

丹江口水库诱发地震趋势研究

黄乃安 张绍波

(武汉水利电力学院)

P315.9

提要 本文研究了丹江口水库地震的特征和地震地质条件。据此,应用灰色系统方法,建立了水库地震的灰色聚类预测模型及水库地震趋势的灰色灾变预测模型。运用灰色关联分析原理研究了水库规模与水库地震震级的关系。结果表明,丹江口水库的4.7级地震是第一期工程的最大地震,第二期工程竣工蓄水后诱发地震的最大震级不超过5.6级,该库坝按原定抗震烈度Ⅷ度设防是合理的。

关键词 丹江口水库 第二期工程 灰色聚类方法 地震趋势

水库诱发地震

地震震级,

一、前言

丹江口水库是跨越鄂豫两省的一座大型水利枢纽工程,该水库分为丹江和汉江两个库区。丹江口水库的第一期工程,坝高为97米,库容160亿立方米,正常蓄水位高程为155米,于1976年11月竣工蓄水。目前,该水库正拟建第二期工程,届时水位高程将达170米,即比现在的正常高水位增高15米,库容达318.05亿立方米,增加近1倍。该水库是一座已诱发地震的水库,今后地震活动的趋势如何?特别是二期工程大坝加高后,诱发地震的状况又将会怎样?都是令人关注和有重要意义的问题。

二、丹江口水库地震概况

丹江口水库的整个库区位于新华夏系第二沉降带及第三隆起带的接壤部位,秦岭纬向构造带和新华夏系在此交汇复合。库区东侧为南阳盆地,南侧为武当山地长期隆起,北侧为古老的秦岭纬向构造带。由于受多次地壳运动的影响,库坝区及周围形成了一系列压性、压扭性的北西——北西西向断裂和褶皱,推测还有一条近西北向的丹江断裂带与之相交接(图1)。

汉江库区主要出露元古界的片岩、砂岩及岩浆岩,其渗透性能微弱,丹江库区则座落在古生界石灰岩及白垩—第三系红层上,岩体破碎,断裂发育,并有大量溶洞、落水洞等,有利于库水向深部岩体渗入。

丹江口水库蓄水以前,库区在历史上没有发生过Ⅴ度以上地震。蓄水后却诱发了大量的地震,其中最大震级为4.7级,震中烈度高达Ⅷ度。水库地震震中大多密集于宋湾、林茂山和玉皇顶三个区域,震源深度在4—10千米。从1972年林茂山的3.5级地震和1973年宋湾4.7级地震的震源机制解可知,丹江口水库地震属构造型水库地震,该区北西西向挤压的区域构造应力是水库地震的主要初始应力。但1977年黄庄的3.8级地震机制解的主压应力方向却与区域构造应力场不一致,表明该区构造应力已得到充分释放,不再成为诱发地震的主要

初始应力。地震序列特征分析也表明,丹江口水库地震活动现已处于相当低的水平。

三、水库地震的灰色聚类预测

灰色系统是指部分信息已知,部分信息未知或非确知的系统。水库地震从其特点和成因上说可视为灰色系统。

根据水库地震诱发参数所收集的数据,按水库地震聚类类别将所收集的数据依据统计方法抽取其权,将被预测水库按现有实际指标值在白化权函数上查找各类水库地震所对应的权,再依权的大小来判断被预测水库所属的类别,是一种灰色聚类,我们称之为水库地震的灰色聚类预测。

记,
 Y_L ——为第L种水库地震类别 $L=1, 2, \dots, h$

X_i ——为第i个预测指标
 $i=1, 2, \dots, h$

Z_K ——为第k个被预测水库
 $k=1, 2, \dots, m$

$Y_L(X_i)$ 为第L种水库地震

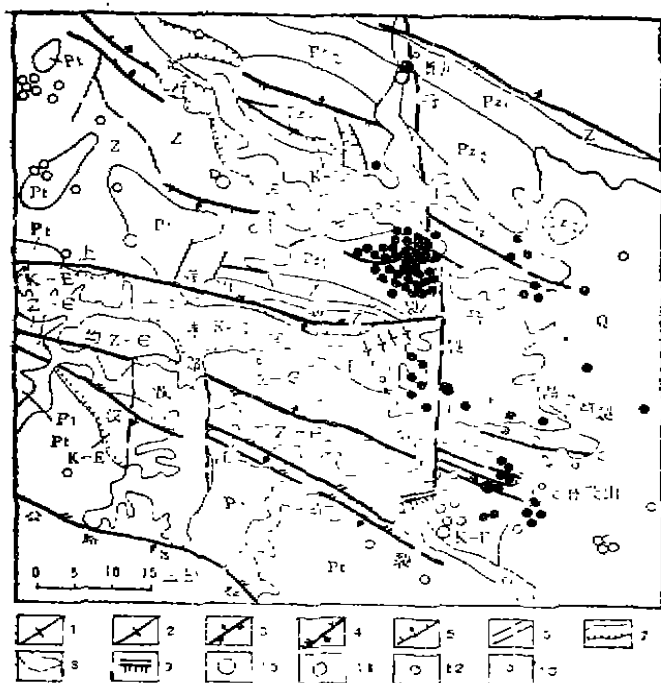


图1 丹江口水库地震震中与地质构造关系略图(据李祖武,1981)

Fig. 1 Sketch of the relations between the epicenter and geologic structure of Danjiangkou reservoir earthquake

1. 背斜; 2. 向斜; 3. 逆断层; 4. 压—剪性断层; 5. 正断层; 6. 性质不明或推测性断层; 7. 地层界线; 8. 水域边缘(海拔170米); 9. 坝址; 10. $4.0 \leq M_s \leq 5.0$; 11. $3.0 \leq M_s \leq 4.0$; 12. $2.0 \leq M_s \leq 3.0$; 13. $1.0 \leq M_s \leq 2.0$. 空心圆为蓄水前的地震, 实心圆为蓄水后的地震。

类别第i个指标的统计数。

$Y_L(X_{ij})$ 为第L种水库地震类别第i个指标中第j个分指标的统计数。

$Y_L\left(\frac{X_{ij}}{X_i}\right)$ 为第L种水库地震类别中第ij个分指标对 X_i 的百分数, 即权。

$Z_K(d_{ij})$ 为第K个被预测水库对 X_{ij} 的样本。

$f_{Li}(Z_K(d_{ij}))$ 为 $Z_K(d_{ij})$ 对第L种水库地震白化函数的权, 有

$$f_{Li}(Z_K(d_{ij})) = \begin{cases} Y_L\left(\frac{X_{ij}}{X_i}\right) & \text{若 } Z_K(d_{ij}) = Y_L\left(\frac{X_{ij}}{X_i}\right) \\ 0 & \text{若 } Z_K(d_{ij}) \in \emptyset \\ \sigma & \text{若 } Z_K(d_{ij}) \neq Y_L\left(\frac{X_{ij}}{X_i}\right) \end{cases}$$

$$\sigma \in \left\{ \min \left(Y_L \left(\frac{X_{ij}-1}{X_i} \right), Y_L \left(\frac{X_{ij}}{X_i} \right) \right), \right. \\ \left. \max \left(Y_L \left(\frac{X_{ij}-1}{X_i} \right), Y_L \left(\frac{X_{ij}}{X_i} \right) \right) \right\}$$

以 $f_{Li}(Z_K(d_{ij}))$ 的总和求出各个预测水库的灰类权, 即可得预测向量 $Z_K(Y_L)$ 为

$$Z_K(Y_L) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} f_{Li}(Z_K(d_{ij})) \\ = \{ Z_K(Y_1), Z_K(Y_2), \dots, Z_K(Y_k) \}$$

若被预测水库地震类别记为 L^* , 则在 $Z_K(Y_L)$ 中取

$$Z_K(Y_{L^*}) = \max_L (Z_K(Y_L))$$

则有第 K 个水库属于第 L^* 种水库地震类别。

我们将水库地震分为 $M_s \geq 5$ 、 $M_s < 5$ 和 $M_s = 0$ 三种类别, 选取最大库深、库容, 构造应力场状况, 断层活动性及介质条件作为诱发参数。其预测指标据文献〔6〕资料整理统计见表1。

表1 Table. 1

X_i	X_{ij}	$Y_1 (M_s \geq 5.0)$ $Y_1 (X_{ij} / X_i)$	$Y_2 (M_s < 5)$ $Y_2 (X_{ij} / X_i)$	$Y_3 (M_s = 0)$ $Y_3 (X_{ij} / X_i)$
X_1 库深	$X_{11} (\geq 150 \text{米})$	0.21	0.27	0.13
	$X_{12} (92-150 \text{米})$	0.50	0.17	0.71
	$X_{13} (\leq 92 \text{米})$	0.29	0.54	0.16
X_2 库容	$X_{21} (1800 \text{亿方})$	0.29	0.12	0.25
	$X_{22} (12-100 \text{亿方})$	0.57	0.18	0.18
	$X_{23} (\leq 12 \text{亿方})$	0.14	0.53	0.57
X_3 构造应 力场状况	$X_{31} (\text{逆断层})$	0.10	0.11	0.17
	$X_{32} (\text{正断层})$	0.40	0.59	0.68
	$X_{33} (\text{走滑断层})$	0.50	0.30	0.15
X_4 断层活动性	$X_{41} (\text{有活断层})$	1.00	1.00	0.67
	$X_{42} (\text{无活断层})$	0	0	0.33
X_5 介质条件	$X_{51} (\text{沉积岩})$	0.40	0.53	0.35
	$X_{52} (\text{变质岩})$	0.10	0.22	0.39
	$X_{53} (\text{火成岩})$	0.50	0.25	0.26

(据常宝琦等, 1986)

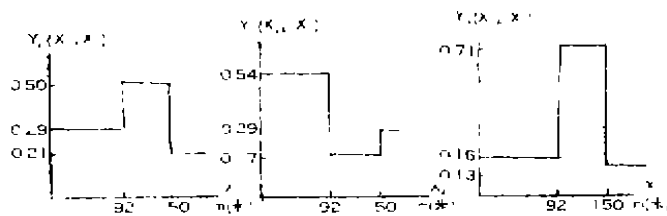


图 2
Fig. 2

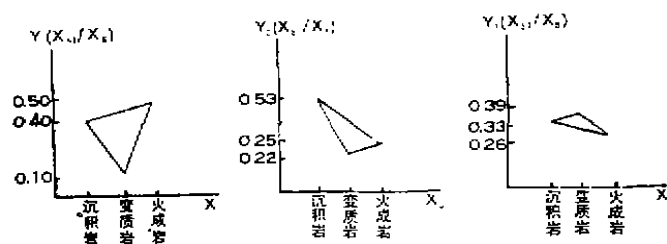


图 3
Fig. 3

图 2、图 3 分别为预测指标 X_1 、 X_2 的白化函数图（其余从略）。图 3 是离散函数的白化函数图，用直线连接，说明其信息可能不明确。如库区同时出露两种岩石，则可在其图上取权。

我们用新丰江等水库作了模型检验，其预测结果均与实际发震情况相吻合。

对于丹江口水库一期工程有预测指标 X_{13} 、 X_{21} 、 X_{33} 、 X_{41} 、 X_{51} ，预测向量为 $\{2.48, 2.49, 1.58\}$ 故丹江口水库一期工程最大诱发地震震级应小于 5.0 级。

我们认为 4.7 级地震是丹江口水库一期工程的主震，这是因为：第一，从灰色聚类预测结果来看，4.7 级地震比较接近。第

二，对国内外 83 个发震水库研究表明，发震水库滞后于蓄水时间超过 20 年的只占 3.6%，没有超过 25 年的，这也证明了 4.7 级地震是主震。第三，通过和新丰江、米德湖、克里玛斯塔水库地震活动特征的对比，也说明了 4.7 级地震为主震。

四、水库地震趋势的灰色灾变预测

水库地震趋势的研究是指对蓄水后已发震的水平，探讨现已发生的最大地震是否为主震以及今后的地震趋势。

灰色灾变预测，是指某种灾变值在哪些年将发生的预测。

对丹江口水库，现已发生的 4.7 级地震成为一期工程的主震，但今后是否应有地震发生，尚属未知。

设有原始数据列 $\{X^{(0)}\}$

$$X^{(0)} = \{X_{(1)}^{(0)}, X_{(2)}^{(0)}, \dots, X_{(i)}^{(0)}, \dots, X_{(n)}^{(0)}\}$$

其中 $X_{(i)}^{(0)}$ 是第 i 年的数据，令 ξ 为异常值，如果说 $X_{(i)}^{(0)} > \xi$ 为灾变，则称 ξ 为灾变阈值。

对 $\{X^{(0)}\}$ 进行突变映射有

$$X_{\xi}^{(0)} = \{X_{(1')}^{(0)}, X_{(2')}^{(0)}, \dots, X_{(i')}^{(0)}, \dots, X_{(n')}^{(0)}\}$$

式中： $n' < n$

令 P 为灾变值到灾变发生年份的映射，则对 $X_{\xi}^{(0)}$ 进行 P 映射有

$$W^{(0)} = \{ W_{(1')}, W_{(2')}, \dots, W_{(i')}, \dots, W_{(n')} \}$$

进行一次累加生成:

$$W_{(k)}^{(1)} = \sum_{j=1}^k W_{(j)}^{(0)}$$

得式

$$\hat{W}_{(k+1)}^{(1)} = \left(W_{(1)}^{(0)} - u/a \right) e^{-ak} + u/a$$

为预测模型, 称为GM(1, 1)模型。

取丹江口水库1974~1985年历年最大震级的地震建模, 预测结果为: 1987年、1992年均
有 $M_s > 1.5$ 级地震发生。实际上
1987年12月17日浙川发生 $M_s = 1.75$
级地震, 1992年有待检验。

若以1970—1985年的地震信息建模, 预测结果1986年将有 $M_s > 1.5$ 级地震发生。但实际上1986年没有大于1.5级地震, 造成这种误差的原因是模型中引入了主震前的信息, 增加了模型的噪音。这说明主震前的地震对以后地震趋势影响不大。

模型计算框图如图4。

计算结果表明, 丹江口水库一期工程主震已经过去, 但今后仍会有小震发生。

五、二期工程后诱发地震危险性分析

按灰色聚类法来预测二期工程后丹江口水库诱发地震的危险性, 有预

测指标 $\{X_{12}, X_{21}, X_{33}, X_{41}, X_{51}\}$, 预测向量为 $\{2.69, 2.12, 2.13\}$ 。故二期工程后丹江口水库有发生 $M_s \geq 5.0$ 级地震的可能性。

若与新丰江水库进行类比, 很明显, 丹江口地区在中新生时地壳活动强度, 以及新构造时期乃至现代地壳活动强度都远不如新丰江地区。水库蓄水后, 诱发地震活动的强度及频度等, 新丰江水库也远比丹江口水库强烈。故丹江口水库诱发地震的强度一般地说不会超过新丰江水库的水平。两水库的地震状况现都处于“尾声”阶段。新丰江水库自1982年至1985年地震活动基本处于稳定状态, 但在蓄水后27年的1986年9月15日, 在水位变化不大的情况下, 发生了3.9级地震。一年后, 在1987年9月15日又发生了4.6级地震。两次地震均为孤立型。丹江水库进入80年代以后, 地震频度和强度也极低。鉴于新丰江水库1986年和1987年的

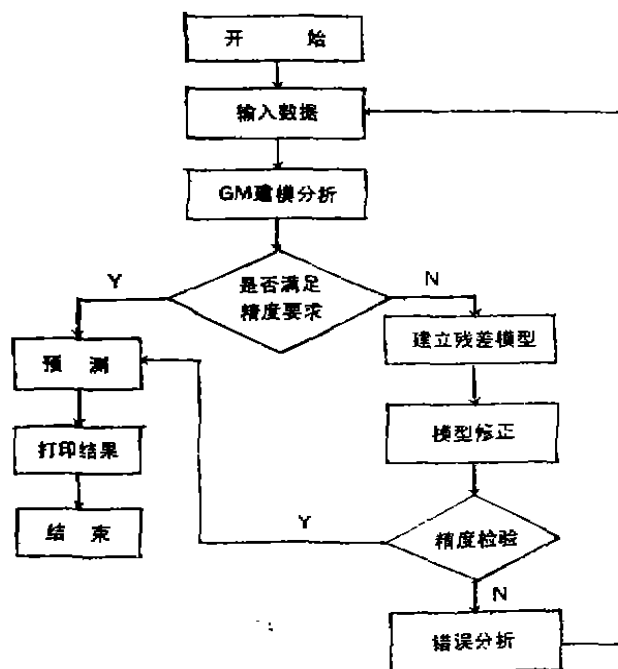


图4
Fig. 4

两次地震,我们认为在二期工程后,由于水位、库容及淹没面积的加大,丹江口水库有发生中强震的可能性。但震级不会超过新丰江水库的6.1级地震的强度。

水库地震是由库水触发的,作为外因的库水入渗以后,它的作用是迭加到构造应力场上,从而成为岩体破裂的驱动力。水库有大有小,库容、坝高、水域面积和水深也各不相同,到底什么要素在水库地震中起主要作用?有人认为最大库深重要,有人主张库容的作用较大,还有人认为库域面积不可忽视。常宝琦(1987)认为,水库规模是决定水库地震最大震级的主要因素之一。并命名一个参数—综合影响参数E,它的定义是:

$$S = E \frac{V}{H}$$

我们采用灰色关联分析方法来探讨这个问题。灰色关联分析是指系统因素间作用与关联程度的序量化分析。

设参考数列为 X_0 ,被比较数列为 X_i

$$X_0 = \{X_{0(1)}, X_{0(2)}, \dots, X_{0(n)}\}$$

$$X_i = \{X_{i(1)}, X_{i(2)}, \dots, X_{i(n)}\}$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

有关联系数

$$\xi_{i(k)} = \frac{\min_i \min_k |X_{0(k)} - X_{i(k)}| + \rho \max_i \max_k |X_{0(k)} - X_{i(k)}|}{|X_{0(k)} - X_{i(k)}| + \rho \max_i \max_k |X_{0(k)} - X_{i(k)}|}$$

关联度

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{i(k)}$$

式中

(1) ρ 为分辨系数,在 $\{0, 1\}$ 区间取值,一般取0.5。

(2) 对于单位不同的数列作关联分析时,一般要对原始数据作处理,使之无量纲化,归一化。

以 M_s 为参考因素, H、V、S为被比较因素,统计了30座水库的E值,计算了 r_{M_s-E} ,其值为0.9519。表明 M_s 与E的关联性最好,而且,E值代表了H、V、S。同时,E值反映了库区的地貌特征,利用E来预测水库地震也避免了发震时水位高低,库容和库域面积大小与 M_s 关系的一些问题。

采用常宝琦(1990)提出的 M_s 与E的关系式

$$M_s = 0.338 + 1.291E \pm 0.730$$

式中,0.730为预测值与实际值的回归残差。

按上式对丹江口水库最大诱发地震震级进行预测,一期工程 $M_s = 5.23$,二期工程后 $M_s = 5.87$ 。

考虑到丹江口水库一期工程预测地震震级与实际地震的差别,我们定义修正系数 η

$$\eta = \frac{4.7}{5.23} = 0.899$$

故丹江口水库二期工程后最大诱发地震震级为

$$M_{\max} = 0.899 \times 5.87 = 5.3$$

考虑到还有一些其它影响因素。该库二期工程后最大诱发地震震级不会超过5.5级。

六、未来可能发震部位的估计及库坝抗震烈度的要求

丹江口水库具备发震条件的只有丹库区。所以我们认为未来的发震主要地点还应在丹库区。但将向外围扩展。应特别注意的是在新淹没区内具有发震构造条件的部位上。诱发强震的可能性较大。对于早期已发震的地段发生强震的可能性不大。这是因为水对这些地段断裂的各种作用已基本完成。加之20多年的应变能释放。即使水位再提高十几米。对其的触发作用也是极微弱的。

关于汉库区。并不具备发生水库地震的地质条件。但必须指出。在汉库区可能有一条与丹江断裂大致平行的近南北向断裂带存在(图1)。由于水荷载的增加。很可能形成另一个应力集中区(相对丹江断裂带来说。它是次一级的)而发震。但由于受渗透条件的限制。预计其强度不会太大。

丹江口水库现有地震的震源深度大多在4—10千米。且 $M_s \geq 3.0$ 级地震的震源深度均大于5千米。二期工程后。水位提高。荷载加大。水的作用将向更深处发展。所以未来的强震震源深度可能大于5千米。

我们按水库地震震中烈度——震级——震源深度的关系式来计算二期工程后丹江口水库地震震中烈度。得到二期工程后水库地震震中烈度不超过Ⅷ度。加之烈度衰减。对大坝的影响也减弱。因此。丹江口水库大坝按原定烈度Ⅷ度设防是合理的。

结 论

丹江口水库一期工程。4.7级地震已成为诱发地震的主震。但今后仍会有一些小震的发生。二期工程后。其最大水库地震震级不会超过5.5级。发震地点可能在丹库周围新淹没区一些具有发震构造的部位上。未来的地震对大坝的影响不会超过Ⅷ度。该库按原定烈度Ⅷ度设防是合理的。

从现有的水库地震震例来看。水位变化率对水库地震的波动影响较大。为防范于未然。控制二期工程后水位变化率是极为必要的。据国内外一些水库的经验。建议水位变化率应小于1.5米/天。

参 考 文 献

- 〔1〕国家地震局地震研究所编。丹江口水库诱发地震文集。地震出版社。1980。
- 〔2〕邓聚龙。灰色系统基本方法。华中工学院出版社。1987。
- 〔3〕李祖武。丹江口水库区地震的形成条件与发展趋势的讨论。西北地震学报。1981, 3, (2)。
- 〔4〕张绍波。灰色聚类法在水库地震预测中的应用。全国第四次灰色系统理论学术会论文。武汉。1988。
- 〔5〕张绍波。水利工程施工与方案优化选择的灰色关联分析法。四川水力发电。1990, (1)。

- 〔6〕常宝琦等, 对白盆珠水库诱震危险性的初步预测, 华南地震, 1986, 6, (1).
- 〔7〕常宝琦等, 水库“规模”与水库地震震级的关系, 华南地震, 1987, 7, (1).
- 〔8〕胡聿贤、霍俊荣, 具有随机误差的变量之间的回归分析, 地震工程与工程振动, 1988, 8, (4).
- 〔9〕Huang naian and Zhang Shaobo, Grey Cluster analysis method for the forecast reservoir induced seismicity, SINO—JAPAN conference on seismological research, BEIJING, 1989.

RESEARCH ON THE INDUCED EARTHQUAKE TENDENCY IN DANJIANGKOU RESERVOIR

Huang Naian and Zhang Shaobo

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering)

[Abstract] This paper studies the earthquake character and seismo—geologic conditions in Danjiangkou reservoir. Based upon this study, the model of grey clustering to forecast reservoir earthquakes is established and another model of grey catastrophy to predict the tendency of reservoir earthquake is formulated by introducing the grey system method. The relation between reservoir scale and earthquake magnitude is studied by using the grey connection analysis. The earthquake of $M=4.7$ occurred in Danjiangkou reservoir is the largest earthquake in th the first phase of the project. The maximum induced earthquake will not be more than $M=5.5$ when the water level rises after the accomplishment of the second phase of the project. It is reasonable to design the dam according to the original antiseismic intensity Ⅷ

[Key words] Danjiangkou reservoir; The second phase of the project, Grey cluster method, Earthquake tendency