

糯扎渡水电站水库诱发地震预测^{*}

李志祥^{1,2}, 毛玉平², 谢建斌³, 肖海滨³, 李茂仙²

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

3. 云南华能澜沧江水电有限公司, 昆明 650214)

摘要: 采用概率预测方法, 依据设计参数对糯扎渡水电站水库蓄水后诱发地震的可能性进行了判断, 同时对可能的最大诱震震级进行了计算, 得出糯扎渡水电站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。

关键词: 糯扎渡水电站; 水库诱发地震; 概率; 预测

中图分类号: P315.72⁺8 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)增刊-0633-09

0 引言

澜沧江—湄公河作为一条国际性河流, 其水利资源的开发与利用是一个国际性举措, 在我国境内澜沧江中下游的云南糯扎渡电站的地震安全对下游六国区域间经济合作、地区政治安全具有重要影响, 本文就是在这一背景之下, 采用国内外学者提出的世界水库诱发地震统计样本及计算方法, 对糯扎渡水电站蓄水后诱发地震的可能性进行判定, 同时预测其可能诱发的最大震级。

地震预测包括时间、地点和震级三要素, 水库诱发地震都发生于水库蓄水以后不久或一定时间内 (一般认为 3~5 年内, 极少数震例有超过 5 年发震的) 并且分布于水库区, 因此, 时间和地点的判断在水库诱发地震预测中不具突出意义。水库诱发地震的预测实际上包含两个主要问题, 第一是水库蓄水以后发生诱发地震的可能性或概率; 第二是可能发生的诱发地震的最大震级。对于水利建设来说, 在工程设计之初提出水库诱发地震的预测意见——指出诱发地震的可能性、可能发生的地震最大震级, 根据预测意见采取必要的地震对策, 选择恰当的坝址和坝型, 进行必要的抗震设计, 使可能的水库诱发地震造成的危害减轻到最低限度, 从而产生明显的经济效益和社会效益。事实上, 鉴于生产建设的需要, 根据现有的认识, 我们将新建的高坝 (≥ 100 m)、大库容 ($\geq 10 \times 10^8$ m³) 水库都看作潜在的诱发地震的

对象 (丁原章等, 1989), 采用概率预测的方法对其水库诱发地震的未来状况进行估计, 当然, 有许多因素控制了诱发地震是否发生以及怎样发生, 有的因素来自水库系统之外, 如库区的构造地质条件、水文地质特征、构造应力累积的程度和断裂的分布等等, 而且一旦发生了水库诱发地震, 地壳对水库响应的反馈因素也将对诱发地震的发展起作用 (Simpson, 1985), 这些外部条件和反馈因素在决定诱发地震的发生和发展方面起了不容忽视的作用, 在进行具体的水库诱发地震的未来状况估计时, 应当考虑具体实际情况的差异性, 同时考虑概率预测的方法的适用范围, 以提高预测的准确性。

1 水库诱发地震的可能性预测

就水库诱发地震的预测而言, 对可能性的预测是第一位的, 目前这个方面的理论计算主要有三种方法, 第一种是在假设一般水库诱发地震最大震源深度约 10 km, 主震约 5 km 左右的前提下计算相关断层在蓄水前后由于应力调整以及介质参数变化导致的稳定度 (采用断层面抗滑稳定系数表征) 变化的断层强度分析法; 第二种是在应力—渗流藕联条件下, 通过联合求解平衡方程和渗流方程, 即只考虑库水荷载和孔隙压效应, 计算这两种效应导致的断层面强度变化, 进一步估计断层蓄水后的发震危险度的数值模拟法; 第三种方法就是由美国的佩克 (D. R. Packer) 和比切

^{*} 收稿日期: 2008-08-05.

尔 (G B Bercher) 等人提出的概率预测法, 其立意是在概率意义上对一个新建的水库的诱震危险性进行预测。由于迄今并不很清楚水库诱发地震发生的必要条件, 因而从现有大水库的可能与诱发地震有密切关系的因素进行统计分析显得更具合理性, 这些因素包括: 库深 (D)、库容 (V)、水库所在地区应力场状况 (S)、库区断层活动性

(F) 以及库区优势岩性条件 (G) (表 1); 佩克和比切尔等人给出了根据截止于 1980 年底世界上 39 座发震的和 173 座未发震的大水库 (大水库的定义是库深大于 92 m 或库容大于 $10 \times 10^9 \text{ m}^3$) 的资料得出的相应各因素状态的似然率 (表 2); 同时给出了 5 个因素、3 种状态下发震水库似然率与未发震水库似然率的比值 (IR) (表 3)。

表 1 诱震因素及状态

诱震因素	因素状态					
	1		2		3	
库深 (D) /m	D ₁ : 很深的	D ₁ > 150	D ₂ : 深的	150> D ₂ > 92	D ₃ : 浅的	D ₃ < 92
库容 (V) /10 ⁹ m ³	V ₁ : 很大的	V ₁ > 10	V ₂ : 大的	10> V ₂ > 1. 2	V ₃ : 小的	V ₃ < 1. 2
应力场状况 (S)	S ₁ : 逆断层 (σ ₃ 垂直, σ ₁ 、σ ₂ 水平)		S ₂ : 正断层 (σ ₁ 垂直, σ ₂ 、σ ₃ 水平)		S ₃ : 走滑断层 (σ ₂ 垂直, σ ₁ 、σ ₃ 水平)	
断层活动性 (F)	F ₁ : 活动的		F ₂ : 不活动的			
介质条件 (G)	G ₁ : 沉积岩		G ₂ : 变质岩		G ₃ : 火成岩	

表 2 世界发震的 (RIS) 与不发震的 ($\overline{\text{RIS}}$) 大型水库似然率

诱震因素	水库数目		因素状态					
			1		2		3	
	RIS	$\overline{\text{RIS}}$	RIS	$\overline{\text{RIS}}$	RIS	$\overline{\text{RIS}}$	RIS	$\overline{\text{RIS}}$
D	39	173	0. 308(12)	0. 133(23)	0. 564(22)	0. 728(126)	0. 128(5)	0. 139(24)
V	39	173	0. 231(9)	0. 208(36)	0. 410(16)	0. 214(37)	0. 359(14)	0. 578(100)
S	39	173	0. 205(8)	0. 208(36)	0. 538(21)	0. 642(111)	0. 256(10)	0. 150(26)
F	7	6	1. 00(7)	0. 67(4)		0. 33(2)		
G	39	173	0. 410(16)	0. 358(62)	0. 333(13)	0. 387(67)	0. 256(10)	0. 254(44)

注: 括号内为水库数目。

表 3 世界发震的与未发震的大型水库似然率比值

因素	因素状态		
	1	2	3
D	2. 316	0. 775	0. 921
V	1. 111	1. 916	0. 621
S	0. 986	0. 838	1. 707
F	1. 500	1. 000	
G	1. 145	0. 860	1. 008

1. 1 水库诱发地震可能性的概率计算方法

在各因素相互独立的情况下, 发震条件概率 $P(\text{RIS}/D, V, S, F, G)$ 与不发震的条件概率 $P(\overline{\text{RIS}}/D, V, S, F, G)$ 可根据贝叶斯定理表示:

$$P(\text{RIS}/D, V, S, F, G) = \frac{P(\text{RIS}) P(D, V, S, F, G/\text{RIS})}{P(\text{RIS}) P(D, V, S, F, G/\text{RIS}) + P(\overline{\text{RIS}}) P(D, V, S, F, G/\overline{\text{RIS}})},$$
$$P(\overline{\text{RIS}}) = 1 - P(\text{RIS})$$

2019-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1)

式中 $P(RIS)$ 和 $P(\overline{RIS})$ 是发震和未发震先验概率（或称检验前概率），在上述样本条件下为

$$P(RIS)=\frac{39}{39+173}=0.184 \qquad P(\overline{RIS})=1-0.184=0.816.$$

$P(D \vee S \vee F \vee G/RIS)$ 和 $P(D \vee S \vee F \vee G/\overline{RIS})$ 分别为发震与不发震事件的因素组合的条件概率，在假设各因素之间为概率独立时

$$P(D \vee S \vee F \vee G/RIS)=P(D/RIS)P(V/RIS)P(S/RIS)P(F/RIS)P(G/RIS), \tag{2}$$

$$P(D \vee S \vee F \vee G/\overline{RIS})=P(D/\overline{RIS})P(V/\overline{RIS})P(S/\overline{RIS})P(F/\overline{RIS})P(G/\overline{RIS}). \tag{3}$$

式（2）除以式（3），并代入式（1）得

$$\begin{aligned} \frac{P(RIS/D \vee S \vee F \vee G)}{P(\overline{RIS}/D \vee S \vee F \vee G)} &= \frac{P(RIS)P(D \vee S \vee F \vee G/RIS)}{P(\overline{RIS})P(D \vee S \vee F \vee G/\overline{RIS})} \\ &= \frac{P(RIS)P(D/RIS)P(V/RIS)P(S/RIS)P(F/RIS)P(G/RIS)}{P(\overline{RIS})P(D/\overline{RIS})P(V/\overline{RIS})P(S/\overline{RIS})P(F/\overline{RIS})P(G/\overline{RIS})} = \frac{P(RIS)}{P(\overline{RIS})}IR(D \vee S \vee F \vee G). \end{aligned} \tag{4}$$

一个新建大水库的 5 个因素的状态一经确定之后，根据表 3 查得似然比 $IR(D \vee S \vee F \vee G)$ 并代入式（4），就可以计算其发生水库诱发地震的概率 $P(RIS/D \vee S \vee F \vee G)$ 。

1.2 水库诱发地震可能性判据的确定

水库诱发地震为多因素联合作用下的随机现象，用统计概率方法预测其诱震危险性时，必须确定临界概率 P_c ，如果用上述提出的概率模式预测的发震概率 $P(RIS/D, V, S, F, G) \geq P_c$ ，则可以认为蓄水后可能产生诱发地震，反之，若 $P(RIS/D, V, S, F, G) < P_c$ ，可判断为不发生水库诱发地震。

采用下述 4 项指标确定合理的临界概率 P_c ：预测的精度 K 和 R 、信息量 $I(a, b)$ 和信息率 g 。它们的意义如下：

（a）预测的精度指标 K 和 R 为

$$K=1-\frac{(n^p-n_e^p)+(n^f-n_q^f)}{n}, \tag{5}$$

$$R=1-\frac{n_e^f}{n_e}-\frac{n_q^p}{n_q}. \tag{6}$$

式中 n^p 为用统计概率模式预测有震的水库数目；
 n^f 为预测无震的水库数目；
 n_e^p 为预测有震确也发震的水库数目；
 n_q^f 为预测无震确也无震的水库数目；
 n 为统计预测所用的发震水库和未发震水库总数；
 n_e^f 为预测无震但实际上发震的水库数目；
 n_q^p 为预测有震但实际上未发震的水库数目；
 n_e 为发

震的水库数目；
 n_q 为未发震的水库数目。它们之间的关系见表 4。

表 4 地震活动性统计记号

实际的 预测的	实际的		
	发震	不发震	合 计
已发震	n_e^p	n_e^f	n_e
未发震	n_q^p	n_q^f	n_q
合 计	n^p	n^f	n

（b）信息量

$$I(a, b)=H(b)-H_c(b). \tag{7}$$

$H(b)$ 和 $H_c(b)$ 分别为预测前和预测后的熵：

$$\begin{aligned} H(b) &= -P(n_e)\log(n_e) - P(n_q)\log(n_q) \\ H_c(b) &= -\frac{n^p}{n}\left[-\frac{n_e^p}{n^p}\log\left(\frac{n_e^p}{n^p}\right) - \frac{n_q^p}{n^p}\log\left(\frac{n_q^p}{n^p}\right)\right] \\ &\quad + \frac{n^f}{n}\left[-\frac{n_e^f}{n^f}\log\left(\frac{n_e^f}{n^f}\right) - \frac{n_q^f}{n^f}\log\left(\frac{n_q^f}{n^f}\right)\right]. \end{aligned} \tag{8}$$

（c）信息率

$$g=I(a, b)/H(b). \tag{9}$$

常宝琦等（1989）给出了采用上述样本的资料，在假设不同临界概率的情况下，4 项指标的计算结果如表 5。

表 5 水库地震用 概率方法预测的结果

P_c	n^p	n_e^p	n^f	n_q^f	K	R	$I(a, b)$	g
0. 1	147	36	66	63	0. 47	0. 285	0. 035	0. 074
0. 2	76	31	137	129	0. 75	0. 536	0. 092	0. 193
0. 3	35	20	178	159	0. 84	0. 427	0. 080	0. 169
0. 4	21	13	192	166	0. 84	0. 287	0. 053	0. 111
0. 5	12	10	201	172	0. 85	0. 245	0. 062	0. 130
0. 6	3	2	210	174	0. 83	0. 077	0. 024	0. 053
0. 7	0	0	213	174	0. 82	—	—	—

从样本资料的使用情况来看，在最大信息量和信息率条件下，具有较高精度的可能性概率判
据 R 取 0. 2为宜，如果某水库的各种可能组合条
件的发震概率均大于 0. 2 则判断其蓄水后诱发地
震的危险性是很高的。

1. 3 水库诱发地震可能性概率计算结果的不确定
性分析方法

在进行概率预测时，为了提高预测的可靠性，
应进行不确定性分析，不同的水库不确定性分析
的内容有所不同，这是因为：

第一个不确定性来源于资料中的因素状态的判
断可能有错误。一个区域的应力场状况的判定主要
根据以往地震的震源机制解、库区断层的优势活动
方式和大地构造特征三方面的资料，但不少库区并
不完全具备这三个方面的资料，容易错判。

第二个不确定性来源于库深和库容各状态的
截断水平，尤其是库深在某些设计中的水库可能

存在几种方案，库深的截断水平如发生变动则相
应的似然比可以有较大改动，自然就会影响发震
概率值。

第三个不确定性是由于抽样数目引起的，必
须对因素状态组合的方差进行分析。佩克和比切
尔给出了所用样本两种组合时 RI 和 \overline{RI} 各因素状
态的方差（ $\times 10^{-3}$ ）和标准差（ $\times 10^{-2}$ ）（表 6），
采用误差传播理论计算确定各因素状态组合的标
准偏差。第一组合的标准偏差 $\sigma(P_1)=0. 14$ ，第
二组合的标准偏差为 0. 13 这样，某一水库区这
两种因素状态组合的发震概率（依据（4）计算得
0. 357及 0. 630）经校正后为

$$P(RIS/d, \gamma, \delta, f, g)=0. 357+0. 140=0. 497$$
$$P(RIS/d, \gamma, \delta, f, g)=0. 357-0. 140=0. 217$$
$$P(RIS/d, \gamma, \delta, f, g)=0. 630+0. 130=0. 760$$
$$P(RIS/d, \gamma, \delta, f, g)=0. 630-0. 130=0. 500$$

表 6 准偏差的计算

因素状态		方差（ $\times 10^{-3}$ ）		标准偏差（ $\times 10^{-2}$ ）		变异系数	
		RS	\overline{RS}	RS	\overline{RS}	RS	\overline{RS}
第一种组合	D_1	5. 47	0. 67	7. 40	2. 58	0. 24	0. 19
	V_1	7. 77	0. 95	8. 81	3. 08	0. 35	0. 15
	S_2	6. 37	1. 33	7. 98	3. 65	0. 15	0. 06
	G_1	6. 20	1. 33	7. 87	3. 64	0. 19	0. 11
第二种组合	D_1	5. 47	0. 67	7. 40	2. 58	0. 24	0. 19
	V_1	7. 77	0. 95	8. 81	3. 08	0. 35	0. 15
	S_3	4. 88	0. 74	6. 99	2. 71	0. 27	0. 18
	G_1	6. 20	1. 33	7. 87	3. 64	0. 19	0. 11

2 水库诱发地震最大震级的预测

在对水库诱发地震的可能性作了预测之后，最
大震级的预测问题随之而来。在分析这个问题之前，

需要明确两个概念，这里要预测的水库诱发地震的
最大震级指的是由于水库蓄水而诱发的最有可能发
生的最大的常遇水库地震，它反映库水对可能的发
震断层的现今应力积累水平影响的程度；而不是可
能性很小甚至是小概率事件的水库诱发地震危险区

内可能和发震断层有史以来所发生的历史最大天然地震有关的水库诱发的地震强度所不可能达到的最接近的罕遇的极限水库地震^①。

除库区特定的地质构造环境外，当地地震基本烈度、库区本底地震危险性分析和水库的规模这三个因素与水库诱发地震的最大震级有关，前两者的确定方法已不属于水库诱发地震的专门研究，需要强调的是，在进行库区本底地震危险性分析时，必须重视水库蓄水对水库区活动断层的影响—水库荷载效应、水库造成的孔隙压变化和库水对岩石的软化作用都可能增大活动断层发生错动的可能性，在估计诱发地震最大震级时要充分考虑贯穿库区的活动断层的地震危险性（国家地震局地震研究所，1984）^②。

对水库诱发地震最大震级预测的理论计算主要有三种方法，第一种是对现有资料进行必要的数学处理，将发生 $M_s \geq 5$ 和 $M_s < 5$ 的水库诱发地震震例各“因素状态”的差异性进行检验，证明它们之间存在显著的差异性，同时根据已有研究

成果建立起“专家意识”，赋予各因素及其状态不同权重，尽量提高采用震级分档的 M_x （发生 $M_s \geq 5$ 的诱发地震）、 M_0 （发生 $M_s < 5$ 的诱发地震和 M_0 （不发生水库地震）的最终预测结果与实例的符合率，以求得“最佳解”的两级综合模糊评判方法；第二种和第三种是分别建立综合影响系数、断层破裂长度与水库诱发地震最大震级的关系式，来预测水库诱发地震的最大震级。三种方法中，水库诱发地震两级综合模糊评判方法计算复杂，精度偏低，不推荐采用。

2.1 水库诱发地震最大震级的计算方法

许多研究显示，水库的规模与诱发地震的最大震级有关，在选取表示水库规模的参数时，佩克在概率预测中考虑了库深和库容，沈崇刚、古哈认为水库面积与诱发地震有关。常宝琦等（1989）给出 30 座诱震水库的表征水库规模的三个因素——最大坝前库深 H_{max} ，相应库容 V 和相应水库面积 S （表 7），并依据表 7 计算 $H_{max}-M$ 、 $V-M$ 和 $S-M$ 的相关系数（表 8）。

表 7 部分诱震水库水库规模与发震及预测震级概况

库名	最大库深 H_{max}/m	库容 $V/10^8\ m^3$	水库面积 S/km^2	综合影响参数 E	震级 M	预测震级 $M_{预测}$
阿斯旺	84	164 000	6200	3.18	3.5	4.5
伯罗沃标	95	1 628	44.5	2.60	3.5	3.9
堪内里斯	132	678	16.3	3.17	4.7	4.5
尤库比内	10.6	4 761	145	3.23	5.0	4.5
米德湖	191	36 703	593	3.09	5.0	4.4
乔卡西	107	1 431	30	2.24	3.2	3.9
卡里巴	122	175 000	6572	4.58		5.9
克班	182	31 000	680	3.99	3.5	5.2
科尔	54	1 505	60	2.15	3.8	3.5
柯依那	100	2 730	115	4.14	6.5	5.4
克里马斯塔	120	4 750	180	4.55	6.2	5.8
黑部第四	186	199.3	3.5	3.26	4.9	4.6
马尼克 3 号	96	10 423	207	1.91	4.1	3.2
马拉松	60.3	41	2.4	3.53		4.8
努列克	285.3	11 000	74	1.92	4.5	3.2
奥罗维尔	204	4 400	63	2.92	5.7	4.2
塞菲亚拉德	80	1 800	56	2.49	4.7	3.8
沙斯塔	153	5 610	119	3.24	3.0	4.2
他宾戈	142	935	19.4	2.95	3.5	4.3
乌凯	63.6	8611	320	2.39	3.0	3.7
瓦拉根巴	104	2 053	75	3.80	5.4	5.1
新丰江	97	111 500	390	3.29	6.1	4.6
丹江口	92	20 896	862	3.79	4.7	5.1
南水	81.3	1 218	39.4	2.63	2.4	3.9

① 中国水利水电科学研究院 国家电力公司昆明勘测设计研究院：2002 云南澜沧江糯扎渡水电站可行性研究阶段水库诱发地震危险性预测研究报告，科研—地质—03。

② 云南省科委科技攻关 2006 SQ01 复杂构造区水库地震监测预警研究课题组：2008 水库诱发地震成因与机理，水库诱发地震综合研究，水库诱发地震震例资料。

续表 7

库名	最大库深 H_{\max}/m	库容 $V/10^8 \text{ m}^3$	水库面积 S/km^2	综合影响参数 E	震级 M	预测震级 $M_{\text{预测}}$
前进	50	17	0.8	2.62	3.0	3.6
柘林	62	7 171	387.4	3.35	3.2	4.6
佛子岭	74.4	488	23	3.51	4.5	4.8
南冲	45	15.5	1	2.90	2.8	4.2
参窝	50	790	52.6	3.35	4.6	4.7
乌溪渡	129	2 060	41.9	2.62	2.8	3.9

表 8 水库规模与震级的相关系数

水库参数	相关系数	临界值	
		$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
H_{\max}	0.169		
V	0.348	0.361	0.463
S	0.346		
E	0.586		

三个相关系数都小于相应自由度时 95%显著性水平的临界相关系数，在统计学上不能认为它们各自与 M 相关，为了得到更合理的参数代替最大库深 H_{\max} 、库容 V 和库面积 S ，采用综合影响参数 E ，即

$$S = E \times V / H_{\max}.$$

(10)

显然，受地形的支配，库水是一个不规则形状的水体，但总可以用式（10）表达三个水库规模参数之间的关系，即库容一定， S 反比于 H_{\max} ； H_{\max} 一定， S 正比于 V 。联系它们之间的比例常数 E 值与震级的关系系数为 0.586（见表 8），两者相关性较好，常宝琦（1989）统计两者间的回归关系式为：

$$M = 1.317 + 0.995E \pm 1.201.$$

(11)

式中 ± 1.201 为震级的标准偏差 σ_M ； E 值的标准偏差 $\sigma_E = 0.696$ 。表 7 给出了常宝琦等（1992）采用式（11）对发震水库进行震级预测的结果（不含标准偏差）。

表 7 样本中， E 值的实际上限为 4.58，计算样本水库地震的最大震级为

$$M = 1.317 + 0.995 \times 4.58 + 1.201 = 7.0.$$

目前世界上最大的水库诱发地震为 $M_{\text{s}}6.4$ 。应当注意的是：由上述样本统计数据得到的关系只能适用于统计范围之内，不能任意外延，式（11）也只能适用于较大的水库，根据所用资料，限定它的范围

是最大库深 $H_{\max} > 50 \text{ m}$ ，相应库容 $0.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以上。

2.2 水库诱发地震最大震级与发震断层长度关系的经验回归公式

我国学者对水库诱发地震震级与断层破裂长度的关系进行了统计研究，曾心传和高士钧（1987）从国内外 21 例水库地震震级（绝大部分为 $M_{\text{s}} > 3$ 地震）与发震断层长度经回归分析得到如下关系：

$$M_{\text{s}} = 3.45 \lg L + 1.76$$

(12)

式中 L 为发震断层的长度，单位为 km 。

至此，我们用概率预测方法对水库诱发地震的可能性进行了判定，同时对最大震级进行了定量预测，这一方法现如今已被尝试应用于水电工程水库诱发地震预测实践工作中。

3 糯扎渡水电站水库诱发地震预测

3.1 糯扎渡水电站及其相关地质构造环境概况

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，是澜沧江中下游梯级规划中紧接大朝山电站的第五个梯级电站，拟建坝址地理位置为 $100^{\circ}25'E$ 、 $22^{\circ}40'N$ ，设计最大坝高 254 m，设计正常蓄水位高程 812 m，水库总库容 237.03 亿 m^3 ，装机总容量 5 850 MW^①。水库回水与上游大朝山水电站衔接，电站下游与正在建设的景洪水电站水库相连，库长 214 km。两岸支流发育，较大支流有勐戛河、小黑江（澜沧江右岸）、小黑江（澜沧江左岸）、黑河、忙怕河、普洱大河等。较大的支库有小黑江（澜沧江右岸）支库，库长 32 km，普洱大河—小黑江（澜沧江左岸）支库，库长 100 km，黑河支库，库长 30 km，是澜沧江中下游梯级规划中工

① 国家电力公司昆明勘测设计研究院，2003. 云南澜沧江糯扎渡水电站可行性研究报告·第三篇·工程地质.

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

程规模、调节库容、装机容量和发电量最大的电站。电站距昆明 350 km，距普洱市思茅区约 100 km，距澜沧县城 76 km，交通条件便利。

就区域本底地震背景而言，糯扎渡库区处于耿马—澜沧地震带和普洱—思茅地震区两个二级地震带（区）之间，这两个地震带（区）的地震活动对坝址会有直接的影响，依据中国地震局地质研究所和糯扎渡水电站地震工作研究队（现中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院地质分院）的研究成果，耿马—澜沧地震带未来百年将发生 3 次左右 7~7.9 级地震，6~9 次 6~6.9 级地震，最大震级约 7.5 级；普洱—思茅地震区未来百年将发生 6 次左右 $M \geq 6$ 地震，最大震级 6.8~7 级，

上述地震将有相当一部分以双震型和震群型的方式发生^①。

中国水利水电科学研究院和国家电力公司昆明勘测设计研究院对糯扎渡水电站水库诱发地震危险性预测研究成果指出，糯扎渡水电站水库有三个库段具有诱发中强以上地震的可能，一是普洱大河库段，二是忙怕河口—邦东库段，三是库首段；这个预测结果除库首主要考虑应力卸荷因素外，其余两个库段在考虑地层岩性及渗透条件基础上，无一例外地是以库段地质构造及其本底地震活动性为重要依据的，属于构造型水库地震的范畴，下述为各库段主要构造（图 1）^②：

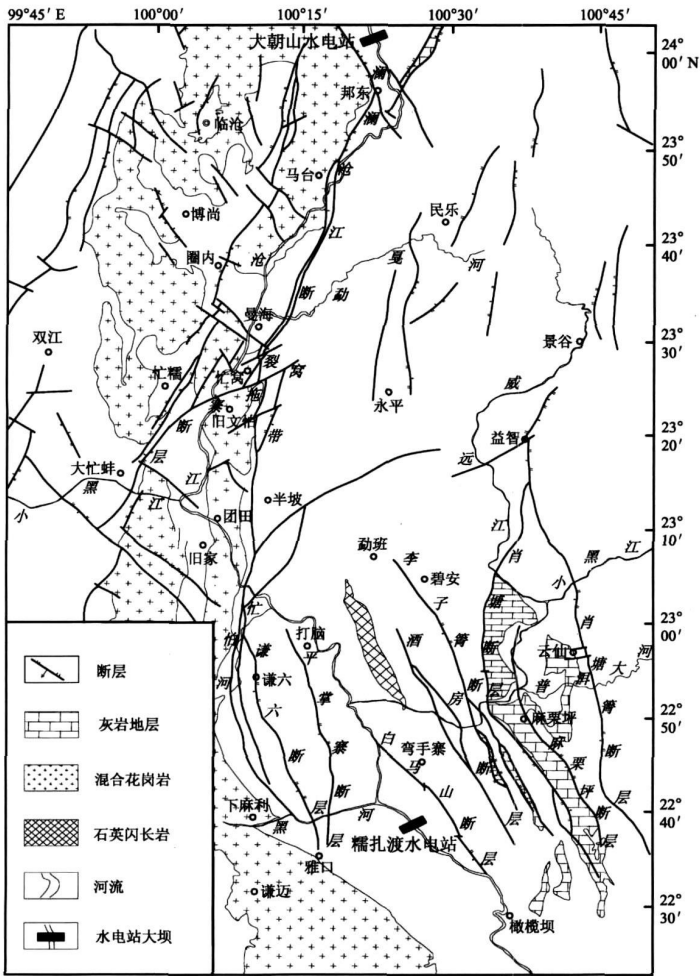


图 1 糯扎渡水电站库区及周边岩性和主要影响断层分布图

① 国家地震局地质研究所，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 云南省科委科技攻关 2006SQ01 复杂构造区水库地震监测预警研究课题组，2008 云南澜沧江中下游梯级电站水库地震监测系统建设总体规划方案—云南糯扎渡水电站库区数字地震监测系统建设工程设计方案。

普洱大河库段

(1) 谦六断层为近南北向的高角度逆断层, 总体呈北北西向展布, 倾向南西, 倾角 70° 以上, 最大垂直断距 2 000 m 以上, 属中更新世断裂。

(2) 平掌寨断层由两三条近南北走向的正断层组成, 西支倾向西, 东支倾向东, 总体呈北北西向展布, 最大倾角 80° , 最大垂直断距 3 000 m, 属前第四纪断裂。

(3) 白马山断层为近北北西向的陡倾断层, 倾向西南, 长约数十公里, 属中更新世断裂。

(4) 酒房断层近北北西向展布, 长约 50 km, 断层倾角陡, 倾向变化复杂, 在那许一带, 倾向西, 倾角 80° ; 在小箐口附近, 倾向东, 倾角较陡。断层总体倾向北东, 推测断距 1 000 m 以上, 有张裂性活动历史, 属早、中更新世断裂。

(5) 李子箐断层断裂走向北北西, 陡倾角, 倾向西南, 逆断, 长约 50 km, 属前第四纪断裂。

(6) 肖塘断层断裂走向近南北, 高角度倾向东, 倾角 45° , 逆断, 长约 72 km, 最大垂直断距 3 000 m 以上, 属前第四纪断裂。

(7) 麻栗坪断层断裂走向近南北, 为高角度逆冲断层, 倾向西, 倾角 70° , 长约 40 km, 属前第四纪断裂。

(8) 肖塘箐断层断裂走向北北西, 长约 80 km 以上, 倾向西, 倾角小于 70° , 最大垂直断距 2 000 m 以上, 形成时期较肖塘断层更早, 属前第四纪断裂。

(9) 澜沧江断裂南段断裂走向北北西及近南北, 倾向南西, 为断裂南段的南部, 谦六断裂为其一支, 逆断性质, 形成时期较早, 属早、中更新世断裂。

忙怕河口—邦东库段

(1) 窝拖寨断层走向北东, 长约 26 km, 两盘均为混合花岗岩, 具左旋性质, 现今构造活动不明显, 但沿断层的地震活动有密集成带现象, 并伴有中等强度的地震发生。

(2) 澜沧江断裂南段断裂走向北北西及近南北, 倾向西, 为断裂南段的中部, 逆断性质, 属早、中更新世断裂。

3.2 糯扎渡水电站水库诱发地震的预测

我们先确定云南糯扎渡水电站水库诱震因素的状态, 依据设计文件, 云南糯扎渡水电站水库最大库深 (D) 为 202 m, 最大库容 (V) 237.03 亿 m^3 , 库区总体应力状况 (S) 显示逆断层应力状态, 库区断层活动性 (F) 总体上表现为不活动, 库区介质条件 (G) 总体上以变质岩为主 ($>60\%$ 的库段)^{①②}; 在考虑库深和库容最大截断水平前提下, 糯扎渡水电站水库诱震因素确定为 d 、 V 、 S 、 F 、 G 状态组合, 采用方法样本检验前概率 (发震 0.184 不发震 0.816), 查表 3 利用公式 (4) 计算其发生水库诱发地震的概率 $P(RIS/D, V, S, F, G)$ 为 0.33。

对糯扎渡水库而言, 计算其由于方法采用样本而导致的第三种不确定性来源, 取方法采用样本在糯扎渡水库诱震因素状态组合下各因素状态的方差和标准差, 经误差传播理论计算该因素状态组合标准差为 0.20, 则糯扎渡水电站水库的发震概率为

$$P(RIS/D, V, S, F_2, G_2) = 0.33 + 0.20 = 0.53$$

$$P(RIS/D, V, S, F_2, G_2) = 0.33 - 0.20 = 0.13$$

取方法样本临界概率 P_c 为 0.2, 同时考虑一般大型水库 (坝高 ≥ 92 m, 库容 ≥ 100 亿 m^3) 诱发地震的发震概率 (0.184) 及库区复杂的地质构造环境, 则 $P(RIS/D, V, S, F_2, G_2) \geq P_c$, 可以认为蓄水后糯扎渡水电站水库可能产生诱发地震。

下面计算糯扎渡水电站水库可能发生的最大水库诱发地震震级, 糯扎渡水电站水库库容 (V) 237.03 亿 m^3 , 库面积 (考虑支库 S) 322.67 km^2 , 最大库深 (H_{max}) 202 m, 采用公式 (10) 计算其综合影响系数 E 为 2.75, 再采用公式 (11) 计算其最大水库诱发地震震级为:

$$M = 1.317 + 0.995 \times 2.75 \pm 1.201 = 4.05 \pm 1.201$$

如果采用常宝琦等 (1992) 根据样本修正后的水库诱发地震最大震级计算公式:

① 国家电力公司昆明勘测设计研究院. 2003. 云南澜沧江糯扎渡水电站可行性研究报告. 第三篇. 工程地质.
② 中国水利水电科学研究院, 国家电力公司昆明勘测设计研究院. 2002. 云南澜沧江糯扎渡水电站可行性研究阶段水库诱发地震危险性预测研究报告. 科研—地质—03.
1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$M_s = -4.7251 + 1.1962E + 1.2420 \ln H_{\max} \pm 0.511 \quad (13)$$

则糯扎渡水电站水库的最大水库诱发地震震级为

$$M_s = -4.7251 + 1.1962 \times 2.75 + 1.2420 \ln 202 \pm 0.511 \\ = 5.16 \pm 0.511.$$

考虑糯扎渡水电站水库具有三个支库并处在复杂的地震地质构造环境当中, 取 100% 的标准偏差, 其可能的最大诱震震级为

$$M = 1.317 + 0.995 \times 2.75 + 1.201 = 4.05 + 1.201 \\ = 5.25 \approx 5.5$$

$$M_s = -4.7251 + 1.1962 \times 2.75 + 1.2420 \ln 202 + 0.511 \\ = 5.16 + 0.511 = 5.67 \approx 5.5$$

根据糯扎渡水电站预可研阶段研究报告^①, 糯扎渡电站坝址区断层发育, 但规模不大, 一般长度最长不超过 10 km。如果这些小规模断层成为发震断层, 依据公式 (12) 计算糯扎渡电站坝址区最大水库诱发地震震级为

$$M_s = 3.45 \lg 0 + 1.76 = 5.21 \approx 5.5.$$

因此, 糯扎渡水电站水库蓄水后可能的最大诱震震级为 5.5 级。

4 结论

(1) 糯扎渡水电站水库蓄水后其发震概率最大为 0.53, 最小为 0.13, 很有可能发生水库诱发地震。

(2) 糯扎渡水电站水库蓄水后其发生水库诱发地震的最大震级为 5.5 级。

参考文献:

- 常宝琦, 梁纪彬. 1992. 水库诱发地震最大震级的预测 [J]. 华南地震, (5): 23-26.
- 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.
- 国家地震局地震研究所. 1984. 中国诱发地震 [M]. 北京: 地震出版社.
- 毛玉平, 韩新民. 2004. 云南地区强震 ($M \geq 6$ 级) 研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社.

Prediction of Earthquake Induced by Nuozhadu Reservoir in Yunnan

LI Zhi-xiang², MAO Yu-ping², XIE Jian-bi¹, XIAO Hai-bi¹, LI Mao-xian³

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

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

(3. Yunnan Huaneng Lancang River Hydropower Development Co., LTD, Kunming 650214, Yunnan, China)

Abstract

We use probability prediction method to analyze the probability of earthquake induced by Nuozhadu Reservoir and calculate the maximum induced magnitude based on design parameters of the reservoir. After Nuozhadu Reservoir stores water, it will be capable to induce the earthquake with the maximum magnitude of 5.5.

Key words: Nuozhadu hydropower station; reservoir induced earthquake; probability; prediction