

•水利与土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202300837



本刊网刊

## 基于权重优化-云模型的土石坝运行安全综合评价

张建伟<sup>1</sup>, 毋伟涛<sup>1</sup>, 侯 鸽<sup>1\*</sup>, 黄锦林<sup>2</sup>, 王兵鹏<sup>1</sup>, 刘洪泽<sup>1</sup>, 呼梓旭<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635)

**摘要:**针对土石坝运行安全综合评价中评价指标之间存在相关性及人为设定的权重恒定不变的问题,通过决策实验室法分析指标内部联系,联合变权理论依据指标状态值对指标权重进行修正,得到一种考虑指标相关性及指标状态值的优化权重。并探究常权重与优化权重对各评价指标的权重和评价结果的影响,识别影响土石坝运行安全综合评价的关键指标。结合云模型能有效处理监测信息和评价过程中存在的不确定问题的优点,构建权重优化-云模型的土石坝运行安全综合评价模型。以和龙水库的土石坝为研究对象,对其进行运行安全综合评价,结果表明:评价云生成的云滴大部分落在“安全”与“基本安全”之间;结合云相似度计算结果,和龙水库与“安全”和“基本安全”的相似度分别为 32.5% 和 16.3%,由最大相似度原则确定评价结果为“安全”。与常权重相比,两者的评价结果一致,但对“安全”的隶属度从 40.7% 降低到了 32.5%,体现出指标相关性及指标状态值对评价结果的影响。评价结果与和龙水库现状吻合,印证本文模型的准确性和可行性,且该方法考虑了指标相关性及实测指标对权重的影响,并结合云模型从定量和定性两个角度评估土石坝的运行状态,能够更加真实有效地反映大坝的安全状况,可为大坝运行安全综合评价提供参考。

**关键词:**土石坝;综合评价;决策实验室;层次分析;变权理论;云模型

中图分类号:TV641.2

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)04-0165-11

截止 2020 年,中国已修建各类水库  $9.8 \times 10^4$  余座;自 1954 年有溃坝记录以来,中国共溃坝 3 558 座,其中绝大多数发生于 20 世纪 80 年代以前<sup>[1]</sup>。为防止此类事故的发生,需要依据大坝实际监测资料及理论分析手段,实现坝体结构运行安全评价。

传统的大坝安全评价方法有模糊综合评价法<sup>[2-3]</sup>、理想点法<sup>[4]</sup>、D-S 证据理论<sup>[5-6]</sup>和物元可拓模型<sup>[7-8]</sup>等,这些理论方法因能有效地对大坝进行评价而被广泛使用,但均因无法充分考虑大坝评价中的不确定性而具有一定的局限。李德毅等<sup>[9]</sup>提出的云模型能够描述变量的不确定性,目前已有众多学者将其运用到大坝评价中;何金平等<sup>[10]</sup>针对大坝健康诊断中普遍存在的不确定性问题,提出了基于云滴的改进云合并算法;Wang 等<sup>[11]</sup>将模糊神经网络和云模型相结合,实现了大坝的压实质量评价;姜振翔等<sup>[12]</sup>针对目前大坝评价过于主观的问题,提出采用多测点融合残差表征大坝整体性态,并结合信息熵和云理论生成不同性态的概念

云以识别异常测值;傅鹤林等<sup>[13]</sup>对云模型进行改进,对隧洞的健康状态进行诊断,极大提高了诊断结果的可视化和鲁棒性。上述研究表明,云模型在应对综合评价中的不确定性问题上具有一定的优势,能够准确合理地对大坝进行评价。在确定指标权重方面,Fu<sup>[14]</sup>和 Hao<sup>[15]</sup>等采用不同的组合赋权方式对大坝安全评价的指标权重进行了研究,提高了评价结果的准确性;李宗坤等<sup>[16]</sup>针对传统的指标权重固定不变和评价过程中存在的不相容问题,引入变权理论对指标权重进行修正,结合集对分析和可拓理论解决评价中的不确定性和不相容性问题;Chen 等<sup>[17]</sup>将区间数理论应用到专家评价和改进的层次分析法中,印证了基于区间数理论的综合评价方法的适用性;王雷等<sup>[18]</sup>针对传统证据理论未考虑冲突信息来源使得评价结果失真的情况,提出融合权重优化与冲突信息来源的大坝安全综合评价方法。总体来看,上述研究极大推动了大坝安全评价的发展,但其大多是针对重力坝和拱坝,对于土石坝综合评

收稿日期:2023-10-23 修回日期:2024-03-09 网络出版日期:2024-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52279133);内蒙古自治区水利科技项目(NSK202401);广东省水利科技创新项目(2024-07;2025-17)

作者简介:张建伟(1979—),男,教授,博士。研究方向:水利水电工程。E-mail:zjwcivil@126.com

\*通信作者:侯 鸽,讲师,E-mail:ncwuhg@126.com

价及评价指标间的相关性对评价结果造成的影响却鲜有研究。

鉴于这一问题,引入决策实验室法(decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)分析指标间的相关性,将其与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和变权理论(variable weight theory, VWT)相结合,提出一种AHP-DEMATEL-VWT(ADV)的指标权重计算方法;针对大坝评价中存在的 uncertainty 问题,通过云模型(cloud model, CM)建立了一种ADV-CM的综合评价模型,对土石坝的运行安全进行综合评价。依托和龙水库,实现水库大坝运行安全综合评

价,验证模型的有效性和合理性。

### 1 土石坝运行安全综合评价指标体系建立

随着土石坝服役年限的增加,水文序列的延长及大坝内部结构老化,大坝的安全状态也随之变化。为保证大坝的安全运行,参考相关文献和规范[19-23],结合土石坝的工作特点和对土石坝失事原因的统计[1],从影响大坝安全的因素中选取具有代表性的指标构建土石坝运行安全评价指标体系,并将土石坝的安全等级分为5级,如图1所示。

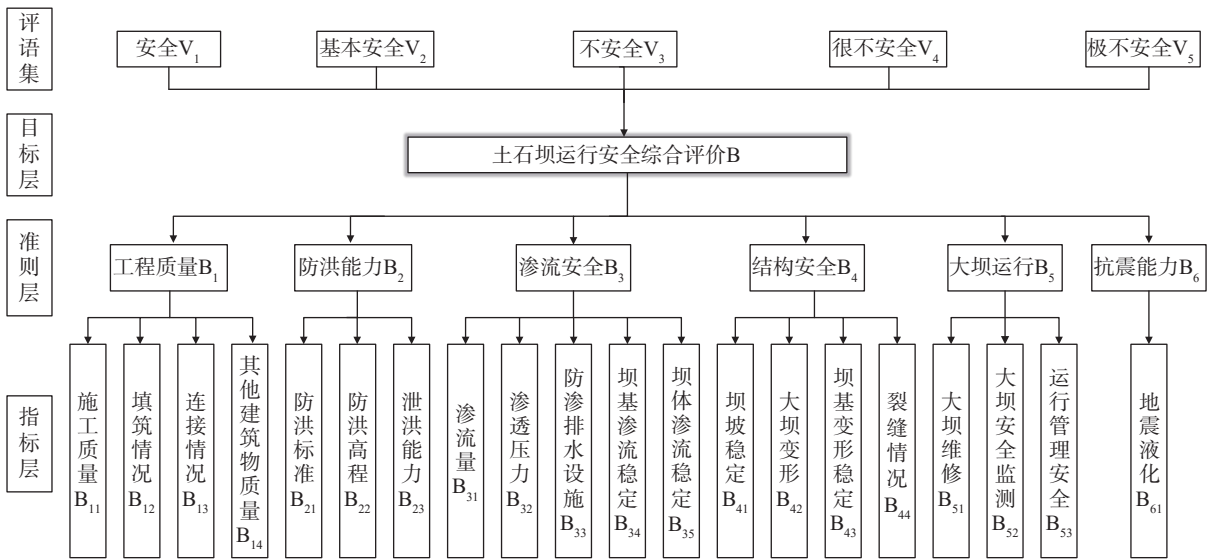


图1 土石坝运行安全评价体系

Fig. 1 Earth-rock dam operation safety evaluation system

## 2 运行安全综合评价方法

### 2.1 传统的AHP-DEMATEL模型

层次分析法(AHP)是一种将决策问题分解为多准则多指标,通过对指标的模糊量化计算层次单排序和总排序的方法。该方法通过决策者构造的判断矩阵来获取权重,具体计算过程如图2所示。

图2中, $\lambda_{max}$ 和 $\alpha$ 为判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量, $n$ 为评价指标个数。为了衡量判断矩阵偏离完全一致性的程度,计算一致性指标 $C_1$ 和一致性比例 $C_R$ ;当判断矩阵完全符合一致性时, $C_1=0$ ;  $R_1$ 为随机一致性比例,用以判断一致性是否可接受,当 $C_R \leq 0.1$ 时,认为矩阵满足一致性要求,进而将 $\alpha$ 归一化后获取第 $i$ 个指标的权重 $w_i$ 。

AHP作为一种经典的赋权方法,该方法能充分利用专家经验计算指标之间的相对重要性,但因未能考虑指标间的交叉关系而具有一定局限性。李四光[24]和薛彦卓[25]等通过挖掘系统中要素的依存关系,筛选出系统中的核心要素,进而计算指标权重。具体步骤如下。

1)建立直接影响矩阵 $M = [m_{ij}]$ 。其中, $m_{ij}$ 为 $M$ 中第 $i$ 个要素与第 $j$ 个要素相比较时前者对后者的影响程度。本文采用常用的5级标度法,具体语言变量与量化数字之间的关系如表1所示。

2)根据 $M$ 中行和的最大值 $\lambda$ 计算规范化的直接影响矩阵 $N$ 。

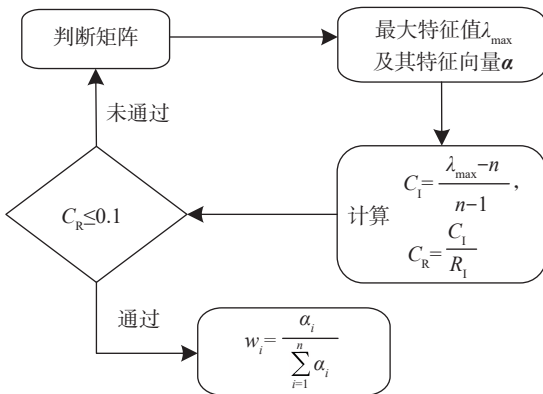


图2 AHP权重计算流程

Fig. 2 AHP weight calculation flowchart

表1 5级标度法  
Tab.1 Level 5 scale

影响程度	无影响	影响较弱	影响中等	影响较强	影响极强
$m_{ij}$	0	1	2	3	4

$$\lambda = \max_j \left( \sum_{i=1}^n m_{ij} \right) \quad (1)$$

$$N = M/\lambda \quad (2)$$

3)通过将直接影响矩阵  $N$  进行  $n$  次自乘来反映元素之间产生的  $n$  阶间接影响,所有的间接影响之和即为体现元素综合影响的综合影响矩阵  $T$ 。

$$T = \sum_{k=1}^{\infty} N^k = N(P - N)^{-1} \quad (3)$$

式中,  $P$  为  $n$  阶的单位矩阵,  $k=1, 2, \dots$ 。

4)计算要素的影响度  $D_i$ 、被影响度  $F_i$ 、中心度  $H_i$  和原因度  $R_i$ 。

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (4)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad (5)$$

$$H_i = D_i + F_i \quad (6)$$

$$R_i = D_i - F_i \quad (7)$$

式(4)~(7)中,  $t_{ij}$  为综合影响矩阵  $T$  第  $i$  行、第  $j$  列对应的元素,  $t_{ji}$  为综合影响矩阵  $T$  第  $j$  行、第  $i$  列对应的元素。

5)计算 AHP-DEMATEL 组合权重。

$$\omega'_i = \frac{H_i w_i}{\sum_{i=1}^n H_i w_i} \quad (8)$$

式中,  $w_i$  和  $\omega'_i$  分别为第  $i$  个指标的 AHP 权重和传统的 AHP-DEMATEL 权重。

## 2.2 改进的 ADV 权重优化方法

度量大坝安全特征的指标往往由于存在一定的相关性而导致信息重叠<sup>[26]</sup>, 指标不能独立地反映大坝安全某一方面的特征, 进而导致评价结果失真。相比于 AHP, DEMATEL 能够分析指标间的交叉关系, 但传统的 DEMATEL 是按照指标中心度  $H_i$  对指标权重进行排序, 并不能突显独立性较强因素的重要性。

基于上述分析, 针对 DEMATEL 无法解决指标间的相关性即信息重叠问题, 对其进行改进。基本改进思想是: 依据 DEMATEL 分析指标间的相关关系, 量化指标的独立度, 并依据指标的独立度对指标权重进行调整以降低指标间信息重叠, 指标的独立度越小, 该指标与其他的信息重叠量越大, 对应的权重应适当减小。

定义指标独立度  $I$  对 DEMATEL 模型进行改进, 并计算优化后的权重。这里的独立度表征的是该指标不受其他指标的影响程度。由于指标的独立度与被影响度呈现负相关性, 即指标的被影响度越高, 指标的

独立度越小, 可按式(9)计算:

$$I_i = \frac{\max(F_i) - F_i}{\max(F_i) - \min(F_i)} \quad (9)$$

由于  $I_i \in [0, 1]$ , 利用式(8)的乘法融合会导致部分指标权重为 0, 故将其进行指数变换, 如式(10)所示:

$$\omega_i = \frac{w_i e^{\beta I_i}}{\sum_{i=1}^m w_i e^{\beta I_i}} \quad (10)$$

式中:  $\beta$  为独立度影响因子, 表征独立度对指标权重的影响程度,  $\beta \in (0, +\infty)$ ;  $e$  为自然常数;  $\omega_i$  为改进的 AHP-DEMATEL 权重。通过式(10)可以在 AHP 权重的基础上依据 DEMATEL 减小独立性弱的指标权重以降低指标间信息重叠对评价结果造成的影响。

此外, 大坝的安全状态是随着时间推移不断变化的动态过程, 且大坝的恶化在前期往往呈现局部破坏状态, 使用常权权重可能会导致这些指标被其他优势指标掩盖, 从而不能发现局部破坏问题, 故需要依据变权理论对指标权重进行修正<sup>[27-28]</sup>。

设  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  为指标状态变量,  $S_j(X) = \{S_1(x), S_2(x), \dots, S_m(x)\}$  为状态变权向量, 则变权向量  $W_j(X)$  如式(11)所示:

$$W_j(X) = \frac{\omega_j S_j(X)}{\sum_{j=1}^m \omega_j S_j(X)} \quad (11)$$

式中,  $\omega_j$  为第  $j$  个指标改进的 AD 权重,  $W_j$  为优化的 ADV 权重。

安全评价时, 由于各指标量纲和极性不同, 变权需将所有指标进行极大化处理。为防止一些危险因素被其他安全因素覆盖, 出于安全考虑, 应对劣势指标的权重进行激励, 对优势指标权重进行惩罚, 从而以更安全的角度反映大坝的运行状态, 依据相关文献[16], 采用指数型状态变权向量  $S_j(X) = e^{\gamma x_j}$ , 取  $\gamma = -1$ 。

## 2.3 基于云模型的土石坝运行安全综合评价方法

设  $U$  是一个由精确数值表示的定量论域,  $C$  为  $U$  上的定性概念, 若定量值  $x \in U$ , 且  $x$  是定性概念  $C$  的一次随机实现,  $x$  对  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0, 1]$  是具有稳定倾向的随机数, 即  $\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ , 则  $(x, \mu)$  称为一个云滴。在云模型中, 常通过逆向云发生器  $(CG^{-1})$  提取数据的期望  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_c$  这 3 个特征值, 来实现定量数据向定性概念的转换; 通过正向云发生器  $(CG)$ , 生成服从于期望为  $E_n$ 、标准差为  $H_c$  的正态随机数  $E'_n$ , 进而生成服从于期望为  $E_x$ 、标准差为  $E'_n$  的正态随机数  $x$ , 并计算其确定度  $\mu$ , 从而生成云滴  $(x, \mu)$ 。正逆向云发生器的基本原理如图 3 所示。

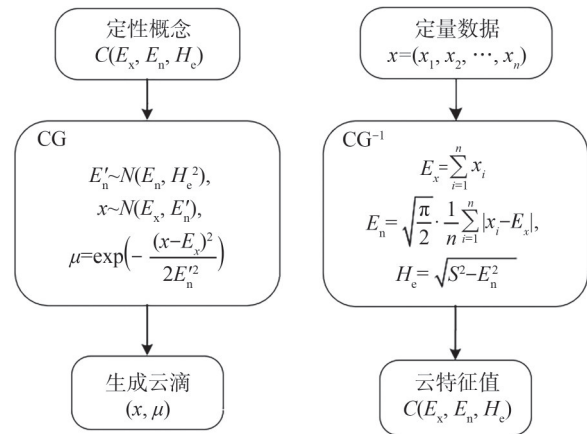


图3 正逆向云发生器的基本原理

Fig. 3 Fundamentals of forward and reverse cloud generators

评价模型建立的具体步骤如下。

1)参考相关文献[11],依据黄金分割法计算各评价等级的云特征值,具体语言变量及云特征值如表2所示。

表2 各等级云特征值

Tab. 2 Cloud characteristic values for each level

评语集	数字特征
安全	(1.000,0.103,0.013)
基本安全	(0.691,0.064,0.008)
不安全	(0.500,0.039,0.005)
很不安全	(0.309,0.064,0.008)
极不安全	(0,0.103,0.013)

2)参考相关文献[20-21],将监测数据归一化后输入到逆向云发生器中获得云特征值,定性数据的云特征值是通过将专家打分结果输入到逆向云发生器中获取。而针对一些复核型数据,如衡量大坝填筑质量的压实度、防洪标准等,由于其在短时间内基本不会改变,取其云特征值为该指标的评价等级对应的云特征值。如大坝的压实度为98%,对应的评价等级为“安全”,取其云特征值为(1.000,0.103,0.013)。

3)依据指标云特征值及对应权重计算综合评价云  $C(E_x, E_n, H_c)$ 。

$$\begin{cases} E_x = \sum_{i=1}^n E_{xi} W_i, \\ E_n = \frac{W_i^2 E_{ni}}{\sum_{i=1}^n W_i^2}, \\ H_c = \frac{W_i^2 H_{ci}}{\sum_{i=1}^n W_i^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $E_{xi}$ 、 $E_{ni}$ 、 $H_{ci}$  为第  $i$  个指标的评价云数字特征,  $W_i$  为第  $i$  个指标的权重。

4)云图能直观反映客体的状态也能揭示评价结果的模糊性,但若评价云处于两评价等级中间位置或熵和超熵较大将导致云滴的离散性和雾化现象严重时,观察云图难以确定评价结果。云相似度<sup>[29]</sup>可以量化评价云和目标云之间的重合程度,同时避免主观因素对评价结果的影响。计算方法如下:

①将综合云  $C(E_x, E_n, H_c)$  输入到正向云发生器中得到  $a$  个云滴  $(x_i, \mu_i)$ 。

② $x_i$  对  $C_v(E_{xv}, E_{nv}, H_{cv})$  的隶属度可依据式(13)计算:

$$\mu_i = \exp\left(-\frac{(x - E_{xvi})^2}{2E_{nvi}^2}\right) \quad (13)$$

式中,  $E_{nvi} \sim N(E_{nv}, H_{cv}^2)$ 。

③计算综合相似度  $\delta = \sum_{i=1}^n \mu_i / a$ 。

5)云滴数量对综合相似度的影响研究。

以评价云(0.850,0.020,0.002)对“基本安全(0.691,0.064,0.008)”的隶属度为例,分别取500、1 000、2 000、5 000、10 000个云滴按照上述步骤计算其综合相似度作为对应云滴数下的模型解。

根据正向云发生器的基本原理,  $E'_{ni} \sim N(E_n, H_c^2)$  和  $E'_{nvi} \sim N(E_{nv}, H_{cv}^2)$  的概率密度函数分别为:

$$f_{E'_{ni}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} H_c} \exp\left(-\frac{(y - E_n)^2}{2H_c^2}\right) \quad (14)$$

$$f_{E'_{nvi}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} H_{cv}} \exp\left(-\frac{(z - E_{nv})^2}{2H_{cv}^2}\right) \quad (15)$$

而  $x \sim N(E_x, E_n^2)$ , 则  $x$  的累计分布函数为:

$$F_x = \int_{-\infty}^x \int_0^{+\infty} f_{E'_{ni}} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} y} \exp\left(-\frac{(t - E_{xv})^2}{2y^2}\right) dy dt \quad (16)$$

式中,  $t$  为积分变量,  $y, z$  为随机变量。

根据式(13)可得期望隶属度为:

$$E_\mu = \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_x \times f_{E'_{nvi}} \times \exp\left(-\frac{(x_i - E_x)^2}{2z^2}\right) dx dz \quad (17)$$

式中,  $f_x = \frac{dF_x}{dx}$ , 依据正态分布的  $3\sigma$  准则, 式(17)可简化为:

$$E_\mu = \int_{E_{nv}-3H_{cv}}^{E_{nv}+3H_{cv}} \int_{E_x-3E_n}^{E_x+3E_n} f_x \times f_{E'_{nvi}} \times \exp\left(-\frac{(x_i - E_x)^2}{2z^2}\right) dx dz \quad (18)$$

将  $E_\mu$  作为理论解(即云滴数无穷大时的综合相似度)计算各云滴数的误差  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{\delta - E_\mu}{E_\mu} \times 100\% \quad (19)$$

依据式(19)计算,进行20次随机试验,各云滴数的误差变化如图4所示。

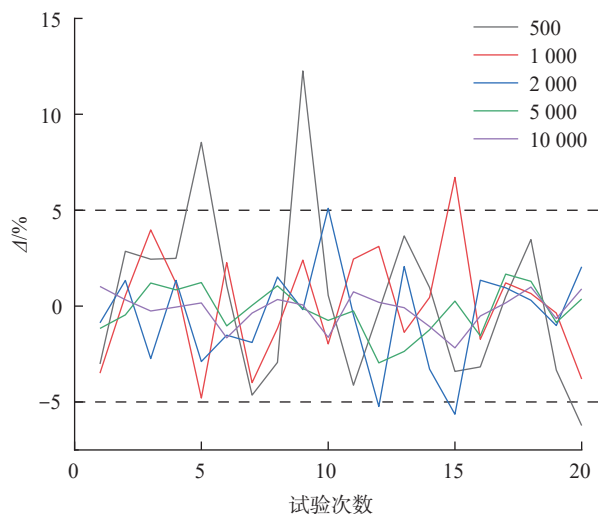


图4 不同云滴数下的误差变化

Fig. 4 Error variation under different cloud droplet numbers

从图4可以看出,在20次随机试验中,随着云滴数的增加,Δ逐步趋于平稳,对应的方差从20.860减小到0.800。云滴数为2 000时有3次实验超出5%的误差,云滴数为5 000时20次试验均满足95%的工程精度要求,云滴数继续增加误差变化不大,为保证计算精度和计算效率,取云滴数 $a=5\ 000$ 。

### 2.4 基于ADV-CM的土石坝运行安全综合评价流程

土石坝运行安全综合评价流程如图5所示。首先,从影响大坝安全的关键因素中选取具有代表的指标构建土石坝运行安全综合评价指标体系;然后,基于AHP法计算指标权重,利用改进的AHP-DEMATEL方法分析指标间的相关性,解决指标不独立导致的信息重叠问题,并结合变权理论对常权进行修正,得到一种基于专家经验,考虑指标相关性和指标状态值的ADV优化权重;最后,结合云模型计算综合云确定大坝的运行安全等级。

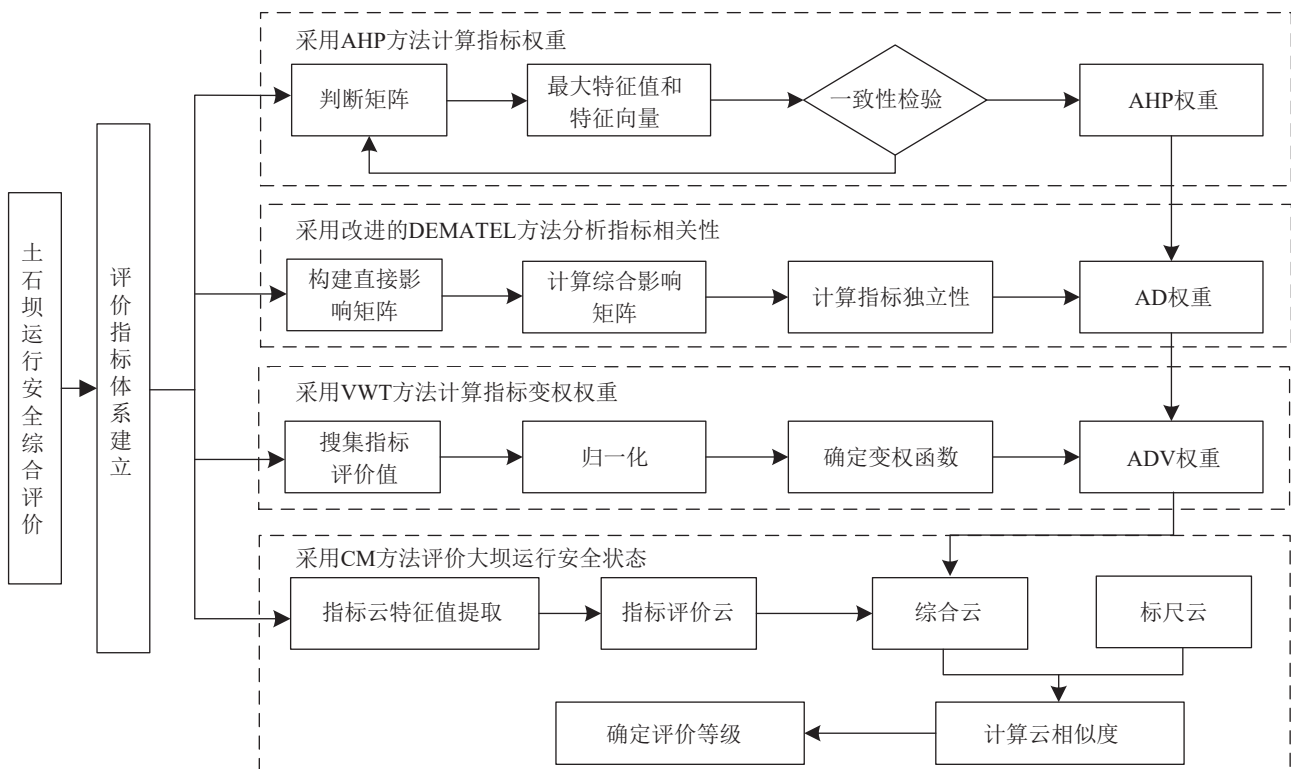


图5 土石坝运行安全综合评价流程

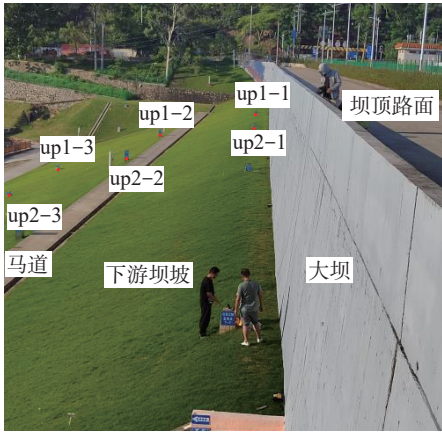
Fig. 5 Comprehensive evaluation process for the operation safety of earth-rock dams

## 3 工程实例分析

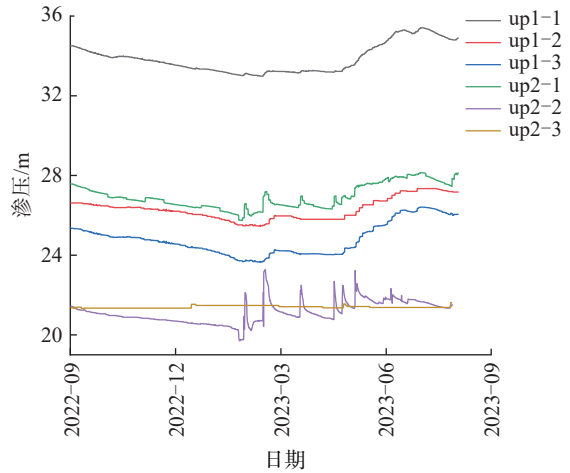
### 3.1 工程概况

和龙水库位于广州市太和镇和龙村,于1974年竣工验收,水库总库容 $1\ 602 \times 10^4\ m^3$ ,为中型水库;水库集雨面积 $24.83\ km^2$ ,属多年调节水库;大坝为碾压式均质土坝,坝顶长 $235.0\ m$ ,坝顶宽 $7.5\ m$ 。防浪墙顶高程 $42.7\ m$ ,最大坝高 $24.7\ m$ ,设计洪水为100年一遇,校核洪水为2 000年一遇。大坝经40年的服役,部分机

能出现老化,2015年的安全鉴定结果为病险坝,由当地水务局负责对其进行除险加固工程,本次工程对坝体坝基进行了灌浆加固、完善了监测系统、重建厂房等。为实时监测大坝的运行状态,依据第2节建立的评价模型结合和龙水库实测数据,对除险加固后的大坝进行运行安全综合评价。大坝渗压测点位置分布及渗压曲线如图6所示。图6中,up1-1、up1-2、up1-3代表断面1上的3个渗压测点,up2-1、up2-2、up2-3代表断面2上的3个渗压测点。



(a) 大坝渗压测点位置分布



(b) 坝体渗压

图 6 大坝渗压测定位置布置及渗压曲线

Fig. 6 Dam seepage location layout and seepage curve diagram

3.2 基于DEMATEL的关键指标识别

目前,国内外学者对于土石坝安全评价的研究很多,但对于关键指标识别和指标间的相关性研究较少。利用DEMATEL模型识别系统中的关键指标,合理地土石坝的指标进行分析,可为大坝日后的运行管理提供依据。

邀请 15 位对土石坝的施工、设计、管理、科研等多领域有深入了解的水利行业的专家,依据第 2.1 节中的 DEMATEL 方法分析指标之间的相关性以及指标的相关性对权重进行修正以验证方法的可行性。限于篇幅要求,这里仅展示一位专家的打分情况,即该专家构造的直接影响矩阵  $M_1$ 。

$$M_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 3 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 3 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 3 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 3 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 3 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

各指标的计算结果如表 3 和图 7 所示。

图 7 中:位于第 I、IV 象限的指标为和龙水库大坝运行安全评价的原因型指标;位于第 II、III 象限的指标为大坝运行安全评价的结果型指标;位于第 I、II 象限的指标中心度高于平均值,表明其为影响和龙水库大坝安全运行的关键因素。指标  $B_{31}$ 、 $B_{32}$ 、 $B_{34}$ 、 $B_{35}$  的中心度排序分别为 4、1、2、3,其被影响度排序为 6、3、

2、1,这些指标的中心度和被影响度较大,为系统中的关键结果指标; $B_{43}$ 、 $B_{44}$  的中心度排序为 6 和 5,其影响度为 1 和 2,表明这些指标易对其他指标造成影响,为关键原因指标。此外,指标  $B_{11}$ 、 $B_{13}$ 、 $B_{21}$ 、 $B_{51}$ 、 $B_{61}$  的独立度排序为 3、4、5、1、2,表明这些指标在系统中不易受其他因素影响。

综上所述, $B_{31}$ 、 $B_{32}$ 、 $B_{34}$  及  $B_{35}$  为关键结果指标, $B_{43}$

表3 基于DEMATEL的指标参数计算结果

Tab.3 Index parameter calculation results based on the DEMATEL

指标	影响度	被影响度	原因度	中心度	独立度
B <sub>11</sub>	2.418	0.059	2.359	2.476	0.986
B <sub>12</sub>	2.421	0.171	2.250	2.593	0.958
B <sub>13</sub>	1.341	0.066	1.276	1.407	0.984
B <sub>14</sub>	0.494	0.258	0.236	0.752	0.937
B <sub>21</sub>	0.175	0.066	0.109	0.241	0.984
B <sub>22</sub>	0	0.120	-0.120	0.120	0.971
B <sub>23</sub>	0	0.106	-0.106	0.106	0.974
B <sub>31</sub>	2.395	3.180	-0.785	5.576	0.218
B <sub>32</sub>	2.202	3.755	-1.552	5.957	0.076
B <sub>33</sub>	2.505	1.288	1.218	3.793	0.683
B <sub>34</sub>	1.801	3.882	-2.082	5.683	0.045
B <sub>35</sub>	1.609	4.066	-2.457	5.675	0
B <sub>41</sub>	1.168	3.666	-2.498	4.834	0.098
B <sub>42</sub>	2.161	2.279	-0.118	4.440	0.439
B <sub>43</sub>	2.817	2.597	0.220	5.414	0.361
B <sub>44</sub>	2.677	2.791	-0.114	5.467	0.314
B <sub>51</sub>	2.584	0.053	2.531	2.637	0.987
B <sub>52</sub>	0	0.119	-0.119	0.119	0.971
B <sub>53</sub>	0.172	0.420	-0.248	0.592	0.897
B <sub>61</sub>	0	0	0	0	1.000

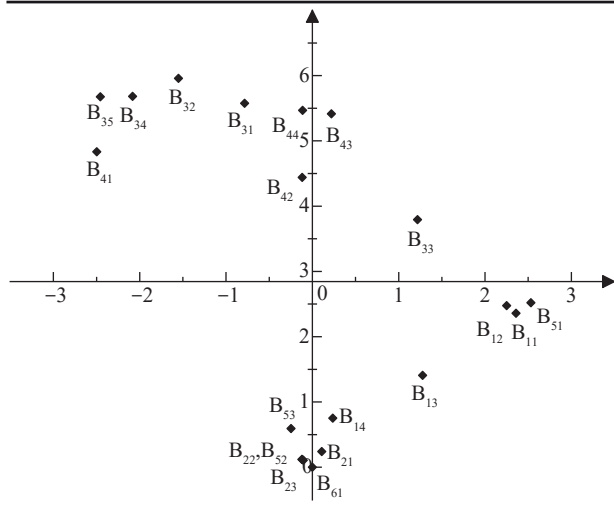


图7 原因度-中心度

Fig.7 Cause degree and centrality

和B<sub>44</sub>为关键原因指标;B<sub>11</sub>、B<sub>13</sub>、B<sub>21</sub>、B<sub>51</sub>和B<sub>61</sub>的独立度相对较强,能够较好地反映大坝独特的一面。所以,渗流破坏是和龙大坝出现风险的重要因素,坝基变形和裂缝是重要条件。

### 3.3 基于改进的ADV指标权重计算

依据文献[17-18]中的方法,结合和龙水库实测资料,计算大坝的指标云特征值,结果如表4所示。

表4 土石坝各指标云特征值

Tab.4 Cloud eigenvalues of earth-rock dam indexes

指标	云特征值	指标	云特征值
B <sub>11</sub>	(0.876,0.044,0.014)	B <sub>34</sub>	(0.863,0.045,0.014)
B <sub>12</sub>	(0.691,0.064,0.008)	B <sub>35</sub>	(0.858,0.037,0.019)
B <sub>13</sub>	(0.874,0.041,0.015)	B <sub>41</sub>	(1.000,0.103,0.013)
B <sub>14</sub>	(0.892,0.041,0.010)	B <sub>42</sub>	(1.000,0.103,0.013)
B <sub>21</sub>	(0.691,0.064,0.008)	B <sub>43</sub>	(0.850,0.030,0.009)
B <sub>22</sub>	(1.000,0.103,0.013)	B <sub>44</sub>	(0.839,0.040,0.019)
B <sub>23</sub>	(1.000,0.103,0.013)	B <sub>51</sub>	(0.888,0.040,0.016)
B <sub>31</sub>	(0.735,0.073,0.025)	B <sub>52</sub>	(0.769,0.057,0.005)
B <sub>32</sub>	(1.000,0.103,0.013)	B <sub>53</sub>	(0.869,0.057,0.005)
B <sub>33</sub>	(0.861,0.036,0.021)	B <sub>61</sub>	(0.691,0.064,0.008)

分别采用AHP、AD、ADV3种方法计算各指标权重,并进行对比分析,结果如图8所示。从图8可以看出,相较于AHP权重,B<sub>11</sub>、B<sub>12</sub>和B<sub>13</sub>等指标的AD和ADV权重存在不同程度的放大现象,原因是这些指标的被影响度较低,表征了大坝安全特性中独特的一方面,故权重被适当加大。而其余指标由于被影响度较大,为结果型指标,与影响其的指标存在一定的信息重叠,故对其权重进行适当削减。ADV权重在AD权重的基础上进一步考虑了指标状态量的影响,对优势指标权重削减而对劣势指标权重进行放大,避免劣势指标被优势指标掩盖,B<sub>61</sub>的状态值为0.691,为劣势指标,通过变权理论将其权重由原来的0.050增大到0.058。综上所述,ADV方法在考虑指标相关性的基础上融合了指标实测数据,使得指标权重随指标状态值变化而变动,能更准确地反映指标的相对重要性。

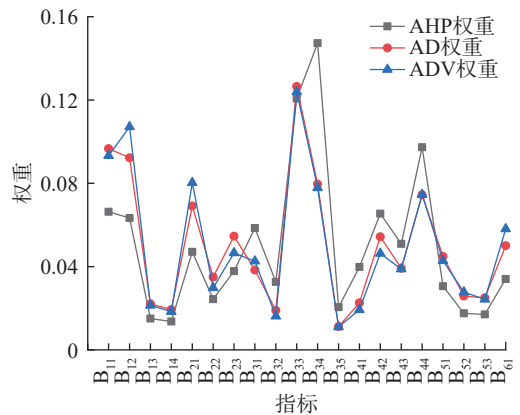


图8 不同权重对比

Fig.8 Comparison of weights for different methods

### 3.4 综合评价云

依据式(11)计算综合评价云特征值,AHP、AD和ADV权重对应的综合云分别为(0.855,0.052,0.016)、(0.846,0.053,0.014)和(0.835,0.052,0.014)通过正向云发

生器生成评价云,将其和标尺云绘制在同一坐标轴上,评价结果对比如图9所示。依据式(12)计算其与各评价等级的云相似度,结果见表5。

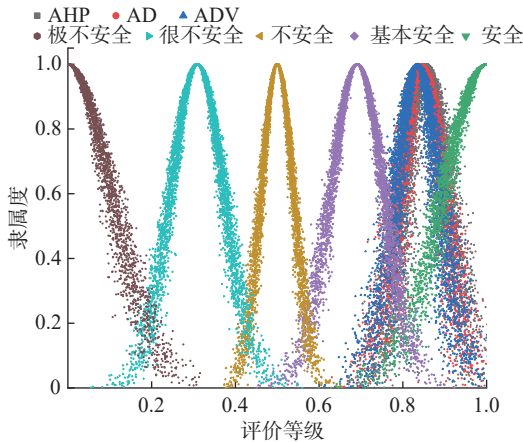


图9 评价结果对比

Fig. 9 Comparison of evaluation results for different methods

表5 不同权重下综合评价云相似度

Tab. 5 Comprehensive evaluation of cloud similarity under different weights

权重	安全	基本安全	不安全	很不安全	极不安全
AHP	0.407	0.109	0	0	0
AD	0.366	0.135	0	0	0
ADV	0.325	0.163	0	0	0

从图9中可以看出,3种权重计算方法得出的综合评价云位于“基本安全”或“安全”,单从云图上难以直观反映评价结果,通过云相似度的计算结果及最大隶属度原则,判断土石坝的评价结果均为“安全”。对比云特征值的计算结果和图9中评价结果可以看出,DEMATEL模型考虑了指标之间相关性的影响,对被影响度强的指标权重进行了削减。由于 $B_{32}$ 、 $B_{34}$ 等优势指标属于结果型指标,受影响度较大而被削减权重,进而导致综合评价云向“基本安全”方向移动,反映了指标独立性对评价结果的影响。在此基础上,通过变权理论对劣势指标权重进行激励,评价结果进一步向“基本安全”方向移动,突出了劣势指标的重要性,避免其产生的消极作用被优势指标掩盖。

为验证ADV-CM评价结果的准确性,将上述评价结果与模糊综合评价<sup>[30]</sup>和集对分析<sup>[31]</sup>的评价结果进行对比,结果如表6所示,其中模糊综合评价I采用扎德算子,II采用加权平均算子,集对分析中的集对势采用李德顺<sup>[32]</sup>的广义集对势计算。由表6可知,根据最大隶属度原则(模糊评价)或最大势理论(集对分析),上述3种方法在3种权重下的评价等级均为“安全”,与本文ADV-CM的评价结果一致,印证了该模型的有效性和合理性。

表6 3种方法在不同权重下的评价结果

Tab. 6 Evaluation results of three methods with different weights

评价方法	权重	极不安全	很不安全	不安全	基本安全	安全	评价结果
模糊综合评价 I	AHP	0.014	0.014	0.014	0.024	0.049	安全
	AD	0.011	0.011	0.011	0.019	0.050	安全
	ADV	0.011	0.011	0.011	0.016	0.058	安全
模糊综合评价 II	AHP	0	0	0.013	0.310	0.639	安全
	AD	0	0	0.018	0.352	0.605	安全
	ADV	0	0	0.021	0.389	0.582	安全
集对分析	AHP	0.096	0.121	0.179	0.278	0.326	安全
	AD	0.096	0.123	0.183	0.280	0.319	安全
	ADV	0.096	0.124	0.186	0.282	0.312	安全

综上所述,3种权重下的不同模型评价结果一致,但ADV方法在传统权重的基础上考虑了指标间相关性对评价结果的影响,并结合指标实测数据对权重进行修正,能够实现大坝的实时监测。相较于其他模型,云模型不仅能够定量地确定大坝的评价等级,还能够通过云图定性地反应大坝的安全状态,描述评价结果的不确定性的同时实现了大坝安全的可视化。

## 4 结论

综合考虑了影响土石坝运行安全的各种因素,构建了土石坝运行安全综合评价指标体系,并基于ADV方法对指标权重进行计算,利用云模型实现了指标集与评语集之间的不确定性映射,最后依据和龙水库工程实例对提出的ADV-CM方法进行了验证,得到以下结论。

1)结合AHP、DEMATEL和VWT的优缺点,获得了一种基于专家经验,考虑指标相关关系和指标状态量的ADV优化权重,能够更加合理地反映指标的相对重要性。

2)依据DEMATEL模型对大坝运行安全评价指标的内在因果关系进行了分析,结果表明, $B_{43}$ 坝基变形稳定和 $B_{44}$ 裂缝情况是关键原因指标, $B_{31}$ 渗流量、 $B_{32}$ 渗透压力、 $B_{34}$ 坝基渗流稳定及 $B_{35}$ 坝体渗流稳定是关键结果指标,对土石坝的运行安全影响较大,在进行大坝监测时应重点关注。

3)通过云模型将评价集和评语集这种模糊概念以一组稳定倾向的随机数来刻画,能有效降低模型的主观性,并结合云相似度定量计算评价结果。通过公式推导和分析不同云滴数下的误差变化,初步确定了云滴数的取值。

4)将提出的ADV-CM方法运用于和龙水库大坝,

大坝对“安全”的云相似度计算结果最高,为32.5%,确定评价结果为“安全”,与工程实际相吻合。并采用模糊综合评价和集对理论对本文方法进行验证,得出的结果一致,印证了本文方法的有效性和合理性。

#### 参考文献:

- [1] Sheng Jinbao, Li Hongen, Sheng Taozhen. Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(1): 1–15. [盛金保, 李宏恩, 盛韬桢. 我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J]. *水利水运工程学报*, 2023(1): 1–15.]
- [2] Chen Longlong, Li Jie, Wang Zhifeng, et al. Sustainable health state assessment and more productive maintenance of tunnel: A case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 396: 136450.
- [3] Wen Lifeng, Yang Ying, Li Yanlong, et al. Comprehensive evaluation method for the concrete-face rockfill dams behavior based on the fuzzy recognition model[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(3): 04022021.
- [4] Jiang Fuliang, Wu Haonan, Liu Yong, et al. Comprehensive evaluation system for stability of multiple dams in a uranium tailings reservoir: Based on the TOPSIS model and bow Tie model[J]. *Royal Society Open Science*, 2020, 7(4): 191566.
- [5] Shu Xiaosong, Bao Tengfei, Xu Ruichen, et al. Dam anomaly assessment based on sequential variational autoencoder and evidence theory[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 98: 576–594.
- [6] Jia Fan, Yang Meng, Liu Bingrui, et al. A comprehensive evaluation method study for dam safety[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2017, 63(5): 639–646.
- [7] Wang Xiaoling, Yu Hongling, Lv Peng, et al. Seepage safety assessment of concrete gravity dam based on matter-element extension model and FDA[J]. *Energies*, 2019, 12(3): 502.
- [8] Chen Anyi, Tang Xianqi, Cheng Bochao, et al. Multi-source monitoring information fusion method for dam health diagnosis based on Wasserstein distance[J]. *Information Sciences*, 2023, 632: 378–389.
- [9] Li Deyi, Liu Changyu, Du Yi, et al. Artificial intelligence with uncertainty[J]. *Journal of Software*, 2004, 15(11): 1583–1594. [李德毅, 刘常昱, 杜鹤, 等. 不确定性人工智能[J]. *软件学报*, 2004, 15(11): 1583–1594.]
- [10] He Jinping, Gao Quan. An improved algorithm of cloud fusion for dam health diagnosis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(7): 1022–1029. [何金平, 高全. 一种适应大坝健康诊断的改进云合并算法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(7): 1022–1029.]
- [11] Wang Fei, Zhong Denghua, Yan Yuling, et al. Rockfill dam compaction quality evaluation based on cloud-fuzzy model[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2018, 19(4): 289–303.
- [12] Jiang Zhenxiang, Chen Hui, Chen Boquan. Evaluation model of overall dam behavior based on cloud theory[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(3): 464–473. [姜振翔, 陈辉, 陈柏全. 基于云理论的大坝整体性态评价模型[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(3): 464–473.]
- [13] Fu Helin, Huang Zhen, Huang Hongwei, et al. Health diagnosis method of shield tunnel structure based on cloud theory[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(5): 794–801. [傅鹤林, 黄震, 黄宏伟, 等. 基于云理论的隧道结构健康诊断方法[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(5): 794–801.]
- [14] Fu Xiao, Zhao Gang, Wang Maomei, et al. Comprehensive evaluation method for structural behavior of concrete dams in cold regions[J]. *Engineering Structures*, 2023, 278: 115435.
- [15] Hao Tengting, Zheng Xin, Wang Huiyu, et al. Development of a method for weight determination of disaster-causing factors and quantitative risk assessment for tailings dams based on causal coupling relationships[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023, 37(2): 749–775.
- [16] Li Zongkun, Mo Xiangming, Ge Wei, et al. Comprehensive evaluation of dam-break consequences based on variable weight set pair-extenics coupling model[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(5): 64–71. [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.]
- [17] Chen Xudong, Xu Peng, Liu Xinyi, et al. Comprehensive evaluation method for the safety state of RCC dams based on interval number theory[J]. *Water*, 2023, 15(11): 2089.
- [18] Wang Lei, Wang Xiaoling, Zhang Jun, et al. Comprehensive evaluation method for dam safety considering fusion weight optimization and conflicting information sources[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(10): 1566–1575. [王雷, 王晓玲, 张君, 等. 考虑融合权重优化与冲突信息来源的大坝安全综合评价方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(10): 1566–1575.]
- [19] Li Zongkun, Jiang Jingshan, Wang Guangyin. Comprehensive assessment of observed behavior of earth-rockfill dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(2): 255–259. [李宗坤, 姜景山, 王广印. 土石坝实测性态综合评价方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(2): 255–259.]
- [20] Li Yawei. Study on safe operation and evaluation of small and medium-sized earth-rock dams in cold regions[D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2021. [李雅薇. 寒区中小型土石坝安全运行与评价研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2021.]

- [21] He Jinping, Gao Quan, Shi Yuqun. A multi-hierarchical comprehensive evaluation method of dam safety based on cloud model[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016,36(11):2977–2983. [何金平,高全,施玉群.基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J]. *系统工程理论与实践*,2016,36(11):2977–2983.]
- [22] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范:SL 274—2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [23] 中华人民共和国水利部. 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.
- [24] Li Siguang, Ma Yonghong, Zhu Enjia. Analysis of institutional barriers to integrated innovation based on AHP-DEMATEL[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022,43(6):900–906. [李四光,马永红,朱恩加.基于 AHP-DEMATEL 的融合创新制度性障碍分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*,2022,43(6):900–906.]
- [25] Xue Yanzhuo, Zhou Ying, Lu Yang, et al. Risk assessment of ships stuck in ice in Arctic ice area based on fuzzy AHP-DEMATEL[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022,43(7):944–949. [薛彦卓,周莹,鲁阳,等.基于模糊 AHP-DEMATEL 的北极冰区船舶冰困风险评价[J]. *哈尔滨工程大学学报*,2022,43(7):944–949.]
- [26] 何金平. 大坝安全监测理论与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [27] Dong Kai, Mi Zhankuan, Yang Dewei. Comprehensive diagnosis method of the health of tailings dams based on dynamic weight and quantitative index[J]. *Sustainability*, 2022, 14(5):3068.
- [28] Li Yue, Hu Yuqi, Cai Jing, et al. Hydroplaning risk of aircraft tire based on variable weight theory—normal cloud model[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023,49(9):2299–2305. [李岳,胡宇祺,蔡靖,等.基于变权重—正态云模型的飞机轮胎滑水风险[J]. *北京航空航天大学学报*,2023,49(9):2299–2305.]
- [29] Liang Li, Xing Guanhua, Wu Fengyuan. The evaluation model and method based on cloud theory[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2019,40(6):881–885. [梁力,邢观华,吴凤元.基于云理论的评估模型和方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2019,40(6):881–885.]
- [30] Chen Xi, Zeng Yawu, Liu Wei. Fuzzy AHP-based two-level fuzzy comprehensive evaluation on safety of reservoir dam in rural area[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019,50(2):168–176. [陈曦,曾亚武,刘伟.基于模糊层次分析法的农村水库大坝安全二级模糊综合评价[J]. *水利水电技术*,2019,50(2):168–176.]
- [31] Ge Wei, Li Zongkun, Li Wei, et al. Risk evaluation of dam-break environmental impacts based on the set pair analysis and cloud model[J]. *Natural Hazards*, 2020,104(2):1641–1653.
- [32] Li Deshun. Research on system risk assessment based on generalized set pair analysis[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. [李德顺.基于广义集对分析的系统危险性评价研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.]

## Comprehensive Evaluation of Operation Safety of Earth-rock Dams Based on Weight Optimization-cloud Model

ZHANG Jianwei<sup>1</sup>, WU Weitao<sup>1</sup>, HOU Ge<sup>1\*</sup>, HUANG Jinlin<sup>2</sup>, WANG Bingpeng<sup>1</sup>, LIU Hongze<sup>1</sup>, HU Zixu<sup>1</sup>

(1.School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2.Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

### Abstract:

**Objective** The accuracy of comprehensive dam safety assessment remains critical to national economic development and the safety of people's lives and property downstream. This study addresses the distortion of evaluation results caused by overlapping information among evaluation indices and the use of constant weights assigned manually in the comprehensive evaluation of the operational safety of earth and rock dams. An optimization weight approach is proposed to mitigate this issue.

**Methods** The initial weights of the indices were calculated using the analytic hierarchy process, and the connections among the indices were analyzed with the help of the decision-making trial and evaluation laboratory. The initial weights were then corrected based on the independence of the indices from DEMATEL to reduce the effect of overlapping evaluation index information on the evaluation results. In addition, the safety state of the dam was a dynamic process that changed over time, and the deterioration of the dam often presented as local damage in the early stages. The use of constant weight can cause these disadvantageous indicators to be overshadowed by other advantageous indicators, thus failing to detect local damage problems. Therefore, it is necessary to revise the weights of the indicators based on the variable weight theory. The weights of the indicators were optimized based on their state values, resulting in an optimized weight that accounted for both the correlation of the indicators and their state values, to address the uncertainty in the monitoring information and evaluation process, the cloud model was adopted to extract the index characteristic values and carry out a comprehensive evaluation. The influence of the number of cloud drops on the comprehensive similarity was explored to resolve the issue that the selection of the number of cloud drops was mainly subjectively determined by the decision-maker and lacked a theoretical basis. The membership degree was calculated by generating different numbers of cloud droplets through the forward cloud

generators, which were taken as the model solution under each number of cloud droplets. The expected value of the membership degree was derived based on the normal distribution probability density function and was taken as the theoretical solution. It was found that in 20 random experiments, the model solution consistently fluctuated around the theoretical solution under the same cloud droplet number. As the cloud droplet number increased from 500 to 10 000, this fluctuation decreased and gradually converged to the theoretical solution, with the corresponding variance decreasing from 20.86 to 0.80. Taking 95% engineering accuracy as the measurement standard, it was found that among these 20 random experiments, three experiments failed to satisfy the condition when the cloud droplet number was 2 000, and all experiments met the requirement when the cloud droplet number was 5 000. Since the error did not change significantly when the number of cloud drops continued to increase, 5 000 was taken as the optimal number of cloud drops to balance computational efficiency and accuracy.

**Results and Discussions** The established evaluation model was applied to the earth and rock dam of the Helong Reservoir in Guangdong Province. The results showed that the optimization weight reduced the weights of indicators that were easily influenced due to a certain degree of information overlap between these indicators and others. Based on this, the variable weight theory was further integrated, and the weights of the advantageous indicators were reduced to prevent the disadvantageous indicators from being overshadowed. Therefore, the role of disadvantageous indicators in the evaluation was highlighted, and the operation status of the dam was reflected from a safer perspective. Most of the cloud drops generated by the evaluation cloud of the Helong Reservoir fell between “safety” and “basically safety”. Combined with the results of the membership degree calculation, the membership degree of the Helong Reservoir Dam to “safety” and “basically safety” was 32.5% and 16.3%, respectively, and the evaluation result was determined to be “safety” by the principle of maximum similarity. Compared to the constant weights, the two evaluation results were the same, but the affiliation degree of “safety” was reduced from 40.7% to 32.5%, which reflected the influence of the correlation of the indicators and the state value of the indicators on the evaluation results. The method considers the correlation of the indices and the influence of the measured indices on the weights. It combines with the cloud model to evaluate the operation state of earth and rock dams from both quantitative and qualitative perspectives, which more realistically and effectively reflects the safety condition of the dams and provides a reference for the safety evaluation of the dam.

**Conclusions** The results indicated that this method is applicable to the comprehensive evaluation of the operational safety of earth and rock dams. Fuzzy comprehensive evaluation and set pair analysis are utilized to compare the evaluation results with those of the proposed model to verify the reliability of the proposed model. All of the evaluation models indicate a status of “safety”. The evaluation results are consistent and align with the actual condition of the dam, confirming the accuracy and feasibility of the proposed model.

**Key words:** earth and rock dams; comprehensive evaluation; decision-making trial and evaluation laboratory; analytic hierarchy process; variable weight theory; cloud model

(编辑 张琼)

引用格式: Zhang Jianwei, Wu Weitao, Hou Ge, et al. Comprehensive evaluation of operation safety of earth-rock dams based on weight optimization-cloud model[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 165–175. [张建伟, 毋伟涛, 侯鸽, 等. 基于权重优化-云模型的土石坝运行安全综合评价[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 165–175.]