文章编号：1000－7598－(2008) 08－2087－05

尾矿库环境影响指标体系及评价方法及其应用

冀红娟[1]，杨春和[1, 2]，张 超[2]，谢 婷[3]

（1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室，重庆 400044；2. 中国科学院岩土力学研究所，武汉 430071；
3. 北京工商大学 化学与环境工程学院，北京 100037）

摘 要：考虑到尾矿库事故对地质环境、自然环境和生态环境的破坏，建立了尾矿库环境影响评价指标体系，采用模糊综合层次分析模型对银山尾矿库进行了环境影响评价。该模型采用反映主观判断的模糊性和不确定性的模糊数据来构造判断矩阵，降低了专家的主观影响；采用多因素加权模型法来分层次计算评价的最终结果，并依据评价标准得出最后银山尾矿库对环境的影响程度为轻度影响。

关 键 词：尾矿库；环境影响评价；指标体系；模糊层次综合分析法

中图分类号：TD 311 **文献标识码：**A

Index system of environmental impact of tailings pond and application of assessment approach

JI Hong-juan[1], YANG Chun-he[1, 2], ZHANG Chao[2], XIE Ting[3]

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. School of Chemical & Environmental Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China)

Abstract: Tailings pond's accidences can bring in destroy on geological environment, natural environment and ecological environment. So an environment assessment index system of tailings pond is set up, and using fuzzy analytical hierarchy apprehensive model to appraise impacts of tailings pond on environment. In this model, the judgment matrix is constructed with fuzzy data so as to show the fuzziness and uncertainty of subjective judgment. So the influence of certain experts biased scoring might be reduced moderately. And multi-factor weighted model is adopted to calculate the last results. According to assessment standard environmental impact degree gained is slight influence.

Key words: tailings pond; environmental impact assessment; index system; fuzzy analytical hierarchy apprehensive process

1 引 言

我国共有尾矿库 7 610 个，正常运行的只占 40 %。尾矿的成分复杂，不但含有各种有毒成分，且在加工的过程中有硫化物、氯化物、氰化物等选矿药剂残存于尾矿中。如果尾矿库一旦发生溃坝、裂缝和沉陷、滑坡和渗漏等事故，就会造成对周围土壤、水系等生态系统的污染，因此有必要对尾矿库引起的事故危害进行环境评价预测。目前国外对尾矿坝的研究主要集中于坝体安全及环境两个方面，特别是环境污染和环境保护[1]。我国对尾矿库的环境方面关注比较少，尤其是对尾矿库环境的定量评价，刘宏宇等[2]对湖南郴州铅锌矿在 1985 年发生的尾矿库溃坝事故中重金属对土壤和农作物的影响进行了环境分析研究；康明雄等[3]利用磷矿尾矿库暴雨溃坝中尾矿的渗漏量对环境影响风险进行了评价；陈庆等[4]利用模糊数学理论对尾矿库环境质量进行了定性和定量评价，均对尾矿库的环境影响作了定性和定量的分析研究，本文旨在尾矿库对环境的综合影响进行分析评价。

尾矿库对环境的影响可以分为地质环境、自然环境和生态环境的破坏三个方面。利用模糊层次分

收稿日期：2007-12-26
作者简介：冀红娟，女，1981 年生，硕士研究生，主要从事安全技术及工程方面的研究。E-mail: jlqjhj@126.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

析法对这几方面进行定量地评价，可以更客观地评价预测尾矿库对环境的影响程度，再根据评价结果可以有效地采取各种预防和应急措施。

2 尾矿库模糊层次综合分析方法

2.1 尾矿库环境影响评价指标体系的建立

尾矿库事故环境影响评价指标体系的建立是以对尾矿库引起的环境安全综合分析为依据的，通过分析尾矿库环境影响，作出明确的判断，由此形成层次明确的指标体系，分层次评价指标体系见表 1。体系共分为 3 个层次，即目标层、准则层和指标层。

表 1 尾矿库环境影响评价指标体系

Table 1 Index system for environmental safety of tailings dam

目标层	准则层	指标层
尾矿库环境影响评价指标 A	地质环境破坏 B_1	改变地形、地表破坏 C_1 滑坡、泥石流 C_2
	环境污染指标 B_2	水体（源）污染 C_3 重金属离子污染 C_4 土壤污染 C_5 空气污染 C_6
	生态环境破坏指标 B_3	生物种类和数量减少 C_7 植被破坏 C_8 影响人们的健康和生命 C_9

2.2 模糊层次综合评价模型

考虑到尾矿库工程对环境造成的负效应，本次对负效应的研究、相关数据的积累及治理经验进行环境风险预测。尾矿库环境影响评价的实质是考虑各个影响因素对尾矿库周边环境安全的综合影响，在综合各个因素对环境的综合影响时还应正确地完成不同因素的影响“权重”和不同因素的“综合汇总”两项工作。本文采用的尾矿库事故环境影响评价方法是模糊综合层次分析法，即权衡各种因素项目，给出一个总概括式的优劣评价结果。综合评判原本是多目标决策问题的一个数学模型，而各个目标的权重用层次分析法确定。

2.2.1 评价的数学模型

模糊评判的数学模型有多因素线性加权模型[5]和多因素模糊综合评判模型。本文采用多因素线性加权模型中的二级模型，根据系统所划分的 3 个层次，具体如下：

（1）评判因子为 B_1、B_2、B_3，记作集合 X_1、X_2、X_3，其中 $X_1=\{x_1, x_2\}$；$X_2=\{x_3, x_4, x_5, x_6\}$；$X_3=\{x_7, x_8, x_9\}$。

（2）分别对 X_1、X_2、X_3 按一级模型进行评判，记作集合 $Y=\{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}$，$X_1$ 中各因素的权重归一化为 $P_1=\{p_1, p_2\}$；X_2 中各元素的权重归一化为 $P_2=\{p_3, p_4, p_5, p_6\}$；$X_3$ 中各因素的权重归一化为 $P_3=\{p_7, p_8, p_9\}$。确定评价因子 $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9)$ 的评价值记为 f_i，则 X_1、X_2、X_3 的综合评价值 W_1、W_2、W_3 分别为

$$\left.\begin{aligned} W_1 &= p_1 f_1 + p_2 f_2; \\ W_2 &= p_3 f_3 + p_4 f_4 + p_5 f_5 + p_6 f_6; \\ W_3 &= p_7 f_7 + p_8 f_8 + p_9 f_9 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

（3）将 X_1、X_2、X_3 作为元素看待，其对应的权重分配为 $\{p_1^*, p_2^*, p_3^*\}$，得到第二级综合评价值：

$$W = W_1 p_1^* + W_2 p_2^* + W_3 p_3^* \quad (2)$$

2.2.2 模糊层次分析法中权重的确定方法

进行尾矿库环境影响评价时，指标权重的确定是至关重要的，权重的细微差别将对整个评价结果产生较大的影响，不合理的权重会导致评价结果的不准确，甚至产生错误的评价结果，因此作为评价的一个重要环节，指标的确定具有重要意义，本文采用层次分析法来确定指标的权重。层次分析法[5]是美国运算学家兹堡大学萨蒂于 20 世纪 70 年代提出来的一种新的定性分析与定量分析相结合的决策方法，它先把复杂问题分解成各个组成因素，并将各组成因素按支配关系分组，形成递阶层次结构；再通过两两比较的方式确定各层次中诸因子的相对重要性，然后由综合决策者判断，确定决策方案相对重要性的总排序。它是分析复杂问题的一种简便方法，特别适用于那些难于完全用定量进行分析的复杂问题。层次分析法在尾矿库环境评价中的具体应用如下：（1）划分层次结构。构造出层次分明的结构。（2）构造判断矩阵。判断矩阵表示同一层次中各个因素对于上一层某个因素的重要程度。按照 1~9 标度的方法对同一层元素重要性程度进行赋值，见表 2。

表 2 标度的含义[6]

Table 2 Meanings of scales

标度	含义
1	表示两元素相比具有同等重要性
3	表示两元素相比前者比后者稍重要
5	表示两元素相比前者比后者明显重要
7	表示两元素相比前者比后者强烈重要
9	表示两元素相比前者比后者极端重要

注：2，4，6，8 表示上述相邻判断的中间值，如果重要性颠倒则用标度的倒数表示。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计算每一个判断矩阵的最大特征值对应的特征向量后将特征向量归一化，然后利用方根法计算特征向量（权重）。

特征向量的求法：

将判断矩阵每一行相乘并开 n 次方根得

$$\boldsymbol{\alpha}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} b_{ij}} \qquad (3)$$

式中：b_{ij} 为判断矩阵中元素的值，对任意的 i，$j=1, 2, \cdots, n$；$\boldsymbol{\alpha}_i$ 为特征矩阵的横向量。

对 $\boldsymbol{\alpha}=(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n)^{\mathrm{T}}$ 向量进行归一化处理，即

$$w_i = \boldsymbol{\alpha}_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{\alpha}_i, \quad (i=1, 2, \cdots, n) \qquad (4)$$

则向量 $\boldsymbol{W}=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^{\mathrm{T}}$，即为所求得的特征向量。

计算判断矩阵的最大特征值：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{RW})_i}{w_i} \qquad (5)$$

式中：$\boldsymbol{R}$ 为判断矩阵；$(\boldsymbol{RW})_i$ 为矩阵 $\boldsymbol{RW}$ 的第 i 个分量，对任意的 $i=1, 2, \cdots, n$。

进行一致性检验[7]指标为

一致性指标：　$CI = \dfrac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$　（6）

一致性比率：　$CR = \dfrac{CI}{RI}$　（7）

式中：RI 为随机一致性指标均值，见表 3。

通常用 CR 作为检验一致性的判别式，若 $CR<0.1$，则认为得到的特征向量即为指标的权重。

表 3　*RI* 值

Table 3　Values of *RI*

阶数	1	2	3	4
RI	0	0	0.51	0.89

2.3　评价指标受影响程度的等级划分及评价标准

2.3.1　评价指标的等级划分

为了确定对环境产生不利的影响及其影响程度的大小，将影响程度划分为 5 级：严重影响、中度影响、轻度影响、微弱影响、没有影响，见表 4。评估中影响大小的程度可按影响程度以低、中、高排序，这是一种主观性的排序。认为较小的或无关紧要的影响可能是不重要的，而较大的或灾难性的影响将是重要的，而且这种影响包括影响环境的地理范围、持续时间和频度及不利环境影响的可逆性等。

①严重影响：导致系统内环境资源的巨大损失和长期的损害，其替代、恢复与重建困难，并且代价很大，需要长期缓慢的过程才能实现。

②中度影响：引起系统内环境资源的较大损失和较长期的损害，其替代、恢复与重建是可能的，但较困难，需要较长的时间。

③轻度影响：将引起系统内环境资源的轻度损失和暂时的损害，其恢复可用天然或人工的方法在短时间内实现。

④微弱影响：将引起系统内环境资源的微弱损失和短暂的损害，系统能自动调节和补偿，并且可在短期内迅速恢复。

⑤没有影响：对环境资源不产生任何的损失和损害。

表 4　影响程度等级量化表

Table 4　Quantization table of impact level

等级	严重影响	中度影响	轻度影响	微弱影响	没有影响
5 分制	4	3	2	1	0

2.3.2　评价标准

评价结果采用模糊等级分类的方法，若评价结果 $W\in[0, 1]$，微弱影响；$W\in[1, 2]$，轻度影响；$W\in[2, 3]$，中度影响；$W\in[3, 4]$，严重影响；$W=0$，表示尾矿库事故对环境没有影响。

3　银山尾矿库环境状况分析及评价方法的应用

3.1　银山尾矿库概况

银山尾矿库位于江西省上饶地区德兴市以东，且选厂西北面 100 m 处的狭长的山谷中。尾矿库下游连接矿山生产和生活区，距离德兴市区约 1.4 km 乐安河流经距矿区西北面 7 km 的香屯，汇入鄱阳湖，与长江相通。库区属于亚热带湿润气候，雨量充沛。年平均降雨量为 1 900~2 000 mm，降水最多达到 2 533 mm（1973 年），全年降雨量分配在 3~6 月 4 个月中，占全年降雨量的 50 %~60 %。梅雨为本区的主要降雨类型。尾矿库的主坝建在千枚岩上，千枚岩属于坚硬岩，有利于坝体的稳定。尾矿坝两侧的坝肩岩石完整，构造简单，没有较大规模的断裂带和破碎带，坝下的基岩较完整，节理裂隙不发育，不存在大的断裂构造。岩石坚硬，含少量风化裂隙水，透水性差，赋水性弱。库区汇水面积小，地下水主要受大气降水的补给，水量供给有限。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

铅锌矿选矿厂尾矿成分为：方铅石为 0.15 %，闪矿石为 0.12 %，黄铁矿占 3.53 %，毒砂占 0.12 %，黄铜占 0.05 %，矿脉石占 96.03 %，其中脉石各矿物的相对含量为 41.49 %，绢云母占 34.3 %，碳酸盐矿物占 14.75 %，其他矿物占 5.4 %。富金铜矿尾矿成分：Cu 占 0.037 %，S 占 0.64 %，Fe 占 1.76 %，Ca 占 0.204 %，Mg 占 0.204 %，SiO_2 占 69.43 %，Al_2O_3 占 13.395 %，Au 占 0.065 %，Ag 占 2.425 %。

3.2 尾矿库环境状况分析

银山尾矿库的基本环境情况如下：

（1）尾矿的物化性质

铅锌选矿厂尾矿的粒度以 $d_{cp}=0.008$ mm 为主；富金铜矿选矿厂的粒度以 $d_{cp}=0.057$ mm 为主。库区属于亚热带湿润季风气候，全年的降雨量一般集中在 3~6 月 4 个月中，占全年降水量的 50 %~60 %，无雨季节空气干燥，受季节风的影响，尾矿会被吹起形成尾矿砂，空气中粉尘含量增加，在风力作用下，尾砂污染范围扩大，扬尘直接影响周边环境，进而影响土壤、水和农产品的质量。

（2）尾矿库事故情况及重金属污染分析

银山尾矿库容纳铅锌矿和富金铜矿选矿厂的尾砂，其中含有铅、镉、汞、砷、铬等重金属。通过调查可知，银山尾矿库的 7 号子坝和 8 号子坝以及 8 号子坝平台上部的斜坡部分均出现不同程度的沼泽化，或是渗透溢出现象。通过对尾矿库的事故调查，了解到 1962 年 7 月 2 日因洪水漫坝而溃坝。1989 年以前，无论是主坝还是 3 号副坝的尾矿堆积坝，浸润线溢出的子坝坡脚，到处可见砂沸（即小管涌）现象，渗流水携带的尾砂，使排水明沟淤满失效，其中情况最严重的是 8 号子坝，不仅在坡脚浸润线溢出带有成串的砂沸，且汛期在坝体西端与山体连接部还出现直径数十厘米的管涌，1 号子坝、7 号子坝及 3 号副坝也有类似现象，只是程度上轻于 3 号子坝。这些病害不但会造成一定程度的土壤污染甚至破坏植被，而且因为尾矿库的下游连接生产和生活区，威胁下游人们的安全和健康生活。

（3）尾矿库地质破坏的分析

矿区地貌因受主要构造线控制，山脉呈北东—西南向长条展布。坝肩、坝底和库区主要分布绢云母千枚岩和火山碎屑岩、熔岩，岩石坚硬，一般可以认为坝区和库区地质条件简单，发生滑坡、泥石流和大规模渗漏等不良工程地质现象的可能性很小。

3.3 评价系统的层次划分

尾矿库的环境影响评价是一个复杂的决策系统。根据层次分析方法的基本原理，可以划分为以下 3 个层次，见表 1。

（1）目标层（A）：把银山尾矿库对环境质量的影响程度作为评价的目标。

（2）准则层（B）：把影响尾矿库环境的因素分为 3 个主要方面：地质环境破坏 B_1、环境污染指标 B_2、生态环境破坏指标 B_3。

（3）指标层（C）：将准则层继续进一步细化分为若干具体评价指标。地质环境破坏：改变地形、地表破坏 C_1 和滑坡、泥石流 C_2；环境污染指标：水体（源）污染 C_3、重金属离子污染 C_4、土壤污染 C_5、空气污染 C_6；生态环境破坏指标：生物种类和数量减少 C_7、植被破坏 C_8、影响人们的健康和生命 C_9。

3.4 构造判断矩阵并计算指标的权重

根据尾矿库现有的资料和事故备案以及现场对环境的实地调查试验，结合专家的意见，按照表 3 的标准对判断矩阵进行赋值。由此可得 4 个判断矩阵，见表 5~8。

表 5 $A-B$ 判断矩阵

Table 5 $A-B$ judgment matrix

A	B_1	B_2	B_3
B_1	1	1/9	1/7
B_2	9	1	1/3
B_3	7	3	1

表 6 B_1-C 判断矩阵

Table 6 B_1-C judgment matrix

B_1	C_1	C_2
C_1	1	2
C_2	1/2	1

表 7 B_2-C 判断矩阵

Table 7 B_2-C judgment matrix

B_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_3	1	2	2	2
C_4	1/2	1	1	1
C_5	1/2	1	1	1
C_6	1/2	1	1	1

表 8 B_3-C 判断矩阵

Table 8 B_3-C judgment matrix

B_3	C_7	C_8	C_9
C_7	1	1/7	2
C_8	7	1	9
C_9	1/2	1/9	1

按照式（5）~（7）计算每一个判断矩阵的最大特征值对应的特征向量，然后将特征向量归一化，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

再利用式（8）和式（9）对特征向量进行一致性检验，确定满足要求后，将各指标的权重填入表 9。

表 9　尾矿库环境安全评价指标体系

Table 9　Index system to environmental safety of tailings

目标层	准则层权重	指标层权重
银山尾矿库环境影响评价指标 A	B_1 : 0.176	C_1 : 0.667 C_2 : 0.333
	B_2 : 0.487	C_3 : 0.4 C_4 : 0.2 C_5 : 0.2 C_6 : 0.2
	B_3 : 0.337	C_7 : 0.131 C_8 : 0.791 C_9 : 0.178

3.5　评价因子评分值的确定方法

评价因子（C）的分值按照表 4 的标准进行打分。一般采用专家评价法，专家在进行评价是应该充分考虑尾矿的成分和性质以及导致事故发生的各个条件。

3.6　评价结果

利用式（1）~（3）计算可得：$W_1 = 2.5\times0.667+3\times0.333 = 2.666\,5$，$W_2 = 2.7\times0.4+2.59\times0.2+3.5\times0.2+2\times0.2 = 2.698$，$W_3 = 4.2\times0.131+2.7\times0.791+1\times0.178 = 2.863\,9$。再由式（4）得，$W = 2.666\,5\times0.176 + 2.698\times0.487 + 2.863\,9\times0.337 = 2.748$。

将 W 的值按照评价标准（2.3.2）进行对照，说明银山尾矿库对环境有轻度影响，即引起系统内环境资源的轻度损失和暂时的损害，其恢复可用天然或人工的方法在短时间内能实现。

4　结　论

通过以上对尾矿库环境危险分析评价可以得出如下的结论：

（1）在对尾矿库引起的环境安全综合分析的基础上，建立了尾矿库事故环境影响评价的理论方法与指标体系。

（2）以系统科学的观点，探索尾矿库系统对周围环境的影响。并利用模糊层次综合分析方法对尾矿库环境影响进行了评价。

（3）本文所建立的评价指标体系应用于银山尾矿库的环境评价，得出的环境影响评价结果为轻度影响。

（4）本评价指标体系还可以分为更多层次，如可以将水源的下级指标分为 pH 值和重金属的含量等，使得评价结果更为准确。

参 考 文 献

[1] 蒋卫东，李夕兵，张虹. 国外尾矿坝安全与环境研究综述[J]. 中国钨业，2003，18（3）：40－43.
JIANG Wei-dong, LI Xi-bing, ZHANG Hong. Review of safety and environment of tailings dam abroad[J]. **China Tungsten Industry**, 2003, 18(3): 40－43.

[2] HONGYU Liu, ANNE Probst. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill(Hunan, China)[J]. **Science of the Total Environment**, 2005, 339: 153－166.

[3] 康明雄，刘大银，毕亚凡，等. 磷矿尾矿库暴雨溃坝环境风险分析[J]. 武汉工程大学学报，2007，29（1）：42－44.
KANG Ming-xiong, LIU Da-yin, BI Ya-fan. Environment risk analysis of dam debacle in phosphorite tailing pond in rainstorm[J]. **Journal of Wuhan Institute of Technology**, 2007, 29(1): 42－44.

[4] 陈庆，谢振华，金龙哲. 基于模糊数学理论的尾矿库环境质量综合评价[J]. 工业安全与环保，2006，32（1）：39－41.
CHEN Qing, XIE Zhen-hua, JIN Long-zhe. Synthetic assessment on environment quality of tailing pond based on fuzzy mathematics[J]. **Industrial Safety and Environmental Protection**, 2006, 32(1): 39－41.

[5] 关福来，梁群. 应用层次分析法确定朝阳气候资源开发优先级[J]. 气象，1997，23（9）：35－38.
GUAN Fu-lai, LIANG Qun. Appling analytical hierarchy process to determine the priority degrees of exploiting climatic resources on Chaoyang city[J]. **Meteorological Monthly**, 1997, 23(9): 35－38.

[6] 袁运祥，袁运鸿. 三峡工程对环境与生态影响的综合评价方法[J]. 深圳大学学报（理工版），1994，11（3）：74－84.
YUAN Yun-xiang, YUAN Yun-hong. A comprehensive method for evaluating the impact of the Three Gorges project on environment and ecology[J]. **Journal of Shenzhen University**(Science & Engineering), 1994, 11(3): 74－84.

[7] 陆慧. 农村户用沼气对环境影响的主表体系与评价[J]. 太阳能学报，2007，28（3）：340－344.
LU Hui. Index system to environmental impact of family-used and appraising in the countryside[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**, 2007, 28(3): 340－344.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net