尾矿库溃坝风险识别与综合风险评估方法研究

张佳乐
内蒙古包头鑫达黄金矿业有限责任公司　内蒙古　包头　014060

摘　要：尾矿库溃坝事故后果严重，科学识别溃坝风险并开展综合风险评估是尾矿库安全管理的基础。本文从尾矿库溃坝致灾机理出发，从坝体稳定性、渗流状态、排洪能力、管理水平和环境条件五个方面识别了溃坝风险源，构建了涵盖工程因素、管理因素和环境因素的综合风险评估指标体系，探讨了基于层次分析法与模糊综合评价相结合的评估方法，并从风险分级管控、监测预警强化、应急预案完善和评估动态更新四个方面提出了评估结果的应用路径。研究认为，建立“风险识别—指标构建—综合评估—分级管控”的评估体系，是提升尾矿库溃坝风险防控能力的有效路径。

关键词：尾矿库；溃坝风险；风险识别；综合评估；安全管理

引言：尾矿库是矿山选矿必备设施，也是行业公认的重大危险源，一旦溃坝，大量尾矿砂和水体瞬间下泄，将对下游居民、农田和基础设施造成毁灭性灾害。近年来，国内外溃坝事故时有发生，教训深刻。溃坝风险受坝体稳定性、渗流状态、排洪能力等工程因素，管理水平、人员素质等管理因素，以及降雨、地震等环境因素共同影响，各因素相互关联，使风险识别与评估成为复杂的系统工程问题。系统识别溃坝风险源，构建科学的综合评估方法，并将结果有效应用于风险管控实践，已成为亟待解决的重要课题。本文从溃坝致灾机理、风险识别、评估方法构建和评估结果应用四个层面展开探讨。

1 尾矿库溃坝致灾机理与风险特征

1.1 尾矿库溃坝的主要模式

尾矿库溃坝主要分为洪水漫顶、渗透破坏、坝体失稳及地震液化四种典型模式。洪水漫顶溃坝最为常见，当入库洪水超出排洪能力时，库水位持续抬升漫过坝顶，水流冲刷坝体快速形成溃口并引发溃坝。渗透破坏溃坝源于坝体、坝基渗流作用诱发管涌、流土等变形隐患，逐步形成渗漏通道，最终造成坝体失稳溃决。坝体失稳溃坝多因抗滑稳定系数不足，在自重、水压力及渗透力耦合作用下发生滑坡坍塌。地震液化溃坝是地震扰动导致尾矿砂液化失强，引发坝体流动破坏。不同溃坝模式的触发条件与演化规律差异显著，需针对性开展风险识别与评估。

1.2 尾矿库溃坝的致灾因素

尾矿库溃坝致灾因素主要分为工程、管理和环境三类，多因素耦合引发险情。工程因素为内在诱因，包含坝体结构缺陷、建材质量不达标、排渗排洪设施不完善、坝基处理不到位等基础性隐患。管理因素为人为诱因，体现在安全制度不健全、日常巡检不到位、隐患治理滞后、从业人员素质偏低、应急处置能力不足等管理漏洞。环境因素属于外部诱因，强降雨、地震等自然灾害易触发溃坝，下游人口、设施密集会放大灾害后果。三类因素相互作用，共同决定溃坝风险等级，因此风险识别需统筹工程、管理与环境全方位因素[1]。

1.3 尾矿库溃坝风险的主要特征

尾矿库溃坝风险具备隐蔽性、突发性、耦合性、危害性强及难预见等显著特征。坝体内部渗流、坝基管涌等隐性隐患难以通过常规巡查发现，风险长期潜伏积累。多数溃坝险情发展速度快，短时间内即可完成灾变过程，突发特性突出。各类致灾因素相互关联、连锁演化，极易形成复合型风险。溃坝后尾矿流体冲击力大、波及范围广，易造成人员伤亡与严重生态破坏。受监测技术与评估手段限制，溃坝精准预判难度较大，因此需采用系统化思维，全方位开展溃坝风险评估与防控。

2 尾矿库溃坝风险识别

2.1 坝体稳定性风险识别

坝体稳定是尾矿库安全运行的基础，风险识别需重点核查多项内容。坝体几何参数方面，核查坝高、坝坡、坝顶宽度是否符合设计，排查坝坡过陡、坝体超高问题。坝体材料重点检验尾矿颗粒级配、密实度与抗剪强度，查找软弱夹层。坝基需评估岩土承载力与压缩特性，判别软弱地基隐患。同时巡查坝体有无裂缝、沉降、位移、塌陷隆起等变形迹象，检查排渗褥垫、排渗井是否堵塞失效。综合采用现场勘查、勘察与在线监测手段，识别坝体稳定性隐患，预判坝体失稳风险。

2.2 渗流状态风险识别

渗流状态是尾矿安全的核心指标，渗流风险识别围绕多项监测与现场现象开展。重点对比实测浸润线与设计控制值，判断是否逼近临界高度；关注渗流量变化，警惕流量突增。观察渗水水质，若水体浑浊、携带尾矿颗粒，则存在渗透变形风险。排查坝脚、坝基、坝肩等位置渗水出逸情况，识别管涌、流土迹象。依托渗压计监测孔隙水压力，校核渗透坡降是否超出允许范围。结合在线监测数据与现场巡查，综合研判渗流状态，判断是否存在渗透破坏风险。

2.3 排洪能力风险识别

排洪能力是尾矿库防洪安全的关键保障。风险识别首先检查排洪塔、排水管、溢洪道等构筑物完好状况，排查堵塞、破损、变形缺陷。复核泄流能力，校验能否满足设计洪水与校核洪水标准。核查调洪库容是否被尾矿淤积占用，评估库容是否达标[2]。同时核验干滩长度是否满足设计要求，管控库水位，防止水位超限逼近坝顶。依靠现场设施检查与水文计算，综合评估库区防洪能力，识别排洪短板，研判洪水漫顶溃坝发生的可能性。

2.4 管理水平风险识别

管理水平直接影响尾矿库安全，管理风险识别从制度、人员、监测、隐患治理、应急等维度开展。核查安全管理制度、操作规程、应急预案是否完备并落地执行。确认管理人员资质能力，落实常态化培训。检查安全巡检、在线监测系统运行状况，保证监测数据真实有效。跟踪隐患排查治理工作，确认整改闭环。核查应急物资储备、应急演练开展情况，评估应急响应速度。摸排下游居民与重要设施，建立多方联动机制。通过资料审查、现场问询，识别安全管理漏洞。

2.5 环境条件风险识别

环境条件属于溃坝的外部诱发因素，环境风险识别需综合多方面资料。分析库区降雨总量、雨强与历史暴雨记录，评估暴雨是否超出设计标准。评估区域地震烈度与活动性，判断地震诱发尾矿液化、坝体失稳的可能性。核算上游汇水面积、洪水总量与重现期，评估洪水是否超出排洪设施承载能力。调查下游人口、重要工程与生态敏感目标，评估溃坝灾害损失程度。同时排查库区滑坡、泥石流等地质灾害隐患，通过水文气象、地震评价与实地调查，评估外部致灾风险等级。

3 尾矿库溃坝综合风险评估方法

3.1 评估指标体系的构建

评估指标体系是综合评估的基础。尾矿库溃坝综合风险评估指标体系应涵盖工程因素、管理因素和环境因素三个维度。工程因素维度包括坝体稳定性、渗流状态和排洪能力三个一级指标，坝体稳定性下设坝高、坝坡坡度、坝体材料、坝基条件、变形迹象等二级指标，渗流状态下设浸润线位置、渗流量、渗流水质、渗透坡降等二级指标，排洪能力下设排洪设施完好性、排洪能力充足性、调洪库容、干滩长度等二级指标。管理因素维度包括制度健全性、人员素质、检查监测、隐患治理、应急能力等一级指标，各一级指标下设若干二级指标。环境因素维度包括降雨条件、地震条件、洪水条件、下游条件等一级指标，各一级指标下设若干二级指标。指标体系应全面覆盖溃坝风险的主要影响因素，指标选取应遵循科学性、系统性、可操作性和独立性原则。

3.2 评估指标权重的确定

指标权重反映各指标对溃坝风险的影响程度，权重确定是综合评估的关键。常用的权重确定方法包括层次分析法、熵权法和专家打分法。层次分析法通过构建判断矩阵，对各指标进行两两比较，确定各指标相对重要性，适用于指标层次结构清晰、专家经验丰富的场景。熵权法根据指标数据的离散程度确定权重，数据离散程度越大权重越大，适用于有大量监测数据的场景。专家打分法通过邀请专家对指标重要性进行打分，确定权重，适用于数据缺乏但专家经验丰富的场景。实际评估中，可将层次分析法与熵权法结合，采用组合赋权方法确定权重，既考虑专家经验，又利用数据信息，提高权重的科学性和客观[3]。

3.3 综合评估模型的建立

综合评估模型是评估方法的核心。尾矿库溃坝综合风险评估可采用模糊综合评价法，其基本步骤为：确定评估因素集和评语集，评估因素集为各评估指标，评语集为溃坝风险等级，如低风险、中风险、高风险、极高风险四级；构建隶属度函数，确定各指标对各风险等级的隶属度；进行模糊综合评判，将指标权重与隶属度矩阵合成，得到综合评判结果；根据最大隶属度原则确定溃坝风险等级。模糊综合评价法能够处理评估中的模糊性和不确定性问题，适用于尾矿库溃坝风险这种多因素、多层次的复杂系统评估。此外，也可采用灰色关联分析法、物元分析法等方法进行综合评估，或采用多种方法相互验证，提高评估结果的可靠性。

3.4 评估流程与步骤

尾矿库溃坝综合风险评估应按照规范的流程和步骤开展。第一步，资料收集与现场调查，收集尾矿库设计资料、运行记录、监测数据和检查报告，开展现场调查，掌握尾矿库实际情况。第二步，风险识别，根据资料和调查结果，从工程、管理、环境三个方面识别溃坝

风险源和风险因素。第三步，指标体系构建，根据风险识别结果，构建综合评估指标体系，确定各指标的计算方法和取值标准。第四步，指标权重确定，采用层次分析法或组合赋权方法确定各指标权重。第五步，综合评估，采用模糊综合评价法或其他方法进行综合评估，确定溃坝风险等级。第六步，结果分析与应用，分析评估结果，找出主要风险因素，提出风险管控措施，将评估结果应用于安全管理实践。

4 尾矿库溃坝风险评估结果的应用

4.1 风险分级管控

风险评估结果应用于风险分级管控。根据综合评估确定的风险等级，将尾矿库划分为不同风险级别，实施差异化管控。低风险尾矿库实行常规管控，按规定的周期和项目开展安全检查和监测。中风险尾矿库实行重点管控，加密安全检查和监测频次，加强隐患治理和应急准备。高风险尾矿库实行严格管控，增加安全检查和监测频次，限期整改重大隐患，落实应急值守和下游联动。极高风险尾矿库实行特别管控，立即采取降低库水位、加固坝体等应急措施，必要时实施下游人员转移。风险等级应动态调整，根据评估结果变化及时更新管控措施。

4.2 监测预警强化

风险评估结果应用于监测预警强化。根据评估识别的主要风险因素，有针对性地加强监测预警。对坝体稳定性风险高的尾矿库，加强位移和变形监测；对渗流风险高的尾矿库，加强浸润线和渗流量监测；对排洪风险高的尾矿库，加强库水位和干滩长度监测[4]。根据风险评估结果，合理确定预警阈值，建立与风险等级相匹配的多级预警机制。将监测预警与风险评估联动，根据监测数据变化动态调整风险评估结果，实现风险的动态感知和预警。

4.3 应急预案完善

风险评估结果应用于应急预案完善。根据评估识别的溃坝模式和影响范围，编制针对性的应急预案。对洪水漫顶溃坝风险高的尾矿库，重点制定洪水调度和人员转移预案；对渗透破坏溃坝风险高的尾矿库，重点制定渗流险情处置和坝体加固预案；对地震液化溃坝风险高的尾矿库，重点制定地震应急和快速响应预案。根据风险评估结果确定应急物资储备种类和数量，组建应急队伍，定期开展应急演练。将风险评估结果与下游联动机制衔接，根据溃坝影响范围确定下游预警和转移方案。

4.4 评估动态更新

风险评估结果应动态更新，保持评估的时效性。尾矿库运行条件变化时，如坝体加高、排渗设施改造、库水位变化等，应及时更新评估。监测数据出现异常时，应及时分析原因，必要时重新评估。法规标准变化时，应及时调整评估指标和标准。定期开展全面评估，如每年至少开展一次综合评估，每季度开展一次风险检查。将动态评估结果纳入安全管理档案，为安全管理决策提供持续支撑。建立评估结果与管控措施的联动机制，确保评估结果及时转化为管控行动。

结束语

尾矿库溃坝风险识别与综合风险评估是尾矿库安全管理的基础工作。本文从尾矿库溃坝致灾机理出发，从坝体稳定性、渗流状态、排洪能力、管理水平和环境条件五个方面识别了溃坝风险源，构建了涵盖工程因素、管理因素和环境因素的综合风险评估指标体系，探讨了基于层次分析法与模糊综合评价相结合的评估方法，并从风险分级管控、监测预警强化、应急预案完善和评估动态更新四个方面提出了评估结果的应用路径。未来，随着监测技术、数值模拟和人工智能技术的发展，尾矿库溃坝风险评估将向定量化、动态化和智能化方向持续演进，为尾矿库安全运行提供更加有力的保障。

参考文献

[1]华清,姚琴琴.尾矿库溃坝风险因素识别与风险评价研究[J].科技资讯，2026，24(4):205-208.

[2]陈星.洪水漫顶工况下畚箕窝尾矿库溃坝数值模拟[J].长江科学院院报，2026，43(4)：99-106.

[3]叶佳文,刘珮勋,李海港,等.基于AISM-MICMAC模型的尾矿库溃坝原因分析及防控研究[J].河南理工大学学报（自然科学版）,2025,44(6):75-82.

[4]李振涛,付士根,郭利,等.卫星遥感影像在尾矿库安全风险监测中的应用研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(3):126-132.