

# 玉江断裂对玉溪东风水库大坝的地震影响浅析<sup>\*</sup>

王洋龙, 王晋南, 安晓文, 毛玉平

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 对玉江断裂的活动性进行了研究, 并结合对滇中地区地震构造和震例的分析, 认为该断裂是一条具备发生 6.5 级左右地震危险的地震构造, 其主要危险地段为晚更新世活动段, 该地段距离大坝仅为 700 m, 一旦发生地震, 大坝将遭受 VIII 度左右的破坏。地震虽然不会对大坝产生不可抗拒的断错破坏, 但引起的地表应变值很可能大于  $0.65 \times 10^{-4}$ , 严重威胁着大坝的安全。所以应该考虑对该坝体采取行之有效的抗应变加固措施。

关键词: 玉江断裂; 发震断裂; 安全距离; 地表应变; 东风水库; 云南

中图分类号: P315.72<sup>+</sup>8 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)01-0051-07

## 0 引言

玉溪东风水库位于云南省玉溪市红塔区 NE 方向约 4 km 的玉溪大河河谷内, 是红塔区约 40 万城乡人口的重要饮水工程。该水库始建于 1958 年 10 月, 于 1960 年 10 月完成, 当时坝高 42 m。1961 年 6 月至 1962 年 1 月对坝体进行加厚。1976 年 3 ~12 月, 大坝加高达到 47.41 m, 坝顶长度 450 m, 坝顶宽 9.8 m, 坝底宽 325 m, 坝型为粘土宽心墙坝, 总库容 9 025 m<sup>3</sup> (玉溪地区水利电力勘测设计院, 1997)。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001) 的定义: “甲类建筑应属于重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害的建筑”, 考虑到大坝一旦溃决对玉溪市可能产生的影响, 该坝体建筑物应属于甲类。

从构造稳定性的角度看, 该水库建设在以普渡河和玉江两条第四纪活动断裂为背景的复杂构造区内, 其中玉江断裂横贯坝址。历史上, 玉溪盆地内曾发生过 6 $\frac{1}{4}$  级地震, 水库周围亦有破坏性地震活动。在《中国地震动参数区划图》和 1:500 万《中国地壳稳定性图》中, 坝址分别处于地震动峰值加速度 0.2 Gal (中国地震局, 2001) 和不稳定区一极不稳定区的边界 (中国地质科学院地质力学研究所, 1997)。在这样的环境中, 如何评价该水库坝址的稳定性, 尤其是玉江断裂对大坝的地震影响, 直接关系到玉溪市城市居民的生命财产和饮水问题。

本文试图以玉江断裂的活动性为基础, 结合水库所在地区的地震构造环境、玉江断裂沿线破坏性地震发生的构造条件和典型震例, 分析玉江断裂的潜在地震危险性, 并根据已取得的经验和理论关系, 分析该断裂对水库大坝可能存在的地震影响。

## 1 玉江断裂及第四纪活动

玉江断裂系指发育在玉溪上新世—第四纪盆地与通海第四纪盆地之间的一组 NW 向断层, 其倾向多为 NE 向, 局部 SW 向, 倾角在 72° 以上, 全长约 43 km (图 1)。两盘地层为中元古界、震旦系、上新统和下更新统, 前古生代地层关系表现为左旋—倾滑活动, 晚新生代地层则为逆冲—右旋活动, 而这种活动性质的转变恰恰发生在新构造运动的初期。

该断裂主要由  $F_{1-1}$ 、 $F_{1-2}$ 、 $F_{1-3}$  和  $F_{1-4}$  4 条分支断层组成, 其几何部位发育有玉溪、九溪、江川和通海 4 个上新世—第四纪盆地, 断裂的第四纪活动基本继承了先存断裂的构造形迹, 大部分段落落在晚更新世仍有活动表现, 如  $F_{1-2}$ , 局部段落则在晚第四纪已停止了活动, 如  $F_{1-3}$ 。地表地质和钻探资料揭示:  $F_{1-3}$  隐伏在大坝所坐落的玉溪大河河谷内, 上覆有 5 ~10 m 厚的全新世冲积砾砂层, 层位稳定。断裂破碎带呈灰绿色, 由角砾岩和碎裂岩组成, 呈松散未胶结状。碎裂岩呈粉末状, 其电子自旋共振 (ESR) 测年其结果是 (120.7 ±

\* 收稿日期: 2007-01-15

基金项目: 云南省重点科技攻关项目“复杂构造区水库地震监测预警研究”课题 (2006SG01-2) 资助



在云南地区所记载的最强地震。 $M \geq 7.0$  地震主要发生在块体的周缘, 如 1970 年通海 7.8 级地震。块体内部  $7.0 > M \geq 6.0$  地震集中发生在具有区域性质的近 SN 向断裂、规模不大的 NW 向晚第四纪活动断裂或它们的复合部位, 这两组断裂是块体内部的主要地震构造 (王洋龙, 2006)。滇中地区的 NNW—SSE 向近水平主压构造应力场也有利于它们的走滑活动。

## 2.2 历史地震活动的构造条件分析

本地区破坏性地震记载最早始于 1517 年 7 月 22 日通海河西  $5\frac{1}{2}$  级地震。在玉江断裂及附近记录到的最大地震是 1571 年 9 月 19 日  $6\frac{1}{4}$  级和 1761 年 5 月 23 日  $6\frac{1}{4}$  级地震, 分别发生在玉江断裂端点所在的通海盆地和玉溪盆地。此外, 在  $F_{1-1}$  断裂的扭曲部位还发生过 1560 年  $5\frac{1}{2}$  级地震。

### (1) 1571 年 9 月 19 日通海 $6\frac{1}{2}$ 级地震

史料记载仅寥寥数语, 涉及到的历史文献也较少, 到目前为止编辑在册的文献有《国榷》、万历《云南通志》、天启《滇志》、嘉庆《临安府志》和《国民通海备征录》, 其中以万历《云南通志》最为详细 (云南省地震局, 1988)。根据这些记载, 本次地震震级推测为  $6\frac{1}{4}$  级, 震中位于通海 (国家地震局震害防御司, 1995)。由于资料匮乏,

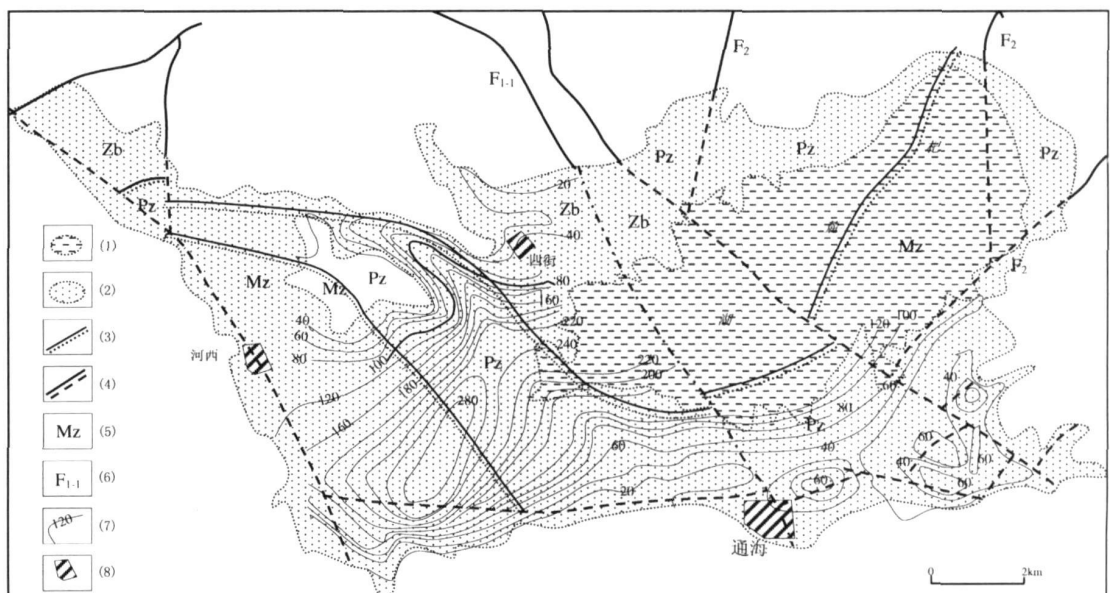
无法圈定地震烈度等震线。但基本可以肯定的是, 该地震发生在通海盆地或附近, 处于小江断裂南段和玉川断裂分支  $F_{1-1}$  的复合部位, 断裂对盆地的后期发展演化均起到控制作用。

通海盆地缺失上新统, 第四系与前新生界呈不整合接触。盆地基底由前新生代不同时代的地层组成, 总体表现为一被小江断裂南段  $F_2$  所控制的 NE 向向斜, 但被  $F_{1-1}$  破坏 (图 4)。据物探资料①, 盆地的第四纪沉积中心与现代杞麓湖水体中心并不一致, 而是西移约 10 km, 即位于通海县城以西 5 km 处的小街附近, 最大沉积厚度在 290 m 左右, 四街至通海县城一带杞麓湖底的第四系最大厚度在 220 m 左右, 等厚度线在通海县城附近为 NE—NEE 向, 在西城一带转变为 NW—NNW 向, 基本与附近的  $F_{1-1}$  走向一致。此外, 盆地内的  $F_{1-1}$  呈现出对  $F_2$  的阻断,  $F_{1-1}$  右旋断错盆地南缘近 EW 向断裂约为 350 m 左右。

因此, 从构造及活动的角度分析, 不能排除玉江断裂为本次地震的发震断裂的可能性。

### (2) 1761 年 5 月 23 日玉溪北古城 $6\frac{1}{4}$ 级地震

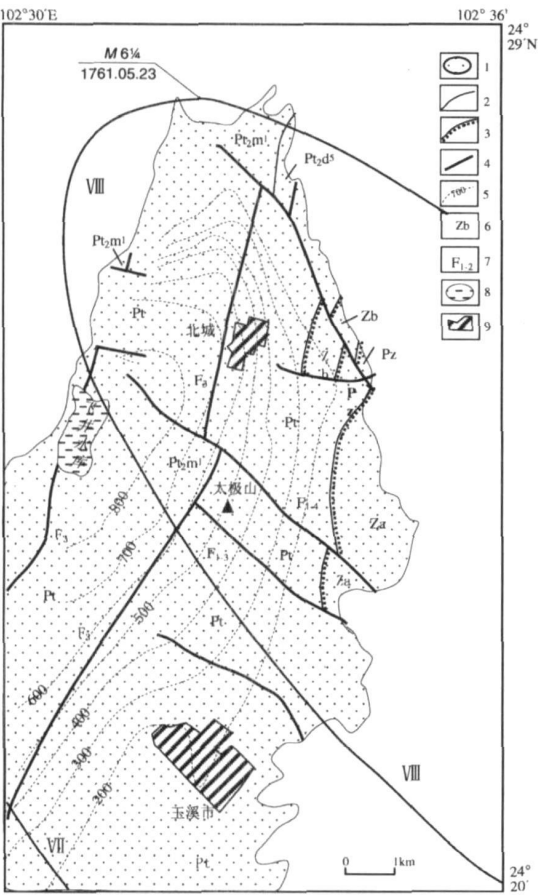
在《清代地震档案史料》、《乾隆实录》和道光《云南通志》中, 对该地震有比较详细的记载, 但文字叙述集中在灾情与赈灾方面, 无地震地质



(1) 现代湖泊; (2) 第四系分布范围; (3) 地层不整合界线 (4) 断裂 (虚线为推测); (5) 地层代号; (6) 断裂编号; (7) 第四系厚度等值线 (单位: m); (8) 县城/村寨  $F_{1-1}$ : 玉江断裂分支;  $F_2$ : 小江断裂

图 4 通海盆地基底构造及第四系厚度等值线分布图①

灾害的描述（云南省地震局，1988）。根据这些文献记载的灾情，该地震震级确定为  $6\frac{1}{4}$  级，VI~VII 度等震线呈近 SN 向（国家地震局震害防御司，1995）。1995 年之后，云南省地震局对该地震进行了反复的调查研究（柴天俊等，1996），结合地表破坏情况，云南省地震局（2000）重新公布了该地震的烈度分布，其宏观震中位于北城至普妙乡之间，震中烈度为 VIII 度，VI~VIII 度区长轴方向是 NW—SE 向。由该地震的烈度分布可知，VII~VIII 度等震线基本围绕着玉江断裂，其中的晚更新世活动段或分支位于 VIII 度区的中心偏西南地带（图 5）。



(1) 玉溪盆地 (2) 1761 年 5 月 23 日玉溪北古城 6 级地震等震线; (3) 推测基底地层不整合界线; (4) 推测断裂; (5) 基底埋藏等深度线 (相当于上新统第四系等厚度线, 其中 100 m 等厚度线相当于第四系等厚度线) (单位: m); (6) 基底地层代号; (7) 断裂编号; (8) 水库; (9) 城镇; Pz 古生界; Zq 震旦系; Pt 中元古界; F<sub>1</sub> 玉江断裂; F<sub>2</sub> 普渡河断裂

图 5 玉溪盆地基底构造与 1761 年  $6\frac{1}{4}$  级地震等震线分布图<sup>①</sup>（云南省地震局，2000）

玉溪盆地的基底为前古生界组成的近南北向向斜，它既被普渡河断裂 F<sub>2</sub> 破坏，也被玉江断裂中的 F<sub>1-3</sub> 和 F<sub>1-4</sub> 所错断，并且 F<sub>2</sub> 被 F<sub>1-4</sub> 左旋走滑位错约 400 m，但盆地基底中的震旦系又被 F<sub>1-4</sub> 右旋位错约 150 m（柴天俊等，1996）。值得注意的是，第四系 100 m 等厚度线在穿越 F<sub>1-3</sub> 时发生约 100 m 右旋扭动，而穿越 F<sub>2</sub> 的等厚度线则无这种水平扭动。此外，在 F<sub>1-4</sub> 的沿线可见线性排列的大量滑塌体，发育高度几乎在同一等高线上，虽然到目前为止还没有时间上的证据说明这是 1761 年地震所为，但可以肯定的是它们属于同一突发事件的产物，而玉溪盆地北缘的 F<sub>2</sub> 则无这种现象。

由此可见，将 1761 年 5 月 23 日玉溪北古城  $6\frac{1}{4}$  级地震的发震断裂推测为玉江断裂要比普渡河断裂更合理一些。

2.3 仪测地震活动

1965 年云南常规区域测震台网建设初具规模。从那时起，台网纪录到一些沿玉江断裂的中小地震活动，图 6 是其中 F<sub>1-2</sub>~F<sub>1-4</sub> 沿线的仪测震中分布图。从图中可以看出，此类地震活动仍有一定的密集呈带性，而 3 级以上地震活动主要集中在断裂的复合部位，即大矣子至九溪。需要指出的是，2001 年 7 月 15 日在九溪发生过 1 次 4.9 级地震，震中位于 F<sub>1-2</sub> 与 F<sub>1-3</sub> 的右阶斜列部位，现场调查肯定了玉江断裂对震害的影响——九溪至河口村沿线山坡多处出现垮塌，九溪至江川新建一级公路已处理的土质边坡出现 5 处坍塌。当地遭受到 VI 度影响。

3 大坝的地震影响浅析

3.1 潜在的最大地震

(1) 1985 年禄劝 6.3 级地震。地震发生在北西向则邑断裂与普渡河断裂北段的交汇部位。极震区位于禄劝县转龙盆地以西的则邑一带，烈度为 VIII 度，形态类似于一个向 SW 方向歪斜的“葫芦”。余震总体上呈 NW—SE 向展布，主震震源机制解 B 节面走向 298°，具有右旋逆断性质。地表破坏主要有崩塌、滑坡和地面开裂，分布零散，无明显的方向性。

<sup>①</sup> 云南省地质矿产局，1987. 1:5 万玉溪幅区域地质调查（编测）说明书  
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

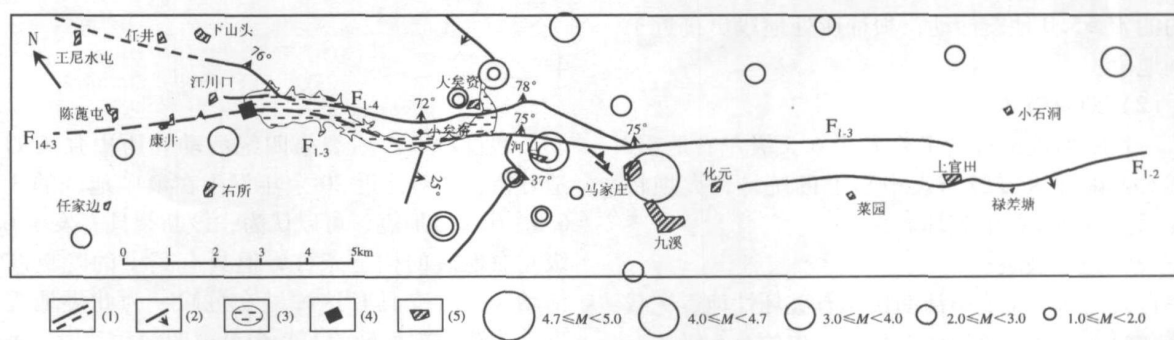


图 6 玉江断裂分支  $F_{1-2} \sim F_{1-4}$  附近的震中分布图

震区内发育有 3 组不同走向的断裂, NW 向红岭坡断裂、则邑断裂、NNW 向洗马河断裂和属于普渡河断裂组成部分的 NE 向断裂, 并且北西向断裂切错普渡河断裂。野外调查也发现, 在这些断裂中惟有则邑断裂属晚更新世活动断裂。综合各种表象, 确认 NW 向则邑断裂为这次地震的发震构造。

(2) 1995 年武定 6.5 级地震。地震发生在 NW 向第四纪活动断裂与近 SN 向汤郎—易门晚更新世活动断裂北段的交汇部位, 并且前者切错后者。极震区 (IX 度) 位于武定县发窝一带, 呈一长轴为 NW—SE 向且向东北突出的椭圆, NW—SE 向长约 25 km, NE—SW 向长约 12 km; 余震分布也呈 NW—SE 向, 震源机制解 A 节面走向  $277^\circ$ 。地震的地表破坏有地裂缝、崩塌、滑坡、地陷和喷砂冒水等, 但分布零散, 不连续。总体上看, 支持发震构造为 NW 向断裂的证据多于近 SN 向断裂的证据。

(3) 2000 年姚安 6.5 级地震。地震发生在姚安与大姚两县交界的马屯至官屯一带, 地质构造处于 NW 向马尾箐断裂与近南北向潜伏性断裂的交汇部位。通过野外地震地质考察, 并结合高震害异常的分布、余震分布、震源机制解、地表形变、历史地震活动、区域和震区地震构造的联系, 这次地震的发震构造是位于震区中部的 NW 向马尾箐断裂。

以上 3 个震例都有这样一些共同的特点: 极震区内分别发育有一条区域性近 SN 向断裂和规模不大的 NW 向断裂, 并且后者切错前者, 除 1995 年武定 6.5 级地震的发震构造尚有异议外, 其它两次地震均为 NW 向断裂, 地震时, 无明显的构造型地

表破裂 (地震断层) 产生; 余震分布方向和震源机制解的某一节面走向均为 NW 向; 极震区长轴或高烈度异常亦为 NW 向; 其中的构造和震害特征又恰恰与 1761 年玉溪北古城  $6\frac{1}{4}$  级地震一致。

根据上述构造类比的结果, 并结合 1517 年以来玉江断裂沿线的地震活动, 可以认为, 该断裂中的晚更新世活动段或分支存在发生 6.5 级左右地震的潜在危险。

### 3.2 危险地段

从理论上讲, 断裂的端点、拐点、阶区和交汇部位都有利于应力的集中, 是地震发生的重要危险地段。从历史和现代仪器测地震活动来看, 沿玉江断裂的强震活动均发生在玉溪盆地、九溪盆地和通海盆地及其附近。因此, 从这个意义上来看, 玉江断裂的这些部位应是未来潜在强震发生的危险地段。

### 3.3 地震影响

综上所述, 玉江断裂是一条具有发生 6.5 级左右地震危险的发震构造, 而发震断裂为晚更新世活动段, 危险地段包括水库库首。

#### (1) 坝址地段

根据《水工建筑物抗震设计规范》中有关水工建筑物的场地选择的规定, 从构造活动性的条件来看, 在坝址 8 km 范围内存在  $F_{1-4}$  和  $F_{1-3}$  两条活动断裂, 其中距坝址直线距离仅为 700 m 的  $F_{1-4}$  长度小于 10 km, 位于库尾的  $F_{1-3}$  长度也不超过 10 km; 若从 1761 年 5 月 23 日玉溪北古城  $6\frac{1}{4}$  级地震的极震区分布来看, 则库区处于极震区范围。结合构造条件, 可以认为, 历史上库区曾发生过  $5.0 \leq M < 7.0$  地震。综合这些条件, 兼顾坝址 8 km 范

围内的  $M \geq 5.0$  地震活动, 坝址所处地段更接近于不利地段。

#### (2) 地震破坏

一旦距坝址最近的  $F_{1-4}^b$  发生 6.5 级左右地震, 根据对云南地区震级与震中烈度的统计, 大坝将遭受 VIII 度或 VIII 度强的破坏。

#### (3) 地表破裂

自公元 624 年滇中活动块体有破坏性地震记载以来, 尚未发现在该块体内部所发生的 6.5 级左右地震伴有地表破裂产生的震例。近 20 多年对滇中地区此类地震的科考工作也证实了这一点, 如在上述所举的 3 个震例中均没有发现沿先存的活动断裂产生显著的构造型地表破裂。

邓起东等 (1992) 曾对青藏构造区的地震地表破裂做过详细的统计研究, 发现  $7.0 > M \geq 6.0$  地震伴有地表破裂的震例仅为 4 例; 与滇中活动块体有关的震例仅有 1 例, 即 1966 年 2 月 5 日云南东川 6.5 级地震, 它产生于块体东界的小江全新世活动断裂上。

蒋浦等 (1998) 也曾对中国大陆地震断错形变与震级做过概率分析, 其结果表明: 当发生 6.5 级地震时, 95% 的断裂不会出现地表断错形变, 仅有个别地震发生时才有可能出现。经对比分析, 这些个别地震均发生于全新世活动断裂, 部分断裂为活动块体边缘断裂的组成部分, 前述的 1966 年 2 月 5 日云南东川 6.5 级地震就属这种情况。

玉江断裂, 既不是全新世活动断裂, 也不是活动块体边缘断裂的组成部分。这就意味着, 当该断裂发生此类地震时产生地表破裂的可能性不大。

此外, 《建筑抗震设计规范》规定, 当场地内存在发震断裂时, 若为非全新世活动断裂, 可忽略发震断裂错动对地面建筑物的影响。

#### (4) 安全距离

根据王爱国等 (2007) 对活动断层地震变形与重大工程场地安全距离 (由断层错动引起的地表应变值小于  $0.65 \times 10^{-4}$ ) 的研究, 当倾角为  $75^\circ$  的走滑断层发生 6.5 级地震时, 上盘的安全距离为 3 650 m; 下盘是 2 400 m。以此为依据, 当  $F_{1-4}^b$  发生 6.5 级地震时, 处于该断裂下盘约 700 m 的东风水库大坝, 其地表应变值大于  $0.65 \times 10^{-4}$ 。也就是说, 大坝处于地表应变值大于  $0.65 \times 10^{-4}$  的非安全距离之内。

## 4 结论

通过对玉江断裂第四纪活动和历史强震的构造分析, 并对近 20 余年发生在滇中地区的 3 次 6.3 ~ 6.5 级地震, 可以认为, 该断裂具有发生 6.5 级左右地震的构造条件, 但只有其中的晚更新世活动段或分支具有这种潜在危险, 为此类地震的发震构造。坝址处的  $F_{1-3}^b$  为早第四纪活动段, 不具备此条件。

无论是从构造类比还是有关规范分析, 当玉江断裂发生 6.5 级地震时, 大坝将遭受 VIII 度或 VIII 度强的破坏, 在地震时断裂虽然不会对大坝产生不可抗拒的断错破坏, 但引起的地表应变值很可能大于  $0.65 \times 10^{-4}$ , 这将严重威胁大坝的安全。故此, 应对该坝体采取行之有效的抗应变加固措施。

#### 参考文献:

- 邓起东, 于贵华, 叶文华. 1992 地震地表破裂参数与震级关系的研究 [A]. 见: 活动断裂研究理论与应用 (第 2 卷) [M]. 北京: 地震出版社, 247—263.
- 国家地震局震害防御司. 1995 中国历史强震目录 (公元前 23 世纪—公元 1911 年) [M]. 北京: 地震出版社, 123.
- 蒋浦, 梁小华. 1998 关于工程地震实践若干问题 [J]. 工程地质学报, 6 (1): 1—26.
- 王爱国, 马巍, 石玉成. 2005 活动断裂地震变形与重大工程场地安全距离研究 [J]. 地震研究, 28 (4): 359—363.
- 王洋龙, 王晋南, 安晓文, 等. 2007 云南玉溪东风水库断裂的第四纪活动 [J]. 地震研究, 30 (2): 157—163.
- 云南省地震局. 1988 云南省地震资料汇编 [M]. 北京: 地震出版社, 46.
- 云南省地震局. 2000 云贵地区地震等震线图集 [J]. 地震研究, 第 23 (增刊): 21.
- GB 50011—2001 建筑抗震设计规范 [S].
- 中国地震局. 2001 中国地震动参数区划图 [M]. 北京: 中国标准出版社.
- 中国地质科学院地质力学研究所. 1997 中国区域地壳稳定性图 (1: 500 万) [J]. 北京: 地质出版社.
- DL 5073—2000 水工建筑物抗震设计规范 [S].
- 玉溪地区水利电力勘测设计院. 1997 东风水库大坝工程地质复核及坝体检查报告 [R]. 玉溪: 玉溪地区水利电力勘测设计院.
- 王洋龙. 2006 滇中块体的旋转作用与中强地震活动 [R]. 昆明: 云南省地震局.
- 云南省地震工程研究院. 2003 玉溪市抚仙湖、星云湖出流改造工程场地地震安全性评价报告 [R]. 昆明: 云南省地震局.
- 柴天俊, 田军. 1996 玉溪地区地震危险性分析 [R]. 昆明: 云南省地震局.

## Analyzing Earthquake Influence of Yujiang Fault on Dongfeng Reservoir Dam

WANG Yang-Long, WANG Jin-Nan, AN Xiao-Wen, MAO Yu-Ping

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China)

## Abstract

The activity of the Yujiang fault has been studied in this paper. Combining the seismic fault with the earthquake case analyses in the mid-Yunnan area, it is considered that this fault is a seismic structure having  $M_{6.5}$  earthquake risk. The major risk segment is Eocene part, where is only 700m away from the dam. Once an earthquake occurs, the dam will suffer VIII or VIII<sup>+</sup> damage. Although an earthquake will not cause irresistible dislocation damage to the dam, the surface strain value is possibly greater than  $0.65 \times 10^{-4}$ , which will greatly threaten the safety of the dam. Therefore, an effective reinforcement measures against the strain should be taken to the dam body.

**Key words:** Yujiang fault, seismogenic fault, safe distance, surface strain, Dongfeng reservoir, Yunnan