

土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型

周兰庭, 郭枫, 王浩

(河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要:针对土石坝运行安全评价中指标间相互影响、主客观权重赋值不够合理以及隶属区间模糊性等问题,提出了一种土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型。以运行期土石坝为对象,构建了土石坝安全评价指标体系,分别采用G1法和改进熵权法对评价指标进行主客观赋权,融合博弈论思想求解最优权重组合系数,并引入云模型理论降低评价过程中隶属区间的模糊性。对某土石坝安全状态进行评价并与两种传统组合赋权法进行了对比,结果表明,3种评价方法的评价结果相近且与实际情况相符,但改进组合赋权-云模型考虑了评价指标间的关联性,运用博弈论思想使主客观权重赋值更加合理,能更客观地反映土石坝的真实运行状态。

关键词:土石坝运行安全评价;组合赋权;云模型;G1法;改进熵权法;博弈论

中图分类号:TV698

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)06-0086-07

Improved combination weighting-cloud model for operation safety evaluation of earth-rockfill dams//ZHOU
Lanting, GUO Feng, WANG Hao(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing
210098, China)

Abstract: Aiming at the problems of mutual influence between indexes, unreasonable assignment of subjective and objective weights and fuzziness of membership interval in operation safety evaluation of earth-rockfill dams, an improved combination weighting-cloud model for operation safety evaluation of earth-rock dams was proposed. Taking an earth-rockfill dam in the operation period as an object, the safety evaluation index system of the earth-rockfill dam was constructed. The subjective and objective weights of each evaluation index were calculated by the G1 method and the improved entropy weight method. The game theory was used to solve the optimal weight combination coefficient, and the cloud model theory was introduced to reduce the fuzziness of the membership interval in the evaluation process. The safety state of an earth-rockfill dam was evaluated and compared with those obtained from two traditional combination weighting methods. The results show that the evaluation results of three evaluation methods are similar and consistent with the actual situation. However, the improved combination weighting-cloud model considers the correlation between evaluation indexes, and the use of game theory makes the subjective and objective weight assignment more reasonable, which can more objectively reflect the actual operation state of the earth-rockfill dam.

Key words: operation safety evaluation of earth-rockfill dam; combination weighting; cloud model; G1 method; improved entropy weight method; game theory

水库大坝集经济效益、社会效益与环境效益于一身,在防洪灌溉、供水发电、航运养殖以及生态保护等方面具有重要作用。中国大多数土石坝修建于20世纪六七十年代,由于当时的技术落后且管理效率较低,目前一些土石坝出现了不同程度的损坏,存在溃坝的威胁。定期开展老旧和病险水库大坝的安全评估和鉴定工作,及时识别和处理安全隐患,是确保土石坝安全运行和社会稳定的重要措施。

为做好大坝安全鉴定工作、保障水库大坝安全

规范运行,水利部制定了SL 258—2017《水库大坝安全评价导则》(以下简称《导则》)。《导则》综合考虑了工程质量、结构安全、防洪能力等多方面因素,为土石坝的安全评价提供了依据。由于土石坝结构及其工作条件的复杂性,土石坝运行性态的评价存在着许多模糊性和随机性。为了降低这些随机性和模糊性,许多学者将云模型理论引入到大坝安全评价领域^[1-3],并取得了显著成果。在云模型评价中,权重的确定是一个关键问题。传统的权重计算方法

基金项目:国家自然科学基金项目(51209078)

作者简介:周兰庭(1975—),女,副教授,博士,主要从事大坝安全监控和水利水电建设管理研究。E-mail:ltzhou@hhu.edu.cn

通信作者:郭枫(2000—),男,硕士研究生,主要从事水利水电工程建设与管理研究。E-mail:gfl029510342@163.com

分为主观赋权法和客观赋权法,主观赋权法过于依赖专家的主观经验,赋权结果易受专家专业水平影响;而客观赋权法易忽略数据之间的差异性,对输入数据的微小变化非常敏感,导致评价结果极不稳定。

针对单一使用主观或客观赋权法存在的不足,多种组合赋权法得到了广泛运用。组合赋权法结合了主客观赋权各自的优点,综合考虑了实际工程数据和专家意见,使评价指标的赋权实现了主客观的统一。近年来,运用组合赋权法对大坝安全评价指标进行赋权的研究也取得了进展。例如:王媛等^[4]利用层次分析法与熵权法组合计算各评价指标权重,提出了一种基于层次分析法-云模型、融合现场监测与检测信息的综合评价方法;宋亮亮等^[5]采用程序关系法以及决策试验和评价实验法获得评价指标的独立权重及关联权重,并对江都水利枢纽工程的运行安全韧性进行了评价;王硕等^[6]提出了一种改进均衡系数的变权层次分析法,构建了水库安全评价层次结构模型;朱文锋等^[7]为了弥补层次分析法过于依赖专家主观经验的缺陷,引入决策试验和评价实验法对权重结果进行优化;郭金等^[8]采用差异系数法对主客观权重进行线性组合赋权,建立了堤防的风险评价模型。上述组合赋权法通常是单独处理每个指标,未考虑评价指标间的关联性,且对于组合赋权中主客观权重的分配都是人为主观确定的,缺乏必要的理论依据,同时在评价指标隶属度确定过程中对于模糊性和随机性的考虑也有所欠缺。

本文利用博弈论原理^[9],考虑多个评价指标间的相互影响,通过平衡基于序关系法与改进熵权法得到的主客观权重,基于云模型理论构建土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型,并通过实际工程验证了该模型的优越性和可靠性。

1 土石坝运行安全评价指标体系及评价标准

1.1 评价指标体系

评价指标体系的建立是对土石坝运行安全进行评价的基础。大部分的土石坝运行安全评价方法中评价指标的确定依赖于主观经验,脱离了现行设计

规范或评价标准,会影响大坝运行安全评价的全面性和结果的科学性。本文依据《导则》,同时参考水库大坝实际情况及相关研究成果^[10-15],构建了以土石坝运行安全评价为总目标,包括工程质量、运行管理、防洪能力、渗流安全、结构安全和金属结构安全6个一级指标、21个二级指标的土石坝运行安全评价指标体系,如图1所示。

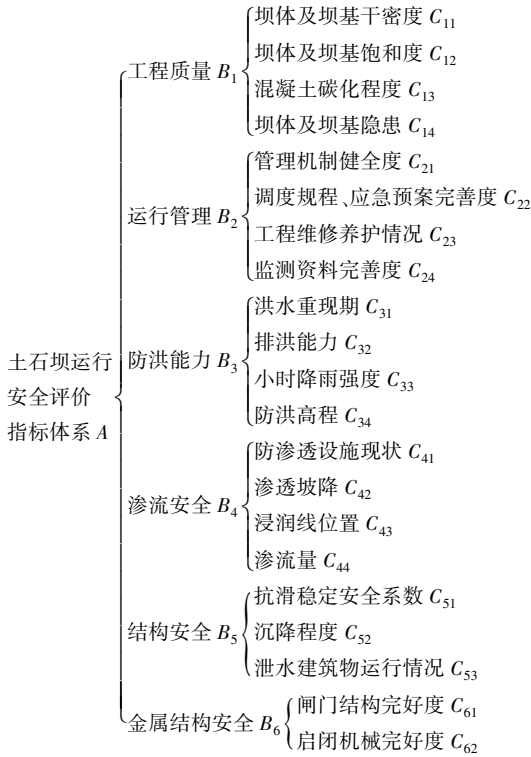


图1 土石坝运行安全评价指标体系

1.2 评价等级与标准

根据《导则》及相关资料,土石坝安全类别分为一类、二类和三类。为了更具体描述土石坝的安全状况,将待评价土石坝的安全等级细分为 I ~ V 共5个等级,并确定每个安全等级所对应的评分区间以及土石坝运行状态,如表1所示。

参考国家现行的规范(如《导则》、SL 274—2020《碾压式土石坝设计规范》、SL 252—2017《水利水电工程等级划分及洪水标准》等)、相关研究成果^[16-18]和水利领域专家经验,确定评价指标的评价内容及等级划分标准,如表2所示。

表1 土石坝运行安全等级分类

安全类别	安全等级	安全状况	评分区间	运行状态
一类	I	安全	[90,100]	土石坝运行状态良好,监测系统完善,坝体及坝基质量无隐患,防洪、抗震等复核计算均满足规范要求,维修养护到位,正常运行
	II	较安全	[80,90)	土石坝运行状态较好,坝体及坝基质量有较小隐患,或监测等管理设施不够完善,但水库能正常运行,需进行修补
二类	III	一般安全	[60,80)	土石坝运行状态一般,存在安全隐患,应再次到现场进行安全检查,采取除险加固措施,排除险情
三类	IV	较危险	[30,60)	土石坝运行状态较差,存在严重安全隐患,应组织有关部门进行维修养护,排除险情
	V	危险	[0,30)	土石坝面临溃坝风险,应立即停止运行,采取除险加固措施排除险情或报废处理

表 2 评价指标等级划分标准

等级	$C_{11}/(\text{g}/\text{cm}^3)$	C_{12}	$C_{13}/\%$	C_{14}	$C_{21}/\%$	$C_{22}/\%$	C_{23}	$C_{24}/\%$	C_{31}/a	$C_{32}/\%$	C_{33}/mm
I	0.8~<1	0~<0.5	0~<15	无隐患	95~100	95~100	养护修理及时	95~100	100~200	≥100	≥200
II	0.6~<0.8	0.5~<0.6	15~<30	无明显沉降或裂缝	90~<95	80~<95	养护修理较及时	90~<95	50~<100	95~<100	150~<200
III	0.4~<0.6	0.6~<0.7	30~<60	有轻微沉降滑动	80~<90	60~<80	维修较及时,有隐患	70~<90	30~<50	90~<95	100~<150
IV	0.2~<0.4	0.7~<0.8	60~<80	有明显沉降滑动	60~<80	40~<60	养护修理不及时	60~<70	20~<30	80~<90	50~<100
V	0~<0.2	0.8~1.0	80~100	有明显沉降滑动及裂缝	0~<60	0~<40	无养护修理	0~<60	10~<20	0~<80	0~<50
等级	C_{34}/m	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{51}	$C_{52}/\%$	C_{53}	C_{61}	C_{62}	
I	<(K-2)	完善	0~<1.0	等于设计值	极小	满足规范要求	0~1	结构稳定正常运行	完好	完好	
II	(K-2)~<(K-1)	基本完善	1.0~<1.1	略大于设计值	很小	略小于规范要求	1~<1.5	细微缺陷正常运行	较完好	略有损坏	
III	(K-1)~<(K-0.5)	部分完善	1.1~<1.2	大于设计值	小	小于规范要求	1.5~<2	有缺陷但能运行	一定变形	一定损坏	
IV	(K-0.5)~K	少部分完善	1.2~<1.3	低于设计值	较大	远小于规范要求	2~<3	较大缺陷影响运行	严重变形	严重损坏	
V	>K	不完善	≥1.3	远低于设计值	极大	远远小于规范要求	≥3	重大缺陷无法运行	无法使用	无法使用	

注： C_{12} 各等级评价值为标准化的数据； C_{13} 混凝土碳化程度为碳化深度与保护层厚度的比值； C_{14} 坝体及坝基隐患指其是否有明显沉降、滑动或贯穿性裂缝； C_{32} 排洪能力为实际排洪量与设计工况排洪量的比值； C_{34} 防洪高程为坝前达到的最高水位， K 为坝顶最高设计高程。

2 评价指标权重的计算

评价体系中各评价指标均需赋予权重,评价指标权重的确定方法有层次分析法、变异系数法等,本文采用 G1 法与改进熵权法分别计算各评价指标的主客观权重,再利用博弈论思想进行组合赋权。改进组合赋权法计算权重既可保证评价体系中各评价指标的重要程度有区分,又使权重计算结果具备客观性。

步骤 1 应用 G1 法确定评价指标主观权重。G1 法也称为序关系法,是基于层次分析法改进的主观赋值法,与层次分析法相比,G1 法计算更简洁高效,且避免了一致性检验的难题^[19]。采用 G1 法对评价指标进行重要性排序,通过计算相邻指标间相对重要性比值从而得到评价指标主观权重。

步骤 2 运用改进熵权法确定评价指标客观权重。熵权法是一种利用评价指标的实际值来度量其有效信息量并确定相应权重的方法^[20]。传统的熵权法具有一定的局限性,例如:当评价指标取值为 0 或 1 时,需要将对应的熵设为 0,这些特殊情况均不符合实际,为了使其应用更加合理,采用改进熵权法确定客观权重。构建包含 m 个评价指标、 n 个评价对象的判断矩阵 C ,经标准化处理、熵值计算求得评价指标客观权重。为了保证数据的完整性和可行性,防止标准化后指标出现 0 值,对熵权法进行改进,对所有标准化后的数据都加上 0.001,使其计算过程更加合理。

步骤 3 采用博弈论思想确定评价指标综合权重。为了使主客观权重赋值更加合理,在步骤 1 和步骤 2 分别计算评价指标主客观权重的基础上,构造出评价指标基本权重集,引入博弈论思想^[21]在 G1 法和改进熵权法所得的主客观权重之间相互博弈,找到纳什均衡点,极小化综合权重和各方法权重

之间的偏差,求解出最优状态下的线性组合系数 λ_1, λ_2 ,再对最优组合系数进行标准化处理得到 λ_1^*, λ_2^* ,利用式(1)计算得到更科学合理的评价指标综合权重。

$$W_k = \lambda_1^* w_{1k} + \lambda_2^* w_{2k} \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

式中: W_k 为第 k 个评价指标的综合权重; w_{1k}, w_{2k} 分别为第 k 个评价指标的主客观权重值; n 为评价指标总数。

3 评价流程

云模型是李德毅教授等^[22]提出的一种数学模型,它能够将评价中不确定的语言表达转换成数量分析,以减小评价指标的随机性和模糊性。假设有一个定量论域 U 和一个模糊集合 C ,任何定量值 x 在 C 中都有唯一的隶属度 $\mu(x)$,其值在 $[0, 1]$ 之间。这个隶属度 $\mu(x)$ 是一个趋向稳定的随机数,其在论域 U 上的分布称为隶属云。因此,对于 U 中的所有 $x, \mu(x)$ 是一个从 U 到 $[0, 1]$ 的映射,即 $x \rightarrow \mu(x)$ 。

在计算评价指标综合权重的基础上,利用云模型获取综合评分及其隶属度,对土石坝运行安全情况进行分析,即利用改进组合赋权-云模型对土石坝运行安全具体情况进行分析评价。基于改进组合赋权-云模型的土石坝运行安全评价步骤为:确定评语集、计算标准云、计算评价指标云和综合评价云、获得评价结果,隶属度计算。其中,在计算评价指标云时,为了保证超熵的平方不会出现小于 0 的情形,引用杨洁等^[23]提出的多步式逆向云变换算法,让云模型具有更强的稳定性。

为验证本文模型的优越性,选用文献[4, 7]采用的组合赋权法进行对比分析。指标评估云模型与标准云模型的隶属度计算公式见文献[24]。评价流程图见图 2。

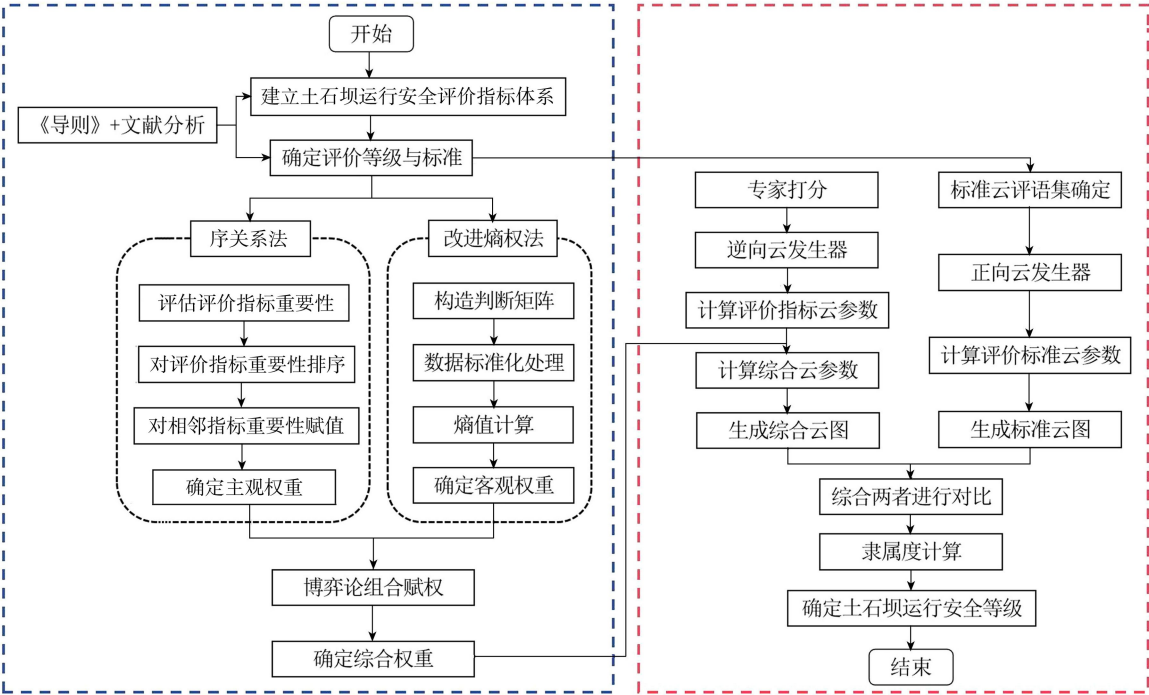


图2 土石坝运行安全评价流程

4 实例分析

4.1 研究区概况

某土石坝位于孝妇河一级支流范阳河中游,控制流域面积 288 km²。该土石设计洪水标准为 100 年一遇,校核洪水标准为 2000 年一遇,2016 年 10 月水库增容后兴利水位抬高为 83.00 m,兴利库容 5 840 万 m³,总库容 9 993 万 m³,整个枢纽工程由大坝、溢洪道(闸)和放水洞三部分组成,是一座集防洪、灌溉、工业供水等功能为一体的中型水库。

4.2 评价指标权重的确定

邀请多位具有大坝安全评价丰富经验的专家先对该土石坝运行安全评价指标的重要性排序,基于 G1 法确定主观权重,基于改进熵权法确定客观权重,基于博弈论思想及式(1)计算得到综合权重,结果见表 3。

4.3 评价等级确定

4.3.1 评语集确定及评价标准云计算

标准云是土石坝运行安全评价的基准参照图,参考《导则》,结合专家意见,将土石坝运行安全的等级划分为 [90, 100]、[80, 90)、[60, 80)、[30, 60)、[0, 30) 五个评级区间,分别对应 I ~ V 5 个安全等级。计算出各评级区间的标准云数字特征如下: I 级 (95, 1. 67, 0. 05), II 级 (85, 1. 67, 0. 05), III 级 (70, 3. 33, 0. 05), IV 级 (45, 5. 00, 0. 05), V 级 (15, 5. 00, 0. 05), 利用正向云发生器生成标准云图。

4.3.2 评价指标云和综合云计算

基于该土石坝安全鉴定报告,邀请 10 位大坝安全评价领域专家对其 2017—2022 年安全运行状况进行打分,综合 10 位专家的打分结果,计算各评价指标云数字特征参数。最后,计算得到该土石坝

表 3 土石坝安全评价指标权重

评价指标	G1 法权重	改进熵权法权重	综合权重	评价指标	G1 法权重	改进熵权法权重	综合权重
C_{11}	0.067 3	0.056 9	0.066 0	C_{34}	0.016 9	0.054 4	0.021 5
C_{12}	0.026 4	0.027 6	0.026 6	C_{41}	0.106 6	0.094 1	0.105 0
C_{13}	0.037 0	0.038 9	0.037 2	C_{42}	0.088 8	0.030 0	0.081 6
C_{14}	0.037 0	0.036 6	0.036 9	C_{43}	0.088 8	0.036 6	0.082 4
C_{21}	0.003 0	0.065 3	0.010 6	C_{44}	0.048 1	0.030 0	0.045 8
C_{22}	0.005 5	0.028 2	0.008 3	C_{51}	0.140 7	0.090 7	0.134 5
C_{23}	0.007 7	0.040 7	0.011 8	C_{52}	0.127 9	0.029 3	0.115 8
C_{24}	0.013 0	0.044 7	0.016 9	C_{53}	0.020 3	0.026 7	0.021 1
C_{31}	0.074 0	0.032 6	0.068 9	C_{61}	0.004 3	0.040 2	0.008 7
C_{32}	0.074 0	0.088 2	0.075 7	C_{62}	0.003 5	0.058 3	0.010 3
C_{33}	0.009 3	0.050 1	0.014 3				

2022 年运行安全的综合云模型数字特征为 (93.8523, 0.8698, 0.1699)。同理可得 2017—2021 年的综合云数字特征分别为 (83.5728, 0.9301, 0.2097)、(84.5853, 1.0008, 0.3503)、(86.6803, 1.2317, 0.2051)、(88.5930, 1.3299, 0.3497)、(90.7278, 1.2103, 0.2797), 利用 MATLAB 绘制综合评价云图并与标准云图进行对比, 结果如图 3 所示 (图中黄色为标准云图)。

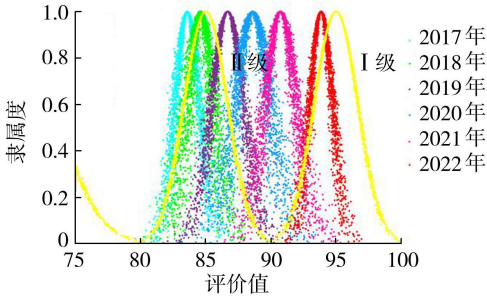
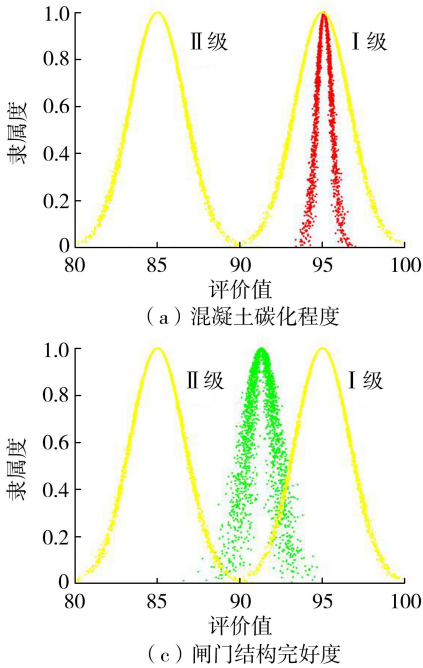


图 3 综合评价云图

4.4 结果分析

由图 3 可知, 该土石坝各年综合评价得分结果云滴较密集, 表明改进组合赋权-云模型的评价结果稳定, 且该土石坝运行安全的云图从 2017—2022 年不断向右偏移, 2022 年评价等级为 I 级。2016 年该土石坝实施了雨洪增容工程, 进一步提高了对洪水的调蓄和雨洪资源利用能力; 同时建设了智慧水库系统, 将水库周边视频监控、雨水情遥测、水位观测、泵站供水监控等进行了统一整合, 大坝管理水平取得显著提高。2022 年该土石坝安全鉴定评价结果为一类坝, 模型评价结果与工程实际情况一致, 表明构建的评价模型具有较强的实用性。



为进一步分析该土石坝运行安全具体情况, 找出相对薄弱环节, 对其薄弱原因进行分析并提出有效的处置方案, 以 2022 年为例, 分别对其二级指标进行分析, 二级指标中评分前二名为混凝土碳化强度、排洪能力, 后二名为闸门结构完好度和启闭机械完好度, 其评价云图见图 4 (图中黄色为标准云图)。由图 4 可知, 该土石坝闸门结构以及启闭机械相对薄弱, 需加强对闸门及启闭机械的安全监测及维修保养, 确保其强度、刚度及稳定性符合规范要求以及闸门在紧急情况下能够正常开启。

4.5 评价方法对比分析

为验证本文提出的改进组合赋权-云模型的优越性和有效性, 以 2022 年该土石坝工程数据为例, 选用文献[4,7]采用的组合赋权法确定权重进行对比。文献[4]采用层次分析法与熵权法组合计算各评价指标权重; 文献[7]将层次分析法确定的各因素权重记为初始权重, 在此基础上采用决策试验和评价实验法对权重进行优化得到综合权重。将上述传统组合赋权法获取的权重值输入到本文云模型中, 借助逆向云发生器计算得到其对应的特征值分别为 (93.3786, 1.3330, 0.7123) 和 (93.5618, 1.2716, 0.6968)。

计算两种传统组合赋权法相对应的综合评价云隶属度, 进一步确定该土石坝运行安全等级, 结果如表 4 所示。根据最大隶属度原则, 可以判定 2022 年该土石坝运行安全等级均为 I 级, 与工程实际情况一致, 验证了方法的可行性。其中, 本文方法得到的云隶属度要大于文献[4,7]的计算结果, 这是由于

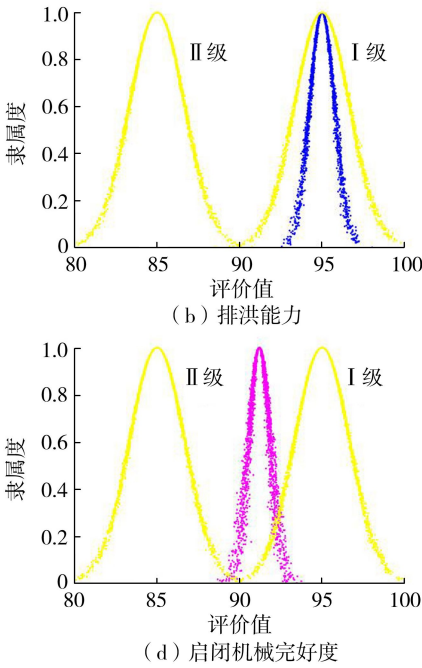


图 4 部分二级指标评价云图

本文引入了博弈论原理,考虑了多个评价指标间的相互影响,在主客观权重之间进行博弈,寻求它们之间的协调和平衡,进一步增加了评价结果的可靠性。与其他两种方法相比,本文方法的优势在于:①在确定评价指标主观权重时采用序关系法,解决了文献[4,7]中层次分析法一致性检验的难题,计算过程更加简洁高效。同时,采用改进熵权法确定评价指标的客观权重,克服了熵权法特殊约定的局限性。②文献[4,7]所用组合赋权法对于主客观权重的分配通常都是人为主观确定的,缺乏一定的理论依据,本文基于博弈论原理考虑了多个评价指标间的相互影响,既弥补了主观赋权法中随意性太强的缺点,又考虑了客观赋权法中数据的波动性影响,通过寻找两种赋权方法之间的协调与平衡,得到最优权重组合系数。

方法	不同土石坝安全等级的隶属度					评价结果
	I级	II级	III级	IV级	V级	
本文	0.740 3	0.000 15	0	0	0	I级
文献[4]	0.576 5	0.002 50	0	0	0	I级
文献[7]	0.608 9	0.002 20	0	0	0	I级

5 结 语

针对土石坝运行安全评价中评价指标间相互关联、主客观权重赋值不够合理以及隶属区间模糊性等问题,本文提出了一种土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型,并通过实证分析对所提出的模型进行了验证。本文依据《导则》和相关文献确定了土石坝运行安全评价指标体系,同时参考工程实际情况,明确了评价指标的内容及等级划分,综合运用基于 G1 法、改进熵权法和博弈论的组合赋权法,通过博弈过程中的交互作用考虑评价指标之间的相互影响,确定了最优组合权重,使评价指标权重的确定更加科学。同时,引入云模型理论确定隶属度,充分减小了隶属区间的模糊性,并可生成云图更加直观地展示评价结果。以孝妇河流域某土石坝为例进行了验证,并与两种传统组合赋权法进行了对比,结果表明,3 种方法对该土石坝的评价结果均为 I 级,与工程实际相符,验证了本文方法的有效性与可行性。同时,改进组合赋权-云模型考虑了评价指标间的关联性,避免了传统组合赋权法中主客观权重赋值不够合理的缺陷,得到的云隶属度较大,能更真实地反映土石坝运行状态。

参考文献:

[1] 高强,彭秀华. 基于云模型-熵权法的大坝风险等级评价[J]. 人民长江,2023,54(11):208-213. (GAO Qiang, PENG Xiuhua. Dam risk level evaluation based on cloud

model-entropy weight method[J]. Yangtze River,2023,54(11):208-213. (in Chinese))

[2] 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. (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. (in Chinese))

[3] 陈泳江,汪魁,赵明阶,等. 基于云模型-模糊 FMECA 法的水库大坝安全性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(4):30-36. (CHEN Yongjiang,WANG Kui,ZHAO Mingjie,et al. Safety analysis of reservoir dams based on cloud model-fuzzy FMECA method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024,43(4):30-36. (in Chinese))

[4] 王媛,刘佳豪,郝泽嘉,等. 基于 AHP-云模型的大型输水倒虹吸安全综合评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):79-84. (WANG Yuan, LIU Jiahao, HAO Zejia,et al. Comprehensive safety evaluation of large water conveyance inverted siphon based on AHP-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):79-84. (in Chinese))

[5] 宋亮亮,张劲松,杜建波,等. 基于云模型的水利工程运行安全韧性评价[J]. 水资源保护,2023,39(2):208-214. (SONG Liangliang,ZHANG Jinsong, DU Jianbo,et al. Assessment of operation safety resilience of water conservancy projects based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 208-214. (in Chinese))

[6] 王硕,沈振中,张文兵,等. 一种分析大坝安全状况的改进变权层次分析法[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):97-103. (WANG Shuo,SHEN Zhenzhong,ZHANG Wenbing,et al. An improved variable weight analytic hierarchy process for dam safety analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (3): 97-103. (in Chinese))

[7] 朱文锋,高超丹,庄克云,等. 基于优化 AHP 及云模型的大坝安全综合评价[J]. 中国农村水利水电,2019(6):125-130. (ZHU Wenfeng,GAO Chaodan,ZHUANG Keyun,et al. Comprehensive evaluation of dam safety based on optimized AHP and cloud model[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(6):125-130. (in Chinese))

[8] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(6):117-122. (in Chinese))

[9] 任楠波,刘宏权,潘增辉,等. 基于 DPSIR-博弈论组合赋权 TOPSIS 模型的河北省水资源保障度演进评价[J].

- 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(5):873-885. (REN Nanbo, LIU Hongquan, PAN Zenghui, et al. Evaluation on the evolution of water resources security degree in Hebei Province based on DPSIR-game theory combined weighting TOPSIS model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5):873-885. (in Chinese))
- [10] 张秋文,章永志,钟鸣. 基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价[J]. 水利学报,2014,45(1):87-95. (ZHANG Qiuwen, ZHANG Yongzhi, ZHONG Ming. A cloud model based approach for multi-hierarchy fuzzy comprehensive evaluation of reservoir-induced seismic risk [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(1):87-95. (in Chinese))
- [11] 王肖鑫,岑威钧,晏成明,等. 基于改进赋权的山区堤防安全云模型评价方法[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):58-63. (WANG Xiaoxin, CEN Weijun, YAN Chengming, et al. Cloud model evaluation method of levee safety in mountain area based on improved weighting[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5):58-63. (in Chinese))
- [12] 赵二峰,顾冲时. 碾压混凝土坝安全服役关键技术研究进展[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):11-20. (ZHAO Erfeng, GU Chongshi. Review on key technologies for safe operation of roller compacted concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):11-20. (in Chinese))
- [13] 周海怡,李淑祎,蔡先锋,等. 基于层次分析法和模糊理论的小型水库土石坝安全评价[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(4):167-174. (ZHOU Haiyi, LI Shuyi, CAI Xianfeng, et al. Safety evaluation of small earth-rockfill dams based on analytical hierarchy process method and fuzzy theory [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2023, 34(4):167-174. (in Chinese))
- [14] 吴胜文,秦鹏,高健,等. 熵权-集对分析方法在大坝运行风险评价中的应用[J]. 长江科学院院报,2016,33(6):36-40. (WU Shengwen, QIN Peng, GAO Jian, et al. Application of entropy weight and set pair analysis theory to risk assessment of dam operation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(6):36-40. (in Chinese))
- [15] 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. (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. (in Chinese))
- [16] 贡力,路瑞琴,靳春玲,等. 基于博弈-改进可拓理论的寒冷地区长距离明渠冬季运行安全评价[J]. 自然灾害学报,2019,28(6):81-92. (GONG Li, LU Ruiqin, JIN Chunling, et al. Winter operation safety evaluation of long distance water diversion channels in cold areas based on game-improved extension theory [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(6):81-92. (in Chinese))
- [17] 马力,刘汉东. 南水北调工程输水渠道运行安全风险评价[J]. 人民黄河,2022,44(3):138-143. (MA Li, LIU Handong. Safety risk assessment of water conveyance channel operation of South-to-North Water Transfer Project [J]. Yellow River, 2022, 44(3):138-143. (in Chinese))
- [18] 李浩平,贾志营,黄耀英,等. 基于重要贡献度的中小型土石坝安全评价指标体系研究[J]. 水利水电技术,2018,49(5):103-108. (LI Haoping, JIA Zhiying, HUANG Yaoying, et al. Important contribution degree-based study on safety evaluation index system of small and medium-sized earth-rockfill dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(5):103-108. (in Chinese))
- [19] 陈陌,郭亚军,于振明. 改进型序关系分析法及其应用[J]. 系统管理学报,2011,20(3):352-355. (CHEN Mo, GUO Yajun, YU Zhenming. An improved method for rank correlation analysis and its application [J]. Journal of Systems & Management, 2011, 20(3):352-355. (in Chinese))
- [20] 李茹,马育林,田欢,等. 基于熵值和G1法的自动驾驶车辆综合智能定量评价[J]. 汽车工程,2020,42(10):1327-1334. (LI Ru, MA Yulin, TIAN Huan, et al. Comprehensive intelligent quantitative evaluation of autonomous vehicle based on entropy and G1 methods [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(10):1327-1334. (in Chinese))
- [21] ZOU Qiang, LIAO Li, QIN Hui. Fast comprehensive flood risk assessment based on game theory and cloud model under parallel computation (P-GT-CM) [J]. Water Resources Management, 2020, 34(5):1625-1648.
- [22] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):15-20. (LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6):15-20. (in Chinese))
- [23] 杨洁,王国胤,刘群,等. 正态云模型研究回顾与展望[J]. 计算机学报,2018,41(3):724-744. (YANG Jie, WANG Guoyin, LIU Qun, et al. Retrospect and prospect of research of normal cloud model [J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(3):724-744. (in Chinese))
- [24] 刘纪坤,王佳茹,王翠霞. 改进组合赋权-云模型下的地铁站突发事件应急能力评价[J]. 安全与环境学报,2023,23(5):1398-1406. (LIU Jikun, WANG Jiaru, WANG Cuixia. Evaluation of emergency response capability of metro station emergency under improved combination weighting-cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(5):1398-1406. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-18 编辑:熊水斌)