

应用灰色聚类法预测小浪底水库 诱发地震最大震级^{*}

贺为民¹⁾ 李智毅²⁾ 刘敏¹⁾ 罗翔飞¹⁾ 刘明军¹⁾ 张建军¹⁾

1)中国地震局地球物理勘探中心,郑州 450002 2)中国地质大学,北京 100083

摘要 根据野外考察并结合前人研究成果,对黄河小浪底水库及其邻区地震地质背景进行了分析,对其区域应力状态、断层活动性、地层岩性和地震活动背景等水库诱发地震因素进行了研究。简要地介绍了灰色聚类法,并应用该方法对小浪底水库发生水库诱发地震的可能性及诱发地震震级进行了预测。结果表明,该水库存在在水库诱发地震的可能性,其最可能诱发地震的地段为库区中段,水库诱发地震最大震级预测为 5 级。

关键词: 水库地震;诱发地震;灰色聚类法;最大震级;小浪底水库

1 库区地震地质背景

小浪底水库¹⁾面积 297.4km²,最大水深 140m,库容 126.5 亿 m³。本区处于秦岭东西向构造带、祁吕贺山字型构造及太行山新华夏系三大体系的交接部位,因而构造复杂,体系多变。但若从整体轮廓来看,由西向东,构造线延展则出现北东—东西—北西向的规则变化。水库区出露地层较齐全,最古老的太古界和下古元界变质岩系少量出露于中条山和王屋山,上元古界震旦系出露较全,为浅海相碎屑岩;下古生界寒武系至下、中统奥陶系出露于太行山及中部一带,以海相碳酸盐岩沉积为主,下部有碎屑岩;上古生界石炭系中、上统和二叠系出露于中部,除底部为海陆交互相沉积外,皆为陆相碎屑岩;中生界少量出露于东部,三叠、侏罗和白垩系地层皆为陆相碎屑岩沉积;新生界的下、上第三系出露于各新生代断陷盆地中,岩性为内陆河湖碎屑岩,成岩程度低;第四系中更新统至全新统以冲积洪积成因为主的松散堆积物广泛分布于各地,覆盖在各老地层上;区域内岩浆岩零星分布,面积小,但成分较复杂,有侵入岩和喷出岩。小浪底库坝区和周边还展布着多条第四纪活动断裂,主要是老断层的新活动(复活),如塔底断层、石井河断层、城崖地断层等形成于燕山期及前燕山期,在晚近期仍有明显活动。城崖地断层主体走向 NW 315°左右,倾向北东,倾角 65°~ 75°,全长 100km 以上,是本区的深大断裂之一;塔底断层近东西走向,总延伸长约 38km,断层性质为左旋扭动的正平移断层;石井河断层总体走向 285°,总延伸长度 40km 以上。小浪底地区现代地应力场属潜在走滑型,即主应力中 σ_1 与 σ_3 近于水平,而

* 收稿日期: 1999- 06- 15

1)水利部黄河水利委员会勘测规划设计院,黄河小浪底水利枢纽初步设计报告附件—工程地质勘察报告,1988。

σ_2 近于铅直,最大主应力 σ_1 的方向为北东东向,在该区域应力场作用下,城崖地断裂、塔底断裂和石井河断裂均表现为以剪切滑移为主,这三条断裂的交汇处在库区中段,是应力最集中的部位^[1]。本区地震活动总体来说较为微弱,以小震、微震为主,距坝址周围 110km 范围内,历史上 $M_s \geq 5$ 级的地震有 7 次,其中最大的一次是平陆 $6\frac{3}{4}$ 级地震,距离最近的一次是距小浪底坝址 25km 的洛阳 5 级地震;从微震震中分布来看,明显受第四纪活动断层控制,在水库淹没区内,主要受塔底断层控制。

2 灰色聚类法

灰色聚类法^[2]是将收集到的样本按统计方法取其权,再将被预测对象按实际指标的白化权函数上找出所对应的权,根据找出权的大小判断所属类别,将水库地震震级作为聚类的类别,记作 M_L 表示第 L 种地震类别 ($L=1, 2, 3, \dots, m$)。诱震因素(见表 1)作为聚类指标,记 x_i 为第 i 种预测指标 ($i=1, 2, 3, \dots, n$)。被预测的水库作为聚类对象,记作 Y_K 为第 K 个被预测对象 ($K=1, 2, 3, \dots, s$)。

表 1 水库诱发地震因素状态及诱震预测指标

诱震因素	诱震因素状态	诱震类别及其预测指标				
		I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
x_1 库深 (m)	$x_{11} (H > 140)$	0.16	0.17	0.47	0.07	0.14
	$x_{12} (140 \geq H > 90)$	0.47	0.26	0.12	0.32	0.68
	$x_{13} (90 \geq H)$	0.37	0.57	0.41	0.61	0.18
x_2 库容 (亿 m^3)	$x_{21} (V \geq 100)$	0.32	0.22	0.12	0.07	0.34
	$x_{22} (100 > V \geq 20)$	0.42	0.22	0.41	0.17	0.27
	$x_{23} (20 > V)$	0.26	0.57	0.47	0.76	0.39
x_3 区域应力状态	x_{31} (挤压)	0.32	0.48	0.35	0.39	0.38
	x_{32} (拉张)	0.21	0.17	0.12	0.05	0.13
	x_{33} (剪切)	0.26	0.22	0.29	0.10	0.13
	x_{34} (未知)	0.21	0.13	0.24	0.41	0.37
x_4 断层活动性	x_{41} (活动)	0.53	0.22	0.24	0.15	0.00
	x_{42} (不活动)	0.16	0.35	0.18	0.15	0.00
	x_{42} (未知)	0.32	0.43	0.59	0.71	0.00
x_5 岩性	x_{51} (可溶岩)	0.21	0.52	0.29	0.29	0.14
	x_{52} (花岗岩)	0.21	0.22	0.06	0.10	0.11
	x_{53} (沉积碎屑岩)	0.21	0.04	0.12	0.10	0.21
	x_{54} (片麻岩)	0.00	0.00	0.24	0.10	0.05
	x_{55} (玄武岩)	0.16	0.04	0.00	0.10	0.02
	x_{56} (变质岩)	0.11	0.17	0.18	0.07	0.26
	x_{57} (火成岩)	0.11	0.00	0.06	0.07	0.11
	x_{58} (千枚岩)	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
	x_{59} (未知)	0.00	0.00	0.06	0.15	0.08
x_6 地震活动背景	x_{61} (活动区)	0.21	0.30	0.29	0.15	0.00
	x_{62} (弱震区)	0.16	0.30	0.12	0.20	0.00
	x_{63} (无震区)	0.32	0.09	0.41	0.32	0.00
	x_{64} (未知)	0.32	0.30	0.18	0.34	0.00

设 $Z_K(d_{ij})$ 为第 K 个被预测水库对 x_{ij} 的样本, 则 $f_{Li}(Z_K(d_{ij}))$ 为 $Z_K(d_{ij})$ 对第 L 种水库地震的白化函数的权, 有

$$f_{Li}(Z_K(d_{ij})) = \begin{cases} Y_L(x_{ij}/x_i) & Z_K(d_{ij}) = Y_L(x_{ij}/x_i) \\ 0 & Z_K(d_{ij}) \in h \\ 0 & Z_K(d_{ij}) \neq Y_L(x_{ij}/x_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $Y_L(x_i)$ 为第 L 种水库地震类别第 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

预测向量 $Z_K(Y_L)$ 定义为

$$Z_K(Y_L) = \{Z_K(Y_1), Z_K(Y_2), \dots, Z_K(Y_s)\} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{Li}(Z_K(d_{ij})) \quad (2)$$

若被预测水库地震类别记为 L^* , 则:

$$Z_K(Y_L^*) = \max(Z_K(Y_L)) = Z_K(Y_m) \quad (L^* = m) \quad (3)$$

当 $L^* = m$, 那么被预测的水库地震就属于第 m 种水库地震类别

利用世界上 308 座水库资料, 其中发震的 100 座, 未发震的 208 座, 将水库诱发地震的诱震因素归纳为 22 种状态, 将水库诱发地震类型分为 5 类, 然后, 根据式 (1) 可求出水库诱发地震预测指标, 列于表 1 其中 I 类是发生 $M_S \geq 5.0$ 级以上地震, II 类是发生 $5.0 > M_S \geq 4.0$ 级地震, III 类是发生 $4.0 > M_S \geq 3.0$ 级地震, IV 类是发生 $3.0 > M_S \geq 0$ 级地震, V 类是没有发生诱震的类型。

3 小浪底水库诱发地震灰色聚类法预测

根据小浪底水库具体的诱发地震因素状态, 在坝址区, 库深可取 x_{11} 状态, 库容取 x_{21} 状态, 区域应力场取 x_{33} 状态, 断层活动性取 x_{41} 状态, 岩性较复杂多样, 取 x_{51} , x_{53} , x_{56} 三种状态, 地震活动背景取 x_{62} 状态。在库区中段, 水深已不到 90m, 取 x_{13} , 其它因素状态同坝址区。这样可获得六种不同的因素状态组合, 见表 2

为对 x_{13} , x_{21} , x_{33} , x_{41} , x_{51} , x_{62} 这种因素状态组合进行预测, 先根据这种组合求出灰色聚类的白化函数权。I 类 ($M_S \geq 5.0$) 的白化函数值是:

$$\begin{aligned} f_{11}(Z_1(d_{12})) &= 0.47 & f_{12}(Z_1(d_{21})) &= 0.32 & f_{13}(Z_1(d_{33})) &= 0.26 \\ f_{14}(Z_1(d_{41})) &= 0.53 & f_{15}(Z_1(d_{51})) &= 0.21 & f_{16}(Z_1(d_{62})) &= 0.16 \end{aligned}$$

同样地, 可以求出 II 类、III 类、IV 类、V 类的白化函数的权。将所求出的白化函数的权代入式 (2), 分类求出这种因素状态组合下预测向量 $Z_K(Y_L)$ 的值为: I 类: $Z_1(Y_1) = 1.95$; II 类: $Z_1(Y_2) = 1.74$; III 类: $Z_1(Y_3) = 1.18$; IV 类: $Z_1(Y_4) = 1.23$; V 类: $Z_1(Y_5) = 1.12$

综合 5 种类型其预测向量 $Z_1(Y)$ 为:

$$Z_1(Y) = \{Z_1(Y_1), Z_1(Y_2), Z_1(Y_3), Z_1(Y_4), Z_1(Y_5)\} = \{1.95, 1.74, 1.18, 1.23, 1.12\}$$

取 $Z_1(Y_1^*) = \max Z_1(Y_L) = Z_1(Y_1) = 1.95$, 这里 $L^* = 1$, 属于第 I 类, 即该因素状态组合下水库诱震预测结果为 $M_S \geq 5.0$

同样地, 可求出另外 5 种因素状态组合下的预测向量及其对应的水库诱震预测震级, 列于表 2

表 2 灰色聚类法预测小浪底水库诱发地震结果

诱震因素状态组合	预测向量值	预测诱震震级
$X_{12}, X_{21}, X_{33}, X_{41}, X_{51}$	{1.95, 1.74, 1.18, 1.23, 1.12}	$M_s \geq 5.0$
$X_{12}, X_{21}, X_{33}, X_{41}, X_{53}$	{1.95, 1.26, 1.01, 1.04, 1.19}	$M_s \geq 5.0$
$X_{12}, X_{21}, X_{33}, X_{41}, X_{56}$	{1.85, 1.39, 1.09, 1.01, 1.24}	$M_s \geq 5.0$
$X_{13}, X_{21}, X_{33}, X_{41}, X_{51}$	{1.85, 2.05, 1.47, 1.52, 0.62}	$5.0 > M_s > 4.0$
$X_{13}, X_{21}, X_{33}, X_{41}, X_{53}$	{1.85, 1.53, 1.30, 1.30, 0.69}	$M_s \geq 5.0$
$X_{13}, X_{21}, X_{33}, X_{41}, X_{56}$	{1.75, 1.70, 1.36, 1.30, 0.74}	$M_s \geq 5.0$

4 结论

从上述灰色聚类法的计算结果来看,坝址区诱发地震的最大震级为 $M_s \geq 5.0$ 级;库区中部的诱发地震强度当岩性为可溶岩时预测诱震结果为 $5.0 > M_s > 4.0$,当岩性为沉积碎屑岩或变质岩时预测诱震结果为 $M_s \geq 5.0$ 级。据国内外震例条件的分析认为^[3]:水库诱发地震都主要发生在碳酸盐岩和火成岩中,且发震部位多在岩溶发育地段,而碎屑岩库段发震的可能性很小。小浪底水库坝址区岩性虽复杂,但碎屑岩出露面积较大,这就降低了坝址区发生诱发地震的可能性。水库区寒武、奥陶系的碳酸盐岩地层主要分布于库区中段,而该库区主要活断层城崖地段层、塔底断层、石井河断层及其交汇部位也在库区中段。水库蓄水后,这些部位最有可能发生诱发地震。据可溶岩为库区中部优势岩性预测诱震结果为 $5 > M_s > 4$ 级。考虑到在历史地震方面,发生在库区中段附近的泃池地震为 5级地震,发生在距坝址 25km的洛阳地震也是 5级地震,据此可以将小浪底水库最可能诱发地震的库段预测为库区中段,水库诱发地震最大震级预测为 5级。

在野外实地考察与研究过程中,受到了中国地质大学唐辉明教授、王建锋博士后和水利部黄河水利委员会勘测规划设计院牛书安、王磊等同志的指导和帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 贺为民,等.小浪底水库诱发地震可能性分析.见:程国栋主编.山的呼唤——工程地质学与可持续发展.北京:地震出版社,1999.
- 2 杨清源,等.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.华南地震,1996,16(2):75~79
- 3 丁原章,等.水库诱发地震.北京:地震出版社,1989.

**PREDICTION OF THE MAXIMUM MAGNITUDE OF
INDUCED EARTHQUAKE IN XIAOLANGDI
RESERVOIR WITH GREY CLUSTER METHOD**

He Weimin¹⁾ Li Zhiyi²⁾ Liu Min¹⁾ Luo Xiangfei¹⁾ Zhang Janjun¹⁾

1) Research Center of Exploration Geophysics, CSB, Zhengzhou, 450002

2) China University of Geosciences, Beijing, 100083

Abstract

On the basis of field investigation and some others former results, the seismological and geological background in Xiaoliangdi reservoir area and its vicinity is analyzed. The factors that can induce earthquakes, such as regional stress state, fault activity, stratigraphic lithology etc, are also studied. The grey cluster method is briefly introduced. Using the method, we assessed the possibility and magnitude of potential induced earthquakes in the reservoir. The results show that the possibility to induce earthquakes exists in the reservoir, especially in the middle part of the reservoir area. The maximum magnitude of induced earthquakes predicted is about M_s5 .

Subject words induced earthquakes; grey cluster method; maximum magnitude, Xiaoliangdi reservoir.