收集整理资料, 借此研究水库蓄水过程与诱发地震的关系。国内针对水库地震开展的监测和研究工作始于 1960 年广东新丰江水库 (丁原章, 1989), 之后相继发表了几个大型水库的监测研究成果, 主要体现在对水库地震发生的地质构造和岩性的认识以及水库诱发地震与危险性评估等方面 (贺为民等, 2001; 李坪等, 2005; 陈翰林等, 2009; 张致伟等, 2009; 程万正等, 2010)。

本文首先简要介绍了金沙江下游向家坝水库工程、地质构造与历史强震活动概况, 再根

[收稿日期] 2013-11-08; [修定日期] 2013-12-11

[项目类别] 金沙江下游梯级水电站水库地震监测系统建设与运行项目 (JS(06)001) 资助

[作者简介] 冯志仁, 生于 1969 年, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: fzf0451@163.com

据 2008 年 9 月至 2013 年 10 月金沙江下游水库地震台网监测资料,研究蓄水期间的地震活动和震源机制,试图分析水库水位变化与水库影响区地震活动的关系,为高烈度区域水库诱发地震的研究提供翔实资料和实例,并为今后的对比分析提供依据。

1 水库工程、地质构造与强震

1.1 向家坝水电站工程概况

向家坝水电站是金沙江流域西电东送最东端的一级巨型水电站,库区地跨川滇两省,左岸位于四川省宜宾县境内,右岸为云南省水富县。水电站以发电为主,兼有航运、防洪、灌溉等综合功能。坝顶高程 384m,最大坝高 162m,装机容量 640 万千瓦,年平均发电量为 307.5 亿千瓦时。水库为河道型水库,岸线长度 156.6km。水库正常蓄水位 380m,总库容 $51.63 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

1.2 历史强震活动及其对库区场地的影响

图 1 是库区及附近地区有记载以来的 $M_s \geq 5.0$ 地震震中分布图。破坏性历史地震活动的空间分布是不均匀的,主要集中在马边-盐津地震带,位于库区 C 段。有记载最早的是公元 1216 年的“马湖夷界 7.0 级地震”,震中距离工程场地 65km。马边地区主要有北西向的利店断层、玛瑙断层和近东西向的漩兰坝断层,1935~1936 年、1971 年的 2 个震群均发生在这两组断裂带的交汇部位及附近。大关一带地震构造复杂,有东西、北东向断裂,还有近南北向的翼子坝断裂,7.1 级的大关地震就发生在这 3 组不同方向的断裂的交汇部位。大关 7.1 级地震震中距坝址 70km。另 1610 年四川高县庆符 $5 \frac{1}{2}$ 级地震距坝址 19km。其他区域的中强地震呈零星分布。

根据史料记载,马边-盐津地震带上的历史强震造成严重地质灾害。1216 年四川雷波马湖地震:“东、西两川地大震,马湖夷界山崩八十里,江水不通。”1917 年云南大关吉利铺 $\frac{3}{4}$ 级地震:“沿大关河谷,上自云台山下至豆沙关两岸山崩滑坡严重;回龙溪一地山崩阻河,江水逆流约 5km。”1936 年四川马边 $6 \frac{3}{4}$ 级地震:“玛瑙、复兴场、屏山夏溪一带,石碉楼全倒,石桥倒塌。庙宇、民房倾倒甚多,土石墙普遍坍塌,木架房倒塌 50%,山岩严重崩垮。”1936 年雷波西宁 $6 \frac{3}{4}$ 级地震:“玛瑙,山崩河水断流,马边城跌倒了很多,平地开裂随即又合拢。”1974 年大关 7.1 级地震:“海口-马颈子大滑坡(长 300m,宽 200m)逆冲到河对岸,高出河床 30m,堵河成湖;手扒岩大滑坡使木杆河断流成湖。”统计马边-盐津地震带 7 次历史强震震中距坝址 60~80km,对水库区的场地影响烈度为 V~VI 度。

1.3 涉及库区的地质构造

在库区西段(即 C 段)主要展布马边-盐津地震构造带,由近南北向或北西向系列活动断裂构成,为强震发震构造系。近南北向的马边-盐津构造带,由北北西向的利店断裂、东西向的漩兰坝断裂以及近南北向的玛瑙、翼子坝、关村、中村断裂构成。展布于水库影响区的是近南北向的玛瑙、翼子坝、关村、中村断裂,其中翼子坝断裂穿过金沙江。

翼子坝断裂南起长坪以北,向北经糖房、猓子坝,止于莲花山南,呈正南北走向,长

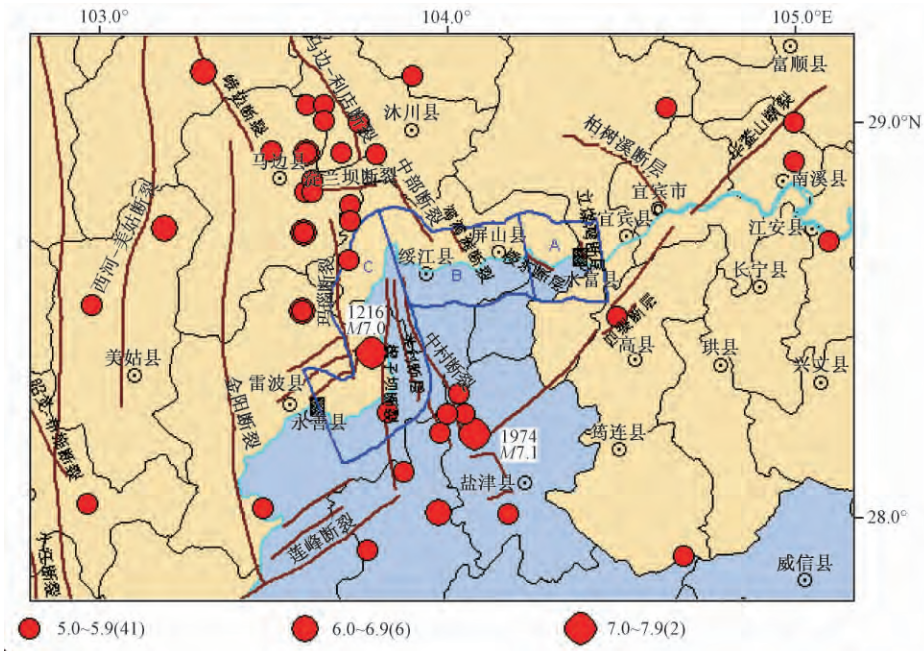


图1 向家坝水库及周围地区有记录以来5级以上地震震中分布
 库区 10km 范围用蓝色线示出;库区分为 A、B、C 段

31km。翼子坝断裂南端切入长坪穹窿核部,向北切过黄毛坝短轴背斜、马湖向斜和芭蕉滩穹窿的东翼。据翼子坝村北露头剖面显示呈挤压逆冲性质,西盘向东仰冲。由于历史记录过少,不能确切判断 1216 年 7 级地震震中位置。据史料,地震使金沙江堵江 40km,分析认为震中在翼子坝断裂附近。1971 年大关北 7.1 级地震时,在靠近断层的回龙一带,在 VII 度背景上出现 VIII 度烈度异常区。

玛瑙断裂北起玛瑙北道坪一带,南经老营盘、土地凹,过双河口后逐渐消失,断于侏罗系,南端切入三迭系和二迭系中。老营盘附近发育数十米宽的挤压破碎带。

关村断层断入三迭系及二迭系中,北段为侏罗系。在老厂坡处,见二叠系下统灰岩逆冲于二叠系上统玄武岩之上,破碎带宽约 15m。

中村-铜厂沟断裂发育于铜厂沟背斜北东翼,1974 年大关北 7.1 级地震的 2 次 $M \geq 5$ 的强余震即发生在该断裂南段。

在库区东段(即 A、B 段)展布湾湾滩断层,断于龙桥-五指山背斜的北东翼。楼东断层横切五角堡背斜的北东端,为规模不大的盖层断裂,属逆冲性质。立煤湾断裂破碎带宽度超过 20m,为 Q_3 以来有过活动(距今 8.3 万年)的断裂。在库区东段外围区展布北东向华莹山及北西向柏树溪断裂,属活动的基底断裂,为中强地震发震构造。

2 蓄水期间的地震活动

2.1 水库蓄水过程

库区蓄水前,库水水位呈正常年变形态,即夏高冬低。

2012年10月10日,向家坝水库正式下闸蓄水,库水位持续增高,未显示年周期变化形态。2012年10月16日,蓄水至354m高程。库水位从280m逐步上涨至354m,涨幅为74m,后期库水位维持在354m。

2013年6月26日,向家坝水库启动第二阶段蓄水。截至2013年7月5日,蓄水至370m高程。库水位由354m逐步上涨至370m,涨幅16m。目前,向家坝水电站维持在370m水位稳定运行。

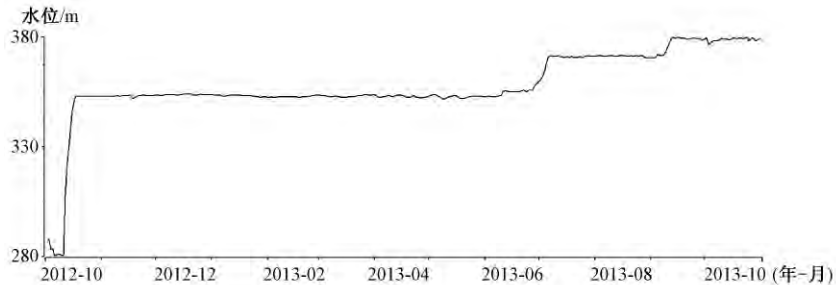


图2 蓄水前后(2012年10月~2013年10月)向家坝水库水位(据库区新滩水文站资料)

2.2 蓄水期间的地震活动

金沙江下游水库地震监测台网包括35个固定测震台,均位于沿江两侧,可很好监测库区沿岸两侧30km范围内的0.5级地震。本文利用2008~2013年的监测资料分析库区地震活动。

图3给出2012年10月~2013年11月15日库区两侧10km范围内发生的地震,共624次,其中 $M_L=0.5\sim 0.9$ 地震350次;1.0~1.9级地震234次;2.0~2.9级地震33次;3.0~3.4级地震7次;据此计算的地震活动 b 值为0.78,最小二乘相关拟合系数为0.999。其中2次3.4级地震均发生在库区C段;地震分布呈团状,分别聚集在玛瑙断裂与翼子坝断裂中段。在库首区A段和水库中段(B段)地震活动较弱,其中A段地震的频次和强度更低。

库区地震活动随时间的变化见图4。2012年10月向家坝水库下闸蓄水至2013年5月,无论地震活动强度、月频次均无明显变化。2013年6月~10月地震活动增强,库区发生多次3级地震;2013年5~6月地震月频次逐渐增加,7~8月达到170次,之后8~10月地震频次逐渐减少,10月恢复到6月水平。震源深度多为2~11km,尤其蓄水期间震源深度2km左右的地震增多。

3 蓄水期间库区C段的地震活动与震源机制

3.1 库区C段的地震活动

实际上因蓄水而增加的地震活动集中在库区C段。为此本文特别给出2013年5~10

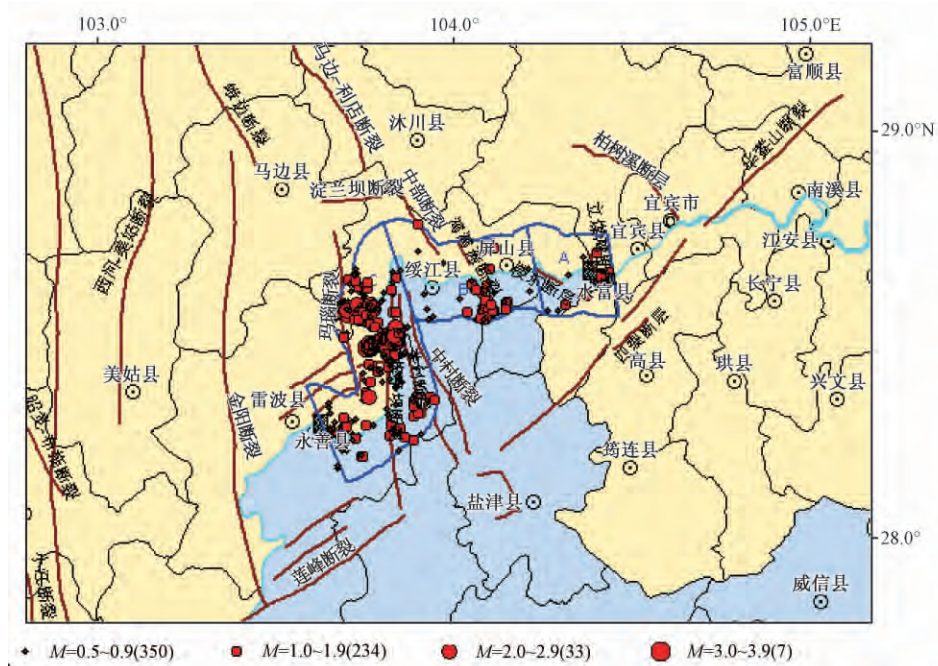


图3 蓄水期间(2012年10月1日~2013年8月30日)向家坝水库区
两侧10km范围内的地震震中分布图

月库区C段每日地震活动随时间的变化(图5)。

2012年10月至2013年5月库区C段地震活动强度低($M \leq 2.0$ 的地震占大多数)。地震活动主要集中在7月中旬至9月上旬,库区C段于7月30、31日发生的2次3.1级地震及9月17日发生的3.4级地震均位于翼子坝断裂带;8月20日的3.2级地震位于玛瑙断裂带;8月19日发生的3.4、3.3级地震位于翼子坝与玛瑙断裂带之间。这些小震群序列的发生使得库区日地震频次显著增加。

库区C段小震活动的增加并非始于蓄水初期。2013年7月5日库区蓄水至370 m高程,此期间库区C段地震活动增加明显,而库区A、B段仍然维持在低地震活动水平。大部分小震震源深度在2~6km,地震活动陡增的时段与水库第二阶段蓄水位抬升时段一致,分析认为地震频次陡增与水库第二阶段蓄水过程有关。

3.2 库区C段地震震源机制

根据波形资料,采用层状介质点源位错模型,拟合理论地震图与观测到的垂直向直达P波和S波的最大振幅(梁尚鸿等,1984;刁桂苓等,1993),反演出10次地震的震源机制解。震中呈北北西向分布,其中有8次震中位于翼子坝断裂附近,2次震中位于玛瑙断裂附近,震源深度在2~7km,比较浅。

2013年7月21日的地震位于玛瑙断裂的泡东坪村附近,其震源机制解呈倾滑型。2013年7月30日和31日的2次3.1级地震位于翼子坝断裂的小厂村附近,其震源机制解呈斜滑型或称倾滑兼走滑分量。2013年7月30日2.5级及2.7级地震位于翼子坝断裂的红岩村附近,其震源机制解分别呈倾滑型和斜滑型。

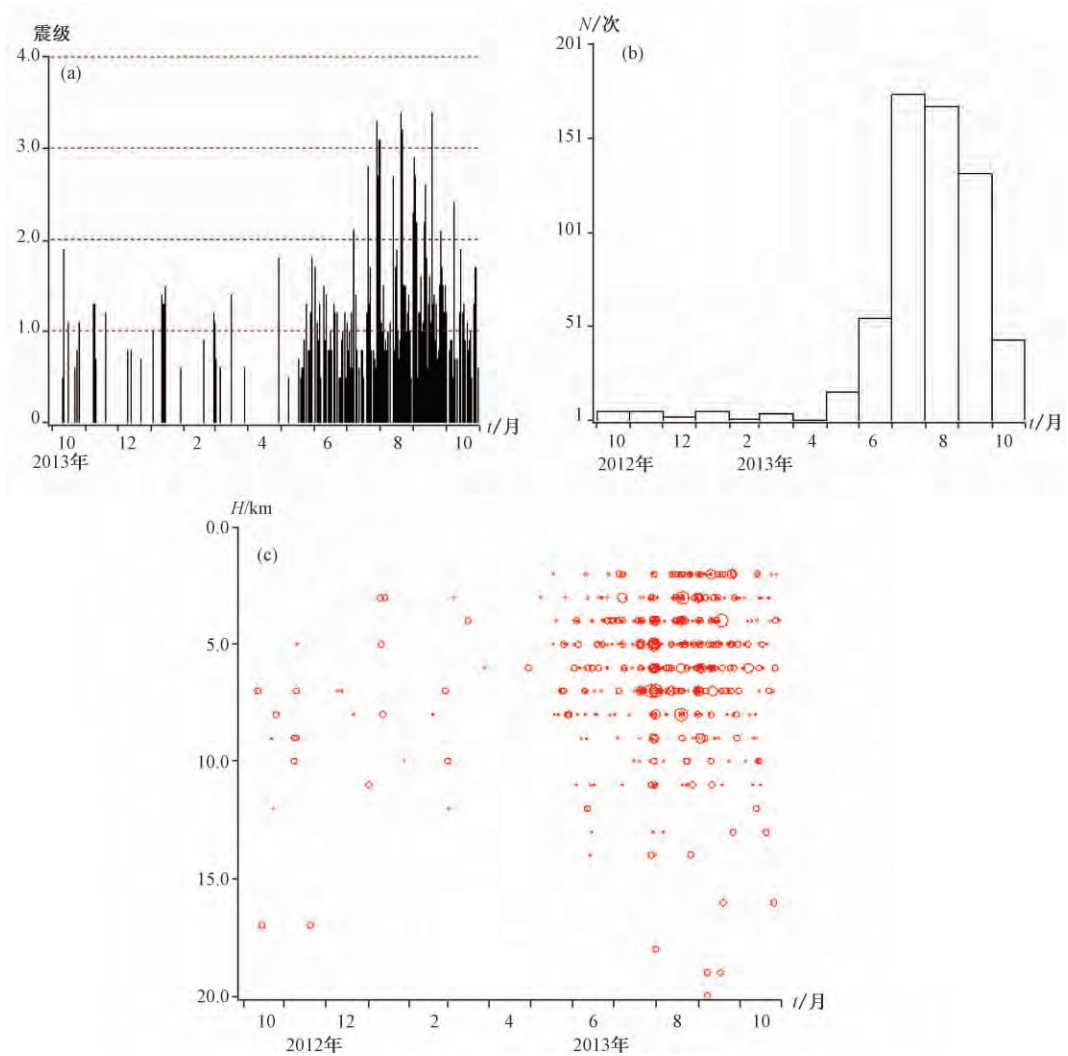


图4 蓄水期间向家坝水库区两侧 10km 范围内地震活动随时间的变化
 (a) 地震 $M-t$ 图; (b) 地震月频次图; (c) 震源深度分布图

近南北走向的翼子坝断裂属现今活动断裂,具逆冲性质,这些局部地段蓄水后发生的地震的震源力学机制多呈现倾滑或正断型。这些库区小震的震源机制继承了该区域构造应力场的特征。根据刁桂苓 2012 年研究报告,库区及周围地区的 400 余次地震震源机制反演的应力场。最大压应力主轴方位北西西-南东东,最小压应力主轴方位北北东-南南西,二者都是水平的;中等压应力主轴直立。蓄水期间给出的这些地震震源机制解得到的主压应力场优势方位与区域应力场大体一致。

位于现今强活动断裂带中段的这些地震,分布在向家坝水库的库尾段,离金沙江很近,空间分布集中,范围小,震源浅,震时震中附近村民有感。小震震源力学机制也反映了局部构造应力环境的差异,如岩体或岩性结构的某些差异。据勘察报告,该库段库深在 5 ~ 80m,该段多为“V”型深切峡谷,谷坡多悬崖绝壁。由于二叠灰岩广泛出露,又有褶皱和断裂构造

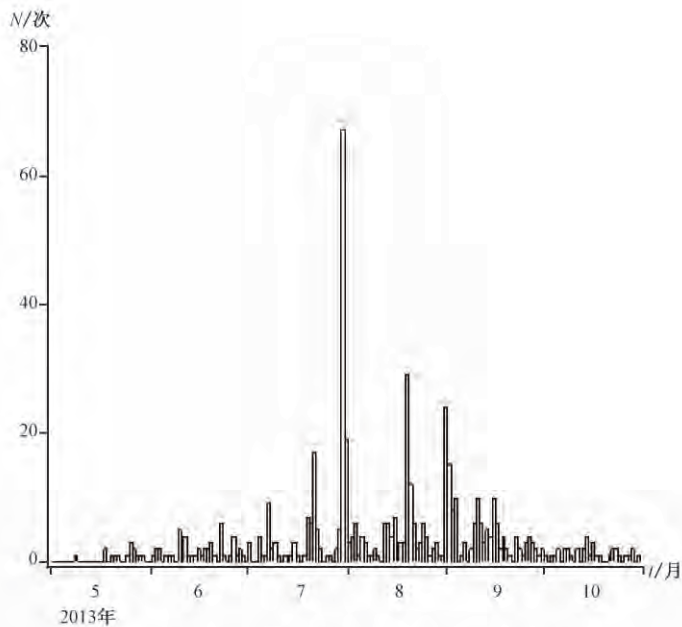


图5 库区两侧 10km 范围内 C 段地震活动随时间的变化

条件,造成岩溶现象的大面积发育。其中暗河、溶洞 10 多处。据调查,该地形具有一定深度的地下水循环系统。翼子坝断裂为出露地表的基底断裂,部分控制金沙江流向,因其本身又被数条北东向小断裂错断,造成沿江灰岩分布区岩石广泛破碎和构造裂隙的大面积发育。蓄水后水位上升 30 ~ 70m,库水跨翼子坝断裂,持续的渗流作用可能造成岩溶,利于诱发地震。

夏其发(2000)认为构造断裂型、地表卸载型与岩溶塌陷型是水库地震的类型。位于库区 C 段金沙江附近的灰岩、溶洞出露地点分布的这些地震,部分是水库诱发地震,或称为岩溶塌陷型地震。除震源浅外,在 S 波后衰减段其面波波形呈放大特征,有待研究。在库区 C 段发生的地震中更多的是天然构造地震。近南北走向的玛瑙断裂、翼子坝断裂均为活动断裂,需继续跟踪监测在这些地段发生的系列中小地震或震群活动。

4 结论和讨论

4.1 蓄水期间库区地震活动特征

至 2013 年 10 月底,向家坝水库蓄水已经 1 年多,蓄水后库首区 A 段地震活动维持低频次和低强度水平。库区 B 段地震发生的月频次和强度也低,没有显著的震群活动和突发地震事件。

蓄水期间地震活动显著增加,且集中分布在库区 C 段。这并非始于蓄水初期,而是在水库第二阶段蓄水至 370m 高程之后,库区 C 段地震活动增加明显,震源深度为 2 ~ 6km,地震活动陡增的时段与水库第二阶段蓄水致水位抬升的时段一致,分析认为这与水库第二阶段的蓄水过程有关。

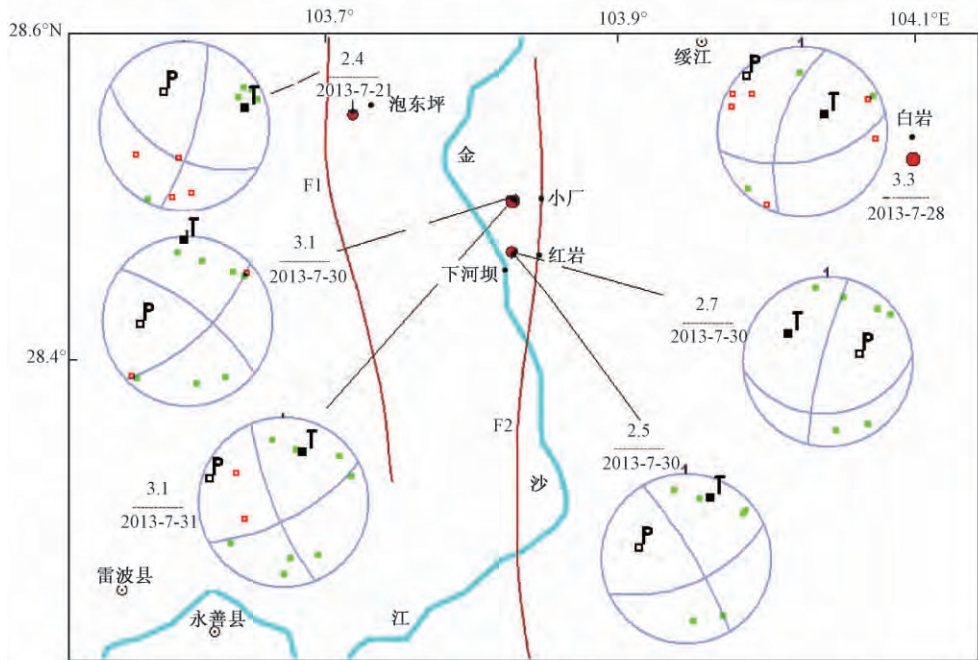


图6 蓄水期间向家坝水库区 C 段地震的震源机制解
F1. 玛瑙断裂; F2. 翼子坝断裂

增加的水库地震震中多位于近南北走向的翼子坝、玛瑙断裂活动断裂的中段。这些局部地段蓄水后发生的地震,给出的震源力学机制多呈倾滑或正断型。鉴于局部地段,灰岩广泛出露,暗河、溶洞,岩溶现象发育,分析认为部分地震为水库诱发岩溶型或塌陷型地震,但大多数是构造地震活动。通过对水库地震成因的分析,我们认为荷载效应、孔隙水压力效应、渗流和水对断层的软化、溶蚀及应力腐蚀效应,以及水沿裂隙至断层可能下渗的速度、深度等显示很强的局域性和差异性,这些因素可能促使浅部岩体中的结构面被破坏或错动,从而诱发地震活动。对这些局部地点因水库蓄水诱发的岩溶或塌陷型地震的波形和波谱分析结果,将另文讨论。

4.2 涉及问题的讨论

目前,库水位稳定,也未发生中等以上地震活动。尽管库区 C 段位于著名的马边 - 盐津地震构造带中段,本地地震活动水平高,且已有水库地震研究的先例:如赞比亚卡里巴水库,蓄水后 3 年内地震活动频次和强度增加,库水位达到最高水位 5 周以后,在蓄水下降段即 1963 年 9 月 23 日发生 5.8 级、25 日又发生 5.8 级 2 次最大地震 (Gough, et al, 1970); 埃及阿斯旺水库也是蓄水至高位后的卸载段,即 1981 年 11 月 14 日发生 5.7 级地震 (Mohamed et al, 1995; Simpson et al, 1988); 2008 年四川紫坪铺水库影响区发生的震群及大震也是在水库蓄水第 3 年的水位下降段发生的 (程万正等, 2010)。虽然其成因均有待探讨,但发生构造型水库地震的重要前提条件是要有较高应力应变能积累,并有透水性结构面及孕震构造的存在。当然荷载效应、孔隙水压力效应、渗流、对断层的软化、溶蚀及应力腐蚀效应,以及水沿裂隙至断层可能下渗的速度、深度等显示很强的局域性和差异性,这些因素

可能促使浅部岩体中结构面的破坏或错动,诱发水库地震活动(程万正,2013)。

延迟型或滞后型水库诱发或触发的水库最大地震往往发生在水库蓄水的下降段或卸载段,确有一些观测实例。因蓄水造成的地震危险性,不是在蓄水初期而在之后,因此在受水库蓄水影响的区域地震防御工作中应保持警惕。加强水库影响区震情的持续跟踪监测,结合所处区域各类观测资料开展未来地震趋势的动态研究是必要的。

致谢:向参加此项金沙江下游水库地震监测分析工作的杨磊、余忠伟、李悦、黎云、吕世成、李精、骆亚芬、李江文及李泽赢等深表感谢!

参考文献

- 程万正、张致伟、阮祥,2010,紫坪铺水库区不同蓄水阶段的地震活动及成因分析,地球物理学进展,25(3),759~767。
- 程万正,2013,高烈度区的水库地震问题,国际地震动态,412(4),1~9。
- 陈翰林、赵翠萍、修济刚,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。
- 丁原章,1989,水库诱发地震,9~87,北京:地震出版社。
- 刁桂苓、于利明、宁杰远等,1993,1989年大同震群的破裂特征,地球物理学报,36(3),360~368。
- 贺为民、刘明军、李智毅等,2001,小浪底水库断裂构造分析与诱发地震预测,华南地震,21(1),63~68。
- 李坪、李愿军、杨关娥,2005,长江三峡库区水库诱发地震的研究,中国工程科学,7(6),14~20。
- 梁尚鸿、李幼铭、束沛镒等,1984,利用区域地震台网P、S振幅比资料测定小震震源参数,地球物理学报,27(3),247~257。
- 夏其发,2000,水库诱发地震评价研究,中国地质灾害与防治学报,11(3),32~35。
- 张致伟、程万正、张永久,2009,汶川8.0级地震前紫坪铺水库小震活动及震源参数研究,中国地震,25(4),367~376。
- Chen L, Talwani P, 2001, Mechanism of initial seismicity following impoundment of the Monticello reservoir, South Carolina, Bull Seis Soc Am,91(6),1582~1594.
- Gupta H K, Restogi B K,1976, Dams and earthquakes, Amsterdam:Elsevier,229pp.
- Gough D L, Gough W L,1970, Load-induced earthquakes at Lake Kariba-II, Geophys. J. R. astr. Soc,21,79~101.
- Leblanc G, Anglin F, 1978, Induced seismicity at the Manic 3 reservoir, Quebec, Bull Seis Soc Am,68(5),1469~1485.
- Simpson D W, Leith W S, Scholz C H,1988, Two type of reservoir induced seismicity, Bull Seis Soc Am,78,2025~2040.
- Mohamed A, Megume M,1995, Earthquake activity in the Aswan region, Egypt, Pure and Applied Geophysics,145(1),69~86.
- Simpson D W, Gharib A A, Kebeasy R M,1990, Induced seismicity and changes in water level at Aswan reservoir, Gerlands Beitr. Geophysik,99(3),191~201.
- Simpson D W, Negmatullaev S K,1981, Induced seismicity at Nurek reservoir, Tadjikistan, USSR, Bull Seis Soc Am,71(5),1561~1586.

Seismicity of the Xiangjiaba reservoir after impoundment

*Feng Zhiren*¹⁾ *Cheng Wanzheng*^{1, 2)} *Diao Guiling*³⁾ *Zhang Hongzhi*^{1, 4)} *Li Wanming*¹⁾

1) Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

3) Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

4) Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

Abstract In this paper, seismicity and focal mechanism of the reservoir area after the impoundment are studied by using the data of seismic network of Jinsha River low reaches. In the segments A and B of the reservoir head region seismic activity was staying with low frequency and strength in more than one year since the impoundment. While a significant increase of seismicity in segment C had the largest earthquake with $M3.0$, which was correlating with the second stage impounding but not the initial impoundment period. The region of seismicity increase is near the Yiziba fault and the middle segment of the Manao fault. Most of earthquakes in these regions are reverse and normal rupture according to focal mechanisms, in which tectonic earthquake takes a large proportion while the rest are reservoir induced and Karst collapse. The result will provide detailed information and example for future reservoir induced earthquake study and forecast.

Key words: Reservoir induced earthquake Xiangjiaba reservoir Impoundment
Triggered earthquake Focal mechanism