

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.025

基于云模型的水利工程运行安全韧性评价

宋亮亮¹, 张劲松², 杜建波¹, 简迎辉¹, 沈菊琴³, 李海燕¹

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029;

3. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:为准确评价水利工程的运行安全水平,将韧性理论引入水利工程安全运行管理,构建了水利工程运行安全韧性评价指标体系,采用序关系法(G1法)获得韧性指标的独立权重,采用决策试验和评价实验室(DEMATEL)法量化韧性指标的关联权重,并利用博弈论确定组合权重,提出了基于云模型的水利工程运行安全韧性评价方法。利用该方法对江都水利枢纽工程2017—2021年的运行安全韧性进行评价,结果表明:江都水利枢纽工程的运行安全韧性逐年提升,并达到高韧性水平;评价结果与实际情况相符,验证了方法的正确性与可靠性。

关键词:水利工程;运行安全韧性评价;G1法;决策试验和评价实验室法;博弈论;云模型

中图分类号:TV222 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0208-07

Assessment of operation safety resilience of water conservancy projects based on cloud model// SONG Liangliang¹, ZHANG Jinsong², DU Jianbo¹, JIAN Yinghui¹, SHEN Juqin³, LI Haiyan¹ (1. Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 3. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the operation safety level of water conservancy projects, the resilience theory was introduced into the safety operation management of water conservancy projects, and the evaluation indexes system of the operation safety resilience of water conservancy projects was constructed. The order relation method (G1 method) was used to obtain the independent weight of the resilience index, the decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) method was used to quantify the correlation weight of the resilience index, and the game theory was used to determine the combined weight. and a cloud model-based method for assessing the operation safety resilience of water conservancy projects was proposed. This method was used to evaluate the operation safety resilience of Jiangdu Water Control Project from 2017 to 2021. The results show that the operation safety resilience of Jiangdu Water Control Project has been improved year by year and reaches a high level of resilience. The evaluation results are consistent with the actual situation, which verifies the correctness and reliability of the method.

Key words: water conservancy project; evaluation of operation safety resilience; G1 method; decision making trial and evaluation laboratory method; game theory; cloud model

水资源安全是我国经济社会高质量发展和生态文明建设新格局的战略基点^[1],“十四五”时期,我国将实施国家水网重大工程,加快完善水利基础设施体系,提升国家水安全保障能力。面对愈发明显的气候变化和频增的极端天气,国家水网工程势必在保障水资源安全发挥更大的作用^[2]。作为国家水网工程持续发挥积极效能的基本前提,水利基础设施工程安全可靠运行尤为关键,尤其是在目前变

化环境下,其重要性达到前所未有的高度^[3]。因此,开展水利工程运行安全研究,对于保障水资源安全及新时期经济社会的高质量发展具有重要意义。

众多学者对水利工程的运行安全进行了积极探索。杜梦娇等^[4]针对江苏水资源安全系统,构建了系统动力学模型并进行了仿真分析。聂相田等^[5]建立了长距离引水工程运行安全风险评价模型,评价了南水北调中线工程的运行安全。罗日洪等^[6]

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(71801082);教育部人文社会科学研究青年项目(18YJCZH148);江苏省水利科技项目(2022025)

作者简介:宋亮亮(1988—),男,讲师,博士,主要从事水利工程安全管理研究。E-mail:lsong@hhu.edu.cn

通信作者:张劲松(1963—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水利工程安全管理研究。E-mail:zhangjs@jnsbd.gov.cn

利用模糊综合评价法分析了渡槽工程的运行安全风险。郭金等^[7]构建了堤防工程的风险评价指标体系,通过风险云图判定了堤防的风险等级。现有研究主要从风险的视角对水利工程运行安全进行研究,但这种被动式的研究范式已无法满足复杂系统的安全管理需求。在不确定性不断增强的环境中,复杂系统的安全管理应当采用强调主动适应的韧性研究范式。水利工程只有具备了适应不确定的能力,才能有效保持自身的健康安全运行。此外,科学量化系统韧性有助于将韧性理论转到实践应用,而现有关于韧性评价的研究^[8],大多忽视了韧性指标的内在关联性,未能充分考虑评价过程中随机性和模糊性,存在一定的局限性。云模型是一种兼顾评价过程中随机性和模糊性的有效工具,广泛应用于水利高质量发展^[9]、生态河道建设^[10]、水生态文明^[11]的评价研究中。鉴于此,本文将韧性理念引入水利工程运行安全管理中,界定水利工程运行安全韧性的内涵,构建水利工程运行安全韧性评价指标体系,提出以云模型为基础的水利工程运行安全韧性评价方法,以期为水利工程安全运行提供参考。

1 水利工程运行安全韧性评价指标体系

水利工程是用于控制和调配自然界地表水和地下水,达到除害兴利目的而修建的工程,包括水资源保护、防洪、防涝、灌溉、供水等工程。水利工程运行系统是一个由人员、组织、技术和环境子系统交互作用形成的复杂社会技术系统,系统要素间的强耦合性造成其运行状态的波动,呈现极大的不确定性。只有更好地适应不确定性事件,具备持久的韧性,水利工程才能运行更安全。韧性本义为恢复到原始状态^[12],1973年Holling^[13]将韧性引入生态学中,用以衡量生态系统在受到外界干扰后,恢复自身平衡状态或稳定状态的能力。此后韧性逐渐拓展至社会生态系统、交通系统、电力系统、城市系统等领域。随着韧性应用领域的多样化,韧性概念也实现从工程韧性到生态韧性再到演进韧性的两次认知转型。演进韧性相较于工程韧性和生态韧性,更强调系统能够根据内外部条件进行自适应地调整和应对,从而让系统“趋利避害”,更加契合水利工程系统的特征^[14]。基于演进韧性,杨亚峰等^[8]定义水资源系统韧性为在面临干扰时,水资源系统恢复原有功能,并达到新的适应平衡的特性;杨静等^[15]认为城市供水系统韧性是指供水系统在灾害发生时,具有抵抗能力,被破坏后能保持功能并快速恢复。本文认为水利工程运行安全韧性是水利工程面对压力、扰动和

冲击时,在人员、技术、组织、环境四大子系统协同作用下,通过自组织、自适应和学习达到维持、恢复和优化系统安全状态的能力。

科学评价水利工程运行安全韧性是将韧性理论进行实践应用的重要内容。现有度量和评价系统韧性主要有基于系统性能曲线和基于韧性能力表征两种方法^[14],其中基于韧性能力表征的方法更适合水利工程运行系统,且具有更高的灵活性。韧性能力包括吸收力、适应力和恢复力,对于水利工程运行系统而言,吸收力是指系统吸收扰动冲击并最小化后果的能力;适应力是在没有恢复活动的前提下,系统调整自身并适应扰动冲击的能力,是吸收力已经被超出的情况;恢复力是系统恢复到正常状态的能力。基于文献研究和专家访谈,结合《水利工程标准化管理评价办法》、GB/T 40947—2021《安全韧性城市评价指南》,本文从人员、组织、技术和环境子系统4个方面,构建包含17个指标的水利工程运行安全韧性评价指标体系,如图1所示(图中a、b、c分别表示韧性指标与吸收力、适应力和恢复力的关联性)。

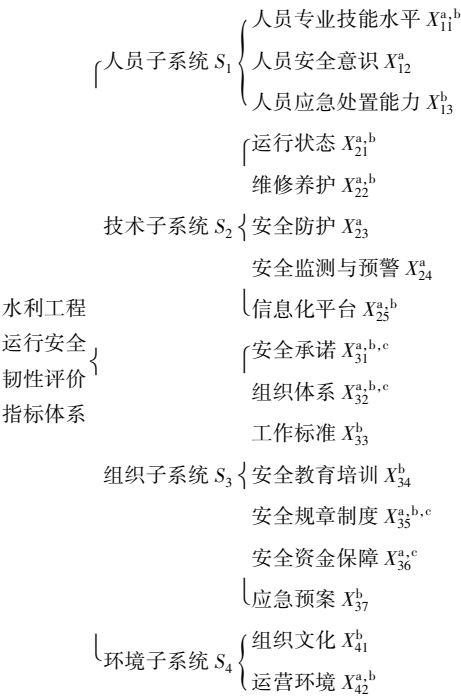


图1 水利工程运行安全韧性评价指标体系

Fig.1 Assessment indexes system for safety operational resilience of water conservancy projects

2 水利工程运行安全韧性评价方法

2.1 权重确定

2.1.1 G1法

G1法又称序关系法,是基于层次分析法优化衍生出的一种主观赋值方法^[16]。该方法无须构建

重要性判断矩阵,因此解决了通过一致性检验的难题,可简单高效地确定指标独立权重。具体步骤如下:

步骤1 确定序关系。由领域内经验丰富的专家根据重要程度对韧性指标进行排序,若指标 X_i 的重要程度大于 X_j ,则记为 $X_i > X_j$ 。对某层的 k 个韧性指标可建立序关系: $X_1^* > X_2^* > \dots > X_k^*$, X_i^* 为排序后的第 i 个韧性指标。

步骤2 确定相邻指标重要程度。序关系确定后,专家根据经验和标准对相邻韧性指标的重要程度进行赋值:

$$r_k = \frac{w_{1,k-1}}{w_{1,k}} \quad (k = n, n-1, \dots, 2) \quad (1)$$

式中: r_k 为 X_{k-1}^* 与 X_k^* 重要程度比值, $r_{k-1} \in [1.0, 2.0)$, r_k 需满足 $r_{k-1} > \frac{1}{r_k}$; n 为评价指标个数; $w_{1,k}$ 、 $w_{1,k-1}$ 分别为第 k 、 $k-1$ 个指标的独立权重。

步骤3 计算指标独立权重。依据专家的赋权情况,计算指标的独立权重 $w_{1,i}$:

$$w_{1,i} = (1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i)^{-1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

2.1.2 决策试验和评价实验室法

决策试验和评价实验室 (decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL) 法是一种分析复杂因素间关联关系的方法^[17]。通过该方法识别韧性指标之间的相互影响关系,明确各指标的中心度和原因度,并以此计算韧性指标的关联权重。具体步骤如下:

步骤1 建立初始直接影响矩阵。邀请专家学者对韧性指标间相互影响程度进行打分,0分、1分、2分、3分、4分分别表示无影响、影响小、影响适中、影响大、影响极大。对所有专家的评分进行算术平均处理后得出初始直接影响矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, a_{ij} 代表韧性指标 X_i 对指标 X_j 的影响程度,且当 $i=j$ 时, $a_{ij}=0$ 。

步骤2 对 A 进行规范化处理,得到规范化后的影响矩阵 B :

$$B = \frac{A}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (3)$$

步骤3 构建综合影响矩阵 T :

$$T = (t_{ij})_{n \times n} = B(I - B)^{-1} \quad (4)$$

式中 I 为单位矩阵。

步骤4 计算各指标的中心度和原因度。根据综合影响矩阵 T 求解的每行之和与每列之和可得各指标的影响度 f_i 以及各指标的被影响度 e_i 。令

$i=j$, 则指标 X_i 的中心度 $M_i = f_i + e_i$, 原因度 $R_i = f_i - e_i$, 同时可绘制相应的因果关系图。其中,中心度代表指标相对重要程度,而原因度代表指标对其他指标的影响程度,若原因度大于0,则该指标为原因指标,反之为结果指标。

步骤5 计算各指标关联权重 $w_{2,i}$:

$$w_{2,i} = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

2.1.3 博弈论组合赋权

为实现独立权重和关联权重的有效融合,引入博弈论 (game theory, GT) 集化模型^[18],以单独赋权信息损失最小化为目标,对指标进行组合赋权,使韧性指标的权重赋值更科学。具体步骤如下:

步骤1 构造基础权重向量集。使用 L 种不同赋权方法计算各韧性评价指标权重,构造出评价指标基本权重向量集 $w_k = (w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn})$ ($k = 1, 2, \dots, L$), n 为韧性指标数量,则这 L 个向量任意线性组合为

$$w' = \sum_{k=1}^L \lambda_k w_k \quad (\lambda_k > 0) \quad (6)$$

式中: w' 为权重集中一种可能的组合权重向量; λ_k 为线性组合系数。

步骤2 优化线性组合系数。求解最优权重组合系数,运用博弈论原理平衡不同权重,找到 Nash 均衡点,极小化组合权重与独立权重、关联权重之间的偏差,求解后可得最优组合系数 λ_k^* 。

步骤3 计算综合权重。对最优权重系数进行归一化处理后,得到最终的综合权重 w 为

$$w = \sum_{k=1}^L \lambda_k^* w_k \quad (7)$$

2.2 评价过程

2.2.1 云模型

云模型由中国工程院院士李德毅等^[19]教授提出,是描述定性概念与其定量描述之间不确定性转换的数学模型,其核心是通过构建云发生器来实现定性与定量之间的映射,能有效解决韧性评价过程中的模糊和不确定问题。给定一个定量论域 U , C 是对应 U 的语言值,即韧性评价指标等级的定性概念。 U 中的元素 x 对于 C 所表达定性概念的隶属度 $\mu(x)$ 是一个具有稳定倾向的随机数,隶属度在 U 上的分布称为隶属云,简称为云。 $\mu(x)$ 在 $[0, 1]$ 中取值,云是从论域 U 到区间 $[0, 1]$ 的映射,即 $\mu(x): U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ 。

云的数字特征可以用期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 来表征。其中, E_x 是反映论域空间的中心值,在云

图上的表征为最高点,故而是最能够表示定性概念的点; E_n 反映云滴的离散程度和波动区间,在云图上的表征为云形的跨度,代表可被定性概念接受的模糊程度; H_n 反映 E_n 的不确定性,是 E_n 的熵,用于表征论域空间内代表该语言值所有点的不确定度的凝聚性,反映为云形的厚度。云模型韧性评价利用逆向云发生器将评价精确数值转变为云数字特征,利用正向云发生器将云数字特征转变为云滴,生成云图直观展示评价结果。

2.2.2 韧性标准云图

标准评价云是韧性评价的基准参照图,参考 GB/T 40947—2021《安全韧性城市评价指南》,结合专家意见,将水利工程运行安全的韧性等级划分 I (高韧性)、II (中韧性)、III (低韧性)、IV (缺乏韧性)4 个评级区间,取值分别为 90 ~ 100、> 75 ~ 90、> 60 ~ 75、> 0 ~ 60。计算各评级区间的标准云数字特征,超熵取 0.5,得到 I 级(95, 1.67, 0.5)、II 级(82.5, 2.167, 0.5)、III 级(67.5, 2.50, 0.5)、IV 级(29.5, 9.83, 0.5)。利用正向云发生器生成 4 个韧性等级的标准云图,如图 2 所示。

2.2.3 评价流程

基于构建的水利工程运行安全韧性指标体系,结合水利工程的实际运行情况进行赋分,分值区间为[0,100],利用逆向云发生器计算各指标的云数字参数,获取独立权重和关联权重,通过博弈论方法进行组合赋权,进行水利工程运行安全韧性的综合云计算,利用正向云发生器生成韧性综合评价云图,并将其与韧性标准评价云进行相似度对比^[20],得到

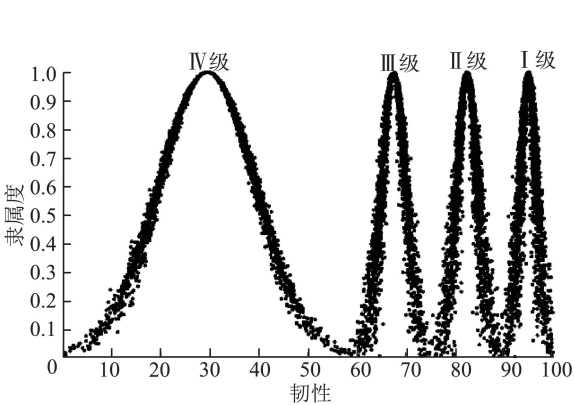


图 2 韧性评价标准云图

Fig.2 Standard cloud map for resilience assessment

最终综合韧性评价等级,评价流程如图 3 所示。

3 江都水利工程实例验证

3.1 权重计算

邀请多位水利行业具有丰富安全管理经验的专家,判断水利工程运行韧性指标的独立重要性,根据专家意见确定韧性指标的独立权重,进而判断韧性指标间的关系,得到韧性指标的综合关系矩阵。相应的因果关系如图 4 所示。

由图 4 可见, X_{11} 、 X_{12} 、 X_{25} 、 X_{31} 、 X_{32} 、 X_{33} 、 X_{34} 、 X_{35} 、 X_{36} 、 X_{41} 为原因指标, X_{13} 、 X_{21} 、 X_{22} 、 X_{23} 、 X_{24} 、 X_{37} 、 X_{42} 为结果指标,管理子系统中韧性指标除应急预案以外全部为原因指标,影响着其他子系统的韧性指标,这意味着组织管理因素是驱动水利工程运行安全韧性转变的重要方面。此外,人员应急处置能力 X_{13} 中心度最高,即重要度最高。将 G1 法得到的独立权重

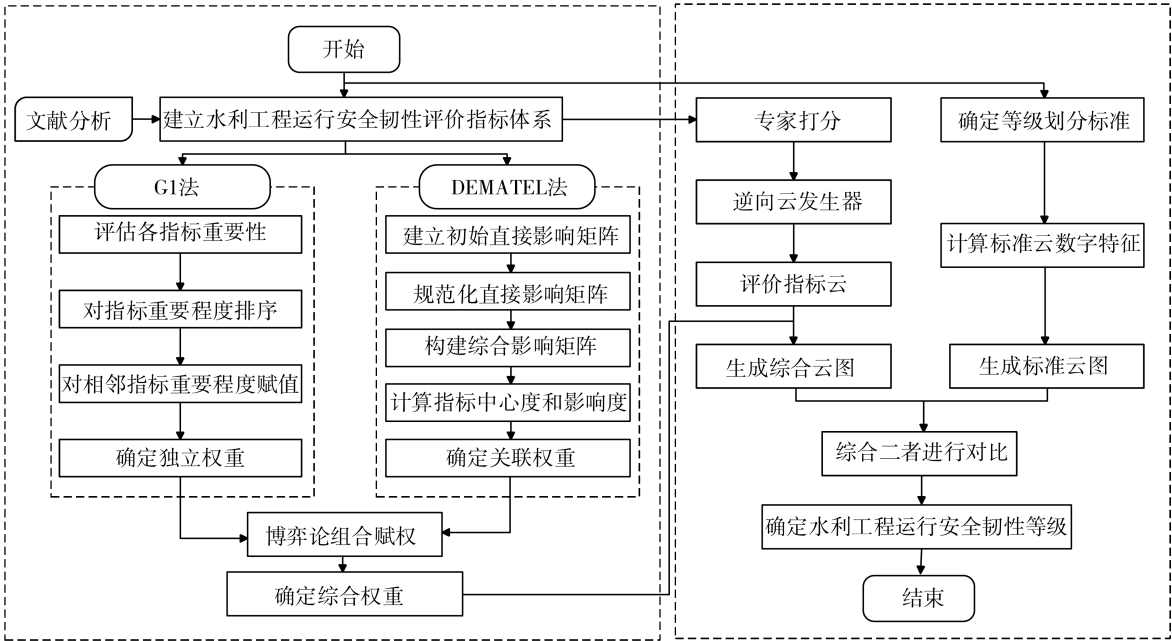


图 3 水利工程运行安全韧性评价流程

Fig.3 Flow chart of operation safety resilience assessment of water conservancy projects

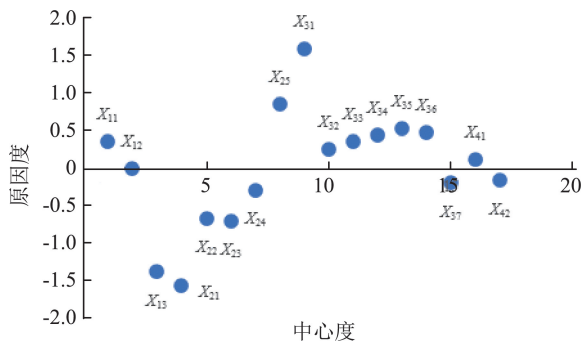


图4 因果关系图

Fig.4 Cause and effect diagram

w_1 和 DEMATEL 法得到的关联权重 w_2 代入式 (6), L 为 2, 运用 Matlab 得到最优权重系数, 分别为 $\lambda_1^* = 0.649$, $\lambda_2^* = 0.351$, 求得所有韧性指标权重分布 (表 1), 可见单一赋权方法会造成部分指标的重要性失真, 组合赋权能有效弥补这一缺陷。

表 1 韧性评价指标权重

Table 1 Weights of resilience assessment indexes

指标	权重		
	G1 法	DEMATEL 法	博弈论组合
X_{11}	0.109	0.060	0.092
X_{12}	0.030	0.069	0.044
X_{13}	0.109	0.120	0.113
X_{21}	0.083	0.091	0.086
X_{22}	0.069	0.075	0.071
X_{23}	0.057	0.078	0.064
X_{24}	0.099	0.072	0.090
X_{25}	0.022	0.057	0.034
X_{31}	0.047	0.072	0.056
X_{32}	0.036	0.021	0.031
X_{33}	0.057	0.050	0.055
X_{34}	0.047	0.061	0.052
X_{35}	0.069	0.033	0.056
X_{36}	0.063	0.049	0.058
X_{37}	0.069	0.031	0.056
X_{41}	0.015	0.025	0.019
X_{42}	0.018	0.036	0.024

3.2 评价结果与分析

邀请 10 位江苏水利系统的专家, 以江都水利枢纽 2017—2021 年的历史资料为基础, 对各年的工程运行安全韧性指标进行打分。综合 10 位专家的打分结果, 利用逆向云发生器计算各指标的云数字特征参数。得到 2017 年江都水利枢纽工程运行安全韧性的综合云模型数字特征为 (72.644 0, 0.870 0, 0.637 5)。同理, 可以得到 2018 年、2019 年、2020 年、2021 年的综合云数字特征分别为 (76.674 6, 0.825 2, 0.646 3)、(81.332 6, 0.954 7, 0.700 5)、(86.394 6, 0.907 3, 0.686 4)、(92.538 7, 0.728 5,

0.599 6)。通过正向云发生器, 利用 Matlab 绘制综合评价云图, 同时与标准云图进行叠加, 如图 5 所示。

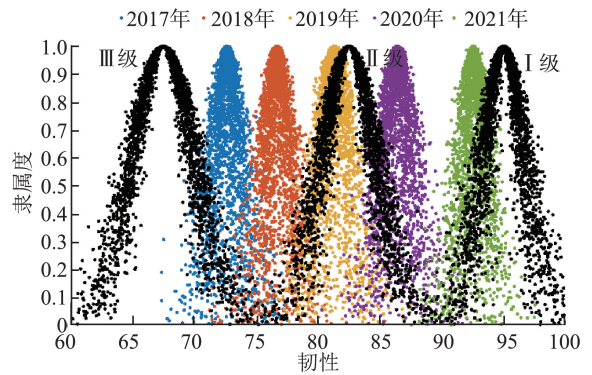


图 5 2017—2021 年综合评价云图

Fig.5 Comprehensive assessment cloud chart for operational resilience from 2017 to 2021

由图 5 可见, 云滴比较密集, 说明韧性评价结果稳定。此外, 江都水利枢纽工程运行安全韧性的云图从 2017 年到 2021 年逐渐向右偏移, 表明随着精细化管理的推行, 江都水利枢纽工程的运行安全韧性等级不断提升, 且后 2 年的提升幅度略高于前 3 年。江都水利枢纽工程通过开展精细化管理工作, 围绕细化管理任务、明晰管理标准、健全管理制度、规范管理流程、强化管理考核、构建管理平台等六大管理模块^[21], 全面提档升级, 工程管理水平 and 运行安全水平取得显著成效, 并在 2021 年以精细化管理模式获第四届中国质量奖提名奖^[21]。韧性评价结果与实际情况一致, 证明了基于组合赋权的韧性云模型的科学性和有效性。

计算 2017—2021 年综合评价云相似度, 进一步确定江都水利枢纽工程运行安全韧性等级, 结果如表 2 所示。根据最大相似度原则, 可以判定 2017 年江都水利枢纽工程的运行安全韧性等级为“低韧性, 稍偏向中韧性”, 有必要引入主动型“精细化 + 自适应”的韧性理念。2018—2020 年, 运行安全韧性等级总体均为“中韧性”, 并从“偏向低韧性”过渡到“偏向高韧性”, 精细化管理的效果逐渐显现。

表 2 2017—2021 年综合评价云与标准云间的相似度

Table 2 Cloud model similarity between each comprehensive assessment cloud and standard cloud from 2017 to 2021

年份	相似度				评价结果
	I	II	III	IV	
2017	0	0.002 1	0.120 5	0.000 1	低韧性, 稍偏向中韧性
2018	0	0.057 0	0.008 1	0	中韧性, 稍偏向低韧性
2019	0	0.654 6	0.000 2	0	中韧性, 微偏向低韧性
2020	0.002 1	0.193 7	0	0	中韧性, 稍偏向高韧性
2021	0.289 4	0.001 1	0	0	高韧性, 稍偏向中韧性

2021年,运行安全韧性等级为“高韧性,稍偏向中韧性”,“精细化+自适应”的韧性理念是提升水利工程运行安全水平的有效方式。综合云相似度的结果与云图保持一致,验证了韧性评价方法的正确性与可靠性。

4 结 论

a. 将韧性理念引入水利工程,建立水利工程运行安全韧性评价指标体系,提出了基于云模型的水利工程运行安全韧性评价方法。

b. 利用G1法计算指标的独立权重,利用DEMATEL法计算指标的关联权重,其中关联权重能有效度量评价指标间的关联性。基于博弈论进行组合赋权,能有效消除单一方法所产生的片面性,使评价指标权重更加科学、合理。

c. 将云模型应用于水利工程运行安全韧性评价,可以兼顾评价过程中的模糊性和随机性,使得评价结果更加科学。对江都水利枢纽2017—2021年开展运行安全韧性评价,得到其韧性逐年提升至高韧性,评价结果与实际相符,验证了评价方法正确性与可靠性。

参考文献:

- [1] 李原园,李云玲,何君. 新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J]. 水利学报,2021,52(11):1340-1346. (LI Yuanyuan, LI Yunling, HE Jun. Strategic countermeasures for China's water resources security in the new development stage [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(11):1340-1346. (in Chinese))
- [2] 李国英. 推动新阶段水利高质量发展为全面建设社会主义现代化国家提供水安全保障[J]. 中国水利,2021(16):1-5. (LI Guoying. Promote high-quality water development in the new era, safeguard water security for building a modern socialist country in an all-round way [J]. Chinese Water Resources, 2021(16):1-5. (in Chinese))
- [3] 夏军,石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报,2016,47(3):292-301. (XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):292-301. (in Chinese))
- [4] 杜梦娇,田贵良,吴茜,等. 基于系统动力学的江苏水资源系统安全仿真与控制[J]. 水资源保护,2016,32(4):67-73. (DU Mengjiao, TIAN Guiliang, WU Qian, et al. Simulation and control of water resources system security in Jiangsu Province based on system dynamics [J]. Water Resources Protection,2016,32(4):67-73. (in Chinese))
- [5] 聂相田,范天雨,董浩,等. 基于IOWA-云模型的长距离引水工程运行安全风险评价研究[J]. 水利水电技术,2019,50(2):151-160. (NIE Xiangtian, FAN Tianyu, DONG Hao, et al. IOWA-cloud model-based study on risk assessment of operation safety of long distance water transfer project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(2):151-160. (in Chinese))
- [6] 罗日洪,黄锦林,李兆恒. 基于改进FCE的渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):162-169. (LUO Rihong, HUANG Jinlin, LI Zhaoen. Comprehensive safety evaluation of aqueduct based on improved FCE method [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(2):162-169. (in Chinese))
- [7] 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(06):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(06):117-122. (in Chinese))
- [8] 杨亚锋,王红瑞,巩书鑫,等. 可变勾股模糊VIKOR水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水利学报,2021,52(6):14-18. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, GONG Shuxin, et al. Variable pythagorean fuzzy VIKOR evaluation regulation model of water resources system resilience and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(6):14-18. (in Chinese))
- [9] 韩宇平,苏潇雅,曹润祥,等. 基于熵-云模型的我国水利高质量发展评价[J]. 水资源保护,2022,38(1):26-33. (HAN Yuping, SU Xiaoya, CAO Runxiang, et al. Evaluation of high-quality development of water conservancy in China based on entropy-cloud model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):26-33. (in Chinese))
- [10] 赵晨程,高玉琴,刘钺,等. 基于云模型的生态河道建设评价[J]. 水资源保护,2022,38(2):183-189. (ZHAO Chencheng, GAO Yuqin, LIU Yue. Evaluation of ecological river construction based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2):183-189. (in Chinese))
- [11] 季晓翠,王建群,傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. 水资源保护,2019,35(2):74-79. (JI Xiaocui, WANG Jianqun, FU Jiemin. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):74-79. (in Chinese))
- [12] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E. A review of definitions and measures of system resilience [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016,

- 145: 47-61.
- [13] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [14] 毕玮,汤育春,冒婷婷,等. 城市基础设施系统韧性管理综述[J]. 中国安全科学学报,2021, 31(6): 14-28. (BI Wei,TANG Yuchun,MAO Tingting,et al. Review on resilience management of urban infrastructure system[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 14-28. (in Chinese))
- [15] 杨静,李大鹏,翟长海,等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题[J]. 中国科学基金,2019, 33(5): 525-532. (YANG Jing, LI Dapeng, ZHAI Changhai, et al. Key scientific issues in the urban earthquake resilience [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2019, 33(5):525-532. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 王伟明,邓潇,徐海燕. 基于三维密度算子的群体 DEMATEL 指标权重确定方法[J]. 中国管理科学, 2021, 29(12): 179-190. (WANG Weiming, DENG Xiao,XU Haiyan. A new index weights calculation method of group DEMATEL based on three dimensional density operator[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021,29(12):179-190. (in Chinese))
- [18] 耿芳,董增川,徐伟. 基于云模型的黑龙江上中游河流健康评价[J]. 水资源保护,2016, 32(6): 131-135. (GENG Fang,DONG Zengchuan,XU Wei. River health assessment of upper and middle reaches of Heilongjiang River based on cloud model [J]. Water Resources Protection,2016, 32(6):131-135. (in Chinese))
- [19] 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(6): 15-20. (LI Deyi,MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995 (6): 15-20. (in Chinese))
- [20] 龚艳冰,蒋亚东,梁雪春. 基于模糊贴近度的正态云模型相似度度量[J]. 系统工程,2015, 33(9): 133-137. (GONG Yanbing, JIANG Yadong, LIANG Xuechun. Similarity measurement for normal cloud models based on fuzzy similarity measure [J]. Systems Engineering,2015, 33(9):133-137. (in Chinese))
- [21] 张劲松. 谋新篇开新局再创新省工程运行管理工作新业绩[J]. 江苏水利,2022(增刊1): 5-9. (ZHANG Jinsong. Seek a new chapter and start a new gamecreating new achievements in project operation management of the whole rovince [J]. Jiangsu Water Resources, 2022 (Supl):5-9. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-24 编辑:王芳)

(上接第 207 页)

- [22] WEBER M, KOCH F, BERNHARDT M, et al. The evaluation of the potential of global data products for snow hydrological modelling in ungauged high-alpine catchments[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021,25(5):2869-2894.
- [23] 袁巧丽,杨建. 青藏高原草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 中国草地学报,2021,43(9): 32-43. (YUAN Qiaoli, YANG Jian. Phenological changes of grassland vegetation and its response to climate change in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021,43(9):32-43. (in Chinese))
- [24] 于伯华,吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. 地理研究,2011,30(12):2289-2295. (YU Bohua, LYU Changhe. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. Geographical Research,2011,30(12):2289-2295. (in Chinese))
- [25] 冉有华,王磊,曾甜,等. "一带一路"亚洲关键区域流域边界图[Z]. 西宁:国家青藏高原科学数据中心,2020.
- [26] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association,1968,63(324):1379-1389.
- [27] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica,1945,13(3):245-259.
- [28] KENDALL M, GIBBONS J D. Rank correlation methods [M]. London:Oxford University Press,1990.
- [29] PEARSON K. Notes on the history of correlation [J]. Biometrika,1920,13(1):25-45.
- [30] FUNAHASHI H, KIJIMA M. Does the Hurst index matter for option prices under fractional volatility? [J]. Annals of Finance,2017,13(1):55-74.
- [31] 王泓云. 气候变异和植被变化对中国陆地水储量的影响研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [32] ZUO Depeng, HAN Yuna, XU Zongxue, et al. Time-lag effects of climatic change and drought on vegetation dynamics in an Alpine river basin of the Tibet Plateau, China[J]. Journal of Hydrology,2021,600:126532.

(收稿日期:2022-02-07 编辑:施业)