

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0124

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 R H, HUANG J L, ZHANG J W, 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)

基于组合赋权和云模型的堤防安全评价

罗日洪^{1,2}, 黄锦林^{1,2}, 张建伟³, 叶合欣⁴

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510635; 2. 广东省粤港澳大湾区水安全保障工程技术研究中心, 广州 510635; 3. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046; 4. 广东省水利水电技术中心, 广州 510635)

摘要:针对堤防安全评价研究中影响因素选择与现行规范结合不紧密以及对堤防安全状态这个复杂系统的模糊性和随机性考虑不足的问题,以现行堤防安全评价相关规范为基础,构建由5个一级评价指标、22个二级评价指标、11个三级评价指标组成的层次指标体系。在此基础上,建立组合优化赋权模型对改进群组G1法和熵权法计算的权重进行组合赋权。通过引进云模型理论,把堤防安全评价的3种安全类别转化为对应的云评语,以浮动云和综合云计算得到堤防安全状态总目标云参数和云图,能直观确定堤防的安全类别,且与实际安全状态一致。同时,分析一级指标安全状态云图,锁定影响堤防安全的关键因素,对堤防安全状态发展的趋势作出分析,给出有针对性的建议。对于复杂堤防系统,基于组合赋权和云模型的方法更好地将模糊性和随机性结合起来,可为堤防安全综合评价和除险加固提供依据。

关键词:堤防安全;组合优化赋权;云模型;安全类别;综合评价

中图分类号:TV87 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



截至2018年底,全国已建成5级及以上堤防31.2万km,达标率为69.8%,防护人口6.3亿人,保护耕地4100万hm²[1]。但仍有部分堤防未达标,存在着建设标准低、堤身质量差、堤基未做处理等问题。而且,堤防在运行中会遇到管涌、滑坡、崩岸和漫溢等险情,严重者甚至导致堤防溃决。因此,为掌握堤防安全状态和加强管理而对堤防进行定期安全评价具有重要意义[2-3]。

目前,国内外很多学者针对堤防工程安全评价进行了研究:Coelho等[4]基于材料点法重新定义了堤防抗剪破坏安全系数,并对堤防的渐进性破坏及其行为进行了分析,但仅是较为单一因素的研究,未综合考虑各种因素的影响;蔡新等[5]引进灰色理论构建堤防安全风险评价指标体系及堤防安全评价数学模型,灰色理论对原始数据要求较高,并且在拟合

度方面存在局限;王秀杰等[6]提出基于突变理论与BP神经网络相结合的堤防安全综合评价模型,但突变理论归一化计算过程复杂,而BP神经网络存在收敛速度慢、样本训练依赖性问题;杨德玮等[7]在划分组合堤、单元堤的基础上通过险工险段识别与专家经验方法对堤防安全进行综合评价,该方法存在过于依赖专家主观经验的问题;兰博等[8]系统构建堤防安全评价体系,运用改进的模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)与熵权融合确定组合权重,并基于专家打分法获得堤防综合安全评价确定值,但该方法无法体现出堤防安全的模糊性和概率性的特点,体现不出模糊的本质。李德毅等[9-10]于1995年提出云模型理论,该理论在各种复杂的综合评价研究中得到应用[11-14],本文采用改进群组G1法和熵权法对评价指标组合优化赋权,并与

收稿日期:2021-03-04 修回日期:2021-07-25 网络出版时间:2021-07-30

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20210730.1608.002.html

基金项目:广东省水利科技创新基金(2020-18)

作者简介:罗日洪(1988—),男(壮族),广西蒙山人,高级工程师,主要从事水利水电工程安全评价和风险评估研究。E-mail:715821816@qq.com

通信作者:黄锦林(1971—),男,江西赣州人,正高级工程师,博士,主要从事水利水电工程及防洪减灾研究。E-mail:1657826640@qq.com

云模型结合,对实际堤防安全进行综合评价。

1 基于云模型的安全评价方法

1.1 云模型理论

云模型在模糊综合评价中可以替代隶属函数,弥补常规模糊评价中无法综合反映模糊性、不确定性和随机性的不足。

云模型的基本定义:假设一个论域 $U = \{x\}$, \tilde{A} 是论域 U 中的模糊集合,对于任意元素 x 都存在一个具有稳定倾向性的随机数 $\mu_{\tilde{A}}(x)$,称为 x 对 \tilde{A} 的隶属度函数, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 在论域上的分布函数即称为隶属云,也称为云^[15]。

$$\begin{cases} E_x = \frac{E_{x1} \times \omega_1 + E_{x2} \times \omega_2 + \dots + E_{xn} \times \omega_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n} \\ E_n = \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2} \times E_{n1} + \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2} \times E_{n2} + \dots + \frac{\omega_n^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2} \times E_{nm} \\ H_c = \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2} \times H_{c1} + \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2} \times H_{c2} + \dots + \frac{\omega_n^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2} \times H_{cn} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_x = \frac{E_{x1} \times E_{n1} \times \omega_1 + E_{x2} \times E_{n2} \times \omega_2 + \dots + E_{xn} \times E_{nm} \times \omega_n}{E_{n1} \omega_1 + E_{n2} \omega_2 + \dots + E_{nm} \omega_n} \\ H_c = \frac{H_{c1} \times E_{n1} \times \omega_1 + H_{c2} \times E_{n2} \times \omega_2 + \dots + H_{cn} \times E_{nm} \times \omega_n}{E_{n1} \omega_1 + E_{n2} \omega_2 + \dots + E_{nm} \omega_n} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为指标权重。

1.2 评价指标赋权方法

(1) 改进群组 G1 法赋权

采用改进群组 G1 法获取参评专家对各个指标的主观权重,该法在传统 G1 法的基础上,利用序关系相似度给每位专家赋权,体现了不同专家知识经验的差异性。为了充分发挥专家群组决策的优点,提高效率,结合堤防安全评价实际要求,根据工程的级别及复杂性,参评专家人数建议在 5(含)~9(含)人的单数。

该方法相比于层次分析法具有显著优势,无须构建判断矩阵,也不用进行一致性检验,且计算量较少^[18]。特别是在堤防安全评价应用中,由于评价指标较多,使用层次分析法工作量大,权重难以确定。而采用改进群组 G1 法具有保序性,且对同层次元素个数没有限制,计算量较层次分析法成倍减少。

确定各指标权重如步骤 1 至步骤 4。

步骤 1: 设专家组专家数为 m , 待评指标数为 n 。专家 i 按照指标的重要性程度由大到小进行排序,确定序关系。指标 X_i 的重要性程度大于指标 X_j , 则记为 $X_i > X_j$ 。

步骤 2: 专家 i 给出相邻指标间相对重要程度之比的理性赋值。指标 X_{k-1} 与 X_k 相对重要程度之

期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_c 是描述云的 3 个数值,可以构建出由大量云滴构成的全部虚拟云形态,并实现云计算。云模型通过正向云发生器和逆向云发生器实现计算。正向云发生器通过输入数字特征 E_x 、 H_c 、 E_n 和生成云滴的个数 n ,可以生成由 n 个云滴组成的、确定度为 μ 的正态分布云图,从而把定性概念转换为定量信息,而逆向云发生器正好相反。堤防安全评价主要实现从定性到定量表示之间的不确定性的转化,适用于正向云计算^[16]。

根据虚拟云理论^[17],若指标互相独立,采用浮动云计算,见式(1);反之,采用综合云计算,见式(2)。

比 ω_{k-1}/ω_k 的理性赋值分别为 $r_k = \omega_{k-1}/\omega_k$, $k = n, n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1$ 确定 r_k 的标准见表 1。

表 1 r_k 的赋值参考
Tab. 1 r_k assignment reference table

r_k	说明
1.0	指标 X_{k-1} 与指标 X_k 具有同样重要性
1.2	指标 X_{k-1} 比指标 X_k 稍微重要
1.4	指标 X_{k-1} 比指标 X_k 明显重要
1.6	指标 X_{k-1} 比指标 X_k 强烈重要
1.8	指标 X_{k-1} 比指标 X_k 极端重要

步骤 3: 根据 r_k 确定第 n 个指标的权重 ω_k 为

$$\omega_k = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i \right)^{-1} \quad (3)$$

步骤 4: 第 $n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1$ 个指标的权重

$$\omega_{k-1} = r_k \omega_k \quad (4)$$

确定每位专家的权重如步骤 5 至步骤 8。

步骤 5: 给出等价序关系。根据步骤 1 中专家组成员给出的序关系共确定出 i 类序关系,并确定出等价序关系。

步骤 6: 对序关系进行编号,制作序关系相似度表,序关系的编号与某位专家的序关系编号一致。

步骤 7: 计算“序关系相似度”。以步骤 2 中专

家的序关系为参考序关系,根据以多胜少的原则进行打分,占多数的专家均得3分,占少数的专家得1分。若所有专家意见一致,每位专家得2分。

步骤8:确定专家权重。定义每位专家的总得分为其序关系相似度 p_i 。序关系相似度反映了大多数专家的意见,并赋予较大的权重,专家权重为

$$a_i = p_i / \sum_{i=1}^m p_i, i=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

计算改进群组 G1 法指标综合权重如步骤 9。

步骤9:计算第 i 位专家关于原指标 $X_k (k=1, 2, \dots, n)$ 的权重 $\omega_k^* (i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n)$, 则综合权重为

$$\omega_k^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times \omega_k^* \quad (6)$$

则综合权重向量为 $\omega_k^* = (\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*)^T$ 。

(2) 熵权法赋权

在完成现场检查、检测以及各专项安全复核报告的基础上,邀请专家组对各个评价指标进行评分,以解决大部分评价指标无法量化的问题。假定对评价对象的认识与专家群体具有最高一致性的专家作为理想的最优专家。根据待评专家给出的评价结果与最优专家的评价结果的差距来表示其可信度,其差距大小可用熵来表示,通过建立熵模型计算出指标熵权重。

步骤1: m 个专家组成的专家组对 n 个指标评分矩阵为 $S_{m \times n}$ 。 $S_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个评价专家对第 j 个评价指标的评分值,专家在一次评价过程中的评价结果为 $s_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in})^T$ 。假定存在一个理想的最优指标评分向量为 $s^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)^T$ 。

步骤2:各专家指标评分质量的优劣以其评分结果与最优评分的差异大小来衡量。通过第 i 个专家指标评分的水平向量 E_i 为

$$E_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in}) \quad (7)$$

其中 $e_k = 1 - \frac{|s_k - \bar{s}_k|}{\max(s_k)}$ ($i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, j$)

式中: \bar{s}_k 为 s_k 的平均值。

步骤3:建立专家指标评分权重的熵模型,衡量评价结果的不确定性。

$$H_i = \sum_{j=1}^n h_{ij} \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$\text{其中 } h_{ij} = \begin{cases} -e_{ij} \ln e_{ij} & \frac{1}{e} \leq e_{ij} \leq 1 \\ \frac{2}{e} - e_{ij} |\ln e_{ij}| & 0 \leq e_{ij} < \frac{1}{e} \end{cases}$$

式中: H_i 为专家 i 指标评分权重的不确定度的熵值。

步骤4:确定专家指标评分权重。专家指标评分结果的不确定度 H_i 越大,说明该专家指标评分结果的可信度越低;反之,则越高。专家指标评分权重为

$$c_i = \frac{1/H_i}{\sum_{i=1}^n 1/H_i} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

c_i 越大,表示专家 i 的意见在评价结果中比重越大。

(3) 组合赋权

为充分发挥专家经验并对改进群组 G1 法指标的权重进行优化,使最终的权重信息量更大、更加合理,以组合权重 β_i 分别与改进群组 G1 法权重 ω_k^* 、熵权法权重之间的偏差平方和最小为目标建立如式(10)的组合优化赋权模型^[19],以求得最终权重。

$$\begin{cases} \min \theta = \sum_{i=1}^n \left[\gamma_i \left(\frac{1}{2} (\beta_i - \omega_k^*)^2 \right) + (1 - \gamma_i) \left(\frac{1}{2} (\beta_i - c_i)^2 \right) \right] \\ \text{s. t. } \beta_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \beta_i = 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: γ_i 为第 i 个指标的经验因子,反映了决策者对改进群组 G1 法权重 ω_k^* 和熵权法权重 c_i 的偏好程度, $0.5 < \gamma_i \leq 1.0$ 表示更倾向于前者,而 $0 \leq \gamma_i \leq 0.5$ 表示更倾向于后者。

构造拉格朗日函数求式(11)的极值

$$L(\beta_i, \lambda) =$$

$$\sum_{i=1}^n \left[\gamma_i \left(\frac{1}{2} (\beta_i - \omega_k^*)^2 \right) + (1 - \gamma_i) \left(\frac{1}{2} (\beta_i - c_i)^2 \right) \right] - \lambda \left(\sum_{i=1}^n \beta_i - 1 \right) \quad (11)$$

对 β_i, λ 分别求一阶偏导,令偏导为0,并联立计算得到组合优化权重

$$\beta_i = \gamma_i \omega_k^* + (1 - \gamma_i) c_i \quad (12)$$

1.3 堤防安全状态评价指标体系构建

大部分堤防安全评价方法由于没有与现行标准建立严格的对应关系,在实际工作中可操作性不强^[20]。为了避免堤防安全评价指标选取主要以经验为主或存在一定的随意性而导致实际评价工作中可操作性不强的问题,本次评价指标按2015年颁布实施的 SL/Z 679—2015《堤防工程安全评价导则》^[21] 和相关研究文献^[22-24] 进行科学提炼,从而构

建完整的指标体系。总目标为堤防安全状态,一级指标为运行管理、工程质量、防洪能力、渗流安全和

结构安全等 5 个指标,一级指标下面按评价内容划分二级指标 22 个,三级指标 11 个,见图 1。

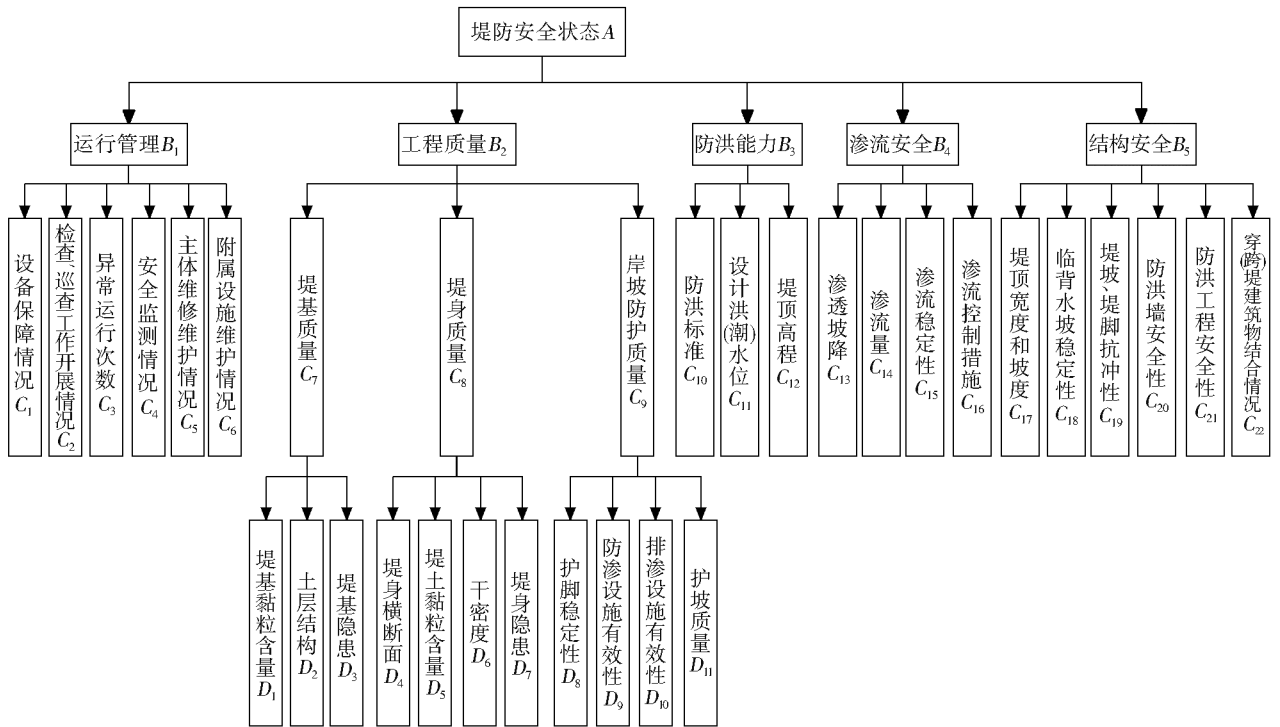


图 1 堤防安全评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of dike safety

1.4 堤防安全类别和评价标准

(1)堤防安全类别。根据文献[21],堤防安全类别分为三类:一类为安全;二类为基本安全;三类为不安全,以标度[0,10]为安全区间。根据堤防安全的特点,一类堤防要求比较苛刻,对应的评分区间也较小,以此类推,3 个安全类别从大到小分别对应标度区间[8.5,10.0],[6.0,8.5],[0,6.0),为了与云模型衔接,标度区间需按式(13)转化为评语云模型,见表 2。

$$\begin{cases} E_x = (C_{max} + C_{min}) / 2 \\ E_n = (C_{max} - C_{min}) / 6 \\ H_c = k \end{cases} \quad (13)$$

式中: C_{max} 、 C_{min} 为评语云的双边约束; k 为常数,反映评语的模糊程度。

表 2 堤防安全类别评价标准

Tab. 2 Evaluation standard of dike safety category

安全类别	标度区间	评语云模型(E_x, E_n, H_c)
安全	[8.5,10.0]	(9.250,0.250,0.050)
基本安全	[6.0,8.5)	(7.250,0.417,0.080)
不安全	[0,6.0)	(3.000,1.000,0.100)

(2)评价指标安全等级划分。以图 1 中的评价指标体系对堤防进行安全状态评价,所列三级指标

中有 3 个为定性指标,二级指标中有 12 个为定量指标,无论定性还是定量指标,首先需对指标进行定量化,以便后续分析。

根据文献[21],指标的等级也分为安全、基本安全、不安全三级,并参照云模型的标度区间确定了具体的得分区间,以便后续专家进行评分。不同安全等级的分界点具体参考堤防工程的设计、验收、评价等相关规范对指标的规定或描述,结合工程经验,按照可操作原则进行划分,见表 3。

2 应用实例

位于珠江航道左侧某段长度 5.04 km 的堤防,主要堤段为土质堤身、部分堤段为混凝土挡墙,防洪标准 200 年一遇,为一级堤防。珠江堤防支涌入口和交叉建筑物较多,主要为水闸、涵管等,评价范围内交叉建筑物共计 3 座,其中水闸 2 座、涵管 1 座。经过多年的运行,部分堤段存在堤顶二级平台开裂、堤防回填料流失、堤面下陷、浆砌石挡墙砂浆脱落,以及水闸附近堤防存在未合龙缺口、不达标等问题。为掌握珠江堤防质量安全现状,进一步查明质量安全问题,需全面准确评价珠江堤防安全现状并提出安全建议,增强堤防防灾减灾能力和风险管理能力。

表3 指标等级划分
Tab.3 Grading of indicators

指标层	安全等级、评分区间、评语云模型			备注	
	安全[8.5,10.0] (9.250,0.250,0.050)	基本安全[6.0,8.5) (7.250,0.417,0.080)	不安全[0,6.0) (3.00,1.00,0.10)		
设备保障情况 C ₁	按要求维护,设备正常运行	基本按要求维护,主要设备能保持正常运转	未维护,设备大部分异常	参考文献[21]运行管理检查及评价中对管理设施和设备的规定	
检查、巡查工作开展情况 C ₂	按要求检查、巡查,频次高,内容全面,记录准确	基本按要求检查、巡查,频次一般	基本不检查、巡查,无记录	参考文献[21]运行管理检查及评价中对安全检查的规定	
异常运行次数 C ₃	无	1~2次	2次以上	参考文献[21]运行管理检查及评价中对堤防异常运行记录及处置的规定	
安全监测情况 C ₄	安全监测设施符合规范要求且有效,每年按要求整编观测资料	安全监测设施基本符合规范要求且主要监测参数有效,有整编资料	安全监测设施基本失效,无整编资料	参考文献[21]运行管理检查及评价中对安全检测资料的规定	
主体维修维护情况 C ₅	工程完整,及时维护,效果好,无抢修	工程完整,有维护,效果一般,1~2次抢修	工程不完整,无维护,抢修2次以上	参考文献[21]运行管理检查及评价中对管养的规定	
附属设施维护情况 C ₆	及时维护,效果好	有维护,效果一般	无维护,附属设施基本失效	参考文献[21]运行管理检查及评价中对附属设施养护修理的规定	
堤基质量 C ₇	堤基黏粒含量 D ₁	25%~35%	10%~25%	<10%,>35%	参考 GB 50286—2013《堤防工程设计规范》 ^[25] 对筑堤材料黏粒的规定
	土层结构 D ₂	以黏性土为主的多元结构,或上部为黏性土底部为岩基	以砂性土为主的多元结构	大部为砂性土或软弱地基	参考文献[25]堤基处理中关于土层结构的描述
	堤基隐患 D ₃	无洞穴和裂缝等险点	有洞穴,不发育,无贯穿裂缝	明显的洞穴且发育,并有贯穿裂缝或遇水可能贯穿裂缝	参考文献[21]堤基质量中对堤基隐患的规定
堤身质量 C ₈	堤身横断面 D ₄	符合规范要求	基本符合规范要求	堤顶高程、宽度和坡度均有较大变化	参考文献[25]堤身设计中对土堤结构的规定
	堤土黏粒含量 D ₅	25%~35%	10%~25%	<10%,>35%	参考文献[25]堤身设计中对筑堤材料黏粒的规定
	干密度 D ₆	(0.85~1.00]	(0.60~0.85]	(0~0.60]	参考文献[25]堤身设计中对填筑标准的规定
	堤身隐患 D ₇	无沉陷、滑动、渗水、洞穴和裂缝等险点	有沉陷、滑动、渗水、洞穴,不发育,无贯穿裂缝	明显的沉陷、滑动、渗水、洞穴,且发育,并有贯穿裂缝或遇水可能贯穿裂缝	参考文献[21]堤身质量中对堤身隐患的规定
岸坡防护质量 C ₉	护脚稳定性 D ₈	稳定,无崩岸,滑坡,裂缝	基本稳定,轻微崩岸或滑坡或裂缝,不影响安全	不稳定,大范围崩岸或滑坡或裂缝,存在安全隐患	参考文献[21]堤(岸)坡防护工程质量对护脚稳定评价的规定
	防渗设施有效性 D ₉	防渗设施完好,且能正常发挥作用	防渗设施有损坏,能发挥作用	防渗设施损坏,已失效	参考文献[21]堤(岸)坡防护工程质量对防渗设施评价的规定
	排渗设施有效性 D ₁₀	排渗设施完好,且能正常发挥作用	排渗设施有损坏,能发挥作用	排渗设施损坏,已失效	参考文献[21]堤(岸)坡防护工程质量对排渗评价的规定
护坡质量 D ₁₁	平整无陷坑、滑动,勾缝、垫层、止水均完好	勾缝有开裂、止水有破损现象	坡面不平整,有较大范围陷坑、滑动	参考文献[21]、SL 634—2012《堤防工程施工质量验收评定标准》 ^[26] 对护坡表面质量评价的规定	
防洪标准 C ₁₀	符合原设计和相关规范标准	基本符合原设计和相关规范标准	与原设计和相关规范有较大差距	参考文献[25]工程级别及设计标准对防洪标准的规定	
设计洪(潮)水位 C ₁₁	符合原设计和相关规范标准	基本符合原设计和相关规范标准	与原设计和相关规范有较大差距	参考文献[21]防洪标准复核对设计洪(潮)水位规定	
堤顶高程 C ₁₂	校核结果与设计值对比≤0.2 m	校核结果与设计值对比0.2~1.0 m	校核结果与设计值对比>1.0 m	参考文献[25]工程级别及设计标准对设计洪(潮)水位加安全超高的规定	

表 3(续)

Tab. 3 (Continued)

渗透坡降 C_{13}	≤ 0.25	0.25~0.50	>0.50	参考文献[25]工程级别及设计标准对渗透坡降的规定
渗流量 C_{14}	$\leq 1Q_{设}$	1~1.5 $Q_{设}$	$>1.5Q_{设}$	参考文献[21]渗流安全复核对渗流量评价的规定
渗流稳定性 C_{15}	随洪(潮)水位稳定变化, 渗流清澈, 背水坡无出逸点	随洪(潮)水位变化, 局部渗流点有异常	严重异常, 有洞穴漏水或集中渗漏通道	参考文献[21]渗流安全复核对渗流稳定评价的规定
渗流控制措施 C_{16}	有渗流控制措施, 运行良好	有渗流控制措施, 局部有缺陷, 但不影响安全	无渗流控制措施, 且有渗流不稳定	参考文献[21]渗流安全复核对渗流控制评价的规定
堤顶宽度和坡度 C_{17}	堤顶宽度不小于 8 m, 坡度不陡于 1:3	堤顶宽度不小于 6 m, 坡度为 1:3~1:2.5	堤顶宽度不小于 3 m, 坡度大于 1:2.5	参考文献[25]堤身设计对土堤堤顶结构的规定
临背水坡稳定性 C_{18}	安全系数 \geq 全系数	安全系数 1.05~1.30	安全系数 $<$ 1.05	参考文献[25]工程级别及设计标准对抗滑稳定系数的规定
堤坡、堤脚抗冲性 C_{19}	迎流顶冲堤段有防冲体, 且体积不小于设计要求	迎流顶冲堤段有防冲体, 体积小于设计要求	无防冲体	参考文献[21]结构安全对堤坡、堤脚抗冲评价的规定
防洪墙安全性 C_{20}	强度符合设计要求, 墙体完整, 无裂缝, 无变形、失稳	墙体有轻微破损, 有微小裂缝, 但无变形、失稳	墙体有肉眼可见裂缝, 且发生倾斜	参考文献[21]、文献[25]对防洪墙评价和设计的规定
防护工程安全性 C_{21}	防护体完整、无塌陷和剥落	防护体有剥落, 主体结构基本完好	防护体不完整, 且塌陷或存在裂缝, 受河水冲刷严重	参考文献[21]结构安全对防护工程评价的规定
穿(跨)堤建筑物结合情况 C_{22}	安全复核满足规范要求, 无异常, 有防渗措施, 有应急处置措施	安全复核满足规范要求, 无影响安全的局部缺陷, 有防渗措施, 有应急处置措施	安全复核不满足规范要求, 或结合部存在安全隐患, 无应急处置措施	参考文献[21]对交叉建筑物(构筑物)连接段评价的规定, 文献[21]穿堤建筑物(构筑物设计要求)

2.1 组合赋权结果

邀请 5 位具有水利不同专业背景的专家组成专家组, 并对各个指标的重要度和安全状态给出意见。在此基础上, 对前述一、二、三级指标分别根据改进群组 G1 法和熵权法的步骤计算权重, 得到改进群组 G1 法权重和熵权法权重。

根据式(12)对上述计算的改进群组 G1 法的权重和熵权法权重进行组合优化计算, 对于经验因子的选择, 考虑到定性指标和定量指标的不同, 定量指标由于有定量的复核结果, 客观性较强, 反映在最终的权重中, 其所占比重应较大。根据式(10), 定量指标的 γ_i 为 0.4, 定性指标 γ_i 为 0.6。最终组合优化权重向量如下:

一级指标组合优化权重 $\beta_B = (0.161, 0.250, 0.245, 0.179, 0.210)$ 。

二级指标组合优化权重 $\beta_C = (0.161, 0.163, 0.182, 0.192, 0.203, 0.099, 0.347, 0.351, 0.302, 0.313, 0.321, 0.366, 0.292, 0.199, 0.285, 0.223, 0.164, 0.120, 0.174, 0.192, 0.106, 0.244)$ 。

三级指标组合优化权重 $\beta_D = (0.352, 0.383, 0.265, 0.309, 0.216, 0.224, 0.352, 0.321, 0.183, 0.255, 0.241)$ 。

2.2 云模型安全状态计算分析

首先把专家组对各个指标评分转换为对应的评

语云模型, 比如专家对某个指标给出的评分为 7, 位于 $[6.0, 8.5)$, 则根据表 2 得到对应的评语云模型为 $(7.250, 0.417, 0.080)$; 然后进行各个专家评价意见的融合, 计算得到专家组对该指标的云模型参数; 最后从底层指标往上计算, 二级、三级指标之间相互独立, 采用式(1)进行浮动云计算, 结果如下:

三级指标云评语 (E_x, E_n, H_c)

$D_1 = (7.584, 0.407, 0.080)$, $D_2 = (8.088, 0.342, 0.070)$, $D_3 = (6.116, 0.584, 0.090)$, $D_4 = (4.132, 0.918, 0.100)$, $D_5 = (5.785, 0.571, 0.090)$, $D_6 = (6.639, 0.464, 0.080)$, $D_7 = (4.077, 0.925, 0.100)$, $D_8 = (6.576, 0.487, 0.080)$, $D_9 = (8.100, 0.341, 0.070)$, $D_{10} = (8.100, 0.341, 0.070)$, $D_{11} = (4.350, 0.860, 0.100)$ 。

二级指标云评语 (E_x, E_n, H_c)

$C_1 = (4.404, 0.720, 0.090)$, $C_2 = (4.297, 0.880, 0.100)$, $C_3 = (7.911, 0.337, 0.070)$, $C_4 = (4.967, 0.675, 0.090)$, $C_5 = (5.023, 0.665, 0.090)$, $C_6 = (3.563, 0.955, 0.100)$, $C_7 = (7.363, 0.422, 0.080)$, $C_8 = (5.036, 0.638, 0.090)$, $C_9 = (6.078, 0.457, 0.080)$, $C_{10} = (7.250, 0.417, 0.080)$, $C_{11} = (5.984, 0.654, 0.090)$, $C_{12} = (3.618,$

0.944,0.100), $C_{13} = (8.658, 0.283, 0.070)$, $C_{14} = (7.741, 0.395, 0.080)$, $C_{15} = (7.178, 0.419, 0.080)$, $C_{16} = (8.343, 0.302, 0.060)$, $C_{17} = (5.685, 0.610, 0.090)$, $C_{18} = (7.250, 0.417, 0.080)$, $C_{19} = (7.962, 0.365, 0.070)$, $C_{20} = (8.105, 0.339, 0.070)$, $C_{21} = (8.180, 0.328, 0.060)$, $C_{22} = (4.975, 0.689, 0.090)$

一级指标云评语(E_x, E_n, H_c)

$B_1 = (5.174, 0.662, 0.090)$, $B_2 = (6.282, 0.511, 0.080)$, $B_3 = (5.513, 0.701, 0.090)$, $B_4 = (7.983, 0.358, 0.070)$, $B_5 = (6.825, 0.495, 0.080)$ 。

从上述云评语中可以看到,三级指标中,堤身断面 D_4 、堤土黏粒含量 D_5 、堤身隐患 D_7 、护坡质量 D_{11} 评级为“不安全”,其余均为“基本安全”;二级指标中,设备保障情况 C_1 、检查和巡查工作开展情况 C_2 、安全监测情况 C_4 、主体维修维护情况 C_5 、附属设施维护情况 C_6 、堤身质量 C_8 、设计洪(潮)水位 C_{11} 、堤顶高程 C_{12} 、堤顶宽度和坡度 C_{17} 、穿堤建筑物结构安全性评级 C_{22} 为“不安全”,其余均为“基本安全”;一级指标中,运行管理 B_1 、工程质量 B_2 、防洪能力 B_3 、结构安全 B_5 评级为“基本安全”,渗流安全 B_4 评级为“安全”。

由于一级指标综合性较高,影响因素较多,将上述一级指标云评语(E_x, E_n, H_c)与其对应的组合优化权重按照式(2)进行综合云计算,从而得到堤防安全状态的总目标云模型参数 $A(E_x, E_n, H_c) = (7.217, 0.434, 0.120)$ 。通过 MATLAB 编程作图,得到堤防安全状态一级指标和总目标的云图,见图 2 和图 3,其中蓝色云图为与表 2 对应的基础安全等级云图。

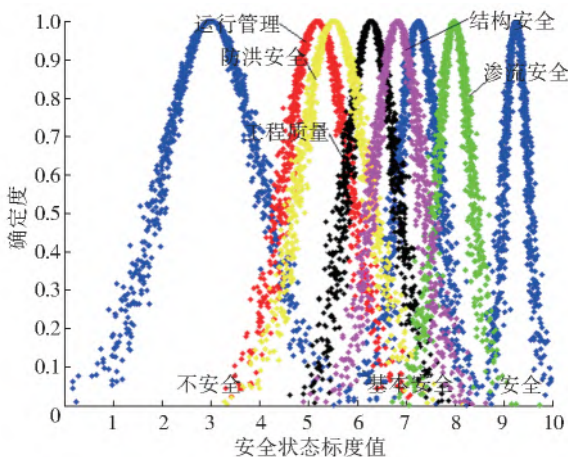


图 2 某堤防安全状态一级指标安全状态云图

Fig. 2 Cloud map of the first-level index of the safety state of a dike

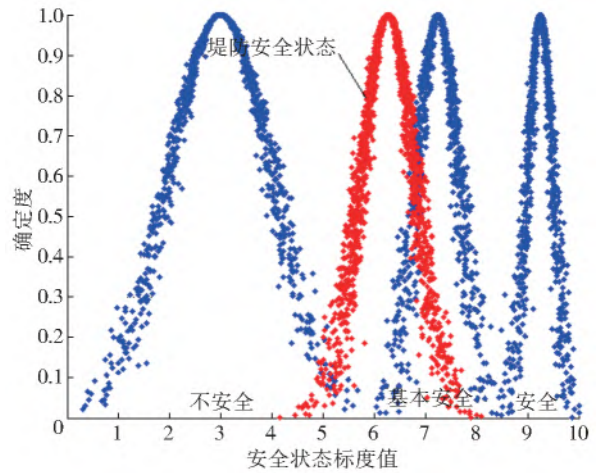


图 3 某堤防安全状态云图

Fig. 3 Cloud map of the safety state of a dike

一级指标中,运行管理由于堤防的日常管理维护、安全监测等存在较大不足,最终评为“不安全”;防洪能力则由于沉降较大,堤防高程低于设计规范要求,因此存在严重的安全隐患,最终评为“不安全”。值得注意的是,工程质量虽为“基本安全”,但评分较低,部分“云滴”落入“不安全”的范围(图 2)。主要原因为堤防的建成时间长,建设标准较低,经过多年运行,其中堤身断面、堤土黏粒含量、堤身隐患、护坡质量存在安全性降低的问题,指标值偏低。根据总目标的云参数,该堤防的安全状态云图基本落入了“基本安全”范围,因此,鉴定为二类堤防,与堤防的实际情况一致。根据安全评价结论,该段堤防应加强运行管理中设备的保障维护、安全监测,及时对堤防及其附属设施进行维护。针对堤防高度和穿堤建筑物结构安全不足等问题,应及时进行除险加固处理。

3 结 论

按照现行规范对堤防安全评价的要求进行指标体系构建,以改进群组 G1 法和熵权法进行组合优化赋权,考虑专家间、指标间的关联性,解决了堤防评价中面临的科学指标体系构建、赋权以及专家群组决策融合等问题,并建立基于云模型理论安全评价系统,统一了复杂堤防安全状态评价中的模糊性和随机性问题。最后以珠江航道左侧某段堤防为例,分析了 5 个一级指标的安全状态云图,锁定对堤防安全状态影响较大的因素,有针对性地提出处理措施。根据总目标云图,直观确定堤防所处的安全状态,对应进行安全分类,验证结果的合理性。

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国水利部. 2018 年全国水利发展统计公

- 报[M].北京:中国水利水电出版社,2019.(Ministry of Water Resources,People's Republic of China. 2018 statistical bulletin on China water activities[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2019. (in Chinese))
- [2] 王小兵,章青,夏晓舟.堤防工程安全运行风险分析研究进展[J].人民黄河,2020,42(8):25-31,35.(WANG X B,ZHANG Q,XIA X Z. Research process of risk analysis on safety operation of levees[J]. Yellow River, 2020, 42(8): 25-31, 35. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; RMHH. 0. 2020-08-007.
- [3] 黄锦林,张婷,李嘉琳.堤防工程防洪安全评价中的若干问题[J].中国农村水利水电,2015(4):109-112.(HUANG J L,ZHANG T,LI J L. Some problems of flood control safety evaluation of levee engineering [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(4): 109-112. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2015. 04. 028.
- [4] COELHO B Z, ROHE A, ABOUFIRASS A, et al. Assessment of dike safety within the framework of large deformation analysis with the material point method[C]// NUMGE2018. 2018.
- [5] 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(1):64-68.(CAI X, YAN W, LI Y, et al. Grey theory in comprehensive evaluation of dyke safety risk[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012(1): 64-68. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SFXB. 0. 2012-01-012.
- [6] 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 X J, SUN Y, YUAN X M, 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)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2018. 07. 022.
- [7] 杨德玮,盛金保,彭雪辉.堤防工程单元堤安全等级评判及风险估计[J].水电能源科学,2016,34(2):77-81.(YANG D W, SHENG J B, PENG X H. Safety level evaluation of unit levee engineering and risk estimation [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(2): 77-81. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SDNY. 0. 2016-02-019.
- [8] 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):131-133,137.(LAN B, GUAN X W, XIAO Q H. 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, 137. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZNSD. 0. 2019-06-026.
- [9] 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 D Y, MENG H J, SHI X M. Membership cloud sand membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995(6): 15-20. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; JFYZ. 0. 1995-06-002.
- [10] 李德毅.知识表示中的不确定性[J].中国工程科学,2000(10):73-79.(LI D Y. Uncertainty in knowledge representation[J]. Strategic Study of CAE, 2000(10): 73-79. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-1742. 2000. 10. 018.
- [11] 沈进昌,杜树新,罗祎,等.基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J].模糊系统与数学,2012,26(6):115-123.(SHEN J C, DU S X, LUO W, et al. Method and application research on fuzzy comprehensive evaluation based on cloud model [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2012, 26(6): 115-123. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-7402. 2012. 06. 017.
- [12] 丁昊,王栋.基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J].环境科学学报,2013,33(1):251-257.(DING H, WANG D. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 251-257. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2013. 01. 036.
- [13] 张志辉,曹邱林.基于云模型的水闸安全性评价研究[J].长江科学院院报,2020,37(1):61-66.(ZHANG Z H, CAO Q L. A comprehensive evaluation study on security state of sluice based on cloud model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(1): 61-66. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20181314.
- [14] 纪静怡,方红远,徐志欢.基于组合赋权云模型的水资源管理综合评价[J].中国农村水利水电,2020(12):40-45,56.(JI J Y, FANG H Y, XU Z H. Comprehensive evaluation of water resource management based on combined weighted cloud model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(12): 40-45, 56. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2020. 12. 007.
- [15] 刘常昱,李德毅,潘莉莉.基于云模型的不确定性知识表示[J].计算机工程与应用,2004(2):32-35.(LIU C Y, LI D Y, PAN L L. Uncertain knowledge representation based on cloud model[J]. Computer Engineering and Applications, 2004(2): 32-35. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1002-8331. 2004. 02. 011.
- [16] 刘常昱,李德毅,杜鹃,等.正态云模型的统计分析[J].信息与控制,2005(2):236-239,248.(LIU C Y, LI D Y, DU Y, Some statistical analysis of the normal

- cloud model[J]. Information and Control, 2005(2): 236-239, 248. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-0411. 2005. 02. 023.
- [17] LI D, CHEUNG D, SHI X, et al. Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1998, 35(3): 99-123.
- [18] 郭亚军. 综合评价理论方法及拓展[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (GUO Y J, Comprehensive Evaluation Theory, Methods and Extensions[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 姜安民, 董彦辰, 吴洋, 等. 三标度 AHP-熵优化组合赋权法在 PPP 项目风险评价中的应用[J]. 工程管理学报, 2017, 31(5): 62-67. (JIANG A M, DONG Y C, W Y, et al. Application of three-scale AHP-entropy optimal combination weighting method in risk assessment of PPP project[J]. Journal of Engineering Management, 2017, 31(5): 62-67. (in Chinese)) DOI: 10. 13991/j. cnki. jem. 2017. 05. 012.
- [20] 黄锦林, 杨光华, 王盛. 堤防工程安全综合评价方法[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 1011-1015. (HUANG J L, YANG G H, WANG S. Comprehensive evaluation method of levee engineering safety[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 1011-1015. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 05. 040.
- [21] 中华人民共和国水利部. 堤防工程安全评价导则: SL/Z 679—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Guidelines for safety evaluation of embankment engineering: SL/Z 679-2015[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2015. (in Chinese))
- [22] 迟国泰, 王卫. 基于科学发展的综合评价理论、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (CHI G T, WANG W. Comprehensive Evaluation Theory, Method and Application Based on Scientific Development [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [23] 黄中发, 黄浩智, 蒋水华, 等. 堤防工程系统风险因子量化及风险评价[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 171-177. (HUANG Z F, HUANG H Z, JIANG S H, et al. Quantification of risk factors and risk assessment for levee engineering system[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(4): 171-177. (in Chinese)) DOI: 10. 13577/j. jnd. 2018. 0423.
- [24] 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 Z T, HUANG X F, FANG G H. 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)) DOI: 10. 14188/j. 1671-8844. 2019-07-002.
- [25] 中华人民共和国水利部. 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for design of embankment engineering: GB 50286-2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese))
- [26] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准: 堤防工程: SL 634—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Inspection and assessment standard for separated item project construction quality of water conservancy and hydroelectric engineering: Levee works: SL 634-2012 [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2012. (in Chinese))

Dike safety evaluation based on combined weighting and cloud model

LUO Rihong^{1,2}, HUANG Jinlin^{1,2}, ZHANG Jianwei³, YE Hexin⁴

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;

2. Technical Research Center of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area's Water Safety Guarantee, Guangzhou 510635 China; 3. School of Water Conservancy North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 4. Guangdong Technology Center of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The water retaining structures built along rivers, canals, lakes, and coasts are called dikes, the earliest and widely used important flood control projects in the world. China has built more than 300,000 km of dikes above grade 5, which has played an important role in preventing floods and protecting people's personal and property safety. Due to the problems of the low construction standard, poor quality and unstable foundation of some dikes, serious dangerous situations such as piping, landslide, bank collapse, and overflowing may even lead to dike break-in operation. Therefore, it is of great significance to evaluate the safety of the dike regularly and grasp the safety situation of the dike in time, to strengthen the management of the dike. Thus, dike safety evaluation was still mainly qualitative evaluation, lack of quantitative evaluation, so it is necessary to conduct more in-depth research.

Some studies only considered the influence of a single factor or much dependent on subjective experience of experts, which was not comprehensive and systematic, and there were few fuzzy and probabilistic studies considering the influencing factors of dike safety. Because dike safety is a multi-level, uncertain, and nonlinear dynamic system affected by many factors. The research on its evaluation method has always been a very complex problem. General numerical simulation, traditional standard evaluation and other methods were difficult to fully reflect the actual safety of dikes. The theory of cloud model evaluation method can comprehensively consider the fuzziness and probability characteristics of the evaluated object, and this theory has been widely used in all kinds of complex comprehensive evaluation research. Therefore, the cloud model theory was introduced into the dike safety evaluation. Based on the current relevant norms of dike safety evaluation, a hierarchical index system was constructed, which was composed of 5 first-level evaluation indexes, 22 second-level evaluation indexes and 11 third-level evaluation indexes. Concerning the rating standards of the existing dike safety evaluation standards, based on the results of on-site quality inspection and safety review, the factors affecting dike safety were comprehensively considered through expert group decision-making. Each expert was given weight through the similarity of order relation to reflect the difference of different experts' knowledge and experience. The traditional G1 method was improved, and the subjective weight of the index was calculated. The weight of the expert was calculated by entropy weight method to make the weight distribution of each index more scientific and reasonable. The corresponding three safety categories of dike safety were assigned to the corresponding scale interval and transformed into the corresponding safety cloud comments, and then the cloud comments of the third level evaluation index were determined by integrating expert opinions, and the floating cloud or integrated cloud computing model was used to fuse the cloud comments of different experts step by step. The total target cloud parameters of the dike safety state were obtained, and the corresponding cloud map was made, and the real safety state distribution of the dike was intuitively obtained. Based on this, the safety category was determined, and the development trend of the dike safety state was analyzed.

Taking a dike on the left side of the Pearl River Channel as an example, the cloud evaluation of the third-level evaluation index was calculated using floating cloud, and the cloud parameters of the first-level index were obtained. The operation and management was rated as "unsafe" because of the great deficiency in the daily management and maintenance and safety monitoring of the dike, and the flood control capacity was rated as "unsafe" because the elevation of the dike was lower than the requirements of the design standards. Although the project quality was "basic safety", but the score is low, some "cloud droplets" fall into the "unsafe" scope. The main reason was that the dike took a long time to be completed and the construction standard was low. After many years of operation, the cross-section of the dike body, the clay content of the dike soil, the hidden danger of the dike body and the quality of slope protection have the problems of reduced safety, and the index value was on the low side. According to the cloud parameters of the first-level index and its corresponding combination optimization weight and overall goal of comprehensive cloud computing, the security state cloud map falls into the "basic security" range and was identified as the second-class dike, which was consistent with the conclusion of the traditional method of dike identification.

The weight distribution of each index was optimized based on the scientific index system construction and combination weighting method, and the fuzziness and randomness of the influencing factors of dike safety were better combined by introducing cloud model theory. It is not only given a more accurate judgment of each state but also transforms the grade evaluation of dike safety into fuzzy and random comprehensive evaluation, compared with the traditional evaluation method. It can reflect the actual safety state of the dike more comprehensively, and provide a more scientific and reasonable basis for dike safety evaluation and strengthening management.

Key words: dike safety; combined weighting; cloud model; safety category; comprehensive evaluation