

# 基于组合赋权和可拓理论的土石坝病险等级判定

丛培江,王亮,尹志刚,张博,李炎春

(长春工程学院 水利与环境工程学院,吉林 长春 130012)

**摘要:** 针对土石坝病险等级判定指标权重确定主观依赖性强,采用层次分析法和熵权法计算评价指标的主客观权重,为避免指标权重的绝对主观性和绝对客观性,采用博弈论确定指标最优综合权重,考虑评价结果存在等级判定不相容性问题,通过可拓评价模型完成土石坝病险程度等级判定,最终建立了基于博弈论组合赋权的土石坝可拓病险等级判定模型,并对5座水库进行模型应用。结果表明:病险等级判定结果与水库实际鉴定结果一致,且该评价模型简单实用,提高了综合安全评价的效率和可操作性,对水库病险程度等级判定和除险加固具有良好的应用前景。

**关键词:** 土石坝;病险等级判定;组合赋权;可拓理论

中图分类号: TV698.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0036-07

## Determination of Earth-rock Dam Risk Level Disease Based on Combinatorial Empowerment and Extension Theory

CONG Peijiang, WANG Liang, YIN Zhigang, ZHANG Bo, LI Yanchun

(School of Water Conservancy and Environmental Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract:** In order to avoid the absolute subjectivity and absolute objectivity of the index weight, game theory is used to determine the optimal comprehensive weight of the index, considering the incompatibility of the evaluation results, the degree of risk of earth-rock dam is determined by the extension evaluation model, and finally a model for determining the extendable risk level of earth-rock dam based on game theory combination empowerment is established, and the model application is carried out for five reservoirs. The results show that the results of the determination of the risk level are consistent with the actual identification results of the reservoir, and the evaluation model is simple and practical, which improves the efficiency and operability of the comprehensive safety evaluation, and hold great potential for the determination of the disease risk level in the reservoir and the reinforcement of risk elimination.

**Keywords:** earth-rock dams; determination of sickness insurance level; combination weighting; extension theory

从1954年—2018年的65年里,我国共溃坝3541座,年均54.5座,年均溃坝率6.3%,而在诸多溃坝案例中,土石坝占比90.55%<sup>[1]</sup>,现有水库大坝安全的鉴定,主要依靠《水库大坝安全评价导则》<sup>[2]</sup>(以下简称《导则》)和专家评定,但是病险程度的严重性判别和排序仍旧有待进一步完善。现阶段学者对评价方法进行了相关研究<sup>[3-6]</sup>,采用方法为多元统计分析法<sup>[7]</sup>、属性识别法<sup>[8-9]</sup>、模糊综合评价

法<sup>[10]</sup>等,评价模型中的指标一般由专家主观选择,受主观因素影响;评价体系权重利用主观权重法或客观权重法,方法单一,容易引起误差;模糊综合评价等方法需要构造函数,函数构造存在一定难度,且实例验证操作相对复杂。目前,将两种或多种研究方法结合使用<sup>[11-13]</sup>是国内外专家学者的研究重点,主要包括对不同权重方法计算权重进行组合<sup>[14]</sup>,旨在使指标赋权更加合理,兼顾两种权重权重方法的优势,有效提高土石坝安全鉴定结果的正确性和合

理性。

本文针对目前研究中暴露出的指标权重存在偏主观或偏客观性的问题,采用指数标度 AHP 法与熵权法进行评价指标主客观权重计算,运用博弈论进行组合赋权,不仅可以兼顾主客观两种权重,也可使指标赋权更加科学,有效提高土石坝病险等级判定的正确性和合理性;考虑影响土石坝安全的因素复杂繁多,本文引入物元可拓评价方法<sup>[15-18]</sup>,该方法不仅可通过系统物元变换和结构变换等方式解决多指标综合评价问题,而且可通过系统物元变换和结构变换等方式,将不相容问题转化为相容问题,最终构建博弈论组合权重下物元可拓病险等级判定模型,并对 5 座水库土石坝进行病险等级判定,

验证模型方法的有效性。

## 1 博弈论组合赋权

### 1.1 构建评价指标体系

构建合理的评价指标体系是评价结果可靠性的基石,对于评价指标的选择要能反映水库现状特性,且评价指标应该是可计算或可具体描述。本文遵循系统性、独立性等原则,以评价指标的对于评价体系的贡献率作为指标体系构建依据,根据相关研究<sup>[19-20]</sup>及《导则》内容,选取防洪安全、渗流安全及结构安全等共 7 个一级指标,并在每个一级指标下设置若干个二级指标,构建病险等级判定指标体系如图 1 所示。

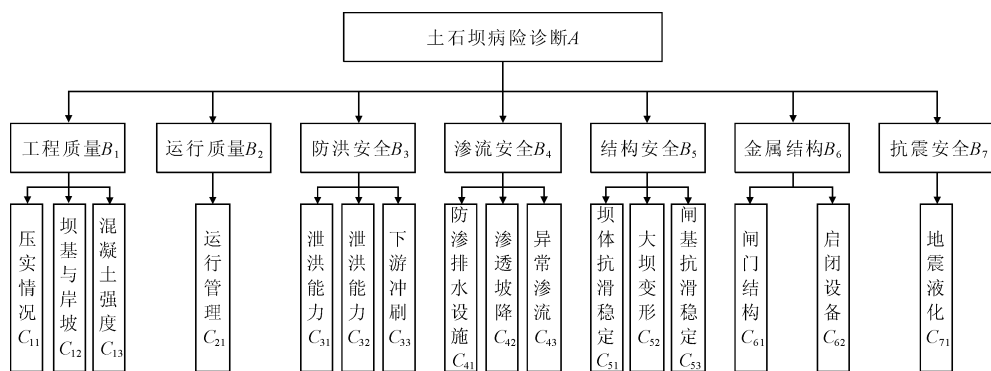


图 1 土石坝病险等级判定指标体系

### 1.2 指标权重确定

#### 1.2.1 指数标度 AHP 法

传统的 AHP 法采用 1—9 标度,在进行一致性检验时容易造成验算不通过现象<sup>[21]</sup>,适用性有待提高。本文采用指数标度法  $e^{0/5} \sim e^{8/5}$  进行主观权重确定,能够更好的通过一致性检验。计算步骤如图 2 所示。

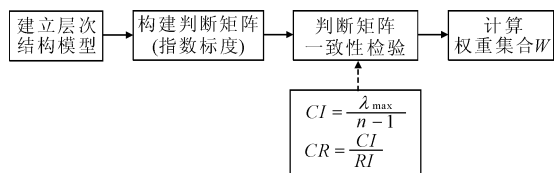


图 2 层次分析法计算流程图

计算所得主观权重记作  $\omega_1$ ,如下式所示:

$$\omega_1 = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (1)$$

式中:  $\alpha_n$  为第  $n$  个评价指标权重。

#### 1.2.2 熵权法客观赋权

客观赋权法是以决策矩阵的信息为依据,并通过客观标准下对样本数据构造数学模型计算权重的

方法<sup>[22]</sup>。为确定权重时更客观,本文采用熵权法进行客观赋权。熵是热力学单位,在数学中,将研究事物所包含的信息量记作期望,表达为信息熵。对于表征事物的某一指标,以熵值表示指标的离散程度,具体表现为指标计算熵值越小,代表该指标的离散程度越大,该指标对综合评价的影响(权重)越大。

采用熵权法确定指标权重计算如下:

#### (1) 数据标准化

因为每个指标的数量级不同,需要把它们化到同一个范围内再比较。标准化的方法比较多,本文采用最大最小值标准化方法。设有  $m$  个待评对象,  $n$  个评价指标,可以构成数据矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ,设数据矩阵内元素  $x_{ij}$  经过指标正向化和标准化处理过后的元素为  $x'_{ij}$ 。

若  $x_j$  为负向指标(越小越严重型),处理如下:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

若  $x_j$  为正向指标(越大越严重型),处理如下:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (3)$$

式中:  $\max(x_j)$  为评价指标数据最大值;  $\min(x_j)$  为评价指标数据最小值。

### (2) 计算信息熵

对某个指标  $x_j$ , 信息熵为  $E_j$

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

式中:  $p_{ij}$  为信息熵计算中间值,  $p_{ij} = \frac{x_{ij}'}{\sum_{j=1}^n x_{ij}'}$

信息熵  $E_j$  越小的指标, 表明该指标对于整个评价体系中提供的信息量越大、变异程度越大, 此时可认为该指标起到的作用也越大。

### (3) 计算客观权重 $\omega_2$

$$\omega_2 = \omega_{ij} = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (5)$$

#### 1.2.3 博弈论组合赋权

基于博弈论的组合赋权法是组合不同方法获得的权重, 旨为获得更合理的能够统筹专家经验和指标变化规律的指标权重。本文协调选取的主观权重和客观权重计算所得权重之间的冲突并寻找两者之间的一致性, 最终达到权重组合的目的。博弈论组合赋权法可以充分结合主观决策和客观数据的内在分布, 在一定程度上提高权重的科学合理性<sup>[23]</sup>。计算步骤如下:

#### (1) 构建线性组合

$$W = \alpha_1 \omega_1^T + \alpha_2 \omega_2^T \quad (6)$$

式中:  $\omega_1$  为评价指标主观权重向量;  $\omega_2$  为评价指标客观权重向量;  $\alpha_1, \alpha_2$  为线性组合系数。

#### (2) 确定目标函数

对主客观权重向量按照博弈集结理论进行最优的线性组合, 主要内容包括: 将离差最小化作为优化目标, 对式(6)的两个线性组合系数  $\alpha_1, \alpha_2$  进行优化, 最终获得优化后指标权重, 由此确定目标函数如式(7)所示:

$$\min \|W - \omega_k\|_2, \quad k = 1, 2 \quad (7)$$

#### (3) 等式变换

采用矩阵微分性质将式(7)进行等价变换, 最终构建最优化一阶导数条件的线性方程组如式(8):

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### (4) 求解综合权重

计算式(8), 得到最优化的线性组合系数  $\alpha_1$ 、

$\alpha_2$ , 在对组合系数归一化处理, 确定基于博弈论组合赋权的综合权重  $W$  计算公式如(9)所示:

$$W = \alpha_1^* \omega_1^T + \alpha_2^* \omega_2^T \quad (9)$$

式中:  $\alpha_1^* = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$ ,  $\alpha_2^* = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$ , 代表组合系数。

## 2 基于改进物元可拓模型的土石坝病险程度等级判定

土石坝病险程度等级判定属于复杂的多目标评价问题, 其当前研究热点在于定量化表征病险程度, 达到病险排序的目的。可拓评价模型能够定量化地表示评价结果, 同时在进行土石坝病险诊断的过程中, 评价体系等级量化的不确定性和病险程度界限的模糊性, 采用物元可拓评价模型都能充分考虑到。其评价模型中特有的等级特征值不仅有利于反映病险诊断结果对于病险等级的贴近程度, 同时也可以分析预测单指标及研究对象未来的偏向趋势。考虑到目前采用的单一的赋权法计算得到的权重存在偏主观或偏客观, 评价结果有效性有待考证。因此, 本文将优化后指标权重应用于物元可拓评价模型, 旨为提高评价结果精度, 精确判断土石坝病险程度。物元可拓模型的构造过程一般包括 5 步<sup>[24-25]</sup>:

#### (1) 确定待评物元

本文旨在确定土石坝病险严重程度, 则待评物元为选定的中小型土石坝, 构建待评物元矩阵必须明确物元三要素, 物元的三要素记作  $R = (N, C, V)$ , 即事物  $N$  有  $n$  个特征, 事物可以用  $n$  个特征元  $(C_1, C_2, \dots, C_n)$  及其相对应的量值  $(V_1, V_2, \dots, V_n)$  描述。基于构建的指标及其量值, 确定待评物元矩阵。

$$R_i = \begin{bmatrix} N_i & C_{i1} & V_{i1} \\ & C_{i2} & V_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{ik} & V_{ik} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $N_i$  为待评价对象;  $C_{ik}$  为待评物元中运行管理,  $\dots$ , 抗震稳定性等评价指标;  $V_{ik}$  为待评对象构建的评价指标的量值。

#### (2) 构建评价指标经典域

本文基于评价指标分级标准构建经典域如下:

$$R_v = \begin{bmatrix} N_v & C_{1v} & V_{1v} \\ & C_{2v} & V_{2v} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{nv} & V_{nv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_v & C_{1v} & (a_{1v}, b_{1v}) \\ & C_{2v} & (a_{2v}, b_{2v}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{nv} & (a_{nv}, b_{nv}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $N_v$  为第  $v$  个评价等级; $C_{nv}$  为第  $n$  个指标处于第  $v$  个评价等级; $a_{nv}, b_{nv}$  为评价指标值域的上、下限。

(3) 建立评价指标的节域物元

各指标对应的所有取值范围,即节域物元,见下式:

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C_{p1} & V_{p1} \\ & C_{p2} & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{pn} & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & C_{p1} & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_{p2} & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{pn} & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $a_{pn}, b_{pn}$  为评价指标的取值范围。

(4) 确定评价指标等级关联度

可拓距和位值是可拓理论的关联函数计算要点,用于描述点与区间、区间与区间之间的位值关系,通过构造实轴上的关联函数,确定待评对象的单指标关联度<sup>[26-27]</sup>。

点  $v_i$  与区间  $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$  的距定义为:

$$\rho(v_{ij}, V_i) = \left| v_{ij} - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2} \quad (13)$$

式中: $a_{ij}, b_{ij}$  为评价指标某一等级的取值上下限; $v_{ij}$  为指标状态值。

同理,则点  $v_i$  与区间  $V_{pj} = \langle a_{pj}, b_{pj} \rangle$  的距为:

$$\rho(v_{ij}, V_p) = \left| v_{ij} - \frac{a_{pj} + b_{pj}}{2} \right| - \frac{b_{pj} - a_{pj}}{2} \quad (14)$$

式中: $a_{pj}, b_{pj}$  为评价指标等级量化范围; $v_{ij}$  为指标状态值。

则单指标关联函数计算公式可表示为:

$$k_v(N_{ij}) = \begin{cases} \frac{\rho(v_{ij}, V_v)}{\rho(v_{ij}, V_p) - \rho(v_{ij}, V_i)}, & \rho(v_{ij}, V_p) \neq \rho(v_{ij}, V_i) \\ -\rho(v_{ij}, V_v) - 1, & \rho(v_{ij}, V_p) = \rho(v_{ij}, V_i) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $k_v(N_{ij})$  为待评对象中评价指标关于评价等级  $v$  的关联度。

(5) 计算综合关联度并确定评价等级

待评对象  $N_i$  关于等级  $v$  的综合关联度  $K_v(N_i)$  计算公式如下:

$$K_v(N_i) = \sum_{i=1}^n \omega_i k_v(N_i) \quad (16)$$

式中: $K_v(N_i)$  为待评对象  $N_i$  关于等级  $v$  的综合关联度; $k_v(N_i)$  为单指标关联度; $\omega_i$  为各评价指标的权重。

确定待评单元关于等级  $v$  的综合关联度后取  $K = \max_{v=1,2,3,4,5} K_v(N_i)$ , 则待评价单元  $N_i$  的综合评价等级为第  $v$  级。

$$\bar{K}_v(N_i) = \frac{K_v(N_i) - \min K_v(N_i)}{\max K_v(N_i) - \min K_v(N_i)} \quad (17)$$

计算待评对象的等级变量特征值见下式:

$$i^* = \frac{\sum_{v=1}^5 i \times \bar{K}_v(N_i)}{\sum_{v=1}^5 \bar{K}_v(N_i)} \quad (18)$$

式中: $i$  为评价等级阈值; $i^*$  为评价对象的等级变量特征值。

### 3 实例分析

#### 3.1 土石坝病险程度等级

现阶段确定土石坝隶属于几类坝主要依靠《导则》来做评判,虽然操作性强、使用广泛,但对三类坝的病险严重程度体现不够,为表征病险程度等级,因此本文采用五级病险程度分级<sup>[28-30]</sup>,分级标准见表 1。

表 1 病险严重性分级评价标准

安全类别	划分等级	病险程度	等级	评分	定性描述
一类坝	A	无病险	I 级	(8,10)	所有的安全性能都远远超出了标准的规定;在过去和现在的情况下,没有发生任何的工程反常现象;各项安保制度和措施都已全面实施
二类坝	B	一般性病险	II 级	(6,8)	所有的安全指标都超过了标准,符合标准的规定;在实际使用和使用中,没有出现重大的工程不正常现象;主要的安保体系和措施得以实施;项目中有可能发生的小规模的小的事件,可以及时处理
	C <sub>1</sub>	较重大病险	III 级	(4,6)	安全性能不满足标准规定;在施工过程中,有可能造成重大安全事故,但不会造成大坝垮塌,是可以得到有效控制
三类坝	C <sub>2</sub>	严重病险	IV 级	(2,4)	安全性能与规范的规定有很大差距;项目存在着重大的缺陷与潜在风险;有重大的意外和不完全的处置;有可能会决堤
	C <sub>3</sub>	极严重病险	V 级	(0,2)	安全性能远达不到标准的规定;项目中的漏洞和潜在风险非常大;曾经出了很大的意外,但没有得到妥善的解决;很大的可能性会出现溃坝

### 3.2 指标权重确定

通过对本领域内若干名专家调查,最终确定指标相对重要性,完成定性指标状态评估值确定,最终通过指数标度 AHP 法得到主观权重向量,选取 5 座

有完整鉴定报告水库(表 2)采用熵权法得到客观权重向量,最后利用博弈论模型进行组合赋权计算,计算结果如表 3 所示。

表 2 水库鉴定结果

水库	基本信息	工程质量	防洪安全	渗流安全	结构安全	金属结构	运行管理	抗震安全	类别
1	小(1)型水库	不合格	C	C	C	C	差	C	三类
2	小(2)型水库	不合格	C	C	C	C	差	C	三类
3	中型水库	合格	C	C	A	B	较规范	A	三类
4	中型水库	不合格	C	A	C	C	不规范	A	三类
5	中型水库	基本合格	A	A	B	C	较规范	B	二类

表 3 指标权重计算结果

一级评价指标	二级评价指标	AHP 法权重	熵权法权重	综合权重	
				$w_{ij}$	$w_i$
工程质量 $C_1$	压实情况 $C_{11}$	0.0511	0.0337	0.0405	0.1135
	坝基与岸坡 $C_{12}$	0.0343	0.0938	0.0706	
	混凝土强度 $C_{13}$	0.0281	0.1324	0.0918	
运行质量 $C_2$	运行管理 $C_{21}$	0.0883	0.0505	0.0652	0.0883
防洪安全 $C_3$	抗洪能力 $C_{31}$	0.0834	0.0938	0.0898	0.2128
	泄洪能力 $C_{32}$	0.0834	0.0315	0.0517	
	下游冲刷 $C_{33}$	0.0460	0.0648	0.0575	
	防渗排水设施 $C_{41}$	0.0583	0.0471	0.0515	
渗流安全 $C_4$	渗透坡降 $C_{42}$	0.0583	0.0313	0.0418	0.1558
	异常渗流 $C_{43}$	0.0391	0.0535	0.0479	
	坝体抗滑稳定 $C_{51}$	0.0660	0.0312	0.0447	
结构安全 $C_5$	大坝变形 $C_{52}$	0.0577	0.0396	0.0466	0.1742
	闸基抗滑稳定 $C_{53}$	0.0505	0.0859	0.0721	
	闸门结构 $C_{61}$	0.0958	0.0723	0.0814	
金属结构 $C_6$	启闭设施 $C_{62}$	0.0784	0.0859	0.0830	0.1742
抗震安全 $C_7$	抗震稳定性 $C_{71}$	0.0811	0.0526	0.0637	0.0811

### 3.3 可拓评价

以水库 1 结构安全评价为例构建待评物元、经典域、节域。

(1) 待评物元

$$R_{P1} = \begin{bmatrix} \text{水库 } P_1 - C_5 & C_{51} & 8 \\ & C_{52} & 7 \\ & C_{53} & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 构建经典域

$$R_1 = \begin{bmatrix} P_1 & C_{51-1} & [0,2) \\ & C_{51-2} & [2,4) \\ & C_{51-3} & [4,6) \\ & C_{51-4} & [6,8) \\ & C_{51-5} & [8,10) \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} P_2 & C_{52-1} & [0,2) \\ & C_{52-2} & [2,4) \\ & C_{52-3} & [4,6) \\ & C_{52-4} & [6,8) \\ & C_{52-5} & [8,10) \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} P_3 & C_{53-1} & [0,2) \\ & C_{53-2} & [2,4) \\ & C_{53-3} & [4,6) \\ & C_{53-4} & [6,8) \\ & C_{53-5} & [8,10) \end{bmatrix}$$

(3) 构建节域

$$R_P = \begin{bmatrix} N_P & C_{51} & [0,10) \\ & C_{51} & [0,10) \\ & C_{53} & [0,10) \end{bmatrix}$$

(4) 关联度计算

根据所构建的经典域、节域及待评指标进行单指标关联度、一级指标关联度及综合关联度计算,求得水库 1 的关联度如表 4 所示。

表 4 水库 1 病险程度等级关联度

关联度	水库 1					等级
	V 级 极严重 病险	IV 级 严重 病险	III 级 较重大 病险	II 级 一般性 病险	I 级 无病险	
$C_{11}$	-0.5000	-0.3333	0.0000	0.0000	-0.3333	III 级
$C_{12}$	-0.2500	0.5000	-0.2500	-0.5000	-0.6250	IV 级
$C_{13}$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$C_{21}$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$C_{31}$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$C_{32}$	-0.7500	-0.6667	-0.5000	0.0000	0.0000	II 级
$C_{33}$	0.0000	0.0000	-0.5000	-0.6667	-0.7500	V 级
$C_{41}$	-0.2500	0.5000	-0.2500	-0.5000	-0.6250	IV 级
$C_{42}$	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	0.0000	I 级
$C_{43}$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$C_{51}$	-0.7500	-0.6667	-0.5000	0.0000	0.0000	II 级
$C_{52}$	-0.6250	-0.5000	-0.2500	0.5000	-0.2500	II 级
$C_{53}$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$C_{61}$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$C_{62}$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$C_{71}$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$B_1$	0.0395	-0.1186	-0.4264	-0.5511	-0.6799	V 级
$B_2$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$B_3$	0.0307	-0.3988	-0.6128	-0.5686	-0.6115	V 级
$B_4$	-0.2176	-0.2835	-0.6418	-0.7612	-0.5247	V 级
$B_5$	-0.1630	-0.5456	-0.5390	-0.2250	-0.4573	V 级
$B_6$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
$B_7$	0.5000	-0.5000	-0.7500	-0.8333	-0.8750	V 级
综合 关联度	0.1034	-0.3793	-0.6071	-0.6136	-0.6651	V 级

根据单指标关联度可以清晰看出评价指标隶属等级,根据一级指标的关联度可以看到,水库 1 的工程质量、运行质量、防洪安全、渗流安全、结构安全、金属结构、抗震安全均属于 V 级,属于极严重病险,与表 2 中水库的单项鉴定报告结论一致。对于整个水库 1 来说病险程度属于极严重病险,即为三类坝,与安全鉴定结论一致。

汇总五座水库病险程度等级及等级特征值见表 5。

表 5 总体病险等级比较

水库	水库 1	水库 2	水库 3	水库 4	水库 5
病险程度	V 级	V 级	III 级	IV 级	II 级
等级特征值	1.4780	1.9151	5.5924	3.3393	7.7925

将表 5 与表 2 进行对照分析,可以看出土石坝的病险程度等级判断与安全鉴定结果一致,且对于同为三类坝的水库 1、水库 2、水库 3、水库 4 可以进

一步区分病险严重程度,为除险加固的排序决策提供参考。通过分析不同水库的等级特征值可以直观的观察出对于相邻病险等级的偏向程度,对于水库 3 来说,鉴于其分项报告中结构安全、金属结构安全、抗震安全、运行管理状况良好,可见其等级特征值也偏向于一般性病险,符合实际情况;而对于水库 5,虽然为二类坝,但是水库仍旧存在部分隐患,专家对于水库 5 金属结构鉴定意见为“闸门轨道、钢丝绳等均存在锈蚀现象,但尚不严重影响工程安全运行”,因此水库 5 的等级特征值偏向于无病险是合理的。综上可见物元评价采用等级特征值可以清晰直观的判断水库评价状态对于相邻两个等级的偏向程度,可以为水库的针对性修缮或改造提供决策支持。

## 4 结 论

本文基于组合赋权和可拓理论,建立了一个综合考虑层次分析概念和模糊随机性的土石坝病险程度等级判定模型,并应用于 5 座水库土石坝的病险等级判定,主要结论如下。

(1) 根据水库大坝安全评价导则,建立土石坝病险等级判定指标体系,采用指数标度 AHP 法确定主观权重,采用熵权法确定客观权重,并运用博弈论建立组合赋权模型,优化指标权重,这种新的组合赋权有利于科学评判指标信息。

(2) 采用可拓评价隶属度可以直观清晰地判定土石坝病险等级,同时计算所得的等级特征值可以清晰判断病险程度对相邻两个等级的偏向性。

(3) 文章通过对 5 座水库的工程应用,验证了基于组合赋权和可拓模型在土石坝病险诊断中的科学合理性和可靠性,基于工程应用可以看出,部分指标的主、客观权重值差别较大,组合赋权明显地对主、客观权重进行了一种均衡,所得综合权重在能够采用专家经验的同时避免完全依赖专家经验而产生的指标主观性和随意性,且避免了指标无差异性问题的统一的问题,更符合实际工程需求且计算结果更加合理可靠,合理的权重也为模型的有效评价奠定了基础。而可拓理论等级特征值能够反映出样本病险严重程度等级对最临近的两个严重程度等级的偏向水平和不同样本之间严重程度大小。故采用组合赋权和可拓理论的评价模型为病险程度等级判定和病险排序提供一种新思路。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2019 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [2] 水库大坝安全评价导则:SL 258—2017[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.
- [3] Li Mingchao, Si Wen, Ren Qiubing, et al. An integrated method for evaluating and predicting long-term operation safety of concrete dams considering lag effect[J]. Engineering With Computers, 2021,37(4):2505-2519.
- [4] Mata J. Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models[J]. Engineering Structures, 2011,33(3):903-910.
- [5] Yu Yang, Liu Xiaoli, Wang Enzhi, et al. Dam safety evaluation based on multiple linea regression and numerical simulation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018,51(8):2451-2467.
- [6] 郑小武,刘立. 基于集对分析的土石坝安全风险评价[J]. 人民黄河,2013,35(11):93-95.
- [7] 黄海鹏. 土石坝服役风险及安全评估方法研究[D]. 南昌:南昌大学,2015.
- [8] 李文光. 密云水库斜心墙土石坝浸润线监测及模拟分析[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- [9] 宗克强. 土石坝施工期安全风险-成本风险综合评价[D]. 郑州:郑州大学,2019.
- [10] 杜修娟. 土石坝安全风险评价方法及其应用研究[D]. 成都:西华大学,2017.
- [11] 罗日洪,黄锦林,叶合欣. 基于组合赋权-模糊理论的土石坝安全风险综合评价[J]. 水利规划与设计, 2021(5):78-83.
- [12] 杨海平. 基于 AHP-熵组合赋权的土石坝安全模糊评价[J]. 人民黄河,2013,35(6):116-118.
- [13] 王亮,尹志刚,丛培江,等. 基于组合赋权-云模型的中小型土石坝安全评价[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(4):91-97,119.
- [14] 张瑜潇. 基于 POT 和改进 D-S 证据理论的土石坝健康诊断方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- [15] 汪伦焰,袁杰,李娜,等. 基于物元可拓模型的水生态文明城市建设评价——以许昌市为例[J]. 人民长江,2016,47(18):18-21.
- [16] 梁文娟,朱记伟,张永进,等. 基于 AHP-物元可拓法的小型水库运行管理标准化评价[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):208-214.
- [17] 陈南祥,汤泽. 基于物元可拓法对郑州市地表水水质评价[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(2):42-45.
- [18] 商卫东,杨占强,孙立平. 基于改进层次分析法和可拓学理论对泥石流危险度的分析[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(6):100-102.
- [19] 水利部大坝安全管理中心. 全国水库垮坝登记册[R]. 南京:水利部大坝安全管理中心,2018.
- [20] 刘璇. 在役土石坝安全性态隶属度判诊分析研究[D]. 南昌:南昌大学,2016.
- [21] 骆正清,杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践,2004,24(9):51-60.
- [22] Mousa Jabbari, Reza Gholamnia, Reza Esmaeili, et al. Risk assessment of fire, explosion and release of toxic gas of Siri-Assalouyeh sour gas pipeline using fuzzy analytical hierarchy process[J]. Heliyon, 2021,7(8):e07835.
- [23] 门业堃,钱梦迪,于钊,等. 基于博弈论组合赋权的电力设备供应商模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(21):179-186.
- [24] 虞未江,贾超,狄胜同,等. 基于综合权重和改进物元可拓评价模型的地下水水质评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2019,49(2):539-547.
- [25] 黄辉玲,罗文斌,吴次芳,等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报,2010,26(3):316-322.
- [26] 禹洪波,刘永波,黄滔滔,等. 基于可拓云模型与模糊贴近度的电能质量评估研究[J]. 智慧电力,2022,50(10):23-29,52.
- [27] 虞未江,贾超,狄胜同,等. 基于综合权重和改进物元可拓评价模型的地下水水质评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2019,49(2):539-547.
- [28] 张国栋,李雷,彭雪辉. 基于大坝安全鉴定和专家经验的病险程度评价技术[J]. 中国安全科学学报,2008(9):158-166.
- [29] 王凯,邹斌,杨丽虹,等. 幸福水库大坝渗流安全分析及评价[J]. 人民珠江,2019,40(10):110-115.
- [30] 何亚辉,赵明阶,汪魁,等. 基于云模型的土石坝渗流安全风险模糊综合评价[J]. 水电能源科学,2018,36(3):83-86.