

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.04.003

基于可拓云模型的中小型水库溃坝后果评价

丛培江¹, 郝刚², 李炎春¹, 王亮¹, 张博¹

(1. 长春工程学院 水利与环境工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 吉林省珲春老龙口供水有限责任公司, 吉林 珲春 133000)

摘要: 水库溃坝会对人民生命财产安全和周边环境造成严重威胁。当前水库溃坝后果评价具有模糊性、随机性, 溃坝后果评价的方法主观性强, 不能较好反映评价目标的真实情况。基于此将云模型的不确定性推理与可拓物元理论的定性定量分析的优点相融合, 构建基于可拓云的溃坝后果综合评价模型。将溃坝后果1级评价指标4个(人员伤亡、经济损失、生态环境影响和社会影响)2级指标22个作为溃坝后果评价的指标体系, 划分5个安全等级(轻微、一般、较严重、严重和极其严重), 构建模型进行指标隶属度计算。结果表明: 该溃坝后果综合评价模型可以直观、清晰地得出评价指标对应的安全等级, 更准确地判断水库溃坝后果的严重程度。工程实例计算也验证了该方法的有效性和适用性。

关键词: 中小型水库; 可拓物元模型; 云模型; 溃坝后果; 评价

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0017-05

Dam Failure Consequences Evaluation of Small and Medium-sized Reservoirs Based on Extendable Cloud Model

CONG Peijiang¹, HAO Gang², LI Yanchun¹, WANG Liang¹, ZHANG Bo¹

(1. Water and environmental engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012, China;

2. Jilin Hunchun Laolongkou Water Supply Co., Ltd., Hunchun, Jilin 133000, China)

Abstract: The occurrence of dam failures in small and medium-sized reservoirs in our country caused by excessive floods for heavy rain was frequent, which will cause a serious threat to the people's lives and property and the surrounding environment. The evaluation of dam failure consequences has characteristics such as fuzziness and randomness. The main methods of dam failure assessment was highly subjective, which cannot reflect the comprehensive level of evaluation objectives. Therefore, the advantages of the uncertainty inference of the cloud model with the qualitative and quantitative analysis of the extensible matter-element theory were combined to construct a comprehensive evaluation model for the consequences of dam failure in this paper. The effectiveness and applicability for the extendable cloud model were tested through engineering example, which will provide reference for scientific evaluation of the severity of dam failure consequences.

Keywords: small and medium-sized reservoirs; matter-element extension model; cloud model; consequence of dam failure; evaluation

我国95%以上为中小型水库大坝, 大部分建设于20世纪50—70年代^[1-2]。1954年—2018年, 我国共溃坝3541座, 中小型水库溃坝3409座。近年来, 相关学者对大坝溃坝损失评估开展了大量研究,

如: Wang等^[3]建立了基于模糊层次法的溃坝后果综合评价模型; 魏海霞等^[4]实现了模糊层次分析法在建筑结构安全评价中的应用; Zheng等^[5]提出了一种基于熵理论和模糊物元法的风险后果综合评价

收稿日期: 2024-02-20

修稿日期: 2024-03-20

基金项目: 吉林省科技厅项目“基于数字孪生的中小型土石坝安全监测与健康诊断技术研究”(20230203024SF); 吉林省应急厅项目“寒区中小型土石坝安全运行与应急管理系统研究建设项目”(120200094)

作者简介: 丛培江(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工结构与大坝安全监测等方面工作。E-mail: congpeijiang@126.com

模型;李宗坤等^[6]构建了基于变权集对-可拓耦合的综合评价模型;王志军等^[7-8]将物元评价法引入到溃坝淹没区的划分中;何冠洁等^[9]建立了溃坝后果评价的灰色系统-可变模糊集耦合模型;孙玮玮等^[10]对 5 种评价模型计算特性和结果进行了比较分析,得出推荐物元综合评价模型的结论。

当前溃坝后果评价的主要方法有模糊综合评价法、灰色关联法、物元可拓法、云模型法等。模糊综合评价法、灰色关联法主观性较强,难以确定最优值。在国内众多学者的研究中,物元可拓理论^[11]能够较好反映评价目标的综合水平,但不能充分考虑评价目标的模糊性和随机性,而云模型法^[12]能充分处理随机性和模糊性等问题。因此本文采用可拓云理论来构建溃坝后果综合评价模型,并将模型应用于实际工程验证其有效性,为溃坝后果评价研究提供参考。

1 可拓物元评价模型

可拓学将事物本身、事物特征以及数量值看作一个整体来考虑,用物元变换来体现事物的变化情况。矛盾问题大致可分为主客观矛盾问题、主观矛盾问题、客观矛盾三类,模型构建及评价步骤如下:

(1) 确定待评物元

明确物元三要素:事物名称(N)、特征(C)及特征量值(V)。三元组记作 $R = YN, C, VY$, 即事物 N 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。确定待评物元矩阵为:

$$R_i = \begin{bmatrix} N_i & C_{i1} & V_{i1} \\ & C_{i2} & V_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{in} & V_{in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N_i 为评价对象; C_{ik} 为溃坝后果评价指标; V_{ik} 为评价指标的量值。

(2) 构建评价指标经典域

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

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

(3) 建立评价指标的节域物元

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C_{p1} & V_{p1} \\ & C_{p2} & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{pn} & V_{pn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_p & C_{p1} & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_{p2} & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{pn} & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: a_{pn}, b_{pn} 为评价指标的取值范围。

(4) 确定关联度

可拓距和位值用于描述点与区间、区间与区间之间的位值关系,确定待评对象的单指标关联度^[13]。

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

$$\rho(v_{ij}, V_i) = \left| v_{ij} - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2} \quad (4)$$

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

$$\rho(v_{ij}, V_p) = \left| v_{ij} - \frac{a_{pj} + b_{pj}}{2} \right| - \frac{b_{pj} - a_{pj}}{2} \quad (5)$$

单指标关联函数计算公式为:

$$k_v(N_{ij}) = \begin{cases} \frac{\rho(v_{ij}, V_v)}{\rho(v_{ij}, V_p) - \rho(v_{ij}, V_i)} & \rho(v_{ij}, V_p) \neq \rho(v_{ij}, V_i) \\ -\rho(v_{ij}, V_v) - 1 & \rho(v_{ij}, V_p) = \rho(v_{ij}, V_i) \end{cases} \quad (6)$$

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) 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:

$$K_v(N_i) = \sum_{i=1}^n \omega_i k_v(N_i) \quad (7)$$

式中: $K_v(N_i)$ 为 N_i 关于等级 v 的综合关联度; $k_v(N_i)$ 为单指标关联度; ω_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 N_i 的综合评价等级为第 v 级。

$$\overline{K}_v(N_i) = \frac{K_v(N_i) - \min K_v(N_i)}{\max K_v(N_i) - \min K_v(N_i)} \quad (8)$$

计算待评对象的等级变量特征值见下式:

$$i^* = \frac{\sum_{v=1}^5 i \times \overline{K}_v(N_i)}{\sum_{v=1}^5 \overline{K}_v(N_i)} \quad (9)$$

式中: i 为评价等级阈值; i^* 为评价对象的等级变量特征值。

2 云评价模型

云模型主要利用 Ex (期望)表述研究事物某一性概念量化问题,由熵随机性与模糊性综合作用

而确定。模型构建及评价步骤如下:

(1) 计算标准云特征值,绘制标准云图

计算评价指标在不同等级下的云特征参数记作标准云特征参数 Ex 、 En 、 He ,公式为:

$$\begin{cases} Ex_{ij} = \frac{a_{ij}^1 + a_{ij}^2}{2} \\ En_{ij} = \frac{a_{ij}^1 - a_{ij}^2}{6} \\ He_{ij} = k \end{cases} \quad (10)$$

式中: a_{ij}^1 、 a_{ij}^2 分别为评价指标等级标准的上下限; k 为常数,以评价指标实际情况或者不确定程度为准。

(2) 评价指标等级云隶属度计算

根据研究对象评价指标原始数据及标准云特征值,计算评价指标等级隶属度,并绘制指标隶属等级云图,实现过程如图 1 所示。

(3) 准则层及目标层隶属度的计算并确定评价等级

分别计算准则层及目标层的等级隶属度,计算公式如下:

$$D_i = \sum_{j=1}^n \omega_j u(x_{ij}) \quad (11)$$

根据对准则层和目标层计算所得等级隶属度,取最大隶属度为溃坝后果严重程度等级 V 。

$$V = \max_{i=1,2,3,4,5} D_i \quad (12)$$

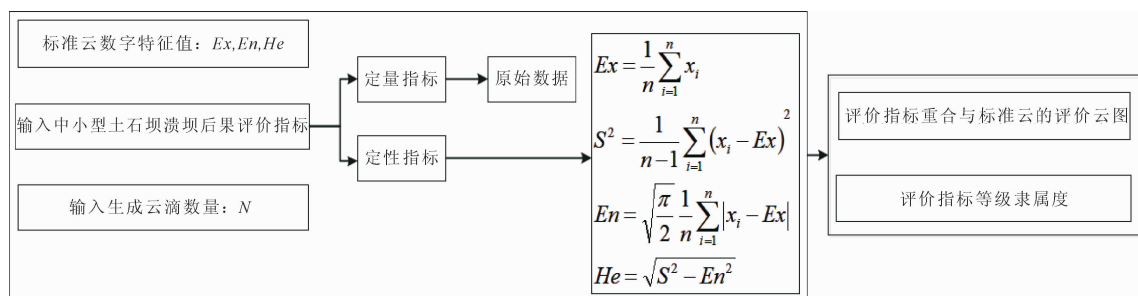


图 1 评价指标云隶属度计算流程

3 可拓云评价模型

考虑到物元评价模型虽能够较好反映评价目标的综合水平,但不能充分考虑评价目标的模糊性和随机性,因此,本文将物元评价与云模型结合,旨在减小模型随机性,提高评价结果精度。

可拓云评价模型构建及评价步骤如下:

(1) 评价指标权重计算及云模型标准云数字特征值的转换

将中小型土水库溃坝后果综合评价严重程度等级划分为 I—V 级,即轻微、一般、较重大、严重、极其严重 5 个等级,可拓云模型需要将评价指标等级所构建的可拓学经典域和云模型标准云参数进行转换,利用式 (10) 计算标准云数字特征值。

(2) 确定可拓云模型评价指标隶属函数

$$\mu_x = \exp\left(-\frac{(x - Ex)^2}{2En^2}\right) \quad (13)$$

(3) 基于可拓云模型的溃坝后果严重程度确定

(a) 确定一级评价指标的隶属

$$\mu_v(R_i) = \sum_{p=1}^m \omega_{ip} \mu_v(C_{ip}) \quad (14)$$

式中: $\mu_v(R_i)$ 为第 i 个一级指标对应的后果严重等级的隶属度; ω_{ip} 为第 i 个一级指标对应的第 p 个二

级指标的权重值; $\mu_v(C_{ip})$ 为第 i 个一级指标对应的第 p 个二级指标关于等级 v 的隶属度。

(b) 确定目标层的隶属

$$\mu_v(R) = \sum_{i=1}^4 \omega_i \mu_v(R_i) \quad (15)$$

式中: $\mu_v(R)$ 为 v 对应的总隶属度; ω_i 为第 i 个一级指标的权重值。

(c) 判定溃坝后果严重程度并计算目标层等级特征值

$$\mu_v(R) = \max \mu_v(R) \quad v \in (I \text{ 级} - V \text{ 级}) \quad (16)$$

4 工程实例

4.1 工程概况

某水库建于 1973 年,由土坝、泄洪灌溉洞、右岸非常溢洪道等组成。水库为中型水库,主要建筑物为 3 级,校核防洪标准为 1 000 年一遇,设计洪水标准为 50 年一遇,水库总库容为 1 573.87 万 m^3 ,坝址区地震基本烈度为 VII 度。2010 年大坝右坝肩发生水毁。按“黄委”水科院实际资料分析公式^[14] 计算溃坝段长度,按横向局部、溃坝冲刷到底计算溃坝处流量、水深、流速,并计算决口处水深、决口处最大流速、水库泄空时间等,最终确定该水库指标值。

4.2 确定云特征参数

由选取的评价指标及其分级标准,并根据式(10)可计算出云特征参数,以评价指标应急预案 C15 进行标准云特征参数计算为例,其余指标云特征参数计算结果见表 1。

评价指标应急预案 C15, I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级对应取值范围^[15]为 [0, 25)、[25, 45)、[45, 65)、[65, 85)、[85, 100], 计算标准云参数过程如下:

I 级:

$$E_x = \frac{25}{2} = 12.5 \quad E_n = \frac{25}{6} = 4.167$$

$$H_e = 0.1 \times 4.1667 = 0.417$$

则应急预案指标的标准云在属于 I 级时, 数字特征值为 (12.5, 4.167, 0.417)。

同理计算 II 级、III 级、IV 级、V 级所对应的标准云数字特征值。

表 1 指标标准云模型数字参数

指标	I 级(轻微)	II 级(一般)	III 级(较重大)	IV 级(严重)	V 级(极其严重)
C11	0.05, 0.017, 0.002	0.55, 0.15, 0.015	5.50, 1.50, 0.150	30, 6.667, 0.667	75, 8.333, 0.833
C12	0.25, 0.083, 0.008	2.55, 0.683, 0.068	8.3, 1.233, 0.123	13.5, 0.5, 0.05	57.5, 14.167, 1.417
C13, C15	12.5, 4.167, 0.417	35, 3.333, 0.333	55, 3.333, 0.333	75, 3.333, 0.333	92.5, 2.5, 0.25
C14	5.50, 1.500, 0.150	0.875, 0.042, 0.004	0.625, 0.042, 0.004	0.375, 0.042, 0.004	0.125, 0.042, 0.004
C21	0.25, 0.083, 0.008	0.75, 0.083, 0.008	1.75, 0.25, 0.025	3.125, 0.208, 0.021	14.375, 3.542, 0.354
C22	0.50, 0.1667, 0.017	1.5, 0.167, 0.017	3, 0.333, 0.033	5, 0.333, 0.033	10.5, 1.5, 0.15
C23	0.25, 0.083, 0.008	0.75, 0.083, 0.008	1.5, 0.167, 0.017	3.5, 0.5, 0.05	12.5, 2.5, 0.25
C24	0.50, 0.167, 0.017	5.50, 1.50, 0.150	30, 6.667, 0.667	75, 8.333, 0.833	150, 16.667, 1.667
C25—C26 C31—C34 C41—C44	12.5, 4.167, 0.417	35, 3.333, 0.333	55, 3.333, 0.333	75, 3.333, 0.333	92.5, 2.5, 0.25
C45	0.1, 0.033, 0.003	0.3, 0.033, 0.003	0.5, 0.033, 0.003	0.7, 0.033, 0.003	0.9, 0.033, 0.003
C46—C47	12.5, 4.167, 0.417	35, 3.333, 0.333	55, 3.333, 0.333	75, 3.333, 0.333	92.5, 2.5, 0.25

II 级: (35, 3.333, 0.333), III 级: (55, 3.333, 0.333), IV 级: (75, 3.333, 0.333), V 级: (92.5, 2.5, 0.25)。则应急预案指标的五等级标准云数字特征值为 (12.5, 4.167, 0.417)、(35, 3.333, 0.333)、(55, 3.333, 0.333)、(75, 3.333, 0.333)、(92.5, 2.5, 0.25) 分别对应指标分级轻微、一般、较重大、严重、极其严重, 绘图如下。

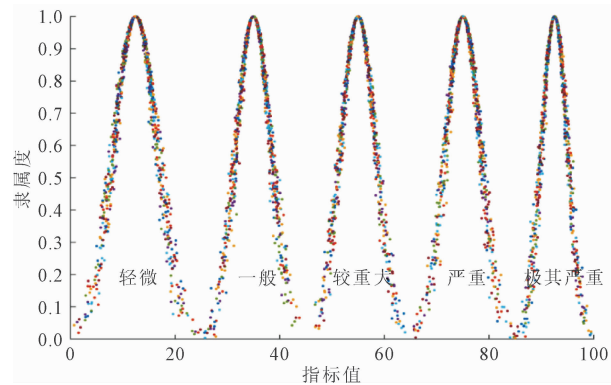


图 2 评价指标应急预案标准云图

4.3 溃坝后果综合评价

4.3.1 评价指标隶属度计算

基于 MATLAB 编程完成指标隶属度计算, 取最

大隶属度作为指标评价等级, 指标等级隶属度计算结果见表 2。

4.3.2 计算准则层评价指标隶属度及等级特征值

根据式(13)、式(14)、表 2 进行生命损失、经济损失、社会影响及生态环境影响四个一级指标的综合隶属度计算。溃坝生命损失隶属度计算如下:

$$\begin{aligned} \mu_r(R_i) &= \sum_{p=1}^5 \omega_{ip} \mu_r(C_{ip}) = [\mu_{\text{轻微}}(R_1), \mu_{\text{一般}}(R_1), \\ &\mu_{\text{较重大}}(R_1), \mu_{\text{严重}}(R_1), \mu_{\text{极其严重}}(R_1)] \\ &= [0.1127 \quad 0.1636 \quad 0.2506 \quad 0.3050 \quad 0.1681] \times \\ &\begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.1054 & 0.1054 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.2133 \\ 0.0000 & 0.0001 & 1.0000 & 0.0001 & 0.0000 \\ 0.0859 & 0.4454 & 0.0122 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.9139 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\ &= [0.1798 \quad 0.1359 \quad 0.2662 \quad 0.0119 \quad 0.0349] \end{aligned}$$

同理计算经济损失、社会影响及生态环境影响隶属度, 将计算结果列于表 3, 取最大隶属度对应等级为评价等级。

4.3.3 计算溃坝后果综合评价隶属度及等级特征值

完成一级指标关联度计算后, 进行溃坝后果综合评价等级隶属度计算, 根据式(15)计算该水库溃坝后果等级特征值。

表 2 溃坝后果评价二级指标隶属度

二级指标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	安全等级
C11	0.0000	0.0000	0.1054	0.1054	0.0000	IV 级
C12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2133	V 级
C13	0.0000	0.0001	1.0000	0.0001	0.0000	III 级
C14	0.0859	0.4454	0.0122	0.0000	0.0000	II 级
C15	0.9139	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	I 级
C21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3054	V 级
C22	0.2728	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	I 级
C23	0.0000	0.0000	0.0000	0.9763	0.0350	IV 级
C24	0.0000	0.0000	0.0001	0.9139	0.0032	IV 级
C25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0063	0.7788	V 级
C26	0.0000	0.0000	0.0063	0.5691	0.0000	IV 级
C31	0.0000	0.0000	0.1049	0.1049	0.0000	III 级
C32	0.0000	0.0000	0.2362	0.0389	0.0000	III 级
C33	0.0000	0.0000	0.0000	0.6663	0.5588	V 级
C34	0.0120	0.3691	0.0000	0.0000	0.0000	II 级
C41	0.0000	0.0000	0.1049	0.1049	0.0000	III 级
C42	0.0000	0.0000	0.5691	0.0063	0.0000	III 级
C43	0.0000	0.0000	0.1049	0.1049	0.0000	III 级
C44	0.0000	0.0000	0.5691	0.0063	0.0000	III 级
C45	0.0000	0.0063	0.5691	0.0000	0.0000	III 级
C46	0.0000	0.0000	0.1049	0.1049	0.0000	III 级
C47	0.0000	0.0000	0.0000	0.0063	0.7788	V 级

表 3 溃坝后果一级评价指标隶属度

一级指标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	安全等级	特征值
C1	0.1798	0.1359	0.2662	0.0119	0.0349	III 级	46.1268
C2	0.0525	0.0000	0.0008	0.3613	0.1839	IV 级	74.8680
C3	0.0036	0.1120	0.0974	0.1570	0.1056	IV 级	65.3272
C4	0.0000	0.0000	0.1789	0.0496	0.1424	III 级	62.7109

$$\mu_v(R) = \sum_{i=1}^4 \omega_i \mu_v(R_i) = [\mu_{\text{轻微}}(R), \mu_{\text{一般}}(R), \mu_{\text{较重大}}(R), \mu_{\text{严重}}(R), \mu_{\text{极其严重}}(R)]$$

$$= [0.4534 \quad 0.1663 \quad 0.1657 \quad 0.2626] \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.1359 & 0.1359 & 0.2662 & 0.0119 & 0.0349 \\ 0.0525 & 0.0000 & 0.0008 & 0.3613 & 0.1839 \\ 0.0036 & 0.1120 & 0.0974 & 0.1570 & 0.1056 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1789 & 0.0496 & 0.1424 \end{bmatrix}$$

$$= [0.0908 \quad 0.0802 \quad 0.1839 \quad 0.1045 \quad 0.1013]$$

将该水库溃坝综合评价等级隶属度及等级特征值计算结果列于表 4。

表 4 溃坝后果综合评价隶属度

目标层	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	安全等级	特征值
C	0.0908	0.0802	0.1839	0.1045	0.1013	III 级	60.1768

用最大隶属度进行溃坝后果严重程度等级的判定, 计算如下:

$$\mu_v(R) = \max \mu_v(R) \quad (v \in \text{轻微, 一般, 较重大, 严重, 极其严重})$$

$$= \max(0.0908, 0.0802, 0.1839, 0.1045, 0.1013)$$

$$= 0.1839$$

依据溃坝后果严重程度判定准则得出, 基于可拓云评价的该水库的溃坝后果严重程度等级为 III 级, 属于较重大事故, 根据其等级特征值可判断, 该水库溃坝严重程度介于 II 级和 IV 级之间, 但是严重程度偏向 IV 级。

5 结 论

本文基于可拓物元和云模型理论建立了溃坝后果综合评价模型, 并对某水库进行实例应用, 主要结论如下:

- (1) 根据水库大坝安全评价导则, 以溃坝后果对人民生命财产造成的损失和对社会产生的影响为出发点, 将溃坝生命损失、经济损失、生态环境影响以及社会影响作为准则层指标, 在每个准则层指标下确定若干二级指标共计 22 个, 构建溃坝后果综合评价指标体系。

- 1269.
- [16] Bian Xia, Peng Weiheng, Qiu Chengchun, et al. Model test on bearing capacity of cemented slurry reinforced pile composite foundation[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02482.
- [17] 赵利平, 龙骁鹏, 黄筱云. 水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 30-36, 70.
- [18] 郑刚, 夏博洋, 周海祚, 等. 桩体模量对水泥土搅拌桩复合地基破坏影响研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 146-154.
- [19] 李喜安, 王继华, 宋焱勋, 等. 水泥土搅拌桩复合地基静载试验有限元数值模拟[C]//第九届全国工程地质大会论文集, 2012: 838-841.
- [20] 李玉根, 郅彬, 赵高文, 等. CFG桩处理风积砂土地基承载性状研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(1): 43-48.
- [21] 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[J]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [22] 肖国丰, 马思琪, 刘洋, 等. 基于ABAQUS生死单元技术的平衡地应力方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(4): 47-52.
- [23] 肖耀廷, 党发宁. 复合地基褥垫层厚度的设计方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1331-1335.
- [24] 陈明, 李镜培, 梁发云, 等. 刚性桩复合地基负摩阻区深度的一种计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 955-959.

(上接第21页)

(2) 通过可拓云模型, 计算各评价指标隶属度及等级特征值, 可以更直观、准确的得出指标对应的安全等级, 清晰的判断指标的等级特征值对应的严重程度等级。通过对某水库的工程应用, 进一步验证了该方法针对中小型水库溃坝后果评价的有效性和适用性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 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.
- [3] Wang X L, Zhou Z Y, Sun R R, et al. Fuzzy hierarchy comprehensive evaluation on dam break risk analysis[J]. Advanced Materials Research, 2011, 383-390: 2151-2155.
- [4] 魏海霞, 赵明, 祝杰. 基于模糊层次分析法的建筑结构安全评价体系研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 181-186, 198.
- [5] Zheng H Y, Sheng J B, Peng X H, et al. Earth-rock dam risk consequence's comprehensive evaluation under drought condition [J]. Advanced Materials Research, 2012, 518-523: 4022-4025.
- [6] 李宗坤, 莫向明, 葛巍, 等. 基于变权集对-可拓耦合模型的溃坝后果综合评价[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(5): 64-71.
- [7] 王志军, 顾冲时, 张治军. GIS支持下基于遗传优化神经网络的溃坝生命损失评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(1): 64-68.
- [8] 王志军, 宋文婷, 马小童. 溃坝经济损失评估方法研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 30-34.
- [9] 何冠洁, 柴军瑞, 覃源, 等. 基于灰色系统-可变模糊集耦合模型的溃坝后果评价[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 164-171.
- [10] 孙玮玮, 彭雪辉, 龙智飞, 等. 溃坝后果综合评价模型特性分析及适用性研究[J]. 水力发电, 2022, 48(1): 70-76.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 齐向坤. 基于物元可拓学的建筑业企业负担评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [14] 水电工程溃坝洪水与非恒定流计算规范: NB/T 10805—2021[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [15] 李巍. 基于云模型及改进可变模糊集中的中国溃坝风险后果评价[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.