

朱晓涵, 周梦婷, 邓茂林, 等. 三峡库区周家沟滑坡基本特征与变形机理[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 241-254. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.018

ZHU Xiaohan, ZHOU Mengting, DENG Maolin, et al. Basic characteristics and deformation mechanism of Zhoujiagou landslide in Three Gorges Reservoir Area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 241-254. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.018

# 三峡库区周家沟滑坡基本特征与变形机理

朱晓涵<sup>1,2</sup>, 周梦婷<sup>1,2</sup>, 邓茂林<sup>1,2</sup>, 彭旭<sup>1,2</sup>, 苏鹏民<sup>1,2</sup>, 梁之康<sup>1,2</sup>,  
李雨洲<sup>1,2</sup>, 童率<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 【目的】受库水位变化和降雨影响, 三峡库区许多涉水土质滑坡的累积位移监测曲线呈现出周期性的变形突变。为避免因变形突变导致滑坡变形阶段的误判及预警失误, 需进一步提升三峡库区滑坡灾害的预警精度与防治效果。【方法】以童庄河流域的周家沟滑坡为研究对象, 结合库水及降雨, 通过监测数据和野外调查, 采用有限元软件 Geo-Studio 进行实际工况下的渗流场、位移场与稳定性计算, 研究滑坡的变形特征及失稳机理。【结果】2022年4月至2024年4月, 周家沟滑坡累积位移监测曲线出现四次变形突变, 与集中强降雨(日降雨量均超过35.6 mm)密切相关, 并伴有明显滞后效应。当库水位超过160 m时, 指向坡内的动水压力有利于坡体稳定, 使降雨阈值提高至40 mm。【结论】研究表明周家沟滑坡稳定性受库水位升降与降雨入渗的影响, 降雨为周家沟滑坡变形主要的诱发因素, 研究成果为三峡库区类似滑坡的监测预警与防治提供了科学支撑。

**关键词:** 变形机理; 稳定性分析; 数值模拟; 降雨; 库水位; 滑坡; 变形; 三峡水库

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.018

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU435; P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0241-14



## Basic characteristics and deformation mechanism of Zhoujiagou landslide in Three Gorges Reservoir area

ZHU Xiaohan<sup>1,2</sup>, ZHOU Mengting<sup>1,2</sup>, DENG Maolin<sup>1,2</sup>, PENG Xu<sup>1,2</sup>, SU Pengmin<sup>1,2</sup>,  
LIANG Zhikang<sup>1,2</sup>, LI Yuzhou<sup>1,2</sup>, TONG Shuai<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Yangtze River Three Gorges Landslide National Field Scientific Observation and Research Station, China Three

Gorges University, Yichang 443002, Hubei China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three

Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

**Abstract** [Objective] The impact of reservoir water level fluctuations and rainfall on the cumulative displacement monitoring curves of water-related soil landslides in the Three Gorges Reservoir area is investigated, with a focus on periodic abrupt changes. Enhanced accuracy in landslide disaster warnings and improved effectiveness of prevention and control measures are deemed

收稿日期: 2025-02-16; 修回日期: 2025-05-06; 录用日期: 2025-05-06; 网络出版日期: 2025-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172303); 河北省自然科学基金项目(D2023403055)

作者简介: 朱晓涵(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质灾害监测预警及机理研究。E-mail: 1021793240@qq.com

通信作者: 周梦婷(2003—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质灾害监测预警及机理研究。E-mail: 3403743774@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

essential to prevent misjudgments in deformation stages and to address early warning failures caused by abrupt deformations. [Methods]The Zhoujiagou landslide, located in the Tongzhuang River Basin, is examined through the integration of reservoir water level and rainfall data, supported by monitoring records and field investigations. The finite element software Geo-Studio is utilized to compute seepage fields, displacement fields, and stability under actual conditions, with the objective of analyzing deformation characteristics and instability mechanisms. [Results]From April 2022 to April 2024, four abrupt deformation events were observed in the cumulative displacement monitoring curve of the Zhoujiagou landslide, closely correlated with heavy rainfall (daily rainfall exceeding 35.6 mm) and accompanied by a distinct lag effect. At reservoir water levels above 160 meters, inward-directed dynamic water pressure was found to enhance slope stability, raising the rainfall threshold to 40 mm. [Conclusion]The stability of the Zhoujiagou landslide is significantly affected by reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration, with rainfall identified as the primary trigger for deformation. These insights provide valuable scientific guidance for the monitoring, early warning, and prevention of similar landslides in the Three Gorges Reservoir area.

**Keywords:** deformation mechanism; stability analysis; numerical simulation; rainfall; reservoir water level; landslide; deformation; Three Gorges Reservoir

## 0 引言

三峡库区地势险峻, 峡谷深邃, 地质条件复杂, 暴雨与洪水频发, 历来是我国地质灾害多发区<sup>[1]</sup>, 其中滑坡灾害尤为突出, 对库区人民生命财产安全和长江航道的稳定构成了严重威胁。特别是三峡工程蓄水后, 库区水文地质环境发生显著改变, 在库水位周期性波动与区域强降雨的叠加效应下, 滑坡灾害呈现出新的活动特征和发育规律。童庄河流域作为三峡库区的典型区域, 其地质环境与滑坡发育特征具有重要研究价值。该流域地处鄂西褶皱山地, 位于三峡构造带中段, 以中低山峡谷地貌为主, 地层以三叠系和侏罗系砂泥岩互层的“红层”地带为主, 地质灾害频发。据统计, 流域内共发育地质灾害点 51 处, 其中, 滑坡 45 处, 不稳定斜坡 6 处, 灾害点空间分布沿水系呈带状特征, 且多集中于汛期(7—8 月), 表明降雨是诱发滑坡的重要因素之一。这些地质灾害对长江航道和人民生命财产安全构成严重威胁, 潜在威胁 477 户 1 999 人, 经济损失近 78 632 万元。因此, 深入研究该区域滑坡的变形特征与诱发机制, 对防灾减灾具有重要意义。

三峡库区滑坡灾害的研究始于 20 世纪 80 年代, 随着三峡工程的推进, 国内外学者对库区典型滑坡的变形破坏特征进行了广泛研究, 如木鱼包滑坡<sup>[2]</sup>、谭家河滑坡<sup>[3-4]</sup>、八字门滑坡<sup>[5-8]</sup>等典型滑坡的变形机制和稳定性分析得到了广泛关注。近年来, 随着监测技术的进步, 学者对树坪滑坡<sup>[9-10]</sup>、藕塘滑坡<sup>[11]</sup>等开展了更为精细的研究, 逐步揭示了滑坡变形的复杂机理。

研究表明, 土质滑坡的变形破坏具有显著的阶段性特征, 三峡库区尤为典型, 变形突变特征显著。这

种变形特征与库水位快速下降和强降雨的叠加作用密切相关, 但受多因素耦合影响, 其诱发机制和失稳判据仍不明确。在滑坡变形机理研究方面, DENG 等<sup>[2]</sup>通过现场监测和数值模拟, 揭示了木鱼包滑坡地表变形规律, 指出库水位波动是诱发滑坡变形的主要因素; 在滑坡稳定性分析方面, WANG 等<sup>[3]</sup>研究了库水位波动对谭家河滑坡稳定性的影响, 建立了水位变化与滑坡稳定性系数的定量关系; CHEN 等<sup>[4]</sup>进一步分析了谭家河滑坡的影响因素、变形机理和破坏过程预测方法, 提出了考虑多因素耦合作用的滑坡稳定性评价模型; ZHANG 等<sup>[5]</sup>针对八字门滑坡, 研究了库水位波动与降雨入渗联合作用下的滑坡稳定性预测方法。这些研究为库区滑坡稳定性评价提供了重要方法支撑。在滑坡监测预警方面, LU 等<sup>[9]</sup>系统分析了树坪滑坡的变形破坏机理, WU 等<sup>[10]</sup>基于监测位移数据识别了滑坡运动特征和成因机制。DAI 等<sup>[11]</sup>对藕塘滑坡的变形和破坏机制进行了深入研究, 揭示了库水位变化对滑坡稳定性的影响。

然而, 现有研究仍存在若干亟待突破的瓶颈: 由于滑坡变形的复杂性和多因素耦合作用, 如何识别这些滑坡变形失稳的诱发因素, 并尽可能早地预测滑坡的稳定性, 进而建立合理精准的预测预警模型, 是避免出现重大损失的重要举措<sup>[12]</sup>。土质滑坡一般需要长时间变形与应变能积累和滑动面的孕育, 才可能产生整体突变性的失稳破坏<sup>[13]</sup>。其变形过程常以变形突变为特征, 这种现象在三峡库区尤为明显, 且与库水位变化及强降雨密切相关。然而, 变形突变的具体机理与失稳判据尚未完全阐明; 库水位波动与降雨的复合作用机制仍需进一步量化; 间歇性变形突变的特征与稳定性演化规律研

究仍不足。这些问题的解决对于提升滑坡预警精度和防治效果具有重要意义。

以童庄河流域的周家沟滑坡为例,该滑坡目前处于间歇性变形突变,处于欠稳定状态,对周边 17 户 46 人的生命财产安全以及童庄河航道安全构成了严重威胁。本文利用 2022—2024 年的自动监测资料,结合近年来的现场调查结果,运用 Geo-Studio 软件建立模型,分析周家沟滑坡的基本变形特征,阐述库水变化及降雨对滑坡体的影响。通过深入分析周家沟滑坡的变形突变特征,阐明了库水位与降雨复合作用的机制。通过以上研究,为相似滑坡体稳定性判断、监测预警和防治提供参考。

## 1 滑坡基本概况

### 1.1 童庄河流域基本概况

#### 1.1.1 区域概况

童庄河位于长江右岸,是三峡库区的长江典型支流之一,也是长江重要的支流航道,地理范围为北纬  $30^{\circ}54'32''$ — $30^{\circ}54'44''$ ,东经  $110^{\circ}41'13''$ — $110^{\circ}45'11''$ ,处于三峡库区秭归县郭家坝镇境内。童庄河地处鄂西褶皱山地,位于三峡构造带的中段区域,该段主要为中低山峡谷地貌。流域内沉积地层出露,以三叠系(P)和侏罗系(J)为主,其中侏罗系地层为砂泥岩互层的软弱相间的“红层”地带。

#### 1.1.2 地质灾害隐患点分布

据有准确月份时间记录(截至 2020 年 8 月)的地质灾害点统计分析,童庄河流域内地质灾害隐患点在

月份上分布不均,一般集中发生在汛期(7—8 月)。这个时段也是降雨较为集中的时期,由此可见灾害的发生受降雨周期以及雨量的影响。流水侵蚀作用是岸坡破坏、演变的主要外动力之一,也是地质灾害形成的重要影响因素<sup>[14]</sup>。童庄河区域地质灾害隐患点的空间分布上总体沿水系呈带状分布,且距河流越近,灾害点越密集。

据调查,区域内共发现地质灾害隐患点 51 处,如图 1 所示,其中滑坡 45 处,不稳定斜坡 6 处,灾害发育以滑坡为主,且多为现代土质滑坡,例如谢家槽滑坡、柏堡滑坡等。童庄河河谷处岸坡宽缓,是主要的居民集中居住地,该流域密集的地质灾害对长江航道和人民的生命财产安全造成极大威胁,潜在威胁 477 户 1 999 人,威胁经济损失近 78 632 万元。厘清童庄河流域滑坡的基本特征和变形机理,可为进一步滑坡灾害的防治和预警预报提供启示。

通过野外调查和 GNSS 地表监测数据发现,周家沟等滑坡有明显变形迹象,威胁居民的生命财产安全。因此,本文以周家沟滑坡为例,用数值模拟结合调查数据分析滑坡的基本特征和变形机理,研究成果为童庄河流域防灾减灾和预警预报提供参考。

### 1.2 周家沟滑坡工程地质概况

#### 1.2.1 滑坡概况

周家沟滑坡位于三峡库区湖北省秭归县郭家坝镇桐树湾村 1 组,展布于长江南岸支流童庄河左岸,距童庄河与长江交汇处 5.5 km。滑坡分布高程 135~203 m,滑坡体整体西高东低,滑体地面坡度  $10^{\circ}$ ~

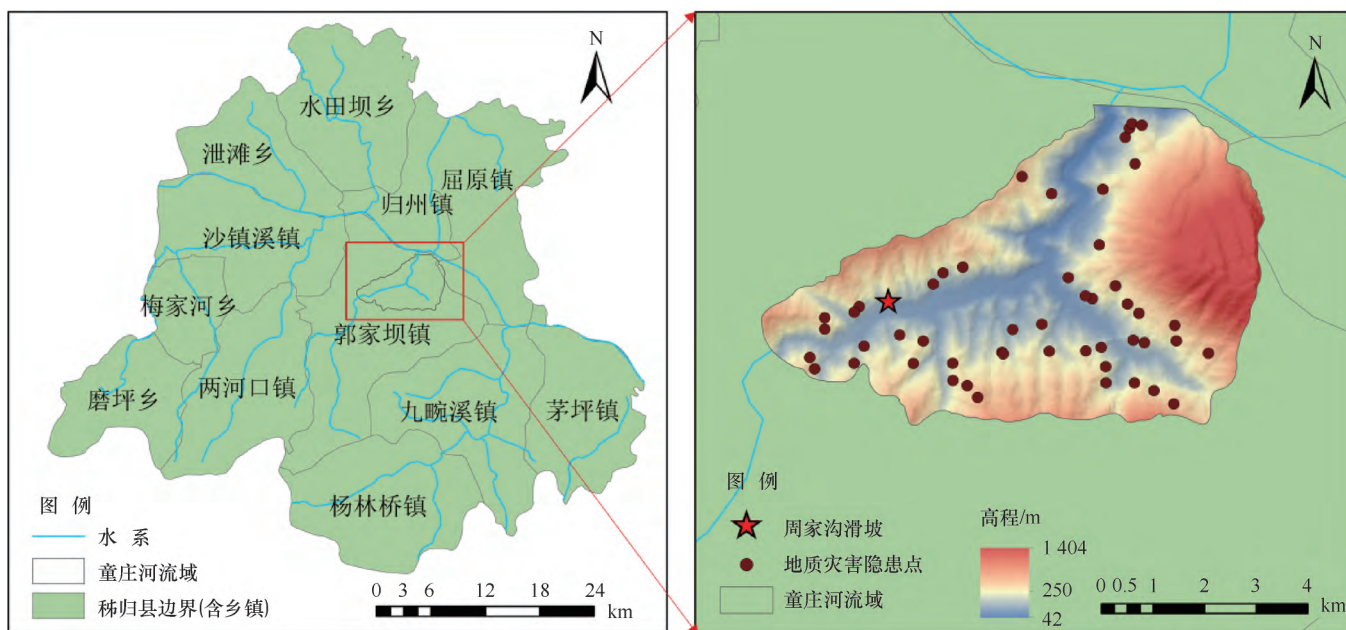


图 1 童庄河流域地质灾害隐患点分布

Fig. 1 Distribution of Geological Hazard Risk Points in the Tongzhuang River Basin

30°, 剖面呈凹形, 平台形状为矩形。滑坡后缘为坡体陡缓结合地段, 左右两侧边界为坡体小型冲沟, 前缘至童庄河, 为土质牵引式中层滑坡。滑坡体长 171 m, 均宽 260 m, 滑体平均厚度 15 m, 体积约为  $66 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 周家沟滑坡监测平(剖)面如图 2 所示。

滑坡发育于侏罗系中统聂家山组 ( $J_{1-2n}$ ) 灰绿色泥质粉砂岩夹紫红色粉砂质泥岩、粉砂质泥岩、长石石英砂岩及泥岩组成的逆向坡中, 表层强烈风化, 岩层产状  $325^\circ \angle 40^\circ$ 。滑体主要为灰黄色、灰红色的碎石块土层, 由粉砂岩及泥岩组成, 土石比为 7 : 3 ~

6 : 4, 碎石直径一般 2~5 cm。滑带为浅灰和灰黄色粉质黏土, 粉质黏土呈软可塑状。

### 1.2.2 滑坡历史变形特征

根据调查报告, 周家沟滑坡的变形历史可以追溯到 20 世纪 50 年代和 70 年代, 当时滑坡后缘曾发生过变形与破坏。1996 年 6 月底, 滑坡区民地板与屋顶出现不同程度的张拉裂缝, 墙体也出现了剪切裂缝。2001 年 6 月, 滑坡前缘发生过小规模坍塌, 其主要诱发因素为降雨, 虽然库水作用尚未直接参与, 但可能通过改变水文条件间接影响该区域的稳定性。

自 2003 年 6 月三峡水库开始蓄水后, 周家沟滑坡的变形显著加剧, 且表现出持续性的特征。2024 年 7 月, 滑坡体出现了贯穿桐楚公路的明显裂缝, 滑坡上部房屋也出现开裂。其中, 滑坡后部公路裂缝长约 20 m, 宽约 5 mm, 如图 3 所示; 滑坡中部裂缝长约 10 m, 宽约 15~20 mm; 滑坡前部裂缝长约 8 m, 局部下错 15~20 cm。目前, 该滑坡威胁着 17 户 46 人的生命财产安全, 并危及童庄河航道的安全。

近年来, 滑坡体的变形主要集中在每年汛期, 当库水位由 150 m 上升至 175 m 的过程中, 库水波动与降雨的叠加效应对滑坡稳定性影响显著。尽管三峡水库蓄水后滑坡变形有所加剧, 但早期的滑坡活动同样显示出明显的降雨诱发特征。

### 1.2.3 滑坡内外动力地质机制

(1) 内在动力机制。周家沟滑坡的内在动力机制主要源于地层岩性与地形地貌的协同作用。从地层岩性来看, 聂家山组以软弱岩层及风化形成的碎石块土层为主, 为滑坡提供了易滑的物质基础; 滑带由粉质黏土构成, 其低滑动阻力的特性显著削弱了坡体稳定性; 逆向坡结构则进一步加剧了滑坡的发生倾向。在地形地貌方面, 滑坡坡度介于  $10^\circ \sim 30^\circ$ , 属缓坡至中等坡度范围, 虽不陡

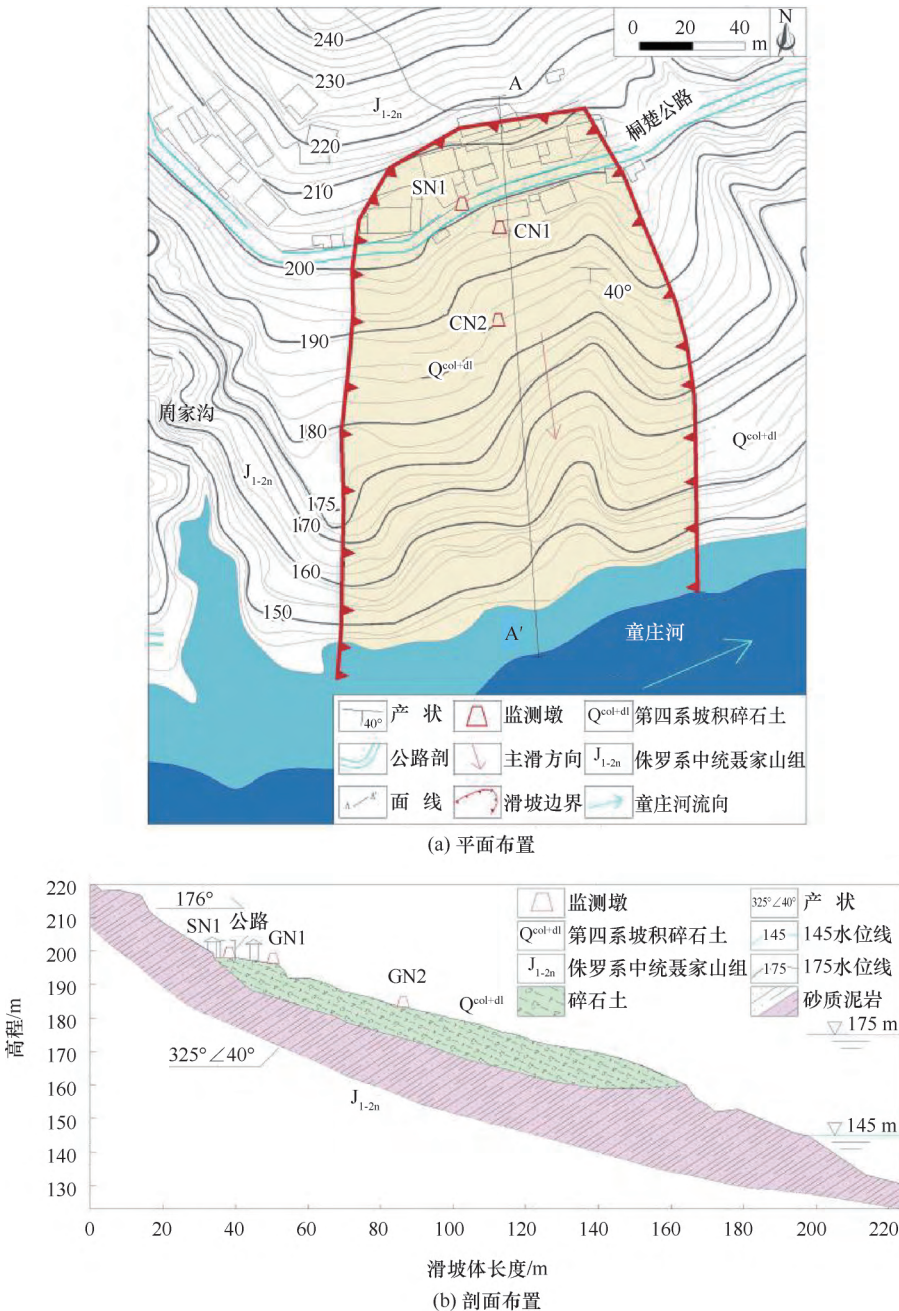


图 2 周家沟滑坡监测平(剖)面布置

Fig. 2 Zhoujiagou landslide monitoring plan (section) layout plan

峭, 但高差达 68 m, 为滑体向下牵引提供了充足的重力驱动力。此外, 滑坡前缘靠近童庄河, 河流侵蚀可能削弱坡脚支撑, 导致坡体失稳。凹形剖面与河流侵蚀的共同作用, 则为滑坡呈现牵引式发育创造了有利条件。

(2) 外在动力机制。周家沟滑坡的外在动力机制源于降雨、库水位变化、河流侵蚀及潜在人类活动的协同作用。降雨作为最主要且长期存在的外部驱动力, 通过强降雨入渗提升孔隙水压力并软化滑带, 直接诱发变形突变, 其滞后性则反映了水文响应的渐进特性。库水位升降是影响滑坡稳定性的关键因素, 尤其在水位剧烈波动时作用显著。童庄河作为前缘邻近水系, 持续侵蚀坡脚, 为滑坡提供长期削弱效应。此外, 公路建设与使用增加坡顶荷载, 房屋建造破坏植被的固坡功能, 削弱坡体稳定性, 并与自然因素叠加, 进一步促发变形。

## 2 监测数据分析

基于全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System), 周家沟滑坡共布设自动监测点 2 个, 监测点 GN1 位于滑坡后缘公路下居民点, 监测点 GN2 位于滑坡中部, 监测点位置如图 3 所示(自 2022 年 3 月 29 日起监测)。

截至 2024 年 4 月, 自动监测点 GN1 和 GN2 累积位移分别为 60.56 mm 和 206.69 mm。自动监测点 GN1、GN2 形变趋势具有一定同步性, 主滑方向相近, 但位移量差异显著, GN2 形变明显大于 GN1。累积位移曲线具有明显周期性变形突变, 集中发生于每年 4—7 月。这些变形突变与强降雨密切相关, 且不同库水运行阶段的降雨影响导致了这些突变, 如表 1 所列。

### 2.1 库水位因素

为分析坡体变形突变, 结合三峡水库库水位调

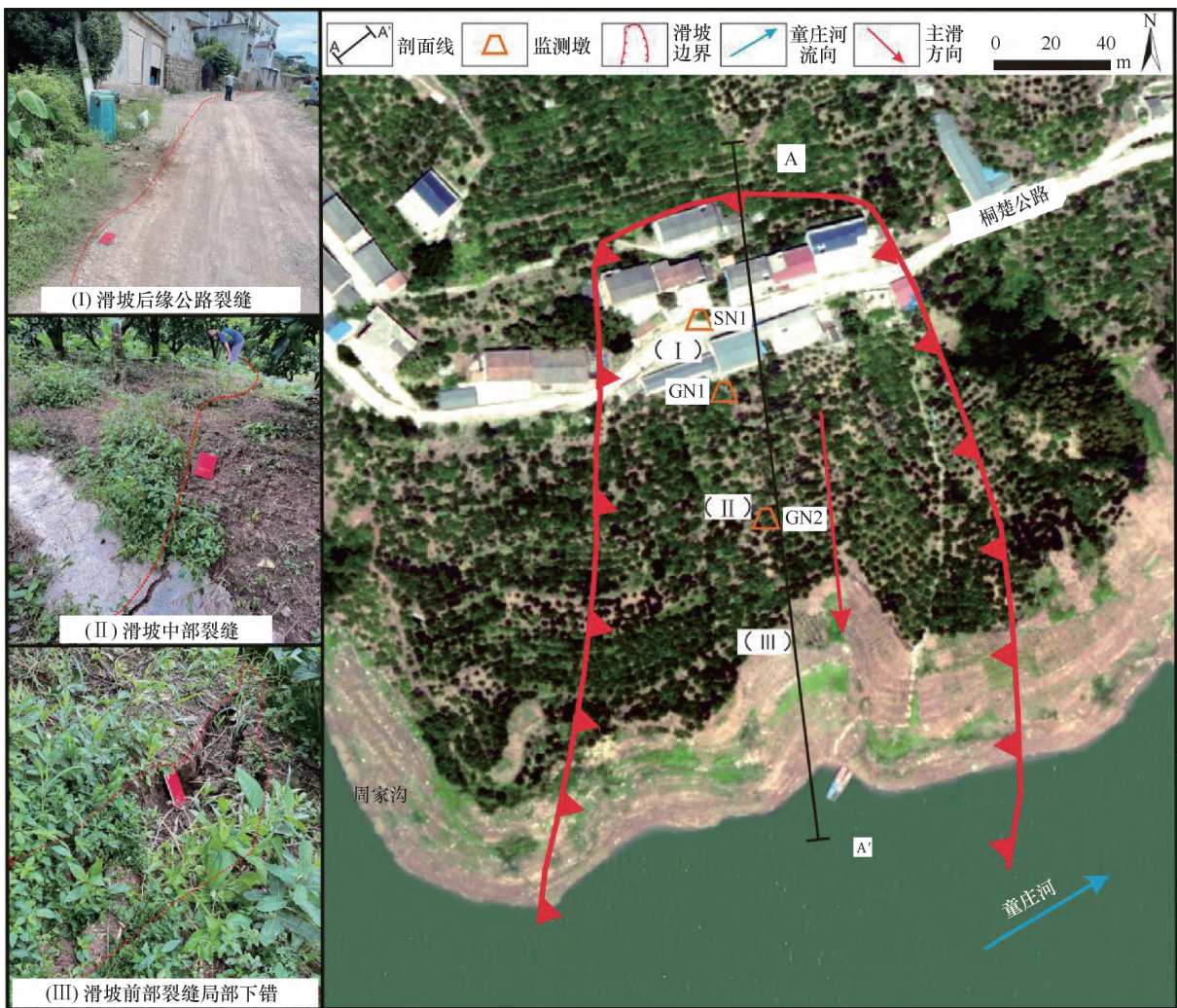


图3 周家沟滑坡裂缝展布

Fig. 3 Distribution map of Zhoujiagou landslide cracks

表1 GN1, GN2 四次变形突变及降雨量情况

Table 1 Table 1 GN1, GN2 Four Abrupt Deformations and Rainfall Conditions

变形次序	变形启动时间/年-月-日	变形结束	持续时间/d	最大日降雨量/mm	库水位变化/m	GN1 位移变化/mm	GN2 位移变化/mm
1	2022-07-17	2022-07-23	7	52.0	146.7→148.4	8.1→13.1	24.4→48.5
2	2022-04-03	2022-05-10	38	35.6	155.1→157.2	28.9→31.9	48.0→93.9
3	2023-06-16	2023-07-05	20	48.2	149.8→153.4	31.4→37.6	109.6→134.7
4	2023-09-10	2023-10-09	30	87.8	159.0→172.9	31.1→50.4	137.2→190.6

度规律, 以一个水文年为周期, 将库水位升降划分为 5 个阶段: (1) 低水位运行期; (2) 库水位上升期; (3) 中水位运行期; (4) 库水位下降期; (5) 高水位运行期。选取两个水文年(2022 年 4 月至 2024 年 3 月) 监测数据统计分析库水位对滑坡变形的影响, 周家沟滑坡 GNSS 自动监测点累积位移-库水位-降雨量关系及日位移速率-库水位升降速率-降雨量关系如图 4 所示。

(1) 低水位运行期(2022 年 6 月 2 日至 2022 年 9 月 15 日, 图 4 中黄色区域) 期间, 库水位在 147 m 左右波动, 监测点 GN1 位移从 18.9 mm 增长至 38.05 mm, GN1 日位移速率持续增大, GN2 日位移速率持续减小。2022 年 7 月 17 日至 2022 年 7 月 23 日库水位持续下降, 并且在强降雨的作用下 GN1、GN2 发生了一次明显变形突变。

(2) 库水位上升期(2022 年 9 月 16 日至 2022 年 11 月 1 日、2023 年 6 月 16 日至 2023 年 10 月 15 日, 图 4 中粉色区域) 库水位上升期共历时 122 d(2023 年 6 月 16 日至 2023 年 10 月 15 日), 由 149.83 m 上升至 174.40 m, 库水位平均上升速率达 0.2 m/d。滑坡变形曲线与库水位监测曲线超越现象相符合, GN1 和 GN2 均发生了明显变形突变。2023 年 10 月 7 日前后, 库水位上升速率达到 0.36 mm/d, GN1、GN2 最大日位移速率分别达到 3.51 mm/d、15.01 mm/d, 因此在库水位上升期, 滑坡变形十分明显。根据监测点日位移变化趋势与库水位监测曲线对比发现, 库水位上升时, GN1 与 GN2 的变形现象明显, 日位移速率产生了明显的变形突变。

(3) 中水位运行期(2022 年 11 月 2 日至 2023 年 3 月 22 日, 图 4 中绿色区域) 由于白鹤滩电站初次蓄水影响, 三峡水库蓄水未达 175 m, 因此将该阶段划分为中水位运行阶段。该阶段由于水位波动较小, 滑坡变形也较为平稳, 运行期间自动监测点 GN1 以及 GN2 累积位移曲线无明显超越现象, 在一定范围内波动。滑坡变形程度与库水位下降之间的相关性并不明显。

(4) 库水位下降期(2022 年 4 月 1 日至 2022 年 6 月 1 日、2023 年 3 月 23 日至 2023 年 6 月 15 日、2023 年 11 月 1 日至 2024 年 4 月 8 日, 图 4 中橙色区域) 2022 年 4 月 1 日至 2022 年 6 月 1 日, 库水位由 169.23 m 快速下降至 148.01 m, GN1 与 GN2 并无明显起伏, 但 47 d 之后, 在持续性降雨叠加影响下, GN1 和 GN2 变形速率明显上升, 库水位快速下降会使坡体地下水与库水位形成水头差, 动水压力增大, 坡体变形产生滞后效应。2023 年 4 月至 7 月期间, 滑坡发生两次明显变形突变, 库水位影响作用并不明显。

(5) 高水位运行期(2023 年 10 月 16 日至 2023 年 10 月 31 日, 图 4 中蓝色区域) 期间, GN1 和 GN2 的位移曲线出现波动, 但未显示出明显的加速变形现象。这表明高水位运行期内, 滑坡变形较为平稳, 库水位下降对滑坡变形的影响较小。

综合上述分析, 周家沟滑坡的变形主要受到库水位和降雨的共同影响: 当处于中低水位运行阶段以及库水位下降阶段时, 库水位对滑坡作用影响较小; 在库水位上升阶段, 滑坡变形受库水位升高影响, 尤其在强降雨与库水位变化共同作用时, 滑坡变形的幅度明显加剧。

## 2.2 降雨因素

对于周家沟滑坡而言, 强降雨是诱发滑坡变形破坏的主要因素。滑坡区全年累计降雨 1 883.2 mm, 单日最大降雨 87.8 mm(2023 年 9 月 23 日), 强降雨主要集中在 5 月、6 月、9 月。2021 年 7 月至 2023 年 10 月, 滑坡发生四次变形突变, 监测曲线呈现“变形突变”趋势。每次突变段起始前及过程中均伴随显著的集中降雨。

选取 2022 年 4 月 1 日至 2024 年 4 月 1 日两个水文年进行分析, 在库水位上升期和中低水位运行期间, 持续性强降雨导致了坡体明显变形。对比分析周家沟滑坡 GNSS 自动监测点累积位移-库水位-降雨量关系图, 5 月至 7 月以及 9 月加速变形, 其主要原因是降雨强度大、持续时间长。2023 年 1 月 1 日至

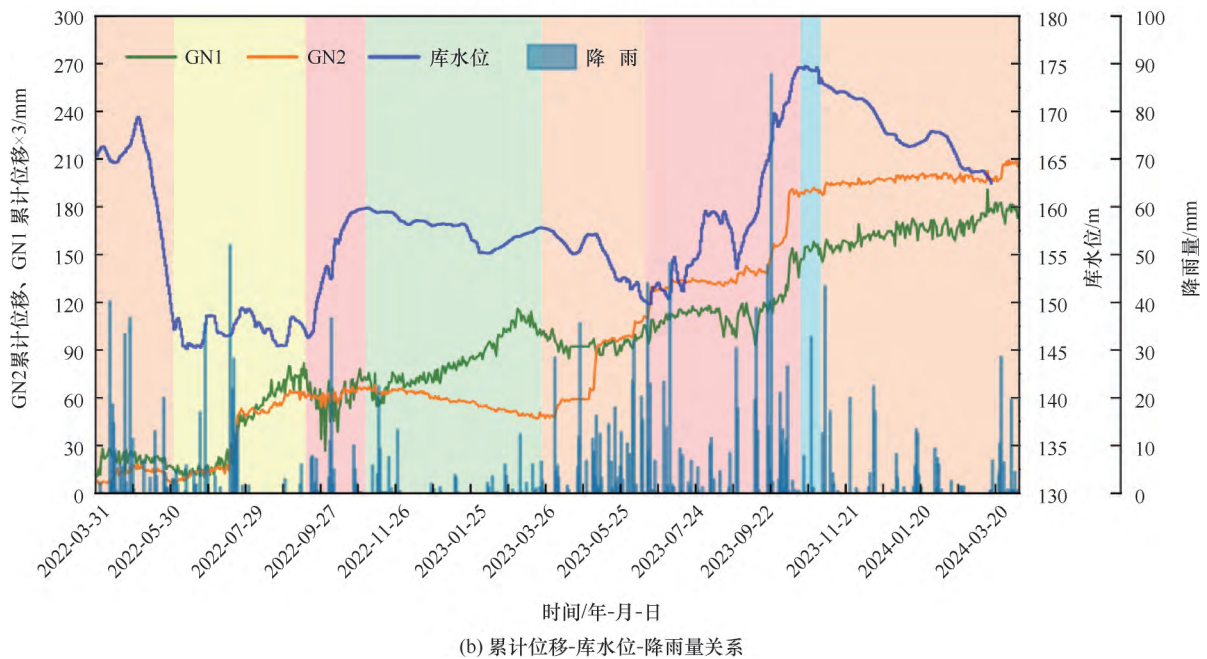
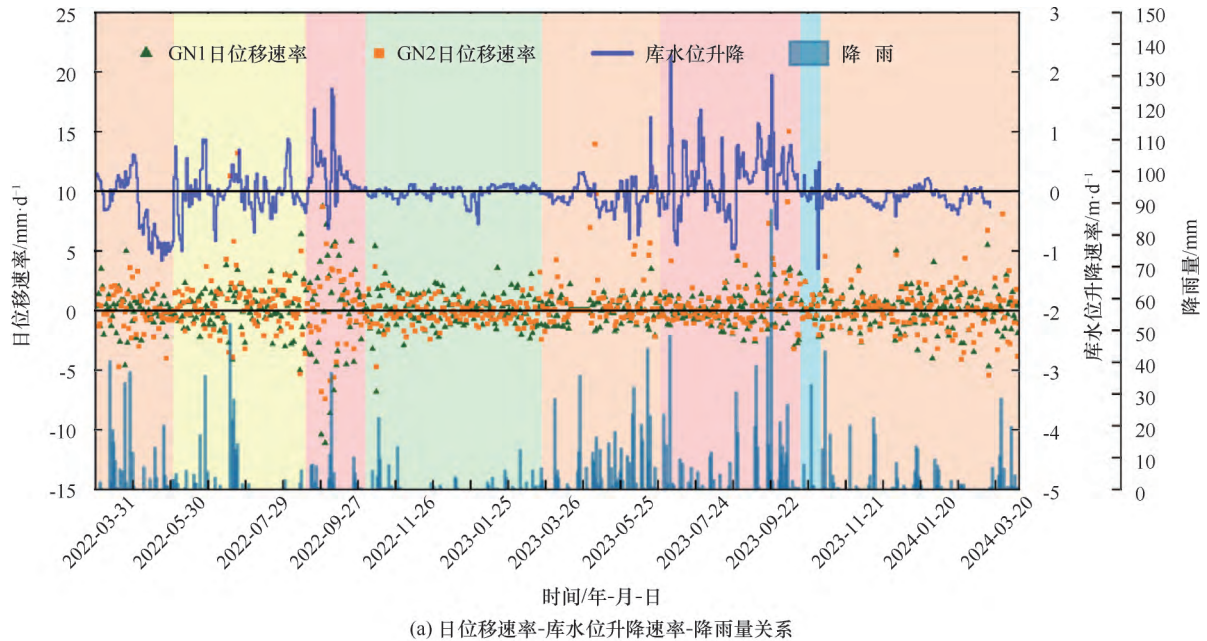


图4 周家沟滑坡 GNSS 自动监测点累积位移-库水位-降雨量关系  
及日位移速率-库水位升降速率-降雨量关系

Fig. 4 The cumulative displacement-reservoir water level-rainfall relationship diagram of the Zhoujiagou landslide GNSS automatic monitoring point and the daily displacement rate-reservoir water level rise and fall rate-rainfall relationship diagram

2023年4月3日, 累计降雨量为756.8 mm, GN1、GN2 形变未见明显变化, 而在2023年4月4日至2023年6月19日, 累计降雨量为1145.2 mm, GN2 位移速率日均增加1.06 mm, 2023年9月20日至2023年10月7日, 累计降雨量为1688.8 mm, GN1、GN2 位移速率日均增加0.47 mm、2.88 mm。

降雨诱发土质滑坡的机理主要包括饱水效应与软化效应。降雨强度大、持续时间长的过程易使土体饱

水并软化滑带, 从而触发滑坡, 且变形常具滞后性, 通常在降雨后期或雨停后1~2天, 坡体完全饱水时发生。然而随着库水位升降, 降雨对滑坡的变形突变也相应受到影响。

2023年5—6月连续降雨作用下, 滑坡变形突变明显, 库水位涨幅不明显, 这一阶段滑坡变形主要与连续强降雨有关。如图5所示, 由周家沟滑坡库水位-月降雨量关系可知, 降雨强度的增减与库水位涨

落具有较强相关性。在库水位上升期, 2022 年上升速率(0.30 m/d) 高于 2023 年(0.21 m/d), 但 GN1 和 GN2 日均位移速率(0.07 mm/d、0.02 mm/d) 低于 2023 年(0.11 mm/d、0.64 mm/d), 这与 2022 年降雨强度较低(最大单日降雨量 36.6 mm) 而 2023 年较高(最大单日降雨量 87.8 mm) 一致, 显示强降雨在库水位上升期对滑坡变形的促进作用。2022 年 10 月、2023 年 7 月与 2023 年 10 月库水位上升、降雨量增加与位移加速趋势相互对应, 通过近两年的监测数据分析可知, 降雨是诱发周家沟的滑坡变形的主要因素。

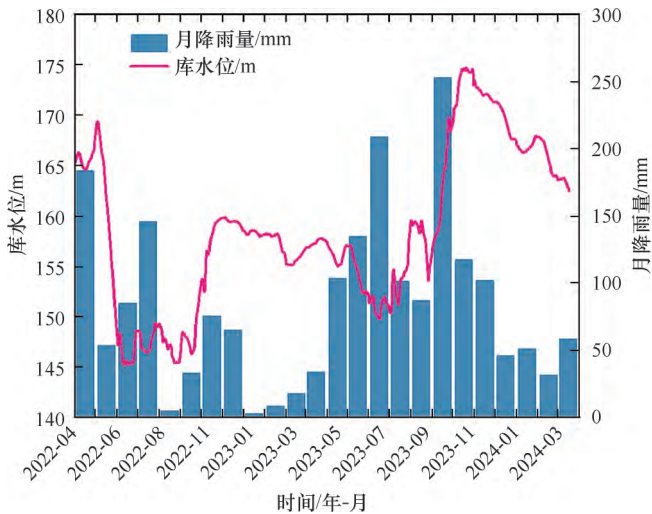


图 5 周家沟滑坡库水位-月降雨量关系

Fig. 5 Relationship between reservoir water level and monthly rainfall for the Zhoujiagou landslide

### 3 GeoStudio 数值模拟

#### 3.1 滑坡计算模型

为进一步分析周家沟滑坡的变形机理, 基于 GeoStudio 软件 SLOPE/W 模块对滑坡进行稳定性分析。计算网格模型节点数为 11 513, 单元数为 11 287, 网络类型为四边形与三角形混合, 周家沟数值模拟计算模型如图 6 所示。

#### 3.2 计算原理

首先在 Seep/W 中建立有限元分析模型, 将有限元计算结果导入 Sigma/W 后得到不同时刻渗透力作用下的应力应变。Slope/W 导入 Seep/W 得到库水耦合降雨条件下的安全系数计算。根据滑坡所在地区的自然情况, 不考虑地震对此地区的影响, 进行实际降雨与模拟工况条件下的滑动面稳定性评价。

#### 3.3 滑坡计算参数

选择周家沟滑坡 A-A' 剖面建立数值模拟模型, 计算模型长 224 m, 高 220 m, 如图 6 所示。根据勘

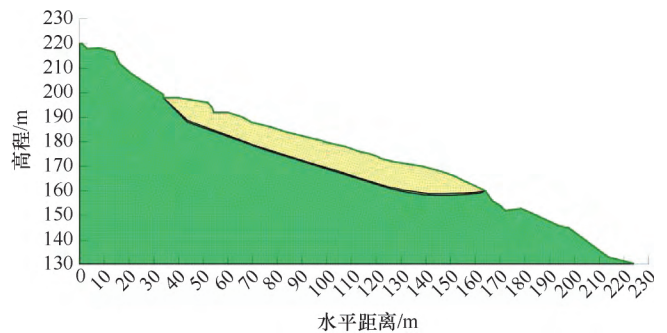


图 6 周家沟数值模拟计算模型

Fig. 6 Zhoujiagou numerical simulation calculation model

察资料和工程类比获取相关物理力学参数, 如黏聚力  $C$  (kPa)、内摩擦角  $\phi$  ( $^\circ$ ) 等, 如表 2 所列。

表 2 数值模拟物理力学参数

Table 2 Numerical simulation of physical

滑坡层	重度 /kN · m <sup>-3</sup>	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )	渗透系数 /m · d <sup>-1</sup>
滑床	24	255	32	0.352 8
滑带	18	12.7	30	0.004 3
滑体	19	18	12.5	0.000 1

#### 3.4 滑坡计算工况

滑坡易发生于每年峰值降雨时期, 秭归县内降雨多以中小雨为主, 时有暴雨发生。根据周家沟滑坡实际降雨情况, 结合实际库水升降速率进行实际工况计算。

#### 3.5 滑坡渗流场分析

库水位在 150 上升至 175 m 期间, 坡体地下水渗流特性如图 7 所示。当库水位低于 160 m 时, 地下水位线变化不明显, 地下水位线主要由降雨影响; 当库水位从 160 m 逐渐上升时, 地下水位线变化幅度随之变大, 库水作用的影响逐步体现出来, 这与之前数据分析的结论保持一致。

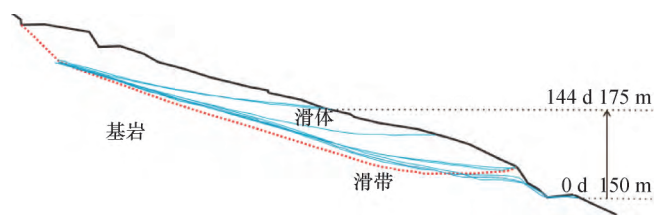


图 7 库水位上升时地下水位曲线

Fig. 7 Groundwater level curve when reservoir water level rises

滑坡体前部力的产生、变化主要是受地下水渗流和库水动、静水压力的影响。当库水位升降速率远大

于滑坡体的渗透系数时, 滑坡体内部的地下水位与库水位无法保持一致, 所产生的水头差决定了坡体内外渗透压力的大小。

库水位上升过程中坡体单位流量通过箭头的大小及方向表示, 直观地呈现出坡内地下水渗流速度大小和方向的分布情况, 如图 8 所示。库水位上升至 159.94 m (2023 年 9 月 12 日), 地下水渗流方向指向坡外, 位置集中于坡体前部, 坡体后部所受影响甚微; 当库水位上升至 161.08 m (2023 年 9 月 13 日) 时, 地下水渗流方向指向坡内, 坡体前部地下水位出现了明显的反曲状态。库水位上升阶段, 库水位与地下水位形成的动、静水压力指向坡内, 从而抵消了降雨对滑坡变形的促进作用, 但库水上升的抵消作用具有一定限度, 单次强降雨之后, 降雨对滑坡变形的影响将占据主导作用。模拟实际工况中, 当库水位上升至 166.86 m (2023 年 9 月 23 日), 单次强降雨量高达 87.8 mm/d, 稳定性明显降低, 此时滑坡前部受库水及降雨作用的联合影响, 后部则主要受到降雨影响。

### 3.6 滑坡位移场分析

为了探究周家沟滑坡在实际工况下的位移特性, 图 9 清晰揭示了周家沟滑坡实际工况下位移的演化规律: (1) 2022 年 7 月 23 日, 坡体受库水渗透和前期降雨入渗的共同作用, 前缘区域开始出现初期变形, 而后缘区域尚未显著响应。此时, 库水位低于 160 m, 降雨成为主导变形的关键因素。(2) 2023 年 7 月 5 日, 随着降雨持续作用, 坡体后缘变形逐渐显现, 变形范围从中部向前缘扩展, 呈现出推移式滑动的特征。(3) 2023 年 10 月 9 日, 随着库水位持续上升并叠加降雨量的增加, 后缘变形范围显著扩大, 变形程度加剧, 成为年度内坡体变形最为剧烈的时期。滑坡变形模式表现为渐进式滑动, 表

明库水波动在高水位条件下显著增强了降雨的诱发效应。

基于图 9 的分析, 可以发现: 当库水位低于 160 m 时, 降雨是驱动滑坡位移的主要因素; 而当库水位上升并与降雨叠加时, 二者协同作用显著加剧坡体变形。这一结论与前文稳定性分析高度一致。为评估模型准确性, GN2 监测点模拟位移 (2022 年 4 月 1 日至 2024 年 1 月 1 日, 样本数  $n=641$ ) 与实测数据被对比, 如图 10 所示。计算结果显示, 平均相对误

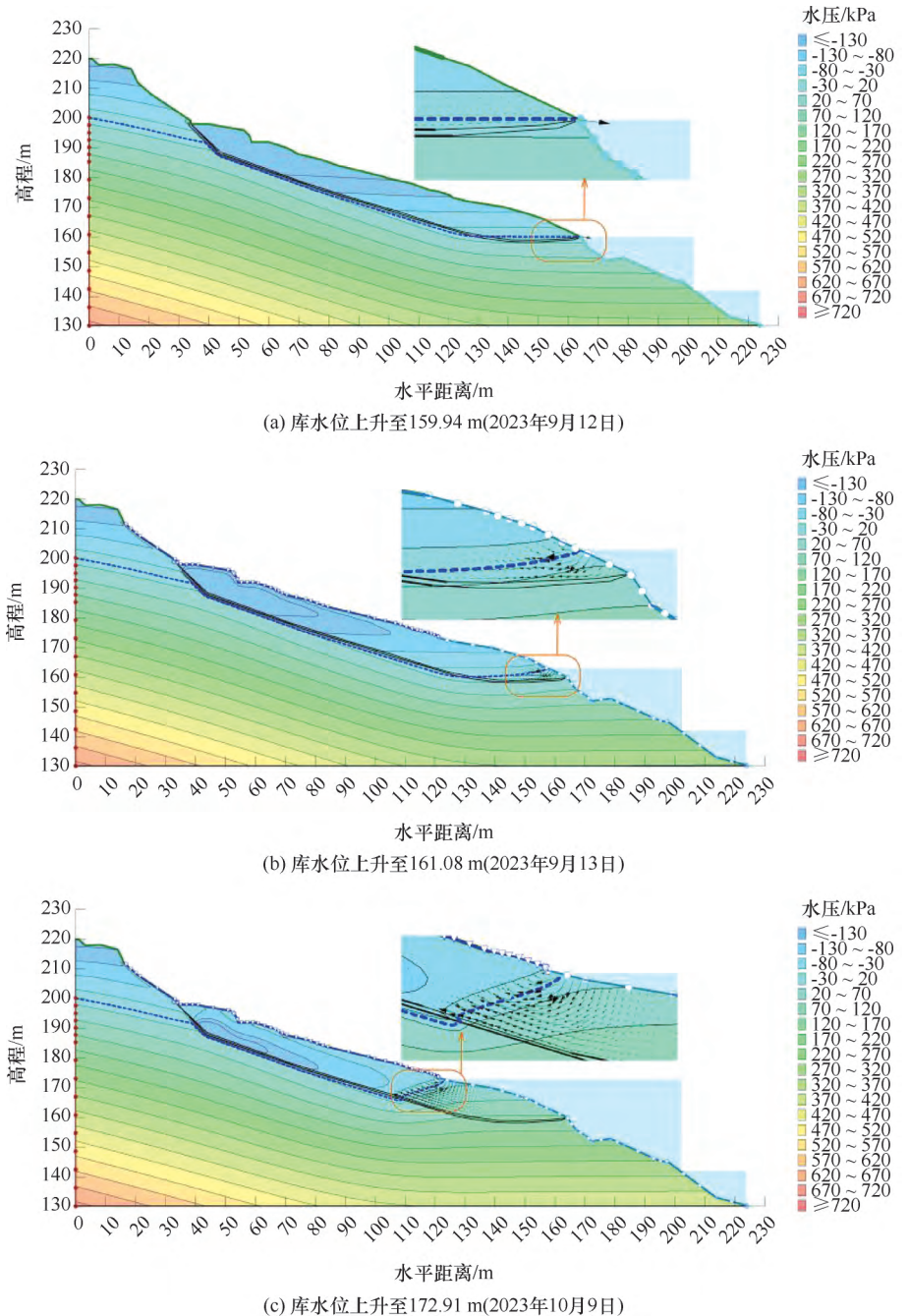


图 8 周家沟滑坡库水及降雨作用渗流场

Fig. 8 Zhoujiagou landslide reservoir water and rainfall seepage field

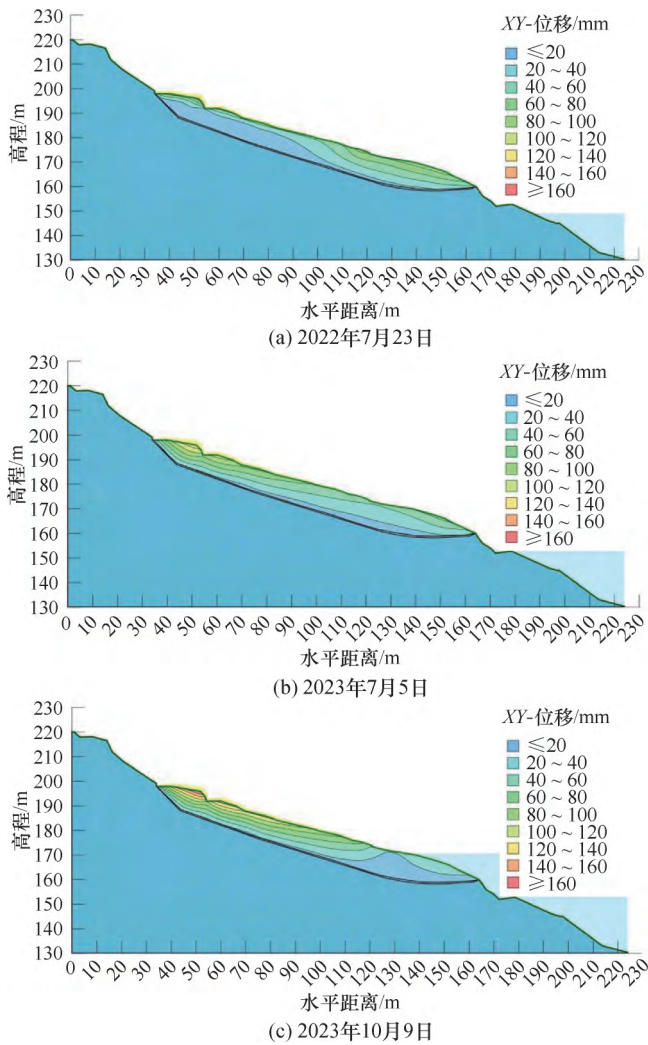


图9 周家沟滑坡实际工况下位移场

Fig. 9 Displacement field of Zhoujiagou landslide under actual operating conditions

差 ( $MRE$ ) 为 17.22%, 均方根误差 ( $RMSE$ ) 为 30.158 m, 平均绝对误差 ( $MAE$ ) 为 22.487 m, 决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.879。表明模拟位移与实测数据的趋势高度一致, 变形突变吻合良好。然而, 较高的  $RMSE$  和  $MAE$  显示在某些突变时段(如 2022 年 7 月 20 日, 相对误差 28.5%) 存在显著偏差。其中, 2023 年 1 月 1 日至 2023 年 2 月 25 日期间偏差最大, 相对误差高达 90%, 可能源于降雨数据分辨率不足或滑体黏聚力(15 kPa) 设定偏低。通过敏感性分析, 当滑体黏聚力从 15 kPa 调整至 20 kPa 时,  $RMSE$  减小至 27.943 m,  $R^2$  增至 0.891, 模型准确性有所提升。误差来源主要包括降雨输入数据的不确定性、黏聚力参数设定偏低等原因。在滑坡受多因素(如降雨、库水、地质条件) 共同控制的背景下, 上述误差被认为在可接受范围内。结果显示, 数值模拟与实际监测数据的吻合度较高, 二者均呈现出明显的变形突变。以 2022 年 4 月至 2024 年 1 月周家沟滑坡实测累计位移为基准, 模拟结果与实测数据的平均相对误差控制在小于 18% 范围。尽管模拟位移在中段与实际数据存在一定偏差, 但考虑到滑坡的形成受多种因素(如地质条件、降雨、库水波动等) 共同控制, 而本次模拟主要聚焦于降雨和库水的实际工况影响, 所得误差被认为在可接受范围内。通过对数值模拟位移结果的进一步分析, 可得出以下总体发现与规律性解释: 滑坡位移曲线的变化与降雨强度呈现显著的正相关关系, 尤其是在降雨量较大的时段, 位移表现出明显的突变式增长趋势, 这一规律表明降雨是驱动滑坡位移的主要因素。

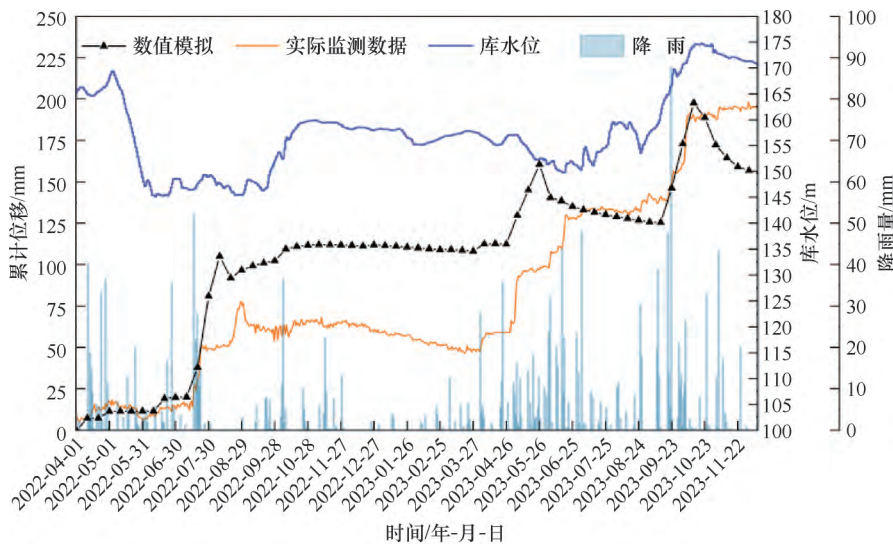


图10 周家沟滑坡模拟位移-实际位移对比

Fig. 10 Comparison of Simulated Displacement and Actual Displacement of Zhoujiagou Landslide

表3 周家沟滑坡不同运营阶段稳定系数(实际工况)

Table 3 Stability coefficient of Zhoujiagou landslide in different operating stages (Actual working conditions)

库水位/m	145	145~160	160~150	150~175	175
稳定系数	1.132	1.131	1.110	1.080	1.014

### 3.7 滑坡稳定性分析

#### 3.7.1 实际工况

根据实际工况可以得出数值模拟结果与数值分析得出的结论较为符合。当库水位在中低水位运行阶段时,库水位对滑坡的稳定系数影响较小,当库水位处于上升阶段时,伴随着降雨作用滑坡的稳定系数逐渐减小,如表3所列。

#### 3.7.2 模拟工况

滑坡易发生在每年峰值降雨期。秭归县域内降雨多以中小雨为主,时有暴雨发生。为模拟实际情景,设定库水位从145 m开始,分别以0.4 m/d、0.8 m/d和1.2 m/d的速率下降,并分别考虑耦合降雨与不耦合降雨两种条件,共形成6种模拟工况(见表4和图11)。

表4 周家沟滑坡数值模拟计算工况

Table 4 Numerical simulation of Zhoujiagou landslide

序号	工况
1	库水位 175~145 m 波动, 降速 0.4 m/d
2	库水位 175~145 m 波动, 降速 0.8 m/d
3	库水位 175~145 m 波动, 降速 1.2 m/d
4	库水位 175~145 m 波动, 降速 0.4 m/d+单日暴雨 80 mm/d
5	库水位 175~145 m 波动, 降速 0.8 m/d+单日暴雨 80 mm/d
6	库水位 175~145 m 波动, 降速 1.2 m/d+单日暴雨 80 mm/d

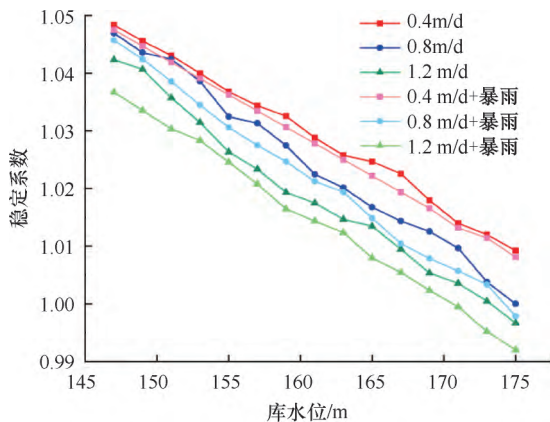


图11 不同工况下的滑坡稳定系数变化

Fig. 11 Variation of slope stability coefficient under different working conditions

分析结果表明:随着库水位下降,滑坡的稳定系数逐渐减小,且库水位下降速率越大,稳定系数的下降幅度越大,曲线波动也越明显。例如,库水位以

1.2 m/d 下降时,稳定系数从初始的1.0423降至约0.996。从曲线下降趋势来看,在库水位达到160 m之前,各工况的稳定系数下降幅度均小于160 m之后。叠加降雨因素后,同一工况下的稳定系数显著低于未考虑降雨的情况。其中,库水位以1.2 m/d下降并叠加单日暴雨80 mm/d的工况最为危险,稳定系数降至0.992。在相同库水位高程下,考虑降雨的稳定系数较不考虑时低0.001~0.004,与实际工况一致,验证了降雨与库水位对稳定性的显著影响。

## 4 讨论

本文利用有限元软件Geo-Studio对周家沟滑坡的渗流场与稳定性进行了数值模拟,结合2022年4月至2024年4月的库水位变化和降雨数据,深入分析其变形特征与失稳机理。相较于传统方法,如极限平衡法(Bishop法<sup>[15]</sup>或Janbu法<sup>[16]</sup>)和基于统计的经验模型<sup>[17]</sup>,以及其他数值模拟方法<sup>[18-20]</sup>,Geo-Studio通过有限元方法耦合地下水渗流与坡体应力的动态变化,展现出显著优越性。例如,模拟工况1结果显示,库水位从145 m升至175 m时,稳定系数从1.0483降至1.0092;日降雨量80 mm时,稳定系数进一步降至1.0081。而极限平衡法仅考虑静态平衡,忽略渗流动态变化,稳定系数计算偏差可达13%;Janbu法在软弱层稳定性分析中有效,但在复杂渗流条件下的稳定系数偏差约为8%。相比之下,许强<sup>[17]</sup>的统计模型高度依赖历史数据,难以适应数据匮乏或地质条件特殊的场景,而Geo-Studio通过物理力学模型模拟土体响应,特别适合周家沟滑坡这类地质特征明确但监测数据有限的案例。与李晨嘉等<sup>[18]</sup>仅聚焦降雨入渗的Geo-Studio分析相比,本研究进一步耦合了库水位波动的影响,揭示库水位超过160 m之后动水压力对稳定系数的正向贡献;然而,Geo-Studio对地质参数精确性要求高;相比极限平衡法的快速计算<sup>[15-16]</sup>,其建模过程耗时较长,降低了大规模滑坡群分析的效率;在极端降雨条件下,模拟位移往往低于实测值,可能是由于土体软化效应的模拟不足。

在结果对比方面,研究发现周家沟滑坡在2022年4月至2024年4月期间发生了四次变形突变,与集中强降雨(日降雨量>35.6 mm)密切相关,并伴有明显的滞后效应。这一特征与三峡库区其他滑坡(如

八字门滑坡)的结论存在一定共性。以八字门滑坡为例<sup>[5-8]</sup>,其降雨阈值约为月降雨量 250~300 mm 或单日降雨量 100 mm 以上,滞后时间通常为降雨后 2~5 d或库水位下降后 5~10 d,位移量在强降雨和快速水位下降期可达 50~100 mm/月,单次强降雨引发突增约 60~100 mm<sup>[5-6]</sup>。周家沟滑坡在库水位超过 160 m 时,降雨阈值升至 40 mm,表明高水位下动水压力对稳定性的正向作用更显著。这种差异可能源于两者的地质特性:八字门滑坡以碎屑岩为主,渗透性较高,降雨入渗迅速导致孔隙水压力快速累积;而周家沟滑坡土体可能富含黏性成分,渗流响应相对迟缓。此外,模拟结果显示,在极端降雨条件下(日降雨量>50 mm),周家沟滑坡的位移幅度可能被低估,这与八字门滑坡研究中提到的土体软化效应未充分模拟的结论相呼应,提示模型在极端工况下的适用性尚待优化。ZHANG 等<sup>[6]</sup>通过 VMD-Bi-LSTM 预测八字门滑坡位移,误差控制在 5%以内,提示本研究可引入机器学习优化极端工况预测。ZHANG 等<sup>[8]</sup>通过概率分析提高八字门滑坡稳定性评估精度(误差<3%),表明本研究在验证深度上需改进。

基于当前分析,研究存在以下不足:首先,受监测数据时效性与空间覆盖的限制,仅依赖周家沟滑坡的两个测点,尚难以全面反映坡体内部应力场的动态演变;其次,模型未充分考虑土体在长期水文作用下的劣化效应(如黏土矿物膨胀或强度衰减),可能导致长期稳定性预测略显乐观。与李晨嘉等<sup>[18]</sup>通过多工况验证的分析相比,本研究基于单一滑坡案例,泛化能力待提升。相较之下,八字门滑坡研究<sup>[5-8]</sup>通过多时段监测和概率分析,预测误差控制在±3%。未来可增加深部位移计(覆盖率提升至 80%)、采样频率(每 6 小时 1 次)、引入劣化模型和机器学习,以提升预测精度。

综上所述,研究通过数值模拟阐明了周家沟滑坡变形突变的成因及其与降雨、库水位的关联性,与八字门滑坡的对比进一步揭示了两者在水文作用下的差异。成果为三峡库区类似滑坡的监测与预警提供了科学依据,但未来需在数据精度和模型完善方面持续改进。

## 5 结论

(1) 周家沟滑坡目前呈间歇性变形突变,处于欠稳定状态,显著受库水位变化驱动。在低水位和中水位阶段,库水对滑坡的作用相对较小,位移变化不明显。在库水位快速上升阶段,滑坡变形显著加剧,易

引发周家沟滑坡加速位移。

(2) 降雨是滑坡变形的主导诱因。周家沟滑坡 2022 年 4 月至 2024 年 4 月的累计位移监测数据显示,滑坡发生 4 次变形突变,均与集中强降雨事件高度吻合,每次突变对应的日降雨量均超过 35.6 mm。分析表明,降雨强度和持续时间对变形起关键作用,尤其在雨季高峰期,滑坡稳定性显著下降。

(3) 降雨与库水位协同作用下,滑坡变形幅度显著增大,反映两者紧密关联。降雨作为直接触发因素,与库水位升降形成耦合效应,共同影响滑坡稳定性。当库水位超过 160 m 时,坡体内部的动水压力增强,有助于抵御外部扰动,使坡体稳定性提升,降雨诱发滑坡的阈值相应提高至 40 mm。此外,在库水位较低时,降雨对滑坡的破坏作用更为显著,表明库水位高程是调控降雨效应的重要变量。

(4) 针对不利工况模拟结果,建议采取以下措施降低风险:完善边坡排水设施(如截排水沟或地下排水管),及时缓解降雨渗流压力;对关键部位施加锚固或护坡加固,特别应对库水位骤降与强降雨叠加情景,提升抗滑能力。

## 参考文献(References):

- [1] 易武,孟召平,易庆林. 三峡库区滑坡预测理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
YI Wu, MENG Zhaoping, YI Qinglin. Theoretical Method and Research of Landslide Prediction in the Three Gorges Reservoir Area [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] 邓茂林,易庆林,韩蓓,等. 长江三峡库区木鱼包滑坡地表变形规律分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3145-3152.  
DENG Maolin, YI Qinglin, HAN Bei, et al. Analysis of surface deformation law of Muyubao landslide in Three Gorges reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3145-3152.
- [3] 王世梅,刘佳龙,王力,等. 三峡水库库水位升降对谭家河滑坡影响分析[J]. 人民长江, 2015, 46(8): 83-86.  
WANG Shimei, LIU Jialong, WANG Li, et al. Analysis on influence of TGP reservoir water level fluctuation on stability of Tanjiahe Landslide [J]. Yangtze River, 2015, 46(8): 83-86.
- [4] CHEN Y Z, ZHANG Y, WANG L, et al. Influencing factors, deformation mechanism and failure process prediction for reservoir rock landslides: Tanjiahe landslide, Three Gorges Reservoir Area [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 974301.
- [5] 张桂荣,程伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 476-482.  
ZHANG Guirong, CHENG Wei. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 476-482.
- [6] ZHANG K, ZHANG K, CAI C X, et al. Displacement prediction of

- step-like landslides based on feature optimization and VMD-Bi-LSTM: A case study of the Bazimen and Baishuihe landslides in the Three Gorges, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(11): 8481-8502.
- [7] ZHANG W G, WU C Z, TANG L B, et al. Efficient time-variant reliability analysis of Bazimen landslide in the Three Gorges Reservoir Area using XGBoost and LightGBM algorithms [J]. *Gondwana Research*, 2023, 123: 41-53.
- [8] ZHANG W G, TANG L B, LI H R, et al. Probabilistic stability analysis of Bazimen landslide with monitored rainfall data and water level fluctuations in Three Gorges Reservoir, China [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2020, 14(5): 1-15.
- [9] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4): 1123-1130.  
LU Shuqiang, YI Qinglin, YI Wu, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4): 1123-1130.
- [10] WU Q, TANG H M, MA X H, et al. Identification of movement characteristics and causal factors of the Shuping landslide based on monitored displacements [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78: 2093-2106.
- [11] DAI Z W, YIN Y P, WEI Y J, et al. Deformation and failure mechanism of Outang landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(1): 44-55.
- [12] 许强, 朱星, 李为乐, 等. “天-空-地”协同滑坡监测技术进展 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1416-1436.  
XU Qiang, ZHU Xing, Li Weile, et al. Technical progress of space-air-ground collaborative monitoring of landslide [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1416-1436.
- [13] 许强, 黄学斌. 三峡库区滑坡灾害预警预报手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2014.  
XU Qiang, HUANG Xuebin. *Handbook for Landslide Disaster Warning and Forecasting in the Three Gorges Reservoir Area* [M]. Beijing: Geological Press, 2014.
- [14] 冯振, 李滨, 赵超英, 等. 三峡库区山区城镇重大地质灾害监测预警示范研究 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22(3): 685-694.  
FENG Zhen, LI Bin, ZHAO Chaoying, et al. Geological hazards monitoring and application in mountainous town of Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(3): 685-694.
- [15] HU G R, LI B, YAN X B, et al. Research on the stability of loess landslides under seismic action based on simplified bishop method [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1490558.
- [16] 鲁松林. 基于简化 Janbu 法的夹炭质泥岩软弱层的溶蚀峰丛斜坡边坡稳定性分析 [J]. *价值工程*, 2024, 43(24): 125-127.  
LU Songlin. Slope stability analysis of dissolution peak cluster slope in carbonaceous mudstone soft layer based on simplified Janbu method [J]. *Value Engineering*, 2024, 43(24): 125-127.
- [17] 许强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理 [J]. *工程地质学报*, 2012, 20(2): 145-151.  
XU Qiang. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(2): 145-151.
- [18] 李晨嘉, 孙立娟, 赵一韩, 等. 基于 GeoStudio 的降雨入渗边坡稳定性分析的数值模拟研究 [J]. *吉林建筑大学学报*, 2024, 41(5): 44-52.  
LI Chenjia, SUN Lijuan, ZHAO Yihan, et al. Numerical simulation of stability analysis of rainfall infiltration slope based on GeoStudio [J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2024, 41(5): 44-52.
- [19] 禹燕生. 基于 Geostudio 分析降雨对边坡稳定性的影响 [J]. *水泥工程*, 2024(2): 83-85.  
YU Yansheng. Analysis of the Influence of rainfall on slope stability based on Geostudio [J]. *Cement Engineering*, 2024(2): 83-85.
- [20] SUN Y S, LI Z H, YANG K, et al. Analysis of the Influence of water level change on the seepage field and stability of a slope based on a numerical simulation method [J]. *Water*, 2023, 15(2): 216-216.
- [21] ZEWDU A B, KEGNE S B, DESSIE M W, et al. A comparative evaluation of seepage and stability of embankment dams using geostudio and Plaxis models: the case of Gomit Dam in Amhara Region, Ethiopia [J]. *Water Conservation Science and Engineering*, 2022, 7(4): 429-441.
- [22] WANG F W, ZHANG Y M, HUO Z T, et al. Movement of the Shuping landslide in the first four years after the initial impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China [J]. *Landslides*, 2008, 5: 321-329.
- [23] TONG D F, SU A J, TAN F, et al. Genetic mechanism of water-rich landslide considering antecedent rainfalls: A case study of Pingyikou landslide in three Gorges reservoir area [J]. *Journal of Earth Science*, 2023, 34(6): 1878-1891.
- [24] CHEN H Y, ZOU J H, WANG X H, et al. Inducing factors and deformation mechanism of the Zhangjiacitang landslide in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 12926.
- [25] 邓茂林, 周剑, 易庆林, 等. 三峡库区靠椅状土质滑坡变形特征及机制分析 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(7): 1296-1303.  
DENG Maolin, ZHOU Jian, YI Qinlin, et al. Characteristics and mechanism of deformation of chair-shaped soil landslides in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(7): 1296-1303.
- [26] 张富灵, 邓茂林, 周剑, 等. 长江三峡库区谭家湾滑坡基本变形特征及机理分析 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(1): 78-83.  
ZHANG Fuling, DENG Maolin, ZHOU Jian, et al. Basic deformation characteristics and mechanism of Tanjiawan landslide in Three Gorges reservoir area [J]. *Journal of Changjiang River Sciences Research Institute*, 2021, 38(1): 78-83.
- [27] TANG H M, WASOWSKI J, JUANG C H. Geohazards in the Three Gorges Reservoir Area, China: Lessons learned from decades of research [J]. *Engineering Geology*, 2019, 261: 105267.
- [28] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. *工程地质分析原理* [M]. 3 版. 北京: 地质出版社, 2009.  
ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. *Principles of Engineering Geology* [M]. 3rd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [29] 朱朋, 卢书强, 薛聪聪, 等. 库水位升降与降雨条件下滑坡的渗流及稳定性分析 [J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(11): 87-92.

- ZHU Peng, LU Shuqiang, XUE Congcong, et al. Seepage flow and stability analysis of a landslide under the conditions of water level fluctuation of reservoir and rainfall [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32( 11): 87-92.
- [30] DAI Z W, ZHANG Y J, ZHANG C Y, et al. Interpreting the influence of reservoir water level fluctuation on the seepage and stability of an ancient landslide in the Three Gorges Reservoir Area: A case study of the Outang landslide [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40( 9): 4551-4561.
- [31] LI B Y, WANG G L, CHEN L C, et al. Analysis of landslide deformation mechanisms and coupling effects under rainfall and reservoir water level effects [J]. Engineering Geology, 2024, 343: 107803.
- [32] TANG L Z, YAN Y, ZHANG F M, et al. A case study for analysis of stability and treatment measures of a landslide under rainfall with the changes in pore water pressure [J]. Water, 2024, 16( 21): 3113.
- [33] ZHU Y R, QIU H J, LIU Z J, et al. Rainfall and water level fluctuations dominated the landslide deformation at Baihetan Reservoir, China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 642: 131871.
- [34] SHUN T H, LI G X, QIAN D Z, et al. Stability analysis of Gongjiacun landslide in the Three Gorges Reservoir area under the action of reservoir water level fluctuation and rainfall [J]. Natural Hazards, 2022, 114 ( 2): 1647-1683.
- [35] ZHANG F L, DENG M L, YI Q L, et al. Deformation characteristics and thresholds of the Tanjiawan landslide in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19 ( 5): 1370-1385.

(责任编辑 王海锋)