

高坝水库诱发地震机理及其风险评估方法

梁浩鹏

湖北省人才发展集团有限公司 湖北 武汉 430000

摘要：高坝水库诱发地震机理复杂，涉及地质构造、水体荷载、水文地质等因素相互作用。本文分析了诱发地震的主要影响因素与形成过程，阐述了风险评估的原则与框架，探讨了地震可能性、强度、影响范围及潜在损失等核心评估内容，介绍了地质、数值、物理模拟及综合评估方法。为高坝水库诱发地震的风险防控提供理论支撑与方法指导。

关键词：高坝水库；诱发地震；机理分析；风险评估；数值模拟

引言

随着高坝水库建设规模扩大，其蓄水可能诱发地震的问题日益凸显。高坝水库诱发地震不仅威胁工程安全，还可能对周边区域造成严重影响。深入探究其诱发地震机理，构建科学的风险评估体系，对于保障水库安全运行、降低潜在灾害损失具有重要意义。本文围绕高坝水库诱发地震机理及其风险评估方法展开研究，以期对相关领域提供参考。

1 高坝水库诱发地震的机理分析

1.1 诱发地震的主要影响因素

地质构造条件是诱发地震的基础因素。断层的分布密度与活动性直接关联地震发生的可能性，活动性断层本身处于应力积累状态，水库蓄水带来的外界扰动可能打破其力学平衡，成为地震触发的薄弱点^[1]。岩体的完整性与破碎程度也有重要作用，破碎岩体中裂隙发育为地下水渗透提供通道，加速应力传递与调整。水库水体荷载通过重量与压力双重作用影响地壳应力。水位升高形成的巨大水体重量会对地壳表层产生附加压力，使下方岩体应力状态发生改变。水位变化速率与幅度进一步加剧这种影响，快速升降会导致应力频繁波动，增加断层活化风险。水文地质条件通过地下水运动参与诱发过程。地下水的分布范围与渗透特性决定其对岩体的作用范围，高渗透性岩层中地下水易沿裂隙扩散，扩大应力影响区域。地下水的静水压力会降低岩体抗剪强度，使断层面摩擦力减小，更易发生滑动。

1.2 诱发地震的形成过程

水库蓄水初期，水体重量逐渐施加于库区地壳，使原有应力场开始重新分布。浅层岩体首先承受附加压力，这种压力通过岩体骨架向深部传递，逐步改变区域应力状态，使某些断层周边应力集中程度提升。随着蓄水持续，地下水在水头差作用下向岩体裂隙与断层带渗

透。渗透过程中，地下水填充裂隙空间，通过孔隙水压力效应降低岩体有效应力，同时软化断层带内的软弱物质，削弱断层整体稳定性。当渗透作用达到一定程度，断层面抗剪能力降至临界值，开始出现微量滑动。断层微量滑动引发地壳应力进一步调整，周边岩体应力不断向滑动区域转移，导致应力集中部位能量快速积累。当能量积累超过岩体所能承受的极限，断层将发生突然错动，释放大能量，引发地震波传播，形成诱发地震。这一过程中，水体荷载的持续作用与地下水的长期渗透共同维持应力调整趋势，推动整个诱发过程从缓慢积累走向快速释放。

2 高坝水库诱发地震风险评估的原则与框架

2.1 风险评估的基本原则

科学性原则要求风险评估依托地质、力学、水文等多学科理论支撑。评估过程需运用地质构造解析方法明确断层分布特征，借助岩体力学原理分析断层稳定性，结合水文动力学规律判断地下水渗透路径^[2]。各项分析均需以学科理论为依据，避免主观判断，确保评估结果能客观反映风险本质。系统性原则强调全面考量各类影响因素及相互作用。需将地质条件、水库特征、水文状况等要素纳入统一分析体系，既要关注单一因素的独立作用，也要分析因素间的关联效应。例如地质构造与水位变化的协同作用、地下水渗透与岩体强度的相互影响，通过系统整合实现对风险的整体把握。动态性原则注重跟踪水库运行过程中的条件变化。水库水位的周期性升降、岩体力学性质的长期演化、断层应力状态的持续调整等，都会使风险处于动态变化中。评估需建立动态更新机制，定期收集新的监测数据，及时调整评估参数，使结果与实际情况保持一致，提升风险评估的时效性。

2.2 风险评估的基本框架

信息收集阶段需全面整合地质、水文、工程等基础

资料。地质资料包括区域构造图、岩体性质报告、断层活动性鉴定结果；水文资料涵盖地下水分布数据、水位变化记录、渗透系数测定值；工程资料包含坝体设计参数、水库运行方案等。通过多源信息汇总，为后续评估提供完整的数据支撑。风险识别环节聚焦明确潜在地震风险点。依据信息收集结果，结合地质构造特征划定可能发生诱发地震的区域，识别易受地震影响的薄弱部位，如断层密集带、岩体破碎区等。同时分析不同风险点可能引发的地震强度与影响范围，为针对性评估奠定基础。风险分析阶段深入探究风险的成因与程度。运用数值模拟技术重现应力场变化过程，结合地质力学分析判断断层活化概率，通过地震活动性分析推测潜在地震的发生频率。综合多维度分析结果，确定不同风险点的风险等级，明确高风险区域的分布特征。风险表征环节对风险进行量化或定性描述。量化描述可采用概率值表示地震发生可能性，用峰值加速度等参数反映地震强度；定性描述可通过风险等级划分呈现风险严重程度。通过规范的表征方式，使风险评估结果清晰易懂，为决策提供明确依据。

3 高坝水库诱发地震风险评估的核心内容

3.1 地震可能性评估

地震可能性评估需综合各类影响因素判断诱发地震发生的概率水平。地质构造条件是基础依据，需重点分析库区及周边断层的活动性，通过地质勘察明确断层的最新活动时间、滑动速率等参数，活动性强的断层往往具有更高的诱发可能性^[1]。水库蓄水带来的水体荷载变化需纳入分析，水位大幅上升时附加应力向地壳深层传递，可能打破原有应力平衡，增加断层活化概率。水文地质特征同样关键，地下水渗透能力强的区域，岩体孔隙水压力更易升高，加速断层弱化过程。评估过程中需结合多因素相互作用，通过数值模拟计算不同工况下的地震发生概率，再结合区域地震活动历史背景，划分高、中、低三个可能性等级，为风险防控提供明确方向。对于断层交汇区域或历史上曾发生过微震活动的地段，需提高评估频次，动态追踪风险变化趋势。

3.2 地震强度评估

地震强度评估聚焦确定可能诱发地震的震级、震源深度等关键参数。震级大小与断层错动规模直接相关，需根据断层长度、破碎带宽度等地质参数推测最大可能错动量，再结合岩体弹性模量等物理性质估算释放的能量，进而判断震级范围。震源深度受应力分布特征影响，浅层断层在水体荷载作用下更易发生浅源地震，这类地震对地表建筑物影响更为显著。评估需参考诱发地

震机理，分析水体荷载与断层应力积累的关系，同时考虑岩体强度差异，坚硬岩体中能量积累到一定程度可能引发较强地震，而软弱岩体可能通过缓慢滑动释放能量，降低地震强度。通过综合分析各类因素，推测地震可能达到的最高强度，为工程抗震设计提供重要依据。评估中还需关注水库运行年限对地震强度的潜在影响，长期蓄水可能使岩体力学性质发生渐进变化，进而改变地震强度的发展趋势。

3.3 地震影响范围评估

地震影响范围评估需结合地震波传播规律与地形地貌特征确定受影响区域边界。地震波从震源向外扩散时，能量随传播距离逐渐衰减，坚硬岩层中地震波衰减较慢，影响范围相对较广，而松散沉积物会加速能量耗散，缩小影响范围。地形地貌对地震波传播有显著干扰，山脉可能阻挡或反射地震波，形成局部放大效应，河谷地带则可能因土层共振加剧震动强度。评估过程中需绘制地震烈度分布图，根据不同区域的地面运动参数划分烈度等级，明确坝体、库区周边城镇、交通干线等重要设施的受影响程度。同时考虑地震引发的次生灾害影响范围，如滑坡、崩塌可能扩大灾害覆盖区域，需将其纳入整体评估范围。对于水库下游的低洼区域，还需评估地震引发溃坝导致洪水蔓延的影响范围，确保评估的全面性。

3.4 潜在损失评估

潜在损失评估需全面分析地震可能造成的各类损害，涵盖直接损失与间接损失。直接损失主要涉及工程设施与生命财产，大坝结构可能因震动出现裂缝、坝体失稳等问题，需根据坝体材料强度、抗震设计标准评估损坏程度；周边建筑物根据抗震能力差异，可能出现墙体开裂、结构坍塌等情况，农村低矮建筑与城市高层建筑面临不同的破坏风险。人员伤亡风险需结合人口密度与建筑物倒塌概率综合判断，人口密集区域潜在伤亡人数相对较多。间接损失包括水库功能中断导致的供水、发电效益下降，交通线路损毁引发的物流受阻，以及灾后重建对区域经济的长期影响。评估需梳理各类损失的关联关系，通过定性描述与量化估算结合的方式，呈现损失的严重程度，为制定应急方案与减灾措施提供全面参考。还需考虑生态环境的潜在损失，地震可能破坏库区周边的生态系统，影响生物多样性与生态功能的稳定发挥。

4 高坝水库诱发地震风险评估的主要方法

4.1 地质分析方法

地质分析方法以野外勘察为基础，通过系统梳理区

域地质构造特征判断诱发地震的潜在条件。对断层的分布形态、延伸长度及活动性进行详细勘察,借助地质填图标记断层走向与交汇关系,识别可能受水库蓄水影响的活跃断层段^[4]。地层岩性分析需确定岩体的完整性与力学性质,采集岩芯样本观察裂隙发育程度,判断岩体抗渗透能力与应力传递特性。地层接触关系研究有助于明确不同岩性界面的分布,这类界面可能成为应力集中或地下水渗透的薄弱带。地质分析还需结合区域构造演化历史,通过地层沉积序列与岩浆活动痕迹,推断地壳应力场的演化趋势。通过整合各类地质信息,划分出诱发地震高风险区域,为后续评估提供基础框架,使风险评估建立在对地质条件的深刻认知之上。

4.2 数值模拟方法

数值模拟方法借助数学模型量化水库蓄水引发的地质过程,实现对诱发地震风险的定量分析。构建三维地质模型再现库区地壳结构,将断层、地层界面等关键地质要素转化为模型中的边界条件。基于岩体力学理论建立应力分析方程,模拟水体荷载作用下地壳应力的分布与变化,计算不同水位工况下断层带的应力增量。地下水渗透模拟需纳入达西定律,通过设定渗透系数与边界水头,再现地下水在岩体裂隙中的运移路径及孔隙水压力的分布特征。将应力变化与孔隙水压力耦合分析,可预测断层的稳定性变化趋势,推算不同时间节点的滑动概率。数值模拟还能通过参数敏感性分析,确定对诱发地震影响显著的关键因素,为风险防控提供靶向性依据。模拟结果以应力云图、位移矢量等形式呈现,使抽象的地质过程转化为直观的量化信息。

4.3 物理模拟方法

物理模拟方法通过实验室缩尺模型再现水库诱发地震的关键过程,验证理论分析与数值模拟的合理性。依据相似原理构建地质力学模型,选用与原型岩体物理性质相似的材料模拟地层结构,通过添加金属薄片或软弱夹层模拟断层带。模型加载系统可模拟水体荷载的施加过程,通过液压装置实现水位升降的动态控制,同步监测模型内部的应力变化与位移响应。孔隙水压力模拟需在模型中嵌入微型传感器,记录不同渗透条件下压力值的分布与演化。物理模拟可直观展现断层从稳定到活化的全过程,观察岩体裂隙的萌生与扩展规律,捕捉地震

发生前的先兆性变形。通过改变模型参数如断层倾角、岩体强度等,研究单一因素变化对诱发过程的影响程度,为多因素交互作用分析提供实验支撑。物理模拟结果能有效弥补理论分析中简化假设带来的偏差,增强风险评估的可信度。

4.4 综合评估方法

综合评估方法通过整合多种方法的结果实现风险评估的全面性与系统性。收集地质分析划定的高风险区域、数值模拟得出的概率参数及物理模拟验证的关键阈值,建立多源信息数据库。对不同方法的评估结果进行一致性检验,分析地质分析的定性结论与数值模拟的定量结果是否匹配,物理模拟的实验现象是否符合理论预期。针对存在差异的评估结论,需追溯方法原理与参数选取的合理性,通过补充勘察或模型优化消除矛盾。综合评估需融入专家经验,组织地质、力学、水文等领域专家对评估结果进行研判,结合类似工程的诱发地震案例,修正评估参数与风险等级划分标准。最终形成的综合评估报告需涵盖各类方法的核心发现,明确风险评估的主要结论与不确定性来源,提出针对性的风险防控建议,为工程决策提供全面且可靠的依据。

结束语

高坝水库诱发地震风险评估需综合地质、力学、水文等多学科理论,结合数值模拟与物理实验,构建系统化的评估框架。通过科学划分风险等级、量化关键参数,可有效识别高风险区域,为工程抗震设计与应急管理提供依据。未来研究应进一步优化评估模型,提升动态监测能力,以应对复杂地质条件下的不确定性挑战,保障高坝水库长期安全运行。

参考文献

- [1]孙超.高坝水库诱发地震机理及其风险评估方法[J].中国高新科技,2025(7):146-148.
- [2]张鹏,孙新蕾,肖卓.新丰江水库地震活动诱因综合分析及展望[J].大地构造与成矿学,2025,49(3):481-491.
- [3]陈湛.降雨及地震作用下水库坝体失稳模式分析[J].水利科学与寒区工程,2025,8(4):33-36.
- [4]马丽君.基于混凝土水库大坝地震响应的数值模拟研究[J].水利科技与经济,2025,31(6):22-26.