

基于云模型改进“3 标度”AHP-物元理论的 不良地质农田灌溉渠道施工风险评价

崔宏艳¹, 张恩典¹, 王志鹏^{2*}, 李清富²

(1. 河南省赵口引黄灌区二期工程建设管理局, 河南 开封 475000;

2. 郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450000)

摘 要:【目的】为了缓解采后土地重建水利工程的土地资源短缺问题, 对不良地质重建农田灌溉渠道可行性的风险级别进行评价。【方法】筛选了包括采空区风险、外在风险、采砂区风险和渠道内在风险 4 个方面共 13 个评价指标, 提出了用云模型改进“3 标度”AHP (层次分析法)-传统物元风险评价方法。【结果】①对于最终的评价结果, 根据权重来看, 应重点关注采空区及采砂区风险, 而对于采空区风险则需重点关注采空区停采时间, 采砂区风险需重点考虑采砂区距离渠道边坡的距离; ②从单向因子风险评估情况来看, 需重点考虑采空区埋深及当地地基土粘聚力的影响。在施工前需要对相关风险因素进行处理和预防, 采取相应的措施后, 在保证安全的前提下进行渠道施工。【结论】实例应用表明, 与相关文献中的方法对比, 本文的评价结果更加客观、准确, 具有更好的适用性, 对于不良地质条件下的农田灌溉渠道施工有重要的指导作用。

关键词:“3 标度”; 云化 AHP; 云化物元; 农田灌溉渠道; 采空区; 采砂区; 风险评价

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021412

OSID:



崔宏艳, 张恩典, 王志鹏, 等. 基于云模型改进“3 标度”AHP-物元理论的不良地质农田灌溉渠道施工风险评价[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 114-122.

CUI Hongyan, ZHANG Endian, WANG Zhipeng, et al. An Improved Three-Layer Analytic Hierarchy Process Model for Assessing Construction of Farmland Irrigation Canals in Tailings of Sand Mining[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 114-122.

0 引 言

【研究意义】农田灌溉渠道是水利建设的输水工程, 从河流、湖泊、水库等水源引水以供农业灌溉、发电、工业与民用等, 是应用最为普遍的水利工程。灌溉渠道形体结构简单, 在修建时基本不会发生施工风险, 但由于其多处于山川、河谷、农田地带, 明晰的地质条件很有可能带来潜在的危害, 故在施工前应主要考虑施工地带的地质环境影响。在我国豫东黄淮平原, 区域地质特性多为粉土, 且之前有区域采砂留下的老采砂坑, 同时豫东地区, 由于过去长年的煤矿开采, 在部分区域也存在采空区。因此, 在不良地质风险因素众多的条件下修建灌溉渠道, 其计划是否可行, 施工是否安全, 亟须对其进行风险评价, 从而指导灌溉渠道的施工。【研究进展】考虑当前渠道工程建设主要的影响因素为采空区及采砂区不良地质,

故查阅相关文献探究现阶段采空区对于再建建筑的风险评价研究, 其中汪云^[1]基于 AHP 和 GIS 技术对矿山采空区地表塌陷风险影响进行研究; 靳昊等^[2]将层次分析法结合属性测度函数应用于采空区塌陷风险评估; 王新民等^[3]运用熵权法和物元分析建立采空区危险性评价模型进行评价; 汪伟等^[4]运用物元可拓方法对采空区的稳定性进行了评估; 郭庆彪等^[5]基于云模型与模糊层次分析法评价了老采空区建设场地的稳定性。陈晓伟^[6]采用正交设计和数理统计方法, 研究了不同采砂坑参数对堤防稳定的影响, 得出采砂坑离堤脚的距离和采砂坑的深度对堤防安全的影响最为显著。同时在渠道施工中, 还应考虑渠道边坡的稳定性。李志强等^[7]基于组合赋权-可拓理论建立基于孕险环境的静态评价模型和基于致灾因子的动态评价模型进行边坡风险等级评价; 赵博等^[8]结合物元可拓法和马尔科夫链法, 从风险的概念出发, 提出了一种新的边坡风险评价模型; 方前程等^[9]建立了基于博弈论-云模型的边坡稳定性分级评价方法。【切入点】对于以上提到的层次分析法及物元理论等数值与数学方法虽取得了较好的评价结果, 但评估指标因素具

收稿日期: 2021-08-28

基金项目: 河南省水利厅水利科技攻关项目 (GG202062)

作者简介: 崔宏艳 (1970-), 女。中级工程师, 主要从事水利工程施工管理工作的研究。Email: kfchy199@163.com

通信作者: 王志鹏 (1994-), 男。硕士研究生, 主要从事评价方法的研究。E-mail: wangzhipeng@gs.zzu.edu.cn

有不确定性, 包含了指标的模糊性、随机性及相互的不相容性, 导致上述方法具有一定的局限性, 故需找到一种可以综合考虑不确定性影响因素的评价方法。

【拟解决的关键问题】层次分析法中的“3 标度”法操作简单、系统简洁, 但无法解决多人决策冲突时的综合评价问题, 构建的判断矩阵不够客观全面, 不能准确地反映出决策者的主观偏好关系; 利用云模型对判断矩阵中的两两风险元素的比较标度赋值可以体现随机性, 并且云模型的集结算法可以将多人决策的赋值全部带入计算公式, 方便决策。物元理论是通过关联函数对事物的特征进行定量计算, 能解决评价对象内容不相容的问题, 但由于其是将特征量值通过具体数值区间来确定, 因而忽略了量值的随机性和模糊性。将云模型参数代替物元理论中的固定事物特征值, 进行重新定义和构造, 并在关联度计算时引入期望值及正态随机数, 使评价结果更加合理、可信。

1 材料与方法

1.1 风险辨识

进行风险评价的首要步骤是进行风险因子辨识, 本文通过搜索相关文献对待评指标进行初步筛选, 对其中起重要影响作用的风险因子进行提取, 并确定为不良地质渠道风险的最终待评指标。最终得到影响渠道施工的风险因素, 分为采空区风险^[10-11] V_1 、外在因素 V_2 、采砂区风险^[12-14] V_3 、渠道内在风险^[15-16] V_4 ; 其中采空区风险包括采空区停采时间 V_{1-1} 、采空区跨度 V_{1-2} 、采空区面积 V_{1-3} 、采空区埋深 V_{1-4} ; 外在因素包括人类活动 V_{2-1} 、降雨量 V_{2-2} ; 采砂区风险包括采砂区离坡角距离 V_{3-1} 、采砂坑形状 V_{3-2} 、采砂坑深度 V_{3-3} ; 渠道内在风险包括地质构造 V_{4-1} 、地下水 V_{4-2} 、地基土的粘聚力 V_{4-3} 、边坡坡度 V_{4-4} 。由此得到影响渠道施工的风险致因层次模型见图 1。



图 1 不良地质渠道施工的风险致因层次模型

Fig.1 The hierarchical model of risk causes in construction of poor geological channels

1.2 评价方法

层次分析法^[17]是运筹学家 T. L. Saaty 构建的一种定性和定量相结合的分析方法, 因操作简单、系统

简洁而被广泛应用于各个领域, 但因其评价的主观性使评价结果有可能不满足一致性检验。相关学者对其传统“9 标度法”进行了“3 标度法”^[18-19]的改进, 通过相应两两方案指标比较建立比较矩阵, 计算最优传递矩阵进而确定判断矩阵, 提高了准确性。该方法的使用自然满足一致性要求, 不需要进行一致性检验。但该改进方法也没考虑到评价指标的模糊性和随机性等不确定性问题。

物元可拓理论^[20]是我国学者蔡文首创, 将物元理论的核心观点融入可拓学中, 以物元作为描述事物的基本元, 形成一个有序三元组, 记为 $R=(N, C, V)$, 其中 N 是所描述事物的名称, C 是事物特征, V 是事物特征值。通过将需要评价的事物通过可拓变化, 确定经典域和节域, 并计算关联函数和关联度, 以此进行定量和定性相结合的评价过程。但其是将特征量值通过具体数值区间确定, 忽略了量值的随机性和模糊性。

云模型理论^[21]是中国工程院院士李德毅提出, 采用自然语言来描述定性概念, 并与其给出的数值之间建立不确定性的转化模型, 有效集成了客观事物或者是人类知识中的随机性和模糊性, 较好地反映了具有随机性和模糊性的客观现象的普遍规律。

根据引言部分对相关文献研究的描述, 可以发现现阶段的研究方法大多是上述 3 种方法的单独使用, 本文旨在发挥云模型的优点来改进“3 标度”AHP 及物元理论, 使得在确定权重及进行关联度计算时运用不确定性和随机性推理机制使评价结果更加真实准确。具体步骤如下。

1.2.1 云模型改进 AHP

1) 利用云模型改造 AHP 中的判断矩阵。通过“3 标度法”, 建立数值判断矩阵, 以量化表示决策信息。假设存在论域 $U=\{i\}, i=-1, 0, 1$, 用 A_i 表示 3 朵云模型, 结构为 $A_i=(E_{x_i}, E_{n_i}, H_{e_i})$, $E_{x_i}, E_{n_i}, H_{e_i}$ 分别为期望、熵和超熵, 参考文献[22]使用黄金分割法计算上述 A_i 参数。黄金分割法的基本原理为: 根据对称性将论域分成 2 部分, 一段线段的起点与终点分别用前一朵云和最后一朵云的期望值表示, 取接近中心云的线段的 0.382 倍作为后一朵云的期望值, 这样前后两朵云的熵与超熵的比例遵循黄金比例准则, 最终得到了特征值表达式:

$$\begin{cases} E_{x_i}=-1, 0, 1, i=1, 2, 3, E_{x_i} \in Z \\ E_{n_1}=E_{n_2}=E_{n_3}=0.382\alpha(x_{\max}-x_{\min})/6=0.109, (1) \\ H_{e_1}=H_{e_2}=H_{e_3}=0.382\alpha(x_{\max}-x_{\min})/36=0.018 \end{cases}$$

式中: $x_{\max}=1, x_{\min}=-1, \alpha$ 为调节系数, 一般取 0.858^[23]。

2) 由上式得到 3 朵云模型后, 进行两两重要性比较, 得到重要性标度云模型的数字特征见表 1。由表可以看出期望 E_{x_i} 数值越大, 表明越重要。

表 1 重要性标度

Table 1 Importance scale

重要性标度	定义
$A_1 = (E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1}) = (1, 0.109, 0.018)$	u_i 比 u_j 重要
$A_2 = (E_{x_2}, E_{n_2}, H_{e_2}) = (0, 0.109, 0.018)$	u_i 和 u_j 同等重要
$A_3 = (E_{x_3}, E_{n_3}, H_{e_3}) = (-1, 0.109, 0.018)$	u_i 不如 u_j 重要

注 u_i 和 u_j 为重要性元素。

3) 根据上述决策方法建立云化 AHP 的标度比较矩阵, 形式如式 (3):

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据文献[18-19]所述, 并根据云模型特征, 确定上式对角线上元素的期望, 熵和超熵为 0, n 为待评价指标的个数。

4) 计算最优传递矩阵 R , 形式如式 (4):

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $R_{ij} = \sum_{k=1}^n (A_{ik} + A_{kj}) / n$

5) 将最优传递矩阵 R 转为判断矩阵 D , 形式如式 (5):

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \cdots & D_{nn} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $D_{ij} = \exp(R_{ij})$, 转换后矩阵具有较好的一致性, 故无需再进行一致性检验。

6) 对矩阵进行归一化, 引入云计算的乘法运算^[24]并采用方根法^[23]计算得到要素期望、模糊性和随机性的权重 $D_{w_i} = (E_{x_i}, E_{n_i}, H_{e_i})$ 和相对权重 $D\bar{w}_i = (E'_{x_i}, E'_{n_i}, H'_{e_i})$, 各参数的计算见式 (6) — 式 (8)。

$$E'_{x_i} = \frac{E_{x_i}}{\sum E_{x_i}} = \frac{(\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}})^{\frac{1}{n}}}, \quad (6)$$

$$E'_{n_i} = \frac{E_{n_i}}{\sum E_{n_i}} = \frac{\left((\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{E_{n_{ij}}}{E_{x_{ij}}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left((\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{E_{n_{ij}}}{E_{x_{ij}}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{n}}}, \quad (7)$$

$$H'_{e_i} = \frac{H_{e_i}}{\sum H_{e_i}} = \frac{\left((\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{H_{e_{ij}}}{E_{x_{ij}}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left((\prod_{j=1}^n E_{x_{ij}}) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{H_{e_{ij}}}{E_{x_{ij}}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{n}}}. \quad (8)$$

1.2.2 云化物元模型

在计算得到权重后, 就可以进行项目的风险评价。本文运用的云化物元模型^[23]在于利用云模型对物元可拓理论进行重新定义和构造, 并保持可拓评价的一般步骤对事物进行描述和评价。利用正态云模型 (E_x, E_n, H_e) 取代固定数值的事物特征值 V , 从而实现对评估过程中随机性和模糊性的数学描述。具体可表示为式 (9):

$$R = \begin{pmatrix} N & C_1 & (E_{x_1}, E_{n_1}, H_{e_1}) \\ & C_2 & (E_{x_2}, E_{n_2}, H_{e_2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (E_{x_n}, E_{n_n}, H_{e_n}) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中: E_x 为期望, 代表云重心的位置; E_n 为熵, 表示云代表的定性概念的模糊程度; H_e 为超熵, 主要体现样本的随机性, 即云图上云滴的厚度。云模型用这 3 个数字特征反映定性概念整体的定量特征。

云化物元模型在划分安全风险等级区间时通过自身的模糊性和随机性特征将评估指标的分类等级界限作为双约束空间 $(C_{\min}, C_{\max})$ 处理。根据云期望的定义, 约束区间的中心值最能代表该等级概念, 则云期望 E_x 的表达式为 $E_x = (C_{\min} + C_{\max}) / 2$, 等级云超熵 H_e 一般根据经验及实际情况取常数, 其值越小, 云滴隶属度的随机性越小, 结果更有可比性, 但会漏掉很多边界处的点; 其值越大, 云滴离散度越大, 隶属度的随机性越大, 能包容更多的点, 但可比性较差, 各等级隶属云之间分隔越不明显, 综合考虑本文定为 0.08^[25]。云熵 E_n 作为状态等级概念模糊度的度量, 反映了所能接受的数值范围, 影响着等级判定的准确性。对于云熵的确定目前有 2 种计算方法, 分别为基于“3 E_n ”规则的 $E_n^{(1)} = (C_{\max} - C_{\min}) / 6$ 和基于“50%关联度”规则的 $E_n^{(2)} = (C_{\max} - C_{\min}) / 2.3548$; 前者得到的相邻等级可拓云在边界处分隔清晰, 体现了等级划分的分明性, 后者得到的相邻等级可拓云在边界处分隔模糊, 表示临界值同时隶属于上下 2 个等级, 体现了等级划分的模糊性。在指标评价时, 对于划分危险和安全这类有清晰边界的等级采用前者, 安全以下的各个危险程度的级别划分采用后者^[25]。

由于改进了等级界限确定时的模糊性和随机性, 结合云模型的可拓物元模型关联度的计算也发生了变化。对于数值与云物元之间的关联度, 把评价指标 x 视为一个云滴, 将其带入一个正态云发生器, 可计算出该数值 x 与该正态云模型的关联度 k , 见式 (10):

$$k = e^{\left(-\frac{(x - E_n)^2}{2(E_n)^2} \right)}, \quad (10)$$

式中: x 为安全评价指标的量值; E_n 为期望值为 E_n 、标准差为 H_e 的一个正态随机数。

在计算出待评估样本各项指标分量与标准正态云之间的关联度后，得出综合评判矩阵 $\mathbf{K}$ ，其形式为式 (11)：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & k_{n4} & k_{n5} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中： k_{ij} 为评估指标与安全风险等级之间的云关联度； $i=1,2,\dots,n$ ，为评估指标数目，本文 n 取为 13， j 为安全风险等级序号，本文为 1-5 的整数。

结合权重系数 $D_{\bar{W}_i}$ 得出评判向量 $\mathbf{B}$ ，见式 (12)：

$$\mathbf{B} = D_{\bar{W}_i} \cdot \mathbf{K}, \quad (12)$$

式中：评估指标权重向量 $D_{\bar{W}_i}$ 由各评估指标的权重组成，本研究取用第一个参数 E_{x_i} ， $\mathbf{K}$ 为待评估指标与安全风险等级标准正态云之间的云关联度矩阵。

利用加权平均得出综合评判分数 $r^{[26]}$ 为式 (13)：

$$r = \frac{\sum_{j=1}^5 b_j f_j}{\sum_{j=1}^5 b_j}, \quad (13)$$

式中： b_j 为向量 $\mathbf{B}$ 对应的分量； f_j 为等级 j 的得分值，评判等级 I-V 对应的分数依次取值为 5, 4, 3, 2, 1^[25]。

需要说明的是在计算关联度时，正态随机数的存在会使计算结果变得不唯一，因此需经多次运算后^[26]求取综合评判分数的期望值 E_{rx} 和熵 E_m ，计算式如式 (14) — 式 (15)。

$$E_{rx} = \frac{r_1(x) + r_2(x) + \dots + r_m(x)}{m}, \quad (14)$$

$$E_m = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{h=1}^m (r_h(x) - E_{rx})^2}, \quad (15)$$

式中： m 为运算次数，本文取为 100； $r_h(x)$ 为第 h 次运算得出的综合评判分数。最终得到的期望值越接近哪个数值，安全风险等级就评判为与该数值对应的等级；熵是对评估结果分散度的衡量，其值越大评判结果越分散。

最后定义可信度因子 $\theta^{[26]}$ 为式 (16)：

$$\theta = \frac{E_m}{E_{rx}}. \quad (16)$$

θ 值越大，表示评判结果的分散度越大，可信度就越小；反之，评判结果的可信度就越大。具体评价方法应用的流程见图 2。

2 结果与分析

2.1 工程背景

河南省赵口引黄灌区二期工程途径开封尉氏县，通许县，杞县以及商丘睢县，分布情况见图 3。本文主要研究位于杞县施工 2 标的跃进干渠，主要包括总干渠渠道总长 14.474 1 km（设计桩号 17+745~32+219.1）。本标段渠道为梯形断面，其中桩

号 17+745~27+613.9 渠道设计为单式梯形断面，底宽 23 m，边坡 1:2.5；桩号 27+613.9~27+702.6 渠道设计为单式梯形断面，此段为渐变段底宽 23~15.5 m，边坡 1:2；桩号 27+702.6~32+219.1 渠道设计为单式梯形断面，底宽 15.5 m，边坡 1:2.5。当地季风气候的不稳定性和天气系统的多变性，造成灌区年际间降水量差别很大，最大与最小降水量相差悬殊和年际间丰枯变化频繁等特点。渠道经过地段穿过部分采空区及采砂区，区域地质多为粉土，砂壤土等，地下水类型为第四系松散层孔隙水。渠道分布及采空区、采砂区影响范围见图 4。

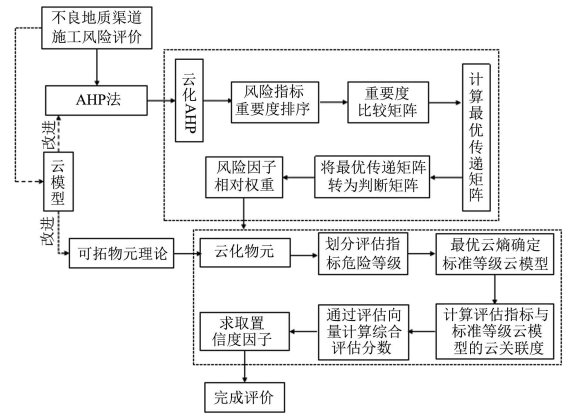


图 2 评价方法流程

Fig.2 Flow chart of evaluation method

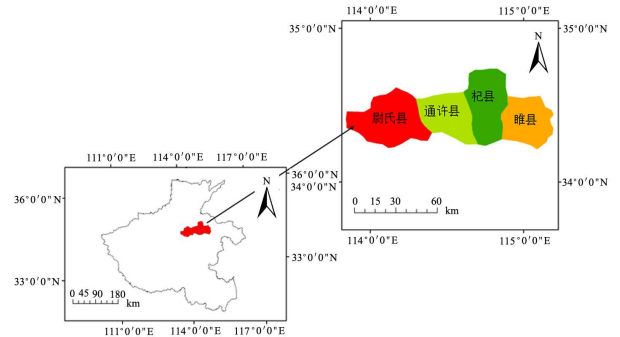


图 3 引黄灌区分布位置

Fig.3 Distribution of the Yellow River irrigation district

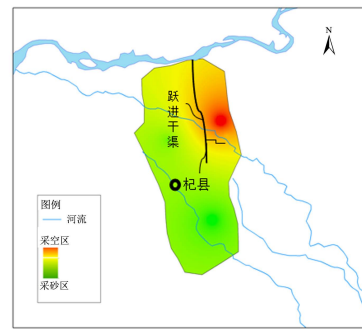


图 4 渠道分布及空区影响范围

Fig.4 Distribution of channels and scope of influence of empty areas

2.2 评估指标的权重确定

通过项目的相关资料及咨询相关专家对影响渠道施工的风险指标重要性程度进行排序，得到一级指

标的重要性排序为: 采空区风险 V_1 >采砂区风险 V_3 >渠道内在风险 V_4 >外在因素 V_2 , 风险因子比较矩阵见表 2。

通过式(4)将判断矩阵转化为最优传递矩阵 R ,

表 2 不良地质渠道一级指标风险因子相对重要度比较矩阵

Table 2 Comparative matrix of relative importance of risk factors for the first-level indicators of adverse geological channels

指标	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1	(0,0,0)	(1,0.109,0.018)	(1,0.109,0.018)	(1,0.109,0.018)
V_2	(-1,0.109,0.018)	(0,0,0)	(-1,0.109,0.018)	(-1,0.109,0.018)
V_3	(-1,0.109,0.018)	(1,0.109,0.018)	(0,0,0)	(1,0.109,0.018)
V_4	(-1,0.109,0.018)	(1,0.109,0.018)	(-1,0.109,0.018)	(0,0,0)

表 3 不良地质渠道一级指标风险因子最优传递矩阵

Table 3 Optimal transfer matrix of first-level index risk factors for poor geological channels

指标	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1	(0,0,0)	(1.5,0.164,0.027)	(0.5,0.164,0.027)	(1,0.164,0.027)
V_2	(-1.5,0.164,0.027)	(0,0,0)	(-1,0.164,0.027)	(-0.5,0.164,0.027)
V_3	(-0.5,0.164,0.027)	(1,0.164,0.027)	(0,0,0)	(0.5,0.164,0.027)
V_4	(-1,0.164,0.027)	(0.5,0.164,0.027)	(-0.5,0.164,0.027)	(0,0,0)

表 4 不良地质渠道一级指标风险因子一致矩阵

Table 4 Consistent matrix of risk factors for first-level indicators of poor geological channels

指标	V_1	V_2	V_3	V_4
V_1	(1,1,1)	(4.482,1.178,1.027)	(1.649,1.178,1.027)	(2.718,1.178,1.027)
V_2	(0.223,1.178,1.027)	(1,1,1)	(0.368,1.178,1.027)	(0.607,1.178,1.027)
V_3	(0.607,1.178,1.027)	(2.718,1.178,1.027)	(1,1,1)	(1.649,1.178,1.027)
V_4	(0.368,1.178,1.027)	(1.649,1.178,1.027)	(0.607,1.178,1.027)	(1,1,1)

表 5 风险因子的相对权重

Table 5 Relative weights of risk factors

D_{W_i}	$D_{\bar{W}_i}$
(2.117,2.273,2.242)	(0.455,0.399,0.413)
(0.472,0.732,0.585)	(0.101,0.129,0.108)
(1.284,1.588,1.545)	(0.276,0.279,0.284)
(0.779,1.097,1.063)	(0.167,0.193,0.196)

因此得到一级指标采空区风险 V_1 , 外界因素 V_2 , 采砂区不良诱因 V_3 , 渠道内在因素 V_4 的权重向量为(0.455, 0.101, 0.276, 0.167)。

对于采空区风险下的二级指标, 得到 4 个风险因子的相对重要度排序为采空区停采时间 V_{1-1} >采空区跨度 V_{1-2} >采空区深度 V_{1-4} >采空区面积 V_{1-3} ; 外在因素下的二级指标, 相对重要度排序为人类活动 V_{2-1} >降雨量 V_{2-2} ; 采砂区风险下的二级指标, 相对重要度排序为采砂区离坡角距离 V_{3-1} >采砂坑深度 V_{3-3} >采砂坑形状 V_{3-2} ; 渠道内在风险下的二级指标, 相对重要度排序为地质构造 V_{4-1} =黏聚力 V_{4-3} >边坡坡度 V_{4-4} >地下水 V_{4-2} 。各级指标的比较矩阵见表 6—表 9。

表 6 采空区风险下二级指标风险因子相对重要度比较矩阵

Table 6 Comparison matrix of relative importance of secondary index risk factors under mined-out area risk

指标	V_{1-1}	V_{1-2}	V_{1-3}	V_{1-4}
V_{1-1}	0	1	1	1
V_{1-2}	-1	0	1	1
V_{1-3}	-1	-1	0	-1
V_{1-4}	-1	-1	1	0

见表 3。通过式(5)把矩阵 R 转化为一致矩阵 D , 见表 4。

通过式(6)一式(8)计算得到的权重及相对权重见表 5:

表 7 外在因素下二级指标风险因子相对重要度比较矩阵

Table 7 Comparison matrix of relative importance of secondary index risk factors under external factors

指标	V_{2-1}	V_{2-2}
V_{2-1}	0	1
V_{2-2}	-1	0

表 8 采砂区风险下二级指标风险因子相对重要度比较矩阵

Table 8 Comparison matrix of relative importance of secondary index risk factors under sand mining area risk

指标	V_{3-1}	V_{3-2}	V_{3-3}
V_{3-1}	0	1	1
V_{3-2}	-1	0	-1
V_{3-3}	-1	1	0

表 9 渠道内在风险下二级指标风险因子相对重要度比较矩阵

Table 9 Comparison matrix of relative importance of secondary index risk factors under channel internal risk

指标	V_{4-1}	V_{4-2}	V_{4-3}	V_{4-4}
V_{4-1}	0	1	0	1
V_{4-2}	-1	0	-1	-1
V_{4-3}	0	1	0	1
V_{4-4}	-1	1	-1	0

采用相同的方法依次对不同指标下的风险因子权重进行计算, 得到采空区风险下二级指标采空区停采时间 V_{1-1} 、采空区跨度 V_{1-2} 、采空区面积 V_{1-3} 、采空区埋深 V_{1-4} 的权重向量为 0.455、0.276、0.101、0.167; 外在因素下二级指标人类活动 V_{2-1} , 降雨量 V_{2-2} 的权重向量为 0.731, 0.269; 采砂区风险下二级指标采砂区

离坡角距离 V_{3-1} ，采砂坑形状 V_{3-2} ，采砂坑深度 V_{3-3} 的权重向量为 0.563, 0.148, 0.289；渠道内在风险下二级指标地质构造 V_{4-1} ，地下水 V_{4-2} ，黏聚力 V_{4-3} ，边坡坡度 V_{4-4} 的权重向量为 0.394, 0.198, 0.211, 0.198。最终得到综合权重见表 10。

2.3 云化物元对项目的风险性评估

经过查阅《采空区公路设计与施工技术细则》(JTG/T D31-03—2011)^[27]，《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386—2007)^[28]，《河道采砂规划编制及实施监督管理技术规范》(SL 423—2008)^[29]等相关规范及对相关文献的研究，确定不良地质渠道施工的风险致因因子的危险性为 I - V 级，分别对应于高度危险，危险，较危险，较安全，安全，具体等级划分见表 11。对于定量指标，以规定数值为划分标准，对于定性指标对 I - V 级分别赋予 5, 10, 15, 20, 25^[25]。

表 11 不良地质渠道施工风险致因因子的危险性等级划分

Table 11 Dangerous grade division of risk-causing factors for construction of poor geological channels

一级指标	二级指标	危险性等级				
		I	II	III	IV	V
采空区风险 ^[1-2,10-12,27]	停采时间/a	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,10]
	跨度/m	(160,300]	(120,160]	(80,120]	(40,80]	(0,40]
	面积/m ²	(2000,3000]	(1600,2000]	(1200,1600]	(800,1200]	(0,800]
	埋深/m	(0,100]	(100,200]	(200,400]	(400,600]	(600,1000]
外在因素 ^[15-16]	人类活动	(0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,25]
	年内旬最大降雨量/mm	(300,500]	(150,300]	(100,150]	(50,100]	(0,50]
采砂区风险 ^[13-14,28-30]	离渠道及边坡的距离/m	(0,3]	(3,5]	(5,7]	(7,9]	(9,15]
	形状	(0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,25]
	深度/m	(8,10]	(6,8]	(4,6]	(2,4]	(0,2]
渠道内在风险 ^[14-16,28-29]	地质构造	(0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,25]
	地下水/(L min ⁻¹ (10 m) ⁻¹)	(125,200]	(100,125]	(50,100]	(25,50]	(0,25]
	地基土的黏聚力/kPa	(0,20]	(20,30]	(30,40]	(40,50]	(50,100]
	边坡坡度/(°)	(60,90]	(45,60]	(30,45]	(15,30]	(0,15]

在得到等级划分指标后，根据最优云熵的确定方法求取不良地质灌溉渠道施工各个风险指标的标准

表 12 渠道风险等级的云模型数字特征

Table 12 Digital characteristics of cloud model of channel risk level

评估指标等级界限云模型参数值	安全风险等级				
	高度危险 (I)	危险 (II)	较危险 (III)	较安全 (IV)	安全 (V)
V_{1-1}	(0.500,0.425,0.080)	(1.500,0.425,0.080)	(2.500,0.425,0.080)	(3.500,0.425,0.080)	(7.000,1.000,0.080)
V_{1-2}	(230.000,59.453,0.080)	(140.000,16.987,0.080)	(100.000,16.987,0.080)	(60.000,16.987,0.080)	(20.000,6.667,0.080)
V_{1-3}	(2 500.000,424.665,0.080)	(1 800.000,169.866,0.080)	(1 400.000,169.866,0.080)	(1 000.000,169.866,0.080)	(400.000,133.333,0.080)
V_{1-4}	(50.000,42.466,0.080)	(150.000,42.466,0.080)	(300.000,84.933,0.080)	(500.000,84.933,0.080)	(800.000,66.667,0.080)
V_{2-1}	(2.500,2.123,0.080)	(7.500,2.123,0.080)	(12.500,2.123,0.080)	(17.500,2.123,0.080)	(22.500,0.833,0.080)
V_{2-2}	(400.000,84.933,0.080)	(225.000,63.700,0.080)	(125.000,21.233,0.080)	(75.000,21.233,0.080)	(25.000,8.333,0.080)
V_{3-1}	(1.500, 1.274,0.080)	(4.000,0.849,0.080)	(6.000, 0.849,0.080)	(8.000, 0.849,0.080)	(12.000,1.000,0.080)
V_{3-2}	(2.500,2.123,0.080)	(7.500,2.123,0.080)	(12.500,2.123,0.080)	(17.500,2.123,0.080)	(22.500,0.833,0.080)
V_{3-3}	(9.000,0.849,0.080)	(7.000,0.849,0.080)	(5.000,0.849,0.080)	(3.000,0.849,0.080)	(1.000,0.333,0.080)
V_{4-1}	(2.500,2.123,0.080)	(7.500,2.123,0.080)	(12.500,2.123,0.080)	(17.500, 2.123,0.080)	(22.500,0.833,0.080)
V_{4-2}	(162.500,31.850,0.080)	(112.500,10.617,0.080)	(75.000,21.233,0.080)	(37.500,10.617,0.080)	(12.500,4.167,0.080)
V_{4-3}	(10.000,8.493,0.080)	(25.000,4.247,0.080)	(35.000, 4.247,0.080)	(45.000,4.247,0.080)	(75.000,8.333,0.080)
V_{4-4}	(75.000,12.740,0.080)	(52.500,6.370,0.080)	(37.500,6.370,0.080)	(22.500,6.370,0.080)	(7.500,2.500,0.080)

渠道不同区段风险因子实测值见表 13。针对每个评估区段,分别输入表 13 中 13 个评估指标的实测值或评分值,根据公式(10)计算求得各评估指标与安全风险等级标准正态云之间的云关联度。本文以区段 P_1 为例,在计算得到云关联度矩阵后。根据式(12)求得样本的评估结果向量 $\mathbf{B}$ (0.025 5, 0.121 7, 0.230 1, 0.333 0, 0.299 5),进而通过式(13)运用加权平均法得到单次的综合评估分数为 2.248。为了减少随机因素的影响,按上述步骤重复计算 100 次,根据式(14)一式(15)计算得到综合评估分数的均值和标准差分别为 2.348 和 0.021,最后根据式(16)求得置信度因子为 0.009,置信度因子较小,表明评估结果的可信度较高。其他 2 个区段的计算方法相同,最终得到 3 个区段的评估结果见表 14。同时为了验证本文方法的实用性,与传统的层次分析法和物元理论模型的评价结果进行对比^[31],最终得到评价结果表 14。

表 13 渠道不同区段风险因子实测值

Table 13 Measured values of risk factors in different sections of the channel

区段	风险因子实测值												
	V_{1-1}	V_{1-2}	V_{1-3}	V_{1-4}	V_{2-1}	V_{2-2}	V_{3-1}	V_{3-2}	V_{3-3}	V_{4-1}	V_{4-2}	V_{4-3}	V_{4-4}
P_1	7	100	1300	150	18	80	13	17	3	18	75	25	21.8
P_2	6	60	900	140	20	80	4	25	3	20	75	25	26.6
P_3	8	110	1500	300	20	80	7	15	5	15	75	25	21.8

表 14 3 个区段不同评价方法风险评估结果

Table 14 3 Risk assessment results of different assessment methods in the segments

区段	本文方法		文献[31]方法 评估结果
	评估结果	置信度因子	
P_1	IV ($E_{x_i}=2.348$)	0.009	IV
P_2	III ($E_{x_i}=2.813$)	0.025	III
P_3	III ($E_{x_i}=2.661$)	0.020	IV

由表14可知,本文所用方法与文献[31]的方法评价结果基本吻合,并且本文方法得到的置信度因子均较小,表明本文提出的云模型结合AHP和物元评价方法进行风险评估可信度较高。对比各项评估结果,发现区段 P_3 的最终评价结果略有差异,根据区段 P_3 的期望均值可知,评价结果距III级和IV级的分值均较近,同时求得的标准差较小,说明最终结果更加接近III级。而且本文的权重计算在对传统层次分析法标度改进的基础上,融入云模型,同时评价模型考虑了项目风险因子的随机性和模糊性,总体来说,本文方法得到的评估结果可信度更高。最终得到的风险评价等级为:区段 P_1 风险等级为IV级(较安全),区段 P_2 和 P_3 风险等级为III级(较危险)。

3 讨论

汪云^[1]所用研究方法主观性较强,没考虑到评价过程中各因子的不确定性,所得评价结果不够准确;王新民等^[3]所用客观评价方法也没考虑到评价过程中可能产生的因子变化影响,对于一定时期内的动态变化不能较好的预测;张军等^[31]所用传统评价方法得到的评价结果接近本文改进方法的评价结果,而本文所用方法先进之处在于将云模型融入“3标度”AHP-物元理论中,克服了传统AHP法依靠主观经验确定因子权重的不足和可拓物元理论无法全面考虑渠道施工风险分级界限值的随机性和模糊性问题。最终使得农田灌溉渠道施工各项风险指标权重的确定更加客观、可靠,并得到满意的综合评估结果及其可信度信息,而且模型算法简单、适应性较强、便于编程实现,为渠道施工风险综合评估提供了一种新方法,对于指导渠道施工提供了一定的帮助。具体创新内容为:层次分析法中的“3标度”法操作简单、系统简洁,但主要依据专家给出评价结果,主观性较强,同时无法解决多人决策冲突时的综合评价问题,构建的判断矩阵不够客观全面,不能准确地反映出决策者的主观偏好关系;利用云模型对“3标度”AHP改进,在判断矩阵的构造时,采用黄金分割法并结合云模型数字特征值使两两风险元素的比较标度赋值体现随机性,并且云模型的集结算法可以将多人决策的赋值全部带入计算公式,方便决策。物元理论是通过关联函数对事物的特征进行定量计算,能解决评价对象内容不相容的问题,但由于其是将特征量值通过具体数值区间来确定,因而忽略了量值的随机性和模糊性;本文将云模型参数代替物元理论中的固定事物特征值,进行重新定义和构造,在建立标准可拓云模型时,直接利用原始数据,省去了数据的归一化处理过程,避免了可能出现的信息丢失,并在关联度计算时引入期望值及正态随机数,使结果更合理可信。

但是本文在权重确定的时候采用云模型改进基础的层次分析法,对于本文的实际风险情况,则更加偏向于使用可以较好处理网状因素系统能力的网络分析法(Analytic Network Process)。同时需要指出的是,各评估指标安全风险等级的划分标准和评估指标的评分取值是否合理也会对评估结果产生较大的影响。因此,在后续的研究中,还需进一步改进研究方法并补充和完善不良地质下多项影响因素的安全风险评估指标体系,并研究评估指标评分取值及其安全风险等级划分标准等问题,以进一步提高评估指标体系的科学性,增强评估结果的全面性和客观性。

4 结 论

1) 河南省赵口引黄灌区二期工程的风险等级评价结果为区段1较安全, 区段2、区段3较危险; 在规划范围内施工应提前预防、做好准备、防止风险的发生, 以促进项目施工安全进行。

2) 根据权重来看, 应重点关注采空区及采砂区风险, 而对于采空区风险则需重点关注采空区停采时间, 采砂区风险需重点考虑采砂区距离渠道边坡的距离; 从单向因子风险评估情况来看, 需重点考虑采空区埋深及当地地基土黏聚力的影响。

3) 在规划施工前应采用工程地球物理勘探、钻探和坑探工程等措施先进行地质勘测, 掌握地下空区参数及地质条件, 分析再建工程的可行性; 设计采空区的处理方法保障地基稳定, 以保障灌溉渠道的建设, 具体可采用帷幕注浆、地下沉管注浆等地基加固措施。最终, 根据专项施工方案在保证安全的前提下进行渠道施工。

参考文献:

- [1] 汪云. 基于 AHP 和 GIS 技术的矿山采空区地表塌陷风险影响研究[J]. 世界有色金属, 2018(9): 65-66.
WANG Yun. Study on the influence of Surface subsidence risk in Goaf based on AHP and GIS Technology[J]. World Nonferrous Metals, 2018(9): 65-66.
- [2] 靳昊, 陈彦好, 周宗青, 等. 基于属性识别理论的金属矿山采空区塌陷灾害风险评估[J]. 金属矿山, 2021(3): 184-190.
JIN Hao, CHEN Yanhao, ZHOU Zongqing, et al. Risk assessment of collapse disaster in goaf of metal mine based on attribute recognition theory[J]. Metal Mine, 2021(3): 184-190.
- [3] 王新民, 柯愈贤, 鄢德波, 等. 基于熵权法和物元分析的采空区危险性评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(6): 71-78.
WANG Xinmin, KE Yuxian, YAN Debo, et al. Underground goaf risk evaluation based on entropy weight and matter element analysis[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(6): 71-78.
- [4] 汪伟, 罗周全, 熊立新, 等. 基于改进物元可拓模型的采空区稳定性评价[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 21-25.
WANG Wei, LUO Zhouquan, XIONG Lixin, et al. Research of goaf stability evaluation based on improved matter-element extension model[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 21-25.
- [5] 郭庆彪, 王亮, 吕鑫, 等. 基于云模型与模糊层次分析的老采空区建设场地稳定性评价[J]. 金属矿山, 2019(11): 43-48.
GUO Qingbiao, WANG Liang, LYU Xin, et al. Stability evaluation of the construction site above a goaf based on cloud model and fuzzy hierarchy analysis[J]. Metal Mine, 2019(11): 43-48.
- [6] 陈晓伟. 山区中小流域堤防安全评价技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
CHEN Xiaowei. Study on evaluation of technology for the safe of small mountainous watershed dike[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [7] 李志强, 杨涛, 王亚平, 等. 边坡稳定性动态辨识及工程应用[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 7-13.
LI Zhiqiang, YANG Tao, WANG Yaping, et al. Dynamic risk identification of geological hazards in high and steep slope and engineering application[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(5): 7-13.
- [8] 赵博, 张翥, 元天宇. 边坡风险评价动态模型的构建及其应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(2): 229-234.
ZHAO Bo, ZHANG Xiao, YUAN Tianyu. Establishment and application of dynamic model for slope risk evaluation[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2018, 40(2): 229-234.
- [9] 方前程, 商丽. 基于博弈论-云模型的露天矿岩质边坡稳定性分析[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 8-13.
FANG Qiancheng, SHANG Li. Analysis of the rock slope stability for the open-pit mine based on the game theory and the cloud model[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1): 8-13.
- [10] 李倩, 彭孟长, 马存金, 等. 非煤矿山采空区风险指标体系研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(7): 106-110.
LI Qian, PENG Mengchang, MA Cunjin, et al. Study on risk index system of goaf in non-coal mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(7): 106-110.
- [11] 黄英华, 闻磊, 黄敏, 等. 金属矿山复杂采空区稳定性模糊评价体系研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(12): 63-67.
HUANG Yinghua, WEN Lei, HUNAG Min, et al. Study on fuzzy evaluation system of the complex goaf stability in metal mine[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(12): 63-67.
- [12] 司鹏飞, 牛小静, 余锡平. 跨/穿河建筑物上游河道采砂安全距离[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 143-148.
SI Pengfei, NIU Xiaojing, YU Xiping. Safe distance for upstream sand mining from river-crossing structures[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 143-148.
- [13] 于合理, 夏叶, 王之晗, 等. 采砂坑纵剖面尺寸对卵石河道河床演变影响数值试验: 以石亭江双盛段为例[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(S2): 83-91.
YU Heli, XIA Ye, WANG Zhihan, et al. Numerical simulation study on effect of different longitudinal profile dimensions of sandpit on riverbed evolution of pebble channel: A case of Shuangsheng section of shiting river[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(S2): 83-91.
- [14] 雷鹏, 余霞, 罗亮. 基于颗粒流程序分析河道采砂对堤防稳定性的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 45-50.
LEI Peng, YU Xia, LUO Liang. Analysis of the influence of sand mining on the stability of embankment based on particle flow code[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(3): 45-50.
- [15] 柯劲松, 张李荪, 刘胜. 基于小波神经网络的第四系覆盖层边坡风险评价[J]. 人民长江, 2020, 51(7): 136-140.
KE Jinsong, ZHANG Lisun, LIU Sheng. Risk assessment on Quaternary overburden slope in Jiangxi Province based on momentum improved wavelet neural[J]. Yangtze River, 2020, 51(7): 136-140.
- [16] 姜银华, 柳剑锋, 刘华, 等. 第四系覆盖层滑坡软弱面特性及机理分析[J]. 电力勘测设计, 2015(S1): 1-4, 10.
JIANG Yinhua, LIU Jianfeng, LIU Hua, et al. Analysis of weak plan characteristic and mechanisms of the forth periods overburden landslides[J]. Electric Power Survey & Design, 2015(S1): 1-4, 10.
- [17] 崔金涛, 吐尔逊·买买提明, 张磊, 等. 基于层次分析法的新疆节水型社会建设综合评价[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S2): 129-132.
CUI Jintao, TUERXUN Maimaitiming, ZHANG Lei, et al. Comprehensive evaluation for water-saving society construction in Xinjiang based on analytic hierarchy process method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S2): 129-132.
- [18] 黄增彦, 王广月, 李倩, 等. 基于可拓学的砂土液化等级评价研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(5): 31-35, 56.
HUANG Zengyan, WANG Guangyue, LI Qian, et al. Rank evaluation of sand liquefaction based on Extenics[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38(5): 31-35, 56.
- [19] 丁丽宏. 基于改进的灰关联分析和层次分析法的边坡稳定性研究[J].

- 岩土力学, 2011, 32(11): 3 437-3 441.
- DING Lihong. Research on estimation of slope stability based on improved grey correlation analysis and analytic hierarchy process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3 437-3 441.
- [20] 尚林鑫, 李育飞, 邵光成, 等. 基于 PSR 模型的灌区节水改造综合效益物元分析评价[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 121-128.
- SHANG Linxin, LI Yufei, SHAO Guangcheng, et al. Evaluating multiple benefits of revamping water-saving irrigation district based on the PSR model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 121-128.
- [21] 刘静霞, 蒙强, 曹志翔, 等. 基于云模型的西藏高原灌区参考作物蒸散量时间变化特征与影响因子研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 135-144.
- LIU Jingxia, MENG Qiang, CAO Zhixiang, et al. Using cloud model to analyze spatiotemporal variation of reference evapotranspiration and its determinants in tableland irrigation district in Tibet[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(5): 135-144.
- [22] 刘尚各, 彭文波, 刘继国, 等. 公路隧道施工风险评估方法及其应用研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 241-246.
- LIU Shangge, PENG Wenbo, LIU Jiguo, et al. Risk assessment method of highway tunnel construction and its application[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 241-246.
- [23] 贾兴利, 许金良. 基于云模型的地震区公路震害风险评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 1 352-1 358, 1 458.
- JIA Xingli, XU Jinliang. Cloud model-based seismic risk assessment of road in earthquake region[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(9): 1 352-1 358, 1 458.
- [24] 崔铁军, 马云东. 基于云化 ANP 的巷道冒顶影响因素重要性研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(11): 3 307-3 310.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Study on importance of factor of roadway roof fall based on ANP-ECM[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(11): 3 307-3 310.
- [25] 岳开伟. 基于云物元的电能质量综合评估及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- YUE Kaiwei. The study of a comprehensive power quality evaluation model based on cloud matter element theory and its application[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [26] 黄成, 朱金善, 张锋, 等. 基于云模型改进物元结构的船舶夜航光环境评价模型[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(4): 43-48.
- HUANG Cheng, ZHU Jinshan, ZHANG Feng, et al. Light environment evaluation model for ship night navigation based on improved cloud matter-element structure[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2018, 44(4): 43-48.
- [27] 中华人民共和国交通运输部. 采空区公路设计与施工技术细则: JTG/T D31-03—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specifications for Design and Construction of Goaf Highways: JTG/T D31-03—2011[S]. Beijing: People's Communications Press, 2011.
- [28] 水利水电工程边坡设计规范. SL 386—2007[S].
- [29] 中华人民共和国水利部. 河道采砂规划编制规程. SL 423—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Regulations for the preparation of river sand mining planning: SL 423—2008[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.
- [30] 王刚, 茜平一, 邹勇. 靠近堤脚采沙对堤防稳定影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2004(7): 68-69, 72.
- WANG Gang, QIAN Pingyi, ZOU Yong. Analysis of the influence of sand mining near the toe of the embankment on the stability of the embankment [J]. China Rural Water and Hydropower, 2004(7): 68-69, 72.
- [31] 张军, 陈欢, 张玉丽. 基于物元分析理论的盾构井施工方案评价[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 115-120.
- ZHANG Jun, CHEN Huan, ZHANG Yuli. Evaluation of construction schemes for shield well based on matter element analysis theory[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(1): 115-120.

An Improved Three-layer Analytic Hierarchy Process Model for Assessing Construction of Farmland Irrigation Canals in Tailings of Sand Mining

CUI Hongyan¹, ZHANG Endian¹, WANG Zhipeng^{2*}, LI Qingfu²

(1. Phase II Project Construction Administration of Zhaokou Yellow River Diversion Irrigation District, Henan Province, Kaifeng 475000, China; 2. School of Hydraulic Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: 【Objective】 Constructing hydraulic engineering projects in tailings of sand mining faces many challenges that are absent in other areas. This paper presents a method to evaluate the risk and feasibility of building farmland irrigation channels in such regions. 【Method】 We consider 13 indicators in the evaluation, including goaf risk, external risk, sand mining area risk and channel internal risk. A three -layer analytic hierarchy process (AHP) method based on cloud model is proposed to calculate the evaluation. The results are compared with those calculated using traditional matter-element risk assessment method. 【Result】 Goaf and sand mining area risks should receive more attention, particularly the time of mining termination and the distance between the mining area and the slope of the channels to be constructed. One-way factor risk assessment shows that the impact of the buried depth of the goaf and the cohesive force of the foundation soil are important factors to be considered. Assessing all risks and having mitigation plans in place is essential before the construction. 【Conclusion】 Compared with traditional methods, the proposed method is more objective, accurate, and applicable. It will play an important role in helping design farmland irrigation canals in or in proximity to tailings of mining.

Key words: “3-scale”; cloud-based AHP; cloud-based matter-elements; farmland irrigation canal; goaf area; sand mining area; risk assessment

责任编辑: 赵宇龙