

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2009.04.018

## 水库地震最大震级预测初步研究

张飞宇<sup>1,2)</sup> 王晓青<sup>2)</sup> 付虹<sup>3)</sup>  
丁香<sup>2)</sup> 王龙<sup>2)</sup> 郑友华<sup>2)</sup>

1) 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650091

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3) 云南省地震局, 昆明 650224

**摘要** 水库地震最大震级综合影响参数  $E$  值预测法及其与最大地震的经验关系自 1987 年被提出后, 在很多大型水库中得到了应用并取得了一定的效果。此后 20 多年又有一批水库地震被确认。该经验关系是否适用值得研究。文中在收集增补最新水库地震资料的基础上, 选取 48 个水库地震震例资料, 统计确定了新的水库地震最大震级与综合影响参数的经验模型, 并与已有经验模型进行了比较, 最后得出水库地震的最大震级上限  $> 7$ 。

**关键词** 水库地震 最大震级 震级预测 模式识别 综合影响参数

**中图分类号**: P315.2

**文献标识码**: A

**文章编号**: 0253-4967(2009)04-0747-11

### 0 引言

20 世纪 30 年代, 希腊马拉松水库和阿尔及利亚瓦迪富达湖水库曾发生水库地震, 此后人类开始了水库地震的研究, 但因地震震级低、无破坏, 当时并未引起广泛重视。1960 年后, 中国新丰江水库、赞比亚和津巴布韦的卡里巴水库、希腊克瑞玛斯塔水库和印度科依纳水库相继发生 6 级以上的强震, 造成水工建筑物破坏、库岸滑塌、房屋损毁、居民伤亡等直接和次生灾害后, 水库地震的研究才引起各方面的广泛关注。对于建成或新建水库, 可能发生多大的水库地震是人们普遍关心的问题。通过近半个世纪的研究, 已经发展了若干预测方法。Packer(1979) 提出了概率预测法, 选择库深、库容、应力状况、库区断层活动性和库区优势岩性条件, 通过统计发震水库和不发震水库给出拟建水库的地震概率。于品清等(1983) 注意到水库地震发生的地质背景和构造条件与天然地震很相似, 认为有关天然地震的理论和方法基本上可以用于水库地震预测, 其预测预报经验也可以借鉴。余永毓(1987) 把逻辑信息法应用在水库地震最大震级的预测中。常宝琦等(1987) 提出了用综合影响参数预测最大震级的方法。常宝琦(1987) 从模糊集理论的角度提出了水库地震的两极综合模糊评判法。曾心传等(1989) 用国内外 21 例水库地震震例(绝大部分为  $M_s$  3 以上的地震) 得出水库地震最大震级与断层长度的关系。杨清源等(1996a) 应用灰色聚类法来预测水库地震的最大震级。许强等(1996) 提出水库地震震级的人工神经网络预测模型。林思诚等<sup>①</sup> 提出了历史地震最高震级预测方法。徐礼华等(2005) 运用

[收稿日期] 2009-07-14 收稿, 2009-11-17 改回。

[基金项目] “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC01B040203)资助。

① 林思诚等, 1997, 水口水库诱发地震的发展趋势及防震减灾对策研究。

地球动力学方法对水库地震震级进行预测。上述各种方法或在考虑水库地震的影响因素,或在分析处理方法,或在应用目的上有所不同,各自具有其优点或不足;而且目前水库地震的数量有限,各种预测方法都有一定的不确定性,因此,在实际水库地震最大震级预测中,往往采用多种方法进行综合分析,以减少预测的不确定性。各种预测方法中,常宝琦等(1987)提出的是综合影响参数预测方法。常宝琦等(1992)用国内外37个水库地震资料进行了分析、讨论,并统计得到了水库地震最大震级和综合影响参数的经验关系,该方法在水库地震最大震级预测中得到了比较多的应用。该统计关系的建立已过去20多年,一些新的水库地震震例被确定。该方法的实际效果如何?水库地震最大震级与综合影响参数 $E$ 的关系是否有变化,值得开展研究。本文在新增水库地震震例的基础上,选取了48个水库地震的震例,采用与常宝琦相同的研究思路,重新建立了水库地震最大震级和综合影响参数的关系,并对结果进行了分析、讨论。

## 1 预测方法概述

常宝琦等(1987)定义了水库地震的综合影响参数 $E$ :

$$E = \frac{S \cdot H}{V} \quad (1)$$

式(1)中 $S$ 为库水面积( $\text{km}^2$ )、 $H$ 为最大库深(m)、 $V$ 为库容( $10^6 \text{m}^3$ )。受地形地貌的影响,水库往往不是一个规则的水体,依据式(1),水库地震的综合影响参数 $E$ 与库深和库水面积成正比,与库容成反比。一般地, $E$ 值的范围为1~6。

常宝琦等(1987,1992)对水库地震最大震级 $M$ 与 $S$ 、 $H$ 、 $V$ 和 $E$ 值相关性的分析表明, $M$ 与 $E$ 的相关性最好。但 $E$ 与 $M$ 的回归分析表明仍有较大的离散性,因此将地震按震级分为2组,采用改进的连续亨明法确定了分组的界限值为4.5。分组后统计 $M$ 和 $E$ 值的关系表明:离散性显著减小(常宝琦,1992)。

以下根据 $E$ 值的定义和新增基础上的水库地震目录,进行 $E$ 值计算、水库地震类型界限值确定、水库最大震级与 $E$ 值关系的回归分析和水库地震最大震级上限的估计等。

## 2 水库地震资料的选取

考虑到所用水库最大地震的发生有一定的时间, $E$ 值的计算需要相关参数,因此水库地震震例的选择依据以下3个原则:1)水库地震发生后的9a之内,如果没有更大震级的地震发生,可认为此地震为水库地震的最大震级,9a界限是根据:常宝琦等(1997)所选84个水库地震震例从初震到主震的年数都不超过9a(只有佛子岭为18a,而此水库地震一直有争议)。因此,选择水库地震震例资料的原则之一是水库最大地震的发生时间在2000年9月之前,据此原则可以确保所用资料是最大水库地震;2)水库地震的最大震级 $M_s \geq 2.4$ (相当于 $M_L \geq 3$ 的地震);3)所收集的资料同时包含水库的库容、库深和库水面积。符合上述选择原则的水库地震震例有48个,其主要参数如表1所示。

表 1 48 个水库地震震例  
Table 1 48 cases of reservoir induced earthquake

| 水库名称      | 所在国家  | 蓄水时间       | 最大地震<br>发生日期 | 库深/m  | 最大震级 $M_s$ | 资料来源  |
|-----------|-------|------------|--------------|-------|------------|-------|
| 柯依纳       | 印度    | 1961-06    | 1967-12-10   | 100   | 6.5        | 1,2   |
| 克里马斯塔     | 希腊    | 1965-07    | 1966-01-24   | 120   | 6.3        | 2,3   |
| 卡里巴       | 赞比亚   | 1958-12    | 1963-09-23   | 122   | 6.1        | 1,2   |
| 新丰江       | 中国    | 1959-10    | 1962-03-19   | 97    | 6.1        | 2,3   |
| 奥洛维尔      | 美国    | 1967-11    | 1975-08-01   | 204   | 5.7        | 2,3   |
| 瓦拉岗巴      | 澳大利亚  | 1960       | 1973-03-09   | 104   | 5.4        | 2,3   |
| 阿斯旺       | 埃及    | 1964       | 1981-11-14   | 97    | 5.3        | 2,3   |
| 斯林那加林     | 泰国    | 1977-08    | 1983-04-22   | 133   | 5.2        | 1,2   |
| 马拉松       | 希腊    | 1929-10    | 1938-07-20   | 60.3  | 5.0        | 2,3   |
| 米德        | 美国    | 1935-05    | 1939-05-04   | 191   | 5.0        | 2,3   |
| 沃尔塔格兰德    | 巴西    | 1973-04    | 1974-02-24   | 50.4  | 5.0        | 2     |
| 尤库班       | 澳大利亚  | 1957-06    | 1959-05-18   | 106   | 5.0        | 1,2,3 |
| 奈川渡       | 日本    |            |              | 125   | 5.0        | 1     |
| 平头        | 美国    | 1958       | 1971-07-28   | 54    | 4.9        | 3     |
| 汤田        | 日本    |            |              | 69.5  | 4.9        | 1     |
| 参窝        | 中国    | 1972-10    | 1974-12-22   | 36    | 4.8        | 1,3   |
| 丹江口       | 中国    | 1967-11    | 1973-11-29   | 81.5  | 4.7        | 3     |
| 塞非亚拉德     | 伊朗    | 1962-01    | 1968-08-02   | 95    | 4.7        | 1,2,3 |
| 卡内勒斯      | 西班牙   | 1960-10    | 1962-06-09   | 132   | 4.7        | 2,3   |
| 卡尤鲁       | 巴西    | 1954       | 1972-01-23   | 20.7  | 4.7        | 2,3   |
| 本莫尔       | 新西兰   | 1964-12    | 1966-07-07   | 96    | 4.6        | 3     |
| 努列克       | 塔吉克斯坦 | 1972-04    | 1972-11-06   | 285   | 4.6        | 3     |
| 黑布第四      | 日本    | 1960-03    | 1961-08-19   | 180   | 4.5        | 1,2,3 |
| 九龙头       | 日本    |            |              | 122   | 4.3        | 1     |
| 沃果诺       | 瑞士    | 1963-08    | 1965-10-11   | 204   | 4.0        | 3     |
| 池源        | 日本    |            |              | 105   | 3.9        | 1     |
| 帕里塞兹      | 美国    | 1956       | 1966-06-10   | 67    | 3.7        | 2     |
| 曾文        | 中国    | 1973       | 1978-06      | 123.5 | 3.7        | 3,13  |
| 曼格拉姆      | 巴基斯坦  | 1967-02    | 1967-05      | 104   | 3.6        | 3     |
| 水口        | 中国    | 1993-03-31 | 1996-04-21   | 65    | 3.6        | 12    |
| 凯班        | 土耳其   | 1973-05    | 1974-06      | 182   | 3.5        | 2,3   |
| 塔尔宾哥      | 澳大利亚  | 1971-05    | 1973-01-06   | 142   | 3.5        | 2,3   |
| 乌江渡       | 中国    | 1979-11    | 1992-05-20   | 135   | 3.5        | 2     |
| Browering | 澳大利亚  |            |              | 95    | 3.5        | 1     |
| 天生桥一级     | 中国    | 1994-12    | 2000-08-13   | 154   | 3.4        | 14,15 |
| 失作        | 日本    |            |              | 90    | 3.4        | 1     |

续表 1

| 水库名称 | 所在国家 | 蓄水时间       | 最大地震<br>发生日期 | 库深/m | 最大震级 $M_s$ | 资料来源 |
|------|------|------------|--------------|------|------------|------|
| 乔卡西  | 美国   | 1971-04    | 1975-11-25   | 107  | 3.2        | 2    |
| 拓林   | 中国   | 1972-01    | 1972-10-14   | 47   | 3.2        | 2,11 |
| 乌开   | 印度   | 1971       | 1972         | 65.6 | 3.0        | 2    |
| 沙斯塔  | 美国   | 1944       |              | 153  | 3.0        | 2    |
| 前进   | 中国   | 1970-05    | 1971-10-20   | 44   | 3.0        | 3    |
| 南冲   | 中国   | 1967-04    | 1974-07-25   | 35   | 2.8        | 3,10 |
| 湖南镇  | 中国   | 1979-01-12 | 1979-10-07   | 122  | 2.8        | 1,9  |
| 隔河岩  | 中国   | 1993-04-10 | 1995-10      | 145  | 2.6        | 8    |
| 黄石   | 中国   | 1969-04    | 1988-09-14   | 34.2 | 2.6        | 3,5  |
| 渔洞   | 中国   | 1996-12    | 1999-10-30   | 87   | 2.5        | 7    |
| 东江   | 中国   | 1986-08-02 | 1991-07-02   | 150  | 2.5        | 4    |
| 南水   | 中国   | 1969-02    | 1970-02-26   | 75   | 2.4        | 3,6  |

注 资料来源: 1 常宝琦等,1992; 2 杨清源等,1996b; 3 夏其发,1993; 4 杨国周等,1998; 5 王国英,1989; 6 肖安予,1990; 7 樊跃新等,2007; 8 王清云等,1998; 9 胡毓良等,1986; 10 刘奇武,1983; 11 陈益明,1985; 12 许振栋等,2007; 13 YANG *et al.*,2008; 14 李杰富等,2002; 15 胡松,2003; 16 杨又陵等,1996。

### 3 水库地震震例的分类判别

水库地震从成因上一般可分为 2 类,即构造型水库地震和非构造型水库地震。构造型水库地震为库水荷载与渗透孔隙压的耦联效应诱发的地震,而非构造型水库地震是指浅部岩溶崩塌(如中国南水水库等)、裂隙水冻胀(如奥地利施莱盖斯水库等)、岸边岩体重力滑移(如中国乌溪江水库等)等造成的地震(常宝琦等,1992)。构造型水库地震震级较高,并可能引发灾害,是水库地震研究关注的主要对象。

但逐个分清每个水库地震的类型是比较困难的。为此常宝琦等(1992)用改进的连续亨明法(王碧泉等,1989)确定构造型水库地震和非构造型水库地震的震级界限值。连续亨明法的出发点是假设一类样品成团状分布而另一类样品的分布则较为分散。然后找出成团状分布的这一类样品的代表——亨明核(其实是成团状分布的这类样品各特征值均值组成的向量),用样品与亨明核的距离来判别样品的类别。

计算步骤如下:

(1) 选择  $E$  值。以震级  $M_s$  和最大库深的对数值  $\ln H$  作为特征值,进行水库地震分类。设特征空间为  $X = (x_1, x_2, x_3)^T$ , 则水库地震震例样本  $i$  可表示为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ 。  $M$  为样本总数,本文所用样本数为 48 个。

(2) 以  $M_s = 4.0, 4.5$  和  $5.0$  作为分类界限值,震级  $M_s$  大于界限值的震例划归为  $D_0$  类,小于界限值的作为  $N_0$  类。然后分别计算 2 类样本各特征值( $E, M, \ln H$ )的均值,构成 2 类样本的亨明核。特征  $x_j$  的  $D_0$  类和  $N_0$  类( $j = 1, 2, 3$ )均值按下式计算:

$$\bar{x}_j^{D_0} = \frac{\sum_i X_{ij}}{M_{D_0}} \quad (2)$$

$$\bar{x}_j^{N_0} = \frac{\sum_i X_{ij}}{M_{N_0}}$$

式(2)中,  $M_{D_0}$  和  $M_{N_0}$  为特征  $x_j$  分别属于  $D_0$  类和  $N_0$  类的样本数。

(3) 计算每类样品的特征方差之和:

$$\begin{cases} S^2(D_0) = \sum_{j=1}^n S_j^2(D_0) = \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{x_{ij} \in D_0} (x_{ij} - \bar{x}_j^{D_0})^2 \right] / (M_{D_0} - 1) \\ S^2(N_0) = \sum_{j=1}^n S_j^2(N_0) = \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{x_{ij} \in N_0} (x_{ij} - \bar{x}_j^{N_0})^2 \right] / (M_{N_0} - 1) \end{cases} \quad (3)$$

(4) 计算亨明核:

若  $S^2(D_0) \leq S^2(N_0)$ , 则计算  $D_0$  类样品的亨明核  $Z$ ; 若  $S^2(D_0) > S^2(N_0)$  则计算  $N_0$  类样品的亨明核  $Z$ 。

$$Z = (z_1, z_2, z_3)^T \quad (4)$$

式(4)中,  $Z$  为特征数,  $z_j = \begin{cases} \bar{x}_j^{D_0} & \text{当 } S^2(D_0) \leq S^2(N_0) \\ \bar{x}_j^{N_0} & \text{当 } S^2(D_0) > S^2(N_0) \end{cases}$

计算各类样品至亨明核的距离即欧氏距离  $d_i(X_i, Z)$ :

$$d_i(X_i, Z) = \left[ \sum_{j=1}^3 W_j (x_{ij} - z_j)^2 \right]^{1/2} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

本研究采用等权方法, 因此, 此处加权系数  $W_j = 1 (j = 1, 2, 3)$

(5) 分类判别。对取定的阈值  $\Delta$ , 样品  $X_i$  的分类准则如下:

① 对  $S^2(D_0) \leq S^2(N_0)$  的情况:

$$\begin{cases} X_i \in D & \text{当 } d_i(X_i, Z) \leq \Delta \\ X_i \in N & \text{当 } d_i(X_i, Z) > \Delta \end{cases}$$

② 对  $S^2(D_0) > S^2(N_0)$  的情况:

$$\begin{cases} X_i \in N & \text{当 } d_i(X_i, Z) \leq \Delta \\ X_i \in D & \text{当 } d_i(X_i, Z) > \Delta \end{cases}$$

根据表 1 的水库震例样本, 按照上述计算公式, 得到以 4.0, 4.5, 5.0 为界限值的判别方式、亨明核和分类判别结果。表 2 给出了取  $M_s = 4.5$  作为界限值的分类判别结果。其中, D 类均值为 (3.32, 5.16, 4.57), N 类均值为 (2.91, 3.25, 4.56);  $S^2(D_0) = 1.07, S^2(N_0) = 0.79$ , 因而  $S^2(D_0) > S^2(N_0)$ , 应采用 N 类判别方法, 此时的亨明核为  $Z = (2.91, 3.25, 4.56)^T$ ; 通过试验, 当阈值  $\Delta = 1.395$  时, 得到最佳分类; 分类结果见表 2, 其分类正确率为 100%, 如表 3 所示。

分别取  $M_s = 4.0$  和 5.0 作为界限值, 采用上述同样的计算步骤, 可以得到相应的分类结果如表 3。表 3 的结果表明, 以分类判别效果最好时的震级  $M_s = 4.5$  作为 2 类水库地震的分类界

表 2 取  $M_s=4.5$  作为界限值的水库地震分类判别结果Table 2 The result of type classification of reservoir induced earthquake with  $M_s=4.5$  as a threshold value

| 水库名称   | $E$  | $M$ | $\ln H$ | 欧氏距离 | 实际类别 | 分类结果 | 水库名称      | $E$  | $M$ | $\ln H$ | 欧氏距离 | 实际类别 | 分类结果 |
|--------|------|-----|---------|------|------|------|-----------|------|-----|---------|------|------|------|
| 柯依纳    | 4.14 | 6.5 | 4.61    | 3.47 | D    | D    | 九龙头       | 3.08 | 4.3 | 4.80    | 1.09 | N    | N    |
| 克里马斯塔  | 4.55 | 6.3 | 4.79    | 3.47 | D    | D    | 沃果诺       | 3.26 | 4   | 5.32    | 1.12 | N    | N    |
| 卡里巴    | 4.58 | 6.1 | 4.80    | 3.31 | D    | D    | 池源        | 2.62 | 3.9 | 4.65    | 0.72 | N    | N    |
| 新丰江    | 3.29 | 6.1 | 4.57    | 2.88 | D    | D    | 帕里塞兹      | 4.18 | 3.7 | 4.20    | 1.39 | N    | N    |
| 奥洛维尔   | 2.99 | 5.7 | 5.32    | 2.57 | D    | D    | 曾文        | 3.00 | 3.7 | 4.82    | 0.53 | N    | N    |
| 瓦拉岗巴   | 3.79 | 5.4 | 4.64    | 2.33 | D    | D    | 曼格拉姆      | 3.63 | 3.6 | 4.64    | 0.80 | N    | N    |
| 阿斯旺    | 3.56 | 5.3 | 4.57    | 2.15 | D    | D    | 水口        | 2.49 | 3.6 | 4.17    | 0.67 | N    | N    |
| 斯林那加林  | 3.00 | 5.2 | 4.89    | 1.98 | D    | D    | 凯班        | 4.04 | 3.5 | 5.20    | 1.33 | N    | N    |
| 马拉松    | 3.62 | 5   | 4.10    | 1.94 | D    | D    | 塔尔宾哥      | 2.99 | 3.5 | 4.96    | 0.48 | N    | N    |
| 米德     | 3.25 | 5   | 5.25    | 1.91 | D    | D    | 乌江渡       | 3.09 | 3.5 | 4.91    | 0.46 | N    | N    |
| 沃尔塔格兰德 | 3.07 | 5   | 3.92    | 1.87 | D    | D    | Browering | 2.60 | 3.5 | 4.55    | 0.41 | N    | N    |
| 尤库班    | 3.20 | 5   | 4.66    | 1.78 | D    | D    | 天生桥一级     | 2.67 | 3.4 | 5.04    | 0.56 | N    | N    |
| 奈川渡    | 3.64 | 5   | 4.83    | 1.92 | D    | D    | 失作        | 3.04 | 3.4 | 4.50    | 0.20 | N    | N    |
| 平头     | 2.16 | 4.9 | 3.99    | 1.90 | D    | D    | 乔卡西       | 2.24 | 3.2 | 4.67    | 0.68 | N    | N    |
| 汤田     | 3.84 | 4.9 | 4.24    | 1.92 | D    | D    | 拓林        | 2.54 | 3.2 | 3.85    | 0.80 | N    | N    |
| 参窝     | 3.51 | 4.8 | 3.58    | 1.93 | D    | D    | 乌开        | 2.47 | 3   | 4.18    | 0.63 | N    | N    |
| 丹江口    | 3.18 | 4.7 | 4.40    | 1.48 | D    | D    | 沙斯塔       | 3.25 | 3   | 5.03    | 0.63 | N    | N    |
| 塞非亚拉德  | 2.96 | 4.7 | 4.55    | 1.45 | D    | D    | 前进        | 2.12 | 3   | 3.78    | 1.14 | N    | N    |
| 卡内勒斯   | 3.17 | 4.7 | 4.88    | 1.51 | D    | D    | 南冲        | 2.26 | 2.8 | 3.56    | 1.28 | N    | N    |
| 卡尤鲁    | 2.48 | 4.7 | 3.03    | 2.15 | D    | D    | 湖南镇       | 2.48 | 2.8 | 4.80    | 0.67 | N    | N    |
| 本莫尔    | 3.27 | 4.6 | 4.56    | 1.40 | D    | D    | 隔河岩       | 3.33 | 2.6 | 4.98    | 0.87 | N    | N    |
| 努列克    | 2.01 | 4.6 | 5.65    | 1.96 | D    | D    | 黄石        | 2.57 | 2.6 | 3.53    | 1.26 | N    | N    |
| 黑布第四   | 3.17 | 4.5 | 5.19    | 1.43 | D    | D    | 渔洞        | 3.25 | 2.5 | 4.47    | 0.83 | N    | N    |
|        |      |     |         |      |      |      | 东江        | 2.96 | 2.5 | 5.01    | 0.88 | N    | N    |
|        |      |     |         |      |      |      | 南水        | 2.71 | 2.4 | 4.32    | 0.90 | N    | N    |

表 3 水库地震类型判别结果

Table 3 The discrimination results of RIS type

| 设定震级 $M_s$ 界限值 | 判别方式  | 亨明核                        | 分类判别阈值 $\Delta$ | 正确率  |
|----------------|-------|----------------------------|-----------------|------|
| 4.0            | N 类判别 | $Z_1 = (2.89, 3.17, 4.51)$ | 1.440           | 96%  |
| 4.5            | N 类判别 | $Z_2 = (2.91, 3.25, 4.56)$ | 1.395           | 100% |
| 5.0            | D 类判别 | $Z_3 = (3.59, 5.50, 4.69)$ | 1.195           | 90%  |

限值是比较合理的,其分类正确率达到 100%。

### 4 水库参数与最大震级的相关性研究

为了确定与最大震级相关性较好的因子,选择  $E$  值、库深、库容、库水面积与最大震级进行相关系数检验法分析。查相关系数显著性检验表得出的结果如表 4 所示,表明在 99.9% 的置信水平下, $E$  值表现为与最大震级的显著相关性。而其它水库参数没有表现出显著的相关性,因此采用  $E$  值作为水库地震的最大震级预测因子是适宜的。

### 5 水库地震最大震级预测的经验关系研究

根据上面的分析结果,选取综合影响参数和水库地震的最大震级,采用一元线性回归模型分别选取表 1 中的  $M_s = 2.4 \sim 6.5$  和  $M_s \geq 4.5$  的震例数据进行回归分析,结果如下(图 1):

全部数据 ( $M_s = 2.4 \sim 6.5$ ) 回归的经验公式为

$$M_s = 0.94E + 1.24 \quad (R = 0.517) \quad (6)$$

$R$  为相关系数。 $M_s \geq 4.5$  的震例回归的经验公式为

$$M_s = 0.59E + 3.19 \quad (R = 0.642) \quad (7)$$

表 4 水库参数与水库地震最大震级的相关性分析  
Table 4 The correlation analysis between the maximum magnitude of reservoir induced earthquake with different reservoir parameters

| 水库参数 | 与水库地震最大震级的相关系数 | 临界值 $r_d$       |                  |
|------|----------------|-----------------|------------------|
|      |                | $\alpha = 0.02$ | $\alpha = 0.001$ |
| $E$  | 0.517          | 0.335           | 0.460            |
| 库深   | 0.112          |                 |                  |
| 库容   | 0.313          |                 |                  |
| 库水面积 | 0.311          |                 |                  |

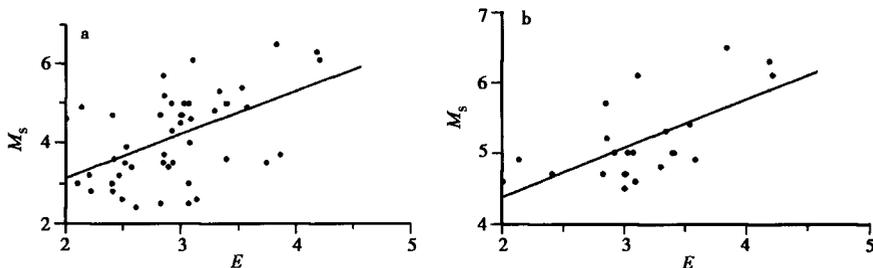


图 1  $E$  与  $M_s$  的关系图

Fig. 1 The relationship charts between  $E$  and  $M_s$ .

式(6)、(7)表明,全部数据回归分析的结果没有震级分档回归结果理想。

### 6 水库地震最大震级上限的确定

根据目前水库综合影响参数的实际值都不超过 5,以及常宝琦等(1992)和本文式(6)统计的水库地震最大震级与水库综合影响参数成正比的特点,可选择最大的  $E$  值估计水库地震最大震级的上限。即取  $E = 5$ ,分别按回归公式计算最大震级  $M_s$ ,并加上标准偏差作为水库地震最大震级上限,结果如表 5 所示。结果表明,按照早期(常宝琦等,1987)的水库地震震例数据统计的标准偏差相对较大确定的最大震级上限达到 7.3,但采用分档法和新的 48 个震例数据震级上限为 6.6 ~ 6.8。所以在考虑 1 倍标准偏差的情况下,水库地震最大震级上限  $\geq 7$ ,目前世界

表 5 水库地震最大震级上限估计

Table 5 Estimation of upper limit of the maximum magnitude of reservoir induced earthquake

| 震例数据           | 震级分档                 | 最大震级预测                         | 标准偏差  | 最大震级上限 |
|----------------|----------------------|--------------------------------|-------|--------|
| 常宝琦等, 1987     |                      | $M_s = 1.024 \times 5 + 1.204$ | 0.98  | 7.3    |
| 本文表 1 的 48 个震例 | $M_s = 2.4 \sim 6.5$ | $M_s = 0.94 \times 5 + 1.24$   | 0.877 | 6.8    |
|                | $M_s \geq 4.5$       | $M_s = 0.59 \times 5 + 3.19$   | 0.486 | 6.6    |

范围内最大的水库地震是印度柯依纳水库于 1967 年 12 月 10 日发生的  $M_s$  6.5 地震。

## 7 结论

本文在新增水库地震震例的基础上,探讨了水库地震综合影响参数预测水库地震最大震级的适用性。结果表明:

(1) 在新增水库地震震例基础上的统计分析表明,水库地震综合影响参数依然是与水库地震最大震级相关性最好的参数,在此基础上统计得到的水库地震最大震级与水库地震综合影响参数回归统计关系较以往统计的关系具有更小的统计误差。

(2) 水库地震类型的分类判别表明,以震级  $M_s = 4.5$  作为震级较大的构造型地震和震级较小的非构造型水库地震的分类界线是适宜的。

(3) 按照本文新的经验统计关系,考虑 1 倍标准偏差的情况下,水库地震最大震级上限将  $> 7.0$ , 比以往的估计略微小一些。

## 8 存在的问题

本文通过新的震例统计的水库地震最大震级的关系式,只考虑了库面积、最大库深和库容的影响,没有考虑区域断层和岩性的作用,有一定的片面性,但可以综合其它预测方法为新建水库的预测、设防提供更全面的依据。

## 参 考 文 献

- 常宝琦. 1987. 预测水库诱发地震的两个数学模式 [J]. 西北地震学报, 9(1): 86—102.
- CHANG Bao-qi. 1987. Two mathematic models for prediction of reservoir induced seismicity [J]. Northwestern Seismological Journal, 9(1): 86—102 (in Chinese).
- 常宝琦, 梁纪彬. 1987. 水库“规模”与水库诱发地震震级的预测 [J]. 华南地震, 7(1): 94—95.
- CHANG Bao-qi, LIANG Ji-bin. 1987. Correlation between “scale” of reservoir and magnitude of induced earthquake [J]. South China Journal of Seismology, 7(1): 94—95 (in Chinese).
- 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, 12(1): 74—79.
- CHANG Bao-qi, LIANG Ji-bin. 1992. Prediction about the maximum magnitude of reservoir induced earthquake [J]. South China Journal of Seismology, 12(1): 74—79 (in Chinese).
- 常宝琦, 沈立英, 梁纪彬. 1997. 水库地震主震发生时间的预测 [J]. 华南地震, 17(2): 76—82.
- CHANG Bao-qi, SHEN Li-ying, LIANG Ji-bin. 1997. Prediction about the mainshock origin time of reservoir earthquake [J]. South China Journal of Seismology, 17(2): 76—82 (in Chinese).

- 陈益明. 1985. 柘林水库地震及其震源机制 [J]. 地震, (4): 35—41.
- CHEN Yi-ming. 1985. Zhelin reservoir-induced earthquakes and their focal mechanisms [J]. Earthquake, (4): 35—41 (in Chinese).
- 樊跃新, 王绍晋, 管丽霞, 等. 2007. 渔洞水库地区地震活动性和构造应力场分析 [J]. 地震研究, 30(1): 29—34.
- FAN Yue-xin, WANG Shao-jin, GUAN Li-xia, *et al.* 2007. Seismic activity and tectonic stress field before and after the water storage of Yudong reservoir in Zhaotong, Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 30(1): 29—34 (in Chinese).
- 高士钧. 1992. 长江三峡地区地壳应力场与地震 [M]. 北京: 地震出版社. 123—126.
- GAO Shi-jun. 1992. Crustal Stress Field and Seismicity of the Three Gorge Area [M]. Seismological Press, Beijing. 123—126 (in Chinese).
- 胡松. 2003. 天生桥一级水电站水库蓄水初期的水库地震 [J]. 地震地磁观测与研究, 24(6): 125—130.
- HU Song. 2003. Reservoir induced earthquake in Tianshengqiao No. 1 Hydropower Station at incipience of reservoir filling [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 24(6): 125—130 (in Chinese).
- 胡毓良, 陈献程, 张忠连, 等. 1986. 浙江湖南镇水库的诱发地震 [J]. 地震地质, 8(4): 1—25.
- HU Yu-liang, CHEN Xian-cheng, ZHANG Zhong-lian, *et al.* 1986. Induced seismicity at Hunanzhen reservoir, Zhejiang Province [J]. Seismology and Geology, 8(4): 1—25 (in Chinese).
- 李杰富, 张维平. 2002. 天生桥一级水电站水库诱发地震震灾处理措施规划设计 [J]. 云南水电技术, (3): 5—9.
- LI Jie-fu, ZHANG Wei-ping. 2002. The treatment plan and design against the seismic hazard of Tianshengqiao No. 1 Hydropower Reservoir induced earthquake [J]. Yunnan Hydropower Technology, (3): 5—9 (in Chinese).
- 刘奇武. 1983. 南冲水库地震简介 [J]. 华南地震, 3(4): 59—62.
- LIU Qi-wu. 1983. A brief introduction of Nanchong reservoir induced seismicity [J]. South China Journal of Seismology, 3(4): 59—62 (in Chinese).
- 王善泉, 陈祖荫. 1989. 模式识别理论、方法和应用 [M]. 北京: 地震出版社. 125—135.
- WANG Bi-quan, CHEN Zu-yin. 1989. Pattern Recognition Theory, Methods and Applications [M]. Seismological Press, Beijing. 125—135 (in Chinese).
- 王国英. 1989. 湖南省黄石水库地震考察与追踪 [J]. 华南地震, 9(4): 67—72.
- WANG Guo-ying. 1989. Seismic survey on the Huangshi reservoir induced earthquake [J]. South China Journal of Seismology, 9(4): 67—72 (in Chinese).
- 王清云, 高士钧. 1998. 隔河岩水库诱发地震的环境条件 [J]. 地壳形变与地震, 18(3): 73—79.
- WANG Qing-yun, GAO Shi-jun. 1998. Environmental conditions of induced earthquake in Geheyan reservoir [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 18(3): 73—79 (in Chinese).
- 夏其发. 1993. 《世界水库诱发地震震例基本参数汇总表》暨水库诱发地震评述<二> [J]. 中国地质灾害与防治预报, (1): 87—96.
- XIA Qi-fa. 1993. Summary of basic parameters of reservoir induced earthquake cases of the world and review of reservoir induced seismicity(2) [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, (1): 87—96 (in Chinese).
- 肖安予. 1990. 南水水库地震及其发展趋势 [J]. 华南地震, 10(2): 68—77.
- XIAO An-yu. 1990. The reservoir induced earthquake in Nanshui and its developing tendency [J]. South China Journal of Seismology, 10(2): 68—77 (in Chinese).
- 徐礼华, 刘素梅. 2005. 丹江口水库二期工程诱发地震强度预测 [J]. 武汉理工大学学报, 27(1): 58—61.
- XU Li-hua, LIU Su-mei. 2005. Strength evaluation of induced seismicity in the second phase of the project of Dan-

- jiangkou reservoir construction [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 27(1): 58—61 (in Chinese).
- 许强, 黄润秋. 1996. 用神经网络理论预测水库诱发地震 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 7(3): 10—17.
- XU Qiang, HUANG Run-qiu. 1996. The prediction of reservoir-induced seismicity using artificial neural network [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 7(3): 10—17 (in Chinese).
- 许振栋, 罗家天, 余庆旺, 等. 2007. 福建水口水库诱发地震及其发展趋势探讨 [J]. 大地测量与地球动力学, 27(3): 106—112.
- XU Zhen-dong, LUO Jia-tian, YU Qing-wang, *et al.* 2007. Discussion on induced earthquake in Shuikou reservoir area of Fujian Province and seismic activity trend [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 27(3): 106—112 (in Chinese).
- 杨国周, 欧阳凰. 1998. 东江水库地震活动特征 [J]. 华南地震, 18(2): 78—83.
- YANG Guo-zhou, OUYANG Huang. 1998. An analysis of Dongjiang reservoir earthquake and its seismicity characteristics [J]. South China Journal of Seismology, 18(2): 78—83 (in Chinese).
- 杨清源, 陈献程, 胡毓良, 等. 1996a. 应用灰色聚类法预测长江三峡工程水库诱发地震的最大震级 [J]. 华南地震, 16(2): 75—79.
- YANG Qing-yuan, CHEN Xian-cheng, HU Yu-liang, *et al.* 1996. Prediction of the maximum magnitude of reservoir induced earthquake in the Three Gorges reservoir region using GREY cluster method [J]. South China Journal of Seismology, 16(2): 75—79 (in Chinese).
- 杨清源, 胡毓良, 陈献程, 等. 1996b. 国内外水库诱发地震目录 [J]. 地震地质, 18(4): 454—461.
- YANG Qing-yuan, HU Yu-liang, CHEN Xian-cheng, *et al.* 1996b. Catalogue of reservoir induced seismic events in the world [J]. Seismology and Geology, 18(4): 454—461 (in Chinese).
- 杨又陵, 杨欣. 1996. 新疆克孜尔震群活动与水库蓄水关系研究 [J]. 内陆地震, 10(2): 147—154.
- YANG You-ling, YANG Xin. 1996. Study on the relation between earthquake swarm activity and water storage of reservoir in Xinjiang Kezi'er area [J]. Inland Earthquake, 10(2): 147—154 (in Chinese).
- 于品清, 孔凡健. 1983. 水库地震地质构造条件的讨论 [J]. 地壳形变与地震, 3(3): 71—81.
- YU Pin-qing, KONG Fan-jian. 1983. The discussion of RIS geological condition [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 3(3): 71—81 (in Chinese).
- 余永毓. 1987. 逻辑信息法在水库诱发地震研究中的应用 [J]. 地震学报, 9(增刊): 413—421.
- YU Yong-yu. 1987. The applications of logical information methods in the reservoir induced earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 9(Suppl): 413—421 (in Chinese).
- 曾心传, 高士钧. 1989. 水诱发地震应力场初步探讨 [J]. 华南地震, 9(1): 73—85.
- ZENG Xin-chuan, GAO Shi-jun. 1989. A preliminary study on the stress field of water induced-earthquake [J]. South China Seismological Journal, 9(1): 73—85 (in Chinese).
- Baccher B G, Keeney R L. 1982. Statistical examination of reservoir induced seismicity [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 72(2): 553—569.
- Packer D R, Cluff L S. 1979. A study of reservoir induced seismicity [R]. Woodward-Clyde Consultants, USA, US Geol Surv, Contract 14-08-0001-16809.
- YANG Feng-jung, LIEN Shang-yao, HO Ta-fu, *et al.* 2008. Dam modification designs for raising reservoir water level—Case study of Tsengwen dam in Taiwan [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 30(11): 1643—1650.

## A PRELIMINARY STUDY ON PREDICTION OF MAXIMUM MAGNITUDE OF RESERVOIR INDUCED EARTHQUAKE

ZHANG Fei-yu<sup>1,2)</sup> WANG Xiao-qing<sup>2)</sup> FU Hong<sup>3)</sup>  
DING Xiang<sup>2)</sup> WANG Long<sup>2)</sup> ZHENG You-hua<sup>2)</sup>

1) *School of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China*

2) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

3) *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China*

### Abstract

Since the prediction method for maximum magnitude of reservoir induced seismicity by using comprehensive effecting parameter  $E$ -value was proposed in 1987, it has been applied to many large-scale reservoirs with good effects. After that, a group of reservoir induced earthquakes were confirmed in the past 20 years. The applicability of the model is worth studying. Based on collection of new cases of reservoir induced earthquakes, 48 reservoir induced earthquake cases are selected in the paper. A new empirical prediction model of the maximum magnitude with  $E$ -value is statistically obtained and compared with the old one. At last, the upper limit of the maximum magnitude of reservoir induced earthquake is estimated to be less than  $M7$ .

**Key words** reservoir induced earthquake, the maximum magnitude, magnitude prediction, pattern recognition, comprehensive effecting parameter

---

[作者简介] 张飞宇,男,1981年出生,现为云南大学资源环境与地球科学学院固体地球物理专业在读研究生,主要从事水库地震研究,电话:0871-5747902, E-mail: 61138461@qq.com。