

基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价

郭 金^{1,2}, 顾冲时^{1,2}, 何 菁³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 南京市水利建筑工程检测中心有限公司, 江苏 南京 210036)

摘要:针对堤防风险评价中风险等级判定主观性太强、风险指标具有模糊性和随机性等问题,采用改进层次分析法(AHP)和熵权法组合赋权的方式,提出基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价方法。以现行堤防安全评价导则为基础,综合考虑运行管理、堤基质量、堤身质量、防洪能力、渗流安全和结构安全 6 个方面构建堤防工程风险评价指标体系,在此基础上计算各评价指标隶属于不同风险等级的二维云模型参数,并将结果以风险云图的形式输出,直观地判定堤防的风险等级。将该方法应用于黄河下游某堤防工程的风险评价,结果与实际情况相符,表明该方法合理可行。

关键词:堤防工程;二维云模型;组合优化赋权;风险评价

中图分类号:TV87 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0117-06

Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting//GUO Jin^{1,2}, GU Chongshi^{1,2}, HE Jing³(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Water Conservancy Construction Engineering Testing Center Co., Ltd., Nanjing 210036, China)

Abstract: Aiming at the problems of strong subjectivity in risk grade judgment, fuzziness and randomness of risk index in levee risk evaluation, a risk evaluation model based on two-dimensional cloud model with combination weighting was proposed by using improved analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method. On the basis of the existing levee safety evaluation criterion, the risk evaluation index system of levee engineering was constructed by considering six aspects, including operation management, levee foundation quality, levee body quality, flood control ability, seepage safety and structural safety. On this basis, the two-dimensional cloud model parameters of each evaluation index belonging to different risk levels were calculated, and the results were output in the form of risk cloud map, which could intuitively judge the risk of caution. Finally, the model was applied to a levee project in the lower Yellow River, and the results were consistent with the actual situation, indicating the reasonability and feasibility of the proposed method.

Key words: levee engineering; two-dimensional cloud model; optimized combination weighting method; risk assessment

作为防洪体系的重要组成部分,堤防工程历来受到人们的重视。近年来,长江、黄河等主要河流流域的堤防工程规模和数量不断扩大,截至 2019 年底,全国已建成 5 级及以上江河堤防 32.0 万 km,累计达标堤防 22.7 万 km,达标率为 71.0%^[1]。堤防工程在抵御洪水灾害、保护下游人民生命财产安全方面发挥着重要作用,一旦失事将造成严重后果。因此,对堤防安全进行综合评价,确定堤防风险等级,对保证堤防安全运行,发挥堤防工程效益具有重要意义。目前,一部分学者已对堤防工程安全评价开展了研究,如王恩^[2]建立了基于层次分析法的模

糊综合评价模型,方法简单易操作,但是主观性较强,普适性较差。王秀杰等^[3]建立了具有较强鲁棒性的突变理论与 BP 神经网络相结合的综合评价模型,从致灾因子、孕灾环境和承灾体 3 个方面构建评价指标体系,但 BP 神经网络不易收敛且容易陷入局部最小值。蔡新等^[4]在堤防安全评价中引入灰色理论,构建了安全评价数学模型,但是灰色理论存在拟合度缺陷,且对原始数据有较高要求。

二维云模型拥有出色的处理模糊性和随机性能力,目前已在多个领域得到广泛应用^[5-7],但是二维云模型在堤防风险评价中的应用甚少。在堤防的风

险评价过程中,风险评价指标通常具有显著的模糊性和随机性特点,同时又不可避免地受到主观因素的影响。因此,本文将二维云模型引入到堤防风险评价中,以期能很好地解决风险因素随机性和模糊性的问题,降低主观因素的影响,为堤防的风险评价开辟新途径。

1 组合赋权二维云模型理论

1.1 组合赋权

传统的权重计算方法可分为主观赋权法和客观赋权法两大类。主观赋权方法,如层次分析法、专家咨询法、乘积标度法等主要依赖于专家的相关工程经验和主观认知,受主观因素影响较大,不能反映信息的客观真实性。客观赋权方法,如熵权法、BP神经网络法、投影寻踪法等可充分利用相关数据所蕴含的有效信息,降低主观因素的影响,但容易忽略数据间的差异性而与实际情况不符。权重计算的合理性直接影响风险评价模型的可靠性和评价结果的准确性。本文基于改进的层次分析法与熵权法进行优化组合赋权,减小了风险因素指标分析中因人员知识结构差异等造成的影响,使权重分配更加合理。

1.1.1 改进层次分析法确定主观权重

层次分析法是一种将定性指标量化的多目标决策方法,具有简单、实用、灵活的特点^[8]。传统的层次标度方法常采用1~9标度,专家判断的主观因素对最后权重计算结果有较大的影响,计算过程烦琐,且需要进行一致性检验。改进层次分析法采用0~2新标度法,专家更容易对指标重要性做出判断,降低了人为主观因素对计算结果的影响,且不需要进行一致性检验,使得计算更加简便。具体流程如下。

a. 建立堤防工程安全风险评价指标体系。将评价指标体系分为目标层、准则层、指标层3层单向递阶层次结构。

b. 对同一层次元素进行重要性比较,构造比较矩阵 $U=(u_{ij})_{n \times n}$,其中 u_{ij} 为元素 i 与元素 j 之间的相对重要性标度, n 为评价指标的个数。各评价指标的重要性标度见表1。

表1 指标相对重要性标度及关系

标度	含义
0	i j 两要素相比, j 比 i 重要
1	i j 两要素相比, i 与 j 重要性一致
2	i j 两要素相比, i 比 j 重要

c. 计算指标重要性排序指数:

$$r_i = \sum_{j=1}^n u_{ij} \tag{1}$$

d. 根据排序指数构造判断矩阵 $B=(b_{ij})_{n \times n}$,各元素 b_{ij} 为

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(k_m - 1) + 1 & r_i \geq r_j \\ \left[\frac{|r_i - r_j|}{r_{\max} - r_{\min}}(k_m - 1) + 1 \right]^{-1} & r_i < r_j \end{cases} \tag{2}$$

其中 $r_{\max} = \max\{r_i\}$ $r_{\min} = \min\{r_i\}$

$$k_m = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}$$

e. 构造最优传递矩阵 H ,其元素 h_{ij} 为

$$h_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\lg \frac{b_{ik}}{b_{jk}} \right) \tag{3}$$

f. 计算判断矩阵 B 的拟优一致矩阵 T ,其元素 t_{ij} 为

$$t_{ij} = 10^{h_{ij}} \tag{4}$$

g. 计算拟优一致矩阵 T 的最大特征值和对应的特征向量,将特征向量归一化后即为首求各因素的权重。

1.1.2 熵权法确定客观权重

熵权法作为一种客观赋权方法,依据各指标所含有效信息的多少确定对应指标的权重,可尽可能降低主观因素的影响,保证指标权重确定的合理性^[8],因此得到广泛应用。熵权法确定客观权重的公式为

$$w_k = \frac{1 - H_k}{n - \sum_{k=1}^n H_k} \tag{5}$$

其中 $H_s = -\frac{1}{\ln m} \left(\sum_{k=1}^m f_{ks} \ln f_{ks} \right)$ ($s = 1, 2, \dots, n$)

$$f_{ks} = b_{ks} / \sum_{k=1}^m b_{ks}$$

式中: b_{ks} 为第 k 个评价指标的第 s 个评价值,当 b_{ks} 为0时, $\ln f_{ks}$ 无意义,故规定 $b_{ks} = 0$ 时 $f_{ks} \ln f_{ks} = 0$; w_k 为第 k 个评价指标的权重,且满足 $\sum_{k=1}^n w_k = 1$ 。

1.1.3 组合赋权

采用差异系数法对主客观权重进行线性组合赋权,消除主客观单独赋权对权重结果的影响以达到扬长避短的效果:

$$W = \alpha W' + \beta W'' \tag{6}$$

其中

$$\alpha = \frac{n}{n-1} \left[\frac{2}{n} (p_1 + 2p_2 + \dots + np_n) - \frac{n+1}{n} \right]$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (\alpha, \beta \in (0, 1))$$

式中: W' 、 W'' 分别为层次分析法和熵权法确定的指标权重向量; p_1 、 p_2 、 $\dots$ 、 p_n 为权重 W' 中各评价指标按升序排列的权重值。

1.2 二维云模型

二维云模型描述了更复杂的不确定信息由定性

到定量的转换,由 (E_x, E_{n_x}, H_{e_x}) 和 (E_y, E_{n_y}, H_{e_y}) 两组云模型数字特征组成。设 F 为服从正态分布的二维随机函数,则称由满足式(7)的云滴 $\text{drop}(x_d, y_d, \mu_d)$ 组成的云模型为二维正态云模型^[9-10]。

$$\begin{cases} (x_d, y_d) = F(E_x, E_y, E_{n_x}, E_{n_y}) \\ (P_{x_d}, P_{y_d}) = F(E_{n_x}, E_{n_y}, H_{e_x}, H_{e_y}) \\ \mu_d = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x_d - E_x)^2}{2P_{x_d}^2} + \frac{(y_d - E_y)^2}{2P_{y_d}^2}\right]\right\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: d 为云滴序号; (x_d, y_d) 为以 (E_x, E_y) 为期望, (E_{n_x}, E_{n_y}) 为标准差生成的随机数; (P_{x_d}, P_{y_d}) 为以 (E_{n_x}, E_{n_y}) 为期望,以 (H_{e_x}, H_{e_y}) 为标准差生成的随机数; μ_d 为隶属度。

2 堤防工程风险评价模型

2.1 风险评价指标体系的确定

堤防工程风险评价指标体系的建立是对堤防工程进行风险评价的基础。大多数的堤防风险评价方法中评价指标的确定依赖于主观经验判断,脱离了现行设计规范或评价准则,影响堤防评价的全面性和结果的科学准确性。评价指标体系的确定应遵循科学性原则、层次性原则、系统性原则、时效性原则、可行性与实用性原则。本文依据SL/Z 67—2015《堤防工程安全评价导则》《堤防工程设计规范》,同时参考工程实际情况及相关文献^[11-14],建立科学完整的评价指标体系。以堤防工程风险评价为总目标,一级指标包括运行管理、堤基质量、堤身质量、防洪能力、渗流安全和结构安全6个指标,一级指标再具体划分为20个二级指标,如图1所示。

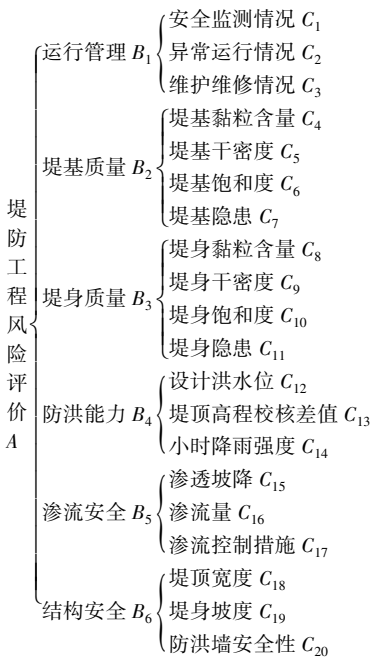


图1 堤防工程风险评价指标体系

2.2 风险云

事故发生的后果和概率共同决定了事故的风险等级,故对堤防风险评价指标的发生概率和后果进行分析可确定堤防的风险等级,即可明确堤防的安全状态。邀请业内专家对事故发生概率和事故后果进行打分,通过分析打分结果确定事故的等级^[15]。风险云的计算公式为

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{q} \sum_{t=1}^q x_t \\ E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{q} \sum_{t=1}^q |x_t - E_x| \\ H_e = \sqrt{\left| \frac{1}{q-1} \sum_{t=1}^q (x_t - E_x)^2 - E_n^2 \right|} \end{cases} \quad (8)$$

式中: q 为专家人数,即样本数量; x_t 为第 t 位专家的赋分值。

2.3 标准云

SL/Z 67—2015《堤防工程安全评价导则》中,堤防风险评价在结合运行管理、工程质量评价和防洪标准、渗流安全、结构安全性复核的基础上,将堤防工程的安全等级分为安全、基本安全、不安全三类。考虑到工程实际情况复杂,且存在诸多不确定性因素,故将堤防的安全等级做更细致的划分,以更准确地分析堤防的安全状况。最终拟定堤防的风险评价等级标准为高风险、较高风险、较低风险、低风险。参考我国水库大坝风险标准^[16],同时结合堤防工程实际运行条件确定堤防工程各风险等级对应风险概率。具体等级划分等见表2。

表2 风险等级评价标准

风险等级	风险等级阈值	风险等级描述	风险概率取值	风险概率等级描述	风险等级云数字特征
I	[7,10]	高风险	0.5~0.99	发生可能性很大	(8.5,0.5,0.05)
II	[4,7]	较高风险	0.01~0.5	发生可能性较大	(5.5,0.5,0.05)
III	[2,4]	较低风险	0.0004~0.01	发生可能性较小	(3,0.333,0.05)
VI	[0,2]	低风险	0.000006~0.0004	几乎不会发生	(1,0.333,0.05)

标准云的数字特征按下式计算:

$$\begin{cases} E_x = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{6} \\ H_e = 0.05 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 分别为风险等级标准区间的最小值和最大值。

2.4 综合风险云

各级指标权重确定后,按照从下到上的顺序计

算综合风险云,即由二级指标权重和风险云矩阵计算 1 级风险云,由一级指标权重和风险云矩阵计算综合风险云:

$$C=(w_1,w_2,\cdots,w_n)\begin{pmatrix}E_{x_1}&E_{n_1}&H_{e_1}\\\vdots&\vdots&\vdots\\E_{x_n}&E_{n_n}&H_{e_n}\end{pmatrix}=(E_x,E_n,H_e)$$

(10)

3 实例验证

3.1 工程概况

某堤防工程位于黄河下游平原地区,为 4 级堤防工程,设计水位高于流域平原区的平均地面高程,对流域平原区有重要的防洪作用。堤防工程防洪标准为 20 年一遇,防洪保护面积为 130 km²,其所在河段为土质岸坡,河岸遭受较严重冲刷破坏,堤身单薄。堤身横断面为梯形,堤顶宽度为 4.0 m,均质土堤。堤基为多层结构,上部为淤泥质土,中下部为淤泥、含贝壳淤泥和黏土,下部为基岩。

3.2 权重计算

邀请 6 位业内具有丰富经验的专家对堤防工程风险评价指标进行评分,评分依据见表 3;各指标的发生概率等级和事故后果等级评分结果见表 4。

根据式(1)~(4)确定主观权重,式(5)确定客

观权重,式(6)进行主客观权重组合赋权,根据式(8)~(10)计算各评价指标的风险云数字特征。各指标的权重和风险云数字特征见表 5。

3.3 结果分析

运用正向云发生器可得到综合风险云与标准风险云的对比,如图 2 所示。为明确运行管理、堤基质量、堤身质量、防洪能力、渗流安全和结构安全 6 个 1 级指标的风险等级,得出各 1 级指标风险云与标准云的对比,如图 3 所示。通过分析图 2 和图 3,可确定该堤防工程总体风险等级为Ⅱ级,即具有较高风险;6 个 1 级指标中,运行管理 B_1 、堤基质量 B_2 、堤身质量 B_3 、防洪能力 B_4 和渗流安全 B_5 均处于Ⅱ级风险附近,结构安全 B_6 风险等级更高,与Ⅰ级风险更加接近。实际情况中,由于该堤防工程建成已久,长期受水流的冲刷使堤身变得单薄,历年出现过塌岸且防洪墙有明显的变形和裂缝,已进行了除险加固设计并准备实施。评价结果与该工程实际情况基本吻合,表明该方法具有一定的可操作性和准确性。

4 结 语

针对传统堤防工程风险评价方法的局限与不足,本文采用以二维云模型为基础的堤防工程风险评价方法,从失事后果严重程度和发生概率 2 个角

表 3 风险等级评分依据

风险等级阈值及描述	C_1	C_2	C_3	$C_4/\%$	$C_5/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	C_6	C_7	$C_8/\%$	$C_9/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	C_{10}
高风险 [7,10]	安全监测设施失效,无监测资料	异常运行次数 4 次以上	工程不完整,维护维修不及时,抢修 2 次以上	<10 或>35	[0.0,0.25]	[0.8,1.0]	有明显发育洞穴或贯穿性裂缝	<10 或>35	[0.0,0.25]	[0.8,1.0]
较高风险 [4,7]	安全监测设施部分失效,监测资料不完整	异常运行次数 3~4 次	工程较完整,维护比较及时,有 1~2 次抢修	(25,35]	[0.25,0.50]	[0.7,0.8]	有裂缝但不贯穿,有洞穴但不发育	(25,35]	[0.25,0.50]	[0.7,0.8]
较低风险 [2,4]	安全监测设施基本符合要求,少部分监测参数无效	异常运行次数 1~2 次	工程完整,维护比较及时,效果一般	(15,25]	[0.50,0.75]	[0.5,0.7]	无明显洞穴或裂缝	(15,25]	[0.50,0.75]	[0.5,0.7]
低风险 [0,2]	安全监测设施符合要求,监测参数有效且有完整监测资料	无异常运行情况	工程完整,维护及时,效果好	[10,15]	[0.75,1.0]	[0.0,0.5]	无洞穴或裂缝	[10,15]	[0.75,1.0]	[0.0,0.5]

风险等级阈值及描述	C_{11}	C_{12}	C_{13}/m	C_{14}/mL	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}/m	C_{19}	C_{20}
高风险 [7,10]	有明显沉降、滑动、洞穴或贯穿性裂缝	与相关设计规范有较大偏差	>1.0	[150,200]	[0.50,1.00]	>1.5 <i>Q</i>	无渗控措施且渗流不稳定	[0,3]	[0.0,0.25]	墙体存在贯穿性裂缝或倾斜明显
较高风险 [4,7]	有明显的沉降、滑动或洞穴,无贯穿性裂缝	与相关设计规范有较小偏差	0.6~1.0	[100,150]	[0.35,0.50]	(1.25~1.5) <i>Q</i>	有渗控措施但损坏严重	[3,6]	[0.25,0.50]	墙体有较严重损坏或变形、裂缝明显
较低风险 [2,4]	有轻微沉降、滑动或少数洞穴,无明显裂缝	基本符合相关设计规范要求	0.2~0.6	[50,100]	[0.25,0.35]	(1~1.25) <i>Q</i>	有完备的渗控措施,局部存在缺陷	[6,8]	[0.50,0.75]	墙体有轻微损坏或微小裂缝,无变形
低风险 [0,2]	无沉降、滑动、洞穴或者裂缝等隐患	严格符合相关设计规范要求	≤0.2	[0,50]	[0.0,0.25]	< <i>Q</i>	有完备的渗控措施且运行良好	[8,20]	[0.75,1.00]	墙体完整无裂缝,无变形

注: Q 为满足规范要求的设计渗流量。

表 4 后果等级和概率等级专家评分

指标	后果等级评分						概率等级评分					
	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6
C ₁	5.7	5.4	5.2	5.3	5.5	5.0	6.7	6.3	6.0	5.9	6.5	5.8
C ₂	4.7	5.0	4.6	4.8	4.2	4.7	3.5	5.9	4.9	4.9	5.8	5.7
C ₃	4.6	4.9	5.2	5.0	5.5	5.1	8.6	4.1	6.3	6.6	6.2	5.7
C ₄	6.9	7.8	8.6	8.5	9.0	7.6	9.1	5.2	9.3	8.9	9.5	8.2
C ₅	8.4	7.8	8.0	7.8	7.9	7.8	6.0	5.9	4.5	7.6	4.0	6.0
C ₆	6.0	5.0	5.6	5.4	6.0	4.9	4.9	6.3	5.7	3.4	7.0	4.9
C ₇	4.4	4.7	3.5	4.1	4.0	3.9	4.6	5.2	6.6	5.6	3.2	7.4
C ₈	6.7	6.2	6.0	5.8	6.4	6.4	6.5	7.8	7.9	7.3	6.9	8.2
C ₉	4.2	4.3	4.5	4.6	3.8	4.1	3.5	4.2	3.6	4.4	3.4	6.2
C ₁₀	7.5	7.3	7.5	6.8	7.6	7.0	7.0	7.4	7.5	8.6	6.2	5.5
C ₁₁	6.0	7.0	6.1	6.2	4.8	6.4	6.1	7.7	7.4	7.5	7.4	7.0
C ₁₂	4.6	3.2	3.7	3.4	2.8	3.1	2.5	4.4	5.8	3.0	5.2	5.6
C ₁₃	8.7	8.6	9.0	8.6	8.5	9.5	7.2	8.0	8.3	9.1	9.0	8.1
C ₁₄	7.0	7.0	7.6	7.7	7.4	7.4	6.8	6.2	6.9	4.9	7.2	8.9
C ₁₅	8.0	8.9	8.4	8.6	8.7	8.6	9.0	6.4	9.2	6.2	9.2	8.0
C ₁₆	4.7	6.2	5.4	5.7	5.8	4.8	4.5	4.9	6.2	7.0	5.2	4.9
C ₁₇	8.0	7.4	7.7	7.2	7.6	7.3	7.0	8.3	8.5	7.7	9.0	7.5
C ₁₈	5.5	5.7	5.3	6.0	4.5	4.8	9.1	7.6	8.7	8.7	8.0	8.1
C ₁₉	7.7	7.7	8.6	8.0	7.4	7.8	8.5	8.7	6.6	7.3	9.2	8.4
C ₂₀	8.3	7.9	7.7	6.9	7.4	8.0	8.9	7.9	8.1	8.0	8.1	9.4

表 5 后果等级和概率等级风险云数字特征

综合风险云				1 级风险云				2 级风险云			
目标层	后果	概率	准则层	权重	后果	概率	指标层	权重	后果	概率	
A	(5.97, 0.40, 0.14)	(5.39, 0.56, 0.20)	B ₁	0.133	(5.00,0.24,0.12)	(5.88,0.49,0.20)	C ₁	0.324	(5.35,0.23,0.08)	(6.2,0.38,0.12)	
							C ₂	0.385	(4.67,0.22,0.14)	(5.28,0.65,0.27)	
							C ₃	0.291	(5.05,0.27,0.13)	(6.3,0.42,0.18)	
							C ₄	0.239	(8.07,0.79,0.18)	(8.15,0.63,0.24)	
							C ₅	0.214	(7.95,0.21,0.11)	(5.67,1.18,0.48)	
							C ₆	0.249	(5.48,0.48,0.07)	(5.37,1.21,0.35)	
			B ₂	0.191	(6.22,0.47,0.14)	(4.17,0.97,0.35)	C ₇	0.298	(4.10,0.38,0.18)	(5.43,1.38,0.55)	
							C ₈	0.356	(6.25,0.31,0.07)	(7.43,0.67,0.16)	
							C ₉	0.254	(4.25,0.27,0.10)	(4.02,0.65,0.16)	
							C ₁₀	0.187	(7.28,0.32,0.03)	(7.42,0.69,0.41)	
							C ₁₁	0.202	(6.08,0.57,0.44)	(7.18,0.53,0.23)	
			B ₃	0.266	(5.90,0.36,0.14)	(3.86,0.40,0.16)	C ₁₂	0.504	(3.47,0.57,0.27)	(5.33,0.58,0.07)	
							C ₁₃	0.186	(8.82,0.36,0.10)	(8.07,0.29,0.17)	
							C ₁₄	0.309	(7.35,0.29,0.04)	(6.80,0.38,0.12)	
							C ₁₅	0.203	(8.53,0.28,0.13)	(7.80,0.46,0.22)	
							C ₁₆	0.578	(5.43,0.58,0.07)	(5.12,0.49,0.31)	
							C ₁₇	0.220	(7.53,0.29,0.03)	(7.83,0.54,0.09)	
			B ₄	0.190	(5.66,0.45,0.17)	(6.30,0.47,0.1)	C ₁₈	0.387	(5.30,0.54,0.15)	(8.27,0.46,0.13)	
							C ₁₉	0.359	(7.87,0.36,0.19)	(8.00,0.88,0.22)	
							C ₂₀	0.254	(7.70,0.46,0.18)	(8.17,0.31,0.20)	
			B ₅	0.110	(6.52,0.46,0.07)	(6.26,0.49,0.24)					

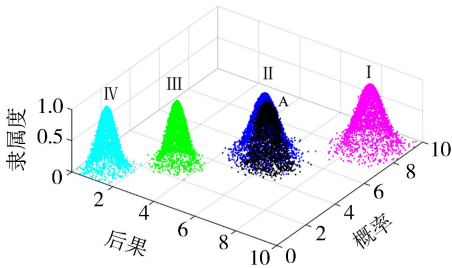


图 2 综合风险云

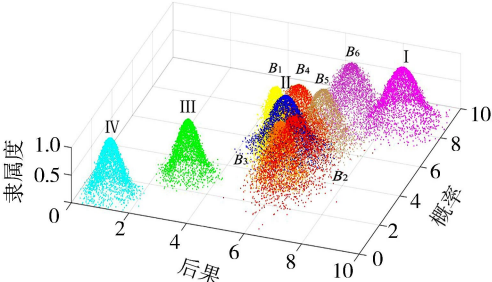


图 3 1 级风险云

度对评价指标的随机性和模糊性进行综合处理,实现了定性、定量之间的转换;采用改进层次分析法与熵权法组合赋权方法,充分考虑了不同风险因素、人

为主观认知对风险大小的影响程度,兼顾主观因素和客观因素,保证风险评价结果更加可靠。风险评价等级以风险云图的形式呈现,评价结果更加直观。

基于此方法对黄河下游平原某堤防工程进行了风险评价,评价结果与该工程实际情况基本吻合,表明该方法具有一定的可操作性和准确性。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2019 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[2] 王恩. 模糊层次分析法在河道堤防工程安全评价中的应用[J]. 山西建筑,2017,43(10):221-222. (WANG En. Safety evaluation of embankment project based on Fuzzy Analytical Hierarchy Process [J]. Shanxi Architecture,2017,43(10):221-222. (in Chinese))

[3] 王秀杰,孙瑀,苑希民,等. 突变理论与 BP 神经网络相结合的堤防安全综合评价[J]. 水利水电技术,2018,49(7):167-173. (WANG Xiujie, SUN Yu, YUAN Ximin, et al. Catastrophe theory and BP neural network-jointed comprehensive evaluation on levee safety [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (7) : 167-173. (in Chinese))

[4] 蔡新,严伟,李益,等. 灰色理论在堤防安全评价中的应用[J]. 水力发电学报,2012,31(1):62-66. (CAI Xin, YAN Wei, LI Yi, et al. Grey theory in comprehensive evaluation of dyke safety risk[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(1):62-66. (in Chinese))

[5] 魏博文,黄海鹏,徐镇凯. 基于云模型和组合赋权的岩体质量二维评价模型[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):3092-3099. (WEI Bowen, HUANG Haipeng, XU Zhenkai. Two-dimensional evaluation model of rock mass based on combination weighting and cloud model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(Sup1):3092-3099. (in Chinese))

[6] 刘德浩,王倩. 一种具有相依关系的二维云推理方法及其在预测中的应用[J]. 计算机科学,2016,43(增刊1):99-102. (LIU Dehao, WANG Qian. Uncertainty reasoning based on related planar cloud and application in prediction[J]. Computer Science,2016,43(Sup1):99-102. (in Chinese))

[7] 邱筱璇,曹庆贵,刘卿,等. 基于改进博弈论和二维云模型的煤矿安全评价方法研究[J]. 煤矿机械,2021,42(7):197-201. (QIU Xiaoxuan, CAO Qinggui, LIU Qing, et al. Research on coal mine safety evaluation method based on improved game theory and two-dimensional cloud model[J]. Coal Mine Machinery,2021,42(7):197-201. (in Chinese))

[8] 李萌,邓念武. 熵权-云模型在土石坝安全综合评价中的应用[J]. 水电与新能源,2017(3):58-63. (LI Meng, DENG Nianwu. Application of the entropy weight method and the cloud model in comprehensive safety evaluation of embankment dam[J]. Hydropower and New Energy,2017(3):58-63. (in Chinese))

[9] 杨子桐,黄显峰,方国华,等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展,2021,

41(4):60-66. (YANG Zitong, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Benefit evaluation of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(4):60-66. (in Chinese))

[10] 王景春,张法. 基于熵权二维云模型的深基坑施工风险评价[J]. 安全与环境学报,2018,18(3):849-853. (WANG Jingchun, ZHANG Fa. Risk assessment of the deep foundation pit based on the entropy weight [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (3) : 849-853. (in Chinese))

[11] 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 Zhaozheng. Comprehensive safety evaluation of aqueduct based on improved FCE method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):162-169. (in Chinese))

[12] 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))

[13] 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))

[14] 张颖,支欢乐,蒋水华. 基于极限学习机的堤防工程多元风险指标评价方法[J]. 长江科学院院报,2021,38(11):80-85. (ZHANG Ying, ZHI Huanle, JIANG Shuihua. Multi-risk index evaluation approach for levee engineering based on extreme learning machine [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021,38(11):80-85. (in Chinese))

[15] 王景春,董妍妍,李钦,等. 基于组合赋权二维云模型的箱涵下穿既有铁路施工风险评价[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(2):516-523. (WANG Jingchun, DONG Yanyan, LI Qin, et al. Risk assessment of box culverts construction under existing railway based on combined weighted two-dimensional cloud model [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2020,17(2):516-523. (in Chinese))

[16] 彭雪辉,盛金保,李雷,等. 我国水库大坝风险标准制定研究[J]. 水利水运工程学报,2014(4):7-13. (PENG Xuehui, SHENG Jinbao, LI Lei, et al. Research on dam risk criteria of China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4):7-13. (in Chinese))

(收稿日期:2021-12-14 编辑:刘晓艳)