

袁华山, 张明慧, 陶霞, 等. 尾矿库环境事故因素分析及建议 [J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(3): 1026-1033.

YUAN H S, ZHANG M H, TAO X, et al. Factors analysis and suggestions on environmental accident of tailings ponds [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(3): 1026-1033.

## 尾矿库环境事故因素分析及建议

袁华山<sup>1</sup>, 张明慧<sup>2\*</sup>, 陶霞<sup>3</sup>, 王宏洋<sup>2</sup>, 赵鑫<sup>4</sup>, 张国宁<sup>5</sup>, 江梅<sup>5</sup>

1. 北京市密云区生态环境局

2. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院

3. 湖南省水处理过程与装备工程技术研究中心, 中机国际工程设计研究院有限责任公司

4. 生态环境部机动车排污监控中心, 中国环境科学研究院

5. 生态环境部环境标准研究所, 中国环境科学研究院

**摘要** 基于我国尾矿库环境风险特征, 分析近年来尾矿库环境事故原因, 并针对环境事故发生后的应急处理及环境次生灾害应急处理展开讨论。针对我国尾矿资源存量、类型多, 资源综合利用率较低以及矿山企业生产管理不高的实际问题, 提出建议: 一是要实现尾矿资源的综合利用, 达到减量减排的目的; 二是要对尾矿库采取系统性的污染治理, 特别是针对因不可抗拒因素而引起的环境污染问题; 三是要加强安全管理, 减少溃坝等安全风险, 从源头降低安全事故次生环境污染风险。

**关键词** 尾矿库; 尾矿; 环境风险; 应急处置

中图分类号: X507 文章编号: 1674-991X(2024)03-1026-08 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20230764

## Factors analysis and suggestions on environmental accident of tailings ponds

YUAN Huashan<sup>1</sup>, ZHANG Minghui<sup>2\*</sup>, TAO Xia<sup>3</sup>, WANG Hongyang<sup>2</sup>, ZHAO Xin<sup>4</sup>,  
ZHANG Guoning<sup>5</sup>, JIANG Mei<sup>5</sup>

1. Beijing Miyun District Ecology and Environment Bureau

2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3. Hunan Water Treatment Process and Equipment Engineering Technology Research Center, China Machinery International Engineering Design and Research Institute Co., Ltd.

4. Vehicle Emission Control Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

5. Institute of Environmental Standards, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

**Abstract** Based on the environmental risk characteristics of tailings ponds in China, the causes of environmental accidents in recent years were analyzed, and the emergency treatment after environmental accidents and environmental secondary disasters were discussed. In view of the practical problems of China's large stock and diverse types of tailings resources, low comprehensive utilization rate, and the low production management level of mining enterprises in China, some suggestions were put forward. The first is to achieve the comprehensive utilization of tailings resources and achieve the purpose of reducing emissions. The second is to take systematic pollution control for the tailings ponds, especially for the environmental pollution caused by irresistible factors. The third is to strengthen safety management, reduce safety risks such as dam break, and reduce secondary environmental pollution risks from the source of safety accidents.

**Key words** tailings pond; tailings; environmental risk; emergency response

作为矿山选矿厂的一项关键生产设施, 尾矿库同时也是一种具有高势能、高危害性的危险源与环境风险源<sup>[1-2]</sup>。我国尾矿库种类复杂、规模小、数量多、分布广<sup>[3]</sup>, 且多居于山区和水源上游, 各种自然、

人为的不利因素时刻威胁着尾矿库的安全, 同时也对周边环境安全构成严重威胁。尾矿主要贮存于尾矿库, 由于尾矿的成分复杂, 常含有有毒有害物, 如重金属和化学药品<sup>[4]</sup>, 且大多数都是重大危险源, 一

收稿日期: 2023-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3205600)

作者简介: 袁华山(1979—), 男, 工程师, 主要研究方向为环境污染与防治, 13621348777@139.com

\* 责任作者: 张明慧(1983—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事环境管理、水环境标准监测方法制定、污染控制技术研究, yuansuming@126.com

巨尾矿库发生泄漏等事故,造成的损失和危害巨大。2019年1月,巴西 Brumadinho 淡水谷发生大规模溃坝事故,已是三年内发生的第二次事故,直接和间接经济损失达 70 亿美元<sup>[5]</sup>。2020年5月,美国密歇根州中部泰塔巴瓦希河上的伊登维尔坝和桑福德坝相继溃坝,导致经济损失约 2.45 亿美元<sup>[6]</sup>。2001—2020年,在我国范围内,共有 90 多起尾矿库事件,包括 8 起重大事件<sup>[7]</sup>。因此,针对尾矿库不仅要开展日常预防,更应该从源头降低安全事故,减少环境污染风险。

## 1 尾矿库环境风险分析

我国是尾矿库大国,现有各类大小尾矿库近 8 000 万座,安全及环境风险高,监管难度大<sup>[8]</sup>。尾矿料的成分含量极其复杂,不但含有各种金属元素、还含有大量的选矿药剂残留(如氰化物、氯化物、硫化物)、药剂分解产生的有毒物质及放射性元素等。如果出现了渗漏、溃坝、坝体失稳、洪水漫顶等事故,会对周围地表水、地下水和土壤造成严重污染<sup>[9]</sup>。含硫尾矿废水酸性较强,排入环境会降低周围水体 pH,还会强化尾矿中有毒物质析出,通常酸性废水对环境的危害极大;重金属尾矿排放到周边环境后,其累积、迁移等行为不但会对周边生态安全造成潜在风险,还会对动植物的发育和生长产生不良影响<sup>[10]</sup>;含放射性元素的尾矿排入周围环境,会造成放射性污染,甚至会通过富集进入食物链,危害人类的身体健康<sup>[11]</sup>。

据统计,我国尾矿库 90% 以上采用上游式筑坝方法<sup>[12]</sup>,其筑坝方式是子坝中心线位置不断向上游方向升高,特点是工艺简单、管理方便、成本较低,但渗透性差、浸润线较高、稳定性差,抗地震液化能力较弱,不适宜在地震烈度较高的地区应用。我国多数尾矿库位于敏感区(如野生动物保护区、人口集中地区、饮用水生态保护区)的上游,因距离敏感区很近,对人民群众的生命财产安全和当地的生态环境构成了极大的威胁<sup>[13]</sup>。如湖南一些尾矿库下游 10 km 以内存在集中水源地;甘肃一些尾矿库位于村庄上游,距离村庄很近,是一种典型的沟谷型尾矿库。

## 2 尾矿库环境事故原因及分析

### 2.1 环境事故统计

20 世纪初,我国主要依靠开发矿产资源来保障现代化建设需要,矿产资源蓬勃发展。随着矿业的迅速发展,全国尾矿库数量急剧增加,从 2003 年的 780 座增加到 2009 年的 12 655 座,2009 年之后则呈

递减趋势<sup>[14]</sup>(图 1)。随着尾矿库数量的迅速增加,尾矿库事故数量也在逐渐增加。2008 年山西省临汾市襄汾县新塔矿业有限公司 980 沟尾矿库发生溃坝事故,造成 277 人死亡、4 人失踪,直接经济损失 9 619.2 万元,2008 年全国尾矿库事故总数达到峰值<sup>[15]</sup>。

2002—2020 年,我国共发生尾矿库事故 96 起,事故总数和死亡人数从 2003 年开始呈明显上升趋势,2009 年之后下降,到 2013 年大幅降低<sup>[16]</sup>(图 1)。主要原因:一是政府高度重视,加强了尾矿库风险监督和管理,有效防范尾矿库安全风险。二是政府有关部门颁布并印发了一系列尾矿库安全风险防控相关政策,基本建立了“企业—地方政府—监管部门—第三方机构”的安全风险防范化解责任体系,形成了较为完善的应急管理制度体系。

### 2.2 环境事故原因

尾矿库事故按照事故类型划分为渗漏、溃坝、洪水漫顶、大坝失稳和排涝系统破坏 5 种,其事故发生占比分别为 18%、56%、6%、16%、4%<sup>[17]</sup>。溃坝事故占比最高,同时事故的风险也最大。统计资料表明,5 类事故的形成原因并非完全独立,而是互有联系,并且溃坝事故形成的原因更为多样化<sup>[18]</sup>。此外洪水漫顶事故、排水系统破损事故及尾矿库蓄水量超标事故如果没有及时得到妥善处理,也可能会发展成溃坝事故。通过对 2001—2020 年我国几个典型尾矿库的溃坝致灾原因分析,发现渗透性溃决率导致事故占比为 50.72%,地震灾害为 5.80%,淹没为 34.78%,大坝失稳为 8.70%。由此可得,坝体的溃堤主要由漫溢和渗蚀引起的<sup>[19]</sup>。

通过对国内外大量尾矿库事故的调查和分析,得出了水是导致尾矿库环境污染的主要因素<sup>[20]</sup>。尾矿库既是贮存尾砂,也是贮水的结构体,有水的存在,使得尾矿库的地理特征问题更为复杂。研究表明<sup>[21]</sup>,尾矿坝填料种类和物理力学特性,包括坝体参数(如坝高、干滩长度、坝内外坡比)、水库位置和浸润线深度、地震活动等,都会对大坝的稳定性产生重要影响。除了初坝的基本特征和子坝外坡比随设计而定外,其他要素均为动态变化特征,且都与水相关。首先,尾矿坝的成分含量、干滩坡降受尾矿浆的占比、流量及颗粒大小等因素的影响,且不同砂带分布的砂层物性也各不相同。其次,水库水位随天气潮湿、大坝抬升、矿浆释放等因素发生涨落,进而对坝体浸润线和坝体物质的物理学特性产生影响,引起坝体的变形甚至不稳定;地下水位以下的尾粉土和饱和尾砂在地震时容易发生液化,引起坝体的不

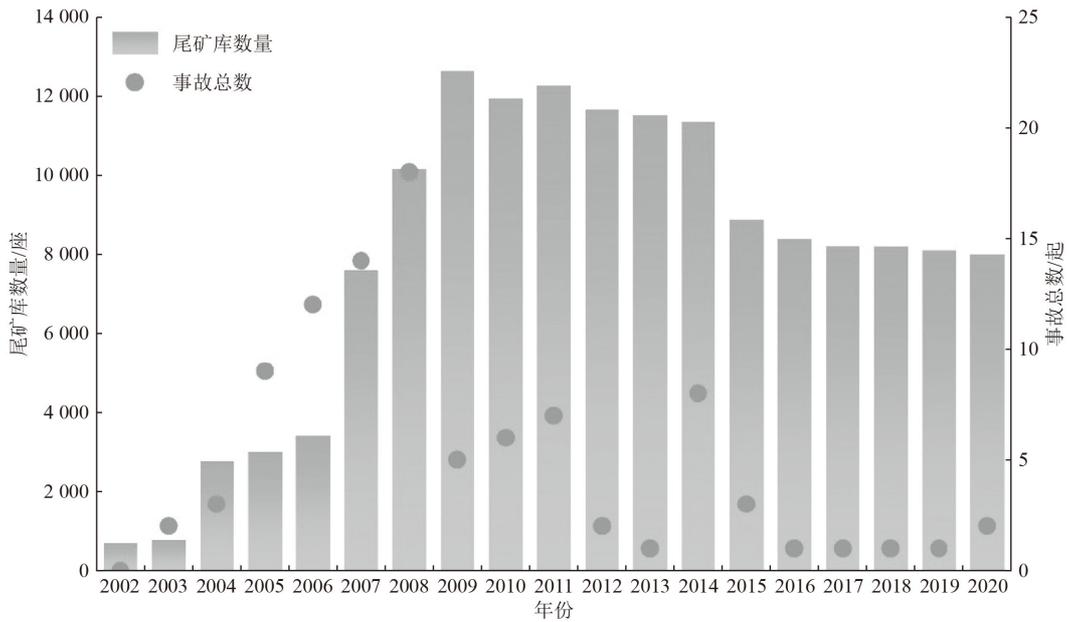


图 1 2002—2020 年我国尾矿库数量和事故数统计

Fig.1 Statistics on the number of tailings ponds and accidents in China from 2002 to 2020

稳定。

### 2.3 环境事故诱发因素

#### 2.3.1 自然因素

降水、地震是导致尾矿库安全性下降的关键原因。降水的渗透、洗刷和浸没作用于尾矿库，雨强愈大，历时愈久，对尾矿库的影响愈大，若发生洪灾，将对尾矿库的安全构成更大的威胁。国内多数尾矿坝为上游式筑坝，而其抗震性能较差，这也导致了尾矿库的安全隐患增大。

#### 2.3.2 人为因素

选址不合理，设计施工、生产运行不规范，排水、排洪系统失能等人为因素是导致重大生产安全事故的隐患。我国有一大批建于 20 世纪 60—70 年代的尾矿库，因为那时还没有正式的尾矿库设计标准，所以在设计上存在很多问题，如排水、排洪系统缺陷，尾矿库选址布局不合理等，导致尾矿库一旦突发事故，会对人民的生命安全、当地的生态环境造成极大的危害。

#### 2.3.3 管理因素

尾矿库的公司法人是预防环境危害的主要责任人，生产的监督管理部门是各级生态环境保护和安全生产控制部门，公司与有关政府部门之间的合作，能够对各类安全事件和环境污染案件进行有效的管理，因此尾矿库的管理因素不容忽视。

尾矿库的有害因素之间相互影响和相互作用，任何一个风险因素都会引起其他因素的连锁效应。因此，对存在隐患进行细致的、综合的判断，以便采

取行之有效的防范和管控手段，防止尾矿库出现意外，对于尾矿库的平稳运转和安全具有重要意义<sup>[22]</sup>。按照全生命周期的思路，从设计施工、运行、排洪等设备故障、维护管理、外界环境因素(降水和地震等)几个方面，结合已发生的环境事故案例，系统分析尾矿库突发环境事故的原因及危害控制策略如表 1 所示。

## 3 应急处置技术

### 3.1 尾矿库突发环境事件应急技术

一次大的事故背后有诸多轻伤隐患和大量的微小隐患，尾矿库的危害事件并非突发事件，往往是由潜在危险逐步发展和扩展而引起的。因此事前预防是代价最小、成效最大的风险防控措施<sup>[23]</sup>。梳理了典型尾矿库突发环境事件清单如表 2 所示。分析尾矿库环境风险隐患发现，设计施工造成的隐患在使用初期不易显现，属于很难补救的重大隐患，对这种隐患应从严监管，从源头杜绝其形成事故<sup>[24]</sup>。而生产运行、排洪等设备故障、维护管理或外界环境因素造成的隐患容易通过检查发现，便于及时处理解决。

#### 3.1.1 事故隐患防范措施

(1)生产运行引起的事故隐患。已建的尾矿坝多为上游式筑坝，针对这种筑坝方式，提出了在坝前均匀放置矿体，保持坝体的均布抬升，以防止沿岸坡、细粒尾砂或扇形破碎向一侧集中堆积等问题，从而避免了滩面沿岸坡的形成。放矿口位置和距离、

表1 尾矿库可能造成突发环境事故的隐患及控制策略

Table 1 Potential hazards that may cause sudden environmental accidents and the control strategy in tailings ponds

类型	隐患	危害及控制策略
设计施工	选址不当,包括位于敏感区域上游且靠近敏感区域(如野生动物保护区、人口发达地区、饮用水生态保护点),位于有开采价值的矿床上,处于不良地质现象严重的区域等	事故危害极大,按照管理规定进行改造,甚至闭矿,并且严格做好闭矿后的风险防控措施
	设计缺陷,包括设计洪水标准偏低,基础水文地质资料不准确,没有按照设计规范要求进行设计(如坝坡过陡、沉积滩过短、不设防洪设施、不设置反滤层、不设排水楼台等)	坝体稳定性变差,按照管理规定进行改造,甚至闭矿
	施工缺陷,包括筑坝材料不合格,基线清基不彻底,坝基、埋管与坝体结合处等处理不合格,表层雨水输送等设施的施工质量不合格,土工布(薄膜)铺设与搭接不良或接头不良,边坡未进行喷浆等	坝体稳定性变差,按照管理规定进行改造,甚至闭矿
运行	放矿作业不合规,包括超量、超速堆矿,未经设计的尾矿、废物或废水进入仓库,多种性质不同的尾矿不合规混合排放,冬季未采取冰下放矿作业,上游坝前不均匀放矿,长时间不调换放矿点,尾矿直接冲击坝体等	坝体稳定性变差,按照设计及运行要求进行整改,坝体出现浸润线过高、裂缝等稳定性问题的须及时维护解决
	筑坝作业不合规,包括每期子坝筑坝不进行质量检查,坝体达到设定高度不进行稳定性分析,不按设计施工(如坝外坡比陡于设计值、安全超高不足、沉积干滩长度不够、不进行岸坡处理、堆石坝外坡上覆土及植物没有达到设计要求),下游坝面坡度不合规,水边坡与坝轴线不平行,不设水位控制设施等	
	巡坝作业不合规,包括未按要求检查坝体及各设施,未按要求检查库区,未按要求检查周边山体	全面系统进行检查、评估,一旦发现异常情况,立即采取处理措施,避免灾害发生。后续严格按照要求开展巡坝作业
维护管理	坝体维护作业不合规,包括乱采、滥挖和非法爆破,坝体出现冲沟、裂缝、管涌、流土、变形等,坝体浸润线过高,坝外坡不维修,回水直接浸润坝体,雨水冲刷坝面、坝肩,汛期前后未进行检查维护等。为了提高水库的调蓄能力,一味地追求还水质量,导致水库调洪量减少	坝体稳定性变差,及时采取处理措施,避免灾害发生
	监测作业不合规,包括未按要求监测内外部坝体水平和垂直位移、浸润线、水库位置、安全高度、雨水含量、干滩长度、地下监测点水质等	全面系统进行监测、评估,一旦发现异常情况,立即采取处理措施,避免灾害发生。后续严格按照要求开展监测
	尾矿库安全管理体系不完善,责任落实不到位	建立健全尾矿库安全机制、责任追究机制。从制度上防范尾矿库事故发生
防排洪、排水、排渗等设施故障	相关设施(主要有排水井、排水斜槽、排水管、排水隧洞、截水沟等)进水口严重堵塞、倾斜或坍塌,基础沉降错位致使漏沙严重,出现裂缝、腐蚀或磨损等	溃坝事故发生概率很大,立即采取处理措施,避免灾害发生
外界环境因素	降水、地震、泥石流、上游水库或尾矿库溃坝等	预防为主,设计阶段充分考虑自然因素对尾矿库的影响,日常加强巡查应对

同时开放的数量、旋流器的使用数量、进料的时间、移动间隔时长和距离,都要按照设计和工作安排来运转,以减少生产运行存在的安全隐患。

(2)排洪等设备故障引起的事故隐患。尾矿库正常工况下,出现的输送系统泄漏及排水、排洪系统堵塞或损坏,须及时组织专业人员进行抢修、加固与疏通,必要时可新建永久性排洪设施,同时将原排洪设施进行封堵,当地基本情况不明时,切忌盲目设计和施工。

(3)维护管理引起事故隐患。加强尾矿坝体的监控管理和巡视,做好坝体的常规维护,防止因渗流破坏、坝体滑坡、管涌、裂缝、崩塌、溃坝等管理不到位引起的尾矿库事故隐患。

(4)外界环境因素引起的事故隐患。洪水、地震、泥石流是导致尾矿库事故多发的主要外界环境要素,要通过人工监测和技术监测相结合的方法实现精准监测预警预报,全面强化尾矿库安全监测预

报,防止灾害发生。

### 3.1.2 整改建议

针对尾矿库安全生产工作应坚持安全第一的思想,严格遵守底线。要坚守建立安全生产的思想,加强事故控制制度建设,加强隐患排查整治,保证生产经营企业的各类活动标准、有序、安全。要把安全工作放在第一位,与经济建设、城市发展等工作一起策划和部署,切实扭转“只抓发展不抓安全”的误区。在项目推进、城市发展、招商引资等方面,一定要坚持高要求、严标准。在安全生产方面,要严肃查处违法违规的情况,对不按照审批流程开展工作的企业进行严肃处理。各级政府和相关部门要按照规章、法规、法律,严格履行各自的职责。

加强企业的安全主体责任,强化企业生产责任的落实。选矿厂要充分发挥自己的安全监管主体责任,加强法律素养、安全素养和责任素养,完善安全生产责任制,不管是公司的首要负责人,还是一般的

表 2 典型尾矿库突发环境事件清单

Table 2 List of typical environmental emergencies in tailings ponds

尾矿库突发事件	时间(年-月-日)	事故原因	事故危害	应急处置
广西南丹鸿图选矿厂尾矿库溃坝事故	2000-10-18	1)基础坝不透水,坝基和后坝群间存在着一个非常小的剪切滑动面; 2)尾矿坝长期大量的人工蓄水,干滩的长度不能满足要求	28人死亡,56人受伤,直接经济损失340万元	1)成立事故抢险救援指挥部,开展事故抢险救援,科学施策预防次生灾害; 2)吸取教训,提高企业安全水平
镇安黄金矿业“4·30”尾矿库特大溃坝伤亡事故	2006-04-30	1)尾矿库坝体未进行安全论证、环境影响评价和正规设计,加坝扩容; 2)未按规程规定排放尾矿,尾矿库最小干滩长度和最小安全超高不符合安全规定	15人死亡,2人失踪,5人受伤,76间房屋毁坏淹没	1)紧急修建围堰和净水坝,拦截控制下泄尾矿渣; 2)采取防水减压措施,防止尾矿库内溃流的尾矿渣再次下泄; 3)实施改河工程,将清水河道与污染源彻底分离; 4)开辟截留处置场,开挖事故处理池,严密控制溃流污染物
辽宁海城西洋鼎洋矿业“11·25”尾矿库垮坝重大事故	2007-11-25	1)尾矿库坝体超高,导致库容增大,使大坝主体承载力变弱; 2)坝坡过陡,降低了坝体稳定性; 3)坝体密度低,降低了筑坝土体的抗剪强度以及坝体稳定性	18人死亡,37人受伤,直接经济损失1 973.17万元	1)高度重视,认真履行安全监管责任,明确分工、压实任务; 2)强化监督,加强对尾矿库风险防控和预警预测,有效防范尾矿库安全风险
陕西安康汉阴黄龙金矿尾矿库泄漏事故	2009-08-29	因暴雨冲刷,尾矿库泄洪涵洞尾部断裂	1人死亡	1)在尾矿坝下300 m处设2道拦截坝,对排洪涵洞排出的尾矿砂进行拦截; 2)清理事故池,将排洪涵洞排出的废水引入事故池,添加石灰和漂白粉进行处理,确保氰化物有效处置
广东信宜银岩锡矿“9·21”尾矿库重大溃坝事故	2010-09-21	1)受台风影响,尾矿库初期坝漫坝后坝体右侧决口,发生溃坝; 2)在建设尾矿库的排水井时,由于未经许可,导致进水口水位升高,对尾矿库的操作、管理和安全责任不到位	22人死亡,直接经济损失1 900万元	1)安全监督管理部门及相关部门切实加强安全监督管理; 2)完善并严控尾矿库建造项目的安全检查制度; 3)切实采取有效措施,加大非煤矿山风险隐患整改力度
湖北建始县磺厂坪矿业公司硫精矿洗矿场直排废水环境事故	2014-08-13	违法直排洗矿场废水,污染物流入3 km之外的重庆巫山县千丈岩水库,造成污染事件	千丈岩水库受到严重污染,水体由碧绿色变为暗黑色,并有刺激性气味,水库周边5万余人饮水受到影响	1)成立事故抢险救援指挥部,开展事故抢险救援,妥善做好善后处置,科学施策预防次生灾害; 2)认真排查治理尾矿库潜在的隐患,强化尾矿库工程安全监督管理,严格建设项目监管
陕西宁强汉中锌业铜矿排污致嘉陵江四川广元段铊污染事件	2017-05-05	非法处理多口炉烟灰,非法排污	嘉陵江由陕入川断面水质异常,西湾水厂饮用水水源地水质铊浓度超标4.6倍	切断污染源、应急供水、调蓄稀释、水厂工艺改造等各项应急处置工作
大冶铜绿山铜铁尾矿库“3·12”较大溃坝事故	2017-03-12	尾矿库3#坝体溃坝,采空区顶板花岗岩经长期风化侵蚀而坍塌,造成坝体失稳,流动的水体及尾砂对3#坝体施加水平冲击力,形成东段坝体呈扇形滑动发生溃坝事故	溃坝下泄淹没下游鱼塘近0.27 km <sup>2</sup> 。总计赔付1 258万元生态环境损害赔偿	启动临时处置工程,在溃坝口处先采用抛石挤淤方法形成基础,再分层堆石碾压修筑土石拦挡坝,恢复坝顶标高至33 m。溃坝于3月24日实现合拢,开始进入坝面调平加高阶段,基本完成尾砂坝临时处置工程

员工,都要按照法律、法规、规章和操作规程来组织项目实施、安全监管、生产经营等工作,真正做到依法运营、遵纪守法;要把隐患安全检查管理工作做好,把企业管理人员的安全隐患、安全检查治理工作落到实处,实行“谁签字、谁检查、谁负责”,做到不留死角、全部覆盖;要加强对尾矿库的安全管理,制定严格的、规范的、切实可行的安全管理措施,严格控制建设项目的安全质量;要加强工程安全管理,对施工、监理、设计等单位进行严格的资质审核,建立标准、合格的工程质量控制、工程招标等体系,保证工程项目满足相关法律法规和生产实践的需要。

加强问责,改善各部门的监督功能;各级政府和相关部门要始终保持清醒的头脑,对监督主体责任

有清晰的认识,增强责任感,使工作不缺位,重在落地。厘清部门之间的责任界限,保证各个区域、各个行业、各个部门都能得到有效的管理。各级相关部门要加强能力建设,提高履行职责的积极性。加强相互协调配合和信息共享,采取强有力措施,始终保持严厉打击危害国有矿山安全、违法越界开采行为的高压态势,坚决依法取缔非法小矿山。要加强对尾矿库工程施工的全过程监管,跟踪督办尾矿库建设项目实施情况,对违法建筑进行查处。要加强安全中介机构管理,严厉查处违法出具虚假报告行为。各部门要强化法治观念、执法严谨,防止不作为和乱作为。要充分发挥国务院安全生产委员会的作用,切实做到“管业务必须管安全、管行业必须管安

全、管生产运行必须管安全”。

### 3.2 尾矿库次生突发环境事件应急处置

针对尾矿库发生二次突发环境事故的实际状况,对近年来我国尾矿库泄漏造成的较大突发环境污染事故进行调查分析,其结果梳理见表3。研究表明,建立科学有效的应急响应,增强应急管理意识是遏制尾矿库事故的有力抓手,对于减少尾矿库溃坝造成的安全损失、减少环境污染具有十分重要的意义<sup>[25]</sup>。很多自然灾害,尤其是高强度的自然灾害一旦出现,往往会引发一系列的其他灾害,称为灾害链。在灾害链上,最先出现并发挥影响的致灾体,被

称作初级致灾;而在原生灾害的基础上诱发的灾害,被称作次生灾害。尾矿库事故造成的环境次生灾害应急处理要遵循3个原则:1)迅速有效控制事态恶化,应急处理必须在短时间的“窗口期”内完成,要尽早、最大程度地控制危险源,防止事故影响范围继续扩大。2)尽力降低事故损失,采取有效的现场处置措施,降低次生灾害的发生。3)全力消除危害后果,防止对人和环境的继续危害。因此,通过及时、科学和高效的生产减污手段,使大面积、高浓度的环境污染在较短的时间内降低到较低浓度或者不对环境造成危害的水平,是应急处理的关键。

表3 尾矿库泄漏次生重大突发环境事件清单

Table 3 List of major emergent environmental events resulting from tailings pond leakage

突发事件	时间(年-月-日)	事故原因	事故危害	应急处置措施
山西省临汾市襄汾县新塔矿业有限公司980沟尾矿库发生溃坝事故	2008-09-08	1)违法构建和生产致使尾矿堆积坝坡过陡; 2)大面积液化,坝体失稳,坝体绝大部分溃塌,泥浆从50 m高的半山腰涌出,造成溃坝	277人死亡、4人失踪,直接经济损失9 619.2万元。	1)加强安全管理,本着“安全第一,预防为主”的方针,认真履职尽责; 2)落实监管制度,保证尾矿库的安全运行,减少安全事故; 3)推行尾矿库资源利用化,加强闭库复垦和生态恢复措施
甘肃陇星锡业有限责任公司“11·23”尾矿库泄漏次生重大突发环境事件	2015-11-23	1)建设施工存在问题,建设施工违法违规、安全设施日常管理混乱; 2)尾矿库排水口的拱形结构不符合设计规范,其质量不符合设计标准。	甘肃省西和县到四川省广元市346 km河流中锡含量超过GB 3838—2002《地表水环境质量标准》规定限值,导致该地区锡污染经济损失达6 120.79万元;甘肃省一些地区的村镇地下水中的锡含量超标,约108 000人的饮水被污染	1)封堵泄漏源、筑坝拦截污染物,关闭了葫芦头电站闸门,在葫芦头水库的上游和下游各建设5个拦河坝,为进一步处理受污染的水赢得更多的时间; 2)通过对沿途的水质进行调查测试,向群众通告被污染的水源停止使用,安排车辆送水,引入其他清洁水源,并对自来水厂的除锡流程进行改造,确保了沿线群众的生产、生活用水安全
河南栾川龙宇铝业有限责任公司尾矿库溢流井垮塌次生突发环境事件	2017-02-14	6号泄水孔塌方,导致该尾矿库循环水经泄水孔流入环境保护沉降池,并排入河流。	事件造成事发点下游约43 km河段和金牛岭水库受到不同程度污染	采取切断源头、筑坝拦截、投药降污和河道清淤的应急处置方案
黑龙江伊春鹿鸣矿业有限公司“3·28”尾矿库泄漏次生重大突发环境事件	2020-03-28	1)尾矿库4#排水井拱板和井架工程质量达不到设计和施工规范要求; 2)排水井建设施工严重违法违规,尾矿库安全设施日常管理混乱,不能及时将事故情况上报生态环境保护部门	尾矿库渗漏的铅量为89.39~117.53 t。导致伊吉米河到呼兰河340 km范围内的铅含量超过GB 3838—2002规定限值,铁力市第一水厂停止取水,约6.8万人用水因减压供水等受到一定影响,伊春市、绥化市境内部分受污染农田约2.87 km <sup>2</sup> 、林地约5.86 km <sup>2</sup> 。共造成直接经济损失4 420.45万元	1)封堵泄漏点,筑坝拦截,在事故点下游依吉密河构筑10道拦截坝,分段对泄漏水体进行拦截和导流,创造沉砂条件,在废水中加入絮凝剂和助凝剂,对废水中的污染物采取絮凝沉降处理,达到了分级削峰的目的; 2)饮水保障,关闭依吉密河水源地,启用原有的二次水源,并提供后备水源,保障居民临时用水安全

## 4 问题与建议

随着尾矿库建设规模和数量的不断增加,其带来的环境问题也日益突出,现阶段我国尾矿库研究主要集中在安全管理和风险评估方面,对于其环境影响的研究还比较少,通过梳理已有研究成果提出目前尾矿库现存的几点问题。

(1)缺少对尾矿企业建设的整体规划。随着我国矿业的发展,尾矿库作为矿业开采中的一项重大辅助项目,近年来对其建设的要求越来越高。由于

受天然资源的制约,加上矿山选址缺少整体的规划,使尾矿库的选择范围更加狭窄。有些尾矿坝在修建时没有回避生态敏感区域和居住区,给当地的环境带来了巨大的风险。

(2)缺乏环境保护的措施。针对金矿、铜铅、稀土、铁矿等金属矿产的尾矿库,其污染的重要来源是共生或共存矿石中的复合重金属及残余的浮选助剂。如萤石矿山等非金属尾矿库,其主要污染物为风化粉尘和尾砂溶出的有毒有害物质,其污染路径

有排出废水、淋溶水渗漏引起的水土流失、尾矿库周围大气污染等。

(3) 缺乏针对生态修复的计划和措施。尾矿库的施工和运行必然会对其生态环境产生影响, 主要是土地占压、绿色植被破坏、尾矿废水外排、扬尘污染以及由溃坝引起的地质灾害等。由于缺乏有效的环境保护与修复措施, 这些问题在各种类型的尾矿库中都很常见。此外, 一些历史遗留尾矿库多因开采无序生态环境破坏严重, 尤其涉及金属尾矿, 如铜、镍、锰等, 这些金属元素无法被全部回收, 大量遗留裸露在外。因此需要进一步提高尾矿库的环境保护和生态恢复水平。

(4) 缺乏安全风险在线监测信息系统。我国大部分尾矿库未建立安全风险的在线监测系统, 尾矿库一旦发生事故, 无法在第一时间向相关部门发出警报, 并采取有效措施来防止事态进一步恶化。

针对以上尾矿库污染问题提出几点建议。一是实现尾矿的资源化, 从而实现源头减排; 二是对尾矿库进行系统性的环境治理, 特别是针对自然原因引起的环境污染问题, 因为尾矿库含有大量的潜在污染成分, 并且受多种因素的作用, 其中一些因子是非常敏感的。三是要加强安全管理, 减少溃坝等事故风险, 从源头降低安全事故次生环境污染风险。四是加强应急管理科技自主创新, 构建信息资源体系, 以“数字”实现安全风险精细化管理, 为各部门应急管理提供基础数据服务和应用支撑, 加快推进安全风险管理的科学化、智能化。

## 参考文献

- [ 1 ] 中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告(2018-2019年度)[R]. 北京: 中华环保联合会固废治理专业委员会, 2019.
- [ 2 ] 张家荣, 刘建林. 尾矿库溃坝及尾矿泄漏事故树安全评价与预防[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(2): 201-206.
- ZHANG J R, LIU J L. FTA-based safety evaluation and prevention of dam break and tailings leakage in tailings reservoir[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(2): 201-206.
- [ 3 ] 谢旭阳, 田文旗, 王云海, 等. 我国尾矿库安全现状分析及管理对策研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2009, 5(2): 5-9.
- XIE X Y, TIAN W Q, WANG Y H, et al. The safety analysis of current situation and management countermeasure on tailing reservoir in China[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2009, 5(2): 5-9.
- [ 4 ] 张家荣, 刘建林. 中国尾矿库溃坝与泄漏事故统计及成因分析[J]. *中国铝业*, 2019, 43(4): 10-14.
- ZHANG J R, LIU J L. The statistics and causes of dam break and leakage in Chinese tailings pond[J]. *China Molybdenum Industry*, 2019, 43(4): 10-14.
- [ 5 ] 刘瀚和. 巴西 Brumadinho 尾矿库溃坝对上游式堆坝的启示[J]. *有色冶金设计与研究*, 2020, 41(4): 49-51.
- LIU H H. Enlightenment of the brumadinho tailings pond collapse in Brazil to the upstream embankment[J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 2020, 41(4): 49-51.
- [ 6 ] 彭之辰, 吴双, 龚士林. 美国伊登维尔坝和桑福德坝溃坝事故反思[J]. *大坝与安全*, 2023(4): 63-66.
- PENG Z C, WU S, GONG S L. Reflections on breach accidents of Edenville Dam and Sanford Dam in the United States[J]. *Dam & Safety*, 2023(4): 63-66.
- [ 7 ] 杜艳强, 刘炳君, 谢冰, 等. 金属矿山尾矿库溃坝诱因分析及对策[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(9): 81-83.
- DU Y Q, LIU B J, XIE B, et al. Inducement analysis and countermeasures of dam break in tailings pond of metal mine[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(9): 81-83.
- [ 8 ] 谢程宇, 阳富强. 基于情景构建的尾矿库事故分析及应用[J]. *安全与健康*, 2022(1): 58-63.
- [ 9 ] 王禹. 矿山污染与矿山环境地质[C]//中国地质学会矿山地质专业委员会. 中国实用矿山地质学(下册). 北京: 冶金工业出版社, 2010: 398-402.
- [ 10 ] 杨勇, 张吉, 张天佑. 有色金属尾矿的问题及处理现状[J]. *硅谷*, 2015, 8(4): 253-254.
- [ 11 ] 朱宁, 陈玉明, 刘相纯, 等. 尾矿库环境污染分析与预防对策[J]. *黄金*, 2014, 35(2): 67-70.
- ZHU N, CHEN Y M, LIU X C, et al. Analysis on environmental pollution in tailings ponds and its countermeasures of comprehensive prevention[J]. *Gold*, 2014, 35(2): 67-70.
- [ 12 ] 杨春和, 张超, 李全明, 等. 大型高尾矿坝灾变机制与防控方法[J]. *岩土力学*, 2021, 42(1): 1-17.
- YANG C H, ZHANG C, LI Q M, et al. Disaster mechanism and prevention methods of large-scale high tailings dam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(1): 1-17.
- [ 13 ] 赵立芳, 赵转军, 曹兴, 等. 我国尾矿库环境与安全的现状及对策[J]. *现代矿业*, 2018, 34(6): 40-42.
- ZHAO L F, ZHAO Z J, CAO X, et al. Present situation and countermeasures of the environment and safety of China's tailings depot[J]. *Modern Mining*, 2018, 34(6): 40-42.
- [ 14 ] 张锦峰, 宋志飞, 耿闻泽. 我国尾矿库数量事故统计分析和防范[J]. *现代矿业*, 2023, 39(3): 6-9.
- ZHANG J F, SONG Z F, GENG W Z. Statistical analysis and prevention of the tailings pond quantity accidents in China[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(3): 6-9.
- [ 15 ] 吕晓宇, 滕军伟. 谁该为这场灾祸负责: 山西襄汾“9·8”特别重大尾矿库溃坝事故调查[J]. *劳动保护*, 2008(10): 108-109.

- [16] 徐进. 尾矿料物理力学性质试验研究及尾矿坝动力稳定性分析 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [17] 王宏洋, 王旭, 陈海燕, 等. 尾矿库环境风险管控相关政策分析及建议 [J]. 环境科学研究, 2023, 36(5): 1052-1060.  
WANG H Y, WANG X, CHEN H Y, et al. Analysis and suggestions of environmental risk control strategy for tailings ponds[J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(5): 1052-1060.
- [18] 罗清月, 魏健, 李明月, 等. 鹿鸣矿业尾矿库泄漏事件环境应急过程解析与总结 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 1963-1971.  
LUO Q Y, WEI J, LI M Y, et al. Analysis and summary of the environmental emergency response process of Luming mining tailings pond leakage accident[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 1963-1971.
- [19] 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.  
WU Z Z, MEI G D. Statistical analysis of tailings pond accidents and cause analysis of dam failure[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(9): 70-76.
- [20] 宁民霞. 水对尾矿坝稳定性影响研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2003: 1.
- [21] 肖容, 袁利伟, 邢志华, 等. 基于模糊 DEMATEL-ISM 模型的尾矿库事故影响因素研究 [J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(5): 74-80.  
XIAO R, YUAN L W, XING Z H, et al. Study on influencing factors on tailings pond accidents based on fuzzy DEMATEL-ISM model[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(5): 74-80.
- [22] 阮修莉. 尾矿库环境风险与应对措施 [J]. 世界有色金属, 2019(1): 291-292.  
RUAN X L. Environmental risk and countermeasure of tailings reservoir[J]. World Nonferrous Metals, 2019(1): 291-292.
- [23] 田祎, 赵虎, 王硕, 等. 我国尾矿环境风险分析与措施建议 [J]. 中国矿业, 2022, 31(10): 57-61.  
TIAN Y, ZHAO H, WANG S, et al. Environmental risk analysis and suggestions for tailings in China[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(10): 57-61.
- [24] 王亚变, 薛丽洋, 刘佳, 等. 尾矿库突发水污染事件环境应急处置措施及应用示范 [J]. 环境污染与防治, 2022, 44(4): 541-545.  
WANG Y B, XUE L Y, LIU J, et al. Measures and application of environmental emergency treatment for sudden water pollution incidents in tailing pond[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(4): 541-545.
- [25] 张家荣, 刘建林, 朱记伟. 我国尾矿库事故统计分析及对策建议 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2016, 38(6): 682-685.  
ZHANG J R, LIU J L, ZHU J W. Statistical analysis and countermeasures of tailings accident in China[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2016, 38(6): 682-685. □