

# 尾矿库溃坝危险性评价方法探讨

——以武宣县三里振祈锰矿尾矿库为例

殷宪太, 欧孝夺, 侯福昌, 廖有芳

(广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

**摘要:**尾矿库作为一个重大危险源,其溃坝后的危险性分析是复杂的。为了给尾矿库防灾减灾和保护下游居民生命财产等方面提供较准确的理论依据,采用泥石流危险范围预测模型,以武宣县三里振祈锰矿尾矿库为例,通过泥石流危险度判定、滑坡工程量估算和溃坝影响范围计算,对尾矿库溃坝引发的泥石流问题进行危险性评价和危险范围预测。结果表明,该尾矿库溃坝引发泥石流的危险性为轻度危险,一次泥石流危险范围预测结果为安全,泥石流最大危险范围情况下尾矿库溃坝对下游居民房屋及道路等均会造成威胁,预测结果应用效果良好。

**关键词:**尾矿库;溃坝;防灾减灾;危险性评价;危险范围

中图分类号:TD926.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)02-0025-05

## Study on Risk Evaluation Method for Dam Collapse of Lagoon: A Case Study on Lagoon of Sanlizhenqi Mn Mine in Wuxuan County

YIN Xiantai, OU Xiaoduo, HOU Fuchang, LIAO Youfang

(Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry Education,  
Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

**Abstract:** As a major source of hazard, the risk analysis after dam collapse of lagoon is complicated. In order to provide a theoretical basis for the disaster prevention and reduction and protect the lives and properties of residents at downstream water, a forecast model of hazard range of debris flow was employed to make a risk evaluation and hazard range prediction of debris flow caused by dam collapse of lagoon taking the lagoon of Sanlizhenqi Mn Mine in Wuxuan County as an example with the study of debris flow risk determination, landslide volume estimation and the calculation of extent affected by dam collapse. The results showed that the hazard scale for the debris flow caused by the dam collapse of lagoon was mild and the range predicted for a debris flow hazardous zone was safe. The dam collapse of lagoon under the greatest hazardous range of debris flow will impose a threat to residents and road at downstream water. Hence, the application of prediction results is of good effect.

**Key words:** lagoon; dam collapse; disaster prevention and reduction; risk evaluation; range of hazard

目前,关于尾矿库的研究主要集中在尾矿库安全现状评价、溃坝风险分析、溃坝致灾机理研究、矿山尾矿胶结及尾矿库坝体稳定性分析等方面,而对尾矿库溃坝后危险范围预测的研究却很少涉及。陈青生等<sup>[1]</sup>就矿山尾矿库溃坝后砂流对坝下的影响提出了一种数学模型预测方法,袁兵等<sup>[2]</sup>根据多个大坝的实际溃坝资料建立了尾矿溃坝的数学模型并提出了预测方法,郭朝阳等<sup>[3]</sup>采用工程类比法得出尾矿库溃坝所形成泥石

收稿日期:2010-11-28

基金项目:广西自然科学基金重点项目(2010GXNSFD013002);工程防灾与结构安全教育部重点实验室基金项目(2009TMZR005);广西省自然科学基金项目(桂科自0991056)。

作者简介:殷宪太(1985—),男,山东滕州人,硕士研究生,主要从事尾矿库稳定性方面的研究。

E-mail: yinyuan5566@126.com.

欧孝夺(1970—),男,广西来宾人,博士,教授,主要从事环境岩土工程、地下结构、尾矿坝稳定危险性评价等方面的研究。E-mail: ouxiaoduo@163.com.

流的数学模型。由于尾矿库通常位于江、湖、水源地的上游，下游分布有村镇、工厂、农田、交通设施等，尾矿库溃坝事故将直接威胁下游居民生命财产安全和造成环境污染。本文从泥石流危险度判定、滑坡工程量估算和溃坝影响范围计算等方面入手，开展尾矿库溃坝危险范围评价工作。

## 1 尾矿库溃坝危险性评价方法评述

### 1.1 尾矿库溃坝评价方法

陈青生等<sup>[1]</sup>、袁兵等<sup>[2]</sup>所建立的数学模型是把尾矿库溃坝引起的滑坡、泥石流等土体流动假定为一种介于“流体”和“散粒体”之间的特殊运动形式，用类似于流体流动的动力方程和连续方程来描述，具有一定的效果。但尾矿库一般多位于地形条件复杂的山区，采用上述模型在边界条件界定及参数取值方面则较难把握，郭朝阳等<sup>[3]</sup>根据工程类比所建立的数学模型，在泥石流冲击范围和破坏能力方面取得了一定的进展。

### 1.2 尾矿库及溃坝特点分析

尾矿库是用于贮存金属、非金属矿山进行矿石筛选后排出的尾矿或其他工业废渣的场所，尾矿库有山谷型、傍山型、平地型，由初期坝、后期堆积坝和排洪系统组成。尾矿坝不同于水库大坝，水库大坝是一次建成的挡水蓄水坝体，而尾矿坝一般是拦渣透水坝，坝体由初期坝和后期堆积坝组成，影响尾矿坝安全稳定的主要因素是尾矿堆积坝的下游坡比、干滩长度、浸润线高低和尾矿的物理力学性质等。据不完全统计，目前全国有尾矿库 12 600 多座，且随着国民经济的发展，采矿能力的提高，尾矿砂排放量日益增多，许多尾矿库处于高位运营状态，各类矿山中处于险、病、超期服务状态的尾矿库占较高比例，有的行业甚至达到了 40%。

尾矿库溃坝是一个非常短暂的过程，溃坝瞬间尾矿砂携同尾矿水大量下泄，形成具有很强破坏性的泥石流，波及范围广，速度快，将会给下游居民生命财产安全带来严重损害，并造成环境污染。

据统计，70% 以上的尾矿库溃坝伴生泥石流或泥浆流灾害，通常尾矿坝高度大，存放的尾矿砂多且饱水，形成大规模泥石流灾害的可能性较大。目前，针对泥石流危险范围的预测研究已比较成熟，尤其针对我国泥石流高发区域——西南地区的理论研究成果，运用于我国该山区暴雨泥石流沟谷和有可能发生暴雨泥石流沟谷的危险性评估，判定结果的可靠度（准确率）约 90%<sup>[4]</sup>。因此，本文借鉴刘希林等<sup>[4]</sup>所建立的泥石流危险范围预测模型，通过泥石流危险度判定、滑坡工程量估算和溃坝影响范围计算，对我国尾矿库溃坝引发的泥石流问题进行危险性评价和危险范围预测，其预测结果具有可比性。

## 2 尾矿库溃坝危险性评价方法探讨

### 2.1 尾矿库溃坝引发泥石流危险度判定

对泥石流的形成、发展、运动和堆积的影响因素很多，根据评价地区泥石流发生和活动特点，选取 10 项危险因子对其进行危险度判定，计算公式为：

$$R_d = 0.2353 G_{L_1} + 0.2353 G_{L_2} + 0.1176 G_{S_1} + 0.0882 G_{S_2} + 0.0735 G_{S_3} + 0.1029 G_{S_6} + 0.0147 G_{S_7} + 0.0588 G_{S_9} + 0.0441 G_{S_{10}} + 0.0294 G_{S_{14}}$$

式中： $L_1$  为一次泥石流（可能）最大冲出量， $\times 10^4 \text{ m}^3$ ； $L_2$  为泥石流发生频率； $S_1$  为流域面积， $\text{km}^2$ ； $S_2$  为主沟长度， $\text{km}$ ； $S_3$  为流域最大相对高差， $\text{km}$ ； $S_6$  为流域切割密度， $\text{km}/\text{km}^2$ ； $S_7$  为主沟床弯曲系数； $S_9$  为泥砂补给段长度比； $S_{10}$  为 24 h 最大降雨量， $\text{mm}$ ； $S_{14}$  为流域内人口密度， $\text{人}/\text{km}^2$ 。计算时，查表可得相应的危险因子等级赋值  $GL_1, GL_2, \dots$ 。

通过野外调查和室内计算，获得泥石流危险度，然后根据泥石流危险度确定分级标准，对该地区尾矿库溃坝引发泥石流的危险性进行评价。

### 2.2 滑坡工程量估算

根据实际工程资料，选取多个尾矿库坝体典型剖面，利用 Geo-Studio 软件 Slope/W 边坡分析模块对尾矿库坝体进行静力稳定分析，取安全系数较小的两个滑动面之间的土体来估算滑动体土方量  $V$ 。由于西南地区雨水丰沛，年降水量大，有可能诱使坝体二次滑坡或多次滑坡，造成更大的灾害。因此，需根据休止角来计算该滑动土体的可能最大土方量  $V'$ ，与  $V$  比较，取两者之间的大者作为滑动体土方量。同时考虑该地区 24 h 最大洪水总量  $W_{24h}$ ，对可能发生泥石流的松散物质补给，取其与滑动体土方量之和作为滑动体最后土方量  $V''$ 。

### 2.3 溃坝影响范围评估

本文所研究尾矿库地处我国西南地区,与刘希林等<sup>[4]</sup>研究的泥石流地域相一致,且尾矿砂的物理性质与该地域土质相近,故采用刘希林等<sup>[4]</sup>所建立的泥石流危险范围预测模型对我国尾矿库溃坝影响范围进行评估。

#### 2.3.1 一次泥石流危险范围预测模型

刘希林等<sup>[4]</sup>所建立的一次泥石流危险范围预测模型为:

$$a=38.41(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{2/3},$$

$$l=8.71(V \cdot G \cdot r_c / \ln r_c)^{1/3},$$

$$d=0.017[V \cdot r_c / (G^2 \cdot \ln r_c)]^{1/3}.$$

式中: $V$ 为一次松散物质(可能)最大补给量, $m^3$ ;  $G$ 为堆积区纵比降; $r_c$ 为泥石流(可能)最大重度, $g/cm^3$ ;  $l$ 为一次泥石流最大堆积长度, $m$ ;  $d$ 为一次泥石流最大堆积厚度, $m$ ;  $a$ 为一次泥石流危险范围, $m^2$ 。

上述泥石流危险范围中的尾矿库溃坝方量是根据经验公式计算的,但实际情况非常复杂,溃坝发生后水窝中水的运动会夹带一些尾矿砂等物质,因此松散物质的估算应当加上可能被夹带的那部分物质。由于目前没有相关理论计算尾矿库中水的运动带走固态物质的量,考虑不利情况,故在计算中采用试算的方式对不同溃坝方量下的危险范围进行估算。

根据一次泥石流危险范围平面形态的判定准则,确定其危险范围平面形态,结合试算结果,可作出一次泥石流危险范围平面预测图。

#### 2.3.2 泥石流最大危险范围的预测模型

泥石流的发生往往伴随有暴雨等,恶劣的天气条件有可能触发二次泥石流甚至更多次泥石流,因此需对其最大危险范围进行预测,刘希林等<sup>[4]</sup>所建立的泥石流最大危险范围预测模型为:

$$S=0.6667L \cdot B-0.0833B^2 \cdot \sin R / (1-\cos R),$$

$$L=0.8061+0.00154A+0.000033W,$$

$$B=0.5452+0.0034D+0.000031W,$$

$$R=47.8296-1.3085D+8.8876H.$$

式中: $S$ 为泥石流最大危险范围, $km^2$ ;  $L$ 为泥石流最大堆积长度, $km$ ;  $B$ 为泥石流最大堆积宽度, $km$ ;  $R$ 为泥石流堆积幅角, $(^\circ)$ ;  $A$ 为流域面积, $km^2$ ;  $W$ 为松散固体物质储量, $\times 10^4 m^3$ ;  $D$ 为主沟长度, $km$ ;  $H$ 为流域最大相对高差, $km$ 。

通过野外调查和室内计算,可作出泥石流最大危险范围平面预测图。

## 3 三里振祈锰矿尾矿库溃坝危险性评价

### 3.1 尾矿库概况

武宣县三里振祈锰矿尾矿库,该矿区属低山丘陵地貌,谷底高程102~120 m之间,地形坡度较陡,沟谷多成“V”型,库区总集雨面积0.54  $km^2$ ,谷底自然坡降在10%~20%之间,两翼山体为北高南低,自然坡度一般为5°~10°左右。库区设计库容66.4万  $m^3$ ,主坝、副坝均属碾压式土石坝,其中主坝高20 m,坝顶宽16 m,坝顶标高130 m,坝内坡坡比约1:1.5,坝外坡坡比为1:1.7;副坝高8 m,坝顶宽10 m,坝内外坡坡比均为1:1.5。

### 3.2 计算结果

通过野外调查和室内工作,该矿区泥石流基础资料如表1、表2所示。

由表1、表2可得该矿区

泥石流危险度为 $R_d=0.297$ ;根据泥石流危险区划分级标准,可知该矿区尾矿库溃坝引发泥石流的危险性为轻度危险,区域泥石流危险等级为V级。

根据一次泥石流危险范围平面形态的判定准则:当 $\gamma_c > 1.8 g/cm^3$ ,且 $G > 0.0875$ 时,危险范围平面形态为椭圆形;不同的溃坝方量,一次泥石流危险范围试算结果如表3所示。泥石流最大危险范围计算结果

表1 泥石流危险度基础资料表

Tab.1 Basic data of debris flow hazard

危险因子	$L_1 /$ ( $\times 10^4 m^3$ )	$L_2$	$S_1 /$ $km^2$	$S_2 /$ $km$	$S_3 /$ $km$	$S_6 /$ ( $km/km^2$ )	$S_7$	$S_9$	$S_{10} /$ $mm$	$S_{14} /$ ( $人/km^2$ )
实测值	19.3	0	0.54	0.636	0.073	6.1	1.23	0.24	290	0

为: $L=0.809\text{ km}$ , $B=0.549\text{ km}$ , $R=47.6^\circ$ , $S=0.303\text{ km}^2$ 。据此,可作出一次泥石流危险范围平面预测图和泥石流最大危险范围平面预测图,分别如图 1、图 2 所示。

如图 1 所示, A,B,C,D,E 共 5 曲线为不同的溃坝方量所对应的尾矿库溃坝危险范围,均不会对下游的房屋和道路造成威胁;在最大危险范围情况下(图 2),溃坝尾矿砂所形成泥石流的堆积幅角为  $47.6^\circ$ ,最大堆积长度为  $809\text{ m}$ ,最大堆积宽度为  $549\text{ m}$ ,影响范围达  $0.303\text{ km}^2$ ,将会对下游居民的生命财产及交通设施构成威胁,并会破坏大量农田和造成环境污染。

表 2 泥石流危险范围基础资料表

Tab. 2 The scope of the basic data of debris flow hazard

影响因子	$V / (\times 10^4 \text{ m}^3)$	$r_c / (\text{g/cm}^3)$	$G$	$A / \text{km}^2$	$W / (\times 10^4 \text{ m}^3)$	$D / \text{km}$	$H / \text{km}$
实测值	33.2	1.90	0.176	0.54	66.4	0.636	0.073

表 3 尾矿库不同溃坝方量影响范围试算结果表

Tab. 3 Different amount of tailings dam side the scope of the results spreadsheet

编号	$V / (\times 10^4 \text{ m}^3)$	堆积面积/ $\text{m}^2$	最大堆积长度/ $\text{m}$	最大堆积厚度/ $\text{m}$
A	33.2	119 181.3	485.18	5.38
B	40	135 011.6	516.39	5.73
C	50	156 667.1	556.27	6.17
D	60	176 915.2	591.12	6.56
E	70	196 063.3	622.29	6.90

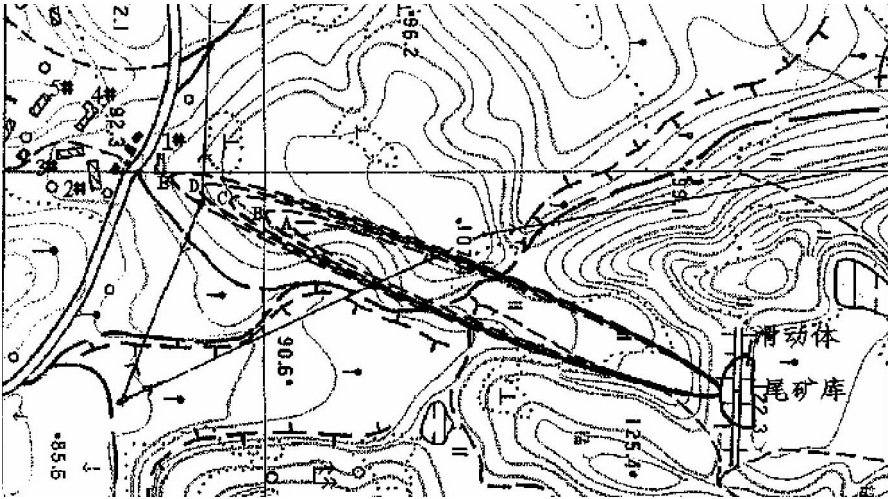


图 1 一次泥石流危险范围预测图

Fig. 1 A range of debris flow hazard prediction map

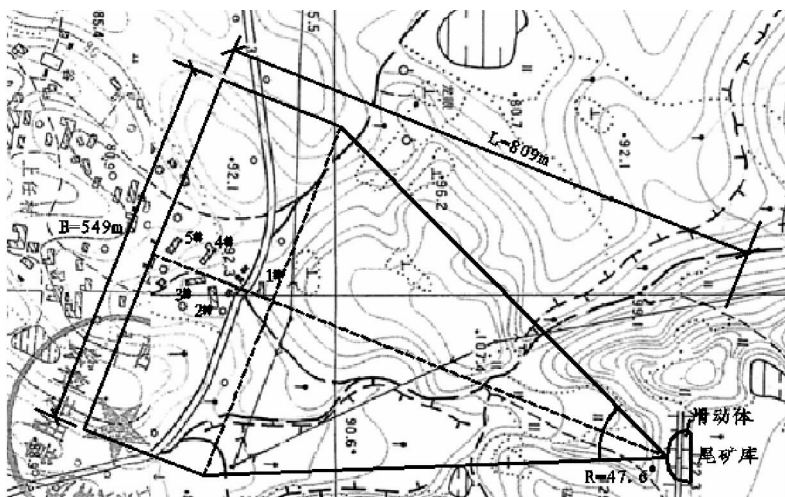


图 2 泥石流最大危险范围预测图

Fig. 2 The maximum range of debris flow hazard prediction map

## 4 结论

尾矿库溃坝的原因是多方面的,比如无沉积滩、坝前积水、无正规设计及无排渗设施等,溃坝后的危险性大,目前针对溃坝后危险范围的研究成果相对较少,理论尚未完善,需要进一步开展研究。

借鉴刘希林等人<sup>[4]</sup>泥石流方面的相关成果,从泥石流危险度判定、滑坡工程量估算和溃坝影响范围计算等方面入手以获得尾矿库溃坝危险性评价方法,得到以下结论。

1)该矿区泥石流危险度  $R_d$  为 0.297,尾矿库溃坝引发泥石流的危险性为轻度危险,区域泥石流危险等级为 V 级。

2)不同的溃坝方量,一次泥石流危险范围的计算结果表明,其对下游房屋和道路不会造成威胁;恶劣环境条件下尾矿库溃坝引发的泥石流,其影响范围显著增大,将会对下游居民的生命财产及交通设施等构成威胁。

3)本案例泥石流危险范围预测结果与该地域泥石流沟道形态调查相一致,分析应用效果良好,可为该地域泥石流沟道的预防与治理提供较准确的理论依据。

### 参考文献:

- [1]陈青生,孙建华. 矿山尾矿库溃坝砂流的计算模拟[J]. 河海大学学报,1995,23(5):99-105.  
CHEN Qingsheng, SUN Jianhua. Calculation of tailings flow due to dam break[J]. Journal of Hehai University, 1995, 23(5):99-105.
- [2]袁兵,王飞跃,金永健,等. 尾矿坝溃坝模型研究及应用[J]. 中国安全科学学报,2008,18(4):169-172.  
YUAN Bing, WANG Feiyue, JIN Yongjian, et al. Study on the model for tailing dam breaking and its application[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(4):169-172.
- [3]郭朝阳,唐治亚. 尾矿库溃坝模型探讨[J]. 中国安全生产科学技术,2010,6(1):63-67.  
GUO Chaoyang, TANG Zhiya. Study on the tailings dam-break model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(1):63-67.
- [4]刘希林,唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [5]崔学奇,胡木刚,葛会超,等. 复合胶凝材料在矿山尾矿胶结中的应用研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2007,26(1):49-52.  
CUI Xueqi, HU Shugang, GE Huichao, et al. Study on application of compound binding materials in cementation of mine tailings[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 26(1):49-52.
- [6]欧孝夺,樊克世,饶平平. 基于 Geo—Slope 的拜尔法干式赤泥场稳定性分析[J]. 金属矿山,2009(7):115-118.  
OU Xiaoduo, FAN Keshi, RAO Pingping. Geo-Slope-based analysis for the dump stability of dry red mud from bayer process [J]. Metal Mine, 2009(7):115-118.
- [7]李云,李君. 溃坝模型研究综述[J]. 水科学进展,2009,20(2):304-310.  
LI Yun, LI Jun. Review of experimental study on dam-break[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2):304-310.
- [8]郑欣,许开立,魏勇. 尾矿坝溃坝致灾机理研究[J]. 中国安全生产科学技术,2008,4(5):8-12.  
ZHENG Xin, XU Kaili, WEI Yong. Study on the disaster-causing mechanism of the tailings dam failing[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008, 4(5):8-12.
- [9]王立辉,胡四一. 溃坝问题研究综述[J]. 水利水电科技进展,2007,27(1):80-85.  
WANG Lihui, HU Siyi. Study on dam failure-related problems[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(1):80-85.
- [10]王又武,袁平,陈珂佳. 尾矿库溃坝有关问题探讨[J]. 工程建设,2009,41(5):35-41.  
WANG Youwu, YUAN Ping, CHEN Kejia. Discussion on related problems of tailing dam break[J]. Engineering Construction, 2009, 41(5):35-41.
- [11]陈明全,周广柱,李寅明,等. 尾矿库土壤-植物系统中的重金属赋存规律[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(3):64-68.  
CHEN Mingquan, ZHOU Guangzhu, LI Yinming, et al. Heavy metal distribution in soil-plant system in tailing dam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(3):64-68.