

基于变权集对 – 可拓耦合模型的溃坝后果综合评价

Li, Zongkun; Mo, Xiangming; Ge, Wei; Wang, Te

DOI

[10.15961/j.jsuese.202100658](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202100658)

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Published in

Gongcheng Kexue Yu Jishu/Advanced Engineering Science

Citation (APA)

Li, Z., Mo, X., Ge, W., & Wang, T. (2022). 基于变权集对 – 可拓耦合模型的溃坝后果综合评价. *Gongcheng Kexue Yu Jishu/Advanced Engineering Science*, 54(5), 64-71. <https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202100658>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable). Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights. We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202100658



本刊网刊

基于变权集对-可拓耦合模型的溃坝后果综合评价

李宗坤¹, 莫向明^{1,2}, 葛巍^{1,3*}, 王特¹

(1.郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2.长江三峡集团福建能源投资有限公司, 福建 福州 350000;
3.Faculty of Technol., Policy and Management, Delft Univ. of Technol., Delft 2628 BX, the Netherlands)

摘 要:溃坝后果严重程度综合评价是大坝风险评价与风险管理的重要组成部分。针对传统溃坝后果综合评价中人为主观设定指标权重固定不变, 以及评价指标值与评价等级标准隶属过程中存在不相容等问题, 基于现有法律法规以及行业规范, 选取生命损失、经济损失、社会影响和环境影响为溃坝后果综合评价指标, 采用变权理论对评价指标常权重进行修正, 利用集对分析能有效处理系统不确定性的特点和可拓学处理不相容性问题的优势, 构建基于变权集对-可拓耦合的综合评价模型。通过集对分析的同、异、反划分可拓集合的论域进而确定可拓联系隶属度, 结合评价指标变权重计算集成可拓联系隶属度, 进而按最大集成可拓联系隶属度原则确定评价等级。将该模型应用于江西省5座水库溃坝后果综合评价中。结果显示: 1) 指数型激励性状态变权向量对5座水库溃坝后果综合评价中各个较差的评价指标进行了一定程度上的激励, 增大了其权重值, 突出了较差指标在综合评价中的地位, 避免了较差指标的消极作用被较好指标掩盖; 2) 5座水库溃坝后果综合评价等级与其他多种评价模型计算出的评价等级基本吻合, 且离散程度最高、区分度更好, 显示了所提出的模型具有良好的实用性, 为溃坝后果综合评价提供了一种新方法。

关键词:溃坝后果; 综合评价; 变权权重; 集对-可拓耦合

中图分类号:TV698

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2022)05-0064-08

Comprehensive Evaluation of Dam-break Consequences Based on Variable Weight Set Pair-Extenics Coupling Model

LI Zongkun¹, MO Xiangming^{1,2}, GE Wei^{1,3*}, WANG Te¹

(1.School of Water Conservancy Eng., Zhengzhou Univ., Zhengzhou 450001, China; 2.Fujian Energy Investment Co., Ltd., China Three Gorges Corp., Fuzhou 350000, China; 3.Faculty of Technol., Policy and Management, Delft Univ. of Technol., Delft 2628 BX, the Netherlands)

Abstract: The comprehensive assessment of severity degree of dam failure impact is an important part of dam risk evaluation and management. There are two major problems identified in the traditional comprehensive evaluation of dam break consequences: Constant weight set subjectively determined by human beings, and incompatibility between evaluation index value and evaluation grade standard. In order to solve the above-mentioned drawbacks, based on existing laws and regulations and industry norms, the life loss, economic loss, social impact and environmental impact are selected as comprehensive evaluation indexes of dam break consequences, considering the characteristics that the set pair analysis deals with the uncertainty of the system effectively and the advantage of extenics in dealing with the incompatibility problem, the variable weight set pair-extenics coupling model is established, in which the variable weight theory is used to modify the constant weight. In this model, the connection membership degree of extenics is determined according to the domain of extenics set divided by identity, difference and opposite of set pair analysis. Furthermore, the integrated connection membership degree of extenics is calculated combined with the variable weight, and is used to

收稿日期:2021-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52079127; 52179144; U2040224; 51679222; 51709239); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(22HASTIT011); 河南省青年人才托举工程(2021HYTP024); 国家大坝安全工程技术研究中心开放基金项目(CX2020B01)

作者简介:李宗坤(1961—), 男, 教授, 博士。研究方向:水利工程风险评价与管控研究。E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn

*通信作者:葛巍, E-mail: gewei@zzu.edu.cn

网络出版时间:2022-07-25 18:04:12

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20220722.1910.002.html>

determine the evaluation grade according to the principle of the maximum membership. The application to the comprehensive evaluation of dam break consequences of five reservoirs in Jiangxi Province. The results show that: 1) In the comprehensive evaluation of the consequences of dam break of five reservoirs, the exponential excitation state variable weight vector motivates the poor evaluation indexes to a certain extent and increases their weight values, highlighting the status of the poor indexes in the comprehensive evaluation, avoiding the negative effects of the poor indexes being covered by the good indexes, and emphasizing their seriousness; 2) The comprehensive evaluation grades of dam break consequences of the five reservoirs are basically consistent with the evaluation grades calculated by other evaluation models, with the highest degree of dispersion and better discrimination, which shows good practicability and provides a new method for comprehensive evaluation of dam break consequences.

Key words: dam break consequences; comprehensive evaluation; variable weight; set pair-extenics coupling

截至2017年底,中国已建水库大坝98 795座,居世界首位^[1]。但是其中约8万座修建于20世纪50~70年代,受当时经济、技术条件限制,大量工程存在设计标准偏低、工程质量较差等问题^[2-3]。随着社会的快速发展,工业化和城镇化的加速推进、下游人口密集度剧增,水库大坝一旦失事,造成的后果将会更为严重^[4-5]。开展溃坝后果综合评价,不仅有助于决策者充分了解大坝溃坝后果的严重程度,以做出更加科学的决策减少溃坝损失,对于完善大坝风险管理理论也具有重要意义。

溃坝后果综合评价涉及生命损失、经济损失、社会影响、环境影响等多个方面^[6-7],目前已有学者对溃坝后果综合评价模型进行了研究。Chen等^[8]提出大坝溃口横向扩展过程可以用一个具有足够精度的双曲线来模拟,只需在Excel表输入15个参数值即能对溃坝洪水进行快速评估;程翠云等^[9]采用属性综合评价模型对溃坝后果进行了综合评价;Li等^[10]通过对溃坝物理模型影响参数的分析选取了8个影响因素,建立了基于突变评价法的溃坝后果快速分析模型;李守义等^[11]利用可变模糊集理论,建立了基于可变模糊集理论的溃坝后果综合评价模型;李宗坤等^[12]以集对分析理论为基础,建立了基于集对分析的溃坝后果综合评价模型;邹强等^[13]基于属性区间识别理论,建立了溃坝后果综合评价的属性区间识别模型;孙玮玮等^[14-15]分别建立了基于模糊数学理论、灰色关联度法的溃坝后果综合评价模型。但溃坝后果综合评价中存在着众多不确定性风险因素,以及评价指标值与评价等级标准隶属过程之间具有不相容性等问题,而以上所提的各种用于溃坝后果综合评价中的方法多是单一考虑某一方面;并且以上研究中指标权重的确定仅考虑了指标本身的相对重要性,而不管实际情况怎么变化,各个指标的状态值如何,均采用固定不变的常权权重^[16],容易忽视低权重指标在极端取值情况下对整个评价结果的影响,因此以上研究在实际应用中会存在一定的局限性。

为弥补常权权重的不足,汪培庄^[17]率先提出变权思想, Li等^[18]在此基础上给出了变权的公理化定

义。变权权重是根据各因素实际情况对常权权重进行修正得到,既注重各因素本身的相对重要性,也注重各因素之间的内在联系,其指标权重随着评价状态的不同而变化,现已用于较多领域^[19-21]。作为处理不确定性问题的系统理论方法,集对分析能对溃坝后果综合评价中的不确定性因素进行有效的刻画^[22-23],但集对分析在评价中难以确定差异度系数,会导致评价结果与某些实际情况存在差异;而可拓集合正域、负域概念对应描述了事物“是”与“非”的相互转化,并能定量地表述事物的质变和量变过程,临界概念则描述了事物“既是又非”的质变点^[24-25],这与集对分析的“同、异、反”三分原理有一定的相似性和联系。为此本研究对集对分析和可拓学进行耦合,构建基于变权集对-可拓耦合模型应用于溃坝后果综合评价。

1 溃坝后果综合评价指标及等级划分

目前尚没有对水库大坝溃坝后果统一的定义或者分类^[26]。根据国内外的研究及工程实际运用情况,并参考《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2017)^[27]和《防洪风险评价导则》(SL 602—2013)^[28]等相关法规以及行业规范,确定溃坝后果综合评价指标为生命损失、经济损失、社会影响和环境影响。生命损失主要指大坝失事后,水流冲击、淹没和寒冷等因素造成淹没范围内的人员伤亡;经济损失主要指因为淹没造成建筑物、物资、农业等直接经济损失以及影响交通运输、厂矿企业正常生产而产生的间接经济损失;环境影响主要指大坝失事,洪水导致的河道形态及人文景观变化、重大污染等,具体体现在水环境、土壤环境、生态环境和人居环境等方面;由于溃坝后果综合评价中若无生命损失、经济损失、环境影响则社会影响几乎就不存在了^[26],可以说,社会影响包含生命损失、经济损失、环境影响。但是,生命损失、经济损失、环境影响又不能全面反映社会影响。例如:文化遗产的损失并不能归于生命损失、经济损失、环境影响中任何一个,因此,本文定义社会影响为:除以上3种损失外的其他影响主要包括政治影响、受灾

群众的心理健康、日常生活水平和生活质量的下降,以及无法补救的文物古迹、艺术珍品和稀有动植物等的损失等。

根据中华人民共和国国务院2007年颁布的《生

产安全事故报告和调查处理条例》和中华人民共和国水利部2007年发布《水库大坝安全管理应急预案编制导则(试行)》可知工程事故严重程度一般分为4个等级,见表1。

表 1 工程事故严重程度分级
Tab. 1 Classification of engineering accident severity

事故等级	具体描述
一般事故(等级Ⅰ)	3人以下死亡,或10人以下重伤,或1 000万元以下直接经济损失
较大事故(等级Ⅱ)	3人以上10人以下死亡,或10人以上50人以下重伤,或1 000万元以上5 000万元以下直接经济损失
重大事故(等级Ⅲ)	10人以上30人以下死亡,或50人以上100人以下重伤,或5 000万元以上1亿元以下直接经济损失
特别重大事故(等级Ⅳ)	30人以上死亡,或100人以上重伤,或1亿元以上直接经济损失

表1给出了生命损失、经济损失的各个等级的定量划分标准。但对于等级Ⅳ的评判标准,由于实际生活中不可能出现上限为无穷大的情况,否则评价将变得毫无意义^[11]。因此,对无上限的区间端点进行量化处理^[12-14],对于偶有超出等级Ⅳ上限的评价值,可直接取其隶属度为1;社会影响和环境影响尚无明确的定量指标,采用李雷等^[29]提出的社会、

环境影响要素赋值参考表,对所考虑的社会影响和环境影响的要素分别赋值并求其乘积,得到社会影响指数和环境影响指数。结合文献^[9,12,14]的等级划分标准对社会影响指数和环境影响指数进行等级划分,以实现定性指标与定量指标间的转化。基于上述分析,构建溃坝后果综合评价指标等级标准,见表2。

表 2 溃坝后果综合评价指标等级标准
Tab. 2 Comprehensive evaluation index grade standard of dam break consequences

事故等级	生命损失(人数)	经济损失/万元	社会影响指数	环境影响指数
一般事故(等级Ⅰ)	1~3	10~1 000	1~3	1~3
较大事故(等级Ⅱ)	3~10	1 000~5 000	3~8	3~12
重大事故(等级Ⅲ)	10~30	5 000~10 000	8~25	12~40
特别重大事故(等级Ⅳ)	30~100 000	10 000~1 000 000	25~100	40~100

2 变权集对-可拓耦合模型

2.1 确定指标变权权重

为弥补溃坝后果综合评价中常权权重的不足,采用变权理论对常权权重进行修正^[17-18]。设 X_j 为因素状态变量, $X_j=\{x_1, x_2, \cdots, x_m\}$; W'_j 为因素常权变量, $W'_j=\{w'_1, w'_2, \cdots, w'_m\}$; $S_j(X)$ 为状态变权向量, $S_j(X)=(S_1(X), S_2(X), \cdots, S_m(X))$,则变权向量 $W_j(X)=(\omega_1(X), \omega_2(X), \cdots, \omega_m(X))$ 如式(1)所示^[30]:

$$W_j(X) = \frac{w'_j \cdot S_j(X)}{\sum_{j=1}^m w'_j \cdot S_j(X)} = \left(\frac{w'_1 \cdot S_1(X)}{\sum_{j=1}^m w'_j \cdot S_j(X)}, \frac{w'_2 \cdot S_2(X)}{\sum_{j=1}^m w'_j \cdot S_j(X)}, \cdots, \frac{w'_m \cdot S_m(X)}{\sum_{j=1}^m w'_j \cdot S_j(X)} \right)$$

(1)

式中: w'_j 为因素常权变量 $W'_j=\{w'_1, w'_2, \cdots, w'_m\}$ 中第 j 个变量。指数型状态变权向量具有参数设置灵活、决策

要求体现明显、拟合能力强等优点,在众多研究中已得到广泛应用^[31-32]。选取 $S_j(X) = e^{\alpha x_j}$, α 为变权因子, $\alpha > 0$ 时,生成的是 m 维激励型状态变权向量; $\alpha < 0$ 时,生成的是 m 维惩罚型状态变权向量; $\alpha = 0$ 时,该模型变为了常权模型^[32]。溃坝后果综合评价中各评价指标的状态值越大,表示溃坝后果越严重。因此, $S_j(X)$ 应为激励性状态变权向量,取 $\alpha > 0$ 。当 $\alpha > 1$ 时,表示决策者已经走向极端,应当避免^[33],结合文献^[32-33]的研究,选取 $\alpha = 1$ 。

由于各评价指标量纲不一致,计算变权前可采用极差法对指标进行归一化处理,如式(2)所示:

$$x_i = \begin{cases} \frac{x'_i - a_{p_i}}{b_{p_i} - a_{p_i}}, & \text{极大型指标;} \\ \frac{b_{p_i} - x'_i}{b_{p_i} - a_{p_i}}, & \text{极小型指标} \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_i 为归一化后的评价指标值, x'_i 为归一化前的评价指标值, a_{p_i} 为评价等级下限值, b_{p_i} 为评价等级上限值。

2.2 建立集对-可拓耦合模型

2.2.1 集对分析

集对分析是通过联系数来描述对应两集合之间

的同、异、反三方面特征^[22-23],使用同一度、差异度、对立度3个概念定量描述评价指标集与目标集之间的关系。其同、异、反联系系数基本表达如式(3)所示:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj \quad (3)$$

式中: μ 为同、异、反联系系数; a 、 b 、 c 为联系分量,分别为对应两集合之间的同一度、差异度和对立度, $a, b, c \in [0, 1]$,且 a, b, c 满足归一化条件 $a + b + c = 1$; i 、 j 分别为差异度系数和对立度系数,且 $i \in [-1, 1]$, $j = -1$ 。此外, i 、 j 也可不取值,仅作为标记符号。

2.2.2 可拓理论

可拓学以物元理论和可拓数学为基础^[24-25]。对于评价样本 N ,其关于特征 C 的量值为 V ,以有序三元组 $R=(N, C, V)=(\text{事物}, \text{特征}, \text{量值})$ 作为描述事物的基本元,简称物元。若事物 N 以 m 个特征 $1, 2, \dots, m$ 和相应的量值 $V_1, V_2, \dots, V_m$ 描述,则可表示为如式(4)所示的形式^[25]:

$$R = \begin{bmatrix} N_k & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_m & V_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于评价问题,设 $N=\{N_1, N_2, \dots, N_K\}$ ($k=1, 2, \dots, K$)是所有类别(分级)的全体, C_j 为第 j ($j=1, 2, \dots, m$)个特

征(评价指标), $V_{jk}=(a_{jk}, b_{jk})$ 为事物 N_k 关于指标 C_j 的量值,则可构造经典域 R_K ,如式(5)所示^[25]:

$$R_K = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_K \\ C_1 & \langle a_{11}, b_{11} \rangle & \langle a_{12}, b_{12} \rangle & \cdots & \langle a_{1k}, b_{1k} \rangle \\ C_2 & \langle a_{21}, b_{21} \rangle & \langle a_{22}, b_{22} \rangle & \cdots & \langle a_{2k}, b_{2k} \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_m & \langle a_{m1}, b_{m1} \rangle & \langle a_{m2}, b_{m2} \rangle & \cdots & \langle a_{mk}, b_{mk} \rangle \end{bmatrix} \quad (5)$$

相应评价指标 C_j 的节域 R_m 如式(6)所示^[25]:

$$R_m = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_m & V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & \langle a_1, b_1 \rangle \\ & C_2 & \langle a_2, b_2 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_m & \langle a_m, b_m \rangle \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, N 为评价对象的全部等级, (a_m, b_m) 为评价指标 C_j 在某种条件下所取量值范围。

2.2.3 基于同异反分析构造联系隶属度函数

可拓学中评价与评价等级的关系主要有3类:位于可拓集合的正域、临界和负域,与集对分析的同伦性、差异性和对立性关系类似。因此,采用集对分析的同、异、反划分可拓集合的论域,当评价位于评价等级构成的可拓集合标准正域内为同一性,位于过渡正域内为差异性,而位于负域内为对立性,如图1所示。

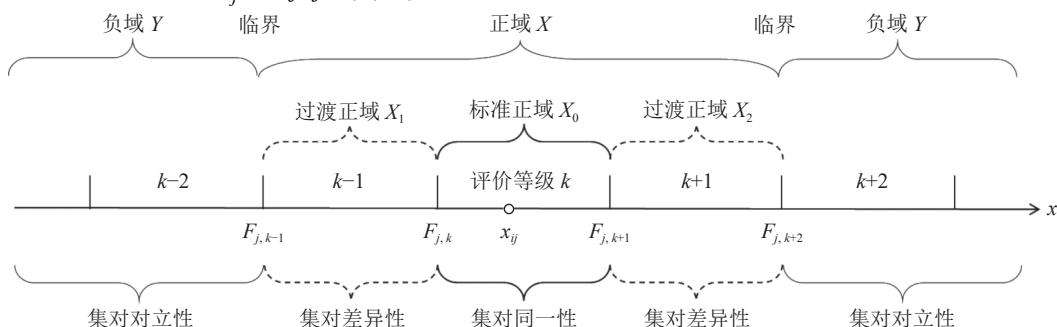


图1 集对-可拓耦合的对应关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of correspondence between set pair-extension coupling

根据图1,将溃坝后果各评价指标 C_j 的评价值 x_{ij} 与评价等级 k ($k=1, 2, \dots, K$)进行比较:

1)若评价值 x_{ij} 处于评价等级 k ($k=1, 2, \dots, K$)内,则表示其与等级 k 的关系为同,即位于评价等级构成的可拓集合标准正域 $X_0=(F_{j,k}, F_{j,k+1})$ 内,相应的联系隶属度函数如式(7)所示:

$$\mu_k(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{2(F_{j,k+1} - x_{ij})}{F_{j,k+1} - F_{j,k}}, & x_{ij} \geq \frac{F_{j,k} + F_{j,k+1}}{2}; \\ \frac{2(x_{ij} - F_{j,k})}{F_{j,k+1} - F_{j,k}}, & x_{ij} < \frac{F_{j,k} + F_{j,k+1}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $F_{j,k}$ 和 $F_{j,k+1}$ 为等级界限值, $\mu_k(x_{ij})$ 为评价对象 i 对评价等级 k 中的指标 j 形成的标准正域的联系隶属度,

$\mu_k(x_{ij})$ 的取值范围为 $(-1, 1)$ 。

2)若评价指标 C_j 的评价值 x_{ij} 处于评价等级 k 的相邻等级 $k-1$ ($k > 2$)或 $k+1$ 内时,也一定处于可拓集合的过渡正域 $X_1=(F_{j,k-1}, F_{j,k})$ 或 $X_2=(F_{j,k+1}, F_{j,k+2})$ 内,则其与评价等级 k 的关系为差异,相应的联系隶属度函数如式(8)所示:

$$\mu_k(x_{ij}) = \begin{cases} \frac{\rho(x_{ij}, X_0)}{\rho(x_{ij}, X) - \rho(x_{ij}, X_0)}, & \rho(x_{ij}, X_0) \neq \rho(x_{ij}, X); \\ -\rho(x_{ij}, X_0), & \rho(x_{ij}, X_0) = \rho(x_{ij}, X), x_{ij} \in X_0; \\ -1, & \rho(x_{ij}, X_0) = \rho(x_{ij}, X), x_{ij} \notin X_0, x_{ij} \in X \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\rho(x_{ij}, X_0) = \left| x_{ij} - \frac{F_{i,k} + F_{j,k+1}}{2} \right| - \frac{F_{i,k+1} - F_{j,k}}{2} \quad (9)$$

$$\rho(x_{ij}, X) = \left| x_{ij} - \frac{F_{i,k-1} + F_{j,k+2}}{2} \right| - \frac{F_{i,k+2} - F_{j,k-1}}{2} \quad (10)$$

式中： $F_{j,k-1}$ 和 $F_{j,k+2}$ 为等级界限值； $\rho(x_{ij}, X)$ 和 $\rho(x_{ij}, X_0)$ 为评价对象*i*的评价值 x_{ij} 对评价等级*k*中的*j*指标标准构成的可拓正域和标准正域的距离，当*k*=1时， $F_{j,k-1}$ 取 $F_{j,k}$ ；当*k*=*K*时， $F_{j,k+2}$ 取 $F_{j,k}$ 。

3)若评价指标*C_j*的评价值 x_{ij} 处于评价等级*k*的相邻等级*k*-2或*k*+2(*k*>2)内或者不在任何标准等级内，即在评价等级构成的可拓集合负域*Y*内，则其与评价标准等级*k*的关系为对立，相应的联系隶属度函数如式(11)所示：

$$\mu_k(x_{ij}) = -1 \quad (11)$$

2.3 确定评价等级

根据上述构建的评价模型计算集成可拓联系隶

属度 μ_k ，如式(12)所示：

$$\mu_k = \sum_{j=1}^m \omega_j \mu_k(x_{ij}) \quad (12)$$

式中， ω_j 为指标变权权重。

求得集成可拓联系隶属度后，按最大集成可拓联系隶属度原则，确定评级等级，如式(13)所示：

$$k = \max \{ \mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_k \} \quad (13)$$

式中，*k*为评价等级。

3 实例应用

3.1 工程概况

将上述评价模型应用于江西省龙山、长龙、下栏、石壁坑、灵潭5座水库溃坝后果综合评价。5座水库大坝的基本参数^[34]，及5座水库大坝的评价指标值^[11-14]

见表3、4。

表 3 5座水库大坝的基本参数

Tab. 3 Basic parameters of five reservoir dams							
水库名称	建成年份	坝型	总库容/(10 ⁸ m ³)	最大坝高/m	坝顶长/m	坝顶高程/m	是否已溃
龙山	1960	黏土心墙坝	0.2810	33.50	287.36	245.80	否
长龙	1960	土石混合坝	0.1685	42.96	170.00	215.78	否
下栏	1969	黏土斜墙堆石坝	0.1168	33.40	141.00	208.90	否
石壁坑	1971	心墙土坝(主坝)	0.5860	36.00	140.00	203.64	否
灵潭	1973	浆砌石重力坝	0.1500	38.40	132.50	397.72	否

表 4 5座水库大坝的评价指标值

Tab. 4 Evaluation index values of five reservoir dams				
水库名称	生命损失 (人数)	经济损失/ 亿元	社会影响 指数	环境影响 指数
龙山	887	25	1.43	34.85
长龙	454	35	1.43	19.28
下栏	735	25	1.43	13.82
石壁坑	975	41	1.43	9.68
灵潭	1 709	20	1.43	7.71

3.2 结果及对比分析

3.2.1 权重计算结果及对比

通过式(2)对指标值进行归一化处理，结果见表5。利用表5中数据和式(1)对常权权重 $W'_j=(w'_1, w'_2, w'_3, w'_4)=[0.636, 0.091, 0.136, 0.136]$ ^[11-12]进行修正，得到5座水库大坝评价指标变权权重，见表6和如图2所示。

由表5、6和图2可以看出：

1)对于单个水库，指标值归一化后状态值较大的指标，状态变权向量对其进行了一定程度的激励，提高了其指标权重值。而状态值相对较小的指标的权重值略有减小，即指标权重值随着指标评分值的

改变而有所变化，体现了评价对象在综合评价中的主动参与性，避免了较差指标的消极作用被较好指标掩盖，突出较差指标对评估结果的影响。

表 5 5座水库大坝评价指标值归一化处理结果

Tab. 5 Normalization results of dam evaluation index values of five reservoirs				
水库名称	生命损失 (人数)	经济损失/ 亿元	社会影响 指数	环境影响 指数
龙山	0.008 87	0.250 00	0.014 30	0.348 50
长龙	0.004 54	0.350 00	0.014 30	0.192 80
下栏	0.007 35	0.250 00	0.014 30	0.138 20
石壁坑	0.009 75	0.410 00	0.014 30	0.096 80
灵潭	0.017 09	0.200 00	0.014 30	0.077 10

2)对于不同水库，即使具有相同的评价指标体系，但由于不同水库的评价指标的状态值不同，进而造成指标权重值存在差异，体现了不同水库溃坝所造成的生命损失、经济损失、社会影响和环境影响严重程度各不一样的实际情况。由此可知，变权权重不仅考虑了评价指标本身的相对重要性，又能根据不同工程实际中评价指标的状态值的相对大小对常权权重进行一定程度上的修正。

表 6 5座水库大坝的指标常权权重和变权权重对比

Tab. 6 Comparison between constant weights and variable weights of corresponding indexes of five reservoir dams

指标权重	生命损失 (人数)	经济损失/ 亿元	社会影响 指数	环境影响 指数
常权权重	0.636	0.091	0.136	0.136
龙山水库变权权重	0.589	0.107	0.127	0.177
长龙水库变权权重	0.597	0.121	0.129	0.154
下栏水库变权权重	0.609	0.111	0.131	0.148
石壁坑水库变权权重	0.602	0.128	0.129	0.140
灵潭水库变权权重	0.620	0.107	0.132	0.141

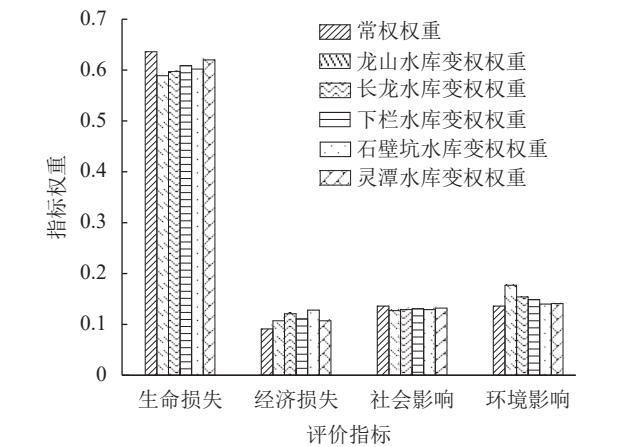


图 2 5座水库大坝的指标常权权重和变权权重对比

Fig. 2 Comparison of constant weights and variable weights of corresponding indexes of five reservoir dams

表 7 变权集对-可拓耦合方法与其他方法的综合评价结果及对比

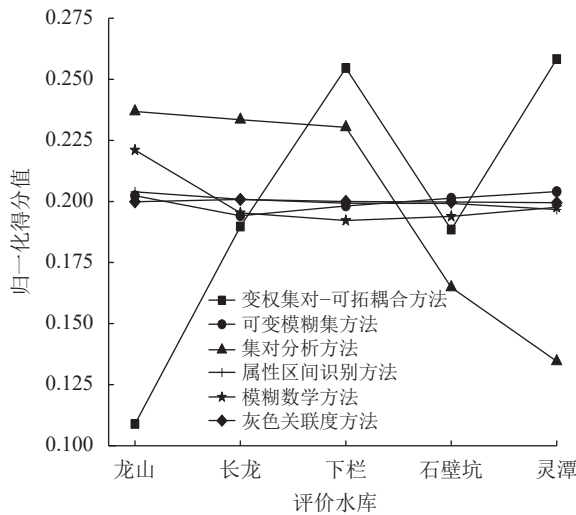
Tab. 7 Comparison between the comprehensive evaluation results based on variable weight set pair-extension coupling method and other methods

水库名	集成可拓联系隶属度				大坝溃坝后果严重程度评价等级					
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	变权集对-可拓耦合方法(最大集成可拓联系隶属度)	可变模糊集方法 ^[11] (级别特征值的均值)	集对分析方法 ^[12] (最大集对势)	属性区间识别方法 ^[13] (样本评分值)	模糊数学方法 ^[14] (最大隶属度)	灰色关联度方法 ^[15] (最大关联度)
龙山	-0.819	-0.940	-0.406	-0.089	等级Ⅳ (-0.089)	等级Ⅳ (3.587)	等级Ⅳ (105.022)	等级Ⅳ (3.342)	等级Ⅳ (0.5364)	等级Ⅳ (0.5027)
长龙	-0.816	-0.862	-0.400	-0.155	等级Ⅳ (-0.155)	等级Ⅲ, 高度倾向等级Ⅳ(3.441)	等级Ⅳ (103.511)	等级Ⅳ (3.292)	等级Ⅳ (0.4741)	等级Ⅳ (0.5049)
下栏	-0.812	-0.842	-0.468	-0.208	等级Ⅳ (-0.208)	等级Ⅳ (3.512)	等级Ⅳ (102.143)	等级Ⅳ (3.266)	等级Ⅳ (0.4667)	等级Ⅳ (0.5030)
石壁坑	-0.779	-0.759	-0.527	-0.154	等级Ⅳ (-0.154)	等级Ⅳ (3.568)	等级Ⅳ (73.079)	等级Ⅳ (3.264)	等级Ⅳ (0.4706)	等级Ⅳ (0.5023)
灵潭	-0.744	-0.696	-0.560	-0.211	等级Ⅳ (-0.211)	等级Ⅳ (3.617)	等级Ⅳ (59.669)	等级Ⅳ (3.224)	等级Ⅳ (0.4798)	等级Ⅳ (0.5015)

表 8 5座水库大坝在各种评价模型中所处最高等级得分的归一化处理结果及标准差

Tab. 8 Normalized results and standard deviation of the highest grade scores of five reservoir dams in various evaluation models

水库名称	变权集对-可拓耦合方法	可变模糊集方法	集对分析方法	属性区间识别方法	模糊数学方法	灰色关联度方法
龙山	0.1089	0.2024	0.2368	0.2039	0.2210	0.1999
长龙	0.1897	0.1941	0.2334	0.2009	0.1953	0.2008
下栏	0.2546	0.1981	0.2304	0.1993	0.1922	0.2000
石壁坑	0.1885	0.2013	0.1648	0.1992	0.1939	0.1998
灵潭	0.2583	0.2041	0.1346	0.1967	0.1976	0.1995
标准差	0.0546	0.0035	0.0422	0.0024	0.0106	0.0004



注: 本文模型得到的集成可拓联系隶属度均为负值, 所以归一化后得分值越小表示溃坝后果越严重。

图 3 归一化得分

Fig. 3 Normalized score

4 结 论

传统溃坝后果综合评价中存在着指标权重使用常权权重的不足, 及不确定性和不相容性共存等问题。采用指数型激励性状态变权向量对常权权重进行修正, 结合集对分析理论的同、异、反分析划分可拓集合的论域, 构建了基于变权集对-可拓耦合模型用于溃坝后果综合评价中。将该模型应用于江西省5座水库大坝溃坝后果综合评价中, 验证了模型的合理性和适用性。与其他评价模型相比, 该模型突出了较差指标在综合评价时的重要性, 避免了其消极作用被较好指标掩盖; 且得到的评价等级结果与其他综合评价模型基本一致, 但离散程度最高, 区分度更好。

参考文献:

- [1] Zhou Xingbo, Zhou Jianping, Du Xiaohu. Lessons from the oroville dam spillway failure analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(5): 650–660. [周兴波, 周建平, 杜效鹄. 美国奥罗维尔坝溢洪道事故分析与启示[J]. *水利学报*, 2019, 50(5): 650–660.]
- [2] Zhou Jianyin, Yao Shiming, Wang Min, et al. Review on overtopping failure and flood evolution of earth-rock dams[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 287–301. [周建银, 姚仕明, 王敏, 等. 土石坝漫顶溃决及洪水演进研究进展[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 287–301.]
- [3] Zhong Qiming, Chen Shengshui, Mei Shiang. Breach mechanism and breach process simulation of homogeneous cohesive earthen dam due to overtopping[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(5): 25–32. [钟启明, 陈生水, 梅世昂. 均质黏性土坝漫顶溃决机理及溃坝过程模拟[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 25–32.]
- [4] Ge Wei, Li Zongkun, Liang R Y, et al. Methodology for establishing risk criteria for dams in developing countries, case study of china[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(13): 4063–4074.
- [5] Li Zongkun, Ge Wei, Wang Juan, et al. Strategic consideration of dam safety management and risk management in China[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 589–595. [李宗坤, 葛巍, 王娟, 等. 中国大坝安全管理与风险管理的战略思考[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 589–595.]
- [6] Li Zongkun, Ge Wei, Wang Juan, et al. Risk criteria and application on reservoir dams in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(5): 567–573. [李宗坤, 葛巍, 王娟, 等. 中国水库大坝风险标准与应用研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(5): 567–573.]
- [7] Li Zongkun, Li Wei, Ge Wei. Weight analysis of influencing factors of dam break risk consequences[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18: 3355–3362.
- [8] Chen Zugu Y, Ping Ziyu, Wang Naixin, et al. An approach to quick and easy evaluation of the dam breach flood[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62(10): 1773–1782.
- [9] Cheng Cuiyun, Qian Xin, Sheng Jinbao. Dam-break impact severity degree assessment based on the attribute theory[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(11): 101–103. [程翠云, 钱新, 盛金保. 基于属性综合评价模型的水库溃坝后果评价[J]. *中国农村水利水电*, 2010(11): 101–103.]
- [10] Li Wei, Li Zongkun, Ge Wei, et al. Risk evaluation model of life loss caused by dam-break flood and its application[J]. *Water*, 2019, 11: 1359.
- [11] Li Shouyi, He Guanjie, Xia Ke, et al. A comprehensive hazard assessment model for the consequence to be caused by the dam collapse based on the theory of variable fuzzy sets[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(1): 1–7. [李守义, 何冠洁, 夏可, 等. 基于可变模糊集理论的溃坝后果综合评价[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(1): 1–7.]
- [12] Li Zongkun, Li Qi, Ge Wei, et al. The comprehensive assessment of dam risk consequences caused by the dam failure based on the set pair analysis[J]. *Yellow River*, 2016, 38(9): 111–114. [李宗坤, 李奇, 葛巍, 等. 基于集对分析的大坝风险后果综合评价[J]. *人民黄河*, 2016, 38(9): 111–114.]
- [13] Zou Qiang, Zhou Jianzhong, Yang Xiaoling, et al. A comprehensive assessment model for severity degree of dam failure impact based on attribute interval recognition theory[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(2): 45–50. [邹强, 周建中, 杨小玲, 等. 属性区间识别模型在溃坝后果综合评价中的应用[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(2): 45–50.]
- [14] Sun Weiwei, Li Lei. Comprehensive hazard assessment model for consequences caused by dam failure based on fuzzy mathematics method[J]. *Hydro-Science and Engineer-*

- ing,2010(4):16–20.[孙玮玮,李雷.基于模糊数学理论的大坝风险后果综合评价[J].*水利水运工程学报*,2010(4):16–20.]
- [15] Sun Weiwei,Li Lei,Zheng Haoyao.Dam risk consequences comprehensive evaluation model based on the method of gray correlation[J].*Yellow River*,2012,34(4):102–104.[孙玮玮,李雷,郑昊尧.基于灰色关联度法的大坝风险后果综合评价[J].*人民黄河*,2012,34(4):102–104.]
- [16] Zeng Yifan,Wu Qiang,Du Xin,et al.Further research on “water-richness index method” for evaluation of aquifer water abundance[J].*Journal of China Coal Society*,2020,45(7):2423–2431.[曾一凡,武强,杜鑫,等.再论含水层富水性评价的“富水性指数法”[J].*煤炭学报*,2020,45(7):2423–2431.]
- [17] 汪培庄.模糊集与随机集落影[M].北京:北京师范大学出版社,1985.
- [18] Li Hongxing,Li Lingxia,Wang Jiayin,et al.Fuzzy decision making based on variable weights[J].*Mathematical & Computer Modelling*,2004,39(2/3):163–179.
- [19] Lin Chunjin,Zhang Meng,Zhou Zongqing,et al.A new quantitative method for risk assessment of water inrush in karst tunnels based on variable weight function and improved cloud model[J].*Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*,2020,95:103136.
- [20] Yan Qingyou,Zhang Meijuan,Li Wei,et al.Risk assessment of new energy vehicle supply chain based on variable weight theory and cloud model:A case study in China[J].*Sustainability*,2020,12(8):3150.
- [21] Niu Qiang,Yu Li,Jie Qiao,et al.An urban eco-environmental sensitive areas assessment method based on variable weights combination[J].*Environment Development and Sustainability*,2020,22(3):2069–2085.
- [22] Wu Meimei,Ge Wei,Li Zongkun,et al.Improved set pair analysis and its application to environmental impact evaluation of dam break[J].*Water*,2019,11(4):821.
- [23] 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.
- [24] Zhou Yunfei,Hui Xiaocui.Fault diagnosis method of large-scale complex electromechanical system based on extension neural network[J].*Cluster Computing*,2019,22(2):2897–2906.
- [25] Xiao Qiang,He Ruichun,Ma Changxi,et al.Evaluation of urban taxi-carpooling matching schemes based on entropy weight fuzzy matter-element[J].*Applied Soft Computing Journal*,2019,81:105493.
- [26] Ge Wei,Jiao Yutie,Li Zongkun,et al.Status and development trend of research on risk consequences caused by dam breach[J].*Advances in Water Science*,2020,31(1):143–151.[葛巍,焦余铁,李宗坤,等.溃坝风险后果研究现状与发展趋势[J].*水科学进展*,2020,31(1):143–151.]
- [27] 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.
- [28] 中华人民共和国水利部.防洪风险评价导则:SL 602—2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [29] 李雷,王仁钟,盛金保,等.大坝风险评价与风险管理[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [30] 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.
- [31] Liu Shiliang,Li Wenping.Indicators sensitivity analysis for environmental engineering geological patterns caused by underground coal mining with integrating variable weight theory and improved matter-element extension model[J].*Science of the Total Environment*,2019,686:606–618.
- [32] Chen Jianhong,Chen Yi,Yang Shan,et al.A prediction model on rockburst intensity grade based on variable weight and matter-element extension[J].*Plos One*,2019,14(6):0218525.
- [33] Nie Xingxin,Zhang Jingjing.Risk assessment for the safety production in the open-pit mines based on the improved matter-element extension theory[J].*Journal of Safety and Environment*,2019,19(4):1140–1148.[聂兴信,张婧静.基于改进物元可拓理论的露天矿山安全生产风险等级评定[J].*安全与环境学报*,2019,19(4):1140–1148.]
- [34] Li Qi.Dam risk consequence evaluation model based on set pair analysis[D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2017.[李奇.基于集对分析的大坝风险后果评价模型研究[D].郑州:郑州大学,2017.]

(编辑 张 琼)

引用格式: Li Zongkun,Mo Xiangming,Ge Wei,et al.Comprehensive evaluation of dam-break consequences based on variable weight set pair-extension 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.]