

# Research on the Causes and Stability Evaluation of Landslide Geological Disasters

Xiang Li

Hunan Provincial Institute of Natural Resources Survey, Changsha, Hunan, 410007, China

## Abstract

Landslides are one of the most widely distributed and highly hazardous geological disasters globally. Their evolution mechanism is highly complex, and the corresponding stability assessment technology system is also showing a diversified development trend. This paper systematically analyzes the key geological conditions that control the development of landslides, including the internal main controlling factors such as lithological combinations of strata and weak structural planes. It also elaborates in depth on the regulatory effects of external driving factors such as hydrological effects, seismic dynamic triggering, and human engineering disturbances on the stability of slopes. The study points out that in practical applications, appropriate evaluation methods should be selected based on the type of landslide and the complexity of geological conditions. The research should focus on developing new assessment models that深度融合 physical mechanisms and data-driven approaches to improve the accuracy and reliability of landslide disaster prediction and risk warning. This study aims to provide a reference for similar research fields.

## Keywords

landslide; formation mechanism; stability assessment

## 滑坡地质灾害成因机制及稳定性评价研究

李翔

湖南省自然资源调查所, 中国·湖南长沙 410007

## 摘要

滑坡作为全球分布最广泛、致灾风险最为突出的地质灾害之一,其演化机理具有高度复杂性,对应的稳定性评估技术体系亦呈现多元化发展态势。本文系统剖析了控制滑坡发育的关键地质条件,涵盖地层岩性组合、软弱结构面等内部主控要素,并深入阐释了水文效应、地震动力触发及人类工程扰动等外部驱动因素对斜坡稳定性的调控作用。研究指出,实际应用中应结合滑坡类型、地质条件复杂程度择优选用评价方法,研究需重点发展物理机理与数据驱动深度融合的新型评估模型,以此提升滑坡灾害预测与风险预警的精准度与可靠性,此次研究旨在为类似领域研究提供参考。

## 关键词

滑坡; 成因机制; 稳定性评价

## 1 引言

当前,山地与丘陵地貌分布广阔,滑坡类地质灾害发育普遍且频发,对城乡居民生命财产安全及重大基础设施的长期安全运营构成严重威胁。滑坡灾害是危害范围最广、发生频率最高的灾种<sup>[1]</sup>。滑坡的孕育与启动,是坡体地质结构、地下水动力条件、地震动力作用及人类工程活动等多因子耦合驱动的复杂过程,其变形与运移规律涉及高度非线性的岩土力学响应机制。科学揭示滑坡成生机理、精准评价坡体稳定状态,既是地质灾害综合防治体系的核心基础,也是当前工程地质学科领域的重点研究课题。现阶段滑坡稳定性评价方法体系主要可划分为极限平衡分析法、数值模拟方法、不

确定性分析方法及机器学习技术四大类,各类方法在适用场景、理论基础与应用局限上存在显著差异。如何针对不同滑坡类型、复杂地质条件选用匹配的评价模型,如何高精度获取岩土力学参数,仍是滑坡稳定性评价中亟待解决的关键科学与技术问题。本文在系统梳理国内外研究进展的基础上,从滑坡成因机理与稳定性评价方法两大核心方向进行综合论述,旨在为滑坡灾害的勘察评估、风险区划与防治工程设计提供科学支撑与理论参考。

## 2 滑坡成因机制分析

### 2.1 地质条件控制机制

地层岩性条件是控制滑坡孕育发生的物质前提与基础要素。软硬相间的互层状地层结构最易诱发滑坡灾害,其中软弱夹层通常成为潜在滑动面的优势发育部位。在沉积岩分布区,页岩、泥岩、泥质粉砂岩等软弱岩体遇水易发生软化

【作者简介】李翔(1972—),男,中国湖南邵阳人,本科,工程师,从事水文工程地质研究。

效应,力学强度大幅劣化。变质岩区的片岩、千枚岩等富含片状矿物的岩层,沿片理面呈现出显著的各向异性,抗剪强度偏低。花岗岩等岩浆岩风化壳内,球状风化岩体与风化残积土的接触界面常构成优势软弱结构面。不同岩土体的物理力学性质差异直接决定坡体内部应力重分布特征与变形响应模式,而软弱结构面的赋存状态为滑坡启动提供了决定性的先决条件。

## 2.2 水的作用机制

水体作用是诱发滑坡失稳最关键的外部驱动因子,其致灾机理可归纳为物理化学劣化效应与力学响应效应两大维度。物理化学方面,地下水对岩土体产生显著的软化、泥化与溶蚀作用,富含亲水矿物的软弱结构面在饱水条件下,颗粒间结合水膜增厚、结构联结弱化,直接导致抗剪强度大幅衰减<sup>[2]</sup>。黄土高原地区的相关研究证实,水力驱动是黄土类滑坡最核心的诱发机制,其补给形式涵盖降雨入渗、地表径流补给、农业灌溉下渗等多种路径。同时,长期水-岩相互作用会溶解土体胶结物、蚀变原生矿物组分,从微观结构层面改变岩土体的物质组成与力学骨架,进一步加剧坡体失稳风险。水文地质条件的定量表征是滑坡稳定性评价的核心环节,其中坡体内部地下水位埋深、孔隙水压力时空分布及渗流场演化特征,是决定评价精度的关键参数。现有研究表

明,水体作用不仅直接降低滑带土强度指标,还通过重塑坡体应力场、改变应力路径,进而控制滑坡的变形模式与破坏机制。

## 2.3 地震触发机制

地震动力作用是诱发滑坡失稳的另一类关键触发因子。地震过程中产生的惯性力为坡体施加瞬时水平与竖向附加荷载,导致坡体内部应力场急剧调整,当附加应力超过岩土体的屈服强度时,便会引发突发性失稳破坏。地震波的传播与衰减特性使其对不同岩性组合、结构面产状的斜坡产生差异化的动力放大效应,同时地形效应会进一步加剧山脊、坡顶等部位的震动强度,使其成为地震滑坡的高发部位。

## 2.4 工程扰动效应

人类工程活动对斜坡稳定性的扰动效应日趋显著,已成为驱动滑坡变形、累进破坏乃至整体失稳的重要外部营力。山区交通线路开挖切坡、露天矿山开采形成的高陡临空面、工程填筑与堆载等大规模建设行为,均会剧烈改变天然斜坡的初始应力场与水文地质条件,进而诱发坡体失稳<sup>[3]</sup>。在地质灾害高易发区段开展道路选线、场地选址及工程结构设计时,必须强化地质风险前置防控理念,从源头弱化工程扰动强度,最大限度降低人为活动诱发滑坡灾害的潜在风险。如表1所示,为滑坡主要触发因素及其作用机制汇总。

表1 滑坡主要触发因素及其作用机制

触发因素	作用机制	主要效应	研究依据
地质条件	软弱夹层、岩性组合、结构面控制	提供滑动面、控制边界条	溃屈型滑坡研究
降雨入渗	软化作用、孔隙水压力升高	抗剪强度降低、有效应力减小	黄土高原滑坡研究
地震荷载	惯性力加载、动力响应	瞬时附加应力、地形放大效应	地震滑坡研究
工程扰动	应力重分布、水文条件改变	坡脚应力集中、局部入渗增强	路堑边坡研究

## 3 滑坡稳定性评价方法

### 3.1 极限平衡法

极限平衡法是当前工程领域应用最为成熟的滑坡稳定性定量评价手段,其核心思路是预设潜在滑移面,将坡体离散为若干竖条单元,基于力与力矩平衡条件求解边坡稳定系数。极限平衡法的优势在于物理意义明确、参数易获取、计算效率高,具备极强的工程实用性。但其固有局限亦较为突出:无法揭示坡体内部应力-应变场演化规律,必须预先假定滑移面形态与位置,且稳定系数易受条块划分方式与基本假设条件的影响。

### 3.2 数值模拟法

数值模拟技术可有效反映岩土体的非均质性、各向异性及复杂边界条件,能够对滑坡从变形、扩展至整体失稳的全过程进行动态复现,已成为揭示滑坡成灾机理、开展精细化稳定性评价的核心技术手段。主流数值方法包括有限单元法、有限差分法、离散单元法及光滑粒子流体动力学法等。数值模拟的突出优势在于可揭示坡体内部的渐进破坏机理,直观定位潜在滑移面的空间形态,并能定量模拟开挖、支护

等工程干预的响应特征。但其局限性同样显著,岩土力学参数难以精准确定,本构模型的选取高度依赖经验,计算结果的合理性通常需结合现场监测数据或极限平衡法成果进行综合校验。

### 3.3 不确定性分析法

岩土体介质本身具有显著的自然空间变异性,通过现场原位测试与室内力学试验获取的参数,本质上仅为特定置信区间内的统计估计值。不确定性分析方法依托概率统计理论,将参数的随机性、离散性与空间变异性纳入分析框架,以概率形式定量表征滑坡失稳风险,其评价结果更贴合工程实际。

蒙特卡罗法是滑坡不确定性分析中应用最广泛的数值方法,其核心思路为:依据各参数的概率分布特征进行大规模随机抽样,对每一组抽样样本开展稳定性计算,最终以失稳工况出现的频率表征滑坡失效概率。该方法可全面反映多参数耦合变异性的综合效应,但存在计算成本较高、需预先给定参数分布类型等局限。

随机场理论进一步实现了对岩土参数空间相关性与时空

间变异性的精细化刻画。基于钻孔等实测数据,利用随机场模型与克里金插值方法构建滑带抗剪强度等关键参数的条件随机场,将其与极限平衡法、蒙特卡罗模拟耦合,可同步实现稳定系数与设计推力的概率化求解。贝叶斯更新方法则能够动态融合现场监测、位移时序等多源信息,不断修正先验分布,显著提升滑坡失稳概率评估的精度与可靠性。

### 3.4 机器学习方法

近年来,机器学习技术在滑坡稳定性评价领域的应用持续深化,逐步发展成为工程地质与岩土力学交叉领域的前沿研究方向。以数据驱动为核心的智能算法,凭借对高维、强非线性关系的高效拟合能力,为突破传统分析方法的固有局限提供了全新技术路径。深度学习模型在预测精度与特征挖掘能力上优于传统统计与机器学习方法,已得到大量研究

证实。深度学习在边坡工程中的应用可划分为三个发展阶段,在稳定系数回归、位移时序预测、滑坡易发性制图等任务中均展现出优异性能。将深度学习与粒子群优化、遗传算法等智能优化算法耦合形成的混合模型,能够有效改善传统模型易陷入局部最优、对参数初值敏感等缺陷。

机器学习在路堑边坡稳定性快速评估中同样具备实用价值,其预测结果与有限元数值解的相对误差通常在2%~10%之间,可作为传统评价方法的高效校验工具。将极限平衡法的理论严谨性与机器学习的自适应拟合优势相融合的混合分析框架,在保障预测可靠性的前提下大幅提升计算效率,为复杂边坡的快速评价与动态预警提供了新思路。如表2所示,为滑坡稳定性评价方法对比汇总。

表2 滑坡稳定性评价方法对比

方法类型	优点	局限性	适用条件
极限平衡法	概念明确、计算简便、参数易获取	无法获得应力应变分布、需预设滑面	均质土坡、简单岩质边坡
数值模拟法	可模拟变形全过程、考虑复杂条件	参数获取困难、本构模型依赖经验	复杂岩土边坡、大变形分析
不确定性分析法	考虑参数变异性、给出失稳概率	计算量大、需参数分布信息	重要工程、参数变异性大
机器学习法	处理非线性问题、大数据适应性	依赖数据质量、可解释性不足	区域易发性评价、快速预测

## 4 不同评价方法的适用性讨论

滑坡稳定性评价方法的合理选取,需结合研究目标、地质复杂程度、基础数据完备性及精度需求进行综合决策。针对常规工程边坡,极限平衡法凭借操作简便、工程实用性强等优势成为首选方案<sup>[4]</sup>。其适用性受滑动面几何形态与岩土介质类型共同制约,圆弧型滑动面适用于均质土坡,任意形状滑动面则更适配已有滑移带或受结构面控制的岩质边坡。

对于重大工程或地质条件复杂的边坡体系,数值模拟方法能够提供更为详尽的变形与力学信息。有限单元法适用于坡体应力-应变场分析,强度折减法可同步获取稳定系数与潜在滑移面空间特征。针对滑坡失稳后的运移堆积过程,SPH等大变形数值方法可对运动速度、堆积范围进行有效预测。在岩土参数空间变异性显著、不确定性突出的场景下,不确定性分析方法能够实现更全面的风险量化评估。蒙特卡罗法与随机场理论可系统反映岩土参数的固有离散性,以失效概率形式表征稳定状态,为风险管控与工程决策提供科学支撑。

机器学习方法在区域尺度滑坡易发性评价中表现突出,在大范围、多因子评价场景下具备显著的计算效率优势。但在单体滑坡稳定性定量计算中的应用仍需结合地质机理开展模型可解释性分析与结果校验。物理机理与数据驱动融合是未来的重要发展方向,通过协同力学机制与机器学习优势,可进一步提升滑坡稳定性评价的精度与可靠性。

## 5 结语

滑坡灾害的成生机制受控于地质背景、水文条件、地震动力与工程活动等多因子的耦合作用,是内外因共同驱动的复杂演化过程。软弱地层与地质结构面共同构成了滑坡发育的物质基础与边界控制条件,水体通过软化效应与孔隙水压力升高双重机制,成为最关键的诱发因素,地震荷载借助惯性力施加与动力响应放大导致坡体失稳,人类工程扰动则通过重塑应力场、改变水文条件显著加剧边坡失稳风险。各类稳定性评价方法具有明确的适用场景与技术优势,工程实践中应依据滑坡类型、地质复杂程度与评价目标,合理选择适配方法,必要时可采用多方法交叉验证以提高结果可靠性。未来研究应重点强化多场多相耦合作用下滑坡演化机理的深度解析,发展物理机制与数据驱动相融合的新型评价模型,进一步提升滑坡灾害预测预警精度,为地质灾害综合防治与国土空间安全规划提供坚实的科学支撑。

### 参考文献

- [1] 凌晴.融合多源信息和高精度监测数据约束的黄土滑坡稳定性评价研究[J].测绘学报,2025,54(10):1915.
- [2] 解立栋,刘欢,杜文学,等.黄土区大型超深层滑坡的稳定性评价与防治方案优选研究[J].工程勘察,2026,54(01):17-25.
- [3] 张财务.梅江区清凉山库区县道滑坡稳定性评价及防治对策[J].科学技术创新,2025,(23):73-76.
- [4] 徐舵.基于地灾评估及滑坡勘查规范的某场镇不稳定斜坡稳定性评价[J].大众标准化,2025,(10):117-119.