

# 广西龙滩水库诱发地震环境影响评价

徐宗学

黄乃安

常宝琦

(清华大学) (武汉水利电力学院) (广东省地震局)

## 提 要

本文根据现有地震地质资料,尤其是近五百年来库区周围的历史地震活动情况,对龙滩水库诱发地震可能造成的环境影响作了初步评价。其结果表明,库坝区存在发生破坏性水库地震的风险,尤其库区周围岩溶的存在,为诱发岩溶塌陷型水库地震创造了条件,对于水库堤坝岸坡的稳定是不利的,对库区周围的环境亦有不利影响。

## 一、前 言

随着各国水利资源的大量开发和利用,到目前为止,全世界已兴建了数以万计的大中型水库,这些水库的合理调度和运用,为各国的经济建设提供了丰富的能源。然而,随着世界各国高坝大库容水库的加速建设,由于水库蓄水诱发地震的事件也相应增多,尤其是六十年代以后,接连出现了我国新丰江、赞比亚卡里巴、希腊克里马斯塔及印度柯依纳水库地震,在世界各地引起了强烈反响,同时也给地震工作者提出了新的研究课题。

近年来,随着水利工程环境影响评价工作的深入,水库诱发地震环境影响评价工作也逐渐受到人们的关注。尤其象龙滩水库这样一个规模巨大的水利工程,其诱发地震环境影响评价工作更为必要,然而遗憾的是,到目前为止,还很少甚至几乎没有人对水库诱发地震作过系统的环境影响评价工作,现有水利水电工程环境影响评价规范亦没有对水库诱发地震环境影响评价的具体内容作出明确、详细的规定,因而本文的工作尚属于一种探索性的工作。

## 二、龙滩水库概况

龙滩水库位于红水河上游,坝高220米,总库容为273亿米<sup>3</sup>,电站装机容量为540万千瓦,是一座高坝大库容、以发电为主的水利枢纽工程。整个库区位于云贵高原东南部,深切于丛山峻岭之中,水深流急,水急滩多,气候温润,雨量充沛。库基大量分布石灰岩,在河流的长期溶解下,沿途溶洞、溶沟、溶槽随处可见,尖山、深谷、崖洞、石林等也大量存在,因而库底形态蜿蜒曲折,变化多端,十分复杂,整个水库分布展延于红水河、布柳河、南盘江、北盘江、蒙江及曹渡河的大部分河段,库水位最深近200米左右。

库区的地层岩性以砂页岩为主，砂岩透水性强构成含水层，页岩透水性较弱而成为隔水层，在砂页岩交替迭置的地段，为库水入渗并形成水体的有限效应区创造了条件。尤其库区岩溶发育极盛，地表峰丛石山、漏斗、落水洞、溶蚀洼地和谷地到处可见，地下溶洞极大，构造上存在强烈的破碎现象，这一切都为诱发水库地震孕育了条件。

库区内断层分布较广，离大坝最近的断裂有八腊断裂和天峨~金谷断裂带等，历史上发生过较高震级地震的断层有两处：一处是距大坝110公里的右江断裂，历史上曾发生过多达5.0级地震；另一处为与凌云、浪平、百地断裂相连接的北南向断裂，该带历史上曾发生过库区内最强的一次地震，震级达6 $\frac{1}{2}$ 级。在大坝50公里范围内，即天峨县境内布柳河一带曾发生过3次大于3.0级的地震，上述6 $\frac{1}{2}$ 级强震于1875年发生在距大坝约50公里处。另外，离坝址较远的册亨、望谟、关岭、兴仁和晴隆等地也属于库区内地震活动性较强的地带，历史上有记载的破坏性地震就有5次之多，但由于离坝址较远，故一般不会对大坝构成太大的威胁。

### 三、水库诱发地震危险评价

在对水库诱发地震危险性作出评价以前，首先需要确定水库诱发地震危险性评价的基本原则，根据国内外进行水库诱发地震危险性分析的经验，可以将上述基本原则概括为：按照研究区与库坝区的地质条件和历史上的地震活动情况，估计天然地震对水库的影响，对水库诱发地震的风险率作出估算，并评价水库诱发地震对大坝及其附属建筑物、库区周围的城镇与自然环境以及由此引进的次生灾害影响，概算诱发地震对大坝与水库的极限影响，为水利工程的合理开发提供参考依据<sup>[1]</sup>。

针对龙滩水库的具体条件，将水库诱发地震环境影响评价分为两个阶段，第一阶段是结合水文工程地质勘察进行的定性评价；第二阶段主要是根据第一阶段定性评价的结果，对地震风险率及危害性作出评价，并提出相应的措施和建议，为工程的施工运行提供参考依据，本文主要是第二阶段的评价工作。

#### 1. 危险库段评价

七十年代至今，人们对水库诱发地震的物理成因与机制进行了广泛深入的研究，结合水库诱发地震震例的研究，探讨了有关的地震地质及水文条件，概括出了若干用于评价蓄水后诱震风险的判据，根据我们的经验，将主要判据归纳为以下几条：

(1) 库坝区有新构造断裂带通过，尤其是其活动的力学性质为张性或扭性，且断层有现今活动的直接地质证据；

(2) 中新世断陷盆地或其边缘，差异性构造活动明显，断层带和破碎带有一定的规模和导水能力；

(3) 库区地表虽未发现新构造断裂带，但深部存在重力异常带或磁异常带，库坝区或其邻近有温泉出露；

(4) 库区岩体裂隙发育较深，透水性强，沿断层有可靠的历史地震记录或仪器记录的地震活动；

(5) 库区有较大面积的碳酸盐岩类分布，其中包括某些地层厚度较大且质纯的厚层块状灰岩，现代岩溶作用发育，且已有天然岩溶塌陷地震的记录；

(6) 一定的气候水文条件及合适的岩溶水文地质结构条件。

至于破坏性水库地震,可以参考李起彤早些时候的研究成果<sup>[2]</sup>,相应判据为:

(1) 高坝大水库:一般坝高超过100米,库容大于20亿米<sup>3</sup>;

(2) 活动断层:在库坝区(半径约25公里)存在大的活动断层,这些断层在第四纪特别是全新世有新活动;

(3) 活动地震带:首先库区要在地震带上,这里有中强地震的历史记录或潜在震源,其次,所在地震带要处于地震活动期。

一个水库若具备了上述三个条件,在蓄水后五年或稍长一段时期内,则有可能发生破坏性水库地震。

据分析,龙滩库区50公里范围内比较重要的断层有八条:平腊(A)、八南(B)、巴鱼(C)、八腊(D)、达良(E)、八茂(F)、望漠~逻西~八南断层东段(G)及里落~浪全断层西段(H),如图1所示,各断层内均存在较厚的软弱夹层,并且多具有发生强

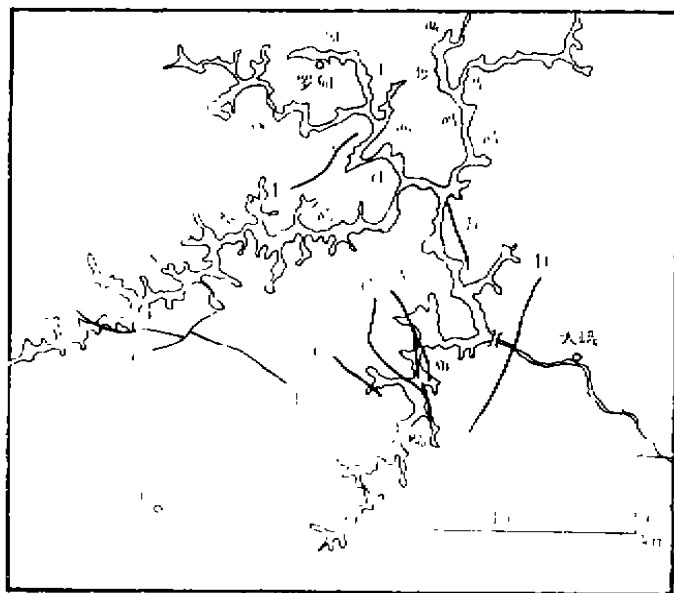


图1 库坝区附近主要断裂分布图

Fig. 1 Distribution of the major fracture near the reservoir area

度较大地震的历史,从岩性条件来看,库区主要分布有三迭纪砂页岩,以砂岩为主的岩层,节理发育,透水性强,构成含水层;以页岩为主的岩层,渗透性较差,形成隔水层,是使库水大量入渗、形成水体有限效应区、建立深部孔隙压的良好环境,再结合库大水深的特点,不难断定发生强度较高地震的风险是潜在的,即库区具有诱发构造型水库地震的可能性。另一方向,库区分布有大量的碳酸盐类岩石,且岩溶发育,地下水侵蚀作用极盛,管道溶洞水深度最大超过160米。在坝址天峨附近,岩溶作用极为强烈,地表峰丛石山,漏斗、落水洞、溶蚀洼地和谷地随处可见;地表、地下溶河、溶槽、溶隙、溶沟、竖井亦十分发

育,地下溶洞极大<sup>[3]</sup>,是形成岩溶塌陷型水库地震的有利条件。

由此可以得出初步结论:靠近大坝及库内深水区的向阳~逻西~更新北一带是发生破坏性水库地震的危险地段,其他库段如南盘江东段、北盘江中部与库区东北方罗甸一带亦存在诱发构造型水库地震的危险;此外,在蓄水过程中,大坝附近天峨一带直至离大坝不远的南丹~河池断裂周围将会诱发一些震级较小的岩溶塌陷型水库地震。

## 2. 危险震级评价

参考上述结果,根据不同的构造成因便可确定出可能诱发地震的震级,对于构造型水库

地震,较为公认的方法是取当地天然构造地震的可能最大震级作为框算的上限,而对于岩溶塌陷型水库地震,则应参照天然岩溶塌陷地震情况确定。对龙滩库区及研究区历史地震目录的研究分析表明,其中的天然构造型地震约80%发生于汛期,换言之,即使是天然构造型地震,也大多与水的作用分不开,在水的作用下发生,因此可以将确定天然构造型地震震级的方法直接近似移用于确定水库诱发构造型地震震级。结合龙滩水库地震地质资料条件,本文采用较为得到大家公认且其结果偏于保守的估计方法,即地震地质类比法和断层破裂长度法。

在断层破裂长度法中,先后提出了各种各样的经验公式,本文选用大家所公认的郭增建公式和国家地震局震源机制会战组公式求震级上限,其结果见表1。需要说明的是,对其长度暂时难以确定的断层,相应的可能最大震级取为历史最大震级加一定的权重后的结果,另据潘建雄等人分析<sup>[4]</sup>,上述断裂带目前多处于地震发展阶段的平静期,并且可以推断今后相当长时期内地震频度与强度不会发生太大的变化,而华南地区处于地震平静期的断裂地震带,一般发展的最大震级不超过5 $\frac{3}{4}$ 级。故根据计算结果,除处于活动期的八腊断裂外,其它断裂的可能最大震级皆取为5 $\frac{3}{4}$ 级,参考历史地震活动情况,将八腊断层处可能最大震级定为6.0级。

表1 龙滩库区主要断裂带可能最大震级

Table 1 The possible maximal magnitude of the major fracture zone in Longtan Reservoir area

断 层	长 度	M=3.3+2.1lgL		M=3.8+1.7lgL		M=3.0+2.3lgL		取用震级上限
		L	$\frac{1}{2}L$	L	$\frac{1}{2}L$	L	$\frac{1}{2}L$	
平 腊	17	5.9		5.9		5.8		5 $\frac{3}{4}$
八 南	27		5.7		5.7		5.6	5 $\frac{3}{4}$
巴 鱼	11	5.5		5.6		5.4		5 $\frac{1}{2}$
八 腊	25	6.2		6.2		6.2		6.0
达 良	12	5.6		5.6		5.5		5 $\frac{1}{2}$
八 茂	15	5.8		5.8		5.7		5 $\frac{3}{4}$
逻西~八南	36		5.9		6.0		5.9	5 $\frac{3}{4}$
里落~浪全	13	5.6		5.7		5.7		5 $\frac{1}{2}$

在早些时候的工作中<sup>[5]</sup>,曾根据综合影响参数E与震级Ms的关系求得龙滩水库最大诱震震级为6.1级,用分级模糊评判法求得 $Ms \geq 5$ ,进一步结合本文的分析可知,构造型水库地震的最危险震级宜定为6.0级。另一方面,考虑到库区附近曾发生过6 $\frac{1}{2}$ 级天然构造型地震,故在估算地震对大坝的影响时,可以考虑按6 $\frac{1}{2}$ 级进行补充校核,但在评价水库地震对当地环境地质条件和城镇的影响时,没有必要采用这样高的标准。

除了上述构造型水库地震外,在库区周围还可能诱发岩溶塌陷型水库地震,据分析我国岩溶地区的水库地震,明显属于塌陷气爆型的有6例,其最大震级分布于1.9~3.2级范围内,而且与水库大小无明显相关关系。与龙滩水库相距不远的乌江渡水库,据分析历史上曾

发生过4~5次天然岩溶塌陷地震,最大震级为4.0级左右。鉴于此,将发生于坝址附近的岩溶塌陷型水库地震的可能最大震级取为Ms4.0级是合适的,对坝址不远处的河池~南丹断裂带的历史地震分析知,将该断裂带的可能最大震级取为Ms4.0级也是可以的。

## 四、水库诱发地震危害评价

水库诱发地震危害评价分几步进行,首先要进行烈度评价,然后对水库、周围环境、次生灾害等项目分别评价。

### 1. 库区烈度评价

据分析,水库地震多为极浅源地震,而统计结果表明,多数水库地震的震源深度都小于20公里,且居于3~7公里内最多<sup>[6]</sup>,结合龙滩库区大量存在碳酸盐类岩石的岩性条件,取震原深度为5公里,而中国的浅源地震,其震中烈度与震级之间存在如下关系,

$$I_0 = \frac{M-1.5}{0.58}$$

$$\text{及 } I_0 = 1.5 (M + 0.5 - 0.8 \lg h)$$

其中h为震源深度,用二种公式进行计算,经比较分析后取用的结果列入表2。

表2 烈度计算成果表  
Table 2 The result of intensity calculation

断 层	震 级	震中烈度	到大坝距离 (Km)	到大坝影响烈度
平 腊	5 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	Ⅶ	10	Ⅴ
八 南	5 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>		14	Ⅳ
巴 鱼	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>		18	Ⅳ
八 腊	6.0		4	Ⅶ
达 良	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>		12	Ⅴ
八 茂	5 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>		38	Ⅱ
逻西~八南	5 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>		32	Ⅱ
里落~浪全	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>		44	Ⅱ

在均匀介质中,一次地震的影响场是一个同心圆,自震中向外,烈度逐渐衰减,震中至各级等震线的距离可按式计算:

$$I_0 - I = 6 \lg \sqrt{\left(\frac{\Delta}{h}\right)^2 + 1}$$

式中I表示震中距为Δ处的烈度。然而,任何一个地区的地壳组成和结构都不是均匀的,任意一次地震的实际烈度场都不可能是一个理想的同心圆<sup>[7]</sup>。但由于龙滩库区岩溶极为发育,且岩性以灰岩为主,根据于品清的分析,在灰岩区,特别是岩液发育地区,等震线多为不规

则的多边形或准圆形，且与当地的岩溶形态一致或基本一致<sup>(8)</sup>。据此可绘出八处断层附近的危险烈度场，并由此进一步得到如图 2 所示的库区危险等震线图。

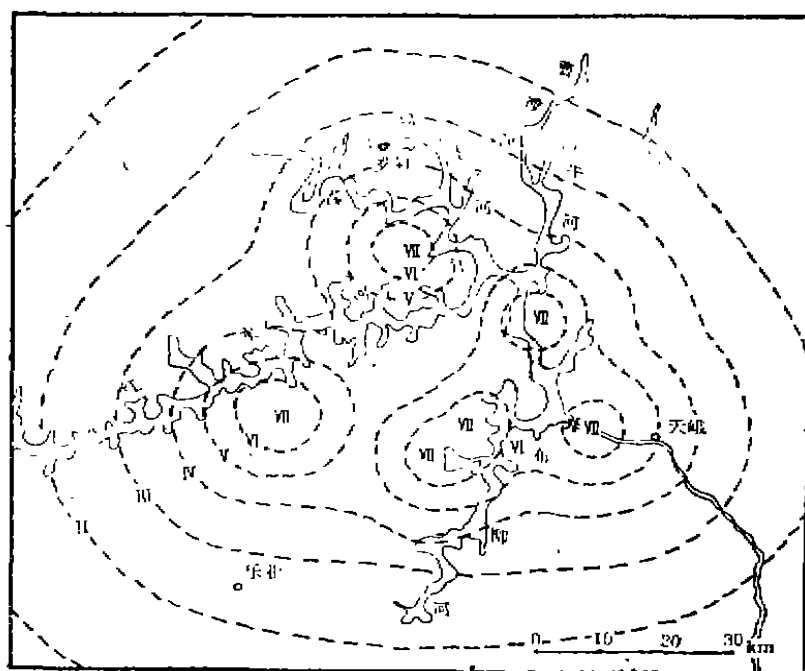


图 2 龙滩库区危险等震线图

Fig. 2 The risky isoseismal map of Longtan Reservoir Area

## 2. 诱发地震对大坝及附属建筑物影响评价

由图 2 可见，水库诱发地震对大坝的影响可达Ⅶ度，库段亦有部分地段处于Ⅶ度烈度区<sup>(8)</sup>，由此看来，水库诱发地震对大坝的影响不会超过区域天然地震的影响烈度，无须单独考虑，但在补充校核时，建议按Ⅶ度进行。

表 2 中亦列出了诱发地震对大坝的极限影响烈度，需要说明的是，八腊断层的震中烈度作了偏小的近似，实际计算值要稍高于Ⅶ度，这可以作为设计时的参考。另外，由于水库蓄水后坝址天峨附近有可能诱发岩溶塌陷型水库地震，影响场地的稳定性，故在大坝及其主要的附属建筑物施工以前，必须彻底查清有关的溶洞、溶沟及地下暗河，进行必要的技术处理。为了进一步避免渗漏和水蚀作用的发生，可在建筑材料中掺杂一些封闭性较好的材料，如塑性混凝土、沥青等，堤坝中的滤水层应尽量大一些，隔水层可用橡胶或塑性材料取代金属板。在由于底部产生岩溶塌陷型水库地震时会导致坝体破裂时，可根据上游来水情况有节制地放水，尽量避免由于快速泄水而引起的坝体失稳。由于诱发岩溶塌陷型地震，可能会引起滑坡，从而使库区产生巨大的涌浪，有可能破坏防浪栅，甚至造成漫坝，损坏坝区内的电力设备，并可能引起下游的洪水泛滥。为此，应有针对性地加固库堤斜坡，备用附加防浪栅，对下游河道进行相应的堤坝维修和防护，对下游河床有目的的疏导开通。另外，如果可能在大坝下游建一个相应的付坝，正常来水条件下保持空库，作为一个蓄水池，以应付意外

的漫坝事故，也是一条有效的措施。

### 3. 诱发地震对库区环境影响评价

所谓诱发地震对库区环境的影响，主要是指水库诱发地震对周围城镇居民及自然环境的影响两个方面。由于库区的地质组成和岩性结构特点，伴随水库诱发地震，库区两岸个别岩体发育、堤坡陡峻的地段可能会引起滑坡，造成一定的次生灾害，严重者可能会使库区产生一定波高的涌浪而危及大坝的安全。诱发地震引起的地壳震动可能会使一部分个别老旧房屋受到损坏，但总的影响估计除坝区及迳西附近外不会很大，尤其是库坝区位于云贵高原，沿岸城镇、重要厂矿企业有限，人烟稀少，故此除了大坝附近的工业民用建筑外，库区其他地段可按一般设防标准进行抗震设计。至于大坝及迳西附近，较重要的工业民用建筑可按5级（Ⅵ度）抗震能力设防，迁移及新建的城镇、厂矿企业要避开地下溶沟、溶洞较发育的地段，更不要建在有溶洞、溶沟和地下暗河发育的边坡上。

从现有水库诱发地震的震例来看，蓄水后一段时间内，可能会发生少量有感地震，引起当地居民的恐慌，根据克里马斯塔水库的诱震过程来看，在蓄水位低于一定高度之前，不会发生震级较高的主震。因此，有关单位在密切监视震情发展的同时，应注意普及地震知识，正确宣传引导，并采取恰当的预防措施。另外，由于意大利互依昂水库的巨型滑坡影响，世界各国都十分重视库区边坡的稳定问题，故建议对龙滩水库两岸的边坡稳定性，尤其是水库深水区及迳西附近库区两岸的边坡稳定性进行细致的计算和分析，并对沿库区两岸进行细致的地质勘察，查清地下溶沟、溶洞和地下暗河的存在，有针对性的进行相应的技术处理，以免引起较严重的次生灾害。

## 五、结 语

本文主要从定性的角度对水库诱发地震可能给库区周围造成的环境影响作了初步评价，其结果表明，龙滩水库诱发地震可能会给库区周围造成一定的环境影响，但其范围是有限的，不致于给工程带来难以解决的技术问题，也不会因此而造成经济上的沉重负担。有关结论可以作为龙滩水库规划、设计、施工以及运行、调度的参考依据，为水利资源的合理开发运用服务。

## 参 考 文 献

- 〔1〕徐宗学，水库诱发地震环境影响评价的原理和方法，水利电力科技，No. 1，1988。
- 〔2〕李起彤，破坏性水库地震发生条件初步研究，华南地震，Vol. 6，No. 2，1988。
- 〔3〕陈天铎，广西岩溶地区概况及水文特征，水文，No. 4，1985。
- 〔4〕潘建雄、黄日恒，广西龙滩水库地震地质概况及诱震条件的初步探讨，华南地震，Vol. 2 No. 1，1982。
- 〔5〕Chang Paoqi, Zeng xianze, Investigation on Inducing Earthquake Risk by Longtan Reservoir, 华南地震, vol. 7, No. 4, 1987。
- 〔9〕黄乃安，水库地震的特点与成因类型，水利电力科技，No. 4，1981。
- 〔7〕薛佳谋，水库工程区地震烈度预测的内容、途径和方法，华南地震，Vol. 2，No. 1，1982。

- (8) 于品清, 丹江口水库地震发生的地质构造条件, 西北地震学报, Vol. 2, No. 2, 1980.  
(9) 常宝琦, 水库诱发地震的预测, 华南地震, Vol. 4, No. 4, 1984.

# THE EVALUATION OF GUANGXI LONGTAN RESERVOIR INDUCED EARTHQUAKE ENVIRONMENTAL IMPACT

Xu Zongxue

( Tsinghua University )

Huang Naian

( Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering )

Chang Baoqi

( Seismological Bureau of Guangdong Province )

## Abstract

*The longtan reservoir induced earthquake environmental impact has been evaluated on the basis of the existing hydrogeology data, especially historical seismicity during the short-term period of five hundred years. The result shows that there is risk to induce destroyed reservoir earthquake. Especially karst is a favourable condition to induce karst collapsing explosion type reservoir earthquake. It is disadvantageous for stable of dykes and dams. There is also disadvantageous impact to reservoir environment.*

---