

构造型水库诱发地震震级预测与探讨

蔡志权

湖北省人才发展集团有限公司 湖北 武汉 430000

摘要：构造型水库诱发地震因震级较高具有显著威胁，其震级受地质构造、水库参数及区域应力场等因素影响。地质构造中活动断裂带的规模、导水能力及力学性质是关键，水库蓄水深度、库容及水位变化速率通过改变岩体应力产生作用，区域应力场与附加应力叠加加剧断裂带活动。预测方法包括地质类比法、经验统计法、数值模拟法及综合评估法，各方法从不同维度推测震级。对这些因素及方法的探讨，可为水库工程地震风险评估与防控提供依据。

关键词：构造型；水库诱发地震；震级预测

引言

水库诱发地震中，构造型因震级较高对工程安全及区域发展构成潜在威胁。其发生与活动断裂带、库水渗透及应力失衡密切相关，震级受地质构造、水库参数和区域应力场等多因素综合作用。准确预测震级是水库建设前期风险评估的核心。本文基于构造型水库诱发地震的特征，分析影响震级的关键因素，探讨现有预测方法的原理与应用，旨在为提升地震风险评估科学性及其制定应对策略提供参考。

1 构造型水库诱发地震概述

水库诱发地震指原本地震活动微弱甚至无地震的区域，因水库蓄水这一人类工程活动而引发的地震现象。其类型多样，其中构造型水库地震在水库诱发地震中具有特殊地位。从地质条件看，区域性或地区性断裂带贯穿库坝区是构造型水库地震发生的重要前提。这类断裂带需在上更新世以来有明显构造活动，且沿断裂带有地震活动记载，这意味着断裂带处于活跃状态，岩体中储存了较高应变能。断裂带还得具备一定规模和导水能力，以便库水能够沿其向深部集中渗透。当库水渗透至深部，会使断裂面的抗剪强度降低，原本处于平衡状态的岩体应力失衡，促使能量急剧释放，进而诱发地震。从震例特征分析，构造型水库地震的震中常位于断裂带附近，震源深度一般在3至5千米，最深可达约8千米，相对较浅。其震级较高，目前记录到的最强震级达6.5级。蓄水深度或水压力大小与发震的相关性并不显著。例如美国格兰峡水库、佛莱明峡水库等，这些位于多震区、强震区或曾发生破坏性地震地区的水库，蓄水后微震、弱震明显增多，中强震却很少出现。部分学者认为，这是由于库水促使岩体中蕴集的应变能提前释放，从而使原有地震活动性减弱。构造型水库地震成因复杂，岩体贮存的构造能是内因，水库蓄水则是触发地震的重要外

因。尽管水库诱发地震整体发生率较低，但构造型水库地震一旦发生，因其震级较高，可能对周边地区的基础设施、生态环境以及居民生命财产安全造成较大威胁。在水库建设前期，全面且深入地开展地质勘察工作，精准评估构造型水库地震发生的可能性，并制定科学有效的应对策略，对保障水库工程安全以及区域可持续发展意义重大。

2 影响构造型水库诱发地震震级的因素

2.1 地质构造条件

地质构造条件在影响构造型水库诱发地震震级方面扮演着极为关键的角色。区域性或地区性断裂带若贯穿库坝区，且该断裂带在上更新世以来呈现出明显构造活动迹象，沿断裂带又有地震活动记载，那么其规模与导水能力对地震震级影响重大。规模较大的断裂带，意味着岩体中储存的应变能更为可观，一旦受到库水作用，所能释放的能量基数大，也就为高震级地震的发生提供了潜在能量基础。断裂带良好的导水能力，使得库水能够更为顺畅地向深部集中渗透。当大量库水渗透至深部，会极大程度降低断裂面的抗剪强度，原本处于相对平衡状态的岩体应力体系被打破，促使岩体应力重新调整与分配。在这个过程中，能量急剧释放，如果断裂带规模足够大且积累的应变能充足，就极有可能诱发高震级的地震。例如，在一些具有大型活动断裂带贯穿库区的案例中，发生的构造型水库诱发地震震级明显偏高。断裂带的力学性质和组合形式也不容忽视。脆性较强的断裂带在受到库水影响后，更容易发生脆性破裂，相较于韧性断裂带，其破裂过程更为突然且能量释放更为集中，更易引发较高震级的地震。多条断裂带相互交织、组合的区域，应力传递和分布更为复杂，库水作用下不同断裂带之间可能相互影响、协同作用，进一步增加了高震级地震发生的可能性。当一条断裂带在库水作用下

应力状态改变发生滑动,其产生的应力扰动可能会传递到与之相关联的其他断裂带上,促使其他断裂带也发生滑动或变形,从而导致能量的叠加释放,抬升地震震级^[1]。

2.2 水库参数

水库参数中的蓄水深度、库容以及水位变化速率等,与构造型水库诱发地震震级存在着紧密联系。蓄水深度和库容直接决定了水库水体荷载对库区岩体施加压力的大小和范围。较大的蓄水深度和库容,意味着更强大的水体荷载。这种荷载会使库区岩体承受额外的压力,改变岩体原有的应力状态。当岩体无法承受这种附加应力时,就会发生变形和破裂。若库区地质构造条件本身就有利于地震发生,如存在活动断裂带等,那么在强大水体荷载作用下,岩体应力失衡加剧,更容易触发地震,且震级可能较高。例如,一些高坝大库,由于蓄水深度大、库容巨大,在蓄水过程中,库区周边地震活动明显增强,甚至出现了相对较高震级的地震。水位变化速率也是一个重要因素。快速的水位升降会导致库水对岩体的压力迅速改变,在岩体内部产生较大的动水压力和孔隙水压力变化。这种快速变化的压力作用,会使岩体的有效应力状态发生急剧改变,尤其是在断裂带等薄弱部位,更容易引发岩体的错动和破裂。相比缓慢的水位变化,快速的水位变化更有可能触发较高震级的地震。在水库调度过程中,如果频繁且大幅度地调整水位,就会增加高震级地震发生的风险。例如,在某些水库进行应急泄洪等操作导致水位快速下降时,库区周边出现了震级相对较高的地震活动。

2.3 区域应力场

区域应力场是影响构造型水库诱发地震震级的重要外部因素。天然的区域应力场本身处于一种复杂的应力平衡状态,当水库蓄水后,这一平衡被打破。水库蓄水产生的附加应力与区域应力场相互叠加,使得库区岩体所受应力状态发生显著改变。若区域应力场原本就处于较高的应力水平,且方向与库区断裂带的走向存在特定关系,当水库蓄水带来的附加应力与区域应力场应力在断裂带上形成同向叠加时,会极大地增加断裂带的应力集中程度。这种高度的应力集中,使得断裂带更容易发生滑动和破裂,从而为高震级地震的发生创造了有利条件。例如,在一些处于区域构造应力集中区域的水库,蓄水后地震活动显著增强,震级也相对较高。区域应力场的动态变化也会对构造型水库诱发地震震级产生影响。地球内部的构造运动是持续进行的,区域应力场也会随之发生缓慢但持续的变化。在水库蓄水后,这种动态变化的区域应力场与水库蓄水产生的附加应力相互作

用更为复杂。如果在水库蓄水后的某个阶段,区域应力场恰好发生有利于断裂带滑动的变化,如应力方向调整为更易促使断裂带错动,再加上水库蓄水的附加影响,就可能引发较高震级的地震。区域应力场的变化还可能影响到断裂带之间的相互作用关系,原本相对稳定的断裂带在区域应力场变化及水库附加应力的共同作用下,可能变得活跃,进而增加了高震级地震发生的概率^[2]。

3 构造型水库诱发地震震级预测方法

3.1 地质类比法

(1)地质类比法以已发生构造型水库诱发地震的案例为参照,通过对比目标库区与已知震例在地质构造特征上的相似性来推测震级。具体而言,会系统分析已知震例中库区的断裂带规模、活动历史、力学性质,以及岩体应变能积累状况等关键地质参数,再将这些参数与目标库区进行逐一比对。若目标库区的断裂带规模、活动性、导水能力等指标与某高震级震例高度吻合,则可推断其存在发生相近震级地震的潜在可能,反之则参考低震级案例的特征进行评估。(2)该方法注重对断裂带组合形式和区域构造背景的类比分析。在已知案例中,多条断裂带交织区域往往比单一断裂带更易发生高震级地震,这一规律可用于判断目标库区断裂带组合区域的地震风险。区域地质演化历史的相似性也至关重要,若目标库区与已知震例在地质年代的构造运动强度、应力积累过程等方面具有一致性,那么其在水库蓄水后的地震响应也可能呈现相似特征,为震级预测提供重要依据。(3)地质类比法的有效性依赖于震例数据库的丰富性和可比性,需对选取的参照案例进行严格筛选,排除因特殊地质条件导致的偶然震例,确保类比参数的代表性和可靠性。通过量化分析相似性指标,如断裂带长度、活动频率、库水渗透深度等与震级的关联度,可进一步提升预测结果的准确性,为水库前期地质勘察中的地震风险评估提供直观且实用的参考^[3]。

3.2 经验统计法

(1)经验统计法基于大量构造型水库诱发地震的实测数据,通过建立震级与影响因素之间的统计模型来进行预测。会收集不同库区的地质构造参数,如断裂带规模、活动速率,以及水库参数如蓄水深度、库容、水位变化速率等,将这些参数与对应库区发生的地震震级进行关联分析,识别出对震级影响显著的关键因子。(2)在数据处理过程中,会采用回归分析、概率统计等方法,构建震级与关键影响因子的数学表达式。例如,通过统计发现断裂带长度每增加一定数值,震级可能呈现出相应的递增趋势,或水位变化速率与震级之间存在特

定的概率分布关系。这些统计规律可形成预测公式或图表,当输入目标库区的相关参数时,就能快速得到可能的震级范围及发生概率。(3)经验统计法需不断纳入新的震例数据以优化模型,尤其要关注高震级案例的特征,避免因样本偏差导致预测结果失真。需考虑不同区域地质条件的差异性,对统计模型进行区域性修正,确保其在特定库区的适用性。该方法能够量化各因素对震级的影响程度,为工程决策提供具有统计学意义的参考依据。

3.3 数值模拟法

(1)数值模拟法借助计算机技术,构建库区地质体的力学模型,通过模拟水库蓄水过程中岩体应力变化及断裂带响应来预测地震震级。需根据地质勘察数据,精确刻画库区岩体的物理力学参数,如弹性模量、泊松比、抗剪强度等,以及断裂带的几何形态、分布特征,建立三维数值模型。(2)在模拟过程中,会逐步施加水库蓄水产生的水体荷载和孔隙水压力,分析岩体应力场的演化规律,重点关注断裂带在水压力作用下的剪应力变化、位移趋势及能量积累过程。通过计算断裂带可能发生的滑动量和释放的能量,结合震级与能量的换算关系,推算潜在地震的震级大小。可模拟不同水位变化速率、蓄水深度等情景,评估其对震级的影响差异。(3)数值模拟法能够直观展现地震发生的力学过程,但其精度依赖于地质参数的准确性和模型简化的合理性。需通过现场监测数据反演验证模型参数,不断优化模拟结果,以提高震级预测的可靠性。该方法为深入理解构造型水库诱发地震的机理提供了有力工具,也为工程设计中的风险防控提供了量化支撑。

3.4 综合评估法

(1)综合评估法整合地质类比法、经验统计法、数值模拟法的优势,通过多维度、多层次的分析实现对构造型水库诱发地震震级的全面预测。运用地质类比法筛选出与目标库区地质条件相似的典型震例,确定震级预测的初步范围;利用经验统计法对关键影响因子进行量化分析,缩小震级可能区间;最后通过数值模拟法验

证不同情景下的震级响应,形成相互印证的预测结果。

(2)该方法注重各方法结果的权重分配,根据不同方法在特定地质条件下的适用性确定权重值。例如,在地质资料详实的区域,数值模拟法的权重可适当提高;而在缺乏实测数据的区域,则更多依赖地质类比法和经验统计法的结果。通过加权计算整合各方法的预测值,最终得到综合震级评估结果,并明确结果的不确定性范围及主要影响因素。(3)综合评估法还需结合现场监测数据进行动态修正,在水库建设及运营过程中,持续采集库区地震活动、岩体变形、水位变化等数据,不断调整评估模型的参数和权重,使震级预测结果与实际情况保持一致。这种动态评估模式能够有效应对构造型水库诱发地震的复杂性,为工程安全管理提供科学、动态的决策依据^[4]。

结语

综上所述,构造型水库诱发地震震级预测需综合考量地质构造、水库参数及区域应力场的复杂作用。地质类比法、经验统计法、数值模拟法及综合评估法各有侧重,其中综合评估法通过多方法融合能提高预测可靠性。尽管当前研究已明确主要影响因素和预测路径,但地质参数精度及动态应力变化仍为难点。未来需强化多学科交叉,结合现场监测优化模型,以提升预测准确性,为水库工程安全与区域可持续发展提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]乔东玉,杨光,陈柳,等.构造型水库诱发地震震级预测与探讨[J].水利水电工程设计,2024,43(2):28-32.
- [2]杨福平,赵理芳,余刚群,等.珊溪水库地区三维构造特征与深部水库诱发地震环境研究[J].大地测量与地球动力学,2021,41(12):1264-1270.
- [3]刘家豪,朱国维,周俊杰.舟坝水库诱发地震震级预测[J].高原地震,2020,32(3):13-20.
- [4]栗梓豪.水库诱发地震多方法研究[J].华北自然资源,2025(2):68-73.