

基于改进赋权的山区堤防安全云模型评价方法

王肖鑫¹, 岑威钧¹, 晏成明², 武娟³, 张鸣³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510610;
3. 南京市高淳区水资源管理中心, 江苏 南京 211301)

摘要:在综合分析山区堤防工程自身特性及其运行条件的基础上,结合行业规范及相关专业研究成果,构建了包含降水强度、河道形态、堤身材料、堤身渗透性及历史险情等17个评价指标的山区堤防安全评价指标体系,通过改进层次分析法和基于平均差的CRITIC法对评价指标进行主观和客观赋权,并基于博弈论组合赋权,提出了一种改进组合赋权的山区堤防安全云模型评价方法。对清远市某山区堤防工程安全云模型评价结果表明,该山区堤防工程的安全评分为70.6,安全等级为基本安全,与工程实际情况相符,验证了该评价方法的可靠性和合理性,可用于山区堤防安全评价。
关键词:山区堤防;安全评价;云模型;组合赋权;层次分析法;CRITIC法

中图分类号:TV871.2 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2022)05-0058-06

Cloud model evaluation method of levee safety in mountain area based on improved weighting//WANG Xiaoxin¹, CEN Weijun¹, YAN Chengming², WU Juan³, ZHANG Ming³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510610, China; 3. Water Resources Management Center of Gaochun District, Nanjing 211301, China)

Abstract: On the basis of comprehensive analysis of the characteristics and operating conditions of mountain levees, combined with industry standards and related professional research, a mountain levee safety evaluation system with 17 evaluation indexes was constructed, including rainfall intensity, channel shape, dike material, dike permeability, historical danger, etc. The indexes were weighted subjectively and objectively by improved analytic hierarchy process and CRITIC method based on average difference, and an improved combined weighted cloud model evaluation method was proposed based on game theory. The proposed improved method was applied to the safety evaluation of a mountain levee project in Qingyuan. The calculation and analysis show that the safety score of the mountain levee project is 70.6, and the safety level is basic safety, which is consistent with the actual situation of the project. The reliability and rationality of the levee safety evaluation method proposed in this paper is then verified, and it can be used for the levee safety evaluation in mountain area.
Key words: embankment in mountain area; safety evaluation; cloud model; combination weighting; analytic hierarchy process; CRITIC method

我国堤防工程类型多、堤线长、分布广、运行条件差异大、管理水平参差不齐,导致各堤防安全性差异大,一些工程安全隐患问题突出。截至2019年我国拥有各类堤防32.03万km,其中达标长度为22.73万km,达标率仅为70.96%^[1]。大量工程调查和研究表明,目前不少堤防工程存在防洪标准低、堤身渗水、堤坡稳定性差、堤顶高程不足等问题。与平原堤防相比,山区堤防所在河道多为天然形成,河道蜿蜒曲折且比降较大,汛期时洪峰流量大,历时短,常出现水位暴涨暴跌的现象,加之堤身材料分布

不均,可能会发生堤防渗漏、失稳、崩塌、漫顶、溃决等破坏,且山区堤防在日常管理和运行维护方面普遍存在不足,因此非常有必要对山区堤防进行安全综合评价,及时掌握其安全状况^[2-3]。
目前,国内外已有不少堤防工程安全评价方面的研究,尤其近年来一些学者根据模糊理论、风险评估方法等构建了不确定性评价模型对堤防工程进行安全评价。冯峰等^[4]基于后果逆向扩散法,构建了多层次半结构性的评价指标体系,并基于分层赋权思路,对多层次的黄河堤防评价体系进行赋权。兰

博等^[5]运用改进的模糊层次分析法(FAHP)与熵权融合法确定各评价指标权重,并基于专家打分法对堤防工程安全进行评价。云模型方法作为一种具有模糊性和随机性的新评价方法,能够对影响工程的外在风险和内在因素进行系统性分析。罗日洪等^[6]采用熵权法和改进群组 G1 法组合赋权,引入云模型理论对实际堤防工程进行综合安全评价,结果表明基于云模型的堤防安全评价结果与堤防的实际运行状态一致。Wang 等^[7]针对边坡稳定性分析中指标的多重不确定性和分布特征,提出了一种新的多维关联云模型,该模型能清晰地描述数据的随机和模糊分布。杨子桐等^[8]分析了堤防工程的失事风险因子,根据可靠度理论确定了指标等级范围并提出了堤防风险云模型评价方法。目前缺少特定情况下评价指标选择和指标间关联性分析等方面的系统性研究,且评价对象通常为平原堤防,对山区堤防进行综合安全评价的研究较少。因此,本文针对考虑强降雨、超标洪水等极端条件的山区堤防工程,采用改进可拓层次分析法进行主观赋权,基于平均差的 CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation)法进行客观赋权,基于博弈论进行组合赋权,构建改进组合赋权云模型,并对清远市某山区堤防安全进行了综合评价。

1 评价指标体系

考虑山区堤防工程自身特性及其特有的运行条件,结合堤防渗透破坏、塌陷、失稳等险情分析,并根据 SL/Z 679—2015《堤防工程安全评价导则》和 GB 50286—2013《堤防工程设计规范》关于堤防设计、管理和评价等相关规定,建立考虑强降雨、超标洪水等极端条件的山区堤防安全评价指标体系如图 1 所示。评价指标体系包含目标层、准则层和指标层 3 个层次,其中准则层包括水文与气候特性、河道特性、堤身特性及结构安全、堤身渗流安全性和堤防运行管理 5 个方面,作为评价山区堤防安全的二级指标,指标层包含降水强度、河道形态、堤身材料等 17 个影响堤防安全的具体指标。

目前关于山区堤防综合安全评价的研究较少,参考 SL/Z 679—2015《堤防工程安全评价导则》和一般堤防工程的安全评价方法,结合山区堤防特点、运行条件及其影响因素,将山区堤防安全评价等级划分为安全、基本安全和不安全 3 级,其评分区间对应(85,100]、[60,85]和[0,60),根据 SL/Z 679—2015《堤防工程安全评价导则》、GB 50286—2013《堤防工程设计规范》以及堤防安全评价方面的相关研究^[8-10],确定山区堤防安全评价指标等级划分

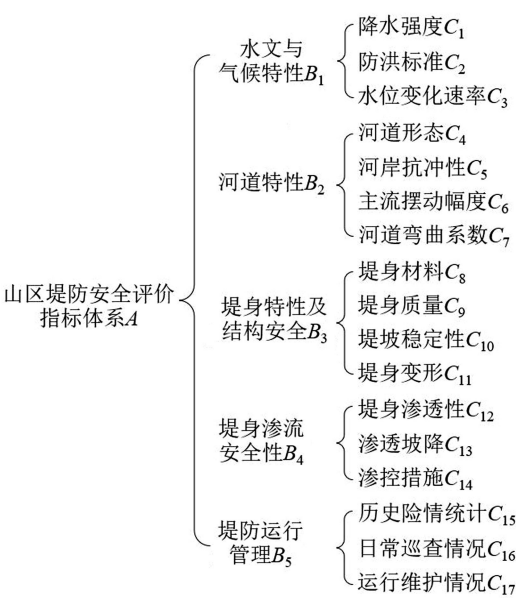


图 1 山区堤防安全评价指标体系

标准如表 1 所示。

2 评价模型

2.1 云模型理论

云模型是李德毅院士提出的一种处理定性概念与定量描述的不确定转换模型,已经成功应用于各类综合评价研究^[11-13]。设 U 是一个用数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量数值 $x \in U$ 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0,1]$ 是有稳定倾向的随机数,即

$$\mu(x):U \rightarrow [0,1] \quad (\forall x \in U, x \in \mu(x)) \quad (1)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云,记作 $C(x)$;每一个 x 称为一个云滴。

采用云模型对山区堤防进行安全评价时,需要采用赋权方法确定评价指标权重。将云模型与改进主、客观赋权方法相结合,基于博弈论进行组合赋权,构建山区堤防安全评价模型。云模型包含期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 3 个云数字特征,其中,期望 E_x 是云滴在论域空间分布的中心值,用于反映山区堤防安全状态的预期;熵 E_n 是定性概念随机性的度量,反映了能够代表这一定性概念的云滴的离散程度,是对评价结果可信度的一种描述;超熵 H_e 是熵的不确定性度量,即熵的熵,由熵的随机性和模糊性共同决定,是对不确定性评价结果稳定性的一种描述。期望 E_x 越大,表明山区堤防越安全;熵 E_n 越小,表明评价结果的可信度越高;超熵 H_e 越小,表明评价结果的稳定性越高。

2.2 可拓层次分析法

传统层次分析法仅对某一具体标度值进行评价,本文引入区间数对传统层次分析法进行改进,构

表 1 山区堤防安全评价指标等级划分标准

安全等级	$C_1/(mm \cdot d^{-1})$	C_2	$C_3/(m \cdot d^{-1})$	$C_4/\%$	C_5	C_6	C_7
安全	<10	满足堤防工程防洪标准	<0.5	<0.1	有较强的抗冲性	摆动幅度小	<1.3
基本安全	10 ~ 50	基本满足堤防工程防洪标准	0.5 ~ 3	0.1 ~ 1	有一定的抗冲性	摆动幅度较小	1.3 ~ 1.5
不安全	>50	不满足堤防工程防洪标准	>3	>1	抗冲性较差	摆动幅度大	>1.5
安全等级	$C_8/\%$	C_9	C_{10}	C_{11}	$C_{12}/(cm \cdot s^{-1})$		
安全	>20 ~ 35	质量好	满足规范要求,无开裂、窝崩等现象	未出现明显不均匀变形,沉降率和倾度小于 1%	<10 ⁻⁵		
基本安全	10 ~ 20	质量较好	基本满足规范要求,出现微小裂缝和窝崩前兆	存在一定程度的不均匀变形,沉降率和倾度在 1% ~ 3% 之间	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁴		
不安全	<10 或>35	质量差	不满足规范要求,出现滑坡迹象、较大裂缝等现象	存在明显的不均匀沉降,沉降率和倾度大于 3%	>10 ⁻⁴		
安全等级	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}		
安全	<0.3	渗控措施完善	未有明显险情	开展必要的巡查工作,有详细记录和分析	按要求制定规章制度,定期运行维护,管理范围明确		
基本安全	0.3 ~ 0.5	渗控措施较为完善,未出现明显缺陷	存在少量险情,但未影响到堤防安全	有一定的巡查并做记录	不定期运行维护,未有明确的管理范围		
不安全	>0.5	渗控措施有明显缺陷	存在较多险情,出现一些破坏性特征	几乎无巡查和记录	缺少规章制度,基本无运行维护		

注:河道形态 C_4 用河床纵坡比表示,堤身材料 C_8 用堤身黏土含量(质量分数)表示。

建基于区间数的可拓层次分析法来确定主观权重。改进后的可拓层次分析法可以从“模糊不确定性”和“随机不确定性”两个方面对指标之间的重要程度进行评判,提高了评价方法的可信性。具体实现步骤如下:

步骤 1 建立山区堤防安全评价指标体系后,对指标层和准则层的指标构建区间数判断矩阵 Z :

$$Z = (< c_{ij}^-, c_{ij}^+ >)_{n \times n} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n) \quad (2)$$

式中: c_{ij}^- 、 c_{ij}^+ 分别为判断矩阵 Z 内各区间的下界值和上界值; n 为评价指标总数。

Z^- 和 Z^+ 分别为由 c_{ij}^- 和 c_{ij}^+ 构成的下界矩阵和上界矩阵,计算 Z^- 和 Z^+ 最大特征值对应的归一化特征向量 w^- 和 w^+ ,同时根据 Z^- 和 Z^+ 计算权重系数 k 和 f ,计算公式如下:

$$k = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(1 / \sum_{i=1}^n c_{ij}^+ \right)} \quad (3)$$

$$f = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(1 / \sum_{i=1}^n c_{ij}^- \right)} \quad (4)$$

k 、 f 需同时满足 $0 \leq kw_i^- \leq fw_i^+$ 和 $0 \leq k \leq 1 \leq f$ 。

评价对象的权重向量 W 表示为

$$W = (W_1, W_2, \cdots, W_n) = (kw^-, fw^+) \quad (5)$$

步骤 2 进行某层指标对于上级相关联指标的层次排序。 $V(W_i \geq W_j)$ 为 W_i 大于或等于 W_j 的可能性程度,具体计算公式如下:

$$V(W_i \geq W_j) = \frac{2(W_i^+ - W_j^-)}{(W_j^+ - W_j^-) + (W_i^+ - W_i^-)} \quad (6)$$

式中 W^- 、 W^+ 分别为根据判断矩阵下界值和上界值计算得到的权重值。

2.3 基于平均差的 CRITIC 法

采用传统 CRITIC 法进行客观赋权时,存在准

确性低、误差大等缺陷,进而可能会导致对数据的误判而产生“失真”现象。本文对传统 CRITIC 法进行改进,提出基于平均差的 CRITIC 客观赋权方法,选取的平均差能够客观、全面表征数据平均变动程度,提高了评价结果的准确性。具体计算步骤如下:

步骤 1 计算评价指标 j 的平均差 Q_j :

$$Q_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| x_j - \bar{x}_j \right| \quad (7)$$

式中: x_j 为评价指标 j 的值; $\bar{x}_j$ 为 n 个评价指标的平均值。

步骤 2 计算评价指标之间的相关系数 r_{ij} :

$$r_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^m (x_{hi} - \bar{x}_i)(x_{hj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{h=1}^m (x_{hi} - \bar{x}_i)^2 \sum_{h=1}^m (x_{hj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (8)$$

式中: x_{hi} 、 x_{hj} 分别为第 h 个评价对象中评价指标 i 和 j 的指标值; $\bar{x}_i$ 、 $\bar{x}_j$ 为 m 个评价对象对应评价指标的均值。

步骤 3 由相关系数 r_{ij} 推求评价指标 j 和其他评价指标的冲突性指标值 R_j :

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (i \neq j) \quad (9)$$

由评价指标的平均差和冲突性指标值计算评价指标 j 信息量 C_j :

$$C_j = Q_j R_j \quad (10)$$

计算评价指标 j 的权重 w_j :

$$w_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j \quad (j = 1, 2, \cdots, m) \quad (11)$$

2.4 基于博弈论的组合赋权

通过改进的层次分析法和 CRITIC 法确定主观权

重和客观权重之后,根据博弈论对各评价指标进行组合赋权。博弈论的核心思想是在寻求多种赋权方法评价指标权重一致性的同时,使各个评价指标的组合权重与各赋权方法下的单一权重之间的偏差最小化。

建立山区堤防安全评价指标的基本权重组合如下:

$$\mathbf{W} = (w_{11}, w_{12}, \dots, w_{ln}) \quad (t = 1, 2, \dots, l) \quad (12)$$
式中: $\mathbf{W}$ 为 l 种主、客观赋权方法的权重向量; $w_{ts}(s=1, 2, \dots, n)$ 由第 t 种赋权方法得到的评价指标 s 的权重。

评价指标 s 的组合权重 w_s 计算公式如下:

$$w_s = \sum_{t=1}^l \alpha_t w_{ts} \quad (13)$$

式中 α_t 为第 t 种赋权方法的权重。

根据博弈论,最优方案为使组合权重 w_s 和 $\mathbf{W}$ 的离差最小:

$$\min \left\| \sum_{t=1}^l \alpha_t \mathbf{W}^T - \mathbf{W}^T \right\|_2 \quad (14)$$

通过归一化后的权重 α_t^* 计算得到基于博弈论的组合权重 $\mathbf{W}^*$:

$$\mathbf{W}^* = \sum_{t=1}^l \alpha_t^* \mathbf{W}^T \quad (15)$$

3 实例验证

清远市位于广东省的中北部、北江中下游、南岭山脉南侧与珠江三角洲的结合带上,属亚热带季风气候,年平均气温为 20.7℃,雨水资源丰富,年平均降水量为 1909.0 mm,年平均降水日为 168 d。选取清远市某山区堤防工程作为评价对象,该山区堤防堤顶宽度为 10~12 m,堤基主要由粉质黏土、粉质壤

土构成,夹杂有少量粉细砂层。综合考虑河道特性、堤身和堤基结构特征、历史险情等因素,选取该山区堤防内具有代表性的 2 km 堤段作为安全评价对象。

邀请 5 位行业专家对堤防安全评价指标进行打分,判断各指标间的重要程度,根据式(2)构建出准则层 B 和指标 C 的区间数判断矩阵。使用 MATLAB 软件计算构建的判断矩阵的最大特征值,并求出对应的归一化向量,同时计算得到式(3)和式(4)中的 k 和 f ,最终根据式(6)确定出基于可拓层次分析法的山区堤防安全评价指标主观权重。同时,采用基于平均差的 CRITIC 法计算得到山区堤防安全评价指标客观权重。确定主、客观权重后,基于博弈论对各个评价指标进行组合赋权,计算得到主观赋权方法的权重 $\alpha_t^* = 0.55$,客观赋权方法的权重 $\alpha_t^* = 0.45$,求出各评价指标的组合权重,并对 5 位行业专家的打分用云模型进行计算,指标权重和云模型参数如表 2 所示。

根据评价指标的云模型参数随机生成 2 000 个云滴,统计各安全等级区间云滴的占比,结果见图 2。图 3 为 4 个典型指标的云滴分布(不安全 1 个、安全 1 个、基本安全 2 个)。

从表 2 和图 2 可以看出:①17 个堤防安全评价指标中,除堤身材料 C_8 、渗透坡降 C_{13} 和渗控措施 C_{14} 的评价等级为安全以外,其余指标的评价等级均为基本安全;指标层中的 $C_1 \sim C_5$ 有部分云滴落在不安全等级区间内,云滴落在不安全等级区间占比最大的指标为水位变化速率 C_3 ,云滴占比超过 10%;安全等级区间云滴占比最大的指标为渗透坡降 C_{13} ,可以看到该指标的大部分云滴分布在安全等级区间内;作为基本安全等级区间云滴占比前 2 位的指标,

表 2 山区堤防工程安全评价指标权重及云参数计算结果

准则层	准则层权重	指标层	归一化权重	主观权重	客观权重	组合权重	E_x	E_n	H_e
B_1	0.386	C_1	0.196	0.060	0.084	0.071	69.4	6.898	0.389
		C_2	0.188	0.071	0.063	0.068	67.3	4.713	1.579
		C_3	0.616	0.254	0.187	0.223	66.1	5.124	0.377
B_2	0.272	C_4	0.463	0.136	0.086	0.113	67.4	3.810	0.981
		C_5	0.106	0.016	0.038	0.026	68.9	3.589	0.710
		C_6	0.201	0.045	0.054	0.049	70.1	2.406	0.097
		C_7	0.230	0.075	0.033	0.056	73.7	2.807	1.148
		C_8	0.223	0.020	0.053	0.035	86.5	1.634	0.907
B_3	0.129	C_9	0.217	0.030	0.038	0.034	81.9	2.607	0.710
		C_{10}	0.312	0.050	0.046	0.049	78.8	3.319	0.921
		C_{11}	0.248	0.029	0.050	0.039	81.7	2.306	0.618
		C_{12}	0.269	0.032	0.057	0.043	81.2	2.306	0.618
B_4	0.161	C_{13}	0.550	0.116	0.054	0.088	89.0	2.106	1.366
		C_{14}	0.181	0.013	0.049	0.029	88.9	3.910	0.714
		C_{15}	0.364	0.031	0.025	0.028	74.0	4.452	1.899
B_5	0.052	C_{16}	0.221	0.011	0.025	0.017	75.4	3.068	0.927
		C_{17}	0.415	0.011	0.058	0.032	79.5	4.011	0.644

注:归一化权重为指标组合权重的归一化值。

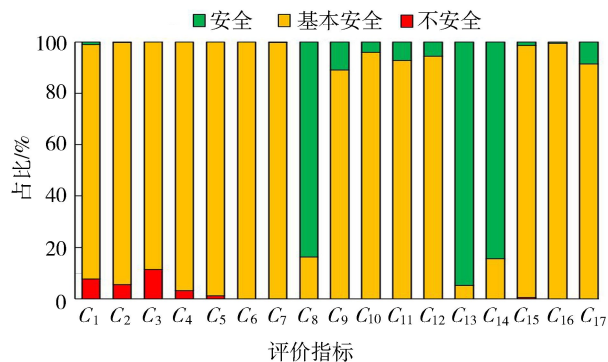


图2 评价指标各安全等级区间的云滴占比

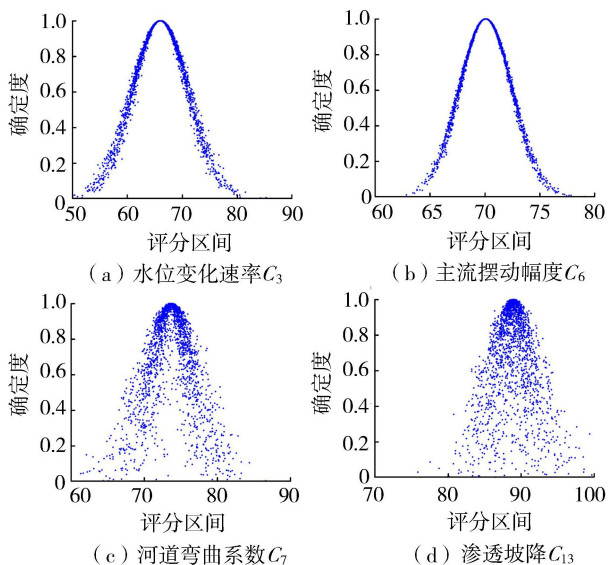


图3 4个典型评价指标云滴分布

主流摆动幅度 C_6 和河道弯曲系数 C_7 绝大部分云滴落在基本安全等级区间内,仅河道弯曲系数 C_7 有极个别云滴落在安全等级区间内;水位变化速率 C_3 的期望 E_x 最小(66.1),原因是在较大降水强度下,该山区堤防的水位变化速率大。②准则层中,权重最大的是水文与气候特性 B_1 ,为0.386,最小的为堤防运行管理 B_5 ,为0.052,说明水文与气候特性对该山区堤防安全的影响较大,因此需要对强降雨、超标洪水等极端条件重点关注。③从主观权重来看,水位变化速率 C_3 (0.254)、河道形态 C_4 (0.136)、渗透坡降 C_{13} (0.116)等是影响山区堤防安全的重要因素。④从客观权重来看,水位变化速率 C_3 (0.187)、河道形态 C_4 (0.086)、降水强度 C_1 (0.084)对堤防安全影响较大。⑤从组合权重来看,水位变化速率 C_3 (0.223)和河道形态 C_4 (0.113)依旧是影响山区堤防安全的重要因素。考虑到山区堤防降雨情况复杂,河道特性与一般堤防所在河流有较为明显的差异,因此水文与气候特性 B_1 和河道特性 B_2 中的其他指标对山区堤防安全的影响也不能忽视。

将上述指标层和准则层的权重以及评价指标云参数结合云模型进行计算,得到准则层水文与气候

特性 B_1 、河道特性 B_2 、堤身特性及结构安全 B_3 、堤身渗流安全性 B_4 、堤防运行管理 B_5 的云参数分别为 (66.9, 5.182, 0.463)、(69.7, 3.486, 0.946)、(80.2, 3.219, 0.896)、(84.3, 2.439, 0.698) 和 (75.5, 3.174, 0.991),最终得到山区堤防安全评价总目标的云参数为 (70.6, 3.922, 0.671)。图4给出了山区堤防安全评价指标体系准则层和目标层安全等级云滴分布。

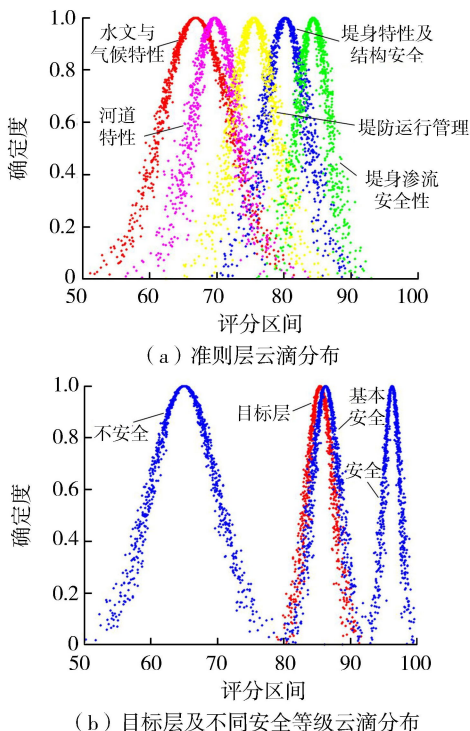


图4 山区堤防安全评价指标体系安全等级云滴分布

准则层5个2级评价指标均为基本安全,但评分有一定差异:堤身渗流安全性 B_4 的评分最高(84.3),接近于安全的指标评分;堤防运行管理 B_5 的评分较低(75.5),原因是该山区堤防工程在巡视检查等方面管理滞后;水文与气候特性 B_1 的评分最低(66.9),应特别注意强降雨、超标洪水等极端条件下的山区堤防安全,需及时采取一定的防护措施。山区堤防安全评价总目标的云参数中, $E_n = 3.922$, 数值较小,表明评价结果的可信度较高; $H_e = 0.671$, 数值较小,表明评价结果的稳定性较高,目标层安全等级的云滴绝大部分落在基本安全的范围内,结合该山区堤防工程的安全评分(70.6),可以判断该山区堤防工程的安全等级为基本安全。该评价结果和与该山区堤防工程的实际情况相符,表明本文提出的评价方法可靠性较高。

4 结 语

考虑山区堤防工程自身特性及其特有的运行条件,建立了山区堤防安全评价体系,包含17个3级

评价指标和 5 个 2 级评价指标。可拓层次分析法综合考虑了复杂条件下堤防工程的模糊性和随机性,基于平均差的 CRITIC 法客观、全面表征了数据,同时基于博弈论组合赋权避免了单一权重法的片面性,相较于传统的综合评价方法,改进赋权方法实现了定性定量的不确定性转化,有效提高了评价指标权重的合理程度。工程案例验证结果表明,除堤身材料、渗透坡降和渗控措施的评价等级为安全以外,其余指标评价等级均为基本安全,计算得到该山区堤防工程的安全评分为 70.6,结合准则层 5 个 2 级评价指标和目标层的安全等级云图,判定该山区堤防工程安全等级为基本安全,与该工程的实际情况相符合,验证了本文提出的评价方法的合理性。针对山区堤防,应重点关注在强降雨、超标洪水等极端条件下的堤防安全,同时对河道转折较大及堤身材料较差的薄弱堤段加强巡视和检修工作。考虑到目前山区堤防安全评价方面尚未形成较为系统的研究,后续研究中可进一步结合风险源识别方法,同时进行失效模式分析,挖掘更多的风险因素,构建更为完善的评价指标体系。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2019 年中国水利统计年鉴 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[2] 介玉新,胡韬,李青云,等. 层次分析法在长江堤防安全评价系统中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44 (12): 1634-1637. (JIE Yuxin, HU Tao, LI Qingyun, et al. Application of analytical hierarchy process in the comprehensive safety assessment system of Yangtze River levee [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44 (12): 1634-1637. (in Chinese))

[3] 赵鑫,马贵生,万永良,等. 堤防工程堤基渗流安全评价方法[J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (10): 79-84. (ZHAO Xin, MA Guisheng, WAN Yongliang, et al. A safety assessment method for seepage flow in dyke foundation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36 (10): 79-84. (in Chinese))

[4] 冯峰,倪广恒,何宏谋. 基于逆向扩散和分层赋权的黄河堤防工程安全评价[J]. 水利学报, 2014, 45 (9): 1048-1056. (FENG Feng, NI Guangheng, HE Hongmou. Research on safety evaluation of Yellow River embankment based on consequence-reverse-diffusion and layered-weight method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (9): 1048-1056. (in Chinese))

[5] 兰博,关许为,肖庆华. 基于 FAHP 与熵权融合法的堤防工程安全综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2019 (6): 131-133. (LAN Bo, GUAN Xuwei, XIAO Qinghua. A comprehensive evaluation of dike engineering safety based

on fusion method of FAHP and entropy [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (6): 131-133. (in Chinese))

[6] 罗日洪,黄锦林,张建伟,等. 基于组合赋权和云模型的堤防安全评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19 (6): 1217-1226. (LUO Rihong, HUANG Jinlin, ZHANG Jianwei, et al. Dike safety evaluation based on combined weighting and cloud model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19 (6): 1217-1226. (in Chinese))

[7] WANG M, WANG X, LIU Q, et al. A novel multi-dimensional cloud model coupled with connection numbers theory for evaluation of slope stability [J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 77 (1): 426-438.

[8] 杨子桐,黄显峰,方国华,等. 基于云模型的堤防工程风险评价方法与应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52 (7): 572-580. (YANG Zitong, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Risk assessment method and application of embankment engineering based on cloud model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52 (7): 572-580. (in Chinese))

[9] 顾冲时,汪自力,刘成栋. 堤防工程安全评估专家赋权模型[J]. 岩土力学, 2006, 27 (12): 2099-2104. (GU Chongshi, WANG Zili, LIU Chengdong. Experts' weight model assessing embankment safety [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (12): 2099-2104. (in Chinese))

[10] 谢婕,龚政,陈永平,等. 海堤安全评价指标体系的构建及应用[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (2): 59-63. (XIE Jie, GONG Zheng, CHEN Yongping, et al. Establishment and application of index system for seawall safety assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (2): 59-63. (in Chinese))

[11] ZHANG Z, LIU Y, LI Y, et al. Lake ecosystem health assessment using a novel hybrid decision-making framework in the Nam Co, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 152087.

[12] 高玉琴,陈鸿玉,刘云苹. 基于云模型的自然灾害灾情等级评估[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38 (6): 38-43. (GAO Yuqin, CHEN Hongyu, LIU Yunping. Study of grade assessment of natural disaster situation based on cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (6): 38-43. (in Chinese))

[13] 黄显峰,刘展志,方国华. 基于云模型的水利现代化评价方法与应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (6): 54-61. (HUANG Xianfeng, LIU Zhanzhi, FANG Guohua. Evaluation and application of water conservancy modernization index system based on a cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (6): 54-61. (in Chinese))

(收稿日期:2022 - 01 - 16 编辑:熊水斌)