

基于模糊层次分析法的尾矿库风险评价

权国荣^{1,2}, 孙军刚¹

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安 710100; 2. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054)

摘要: 尾矿库是矿山生产的重要设施, 是矿企修建的环保工程, 但其重力势能较高, 具有溃坝风险, 且尾矿砂含有害元素, 对环境存在较大威胁, 建立尾矿库风险评价体系迫在眉睫^[1-3]。本研究以全国重点地区生态调查为背景, 以河南省洛钼集团某尾矿库为例, 经野外调研结合高分二号(GF-2)遥感影像, 建立了库属性、库环境、地质背景、日常管理 4 层次 16 指标的尾矿库风险评价模型。运用模糊层次分析法, 对不同层次进行权重比较构造判断矩阵, 归一化各指标权重, 并对指标因子的独立性进行一致性检验。将尾矿库风险划分为 4 种等级并计算其得分区间, 求得各区间的隶属度情况, 根据最大隶属度原则, 得到各指标的归一化评价矩阵。根据归一化评价结果计算出该尾矿库最终得分为 75.380, 其风险评价为低风险。

关键词: 尾矿库; 模糊层次分析法; 风险评价; FAHP

中图分类号: P694; X4; TD167 **文献标识码:** A

RISK EVALUATION OF A TAILINGS RESERVOIR USING FUZZY ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

QUAN Guo-rong^{1,2}, SUN Jun-gang¹

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, China;

2. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The tailings reservoir is an important facility of mine production and an environmental protection project built by mining enterprises, but its gravity potential energy is high, and it has the risk of dam break, and the tailings sand contains harmful elements, which is a great threat to the environment, it is urgent to establish the risk evaluation system of tailing reservoir^[1-3]. Based on the background of national ecological investigation in key areas, a tailing pond of Luomu Group in Henan province was taken as an example, the risk assessment model of 4 levels and 16 indexes of reservoir attributes, reservoir environment, geological background and daily management is established. By using fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), the weights of different levels are compared to construct judgment matrix, normalize the weights of each index, and test the independence of index factors. The risk of the tailing reservoir is divided into four grades and the scoring intervals are calculated, and the membership degrees of each interval are obtained. According to the result of normalization evaluation, the final score of the tailings reservoir is 75.380, and it is low risk.

Key words: tailings reservoir; fuzzy analytic hierarchy process; risk evaluation; FAHP

收稿日期: 2023-07-20 改回日期: 2023-10-13

基金项目: “全国重点地区自然资源综合调查工程”下属二级项目“黄河中游(陕西段)自然资源综合调查”(ZD20220123)

1 引言

尾矿库溃坝是国内外矿山易发的重大事故,直接威胁下游居民生命安全和周边环境安全。目前,我国尾矿库总数已超过一万座,发生过的尾矿库事故已达 100 多件^[4]。梅国栋^[5]对我国 2001~2010 年发生的 66 起尾矿库事故进行统计分析,指出溃坝位居尾矿库事故首位。吴宗之^[6]利用鱼刺图分析法对国内外 160 余起尾矿库溃坝成因进行统计分析,提出在设计、施工、维护等环境影响尾矿库安全的若干要素。尾矿库安全问题不容忽视,为此,国内外学者应用不同的方法对尾矿进行风险评价和灾害模拟。Travis Q B^[7]分析了 157 个失效边坡数据库,编译了 301 个安全系数,建立了一个简化因子方差分析模型来预测尾矿库安全情况。Robinson K^[8]、Ormann L^[9]等用有限元法模拟国外某溃坝尾矿库上游尾矿坝的固结行为,为边坡稳定性评价提供依据。我国尾矿库风险评价起源于 20 世纪末,起初是进行定性评价。郑欣在进行溃坝研究时提出了集对分析法;李全明在对尾矿库风险评价中引入了模糊数学理论,开始由定性评价向定量评价过渡。这些评价方法客观上奠定了尾矿库评价体系,取得了一定成果,但其忽视了尾矿库与环境系统的整体性;其次,在评价过程中使用的数据,多为尾矿库设计时的数据,在实地调查中往往并未达到或者已经超过了初期数据。本文选取河南省榆木沟尾矿库,引用层次分析原理和模糊数学中的隶属度概念,构造出风险评价体系,该体系充分考虑了前人研究的影响尾矿库溃坝因子以及尾矿库与库环境的整体性,以 GF-2 遥感影像为依托,对该尾矿库进行量化的因子特征提取,并与现场调查数据相对比,使评价客观真实地反映尾矿库及周围环境的情况^[10]。

2 模糊层次分析法

2.1 方法概述

层次分析法用于将系统内的多种混合要素分层次进行评价,在金融、矿山、军事等领域应用广泛,其优势在于将一个复杂的系统从不同的角度拆解简化为多个一般系统,但对多个一般系统之间的比较不够精细,不能满足定量需求。模糊层次分析法(FAHP)对其进行了改进,引用模糊数学中的隶属度原理可以达到对某个要素的定量评价,其优势在于构造两两判断矩阵时考虑了人的判断的模糊性^[11]。在评价时,尾矿库固有指标如库容、坝高、尾矿库已使用年限、坝址区地震基本烈度等具有定量

数值,但对尾矿库的一些现实危险指标如尾矿坝的状况、尾矿坝观测系统、库区有无影响尾矿库安全的外界人为因素等需要进行专家咨询以确定其数值,但对有些问题进行专家咨询时,专家们往往会给出一些模糊量(例如三值判断:最低可能值、最高可能值、二值区间判断)^[12-13],AHP 对这些要素之间两两比较比较困难,难以满足定量分析需求;其次,尾矿库比较要素较多,一致性检验可能无法通过,这对风险评价结果产生一定影响^[14]。针对这一问题,本研究将模糊数学和层次分析法理论相结合^[15-16],建立了 FAHP 模型和模糊判断矩阵,分别了解各个风险因素对尾矿的影响,得到了风险因素的适当权重。安全作业的重要性为下一步尾矿风险管理提供了理论依据^[17]。在尾矿库风险评价中,一个尾矿库评价模型通常具有 10 余种参数,这就需要对他们进行层次分析,具体步骤如下。

2.2 建立层次结构模型

尾矿库是由于其重要实用价值,一般会修建的庞大且复杂,具有多种类型和不同级别,因此,造成尾矿库危害的原因和程度也不尽相同。据联合国环境规划署(UNEP)统计,边坡稳定性是最常见的溃坝原因,其次是地震影响^[18]。该层次结构模型是在以往尾矿库安全评价报告的基础上^[19],全面收集研究区基础数据,结合尾矿库自身环境风险特征,对相关指标权重进行专家咨询。根据《尾矿库重大危险源识别与分级标准》要求^[20-21],建立目标层、准则层、指标层 3 个层次结构模型^[22],将尾矿库溃坝风险评价指标体系根据事故成因划分为 4 大单元 16 个层次指标,见表 1。

表 1 尾矿库评价层次结构

目标层	准则层	指标层
尾矿库风险评价 A	库属性 B ₁	坝高 C ₁₁
		库容 C ₁₂
		库型 C ₁₃
		级别 C ₁₄
		最小安全超高 C ₁₅
	库环境 B ₂	最大降雨量 C ₂₁
		下游坡度 C ₂₂
		下游曲折度 C ₂₃
		汇水面积 C ₂₄
		距下游村庄距离 C ₂₅
	地质背景 B ₃	基岩岩性 C ₃₁
		地质构造 C ₃₂
		地震烈度 C ₃₃
	日常管理 B ₄	监测系统 C ₄₁
		定期维护 C ₄₂
		子坝复绿 C ₄₃
安全管理 C ₄₄		

2.3 构造判断矩阵

在确定尾矿库风险评价体系中各准则层不同指标的权重时,如果把所有要素放在一起直接打分,往往不容易被人接受,所以根据不同的层次划分,再进行每一个要素的比较来构造判断矩阵^[23]。判断矩阵 A 表示某一层所有指标针对上一层某一个指标相对重要性的比较^[24-25],假定某一层所有指标 a_1, a_2, \dots, a_n 相对于上一层某一指标 B 进行两两比较,则 A 表示为:

A	a_1	a_2	\dots	a_n
a_1	r_{11}	r_{12}	\dots	r_{1n}
a_2	r_{21}	r_{22}	\dots	r_{2n}
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
a_n	r_{n1}	r_{n2}	\dots	r_{nn}

比较结果用 r_{ij} 表示,其含义为指标 a_i 和指标 a_j 相对于指标 B 进行比较时 a_i 和 a_j 具有模糊关系“...比...重要的多”的隶属度,为了定量地表达任何两个指标相对于某准则的相对重要性,使用了 1~9 的定量尺度,如表 2^[26-30]。

表 2 1~9 数量标度

标度	含义
1	两因素相比,两者同等重要
3	两因素相比,前者比后者稍微重要
5	两因素相比,前者比后者明显重要
7	两因素相比,前者比后者强烈重要
9	两因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	相邻判断的中间值

注:若因素 i 与因素 j 的重要性判断标度为 a_{ij} ,则因素 j 与因素 i 的重要性标度 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ 可分别建立目标层-准则层(A-B)、准则层-指标层($B_1-C_{15}, B_2-C_{25}, B_3-C_{33}, B_4-C_{43}$)的判断矩阵。

2.4 归一化指标权重

建立判断矩阵 A 后计算出最大特征向量 λ_{\max} 对应和对应的特征值 W ^[31],将 W 归一化后得到该层各指标相对于上层某一指标相对重要性的权重 W_i ^[32-34]。

2.5 一致性检验

上述构造的比较矩阵 A ,其指标层两两比较时还应考虑一个问题,有的指标层具有较高的相关性^[35],进而影响各评价因子的独立性,这会对排序结果造成影响,因此要进行一致性检验^[36]。步骤如下:

(1) 计算一致性指标 CI

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

(2) 查找随机一致性指标 RI 。参照 Saaty 给出的 RI 值,见表 3。

表 3 随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

(3) 计算一致性比率 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

如果 $CR < 0.1$,则判断矩阵的一致性通过;如果 $CR \geq 0.1$,判断矩阵的一致性必须修改,才能通过一致性检验^[37]。

2.6 构造模糊判断矩阵

模糊层次分析法引入模糊数学中隶属度的原理把定性评价转为定量评价^[38]。综合考虑尾矿库各指标 C ,将尾矿库环境风险划分为不同等级(基本无风险、低风险、中风险、高风险),这些等级构成一个评价集 U ,若对 U 中的任意指标 C 都有一个数 $X(C) \in [0, 1]$ 与之对应,则 X 为 U 的模糊集, $X(C)$ 为指标 C 隶属于评价集 U 的程度。隶属度 $X(C)$ 越接近于 1,表示 C 属于 U 的程度越高;反之,隶属度越接近于 0 表示这种属于程度越低^[39-42]。隶属度值根据不同应用选用不同方法计算,本文采用专家打分的方法进行评估,并归一化得到综合评价矩阵 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 。

2.7 进行模糊综合评价

不同准则层内的归一化指标权重 W_i 组成权向量 ω_i ,利用(3)式求出各准则层的风险指标评价矩阵 B_i ,则目标层尾矿库风险评价矩阵 $B = [B_1, B_2, B_3, B_4, B_5]^T$ 。

$$B_i = \omega_i \times R_i \quad (3)$$

对尾矿库环境风险进行二次模糊评价,利用(4)式可得隶属于不同评价集 U 的归一化得分值。

$$A = WB \quad (4)$$

计算尾矿库风险评价价值。表 4 给出了尾矿库不同风险评价等级对应的评价得分区间, X 表示评论集 U 中每个风险评价对应的向量值。将模糊层次分析结果按照(5)式转换成具体数值。

$$F = AX^T \quad (5)$$

表 4 尾矿库风险评分表

尾矿库风险类别	基本无风险	低风险	中风险	高风险
分数 X	90	75	65	55
得分区间	[80,100]	[70,80]	[60,70]	[50,60]

3 工程实例

3.1 榆木沟尾矿库评价指标提取

本文选取河南省栾川县陶湾镇榆木沟尾矿库为

研究对象,利用高分二号影像(获取时间:2018年2月11日)结合DEM数据,在GIS平台上进行预处理(ENVI、ARCGIS),准则层各指标特征提取如下。

3.1.1 库属性特征

榆木沟尾矿库位于洛阳市栾川县,目前已堆积57级子坝,坝底标高1210 m,总坝高为250 m,现状坝高197.5 m,其中堆积坝高137.6 m,库内纵深长约1.8 km。属于透水堆石坝类型,筑坝方式为上游式,上下游坡比均为1:2^[43]。榆木沟尾矿库总库容为 $4\,266.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,有效库容为 $3\,839.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,为二等库。利用高分二号遥感影像叠加DEM高程数据制作出该尾矿库三维地图模型(图1),尾矿库三面傍山一面建坝,为山谷型尾矿库,汇水面积为 1.054 km^2 ,距离下游村庄约500 m。



图1 榆木沟尾矿库三维立体图

3.1.2 库环境特征

尾矿库地属暖温带大陆季风性气候,降水丰沛,年均降水日数为122 d,年平均降水量1046.9 mm。若尾矿库发生溃坝,尾矿浆会将含有污染元素和一定势能的矿浆爆发并沿低地势的流域迁移,所以要划分出迁移径向和影响面积等。利用DEM高程数据,对榆木沟尾矿库的环境进行模拟,提取出流域信息,并且模拟出河网分级,确定迁移方向。结合坡度图,划分出该尾矿库的风险流域(图2),风险流域总面积为 2.72 km^2 。

下游坡度和下游曲折度也是库环境的重要指标,根据图2所示的流域边界和分级河网,结合GF-2遥感影像,可以判断出倾泻点为集水流域的一级河网与三级河网的交叉点处。曲折度表示下游某一段轮廓线的长度与该段直线距离的比值,量得尾矿库事故池到倾泻点的实地距离,即一段迁移路径的曲线距离为2575 m,直线距离为2172 m,故下游曲折度为 1.18° 。下游的坡度分析可以利用DEM

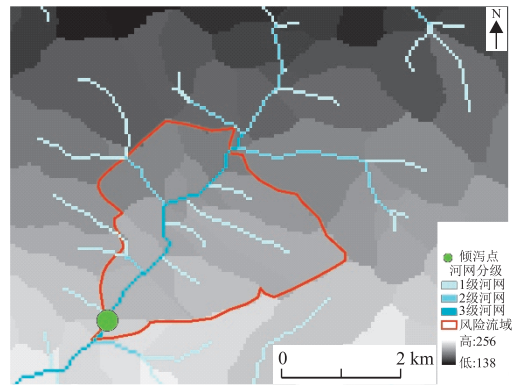


图2 榆木沟尾矿库环境风险流域分析图

高程数据制作的坡度图获得(图3),对迁移路径做100 m的缓冲区,利用GIS工具计算出缓冲区内的平均坡度为 10.28° 。

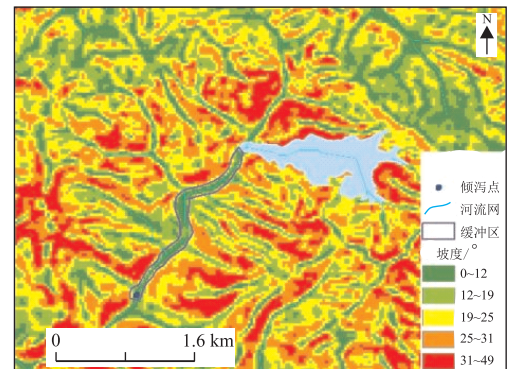


图3 榆木沟尾矿下游坡度分析图

3.1.3 地质背景特征

榆木沟尾矿库位于豫西山地,属秦岭山系东段,为一近NWW向山谷型尾矿库,该尾矿库2007年设计并修建,三面环山,地层分布简单,主要为第四系(图4)。矿区受南北向挤压,地层褶皱和断裂较复杂,位于马超营断裂带附近,由卢氏以东延入本区,东南延向车村断裂。大体以该断裂为界,北部广泛分布熊耳群火山岩,其中眼窑寨东西一线形成熊耳后期的次火山活动带,多项观查研究成果证明,该断裂岸坡稳定,地质条件中等。此区域地壳稳定性属稳定-较稳定区。

3.1.4 日常管理特征

尾矿库排水设施完善,建有溢洪道、截洪沟、排水井,在用为7#框架式排水井,井径7 m,结构状况良好。该尾矿库设计规范,制度完善,各类法规制度落实较好,最近一次安全生产标准化复评完成于2015年9月,保持二级标准等级,最近一次安全现状评价完成于2016年初,并再次延续安全生产许可,库内配套的安全设备齐全完好,工况正常,风险

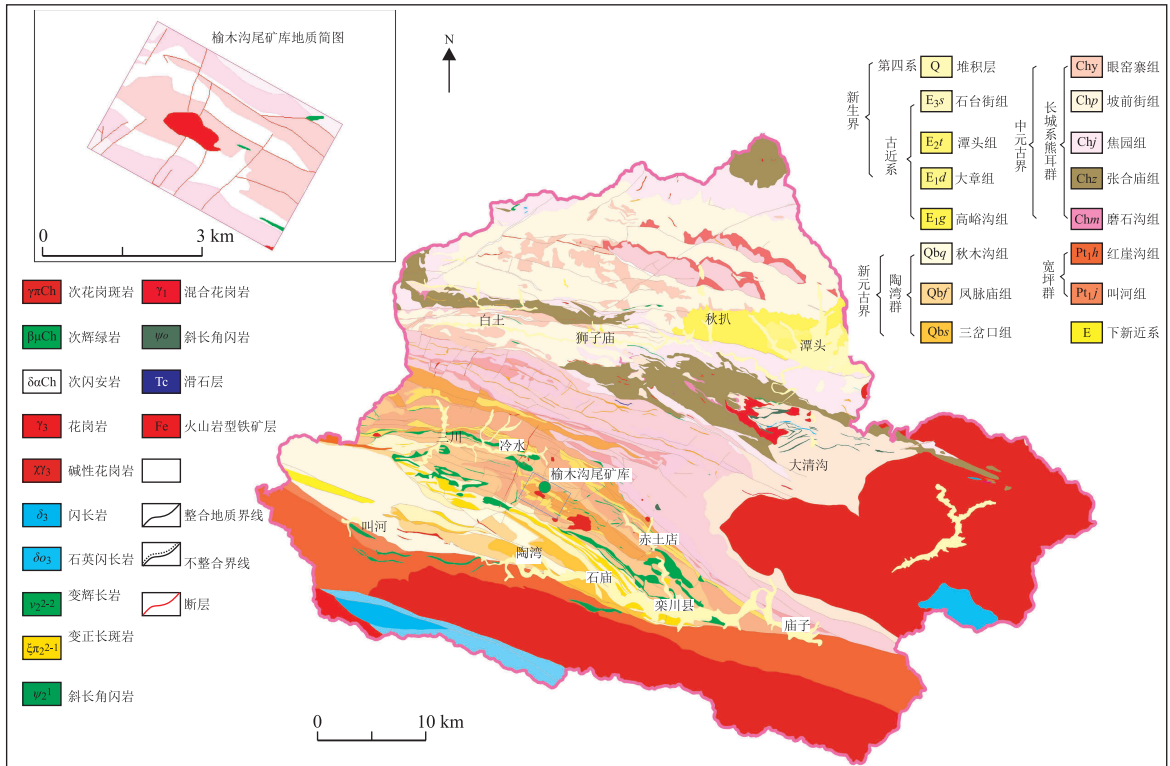


图 4 榆木沟尾矿地质简图

可靠。

3.2 模糊层次分析

根据上述步骤,构造出该尾矿库环境风险评价

模型各层级的判断矩阵。求出每个矩阵的最大特征值 λ_{max} 和特征向量 W_i ^[44],并检查分层单序和一致性。见表 5。

表 5 尾矿库风险评价判断矩阵(A-B)

层次	判断矩阵	W_i	一致性检验
A-B ₄	$ \begin{matrix} & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ \begin{matrix} A \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 2 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & 6 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} $	$ W_{B_1-4} = \begin{pmatrix} 0.283 \\ 0.490 \\ 0.152 \\ 0.075 \end{pmatrix} $	$ \begin{aligned} &\lambda_{max} = 4.010 \\ &CR = 0.004 < 0.1 \\ &\text{通过一致性检验} \end{aligned} $
B ₁ -C ₁₅	$ \begin{matrix} & C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ \begin{matrix} B_1 \\ C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{15} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{6} \\ 2 & 1 & 2 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 2 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} \\ 4 & 2 & 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 6 & 3 & 5 & 2 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} $	$ W_1 = \begin{pmatrix} 0.064 \\ 0.148 \\ 0.101 \\ 0.241 \\ 0.446 \end{pmatrix} $	$ \begin{aligned} &\lambda_{max} = 5.059 \\ &CR = 0.013 < 0.1 \\ &\text{通过一致性检验} \end{aligned} $
B ₂ -C ₂₅	$ \begin{matrix} & C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ \begin{matrix} B_2 \\ C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \\ C_{24} \\ C_{25} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{4} \\ 6 & 2 & 1 & 2 & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} \\ 7 & 4 & 3 & 3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} $	$ W_2 = \begin{pmatrix} 0.051 \\ 0.115 \\ 0.234 \\ 0.132 \\ 0.468 \end{pmatrix} $	$ \begin{aligned} &\lambda_{max} = 5.082 \\ &CR = 0.018 < 0.1 \\ &\text{通过一致性检验} \end{aligned} $

续表 5 尾矿库风险评价判断矩阵(A-B)

层次	判断矩阵	W_i	一致性检验
B_3-C_{33}	$\begin{matrix} B_3 & & C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ C_{31} & & 1 & \frac{1}{3} & 2 \\ C_{32} & & 3 & 1 & 3 \\ C_{33} & & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 \end{matrix}$	$W_3 = \begin{pmatrix} 0.249 \\ 0.594 \\ 0.157 \end{pmatrix}$	$\lambda_{max}=3.0536$ $CR=0.046 < 0.1$ 通过一致性检验
B_4-C_{44}	$\begin{matrix} B_4 & & C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \\ C_{41} & & 1 & 4 & 2 & 3 \\ C_{42} & & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ C_{43} & & \frac{1}{2} & 3 & 1 & 2 \\ C_{44} & & \frac{1}{3} & 2 & \frac{1}{2} & 1 \end{matrix}$	$W_4 = \begin{pmatrix} 0.467 \\ 0.096 \\ 0.277 \\ 0.160 \end{pmatrix}$	$\lambda_{max}=4.031$ $CR=0.011 < 0.1$ 通过一致性检验

3.3 模糊综合评价

对尾矿库风险评价体系中各准则层进行一致性检验后,对最底层指标进行隶属度确定。定量指标隶属度根据尾矿库基本要素以及历史监测数据值相

较评价指标表而得(表 6);定性指标隶属度根据前人研究经验以及专家打分获得^[45]。依据评价指标及 10 位专家打分,可得各指标归一化评价矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 。

表 6 评价指标表

指标	基本无风险	低风险	中等风险	高风险
坝高/m	[0,30]	[30,60]	[60,100]	[100,∞]
库容/ $\times 10^4$ m ³	[0,100]	[100,1 000]	[1 000,10 000]	[10 000,∞]
库型	山谷型	傍山型	平地型	截河型
级别	五级	四级	二级、三级	一级
最大降雨量/mm	[0,100]	[100,300]	[300,1 000]	[1 000,∞]
下游坡度/ $^\circ$	[0,5]	[5,15]	[15,35]	[35,90]
下游曲折度/ $^\circ$	[8,∞]	[5,8]	[3,5]	[1,3]
汇水面积/km ²	[0,60]	[60,150]	[150,1 500]	[1 500,∞]
地震烈度	[0,5]	[6,7]	8	[9,12]
安全管理	有专业人员定期巡视,监测系统完备	管理责任体制未落实,检测设备未维护,不能正常使用	管理责任体制未健全,具有一定的监测设备	缺乏日常排查,没有监测设备

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0.1 & 0.2 & 0.7 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}$$

进行准则层模糊综合评价,根据(3)式可得:

库属性的模糊综合评价结果 $B_1 = \omega_1 \times R_1 = [0.064, 0.148, 0.101, 0.241, 0.446]$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.1 & 0.2 & 0.7 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \end{pmatrix} = [0.150, 0.352, 0.366, 0.132]$$

同理可得:库环境的模糊综合评价结果 $B_2 = [0.051, 0.115, 0.234, 0.132, 0.468]$

$$\begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix} = [0.322, 0.322, 0.244, 0.112]$$

地质背景的模糊综合评价结果 $B_3 = [0.249, 0.594, 0.157]$

$$\begin{pmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \end{pmatrix} = [0.394, 0.522, 0.084, 0.000]$$

日常管理的模糊综合评价结果

$$B_1 = [0.467, 0.096, 0.277, 0.160]$$

$$\begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix} = [0.667, 0.254, 0.063, 0.016]$$

将二级准则层的模糊综合评价结果综合为一级尾矿库风险评价,根据(4)式可得:

一级尾矿库风险评价结果

$$A = WB = W_{B_{1-4}} [B_1, B_2, B_3, B_4]^T$$

$$= [0.283, 0.490, 0.152, 0.075]$$

$$\begin{pmatrix} 0.150 & 0.352 & 0.366 & 0.132 \\ 0.322 & 0.322 & 0.244 & 0.112 \\ 0.394 & 0.522 & 0.084 & 0.000 \\ 0.667 & 0.254 & 0.063 & 0.016 \end{pmatrix}$$

$$= [0.310, 0.356, 0.241, 0.093]$$

根据(5)式得尾矿库风险评价得分值

$$F = [0.310, 0.356, 0.241, 0.093] \begin{pmatrix} 90 \\ 75 \\ 65 \\ 55 \end{pmatrix} = 75.380$$

可见,尾矿库对应于评价集 U {基本无风险、低风险、中风险、高风险} 的隶属度分别为 0.310、0.356、0.241、0.093,根据最大隶属度原则,该尾矿库的风险评价为低风险,其抗灾能力和稳定性较高。

4 结论

以模糊数学理论为基础,采用模糊层次分析法,构建出包含 4 个准则层 16 个指标的尾矿库风险评价体系^[46]。构造判断矩阵,归一化指标权重,并通过一致性检验;根据风险评分表,引入隶属度概念,构造模糊判断矩阵进行环境风险评价。

充分利用遥感影像和 DEM 高程数据,对尾矿库属性和尾矿库环境相关指标进行信息提取,并且和实地调查数据相比对,效果良好。

引入工程实例,以理论模型为基础,结合野外调查信息和收集的相关数据,对各指标进行打分,采用模糊层次分析法进行了环境风险评价,得到风险评价得分值为 75.380,认为该尾矿库的风险评价等级为低风险,该尾矿库运行基本安全。

参考文献

- [1] 吴世龙. 某尾矿库的加高扩容设计研究[D]. 西安建筑科技大学, 2009.
- [2] 杨波. 尾矿库在线安全监测及预警关键技术研究[D]. 中国地质大学, 2012.
- [3] 方雪娟. 基于 RS 和 GIS 的大冶市金属尾矿库环境风险评价研究[D]. 中国地质大学, 2013.
- [4] 张家荣, 刘建林. 中国尾矿库溃坝与泄露事故统计及成因分析[J]. 中国铝业, 2019, 43(4): 10-14.
- [5] 梅国栋, 王云海. 我国尾矿库事故统计分析对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(3): 211-213.
- [6] 吴宗之, 梅国栋. 尾矿库事故统计分析及溃坝成因研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(9): 70-76.
- [7] Travis Q B, Schmeckle M W, Sebert D M. Meta-analysis of 301 slope failure calculations. II: Database analysis [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(5): 453-470.
- [8] Robinson K, Toland G. Case histories of different seepage problems for nine tailings dams [J]. Mine Drainage, 1979, 15(1): 781-780.
- [9] Ormann L, Zardari M A, Mattsson H, et al.. Numerical analysis of strengthening by rockfill embankments on an upstream tailings dam [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(4): 391-339.
- [10] 杨张瑜, 田淑芳, 魏萌, 等. 基于模糊层次分析法的尾矿库环境风险评价研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(9): 16-21.
- [11] 王冷. 基于 Vague 集的层次分析方法及其在应用[D]. 海南师范大学, 2011.
- [12] 王哲. 基于模糊层次分析法的桥梁技术状况评估[J]. 交通科技, 2016, 42(5): 68-71.
- [13] 谢隆. 天威秦皇岛变压器油箱制造基地建设项目综合评价[D]. 华北电力大学, 2014.
- [14] 焦春明. 群组评价一致性的提升机制研究[D]. 浙江工商大学, 2018.
- [15] 赵建平, 汪永超, 殷国富, 等. 基于模糊层次分析法的切削液选择[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014, 56(7): 19-22.
- [16] 刘志. 模糊层次分析法在电视剧评价中的应用[J]. 安徽广播电视大学学报, 2014, 16(2): 57-60.
- [17] 衡家然, 王洁, 宋祖光, 等. FAHP 法在某尾矿库风险管理中的应用[J]. 现代矿业, 2016, 32(8): 197-199+259.
- [18] 李元奇, 曹磊芳. 尾矿库边坡失稳原因及处理措施[J]. 东北水利水电, 2019, 37(8): 23-24+29.
- [19] 马敏. 尾矿库安全评价指标体系及安全评价信息管理系统[D]. 山东科技大学, 2008.
- [20] 钱仕龙, 张紫微, 王火荣, 等. 化工企业重大危险源定量风险评价研究进展[J]. 山东化工, 2013, 42(12): 69-71+77.
- [21] 李爽. 尾矿库数字化环境应急管理体系研究[D]. 东北师范大学, 2014.
- [22] 古洁. 烟草工业建筑可持续性评价系统研究[D]. 西安建筑科技大学, 2014.
- [23] 覃柏英. FAHP 的标度系统与排序方法研究[D]. 广西大学, 2005.
- [24] 孙晓东, 孙璞, 高林. 需要层次理论视域下中学生健身锻炼能力评价指标体系构建及权重系数确定研究[J]. 哈尔滨体育学院学报, 2022, 40(3): 27-33.
- [25] 喻方元, 毛高波. 教师教学质量测评的模糊综合评价模型[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2006, 20(2): 73-78.

- [26] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2):80-88.
- [27] 王嘉炜. 基于模糊层次分析法的种粮机具选型管理[J]. 价值工程, 2012, 31(4):66-67.
- [28] 李海华, 赵红泽, 李海强. 基于模糊层次分析法的煤矿工程评标指标权重确定[J]. 煤炭技术, 2013, 32(2):54-56.
- [29] 田宇航. 都市地铁车站施工风险防控与对策[D]. 重庆交通大学, 2015.
- [30] 余德钊, 袁华东, 刘卫东, 等. 实现指标相关性解耦的售电市场过渡期风险指标评估及权重确定[J]. 现代电力, 2018, 35(2):1-7.
- [31] 钟宁轲. AHP 评价法在市政工程项目招标评标中的应用研究[D]. 四川师范大学, 2014.
- [32] 周曦. P2P 网络借贷平台风险控制研究[D]. 湖南大学, 2015.
- [33] 代转, 罗周全, 秦亚光, 等. 地下金属矿山广义安全管理模型构建及评价[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(6):920-930.
- [34] 赵伟, 李哲, 史海锋, 等. 基于层次分析法的浙江电网雷击跳闸孕灾环境敏感性评估[J]. 高电压技术, 2017, 43(2):619-626.
- [35] 邢如飞. 乘用车操纵稳定性主观评价方法研究[D]. 吉林大学, 2010.
- [36] 李娟. F-AHP 方法在工业企业信用评估中的研究[D]. 湖南大学, 2010.
- [37] 唐浩, 吕中奇, 杨军民, 等. 豫西传统古村落——石碑凹村旅游资源评价研究[J]. 林业调查规划, 2018, 43(6):117-121+152.
- [38] 陶林利, 黄建标. 基于 AHP-模糊综合评价的郴州市电商物流服务质量研究[J]. 物流工程与管理, 2020, 42(2):60-62+79.
- [39] 贺正楚, 吴艳. 高等教育产业的敏捷性评价[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2011, 25(2):46-51.
- [40] 张荣雨. 基于安全监测的海塘综合评判隶属度和权值的研究[D]. 上海交通大学, 2008.
- [41] 宋复亮. 模糊信息评测的数据挖掘研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2011, (6):39-41.
- [42] 张静. 模糊数学在学习结果综合评价中的运用[J]. 中国中医药现代远程教育, 2012, 10(18):70-71.
- [43] 禹金惠. 在线监测技术在尖山铁矿尾矿库的应用[J]. 矿业装备, 2014, (6):114-115.
- [44] 马敏. 尾矿库安全评价指标体系及安全评价信息管理系统[D]. 山东科技大学, 2008.
- [45] 李玉涵. 尾矿库安全评价的模糊层次分析法[J]. 现代矿业, 2017, 33(5):209-211.
- [46] 陈虎, 张宏威. 军队干部选拔的决策方法[J]. 信息系统工程, 2010, (9):135-137.

作者简介: 权国荣(1994—),男,西安矿产资源调查中心助理工程师,长安大学在职硕士研究生,研究方向为资源与环境。
E-mail:gtyzqgr@163.com