

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.06.038

基于信息熵和模糊综合评判法的 震后水库风险评估

陈娜¹, 靳聪聪², 曹震³, 刘帅⁴

(1. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116600;
3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450011; 4. 大连理工大学 城市学院, 辽宁 大连 116600)

摘 要: 地震之后应及时对震后水库的风险等级进行合理评估。因此通过建立震后水库的风险等级评判模型,并结合信息熵和模糊数学理论的方法客观的评估震后水库的风险等级。以江油地区震后水库震损统计数据资料为基础求出各评判因素重要度,运用信息熵对评价体系中的各级指标权重进行客观评估,同时综合考虑重要度因素对评价体系的影响,两者有机构成综合权重,通过模糊理论的隶属函数评判体系中单因素,最终采用模糊加权法对震后水库风险等级进行综合评估。经计算表明,该水库为高风险,与实际调查情况相符,从而验证该法的合理性和适用性。

关键词: 震后水库; 信息熵; 风险等级; 模糊综合评估法;

中图分类号: TV62⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2015)06—0197—06

Risk Assessment of A Reservoir After Earthquake Based on Information Entropy and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

CHEN Na¹, JIN Congcong², CAO Zhen³, LIU Shuai⁴

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450003, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116600, China;
3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450011, China;
4. City Institute, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116600, China)

Abstract: The risk level of the reservoirs after earthquake should be evaluated timely. Therefore, the risk assessment model of the reservoirs after earthquake was established and the risk level of a reservoir was assessed with the combination of information entropy and fuzzy mathematics theory. Based on the statistical data of the earthquake damaged reservoirs in Jianyou area, the importance of each assessment factors in the evaluation system were rated, and then evaluated subjectively using information entropy. Meanwhile the influence of factor importance on the evaluation system was considered to form the comprehensive weights of the factors. According to which, the single factors were assessed by applying membership function of the fuzzy theory, and the risk level of the earthquake damaged reservoir was evaluated by using fuzzy comprehensive evaluation method. Taking Xujiaqiao reservoir in Jianyou area as the case study, information entropy and fuzzy comprehensive evaluation method were adopted to evaluate the risk level of the reservoir. The calculated result indicates that this reservoir is at high-risk rank, which is consistent with the actual situation, therefore the practicability and rationality of this risk assessment method are verified.

Keywords: reservoir after earthquake; information entropy; risk level; fuzzy comprehensive evaluation method

我国处于地震多发地带,频发的地震导致震区内水库整体安全性下降,引起大量裂缝、滑坡、渗漏

等险情,这些险情如不及时采取有效的措施处理,极易引起溃坝,造成严重巨大的损失。近期发生的汶

川大地震和鲁甸地震对当地的水利设施,尤其是对水库造成严重的损害,因此震后水库的风险评估和震后抢险加固就显得尤为重要。

在震后的第一时间内,对水库震损情况进行全面排查并采用合理的风险评估方法对震后水库风险进行评估,按照水库风险等级高低,制定科学、有效的应急除险方案,才能最大限度的缓解险情,同时也能够有效地防止和减少次生灾害的发生^[1]。常用的风险评估方法有蒙特卡罗模拟方法^[2]、模糊综合评判法^[3]、层次分析法^[4]、模糊聚类分析法^[5]、主成分分析法^[6]等。通常的工程风险评价法常采用各因素的定性法或半定量法评估,难以全面客观定量评估工程的风险等级。因此,利用客观的信息熵法计算各评价指标的权重并和模糊综合评判法相结合,建立震后水库风险等级评判指标体系。

1 震后水库风险等级评判模型的建立

为了全面的评估震后水库的风险等级,本文对各风险指标引入重要度,结合江油地区 187 个震后水库调查统计^[7-8],建立震后水库风险评判体系,用事件发生次数与水库总数的商作为事件发生的自然概率,用同层风险事件发生次数的比值归一化处理作为该事件对上层风险事件的重要度 $\beta^{[9-10]}$,详见表 1。

表 1 震后水库风险等级评判指标体系

第一层指标	第一层重要度	第二层指标	第二层重要度
大坝	0.513	坝体裂缝	0.67
		坝体塌陷及滑坡	0.12
		坝体渗漏	0.13
		坝体沉降变形	0.08
溢洪道	0.216	溢洪道堵塞	0.38
		边墙及底板破坏	0.43
		溢洪道桥震裂	0.19
放水设施	0.157	放水设施断裂	0.42
		卧管震损	0.37
		渗漏严重	0.21
库区其他	0.114	管理房震损	0.46
		库区公路裂缝	0.32
		库区山体滑塌	0.22

$$\alpha_i = \sum_{r=1}^5 (f_r \times r) / N \tag{1}$$

$$\beta_j = \alpha_i / \sum_{i=1}^j \alpha_i \tag{2}$$

式中: α_i 为评价指标 i 的重要度均值; r 为重要度等级, $r = 1, 2, \dots, 5$; f_r 为重要度为 r 级的震损水库数量; N 为区域内震损水库总数, $N = 187$; β_j 为第 j 个指标的重要度,其中一级评价指标 $j = 4$,二级评价指标 $j = 13$ 。

2 综合评判模型的建立

2.1 评判模型因素集的确

根据水库的组成将震后水库分为“大坝、溢洪道、放水设施和库区其他四个部分, $U = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]$

2.2 评判模型评语集的确

将风险等级划分为极低风险,低风险,中等风险,高风险,极高风险,记作 $V = [V_1 \ V_2 \ V_3 \ V_4 \ V_5]$,其中 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 对应的分值区间分别为 $[0, 0.2]$ 、 $(0.2, 0.4]$ 、 $(0.4, 0.6]$ 、 $(0.6, 0.8]$ 、 $(0.8, 1]$ 。

2.3 评判模型指标权重的确定

熵权法在确保统计的原始信息不损失的前提下,依靠对原始数据各因素包含的原始信息值得到权重^[11]。本文采取对原始数据标准化变换的方法改进熵权法,并对评价体系中的各指标信息以及评审专家判断信息量化和综合,该方法能够较为有效的减少主观因素干扰并对缩小信息中对评价结果极值不利信息,从而达到客观赋权的要求,适合评估较为复杂多准则决策问题^[12],具体方法如下所述:

(1) 标准化原始数据矩阵

评价体系中有 m 个评价对象,其中 n 个指标组

$$\text{成矩阵 } R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

对原始数据标准化方法进行变换:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_j) / S_j \tag{3}$$

其中, $\bar{X}_j$ 为指标 j 取值的均值, S_j 为指标 j 取值的标准差。

(2) 确定评价指标熵值 H_j

将各评价指标进行归一化处理,得出 X'_{ij} 中 j 项指标比重:

$$f_{ij} = X'_{ij} / \sum_{i=1}^m X'_{ij} \tag{4}$$

依据信息熵概念,评估指标熵值:

$$H_j = - \frac{1}{Ln} \sum_{i=1}^m f_{ij} Ln f_{ij} \tag{5}$$

进而得到计算差异系数

$$G_j = 1 - H_j \tag{6}$$

(3) 确定体系评价指标权值

$$\omega_i = G_j / \sum_{i=1}^n G_j \tag{7}$$

评价指标熵值 H_j 变小,该指标权值 ω_j 相应变大,说明该评价指标重要性变高;评价指标熵值 H_j 变大,该指标权值 ω_j 相应变小,说明该评价指标重要性变低。

(4) 通过考虑现场实际调查数据,本文将重要度 β 与权重 ω 相结合,最终确定各指标的权重为:

$$\gamma_i = \beta_i \omega_i / \sum_i \beta_i \omega_i \tag{8}$$

2.4 评判模型的单因素评判

震后水库风险等级隶属度的计算首先是采用专家组根据 P 、 C 的分类范围确定各风险事件的影响后果 C 的估值及发生概率 P 的估值,将 P 与 C 相乘并将其值代入风险事件相应的事件风险等级对应的隶属函数,从而确定风险事件相对该风险水平隶属度^[13]。

(1) 确定震后水库风险事件的影响后果 C

根据震后水库的实际情况确定风险事件的影响后果,估值方法如表 2 所示。

表 2 震后水库风险事件影响后果估算方法

概率	估值	发生频率	说明
罕见的	1	<0.0003	风险极难出现一次
偶见的	2	0.0003~0.003	风险不大可能会出现
可能的	3	0.003~0.03	风险可能会出现
预期的	4	0.03~0.3	风险会不止一次的发生
频繁的	5	>0.3	风险会频繁发生

(2) 确定震后水库风险事件的影响后果对应的概率 P

震后水库风险事件影响后果对应的概率 P 见

表 4 隶属函数表达式

风险等级	1	2	3	4	5
隶属函数	$\mu_{i1} = \begin{cases} 1, & 0 < v \leq 2 \\ \frac{4-v}{2}, & 2 < v \leq 4 \\ 0, & v > 4 \end{cases}$	$\mu_{i2} = \begin{cases} 0, & v \leq 2 \\ \frac{v-2}{2}, & 2 < v \leq 4 \\ 1, & 4 < v \leq 6 \\ \frac{8-v}{2}, & 6 < v \leq 8 \\ 0, & v > 8 \end{cases}$	$\mu_{i3} = \begin{cases} 0, & v \leq 6 \\ \frac{v-6}{2}, & 6 < v \leq 8 \\ 1, & 8 < v \leq 10 \\ \frac{12-v}{2}, & 10 < v \leq 12 \\ 0, & v > 12 \end{cases}$	$\mu_{i4} = \begin{cases} 0, & v \leq 10 \\ \frac{v-10}{6}, & 10 < v \leq 16 \\ 1, & 16 < v \leq 20 \\ \frac{22-v}{2}, & 20 < v \leq 22 \\ 0, & v > 22 \end{cases}$	$\mu_{i5} = \begin{cases} 0, & v \leq 20 \\ \frac{v-20}{2}, & 20 < v \leq 22 \\ 1, & 22 < v \leq 25 \end{cases}$

对评价体系中风险事件 P 、 C 值代入式(7)可计算该风险事件风险值 v ,另外将 v 值代入隶属函数,从而可计算出震后水库各组成部分对 5 个风险等级

表 3。

表 3 震后水库风险事件发生概率的估算方法

程度	估值	说明
轻微	1	不产生损失
中等	2	产生较少损失(对应数额十万元以内)
严重	3	产生一定可补偿损失(对应数额一百万元以内)
重大	4	损失较大并由较多可补偿损失(对应数额一千万以内)
灾难性	5	产生难以补偿损失(对应数额一千万以上)

(3) 隶属度值的确定

按照澳大利亚大坝委员会的定义,风险 v 是指对生命、健康、财产和环境负面影响的可能性和严重性的度量,是溃坝可能性和产生后果的乘积,即该风险因素导致水库发生负面影响的概率 P 和负面影响后果 C 的乘积:

$$v = P \times C \tag{9}$$

(4) 隶属函数的确定

扎德教授在模糊理论中提出:令 U 为论域, U 中一个模糊集 V ,从论域 U 到 $[0,1]$ 区间的映射:

$$U \rightarrow \mu = \begin{cases} 1 & v \in V_j \\ \mu(v_i) & v \in \text{中间状态} \\ 0 & v \notin V_j \end{cases} \tag{10}$$

震后水库的风险具备模糊以及不确定等特性,而风险水平不能单纯用准确值表述,结合模糊数学理论的同时,兼顾水利坝工工程特点,选用工程上应用较为成熟的梯形分布建立隶属函数确定风险等级隶属度,可快速对风险进行现场评估,作为初期判断的依据^[15]。风险等级由低到高的五个隶属函数表达式,如表 4 所示。

的隶属向量:

$$r_i = [\mu_{i1} \quad \mu_{i2} \quad \mu_{i3} \quad \mu_{i4} \quad \mu_{i5}]$$

根据最大隶属度原则,可确定每个风险事件的

风险等级。

同理计算得到震后水库任一部分的所有评价指标的隶属向量,即可得到该部分风险评估的判断矩阵 $B_i = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4]^T$

2.5 模糊综合评判法

由于评价矩阵 R_i 仅仅能反映评价体系中单因素对评价集 V 的隶属度,不能计算风险因素整体对评价集 V 的隶属度,故而选择模糊数学中的 $M(\cdot, \oplus)$ 模型,从而令体系中风险因素集总体模糊变换到评判集,最后计算震后水库各组成部分 C 风险因素相对于评价集的总体隶属向量。通过评价体系中的综合权重 λ 以及模糊评价矩阵 B 计算出模糊综合评价子集^[12]:

$$Y = \lambda \times B = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_i] \tag{10}$$

模糊加权法^[16] 可有效减少最大隶属度判别中导致信息的丢失,采用评语集对评价体系中信息区间分值计算综合评价系数,所以综合评价系数 Z 可定量确定震后水库风险等级:

$$Z = \sum_{i=1}^n Y_i V_i \tag{11}$$

3 工程概况

许家桥水库总库容 56.5 万 m^3 ,是一座以灌溉为主,兼有防洪、供水等综合效益的小(2)型水库。枢纽工程由大坝、溢洪道、放水设施等部分组成。大坝最大坝高 11.15 m,坝顶长 155 m,顶宽 4.0 m。溢洪道为正堰进口溢洪道,堰顶宽 5.0 m,全长 72 m,边墙及溢流堰底板为浆砌条石,溢流堰以下底板为浆砌块石,有一石拱机耕桥。放水设施位于大坝右岸,为石质梯级卧管,浆砌条石衬砌,卧管为方形,断面尺寸为 0.5 m $\times$ 0.4 m。该水库主要震损情况如下:

(1) 大坝坝顶出现 2 条纵缝,1 条位于坝顶中段防浪子堰坡脚处,长 28 m,最大宽度 10 cm,深度 1.2 m;另 1 条位于防浪子堰顶部中段,坝体右侧缝稍窄,中部到左坝肩部分稍宽,长度 90 m,缝宽 0.5 cm $\sim$ 5 cm,地表缝稍小,往下比较大,可见深度 0.4 m。

(2) 溢洪道震损情况:溢洪道底板和边墙震损,溢洪道桥震裂;

(3) 卧管底板及边墙发生多处断裂,渗漏呈射流状,险情较严重,放水洞有明显的震损情况。

(4) 卧管水库配套设施中的砖混式管理用房局部震裂,防汛道路有多处产生裂纹。

3.1 水库震损现象分析

土石坝最常见震损现象即坝体裂缝,其中纵向裂缝最普遍。纵向裂缝不仅破坏坝体完整性,导致边坡产生滑动面,而且在正常蓄水位时,由于上下游水压导致产生水力劈裂,从而形成渗流通道;横向裂缝在一般工况下虽并不常见,但地震导致的横向裂缝极大的破坏坝体稳定性,并与纵向裂缝交切极易形成坝坡的滑坡。如若裂缝延伸至库水淹没深度时,在水压作用下导致严重渗漏通道,极可能形成溃口^[11]。因此,采用倾度法估算坝体是否产生内部裂缝: $\gamma_{AB} = \frac{\Delta S}{\Delta L} = \frac{S_A - S_B}{\Delta L}$,其中 S_A 、 S_B 为 A 、 B 两点的实测沉降值; ΔL 为 A 、 B 两点的水平距离;沉降差 $\Delta S = S_A - S_B$ 与 ΔL 的比值称为倾度 γ_{AB} 。量测坝顶的纵缝上的 A 、 B 两点采用现场测量沉降值估算横向倾度,见图 1。

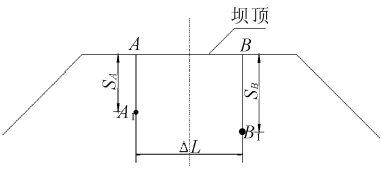


图 1 坝体横向倾度测点位置

现场测得 A 、 B 两点高程 602.00 m,经实测震后 A 点高程 601.93 m, B 点高程 601.78 m,两点间距 3.5 m,采用倾度法计算得出横向倾度 $\gamma_y = 4.29\%$ 。同理,在坝顶纵缝沿轴线选取一断面计算纵向倾度,经计算,纵向倾度 $\gamma_x = 3.17\%$ 。

由土石坝发生裂缝统计数据说明:破坏临界倾度 $\gamma_c = 1\%$,经计算得出该土石坝 γ_x 、 γ_y 均大于 γ_c ,判断此坝体可能存在内部裂缝^[12]。

3.2 震后水库风险等级的评判

3.2.1 震后水库风险指标的权重

按照震后水库表 1 所示,组织 7 位专家对风险清单中第一层指标中的“大坝、溢洪道、放水设施、库区其他”四个水库组成部分按照百分制进行评分,得到下面的评价矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} 91 & 87 & 73 & 71 \\ 94 & 81 & 83 & 77 \\ 87 & 84 & 76 & 65 \\ 95 & 81 & 79 & 72 \\ 93 & 79 & 72 & 67 \\ 91 & 77 & 75 & 68 \\ 89 & 82 & 78 & 79 \end{bmatrix} \rightarrow X =$$

0.937	1.596	0.708	0.988
1.377	0.937	1.525	1.248
0.350	1.267	0.953	0.727
1.524	0.937	1.198	1.031
1.231	0.717	0.627	0.814
0.937	0.498	0.872	0.858
0.644	1.047	1.117	1.335

按照改进的熵权法的式(4) ~ 式(5) 得出:
 $H_1 = 0.9585, H_2 = 0.9715, H_3 = 0.9794, H_4 = 0.9890$

由式(6) 得出: $G_1 = 0.0415, G_2 = 0.0285, G_3 = 0.0206, G_4 = 0.0110$

由式(7) 得出各指标的权重:
 $\omega_1 = (0.4086 \quad 0.2800 \quad 0.2032 \quad 0.1082)$ 。
同理可以求得水库各部分的指标权值 ω
 $\omega_{11} = (0.4527 \quad 0.2139 \quad 0.2352 \quad 0.0982)$
 $\omega_{12} = (0.4732 \quad 0.4085 \quad 0.1183)$
 $\omega_{13} = (0.2772 \quad 0.3346 \quad 0.3882)$
 $\omega_{14} = (0.3255 \quad 0.1617 \quad 0.5128)$

评判体系计算结果见表 5。

表 5 评判指标体系的计算结果

第一层 指标	第二层 指标	ω	β	λ
大坝 U_1	U_{11}	0.4527	0.67	0.8255
	U_{12}	0.2139	0.12	0.0699
	U_{13}	0.2352	0.13	0.0832
	U_{14}	0.0982	0.08	0.0214
溢洪道 U_2	U_{21}	0.4732	0.38	0.4758
	U_{22}	0.4085	0.43	0.4648
	U_{23}	0.1183	0.19	0.0595
放水设施 U_3	U_{31}	0.2772	0.42	0.3618
	U_{32}	0.3346	0.37	0.3848
	U_{33}	0.3882	0.21	0.2534
库区其他 U_4	U_{41}	0.3255	0.46	0.4764
	U_{42}	0.1617	0.32	0.1646
	U_{43}	0.5128	0.22	0.3590

3.2.2 震后水库的单因素评判

结合 7 位专家对指标体系各风险事件进行估值,对打出的分值进行统计。如表 6 所示。
 P 、 C 乘积代入评价体系中的风险水平的隶属函数,计算该风险事件对各风险等级隶属度,得到对应的评判矩阵:

表 6 震后水库风险因素 P 、 C 的值

指标	风险因素						
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
P	4	5	4	2	2	3	3
C	5	4	4	3	3	3	2

指标	风险因素					
	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}
P	3	3	5	2	2	3
C	3	3	4	3	2	2

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.3 震后水库模糊综合评价

$$B_1 = \lambda_1 \cdot U_1 = [0.8255 \quad 0.0699 \quad 0.0832 \quad 0.0214]$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0 \quad 0.0214 \quad 0 \quad 0.9786 \quad 0]$$

同理可以得到溢洪道、放水设施、库区其他的评判结果:

$$B_2 = [0 \quad 0.5352 \quad 0.4648 \quad 0 \quad 0]$$

$$B_3 = [0 \quad 0 \quad 0.7466 \quad 0.2534 \quad 0]$$

$$B_4 = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

结合上述水库一级指标的判断矩阵,可以得到该水库风险评价的判断矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0.0214 & 0 & 0.9786 & 0 \\ 0 & 0.5352 & 0.4648 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7466 & 0.2534 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

上述结果表明,该震后水库中大坝部分风险水平属于极低风险、低风险、中等风险、高风险、极高风险的隶属度分别为:0、0.0214、0、0.9786、0。根据最大隶属度原则可知,大坝部分的风险等级属于高风险。同理可知,溢洪道部分风险水平处于低风险、放水设施风险水平处于中等风险、库区其他风险水平处于低风险水平。

根据评语集对应信息区间分值(0.1 0.3 0.5 0.7 0.9) 计算综合评价系数 Z :

$$Y = \lambda \cdot B = \begin{bmatrix} 0.6668 & 0.1924 & 0.1015 & 0.0392 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0.0214 & 0 & 0.9786 & 0 \\ 0 & 0.5352 & 0.4648 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7466 & 0.2534 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1565 & 0.1652 & 0.6783 & 0 \end{bmatrix}$$
$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 0.1565 & 0.1652 & 0.6783 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.9 \end{bmatrix}^T = 0.6044$$

由综合评价系数为 0.6044 可知,该震后水库的风险等级属于高风险,计算结果与抗震救灾水利工作组评估该水库为高危水库的结果一致,与实际情况相符合。

4 结 论

采用信息熵法和模糊综合评判法建立震后水库风险综合评估体系,并结合江油地区震损水库的重要度对其中的许家桥水库进行风险综合评估。该方法较客观的将震后水库风险评估中难以量化的问题经过数学方法得出量化指标,并进行客观赋权,减少主观臆断性。许家桥水库的计算结果与工程实际情况相一致,表明该评估方法的适用性和合理性。该方法的提出不仅能为区域内的一批震后水库震损情况排序提供新的思路,而且按水库风险等级高低科学合理的安排应急抢险和除险加固等措施提供参考依据。

参考文献:

[1] 叶亚三,陈国兴,王志华,等.汶川大地震中广元市水库震害调查与分析[J].世界地震工程,2011,27(4):73-85.

[2] 吕弯弯,顾圣平,何 蕾,等.基于蒙特卡罗法的土石坝洪水漫顶风险率计算及其敏感性分析[J].长江科学院院报,2015,32(5):48-52,56.

[3] 张宇华,靳聪聪,范 冰,等.基于熵权法与模糊综合分析法的病险水闸风险评价[J].水力发电,2013,39(12):39-42,93.

[4] 陈 诚,花剑岚.基于改进 AHP 法的水闸安全性模糊

综合评价[J].水电能源科学,2013,31(2):174-176,137.

[5] 田林钢,李 洋.模糊聚类分析在震后水库风险评价中的应用[J].人民黄河,2010,32(1):130-131.

[6] 孙 雷.主成分分析法和模糊综合分析法在水质评价中的实例比较[J].环境科学与管理,2011,36(8):178-181.

[7] 孙少楠,张先起,田林钢.“5.12”地震中小型水库震损机理分析研究[J].人民长江,2009,40(7):58-61,104.

[8] 冒 进,陈国兴,王志华,等.汶川大地震中德阳市水库土坝的震害特征[J].防灾减灾工程学报,2014,34(6):784-791.

[9] 周红波.基于贝叶斯网络的深基坑风险模糊综合评估方法[J].上海交通大学学报,2009,43(9):1473-1479.

[10] 姚成玉,张英驿,陈东宁,等.T-S 模糊重要度分析方法研究[J].机械工程学报,2011,47(12):163-169.

[11] 田林钢,靳聪聪.改进的熵权-TOPSIS 在震损水库除险加固方案评估中的应用[J].水电能源科学,2013,31(9):68-71.

[12] 张宇华,靳聪聪,范 冰,等.基于熵权法与模糊综合分析法的病险水闸风险评价[J].水力发电,2013,12(12):39-42,93.

[13] 黄建陵,彭 巍,华文鑫.地下工程安全风险管理与控制研究[J].铁道建筑,2012(1):77-79.

[14] 杨 杰,郑成成,江德军,等.病险水库理论分析研究进展[J].水科学进展,2013,25(1):148-154.

[15] 杨纶标,高英仪,凌卫新.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2011.

[16] 朱 林,雷景生,毕忠勤,等.模糊加权流数据软子空间的聚类算法[J].上海电力学院学报,2013,29(6):553-557.