

基于 PSR-TOPSIS 模型的长距离输水工程运行安全韧性评估研究^{*}

张勇 李萌 蔡戈

(西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710311)

摘要: 为进一步提升长距离输水工程的运行安全水平, 引入韧性理论, 结合压力-状态-响应 (PSR) 模型, 构建长距离输水工程的运行安全韧性评估指标体系; 采用 G1-CRITIC 主客观组合赋权法, 以减少指标权重的主观偏差和客观片面, 并将 TOPSIS 法应用于长距离输水工程运行安全韧性评估; 差异化选取 5 个不同地区的代表性长距离输水工程案例, 验证该评估模型的科学性和有效性, 并综合案例实际情况, 提出韧性提升策略。结果表明, 长距离输水工程运行安全韧性仍有较大提升空间, 提出的韧性评估模型效果符合实际, 可为长距离输水工程运行安全水平的提升提供一定的决策参考。

关键词: 长距离输水工程; PSR 模型; 组合赋权; TOPSIS 法; 运行安全; 韧性评估

0 引言

2023 年《国家水网建设规划纲要》指出, 我国水利基础设施网络系统性、综合性、强韧性还需增强, 需继续提高缺水地区供水保障程度和抗风险能力^[1]。长距离输水工程是我国水利基础设施建设中的重要子系统, 具有跨度大、影响广、地质及环境条件复杂等特点, 输水工程的安全可靠运行, 对增强供水保障能力、推动受水区域社会经济发展至关重要^[2]。因此, 进行长距离输水工程运行安全韧性评估研究, 对于提高水利工程运行安全管理水平、促进我国水利基础设施建设与发展具有重要意义。

近年来, 众多长距离输水工程相继建成并投入运行^[2], 众多学者对长距离输水工程的运行安全进行了深入的研究。例如, 王济干等^[3]针对跨省界区域输水工程, 提出了基于共识模型和前景理论的风险评估模型, 帮助确定工程各风险故障模式的优先级; 聂相田等^[4]利用事故系统风险传递理论, 构建风险传递仿真模型, 分析长距离引

水工程节点风险处置能力对风险传递的影响, 为降低运行安全风险提供新的思路; 关炜等^[5]基于霍尔三维结构模型、概念模型和风险识别模型提出一套适用于长距离调水工程的运行安全风险预警系统; 汤洪洁等^[6]将工程进行单元划分, 建立风险集成层次结构模型, 基于多种评价模型进行集成计算, 以评估工程总体风险等级。

“韧性”理念最初来自于生态学, 用于描述生态系统的稳定状态^[7]。随后, 韧性研究逐渐延伸到心理、工程、交通、城市、基础设施建设等领域。随着基础设施建设韧性研究不断深入, 韧性逐渐成为水利基础设施建设的重要研究对象之一^[8]。例如, 杨芳等^[9]基于韧性能力表征, 从承受、恢复和适应能力三个角度构建城市供水系统的韧性评价体系; 詹栩怡等^[10]从 Todini 指数、供水保证率、剩余供水能力、故障前后节点能量损失 4 个方面, 对供水管网进行韧性评估; 宋亮亮等^[11]对水利工程运行安全韧性进行定义, 构建了基于云模型的水利工程运行安全韧性评价模型,

^{*} 基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划-联合基金项目 (2021JLM-52)。

证明了韧性理论在水利工程运行安全韧性评估中具备较好的适用性。

综上所述，现有针对长距离输水工程的研究大多集中在风险预防与评价方面，而对韧性评估研究较少，且其评价指标选取主要从工程系统内部进行考量。

鉴于此，基于水利基础设施建设韧性发展需求^[12]，综合考虑基础设施建设韧性特征和输水工程运行特点。首先，基于压力-状态-响应（PSR）框架模型，构建长距离输水工程韧性评估指标体系；其次，采取 G1 序关系分析法和 CRITIC 法进行指标主客观赋权；最后，采用逼近理想解法评估长距离输水工程运行安全韧性等级，为提升输水工程运行安全管理能力提供参考。

1 构建基于 PSR 模型的长距离输水工程运行安全韧性评估指标体系

压力-状态-响应（PSR）模型在生态、社区、城市安全韧性评估中应用较为成熟^[13]，基础设

施建设遭受风险后，会经历“稳定-受冲击-冲击后恢复稳定”的动态变化过程^[14]，而 PSR 模型“原因-效应-适应”的逻辑思维可以较为准确地描述工程系统安全韧性。因此，构建基于 PSR 模型的长距离输水工程运行安全韧性评估指标体系，具体步骤如下：

（1）指标选取。考虑长距离输水工程自身特点，参考《水利工程标准化管理评价办法》《水利安全生产标准化通用规范》等标准规范及相关文献^[15-16]，进行指标初筛，在此基础上，根据科学性、可操作性等原则，并结合专家意见进行指标优选。最终，从压力层、状态层和响应层三个层面共选取 19 个指标。

（2）指标等级确定。参考《调水工程标准化管理整体评价标准》等安全评价等级、行业规范及借鉴相关文献^[15-18]，将选取的 19 个韧性评估指标划分为 5 个等级。定性评估指标韧性等级从低到高依次赋 1~5 分作为韧性评估指标的等级取值。

长距离输水工程运行安全韧性评估指标体系及等级划分见表 1。

表 1 长距离输水工程运行安全韧性评估指标体系及等级划分

目标层	准则层	指标层	等级划分					影响方向
			I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	
长距离输水工程运行安全韧性 A	压力层 B ₁	地质灾害发生次数 C ₁ /（次/年）	< 40	40 ≤ C ₁ < 80	80 ≤ C ₁ < 120	120 ≤ C ₁ < 160	≥ 160	负
		突发环境事件及气象灾害 C ₂ /（次/年）	< 60	60 ≤ C ₂ < 120	120 ≤ C ₂ < 180	180 ≤ C ₂ < 240	≥ 240	负
		区域及城市基础设施建设投资 C ₃ （亿元/年）	< 100	100 ≤ C ₃ < 200	200 ≤ C ₃ < 300	300 ≤ C ₃ < 400	≥ 400	负
		人口密度 C ₄ /（人/km ² ）	< 250	250 ≤ C ₄ < 500	500 ≤ C ₄ < 750	750 ≤ C ₄ < 1000	≥ 1000	负
		人均用水量 C ₅ /（m ³ /人）	< 200	200 ≤ C ₅ < 400	400 ≤ C ₅ < 600	600 ≤ C ₅ < 800	≥ 800	负
		水事纠纷 C ₆ /（件/年）	< 200	200 ≤ C ₆ < 400	400 ≤ C ₆ < 600	600 ≤ C ₆ < 800	≥ 800	负
		地区人均水资源量 C ₇ /（m ³ /人）	< 500	500 ≤ C ₇ < 1500	1500 ≤ C ₇ < 3000	3000 ≤ C ₇ < 5000	≥ 5000	正

(续)

目标层	准则层	指标层	等级划分					影响方向
			I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	
长距离输水工程运行安全韧性 A	状态层 B ₂	引水流量 C ₈ / (m ³ /s)	<10	10≤C ₈ <50	50≤C ₈ <100	100≤C ₈ <300	≥300	负
		相对使用寿命 C ₉ / (年)	<0.2	0.2≤C ₉ <0.4	0.4≤C ₉ <0.7	0.7≤C ₉ <0.9	≥0.9	负
		结构强度系数 C ₁₀	<0.7	0.7≤C ₁₀ <0.8	0.8≤C ₁₀ <0.9	0.9≤C ₁₀ <1.0	≥1.0	正
		结构变形速率 C ₁₁ / (mm/年)	<3	3≤C ₁₁ <10	10≤C ₁₁ <20	20≤C ₁₁ <40	≥40	负
		信息化监测平台完备度 C ₁₂	无监测、预警系统；无信息化平台	有监测、预警系统，可实现人工监测预警；无信息化平台	有监测、预警系统，可实现人工监测预警；信息化平台建设初步完善	监测、预警系统较完善，可实现自动化监测预警；信息化平台建设较为完善	监测、预警系统完善，可实现自动化监测预警；信息化平台建设完善	正
		工程建筑物损毁事故次数 C ₁₃ / (次/年)	<1	1≤C ₁₃ <3	3≤C ₁₃ <5	5≤C ₁₃ <7	≥7	负
	响应层 B ₃	应急预案完备度 C ₁₄	未制定应急预案	制定了不完备的应急预案或执行力度较差	制定了较完备的应急预案，执行力度一般	制定了完备的应急制度，执行力度较强	制定了完备的应急制度，执行力度强	正
		工程数据资料完整性 C ₁₅	工程数据资料收集不全，工程档案管理制度差	工程数据资料收集不全，工程档案管理的效率和准确性低	收集必要的工程资料，工程档案管理的效率和准确性一般	工程数据资料收集较为完善，工程档案管理的效率和准确性较高	工程数据资料收集完善，工程档案管理的效率和准确性极高	正
		灾害应急管理制度优化 C ₁₆ / (次/年)	<1	1≤C ₁₆ <3	3≤C ₁₆ <5	5≤C ₁₆ <7	≥7	正
		R&D 经费支出与地区生产总值之比 C ₁₇ / (%)	<1	1≤C ₁₇ <2	2≤C ₁₇ <3	3≤C ₁₇ <4	≥4	正
		运行安全防护知识及制度培训 C ₁₈	从未进行运行安全知识及制度培训	偶尔进行运行安全知识及制度培训	定期进行运行安全知识及制度培训，参与度低	定期进行运行安全知识及制度培训，参与度一般	定期进行运行安全知识及制度培训，参与度高	正
		生态环境保护及移民补偿问题 C ₁₉	未采取生态环境保护及移民补偿措施	采取了初步的相关措施，落实不足	采取了初步的相关措施，落实一般	采取了较为完善的相关措施，落实较好	采取了完善的相关措施，落实严格	正

2 长距离输水工程运行安全韧性评估模型构建

2.1 指标权重确定

2.1.1 采用 G1 法确定主观权重

G1 法又称序关系法,该方法无须构建重要性判断矩阵,可避免一致性检验难以通过的问题^[19],确定评价指标重要性排序为

$$X_1^* > X_2^* > \cdots > X_n^* \quad (1)$$

在同一目标层或准则层下,判断各指标之间的相对重要程度,得出指标 X_{j-1} 与指标 X_j 重要性程度之比为

$$r_j = \frac{X_{j-1}^*}{X_j^*} \quad (j=2, 3, \cdots, n) \quad (2)$$

式中,相对重要程度 r_j 赋值见表 2。

依据专家的赋权情况,计算第 j 个指标的主观权重 w_{1j} 为

$$\begin{cases} w_{1j} = (1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=j}^n r_i)^{-1} \\ w_{1j-1} = r_j w_{1j} \quad (j=2, 3, \cdots, n) \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_j 为韧性指标重要程度比值, i 取 $k \sim n$ 。

表 2 相对重要程度 r_j 赋值

X_{j-1}^* 比 X_j^*	r_j
同等重要	1
稍微重要	1.2
明显重要	1.4
强烈重要	1.6
极端重要	1.8
两个相邻程度中间值	1.1, 1.3, 1.5, 1.7

2.1.2 采用 CRITIC 法确定客观权重

CRITIC 法是一种综合考虑指标之间对比强度和冲突程度的赋权方法^[20]。计算各指标的信息量 I_j 为

$$I_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (4)$$

式中, σ_j 为指标 j 的标准差,反映指标间的差异性; $(1 - r_{ij})$ 为指标间的冲突性; I_j 值为指标所

包含的信息量大小。

计算指标客观权重 w_{2j} 为

$$w_{2j} = \frac{I_j}{\sum_{j=1}^n I_j} \quad (5)$$

2.1.3 运用最小相对信息熵原理确定指标组合权重 W

根据最小相对信息熵原理^[21],可得

$$\min F = \sum_{j=1}^n w_j \left(\ln \frac{w_j}{w_{1j}} \right) + \sum_{j=1}^n w_j \left(\ln \frac{w_j}{w_{2j}} \right) \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j > 0 \quad (j=1, 2, \cdots, n) \quad (7)$$

2.2 基于 TOPSIS 的长距离输水工程运行安全韧性评估模型

TOPSIS 法是一种综合评价方法,基本思路是计算各样本与最优解的距离,以得到与理想方案的贴近度,进而对各样本的优劣进行排序^[19],具体步骤如下:

(1) 建立评估矩阵 X_k 。假设有 m 个待评价样本, n 个待评价指标,故得到初始评估矩阵 X_k ($k=0$ 或 $k=1$) 为

$$X_k = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个待评价样本的第 j 个评价指标的量化值 ($i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n$); X_0 为初始评估矩阵,根据韧性评估指标分级取值建立; X_1 为以具体案例实际数据建立的评估矩阵。

(2) 建立标准化决策矩阵 H_k 。无量纲处理初始评估矩阵 X_0 为

$$h_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (\text{正向指标}) \quad (9)$$

$$h_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (\text{负向指标}) \quad (10)$$

式中, h_{ij} 为 x_{ij} 的无量纲形式; $\max_j(x_{ij})$ 和 $\min_j(x_{ij})$ 为 X_k 中第 i 个评估指标的最大值和最小值。

(3) 计算加权规范化决策矩阵。 S_k 为

$$S_k = (s_{ij})_{m \times n} = H_k W \tag{11}$$

式中, H_k 为通过式 (2)、式 (3) 计算出的标准化决策矩阵; W 为通过式 (9) 计算出的指标综合权重。

(4) 确定每个指标的正负理想解。 s_j^+ 和 s_j^- 分别为 S_k 中第 j 项指标的最大值和最小值, 因此, 正、负理想解分别为

$$S_j^+ = [\max(s_{ij})] = (s_1^+, s_2^+, \cdots, s_n^+) \tag{12}$$

$$S_j^- = [\min(s_{ij})] = (s_1^-, s_2^-, \cdots, s_n^-) \tag{13}$$

(5) 计算各评估对象与正、负理想解的距离。 D_i^+ 、 D_i^- 为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{ij} - s_n^+)^2} \tag{14}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{ij} - s_n^-)^2} \tag{15}$$

(6) 计算各个评估对象到负理想解的贴近度。 D_i 为

$$D_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \tag{16}$$

2.3 确定长距离输水工程运行安全韧性等级标准

根据长距离输水工程运行安全韧性评估指标的分级取值, 建立初始评估矩阵 X_0 , 见式 (17)

根据式 (8) ~ 式 (16), 计算出 5 个韧性等级指标取值的 D_i^+ 、 D_i^- 及 D_i 。贴近度越小, 韧性水平越低。通过 D_i 的大小划分长距离输水工程运行安全韧性等级标准, 见表 3。

表 3 输水工程运行安全韧性等级标准

韧性等级	D_i^+	D_i^-	D_i
I	0.234 4	0.000 0	0.000 0
II	0.168 6	0.080 0	0.321 8
III	0.113 7	0.129 5	0.532 5
IV	0.057 5	0.182 9	0.760 9
V	0.000 0	0.234 4	1.000 0

由表 3 可得韧性等级判别标准如下:

当 $0 \leq D_i < 0.321\ 8$ 时, 此时韧性等级为 I 级 (低韧性); 当 $0.321\ 8 \leq D_i < 0.532\ 5$ 时, 此时韧性等级为 II 级 (较低韧性); 当 $0.532\ 5 \leq D_i < 0.760\ 9$ 时, 此时韧性等级为 III 级 (较高韧性); 当 $0.760\ 9 \leq D_i < 1$ 时, 此时韧性等级为 IV 级 (高韧性); 当 $D_i = 1$ 时, 此时韧性等级为 V 级 (理想韧性)。

输水工程运行安全韧性等级描述见表 4。

表 4 输水工程运行安全韧性等级描述

韧性等级	等级	等级描述
I 级	低韧性	抗压能力弱, 工程总体韧性不足
II 级	较低韧性	抗压能力较弱, 工程总体韧性较低
III 级	较高韧性	抗压能力较强, 工程总体韧性较高
IV 级	高韧性	抗压能力很强, 工程总体韧性极高
V 级	理想韧性	综合所选各研究案例, 各项指标达到最优的相对理想韧性状态

3 实例分析

3.1 案例选取

(1) 案例概况。综合考量区域环境、设计流量、运行年限等特点, 差异化选取全国 5 个不同区域的具体案例, 进行运行安全韧性评估。选取的评估对象分位于安徽、江苏、青海、湖北、甘肃 5 个省 (自治区), 均为进入运营期的某长距离输水工程干、支线, 分别记为 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 , 工程案例概况见表 5。

表 5 工程案例概况

序号	所在区域	设计输水流量 (m^3/s)	运行年限 (年)	区域环境特点
A_1	安徽	290	0.75	生态环境空间差异性大

$$X_0 = \begin{pmatrix} 160 & 240 & 400 & 1000 & 800 & 800 & 0 & 300 & 0.9 & 0 & 40 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 120 & 180 & 300 & 750 & 600 & 600 & 500 & 100 & 0.7 & 0.7 & 20 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 80 & 120 & 200 & 500 & 400 & 400 & 1500 & 50 & 0.4 & 0.8 & 10 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 40 & 60 & 100 & 250 & 200 & 200 & 3000 & 10 & 0.2 & 0.9 & 3 & 4 & 5 & 4 & 5 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 & 0 & 0 & 1 & 0 & 5 & 7 & 5 & 7 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{pmatrix} \tag{17}$$

(续)

序号	所在区域	设计输水流量 (m^3/s)	运行年限 (年)	区域环境特点
A_2	江苏	100	21	地质灾害较少,易出现水华水藻等环境突发事件
A_3	青海	35	0.75	突发环境事件较少
A_4	湖北	350	9.25	崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害较多
A_5	甘肃	32	9	地质灾害较少,气象灾害引发次生灾害较多

(2) 数据来源。定量指标数据通过省水资源公报、中国水利统计年鉴及国家数据网等政府网站获取。定性指标数据通过邀请领域专家根据案例实际情况进行赋分得到。

3.2 指标权重确定

由6名水利工程领域的高校学者与输水工程

建设、施工及运营单位等相关技术专家对准则层及指标层赋分,通过根据式(1)~式(3)计算得出各指标主观权重,准则层专家重要性排序及打分表见表6。

表6 准则层专家重要性排序及打分表

准则层	相对重要性排序	r_j	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	w_{1j}
B_1	3								0.224 1
B_2	1	r_3	1.4	1.5	1.4	1.6	1.5	1.6	0.440 6
B_3	2	r_2	1.2	1.4	1.4	1.2	1.3	1.4	0.335 3

同理,可计算得出各指标层的主观权重。

最终,根据式(1)~式(7),计算出各指标客观权重,并采用最小信息熵对组合权重进行优化,得到最终的各级指标权重,见表7。

表7 各级指标权重

目标层	准则层	综合权重	指标层	主观权重 w_{1j}	客观权重 w_{2j}	组合权重 W
长距离输水工程运行安全韧性 A	压力层 B_1	0.311 8	C_1	0.048 3	0.055 8	0.052 0
			C_2	0.035 5	0.053 1	0.044 3
			C_3	0.061 1	0.056 6	0.058 8
			C_4	0.021 3	0.054 9	0.038 1
			C_5	0.029 9	0.060 2	0.045 0
			C_6	0.012 8	0.056 3	0.034 6
			C_7	0.015 1	0.062 8	0.038 9
	状态层 B_2	0.371 2	C_8	0.040 7	0.059 5	0.050 1
			C_9	0.067 2	0.047 4	0.057 3
			C_{10}	0.080 2	0.048 1	0.064 1
			C_{11}	0.049 5	0.058 0	0.053 8
			C_{12}	0.093 0	0.039 3	0.066 2
			C_{13}	0.109 9	0.049 6	0.079 8
	响应层 B_3	0.317 0	C_{14}	0.057 3	0.041 2	0.049 3
			C_{15}	0.053 9	0.047 6	0.050 8
			C_{16}	0.082 2	0.046 2	0.064 2
			C_{17}	0.030 0	0.052 0	0.041 0
			C_{18}	0.070 6	0.049 8	0.060 2
			C_{19}	0.041 2	0.061 7	0.051 5

3.3 评估结果分析

根据式 (8) ~ 式 (16), 计算出 5 个案例的贴近度, 并得到韧性评估等级, 运行安全韧性评估结果见表 8。

表 8 运行安全韧性评估结果

案例	D^+	D^-	D	韧性等级
A_1	0.133 7	0.128 7	0.490 7	II
A_2	0.125 9	0.185 8	0.607 2	III
A_3	0.191 1	0.124 4	0.394 3	II
A_4	0.119 8	0.153 2	0.561 5	III
A_5	0.116 7	0.175 2	0.600 6	III

为评估各各层指标对于工程安全运行韧性的影响程度, 计算得出各案例与正理想解的贴近度后, 将无量纲处理后的各评估指标实际数据与其指标权重的乘积作为度量值, 各层指标影响程度见表 9。

表 9 各层指标影响程度

案例	压力层	状态层	响应层
A_1	0.312	0.371	0.317
A_2	0.121	0.168	0.195
A_3	0.056	0.327	0.265
A_4	0.289	0.073	0.080
A_5	0.104	0.228	0.224
影响程度	0.766	0.995	1.025

根据表 8、表 9 结果可知, 案例 A_2 、 A_4 和 A_5 工程运行安全韧性等级为较高韧性, 而案例 A_1 、 A_3 为较低韧性, 均暂未达到高韧性, 表明长距离输水工程运行安全韧性仍有较大提升空间, 符合现实情况。各准则层对于输水工程运行安全总体韧性的影响程度为: 响应层 (1.025) > 状态层 (0.995) > 压力层 (0.766), 说明在工程实际运行中, 需重点提升工程在遭受风险后维持稳态、快速有效响应等方面的能力, 以提升工程运行安全韧性。

3.4 韧性提升策略

综合分析各案例的各指标实际数据, 可采取的运行安全韧性提升策略主要如下:

(1) 压力方面。在工程条件方面, 针对地质、环境及气象易发灾害, 采取专项防治措施, 结合区域发展规划, 在工程前期设计中尽可能地避免与其他基础设施交叉施工作业; 在调度协调方面, 综合考虑工业、农业、民用及生态用水需求, 建立动态水资源调度系统, 建立并落实跨区域调度协商、移民征地补偿制度, 以减少水事纠纷、第三方破坏事件的发生。

(2) 状态方面。一是建立完善的信息化监测平台, 实现对工程结构强度、变形速率、设施故障损毁等情况的全面监控及预警; 二是应配备充足的应急保障资源, 定期对核心设施、输水建筑物进行巡查检修。

(3) 响应方面。一是保证工程数据资料档案收集全面, 为灾害应急管理制度优化提供保障; 二是制订有效的应急响应预案, 并加强对员工的运行安全知识及制度培训, 以提升运行管理人员的安全意识和应急处理能力。

4 结语

为提升长距离输水工程运行安全水平, 结合韧性理论与 PSR 模型, 从压力层、状态层、响应层三个维度, 构建了较为完善的长距离输水工程运行安全韧性指标体系; 分别采用 G1 法和 CRITIC 法进行主客观赋权, 并运用最小相对熵原理确定综合权重, 建立基于 PSR-TOPSIS 的长距离输水工程运行安全韧性评估模型; 依据区域及工程特点, 划分韧性等级标准, 并对代表性工程案例评估其韧性等级。结果表明, 该模型评估结果符合实际, 各案例运行安全韧性水平均未达到高韧性等级, 且运行安全韧性受响应层影响最大、状态层影响程度其次, 压力层最次。

参考文献

[1] 中国共产党中央委员会, 中华人民共和国国务院. 国家水网建设规划纲要 [EB/OL]. (2023-05-25) [2024-02-01].

- http://www.news.cn/2023-05/25/e_1129645548.htm.
- [2] 周雅程, 刘建华. 新发展理念引领下实现水利建设高质量发展问题研究 [J]. 价格理论与实践, 2020 (12): 27-30.
- [3] 王济干, 和梦思. 基于共识模型和前景理论的输水工程运行安全风险评价 [J]. 水利经济, 2022, 40 (1): 71-78, 84, 88.
- [4] 聂相田, 赵天明, 庄濮瑞, 等. 长距离引水工程运行安全风险关联分析及风险传递研究 [J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (2): 45-53.
- [5] 关炜, 张颜, 孟路遥, 等. 长距离调水工程运行安全风险预警系统研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2021.
- [6] 汤洪洁, 赵亚威. 跨流域长距离调水工程风险综合评价研究与应用 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2023, 21 (1): 29-38.
- [7] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4 (1): 1-23.
- [8] BROWN C, FREDERICK B, SARAH F, et al. Resilience by design: a deep uncertainty approach for water systems in a changing world [J]. Water Security, 2020 (9): 1-8.
- [9] 杨芳, 蒋艳灵, 田川, 等. 三亚市基于韧性理念的旅游城市供水策略研究 [J]. 中国给水排水, 2022, 38 (12): 14-21.
- [10] 詹栩怡, 刘书明, 于喜鹏, 等. 供水管网韧性评估方法研究 [J]. 给水排水, 2020, 6 (6): 141-145.
- [11] 宋亮亮, 张劲松, 杜建波, 等. 基于组合赋权和云模型的水利工程运行安全韧性评价 [J/OL]. 水资源保护, 2024: 1-14 [2024-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20221129.1529.002.html>.
- [12] 曹建廷, 邢子强. 水基础设施韧性及提升途径初步分析 [J]. 水利规划与设计, 2020 (12): 75-79.
- [13] 闫晨, 陈锦涛, 段芮, 等. 基于压力-状态-响应模型的历史街区防火韧性评估体系构建及应用——以福州市三坊七巷为例 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (8): 3290-3296.
- [14] 陈娜, 郭浩然, 张志鹏, 等. 基于 H-OWA 算子和投影寻踪的地铁站水灾安全韧性评估 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (4): 148-154.
- [15] WILSON D, JONAS A E G. Urban resilience: an urban political movement [J]. Urban Geography, 2018, 39 (8): 1-3.
- [16] 焦柳丹, 邓佳丽, 吴雅, 等. 基于 PSR + 云模型的城市韧性水平评价研究 [J]. 生态经济, 2022, 38 (5): 114-120.
- [17] 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.
- [18] 巴振宁, 王鸣铎, 梁建文. 基于改进 F-ANP 方法的市政排水管网运行安全风险评估 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27 (6): 208-216.
- [19] 刘平清, 张鹏, 宁宝权. 基于改进 CRITIC-G1 法的混合交叉赋权与 TOPSIS 模型的节水灌溉项目优选 [J]. 节水灌溉, 2019 (12): 106-109.
- [20] 李志强, 李琳, 张素凤, 等. 基于 CRITIC-G1 法赋权的包装方案综合评价 [J]. 包装工程, 2021, 42 (13): 180-185.
- [21] 雷功炎. 关于将相对熵用于层次分析的简单注记 [J]. 系统工程理论与实践, 1995 (3): 65-68. **PMT**

收稿日期: 2023-12-15

作者简介:

张勇 (1965—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 硕士研究生导师, 研究方向: 项目管理、水利工程、土木建造与管理。

李萌 (通信作者) (2000—), 男, 研究方向: 项目经济与管理。

蔡戈 (1998—), 男, 研究方向: 项目经济与管理。