

尾矿库溃坝灾害防控现状及发展建议

王昆^{1,2)} 杨鹏^{3,1)}✉ Karen Hudson-Edwards²⁾ 吕文生¹⁾ 卜磊¹⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 埃克塞特大学环境与可持续发展研究所, 康沃尔 TR10 9FE, 英国 3) 北京联合大学北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101

✉通信作者, E-mail: yangpeng@buaa.edu.cn

摘要 尾矿库溃坝灾害应急响应时间短、潜在威胁巨大, 往往造成惨重人员伤亡与巨额财产损失。近些年尾矿库安全事故的总体下降趋势充分体现出现代化技术及安全管理方面的进步, 然而重大事故发生频次却不减反增, 2015 年巴西 Samarco 铁矿与 2014 年加拿大 Mount Polley 重大溃坝事故及其严重后果, 再次为尾矿库安全敲响警钟。我国现存尾矿库 8869 座, 含“头顶库”1425 座, 安全形势复杂。本文在收集大量相关领域文献的基础上, 聚焦尾矿库溃坝灾害防控体系中的安全监测、灾害预警与应急准备、安全管理与标准规范这三大方面核心内容, 分别综述对比国内外现状及前沿进展, 探讨分析我国当前所面临的问题并尝试提出改进建议, 为尾矿库防灾减灾理论研究与技术革新提供参考。结果表明: (1) 我国尾矿库安全监测标准更高, 但仪器耐久性、可靠性与实用性不足, 专用监测器件与新技术的研发应用势在必行; (2) 灾害预警方法单一且可信度不高, 而信息技术融合应用成为发展趋势; (3) 应急管理 with 预警决策需以充分的科学论证为基础, 当前研究在试验手段与计算方法上存在局限; (4) 我国拥有完善的安全管理标准规范体系, 但在安全等别划分、全生命周期管理、主体变更、事故总结等方面相对欠缺。

关键词 尾矿库溃坝; 安全监测; 预警; 应急准备计划; 安全管理

分类号 TD77.1

Current status and developing recommendations of tailings dam failure accident prevention and control

WANG Kun^{1,2)}, YANG Peng^{3,1)}✉, Karen HUDSON-EDWARDS²⁾, LYU Wensheng¹⁾, BU Lei¹⁾

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Environment and Sustainability Institute (ESI), University of Exeter, Penryn Campus, Cornwall TR10 9FE, United Kingdom

3) Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China

✉Corresponding author, E-mail: yangpeng@buaa.edu.cn

ABSTRACT Tailings dam failure accidents with limited emergency response time and huge potential threats, can often lead to heavy casualties and serious financial losses. In recent years, the decreasing trend of tailings dam failure accidents evidences the development of modern technology and safety management. However, the frequency of major tailings dam failure accidents has increased, rather than decreased. The 2015 Samarco Accident in Brazil and the 2014 Mount Polley Accident in Canada, along with their disastrous consequences, once again sounded the alarm for the tailings ponds safety. China is now facing a complicated safety situation, with 8869 tailings ponds all over the country, including 1425 “Overhead Tailings Ponds” which represents the tailings ponds that located within 1 km upstream of residential area, workshops, schools or other important facilities. Based on a large amount of relevant research literatures,

收稿日期: 2018-1-1

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774045); 国家留学基金委建设高水平大学公派研究生资助项目(201706460051)

focusing on three main aspects of accident prevention and control which include safety monitoring, early-warning and emergency preparation, safety management codes and standards, the current status and frontier progress were reviewed in this paper. Furthermore, the relevant problems in China were discussed and several improvement recommendations were put forward, which could provide a reference for the tailings pond accident prevention theoretical research and technological innovation. The result shows: (1) the safety monitoring standards in China are relatively strict. However, the monitoring instruments are lack of the stability, reliability and practicability. Thus the development of specific devices and new technologies is urgently needed. (2) The current early-warning method is lack of diversity and reliability. And further interdisciplinary application of information technology is becoming the developing trend. (3) The emergency management and decision-making should be based on sufficient scientific proof. However the relevant research is limited by test methods and simulating algorithms. (4) China now has built a complete system of safety management codes and standards. But with shortcomings of safety level classification, life-cycle management, change management process, accident investigation and so on, there is still a long way to go.

KEY WORDS tailings dam failure; safety monitoring; early-warning; emergency preparation plan; safety management

尾矿库是指由一个或多个尾矿坝堆筑拦截谷口或围地所构成的矿山生产设施, 用以堆存矿石粉碎选别后所残余的有用成分含量低、当前经济技术条件下不宜进一步分选的固体废弃材料^[1,2]。全球范围内, 人类文明进步尤其是近代城镇化进程离不开各类矿产资源的开发利用, 因此, 尾矿库在大多数国家均有分布^[2,3], 特别是美国、加拿大、南非、澳大利亚、巴西、中国等矿产资源丰富地区。同时, 全球矿产品需求量当前仍处于高位, 而高品位、易采矿体逐渐开采殆尽, 低品位矿体的开采和提取成为矿业未来发展方向之一, 可以预见尾矿废弃物排放规模仍将持续增大^[4]。以我国为例, 2016 年统计数据 displays, 尾矿累积堆存量高达 146 亿吨, 年排放量超 15 亿吨并仍呈增涨态势, 在大宗工业固体废弃物中占比最高; 而用于空区充填、建筑材料等综合回收利用率仅 18.9%, 其余绝大部分被贮存于尾矿库中^[5,6]。

众所周知, 尾矿库具有高势能的重大危险源, 溃坝事故由于致灾因素多、机理复杂、突发性强、破坏力巨大, 往往造成惨重人员伤亡、巨额财产损失以及难以修复的环境污染^[7]。据世界范围内 18401 座矿山的统计数据, 近一百年间尾矿坝溃决事故率高达 1.2%^[8], 比蓄水坝 0.01% 的溃坝事故率高出 2 个数量级^[9]。近些年随着社会经济发展与技术革新, 尾矿库事故总体呈下降趋势, 但重大事故发生频次却不减反增。据 1910-2010 年期间全球统计数据, 55% 的尾矿库重大溃坝事故发生在 1990 年以后, 并且 2000 年之后的溃坝事故中 74% 属于重大或特别重大事故^[10,11]。例如, 2015 年 11 月 5 日, 巴西 Samarco 铁矿尾矿库因小型地震触发本身已接近饱和的超高坝体液化溃决, 约 6200 万 m³ 泥砂涌出, 淹没下游 5km 外 Bento Rodrigues 村庄 158 座房屋 (见图 1), 造成至少 17 人遇难, 污染 650km 河流并汇入大西洋, 引发巴西史上最严重的环境灾害^[11,12]; 2014 年 8 月 4 日, 加拿大 Mount Polley 金铜矿尾矿坝由于坝基设计未考虑冰层而引发溃坝, 约 2500 万 m³ 尾矿及废水瞬间倾出, 破坏性巨大的尾矿泥砂将下游 Hazeltine 河宽度由 1m 冲刷到 45m, 淹没大片森林与湖泊 (见图 1), 生态环境遭到严重毁坏, 引发加拿大政府与民众的高度关注^[11,13]; 2009 年 8 月 29 日, 俄罗斯 Karamken 尾矿库因强降雨引发溃坝事故, 向下游倾泻 100 万 m³ 泥砂, 摧毁 11 座房屋并造成至少 1 人死亡^[11]; 2008 年 9 月 8 日, 我国山西省襄汾县塔山铁矿尾矿库因违规运营发生特别重大溃坝事故, 泄露尾矿约 19 万 m³, 淹没下游仅 50m 外的办公楼、农贸市场、居民区等人群密集区, 酿成至少 277 死、33 伤的惨重后果, 给当地经济发展和社会稳定造成极其恶劣影响^[14]。上述事故的发生及其惨痛教训, 均凸显出尾矿库现行溃坝灾害防控体系的薄弱, 事故发生前监测系统形同虚设, 并且缺乏稳定可靠的灾害预警机制以及高效合理的应急管理措施。

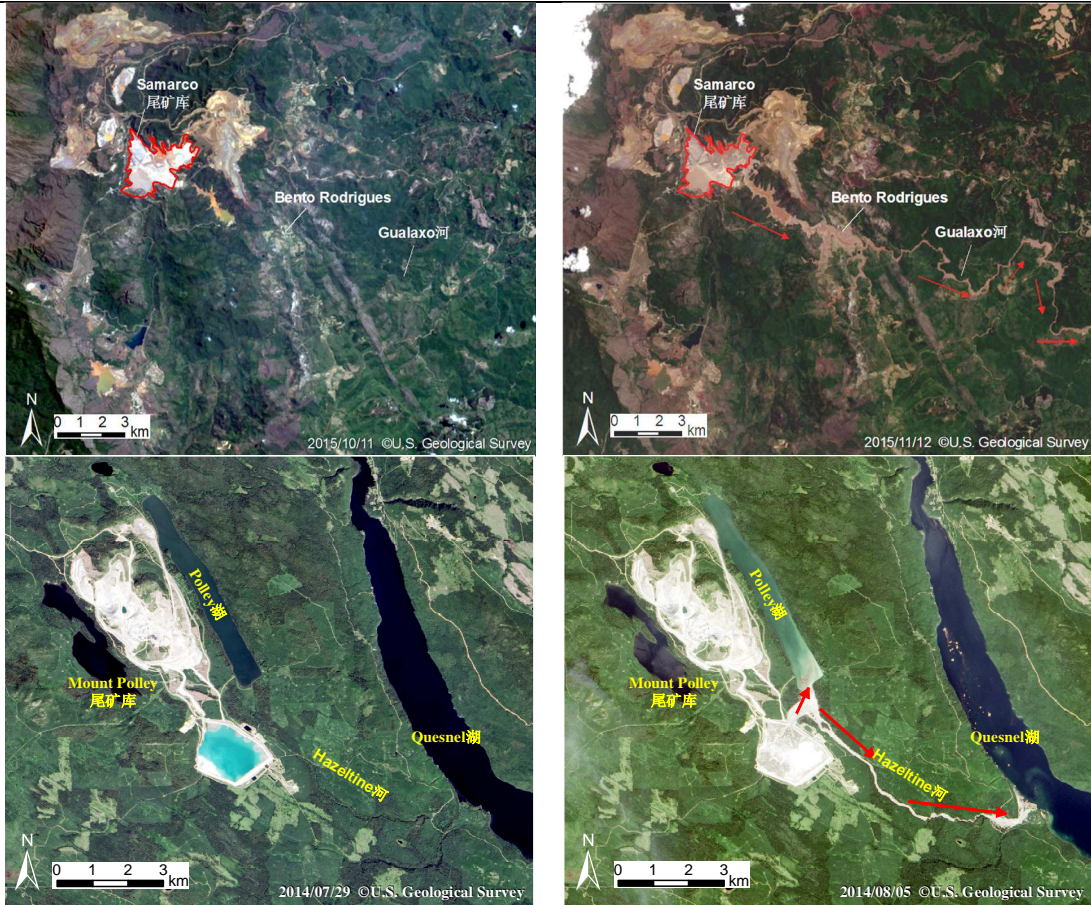


图1 Mount Polley 与 Samarco 尾矿库溃坝事故 Landsat 8 卫星图像

Fig.1 Landsat 8 satellite images of the Mount Polley and Samarco tailings dam failure accidents

我国在 2007 年后开展了卓有成效的尾矿库综合治理及专项整治行动, 消除了绝大多数的危库、险库, 但是总体安全形势仍旧不容乐观, 且情况较为复杂, 具有数量多、上游筑坝比例高、安全等级低的特点^[15]。据统计, 我国现存尾矿库数量高达 8869 座, 其中包括“头顶库”(系指下游 1 公里内有居民区或其他重要设施的尾矿库) 1425 座, 易导致重特大安全生产事故、重大突发环境事件和群体事件, 严重威胁群众生命财产安全与社会和谐稳定^[16, 17]。2016 年 5 月, 国家安全监管总局印发《遏制尾矿库“头顶库”重特大事故工作方案》, 指出“头顶库”溃坝事故突发性强, 溃坝时间短, 泥砂流速大, 应急时间有限, 下游居民撤离和设施转移难度高, 将以提高安全保障能力、完善应急管理机制为目标, 开展综合治理工作^[17]; 2017 年 1 月, 国务院办公厅印发《安全生产“十三五”规划》, 提出健全监测预警应急机制、提高应急救援处置效能等工作任务, 切实降低重特大事故危害后果、最大限度减少人员伤亡和财产损失^[18], 充分体现我国对于尾矿库灾害防控工作的高度重视。

鉴于上述情况, 笔者针对我国尾矿库复杂的安全形势, 结合新时代背景下安全生产的新要求, 围绕安全监测、灾害预警方法与应急准备、安全管理与标准规范这三大方面核心内容, 梳理总结国内外研究现状及前沿进展, 探讨我国尾矿库溃坝灾害防控当前所面临的问题, 并尝试提出发展建议, 为尾矿库防灾减灾理论研究与技术革新提供参考。

1 尾矿库溃坝灾害防控国内外现状

1.1 尾矿库安全监测国内外现状

1.1.1 国外现状及前沿进展

安全监测是尾矿库安全管理的耳目, 库区健康运营、事故预防及应急响应均离不开准确及时的监测信息。国外尾矿库设计规定的监测内容包括位移、渗流、坝基稳定性等坝体安全指标, 以及扬尘、地表水、地

下水等环境指标^[19, 20], 而相关研究多见于环境污染的监测^[21, 22]。安全监测方面, 加拿大黄金公司(Goldcorp)^[23]为保障 BC 省一处已闭库、缺乏人员看管的银矿尾矿库安全, 引进了由太阳能供电、数据收集、无线传输、自动测量、气象站、图像采集等模块集合而成的 Trimble T4D 智能化自动监测系统, 包含最优化布置的水位、孔隙水压力、位移等传感器, 保证监测信息实时汇总至管理人员; Berghe 等^[24]研究指出合格的监测方案除水位、坝体位移等参数外, 还应涉及基于实时监测数据的坝体稳定性评估、潜在溃坝形式特点及其关键监测参数体现、预警等级划分及其相应对策; Zandarín 等^[25]认为毛细现象对坝体稳定性至关重要, 建议在安全监测中新增毛细水位测量指标。

在安全监测新技术的研究与应用方面, Coulibaly 等^[26]、Sjödahl 等^[27]分别使用电阻率成像仪探测了加拿大 Westwood 与瑞典南部 Enemossen 尾矿坝内部含水饱和度、裂缝及变形情况, 展现出地球物理方法在尾矿坝监测中的应用前景; Colombo 等^[28]尝试使用干涉合成孔径雷达(InSAR)技术监测非洲两座露天矿地貌演化与尾矿坝变形, 以及波兰某煤矿地下开采引起的地表沉降, 并取得了理想的效果; Palmer^[29]指出大型滑坡事故在产生致命破坏之前通常可观测到数月或数年的缓速蠕变, 卫星遥感可在地质灾害防控方面发挥重要作用, 譬如欧洲航天局于 2017 年 3 月部署完成的两颗“哨兵 2 号”卫星可实现每间隔五天对同一区域的遥感监测; Schmidt B 等^[30]通过处理卫星数据提取地形图和航摄影像, 监测墨西哥某长达 11 公里的尾矿坝, 克服了传统测量方法劳动强度大、危险性高等缺点, 为库区建设与运营提供了宝贵参考资料; Emel J 等^[31]探索使用航天飞机雷达、星载热辐射和反射辐射计获取数字高程模型, 研究美国坦桑尼亚 Geita 金矿尾矿库周边 2000~2006 年期间的地形地貌和水文演变特征; Minacapilli M 等^[32]、Zwissler B 等^[33]指出利用红外热惯量和热红外图像遥感监测土壤或尾矿中水分时空分布规律具有巨大应用潜力。近几年, 无人机摄影测量受益于技术成熟和产品商业化, 续航能力、极端条件航行、路径导航、建模算法、模型精度等难题在一定程度上得到解决, 应用于古迹维护、环境保护、地质灾害调查、地图测绘、精准农业等领域取得了理想的效果^[34, 35]。Pajares^[35]列举了大量无人机遥感技术在各个行业的应用实例, 所搭载的传感器类型包括普通相机、热红外相机、Lidar 激光扫描仪、多光谱和高光谱传感器、合成孔径雷达(SAR)、化学传感器、磁传感器、声呐等, 可借鉴用于尾矿库干滩面、尾矿温湿度等指标的快速监测; 巴西 Samarco 铁矿尾矿库^[12]除采用常规监测手段外, 自 2013 年开始施行月度周期的无人机影像监测及地形测量, 监测数据为溃坝事故调查提供了重要依据; Peternel T 等^[36]通过无人机摄影测量三维建模, 分析两年期间内某山体表面高程和体积变化规律, 揭示出了该山体的滑坡运动模式。

1.1.2 国内现状及前沿进展

近些年在监管部门严格监督与矿山企业积极配合下, 我国尾矿库安全监测普及率大幅提高, 大大改善了矿山安全保障水平。根据现行《尾矿库安全监测技术规范》^[37]与《尾矿库在线安全监测系统工程技术规范》^[38]要求, 尾矿库安全监测需与人工巡查、库区安全检查结合并进行比测, 规定需监测坝体位移、渗流、干滩、库水位, 四等库及以上还需监测降水量, 另酌情监测孔隙水压力、渗透水量、浑浊度, 三等库及以上需安装在线监测系统。

国内学者围绕上述监测内容工程实践中所遇到的问题开展了大量研究。针对浸润线观测准确度低的问题, 李晓新等^[39]设计了基于高密度电阻率法的监测方案; 袁子清等^[40]提出了基于实时浸润线与库水位的渗流反推法。为解决系统稳定性差的难题, 陈凯等^[41]研究了监测系统防护、封装、分布式供电、混合式 Mesh 网络通信等技术, 以保障极端气象条件下的数据稳定获取; 王利岗等^[42, 43]基于 ZigBee 无线传感技术设计了具有自愈、自组网能力的在线监测系统, 归纳了防雷保护措施与注意事项, 以期提高系统运行稳定性; 余乐文等^[44]设计了风光互补冗余供电系统, 保障监测数据的连续采集。关于尾矿库安全监测的发展趋势, 于广明等^[45]认为系统组成应根据设计级别、筑坝方式、地质条件、地理环境等因素具体制定, 力求做到理论与实践结合、监测内容全面、测点布置科学、信息终端可视及数据分类存储共享等目标; 李青石等^[46]指出我国尾矿库安全监测存在成本高、适用性与稳定性差等缺陷, 并探讨了基于视频可视化与多通道微震系统的全天候监测方法可行性, 指出弹性波传播衰减速度快与信号不易采集的难题。

遥感技术在安全监测研究中的交叉应用同样受到国内学者追捧, 马国超等^[47]为提高尾矿库安全监测效率, 提出高分遥感与地表三维激光扫描相结合的“天地一体化”监测模式, 为安全监测提供了新思路; 高永志

等^[48]通过高分辨率遥感影像与 GIS 软件识别分析黑龙江省内重点矿集区尾矿库分布情况,为尾矿库普查与监管提供依据;刘军等^[49]探索使用无人机搭载数码相机获取露天矿边坡区域高分辨率图像数据,通过影像三维重建制作边坡精细三维模型,进而分析掌控边坡区域稳定性;马国超等^[50]通过统一控制点坐标系,实现三维激光扫描与无人机倾斜摄影技术结合的三维数据完整采集,并在露天采场开展应用研究;王海龙^[51]将摄影测量技术应用于露天矿山土石方量计算中,为生产计划提供数据支持。

综上所述,相较于国外,我国拥有更加严格的尾矿库安全监测规定,国内学者为解决稳定性差、精度低等具体实践问题开展了一系列研究。同时,国内外学者在尾矿库安全遥感监测方面均开展了大量研究,但国内学者主要集中于理论研究,在实践应用方面相对欠缺。可以预见随着高分遥感、无人机、摄影测量等理论技术进步与装备革新,上述新型监测方法的大规模应用推广将成为可能。

1.2 尾矿库溃坝灾害预警方法与应急准备国内外现状

1.2.1 预警方法国内外现状

尾矿坝溃决泥沙下泄是极其短时间的过程,若灾害发生后才启动应急疏散程序是完全来不及的。而溃坝灾害在孕育发展阶段均会呈现不同形式的征兆,可表征体现在各监测指标上,因此,溃坝灾害预测预警方法的研究对于尾矿库尤其是“头顶库”隐患治理与灾害防控具有重要意义。

国外针对尾矿库溃坝灾害预警的研究较为少见,而地质灾害领域的研究具有一定借鉴意义。Azzam 等^[52]通过太阳能供电网关连接测量传感器与通信处理单元节点,建立具有自组织、自愈能力的无线传感网络,构建出建筑物、滑坡山体、水坝、尾矿库及桥梁等的实时监测预警平台;Peters 等^[53]使用多个传感网络节点监测法国南部山体孔隙水压力、倾斜度及温度等参数,耦合水动力学模型实现了滑坡灾害的实时预警;Intrieri 等^[54]将意大利中部某滑坡体划分为普通、警惕与报警三个危险级别,其中警惕级别由预设阈值触发,报警级别基于专家评估法预测确定,另通过数据冗余与均值处理减少错误警报;Capparelli 等^[55]深入系统分析滑坡与降雨量关系,建立出降雨因素诱发滑坡的预警经验模型;Intrieri 等^[56]概述了滑坡预警系统组成及其实践准则,指出预警敏感度与准确率互相矛盾,误报警无法完全避免,强调预警机制必须以人为本,培养强化人员应急能力;Krzyszczanovskaya 等^[57]提出了传感器网络与溃坝模拟相结合的洪水预警决策支持系统,并利用人工智能及可视化技术保障该系统的稳定运行;Zare 等^[58]尝试运用多层神经网络与径向基网络两种人工神经网络方法分析预测山体滑坡,以期实现更为科学有效的灾害风险评估。

国内学者在灾害预警平台开发、指标选取、算法优化等方面做了大量研究。黄磊等^[59]设计搭建了基于空间信息网络访问模型的尾矿库监测预警平台,并成功应用于洛阳市某五座尾矿库,但存在数据处理算法过于简单及预警模型准确率低等问题;王刚毅等^[60]运用信息融合技术实现尾矿库多指标预警体系,系统由数据综合管理、实时评估、监控中心与预报预警四个模块构成,与实时气象信息融合,超前诊断尾矿库在极端条件下的运行状态;Dong 等^[61]利用物联网与云计算技术构建了基于实时监测与数值仿真的尾矿库灾害预警评估平台,根据监测数据及仿真计算结果划分预警级别。在预警指标选取方面,王晓航等^[62]选用洪水危险性、承灾体易损性和工程防御能力作为参数,基于 GIS 平台与线性加权模型,构建出蓄水坝溃坝生命损失预警综合评价模型;何学秋等^[63]试验得出尾矿坝变形包括衰减、稳定、加速三个阶段,基于流变-突变理论,预警准则应根据各阶段特征分别制定;谢旭阳等^[64]选取地形坡度、地质构造、降雨量、采矿活动、下游状况等 9 个指标建立了尾矿库区域预警指标体系。在预测算法优化方面,王英博等^[65, 66]构建了和声搜索算法与修正型果蝇算法优化的神经网络安全评价模型,选用滩顶高度、库水位、浸润线、干滩高度和安全超高五种指标实例验证,显示出较高的预测精度;李娟等^[67]利用支持向量机预测尾矿库浸润线高度,实现了小样本情况下的高精度预测;Dong 等^[68]建立了区间非概率可靠度模型,验证可适用于数据不连续时尾矿坝稳定性评价;为克服监测信息的非线性与非对称性引起的误差,王肖霞等^[69]提出并验证了基于柔性相似度量及可能性歪度的风险评估方法。

国外学者围绕地质灾害领域、国内学者聚焦尾矿库安全,在预警平台构建、指标选取、算法优化等方面均开展了卓有成效的研究,其中不乏无线传感网络、云技术、水力学模型、大数据、人工智能等前沿理论方法,力求进一步提升灾害预警的准确率、实用性与智能化。

1.2.2 应急准备国内外现状

根据 Helbing 等^[70]的研究, 突发性事件中人群处于恐慌逃逸情形下容易出现从众、盲目、无组织的“羊群行为”, 因此在事故已无法避免的情形下, 高效合理的应急准备将在紧急疏散、灾后救援、次生灾害防治等方面发挥极大作用, 力争将损失伤亡降到最低。国内外监管机构对于尾矿库灾害应急准备均有明确规定。例如, 澳大利亚维多利亚州^[71]规定应急预案要根据事故最坏情形来制定, 必须包括受灾体特征评估、疏散程序、人员培训方案等细节; 加拿大最新版尾矿设施管理规范^[72]明确规定应急预案应覆盖建设初期、运营及闭库的全生命周期, 并应与灾害可能涉及的其他单位或社群建立协同机制; 加拿大大坝协会 (CDA, Canadian Dam Association) 2015 年应急管理研讨会报告^[73]指出, 尾矿坝应急响应预案不可忽视环境危害的防治, 且需随着库区运营阶段及时更新升级, 应急演练必须全员参与, 同时还将开设线上论坛为会员企业共享应急管理经验和资料提供平台; 加拿大矿业协会 (MAC, the Mining Association of Canada) ^[74]总结 Mount Polley 事故教训, 建议应急措施计划及救援物资预备需要根据溃坝发生后可能波及的范围来具体制定; 由必和必拓、淡水河谷、英美资源等 23 家矿业巨头组成的国际矿业与金属理事会 (ICMM, International Council on Mining & Metals) 2016 年底联合发布尾矿库灾害防控立场声明^[75], 颁布安全管理一系列改进举措, 其中提及应急预案需要包含触发条件、响应计划、机构职责、通讯方式、演练周期、应急物资保障、与可行性分析等; 在我国, 矿山企业需针对溃坝、洪水漫顶、排洪设施故障等灾害情形编制应急预案并定期组织演练, 预案应包括机构职责、通讯保障、人员物资、撤离方案等内容^[76]。

溃坝泥砂演进规律能够为应急措施制定提供直接依据, 为此国内学者结合数值仿真与相似模型试验开展了大量研究。张力霆等^[77]利用自主研发的尾矿库模型试验平台进行了坝体排渗系统失效致使浸润线持续升高而诱发溃坝的缩尺模型试验, 分阶段描述溃决破坏形式; 张兴凯等^[78]利用雷达干涉仪、高速摄像机、流速仪等仪器的模型试验装置模拟分析洪水漫顶溃决过程, 得出了溃坝位移与坝体饱和度的关系; 尹光志等^[79]以云南某尾矿库设计资料为依据, 对不同高度尾矿坝瞬间全溃后的泥浆演进规律及动力特性进行研究, 结果表明溃决泥浆淹没高程、冲击强度、运移速度均与坝高有关, 冲击强度峰值在泥深峰值之前出现; 郑欣等^[80]使用 CFD 软件模拟溃坝砂流演进过程, 得出淹没范围、时间、流速等参数, 据此估算出灾害生命损失, 但研究存在大量假设条件且未考虑下游地形; 刘洋等^[81]通过数值模拟对比验证河北某尾矿库溃坝事故案例中泥石流演进过程, 总结出淹没范围、速度、厚度随时间的变化规律, 并模拟出拦挡导流坝防护效果显著。在应急撤离方案方面, 张士辰等^[82]针对溃坝情况下应急撤离路径灾民分流优化配置问题, 建立基于最优化理论与运筹学的分配机制; 黄诗峰等^[83]探索了基于 GIS 网络分析功能的灾民撤离过程仿真技术, 为洪水灾害应急措施的制定提供依据。

从上述分析不难看出, 国内外监管机构均高度重视尾矿库这一重大危险源的应急准备工作, 并具体规定了应急预案、物资准备、撤离疏散及日常演练等基本内容。相比之下, 国外在应急准备制定原则、可行性分析、经验总结、案例共享以及改进升级等方面的先进机制值得我国学习。我国学者采用数值仿真和相似模拟方法深入研究分析了尾矿库溃坝泥砂演进规律及可能的致灾后果, 为应急措施的制定与完善提供科学依据。

1.3 尾矿库安全管理与标准规范国内外现状

科学合理的安全管理方法与健全的配套标准规范是尾矿库安全运营的基本保障, 将在灾害防控工作中发挥出事半功倍的效果。Schoenberger^[84]深入研究分析了巴布亚新几内亚 Ok Tedi 与加拿大 Mout Polley 两起重大溃坝事故深层次原因, 并列出了美国 McLaughlin 尾矿库长达二十年的安全与环保成功管理案例, 批判性地揭露出溃坝事故频频发生的根本症结在于矿山安全管理方法缺陷或执行不力, 而绝非工程技术层面的瓶颈。

1.3.1 国外现状及前沿进展

美国、加拿大、澳大利亚等矿业发达国家在尾矿库安全管理方面积累了丰富的经验。加拿大作为世界上矿山事故率最低的国家之一, 由大坝协会 CDA 与矿业协会 MAC 共同制定了非常完善的尾矿库安全管理框架。CDA 于 2014 年出版技术报告, 详细诠释了大坝安全相关概念及技术规范在尾矿坝领域的适用性, 并做了必要补充; MAC 发布了《OMS 手册指南》^[85], 即 OMS 手册 (Operation, Maintenance and Surveillance Manual) 的制定规范, 矿山企业在设计阶段据此独立编写相应的 OMS 手册, 从而构成完整的企业安全管理体系, 督促企业维护职工及公众权益、遵守政府法规与集团政策、尽职尽责开展安全管理、并在实践中持续

改进;同时 MAC 还发布了《尾矿设施管理指导》^[72] (the Tailings Guide), 附有详细的安全检查清单, 旨在明确安全与环保主体责任、帮助企业建立安全管理体系、健全库区建设工程管理准则;在 Mount Polley 事故后, MAC 公布报告^[74], 探讨反思在可持续矿业 (TSM, Towards Sustainable Mining) 协议框架下的管理规范可否防止该溃坝事故的发生, 并总结提出修改完善《尾矿设施管理指导》及《OMS 手册指南》, 增添设计运营各环节独立审查流程、最优技术方案评估遴选准则、加强已闭库尾矿库管理、共享成熟管理案例经验、整改低等级库工作计划等 29 条具体建议;事故发生地 BC 省于 2016 年 7 月更新矿业标准, 规定尾矿库需新增具有从业资质且无利益相关的资料记录工程师 (EOR, Engineer of Record), 在库区易主或其他变更发生时保证数据、报告、安全记录等资料档案的完整且准确交接^[86]。

在澳大利亚, 大坝委员会 (ANCOLD, Australian National Committee on Large Dams) 成员矿业公司在尾矿库安全管理方面积累了大量成功实践案例, ANCOLD 标准虽未对管理体系做出详细规定, 但在技术指标方面比 CDA 更加严格, 高度重视尾矿坝的安全监测, 以揭示坝体堆积过程中结构及其稳定性的演变规律, 并及时做出有效调整;维多利亚州^[71]对尾矿库安全管理全生命周期内的设计阶段选址、渗流、污水处置、氰化物管理与闭库规划, 建设阶段行政审批与资料管理, 运营阶段组织结构、尾矿输送与坝体堆积方式、安全环保监测以及资料存档, 闭库阶段覆盖材料、地貌恢复、复垦方案及进度计划, 闭库后的防洪、渗流与腐蚀防控、复垦状态及水质监测均做出了详细要求, 并附上了各环节工作流程图与检查清单。

美国 SANS 研究所颁布的标准同样拥有大量尾矿库安全管理成功案例, 区别在于 SANS 标准未详细规定管理体系职位及其责任划分, 将权力下放增强企业自主决定权, 称身裁衣提高管理效率^[86];欧盟委员会^[87]于 2009 年发布了尾矿管理最佳可行技术 (BAT, Best Available Techniques) 的指导文件, 明确了最小化尾矿排放量、最大化综合利用量、风险评估管理、潜在灾害应急准备、减少污染物泄露的基本原则, 并且对尾矿库从设计到闭库的全生命周期安全管理内容做出详细规定: 在设计选址阶段要求论证闭库后长远影响、生态环境保护、人文社会与区域经济背景、风险评估与应急准备计划、安全监测方案、粉尘防治等问题;在建设阶段需重视施工方案、图纸资料归类、专家监理等;运营阶段的规定包括实时监控、监测数据与尾矿排放日志维护、日常安全巡查、操作流程规范、事故责任界定、应急预案维护、安全状态独立审查等;闭库及闭库后阶段的规定包括基础设施维护、极端事件 (地震、洪水、台风) 应急、土壤与水污染防治、水冲冰冻风化腐蚀、土地恢复等。国际大坝协会 (ICOLD, International Commission on Large Dams) ^[91]分析了大量事故案例, 总结出尾矿库溃坝事故预防的四个关键点: 建设初期质量控制、排洪设施有效维护、操作技术规范掌握, 以及管理责任明确落实。

1.3.2 国内现状及前沿进展

我国尾矿库安全由国家及地方安全生产监督管理部门管理, 各省市根据需要在国家法律法规及行业标准的基础上颁布地方法规与规范, 尾矿库经营单位制定规章制度与操作规程, 形成自上而下的法律法规及标准规范体系。国家安全监管总局于 2011 年公布修订版《尾矿库安全监督管理规定》, 对尾矿库建设、运行、回采、闭库等环节程序及其安全管理监督做出了明确指示;李全明等^[16]围绕法规标准、生命周期管理流程、关键设计参数、施工管理、安全监测、闭库流程等方面对比了我国与加拿大尾矿库安全管理现状, 提出完善闭库与复垦法规标准、设立复垦与环保基金、根据安全性与溃坝严重性划分等级、提高防洪与安全系数设防标准等具体建议;李仲学等^[88]运用系统分析方法, 提取分类尾矿库设计、建设、运营与闭库全生命周期的风险因素, 包括技术因素、外部环境、人为因素与法规标准, 运用计划、实施、检查、处理循环过程的 PDCA 模式持续改进方法, 构建出各环节 Safety Case 安全管理体系框架;王涛等^[89]运用定性与定量相结合的层次分析法确定并排序尾矿库排洪、回水、输送与堆存等系统影响安全运行的因素权重, 得出排洪与调洪能力是正常运行的主导因素, 为安全管理指明了侧重点;谢旭阳等^[90]综合规模等级、服务年限、筑坝方式、排洪设施等 11 个方面分析了我国尾矿库安全现状与不足, 提出落实企业主体责任、完善内部制度规程、规范尾矿库设计及安环评价流程、加强从业人员培训等建议。

综上所述, 我国拥有完整的国家及地方标准规范体系, 但相较于发达国家, 尾矿库安全管理仅局限于全生命周期的运营阶段, 而对于规划设计、建设、闭库及闭库后等环节缺乏重视。随着我国经济社会进步与安全环保标准提高, 亟需学习借鉴国外尾矿库全生命周期管理先进理念与成熟经验, 顺应“绿色矿山”发展趋

势, 在各环节全面考虑、具体论证对生态环境与人文社会的长远影响, 以及安全管理与应急准备计划的可行性; 另外在事故教训总结方面同样需要进一步加强。

2 我国尾矿库溃坝灾害防控存在的问题及建议

2.1 存在的问题

2.1.1 中小型尾矿库比例高, 灾害防控基础薄弱

根据 Azam 等^[8]对 1910-2010 年间全球尾矿库溃坝案例的统计, 约 80% 有明确记载的事故发生在坝高不足 30m 的小型库, 尤其是广泛存在于发展中国家的上游式坝体。而由于工艺简单、经济合理, 我国 80% 左右的尾矿坝采用上游法工艺堆筑, 并且安全基础薄弱的中小型尾矿库数量庞大, 其中坝高低于 30m 的五等库占比高达 64%。另一方面, 如图 2(a) 所示, 溃坝危险性巨大的 1425 座“头顶库”中, 78.3% 属于四等库或五等库^[7]。由于历史原因, 部分中小型尾矿库未经过正规勘察与设计流程, 建设运营资料缺失, 在建设时期遗留大量问题, 安全基础薄弱^[90]。而中小型矿山投入安全及环保管理的预算本来就有限, 难以承担监测系统高昂的建设维护成本, 将其安全管理置于恶性循环态势。此外, 中小型尾矿库在设计单位、施工单位、管理运营者或所有人变更时, 其勘察设计、施工运营、变更维护、闭库规划、监测日志以及软硬件接口等档案资料常无法完整交接, 导致出现大量无证经营、无设计资料、无人认领尾矿库, 其安全管理基础更加薄弱且缺乏资金投入。如图 2(b) 中统计数据显示, 处于停用或闭库状态的尾矿库约占“头顶库”总数的一半, 其安全管理及监测同样不容疏忽。

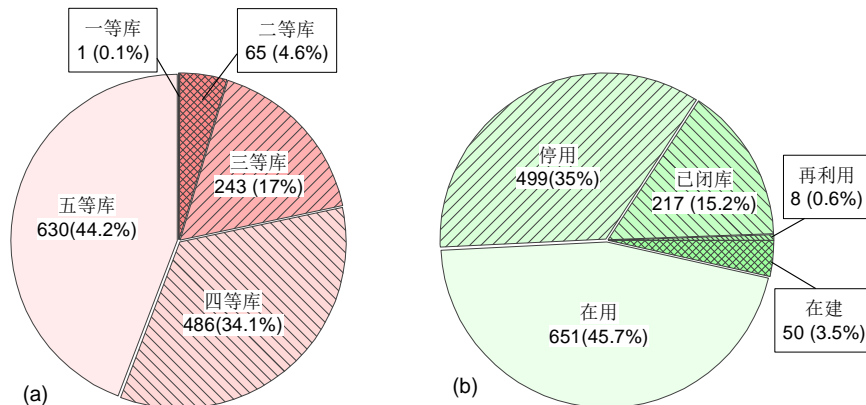


图 2 我国“头顶库”各等别 (a) 与运行状态 (b) 数量统计 (单位: 座)

Fig.2 The amount of various levels and running statuses Overhead Tailings Ponds in China

2.1.2 监测系统稳定性差, 缺乏有效管理维护

由于尾矿坝在构造特征、组成介质、几何形态、堆筑周期与力学行为等方面较为特殊^[45], 当前监测手段单一、稳定性差、可靠度低等问题愈发凸显。首先, 尾矿浆多具有腐蚀性, 传感器及其信号线缆极易老化失效, 而多数监测设备沿用自蓄水坝或岩土边坡等工程领域, 难以适应尾矿坝大变形监测以及库区严苛复杂的环境, 且部分设备易受天气、能见度、温度等外部条件制约。张达等^[91]指出传统尾矿库在线监测系统立足于正常运行时数据的采集与展示, 并非如何降低灾害损失, 多存在“灵时不用, 用时不灵”的情况。其次, 尾矿坝高度随服务年限不断增长, 监测系统常需分期建设及更新升级, 部分矿企频繁更换设备供应商, 监测设备或平台软件不相兼容, 无形中大幅增加企业负担, 还造成系统臃肿, 维护难度增大。有些矿山投入大量资金按照规范建设在线监测系统并验收合格后, 因缺乏专业技术人员或为节约成本, 未能实现监测设备及软件平台的定期维护升级, 难以保证其持续健康运行, 甚至监测数据已严重失准、失去参考价值。目前多数矿山仍主要依赖定性观察的人工巡查, 即人员按照预定线路, 借助自身经验或便携式仪器观测坝体、排洪设施及周边环境情况, 不仅工作量大, 且难以避免引地形、天气等限制出现数据采集盲区及人工操作误差。另外, 监测数据的资源访问权限分布在不同管理部门, 不同设备供应商数据库格式多种多样、接口混乱, 造成系统升级与集成难度高, 数据共享程度有限, 海量历史数据的存储管理有待进一步规范。

安全监测系统应当以保障尾矿库安全运营、辅助矿山管理决策并提升企业经济效益为主要目标,而上述现状已逐渐背离监管部门对于监测系统建设强制性规定的初衷,监测系统逐渐沦为遮挡在企业落后管理机制上、用先进装备拼装出的“皇帝新衣”,值得全体从业人员反思。

2.1.3 灾害预警模型准确度低,新方法缺乏实践验证

当前监测数据处理分析手段过于简单,主要由设备配套软件平台自动生成图表,管理人员基于数据变化趋势及速率结合自身经验做出直观判断,与系统建设高投入严重不相匹配^[92]。而灾害警报触发通过设置监测数据预警阈值及人工巡查实现,预设阈值伴随坝体堆筑具有一定时效性,无效报警消息频发干扰正常生产秩序,预警系统逐渐失去管理者及公众的信任,已无法满足新时代背景下信息化安全管理的要求。另一方面,尾矿坝溃决致灾要素复杂,包括地震、洪水漫顶、管涌、坝体裂缝、坝体渗漏、滑坡、排水构筑物垮塌、排水系统失效等^[93],简单的监测数据趋势分析难以准确及时揭露出各要素致灾演化过程,将灾害预警及应急管理置于不利局面。如前文所述,国内外学者针对灾害预警模型及其算法的优化开展了大量研究,取得了可喜的成果,但普遍存在训练及验证数据样本量有限的问题,甚至有学者建立出100%准确率的预警模型,可靠性有待进一步实践验证。在大数据、人工智能等技术高速发展的信息时代,基于尾矿库事故案例库以及海量历史数据的预警算法将为预警准确率改进提供新的思路。

2.1.4 应急措施制定与评价不规范,理论支撑不足

近几年矿山企业效益不佳,部分中小型矿山为控制成本,未完全按规定制定应急预案^[90]或委托设计院全权负责库区规划及建设方案设计。有些设计人员根据自身经验及矿山资料草草制定应急预案,并未经过严谨的科学论证,方案未必高效实用甚至可行。

国内学者对溃坝灾害泥砂演进机制已开展了大量试验研究,为应急措施的制定及改进提供理论支撑。然而,该研究是涉及土力学、水力学、流体力学等多学科交叉的复杂议题,由于溃坝砂流破坏性巨大不易控制,只能借助物理相似模拟结合计算机数值仿真重现,当前研究在以下四个方面仍存在不足:(1)往往忽略或简化处理库区及下游复杂地形,未考虑尾矿坝堆积材料的多维、多相、多层次复杂工程特征,以及地质、气象、地表植被等影响因素,边界条件过于粗放或理想化,因此结果具有不确定性;(2)土体特性是由密度和应力水平共同决定的,上述缩尺物理模拟试验未能复制原型问题的土体应力水平,可能出现较大误差甚至给出与实际情况相反的结论;(3)主要通过试验现象以及库区水位、干滩面、坝体位移等参数简单描述溃决演进过程,缺乏更为先进、精确的量测手段;(4)尾矿溃坝泥砂是类似于泥石流的带有自由面的多相流体,当自由面发生较大变形时,网格类数值模拟方法难以给出精确可信的计算结果。

当前应急措施的评价主要依赖监管部门强制性要求的应急演练,由尾矿库管理人员及下游群众定期参与,模拟事故发生情形,检验考察应急程序、物资配备、通讯能力、组织机构协调、应急人员技术水平。然而,长期实践过程中逐渐凸显出演练形式单一、关键环节缺失、参与度低、应付检查、形式主义等问题,导致实际效果大打折扣。

2.2 发展建议

2.2.1 科学划分尾矿库安全等别,规范主体变更程序

当前我国尾矿库的设计等别根据库容与坝高从高至低划分为一等库至五等库,安全度等级根据坝体状态与调洪能力划分为危库、险库、病库、正常库四级^[76],各等别对应不同严格程度的设计与安全标准。然而如上所述,我国低等级中小型库数量庞大、安全基础薄弱,溃坝风险更大、后果更加严重,现行等别划分标准不能全面反映出坝体安全性与危害程度。建议我国可借鉴国外先进经验,综合评估库区规模、溃坝后果严重程度、安全保障能力、应急准备情况来进一步科学细分安全等级。

为解决部分废弃尾矿库无人认领或主体不明确问题,可考虑借鉴加拿大管理经验,设置记录工程师职务,根据尾矿库等别及其安全性,由具备从业资质的专人独立审查并管理一至多个库区档案资料,在主体变更、企业破产等特殊情况下,记录工程师能够维持资料的完整与可溯性。另可参照国外经验,在建设初期由企业出资筹建复垦环保基金^[16],从资金上保障尾矿库的全生命周期管理。

2.2.2 传统监测设备研发升级及新兴技术交叉应用

为提高监测系统的运行稳定性,亟需在传统监测设备的基础上,研究开发适应尾矿库岩土特征的耐高压、耐腐蚀、高稳定性专用监测仪器,实现坝体深部及表层长期大变形、孔隙水压力、浸润线等参数的高精度连续监测。同时,为促进监测设备供应行业的健康良性发展、调动矿企建设与维护的积极性,设备厂商应充分考虑监测系统实用性与经济性,不应仅立足于安全监测与灾害防控,还需兼顾尾矿库运行参数的准确掌控与评估,迎合矿山企业安全生产及经济利益的诉求,为库区运营与规划提供决策支持。

在新兴技术交叉应用方面,近些年涌现出的卫星遥感、边坡雷达、摄影测量、智能机器人、无人机、无人船及无人车等新技术与装备,在自然灾害防治领域各显神通,积累了大量成功案例。可尝试借鉴引入到尾矿库灾害防控中,扩充安全监测视角,从技术装备层面提高尾矿库安全保障水准。然而,受卫星轨道竞争、监测区域天气情况等不可预测因素影响,卫星遥感具有无法及时获取合格数据的风险,尤其我国北方地区雾霾天气频繁,使得卫星监测手段具有不确定性;微波遥感、热红外遥感、高分影像等在尾矿库监测中应用范围以及识别解译规则,时间序列数据集构建方法等仍有待深入研究;无人机摄影测量实践过程中图像畸变、强光照、地表反射率等因素会对三维重建模型精确度造成较大影响,该技术应用到尾矿库监测领域中如何优化设计工作参数、提高重建模型精度成为亟需研究的问题。在数据库管理维护方面,受矿石品位下降、矿产品价格波动、选矿技术装备革新、环保标准提升等因素促动,贮存尾矿在未来将具备潜在回采价值,而库区运营与监测数据的合理存储管理,需建立界面更友好、操作更简洁、兼容性与扩展性更强的数据库,为安全管理及闭库、复垦与将来可能的二次回采提供数据支撑。

2.2.3 提高灾害预警精度,缩短预警响应时间,并建立完善应急联动机制

尾矿库溃坝灾害突发性强、演进速度快,灾害应急疏散分秒必争。尤其是我国大量存在的“头顶库”,预警响应时间往往关乎群众生命财产安全,其重要性不言而喻。灾害预警的关键问题在于准确及时地触发警报,迅速制定合理的应急决策,并及时传播到应急响应主体,以提供尽量长的应急疏散时间,即尽可能缩短预警响应时间。因此,除通过优化预警模型增加预警提前度与精度之外,还可借助数值分析、灾害仿真等先进手段,快速评估事故严重性及后果,辅助管理人员制定完善应急准备方案以及警报发出时快速应急决策。针对当前研究存在的不足,可引入无网格法、离心模拟、GIS等先进手段,结合典型事故案例验证分析,以增加溃坝灾害模拟结果可信度。

同时,建立完善高效可靠的信息通讯系统与应急联动机制,提高灾害预警信息发布的准确性与时效性,同样具有重要意义。尾矿库尤其是“头顶库”溃坝灾害往往不单涉及矿山企业,还可能危及下游群众、厂房、医院、学校、古迹等重要设施,并且应急措施的制定与完善、预警信息的发布与传播、灾情动态的实时掌控均需要政府部门、涉灾企业、社会组织与民众团体的共同参与、协调配合。建议进一步健全矿山灾情信息传递与共享体系、救灾物资装备高效统筹调运机制、规范协同工作方案,融合构成由预警触发、应急决策、警报发布、传播通知、紧急处置到解除警报的应急管理闭环全过程,并在库区各致灾形式的日常应急预案演练过程中持续考察改进。

2.2.4 尾矿库灾害防控基础知识的普及宣传

目前公众对于尾矿库基本构成、潜在危害及灾害应急等基础知识的了解普遍存在偏差,并且缺乏学习认知途径。并且近几年受矿业形势波动影响,矿山人才流失严重,部分尾矿库运营及监管人员同样严重缺乏认识,灾害防控与自救互救的意识和能力不足。需进一步加强尾矿库尤其是“头顶库”全体职工及涉灾群体的安全培训与教育,借助宣传专栏、移动终端媒体、集中培训等通俗易懂的形式向公众宣传普及基本知识,帮助公众正确认知尾矿库及其潜在危险性,提高谣言与伪科学的辨别能力,在思想上提高其重视程度,从而保证灾害应急演练实际效果。此外,尾矿库是粉尘与有毒化学物聚集的工作环境,职工的生命健康不可忽视,矿山企业应遵守国家法律法规,重视职业病预防常识宣传工作。

2.2.5 正视事故原因,积极总结教训

事故调查工作的最根本目的在于总结吸取教训,并防止同类事故再次发生,而责任追究只是为实现该目的的手段之一。过度强调责任追究势必忽视教训总结,并可能导致事故发生时涉事人员为逃避惩罚,刻意瞒报谎报事故真相,互相推脱责任,造成更加严重的后果,这也是重大事故频频发生的主要原因之一。因此,事故调查报告不应将大篇幅用在责任划分与人员处分上,而对于事故原因轻描淡写。事故发生原因的深入

挖掘、独立调查、科学论证,多角度、客观还原事故演化过程与后果,将为事故预防、隐患治理、应急措施改进及相关研究等提供一手资料,对于“依法治安、科技强安”的推进、安全生产基础保障能力建设以及政府公信力提升具有深远意义。此外,小型事故或未遂事故同样需要引起各级安全管理人员重视,及时发现事故隐患并采取合理整改措施,将有效防止更大事故的酿成。

3 结论

我国尾矿库数量庞大,“头顶库”安全问题棘手。在“十三五”国民经济稳速发展、矿产资源需求总量维持高位、传统矿业绿色转型的大背景下,尾矿库溃坝灾害防控的研究对于促进防灾减灾理论研究与技术革新、保障矿山安全生产、实现资源绿色开采、维持社会和谐稳定具有重要意义。本文梳理总结了安全监测、预警方法与应急准备、安全管理方法与标准法规这三方面的国内外现状及前沿进展,分析得出如下结论:

(1) 尾矿库安全监测在我国得到高度重视,但监测仪器精度低、效果差、缺乏维护等问题普遍。需针对尾矿库复杂岩土特征及较大变形监测需求,研发高稳定性、高可靠度、高耐久性的专用监测器件,并交叉融合新兴技术丰富监测手段。同时还需提高监测系统的实用性与经济性,从而调动矿山企业建设维护的积极性。此外,中小型尾矿库的安全监测同样不容忽视。

(2) 当前监测数据处理方法过于单一,灾害预警方法在准确率、可靠度等方面存在不足。而大数据、人工智能等理论方法应用于数据分析预测及灾害预警,成为安全管理信息化发展的必然趋势。

(3) 溃坝灾害应急准备及预警决策制定需经过充分科学论证。在国内学者大量研究的基础上,需进一步完善计算方法、提高模型精准度与真实度。同时,规范完善各涉灾主体与政府部门、救援队伍的应急联动机制,对于灾害应急的及时启动与有序开展同样至关重要。

(4) 我国在安全管理方面拥有完善的国家及地方标准规范体系,监管部门协同矿山企业开展了大量工作。但相比与国外,在安全等别划分、全生命周期管理、主体变更等方面仍存在不足。此外还需进一步树立事故原因分析与教训总结的正确导向,加强灾害防控基础知识的普及宣传。

参考文献

- [1] Cai S J, Yang P. Tailings problems and tailings utilization and treatments in the metal mines. *Eng Sci*, 2000, 2(4): 89-92
(蔡嗣经, 杨鹏. 金属矿山尾矿问题及其综合利用与治理. 中国工程科学, 2000, 2(4): 89-92)
- [2] Lottermoser B G. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*, 3rd Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [3] Hudson-Edwards K A, Jamieson H E, Lottermoser B G. Mine wastes: past, present, future. *Elements*, 2011, 7(6): 375-379
- [4] Hudson-Edwards K. Tackling mine wastes. *Science*, 2016, 352(6283): 288-290
- [5] Wang H J, Xue Y Z, Lei X P, et al. *The Report of Mineral Resources Saving & Comprehensive Utilization in China (2016)*. Beijing: Geological Publishing House, 2016
(王海军, 薛亚洲, 雷喜平, 等. 全国矿产资源节约与综合利用报告(2016). 北京: 地质出版社, 2016)
- [6] Ministry of Environmental Protection of P.R. China. *The 2016 Annual Report of Large and Medium Urban Solid Waste Prevention and Control in China*. Beijing: Ministry of Environmental Protection of P.R. China, 2016
(中华人民共和国环境保护部. 2016 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2016)
- [7] Kossoff D, Dubbin W E, Alfredsson M, et al. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Appl Geochem*, 2014, 51: 229-245
- [8] Azam S, Li Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotech News*, 2010, 28(4): 50-54
- [9] ICOLD, UNEP. *Tailings Dams-Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt From Practical Experiences (Bulletin 121)*. Paris, France: International Commission on Large Dams, 2001
- [10] Bowker L N, Chambers D M. *The Risk, Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures*. Stonington, ME: Earthworks, 2015
- [11] WISE Uranium Project. Chronology of major tailings dam failures (from 1960) [EB/OL]. (2017/07/08)[2017/10/19]. <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>

- [12] Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the immediate causes of the failure of the Fundão Dam [EB/OL]. (2016/08/25)[2016-2017]. <http://fundaoinvestigation.com/the-panel-report>
- [13] Byrne P, Hudson-Edwards K, Macklin M, et al. The long-term environmental impacts of the Mount Polley mine tailings spill // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. British Columbia, Canada, 2015
- [14] Guodong M. Quantitative assessment method study based on weakness theory of dam failure risks in tailings dam. *Procedia Eng*, 2011, 26(Supplement C): 1827-1834
- [15] Li C H, Bu L, Chen L G. Research situation of the disaster-causing mechanism of tailing dams and its developing trend. *Chin J Eng*, 2016, 38(8): 1039-1049
(李长洪, 卜磊, 陈龙根. 尾矿坝致灾机理研究现状及发展态势. 工程科学学报, 2016, 38(8): 1039-1049)
- [16] Li Q M, Li H, Li G. Comparative analysis on safety management of tailings ponds in China and Canada. *China Min Mag*, 2017, 26(01): 21-24, 48
(李全明, 张红, 李钢. 中国与加拿大尾矿库安全管理对比分析. 中国矿业, 2017, 26(01): 21-24, 48)
- [17] State Administration of Work Safety. Notifications on issuing the "work plan for the prevention and control of the Overhead Tailings Ponds major accidents" by the State Administration of Work Safety [EB/OL]. (2016/05/26)[2016-2017]. http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_6288/2016/0526/269917/content_269917.htm
(国家安全生产监督管理总局. 国家安全监管总局关于印发《遏制尾矿库“头顶库”重特大事故工作方案》的通知[EB/OL]. (2016/05/26)[2016-2017]. http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_6288/2016/0526/269917/content_269917.htm)
- [18] General Office of the State Council. Notifications on issuing "The 13th Five-Year Plan on Work Safety" by General Office of the State Council [EB/OL]. (2017/02/03)[2017/10/19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/03/content_5164865.htm
(国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发安全生产“十三五”规划的通知[EB/OL]. (2017/02/03)[2017/10/19]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/03/content_5164865.htm)
- [19] Scott M, Lo R, Thavaraj T. Use of instrumentation to safeguard stability of a tailings dam // *7th FMGM 2007: Field Measurements in Geomechanics*. Boston, Massachusetts, 2007: 1-13
- [20] Song Y-S, Cho Y-C, Kim K-S. Monitoring and stability analysis of a coal mine waste heap slope in Korea. *Eng Geo Soc and Terr*. 2015, 2: 217-220
- [21] Rashed M. Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *J Hazard Mater*, 2010, 178(1): 739-746
- [22] Buselli G, Lu K. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods. *J Appl Geophys*, 2001, 48(1): 11-23
- [23] Goldcorp. Tailings monitoring embraces innovation [EB/OL]. (2016/06/05)[2017/12/18]. <https://blog.goldcorp.com/2016/06/05/tailings-monitoring-embraces-innovation/>
- [24] Berghe J-F V, Ballard J, Wintgens J, et al. Geotechnical risks related to tailings dam operations // *Proceedings Tailings and Mine Waste*. Vancouver, BC, Canada, 2011
- [25] Zandarín M T, Oldecop L A, Rodríguez R, et al. The role of capillary water in the stability of tailing dams. *Eng Geo*, 2009, 105(1): 108-118
- [26] Coulibaly Y, Belem T, Cheng L. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine. *Int J Min Sci Technol*, 2017, 27(4): 701-710
- [27] Sjödhahl P, Dahlin T, Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. *Environ Geo*, 2005, 49(2): 267-273
- [28] Colombo D, MacDonald B. Using advanced InSAR techniques as a remote tool for mine site monitoring: international symposium on slope stability in open pit mining and civil engineering // *SAIMM*. Cape Town, South Africa, 2015
- [29] Palmer J. Creeping earth could hold secret to deadly landslides. *Nature*, 2017, 548(7668): 384-386
- [30] Schmidt B, Malgesini M, Turner J, et al. Satellite monitoring of a large tailings storage facility // *Proceedings Tailings and Mine Waste*. Vancouver, BC, Canada, 2015
- [31] Emel J, Plisinski J, Rogan J. Monitoring geomorphic and hydrologic change at mine sites using satellite imagery: the Geita Gold

- Mine in Tanzania. *Appl Geog*, 2014, 54: 243-249
- [32] Minacapilli M, Cammalleri C, Ciralo G, et al. Thermal inertia modeling for soil surface water content estimation: A laboratory experiment. *Soil Sci Soc Am J*, 2012, 76(1): 92-100
- [33] Zwissler B, Buikema N, Oommen T, et al. Thermal Remote Sensing for Mine Tailings Strength Characterization // *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*. Atlanta, Georgia, US, 2014
- [34] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS J Photogramm Rem S*, 2014, 92: 79-97
- [35] Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogramm Eng Rem S*, 2015, 81(4): 281-329
- [36] Peternel T, Kumelj Š, Oštir K, et al. Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements. *Landslides*, 2017, 14(1): 395-406
- [37] State Administration of Work Safety. AQ 2030—2010 *Technical Regulations for the Tailings Pond Safety Monitoring*. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011
(国家安全生产监督管理总局. AQ 2030—2010 尾矿库安全监测技术规范. 北京: 煤炭工业出版社, 2011)
- [38] Ministry of Housing and Urban-Rural Development, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 5118—2015 *Technical Code for Online Safety Monitoring System of Tailings Pond*. Beijing: China Planning Press, 2015
(住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 5118—2015 尾矿库在线安全监测系统工程技术规范. 北京: 中国计划出版社, 2015)
- [39] Li X X, Wang J Y, Niu Y G. Design of seepage line monitoring system for tailings dam based on high density resistivity method. *Ind Mine Autom*, 2013, 39(4): 20-23
(李晓新, 王吉宇, 牛昱光. 基于高密度电阻率法的尾矿坝浸润线监测系统的设计. 工矿自动化, 2013, 39(4): 20-23)
- [40] Yuan Z Q, Yang X C, Zhang D, et al. A new method for online monitoring on beach width of tailings pond. *J Saf Sci Technol*, 2014, 10(7): 71-75
(袁子清, 杨小聪, 张达, 等. 一种用于尾矿库干滩长度在线监测的新方法. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(7): 71-75)
- [41] Chen K, Lu J S, Jin F, et al. Study on metallic-mine tailing dam online monitoring system in extreme weather condition. *Min Metall*, 2014, 23(5): 81-85
(陈凯, 陆得盛, 金枫, 等. 极端气象条件下金属矿山尾矿库在线监测系统研究. 矿冶, 2014, 23(5): 81-85)
- [42] Wang L G, Zhang D, Yang X C, et al. The online monitoring system of a tailings pond based on Zigbee sensing network. *Nonferrous Met Eng*, 2014, (3): 74-77
(王利岗, 张达, 杨小聪, 等. 某尾矿库基于 ZigBee 传感网络的在线监测系统. 有色金属工程, 2014, (3): 74-77)
- [43] Wang L G. Research on the lightning-protection grounding technique for tailings pond safety monitoring system. *Mod Min*, 2012, 28(8): 93-96
(王利岗. 尾矿库安全监测系统防雷接地技术研究. 现代矿业, 2012, 28(8): 93-96)
- [44] Yu L W, Zhang D, Zhang Y S, et al. Study on power supply technology for tailings dam online monitoring system. *Met Mine*, 2016, (2): 122-124
(余乐文, 张达, 张元生, 等. 尾矿库安全在线监测系统供电技术研究. 金属矿山, 2016, (2): 122-124)
- [45] Yu G M, Song C W, Wu Y X, et al. Engineering characteristics and key problems of security monitoring informatization for tailings dams. *Chin J Geotech Eng*, 2011, 33(s1): 56-60
(于广明, 宋传旺, 吴艳霞, 等. 尾矿坝的工程特性和安全监测信息化关键问题研究. 岩土工程学报, 2011, 33(s1): 56-60)
- [46] Li Q S, Li S L, Chen J J. Discussion on the situation and prospect of safeguard for tailing pond. *Chin J Geol Hazard Control*, 2011, 22(1): 99-106
(李青石, 李庶林, 陈际经. 试论尾矿库安全监测的现状与前景. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 99-106)
- [47] Ma G C, Wang L J, Ma S, et al. Research on mine tailing pond safety monitoring based on multiple technology fusion. *China Saf Sci J*, 2016, 26(7): 35-40
(马国超, 王立娟, 马松, 等. 矿山尾矿库多技术融合安全监测运用研究. 中国安全科学学报, 2016, 26(7): 35-40)
- [48] Gao Y Z, Chu Y, Liang W. Remote sensing monitoring and analysis of tailings ponds in the ore concentration area of Heilongjiang

- Province. *Rem S Land Resour*, 2015, 27(1): 160-163
(高永志, 初禹, 梁伟. 黑龙江省矿集区尾矿库遥感监测与分析. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 160-163)
- [49] Liu J, Wang H, Wang Q L, et al. Application of UAV remote sensing technology in open-pit slop mapping. *Infrared Laser Eng*, 2016, 45(S1): 111-114
(刘军, 王鹤, 王秋玲, 等. 无人机遥感技术在露天矿边坡测绘中的应用. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): 111-114)
- [50] Ma G C, Wang L J, Ma S, et al. Application of safety monitoring in open pit based on laser scanning and UAV oblique photography. *J Saf Sci Technol*, 2017, 13(5): 73-78
(马国超, 王立娟, 马松, 等. 基于激光扫描和无人机倾斜摄影的露天采场安全监测应用. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(5): 73-78)
- [51] Wang H L. Application of low altitude photogrammetry to the calculation of soil and stone stripping amount in open-pit mines. *Bull Surv Mapp*, 2014, (S2): 170-172
(王海龙. 低空摄影测量技术在露天矿山土石方剥离工程量计算方面的应用探索. 测绘通报, 2014, (S2): 170-172)
- [52] Azzam R, Arnhardt C, Fernandez-Steeger T. Monitoring and early warning of slope instabilities and deformations by sensor fusion in self-organized wireless ad-hoc sensor networks // *International Symposium and the 2nd AUN/Seed-Net Regional Conference on Geo-Disaster Mitigation in ASEAN-Protecting Life from Geo-Disaster and Environmental Hazards*. Yogyakarta, Indonesia, 2010
- [53] Peters E, Malet J, Bogaard T. Multi-sensor monitoring network for real-time landslide forecasts in early warning systems // *Proceeding conference on mountain risks: bringing science to society*. Florence, Italy, 2010
- [54] Intrieri E, Gigli G, Mugnai F, et al. Design and implementation of a landslide early warning system. *Eng Geol*, 2012, 147: 124-136
- [55] Capparelli G, Tiranti D. Application of the MoniFLaIR early warning system for rainfall-induced landslides in Piedmont region (Italy). *Landslides*, 2010, 7(4): 401-410
- [56] Intrieri E, Gigli G, Casagli N, et al. Brief communication "Landslide Early Warning System: toolbox and general concepts". *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2013, 13(1): 85-90
- [57] Krzhizhanovskaya V V, Shirshov G, Melnikova N, et al. Flood early warning system: design, implementation and computational modules. *Procedia Comput Sci*, 2011, 4: 106-115
- [58] Zare M, Pourghasemi H R, Vafakhah M, et al. Landslide susceptibility mapping at Vaz Watershed (Iran) using an artificial neural network model: a comparison between multilayer perceptron (MLP) and radial basic function (RBF) algorithms. *Arab J Geosci*, 2013, 6(8): 2873-2888
- [59] Huang L, Miao F, Wang M X. Designing and setting up a monitoring and early warning system for tailings ponds in a region. *China Saf Sci J*, 2013, 23(12): 146-152
(黄磊, 苗放, 王梦雪. 区域尾矿库安全监测预警系统设计与构建. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 146-152)
- [60] Wang G Y, Chen X F, Gui W H. Design of real-time warning and evaluation of tailings dam based on multi-information fusion. *Comput Technol Autom*, 2012, 31(4): 80-82
(王刚毅, 陈晓方, 桂卫华. 多源信息融合的尾矿库实时预警与评估系统设计. 计算技术与自动化, 2012, 31(4): 80-82)
- [61] Dong L, Shu W, Sun D, et al. Pre-alarm system based on real-time monitoring and numerical simulation using Internet of Things and cloud computing for tailings dam in mines. *IEEE Access*, 2017, 5: 21080-21089
- [62] Wang X H, Sheng J B, Zhang X N, et al. Study on pre-alarming model of loss of lives due to dam break based on GIS. *J Hydroelectr Eng*, 2011, 30(4): 72-78
(王晓航, 盛金保, 张行南, 等. 基于 GIS 技术的溃坝生命损失预警综合评价模型研究. 水力发电学报, 2011, 30(4): 72-78)
- [63] He X Q, Wang Y H, Mei G D. Study on mechanism and warning criteria of tailings dam-break based on theory of rheology-mutation. *China Saf Sci J*, 2012, 22(9): 74-78
(何学秋, 王云海, 梅国栋. 基于流变-突变理论的尾矿坝溃坝机理及预警准则研究. 中国安全科学学报, 2012, 22(9): 74-78)
- [64] Xie X Y, Wang Y H, Zhang X K, et al. Establishment of regional pre-warning index system for tailings reservoirs. *China Saf Sci J*, 2008, 18(5): 167-171
(谢旭阳, 王云海, 张兴凯, 等. 尾矿库区域预警指标体系的建立. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 167-171)

- [65] Wang Y B, Wang L, Li Z X. Safety evaluation of mine tailings facilities based on HS-BP algorithm. *Syst Eng Theory Pract*, 2012, 32(11): 2585-2590
(王英博, 王琳, 李仲学. 基于 HS-BP 算法的尾矿库安全评价. 系统工程理论与实践, 2012, 32(11): 2585-2590)
- [66] Wang Y B, Nie N N, Wang M Z, et al. Mine tailings facilities safety evaluation of GRNN optimized by modified fruit fly algorithm. *Comput Eng*, 2015, 41(4): 267-272
(王英博, 聂娜娜, 王铭泽, 等. 修正型果蝇算法优化 GRNN 网络的尾矿库安全预测. 计算机工程, 2015, 41(4): 267-272)
- [67] Li J, Li C P, Li C M, et al. Forecasting of infiltration route in tailings dam by Support Vector Regression. *J Saf Sci Technol*, 2009, 5(1): 76-79
(李娟, 李翠平, 李春民, 等. 支持向量回归机在尾矿坝浸润线预测中的应用. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(1): 76-79)
- [68] Dong L, Sun D, Li X. Theoretical and case studies of interval nonprobabilistic reliability for tailing dam stability. *Geofluids*, 2017, 2017
- [69] Wang X X, Yang F B, Ji L N, et al. A method of risk assessment based on flexible similarity measurement and possibility skewness. *J Shanghai Jiao Tong Univ*, 2014, 48(10): 1440-1445
(王肖霞, 杨风暴, 吉琳娜, 等. 基于柔性相似度量 and 可能性歪度的尾矿坝风险评估方法. 上海交通大学学报, 2014, 48(10): 1440-1445)
- [70] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490
- [71] Earth Resources. Management of Tailings Storage Facilities [EB/OL]. (2016/06/09)[2017/11/01]. <http://earthresources.vic.gov.au/earth-resources-regulation/licensing-and-approvals/minerals/guidelines-and-codes-of-practice/management-of-tailings-storage-facilities>
- [72] MAC (The Mining Association of Canada). *A Guide to the Management of Tailings Facilities*. 3rd Ed. Ottawa, Canada: www.mining.ca. 2017
- [73] CDA (Canadian Dam Association). *Summary Report: Workshop on Emergency Management for Dams*. Ottawa, Canada: CDA, 2015
- [74] TSM Tailings Review Task Force. *Recommendations to Strengthen the Mining Association of Canada's Tailings Management Requirements and Guidance*. Ottawa, Canada: MAC (The Mining Association of Canada), 2015
- [75] ICMM (International Council on Mining & Metals). *Position Statement on Preventing Catastrophic Failure of Tailings Storage Facilities*. London, UK: ICMM, 2016
- [76] State Administration of Work Safety. *AQ2006—2005 Safety Technical Regulations for the Tailing Pond*. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006
(国家安全生产监督管理总局. AQ2006—2005 尾矿库安全技术规程. 北京: 煤炭工业出版社, 2006)
- [77] Zhang L T, Qi Q L, Li Q, et al. Experimental model study on dam break and evolution law of tailings pond. *J Hydraul Eng*, 2016, 47(2): 229-235
(张力霆, 齐清兰, 李强, 等. 尾矿库坝体溃决演进规律的模型试验研究. 水利学报, 2016, 47(2): 229-235)
- [78] Zhang X K, Sun E J, Li Z X. Experimental study on evolution law of tailings dam flood overtopping. *China Saf Sci J*, 2011, 21(7): 118-124
(张兴凯, 孙恩吉, 李仲学. 尾矿库洪水漫顶溃坝演化规律试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 118-124)
- [79] Yin G Z, Jing X F, Wei Z A, et al. Experimental study of similar simulation of the tailings dam-break. *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(a02): 3830-3838
(尹光志, 敬小非, 魏作安, 等. 尾矿坝溃坝相似模拟试验研究. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(a02): 3830-3838)
- [80] Zheng X, An H M, Zhang F, et al. Risk control on life loss during tailings dam break. *J Northeast Univ (Nat Sci)*, 2017, 38(4): 566-570
(郑欣, 安华明, 张放, 等. 尾矿坝溃坝生命损失风险控制. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 566-570)
- [81] Liu Y, Qi Q L, Zhang L T. Study on evolution of debris flow from dam break and protection measures. *Met Mine*, 2015, (12): 139-143
(刘洋, 齐清兰, 张力霆. 尾矿库溃坝泥石流的演进过程及防护措施研究. 金属矿山, 2015, (12): 139-143)
- [82] Zhang S C, Zhou K F, Wang X H. Study on the optimization mechanism of risk population distribution over emergency evacuation

- route after dambreak. *J Hydroelectr Eng*, 2014, 33(1): 246-251
(张士辰, 周克发, 王晓航. 水库溃坝条件下应急撤离路径上风险人口分配优化机制研究. 水力发电学报, 2014, 33(1): 246-251)
- [83] Huang S F, Wei Y M, Yang C J, et al. Network model for victim dispatching and its simulation based on geographic information system. *J Nat Disasters*, 1998, 7(3): 65-70
(黄诗峰, 魏一鸣, 杨存建, 等. 灾民撤退网络流模型及其 GIS 模拟技术. 自然灾害学报, 1998, 7(3): 65-70)
- [84] Schoenberger E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. *Resour Policy*, 2016, 49: 119-128
- [85] MAC (The Mining Association of Canada). *Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities*. Ottawa, Canada: www.mining.ca. 2011
- [86] Golder Associates. *Review of Tailings Management Guidelines and Recommendations for Improvement*. London, UK: ICMM (International Council on Mining and Metals), 2016
- [87] Joint Research Centre. *Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities*. Seville, Spain: European Commission, 2009
- [88] Li Z X, Cao Z G, Zhao Y Q. Safety case and PDCA based safety assurance system for mine tailings facilities. *Syst Eng Theory Pract*, 2010, 30(5): 936-944
(李仲学, 曹志国, 赵怡晴. 基于 Safety case 和 PDCA 的尾矿库安全保障体系. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 936-944)
- [89] Wang T, Hou K P, Guo Z S, et al. Application of analytic hierarchy process to tailings pond safety operation analysis. *Rock Soil Mech*, 2008, 29
(王涛, 侯克鹏, 郭振世, 等. 层次分析法 (AHP) 在尾矿库安全运行分析中的应用. 岩土力学, 2008, 29)
- [90] 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 Saf Sci Technol*, 2009, 5(2): 5-9
(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. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(2): 5-9)
- [91] Zhang D, Zhang X P, Yang X C. Key technology and industrial application of on-line monitoring and emergency scheduling assistance system in tailing reservoir. *Min Metall*, 2011, 20(2): 20-25
(张达, 张晓朴, 杨小聪. 尾矿库在线监测及应急指挥系统关键技术及工业应用. 矿冶, 2011, 20(2): 20-25)
- [92] Li Q M, Tian W Q, Wang Y H. Study on displacement analysis methods of tailing ponds on-line monitoring system. *J Saf Sci Technol*, 2011, 07(8): 47-52
(李全明, 田文旗, 王云海. 尾矿库在线监测系统中位移数据分析方法探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 07(8): 47-52)
- [93] Yu G M, Song C W, Pan Y Z, et al. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with development trend in China. *Chin J Rock Mech Eng*, 2014, (S1): 3238-3248
(于广明, 宋传旺, 潘永战, 等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, (S1): 3238-3248)