

引用格式: 史学磊, 韩旭东, 杨秀元, 等, 2023. 三峡库区溪沟湾滑坡的诱发因素及前期降雨影响 [J]. 地质力学学报, 29 (2): 253–263. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022049

Citation: SHI X L, HAN X D, YANG X Y, et al., 2023. Factors inducing the Xigouwan landslide in the Three Gorges Reservoir area and the influence of antecedent precipitation [J]. Journal of Geomechanics, 29 (2): 253–263. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022049

三峡库区溪沟湾滑坡的诱发因素及前期降雨影响

史学磊^{1,2,3}, 韩旭东^{1,2,3}, 杨秀元^{1,3}, 孙秀娟^{1,3}, 李严严⁴

SHI Xuelei^{1,2,3}, HAN Xudong^{1,2,3}, YANG Xiuyuan^{1,3}, SUN Xiujuan^{1,3}, LI Yanyan⁴

1. 自然资源部三峡库区地质灾害监测预警野外科学观测研究站, 重庆 404700;

2. 自然资源部地质环境监测工程技术创新中心, 河北 保定 071051;

3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051;

4. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124

1. *Field Scientific Observation and Research Platform for Geological Hazards Monitoring and Early Warning in Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Natural Resources, Chongqing 404700, China;*

2. *Innovation Center for Geological Environment Monitoring Technology of Ministry of Natural Resources, Baoding 071051, Hebei, China;*

3. *Center for Hydrogeology and Environment, CGS, Baoding 071051, Hebei, China;*

4. *Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Factors inducing the Xigouwan landslide in the Three Gorges Reservoir area and the influence of antecedent precipitation

Abstract: Monitoring data over the years have shown that seasonal rainfall and reservoir level changes have always accompanied the accelerated deformation of the Xigouwan landslide, which makes it difficult to identify the dominant triggering factors of landslide deformation and poses a challenge to risk analysis. Given this, this paper analyzed the correlation between the daily deformation rate of the active and inactive areas in the Xigouwan landslide and rainfall, reservoir level, and the change rate of reservoir level by applying the attribute reduction algorithm of the neighborhood rough set model. The calculation results showed that the deformation in the active area was mainly affected by the rainfall in the past seven days. It was also related to the short-term change rate of reservoir water level in some ways. The weak deformation in the inactive area was related to the change rate of reservoir water level in the past three days. Then, based on the landslide deformation characteristics, it was further obtained that the average rainfall in the past seven days inducing severe deformation in the active area was about 20 mm. The decline of the reservoir water level influenced its deformation, but the effect was small. The reservoir level change affected the weak deformation in the inactive area with negligible influence, while the weak deformation in the inactive area was mainly influenced by the reservoir level change. Finally, the seepage-mechanics numerical analysis of the Xigouwan landslide reveals the deformation mechanism of the active area under long-duration early rainfall. As the rainfall intensity increased from 1 mm/d to 20 mm/d, the pore water pressure at the bottom of the landslide body gradually increased. The internal reservoir level rose and extended to the active area, which caused the landslide body in the active area to go from a stable state to an under-stable state, leading

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1509702); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190715, DD20221813)

This research is financially supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant 2019YFC1509702) and the Public Welfare Project of the China Geological Survey (Grants DD20190715 and DD20221813).

第一作者: 史学磊 (1971—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事重庆三峡库区地质灾害监测预警研究。E-mail: shixuelei@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 韩旭东 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事工程地质与灾害研究工作。E-mail: hanxudong@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-10-10; 责任编辑: 吴芳

to large deformation in the active area. In addition, the numerical simulation results further showed that the decline of the reservoir level had little effect on the internal seepage field and the stability in the active area. The reservoir level change greatly influenced the internal seepage field in the inactive area, indicating that the weak deformation in the inactive area was mainly affected by the reservoir level change. The complete analysis results of factors inducing the Xigouwan landslide in this paper can help provide early warning. The average rainfall of 20 mm in the past seven days can be used as one of the early warning thresholds for severe deformation in the active area of the Xigouwan landslide.

Keywords: Xigouwan landslide; triggering factors; antecedent precipitation; warning threshold; geological disaster

摘 要: 多年来的监测数据表明溪沟湾滑坡加速变形时总伴随着季节性降雨和库水位变动, 难以辨别滑坡变形的主导诱发因素, 对风险分析带来了挑战。鉴于此, 论文首先采用邻域粗糙集模型中的属性约简算法, 对溪沟湾滑坡活跃区和非活跃区日变形速率与降雨、库水位和库水位变动速率因素之间的相关性进行了系统分析, 计算结果表明溪沟湾滑坡活跃区变形主要受过去 7 日降雨因素影响, 并与短期库水位变化率因素存在关联性, 滑坡非活跃区的微弱变形与过去 3 日库水位变化率因素存在关联性。然后, 结合滑坡变形特征, 研究发现诱发溪沟湾滑坡活跃区剧烈变形的过去 7 天平均降雨量在 20 mm 左右, 库水位下降因素对其变形存在影响, 但影响较小, 而溪沟湾滑坡非活跃区的微弱变形主要受库水位波动影响。最后, 通过对溪沟湾滑坡进行渗流-力学数值计算分析, 结果揭示了溪沟湾滑坡活跃区受长历时前期降雨作用的变形机理。数值分析过程中, 当降雨强度由 1 mm/d 增至 20 mm/d, 降雨造成滑坡体内部孔隙水压逐渐增大, 内部水位抬升并不断向滑坡活跃区延伸, 导致活跃区滑坡体由稳定状态降至欠稳定状态, 进而引发溪沟湾滑坡活跃区变形加剧。此外, 数值模拟结果也表明库水位下降因素对滑坡活跃区内部渗流场影响较小, 对其稳定性影响有限, 而库水位变动对滑坡非活跃区内部渗流场影响较大, 说明滑坡非活跃区的微弱变形主要受库水位波动影响。论文针对溪沟湾滑坡变形诱发因素的综合分析结果, 有助于对该滑坡进行风险预警, 可将过去 7 日平均降雨量 20 mm 作为诱发溪沟湾滑坡活跃区剧烈变形预警阈值之一。

关键词: 溪沟湾滑坡; 诱发因素; 前期降雨; 预警阈值; 地质灾害

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 02-0253-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022049

0 引言

截至 2021 年底, 中国已发现的地质灾害隐患达 30 多万处, 为了应对地质灾害隐患, 中国政府建成了全国普及的群测群防体系, 监测预警体系也在加速推进, 但地质灾害防御形势依然十分严峻。如何分析和把控地质灾害隐患风险已成为地质灾害防御工作的重点。研究诱发因素及其影响是地质灾害隐患风险分析与把控的关键。库水位变动和降雨被认为是诱发库区滑坡的两大重要因素 (Tang et al., 2019a; 谭淋耘等, 2020; Hu et al., 2021)。库水位变动诱发库区滑坡可大致概括为两类: 一类是水库蓄水形成高水位, 渗透性较高的库岸滑坡下部滑体淹没于库水位之下, 造成滑体内部孔隙水压力抬升, 有效应力降低, 进而导致滑体加剧变形乃至失稳 (Tang et al., 2019b;

Zhang et al., 2021a); 另一类是库水位快速下降, 渗透性较低的库岸滑坡下部滑体快速暴露于库水位之上, 造成滑体内部水压力无法快速消散, 形成朝向水库方向的渗透压力, 进而导致滑体加剧变形乃至失稳 (Gu et al., 2017; Huang et al., 2020)。降雨是诱发库区滑坡的普遍因素, 但近年来, 随着对库区滑坡诱发因素研究的深入, 发现降雨对滑体不同部位的影响程度是不同的 (谭淋耘等, 2021)。代贞伟等 (2016) 和黄达等 (2019) 通过研究三峡库区藕塘滑坡变形特征, 发现降雨影响该滑坡中后端滑坡体变形, 库水位波动影响其前端滑坡体变形。朱伟等 (2017)、Yao et al. (2019) 和尚敏等 (2021) 通过研究白家包滑坡的变形特征, 认为降雨和水库蓄水形成的高水位的共同作用是白家包滑坡前端变形失稳的关键, 即该滑坡中后端滑坡体变形与降雨和库水位波动有关。

多年来的监测数据表明库区滑坡加速变形时总伴随着季节性降雨和库水位变动,这造成滑坡变形的主导诱发因素很难把控,对滑坡风险分析带来了挑战(张凯等,2021)。从库区滑坡的变形、降雨和库水位变动数据相互关系来看,降雨和库水位变动数据可以看作是库区滑坡变形数据的两个属性数据,受库区人工调蓄、水文气象等情况影响,这两个属性时常在滑坡变形时同时表现,根据数学集合理论,库区滑坡变形数据是一种具有混合属性的数据。近十年来,随着数据挖掘理论与技术的运用,如邻域粗糙集理论、神经网络等,人们可以有效地对混合属性型数据进行数据分析与信息提出,这为文章研究提供了技术分析基础。论文以三峡库区溪沟湾滑坡为研究案例,首先通过长时序地表位移监测数据和地表宏观变形对滑坡体进行分区,获取滑坡变形活跃区和非活跃区。然后通过基于邻域粗糙集模型中属性间依赖度算法来定量分析滑坡变形活跃区和非活跃区的变形与降雨、库水位及库水位波动因素之间的相关性,获取影响活跃区和非活跃区滑体变形的关键诱发因素,最后对活跃区滑坡体关键诱发因素影响进行渗流-力学分析,评估影响程度。研究结果明晰了溪沟湾滑坡变形的关键诱发因素及影响,可促进对溪沟湾滑坡风险进行针对性的防范工作,为库区单体滑坡变形的诱发因素及影响分析提供借鉴。

1 三峡库区溪沟湾滑坡

溪沟湾滑坡位于重庆市巫山县曲尺乡长江支流溪沟河左岸,为典型涉水滑坡,滑坡距溪沟河口1.2 km(图1)。溪沟湾滑坡前缘高程149 m,后缘高程310 m,相对高差161 m,滑坡主滑方向为112°,沿主滑方向纵坡长400 m左右,垂直主滑方向平均坡宽120 m左右,滑体平均厚25 m左右,滑体面积约 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $120 \times 10^4 \text{ m}^3$,为大型堆积体滑坡。溪沟湾滑坡滑体物质结构松散,由第四系崩积、坡积成因的粉质黏土夹碎块石组成,滑带物质以粉质黏土为主,遇水易软化,滑床上部为三叠系中统巴东组棕红色砂泥岩,下部为浅灰泥质灰岩,岩层产状 $330^\circ \angle 40^\circ$,为逆向滑床(图2)。2017年开展专业监测以来,溪沟湾滑坡经历了三峡水库多次调蓄过程。通过巡查及

地表监测数据综合分析,滑坡运动方式整体为推移式,可将滑坡分为上下两个子区域,上部为滑坡变形活跃区(I),下部为滑坡变形非活跃区(II),截至2021年6月28日,变形活跃区内滑坡地表位移监测点位J2处累积绝对位移量达到了284 mm,变形非活跃区内滑坡地表位移监测点位J3处累积绝对位移量为18 mm(图2,图3)。

2 依赖度计算

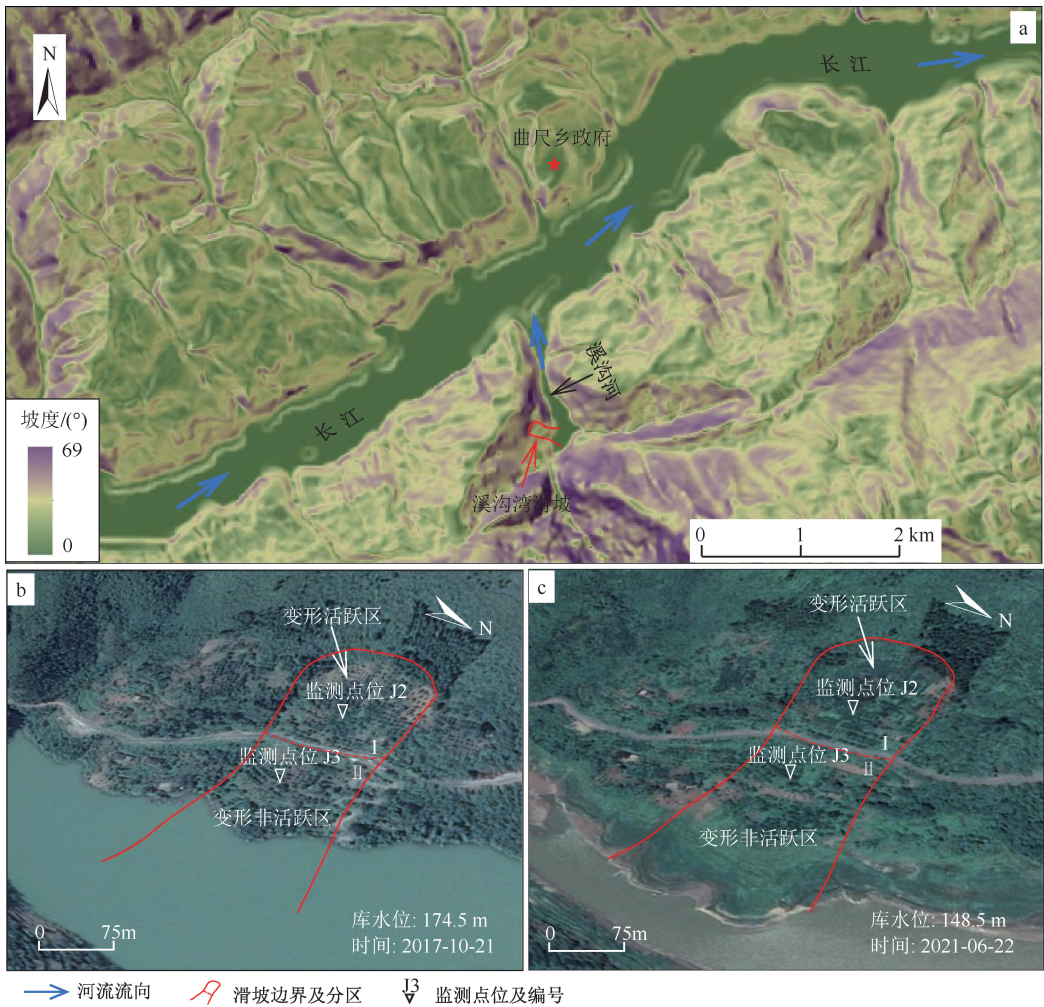
1991年,波兰学者Pawlak首次提出经典粗糙集理论模型,随后被用于对多维数据的降维处理及分类计算(Pawlak,2002;Hu et al.,2008;盛魁等,2020)。随后,众多学者对粗糙集理论模型进行了完善和扩展。但无论是经典粗糙集理论模型还是扩展的粗糙集理论模型,如邻域粗糙集模型,其核心算法均集中在对数据的属性约简上,即数据重要特征筛选,这其中涉及到属性间依赖度计算(Pawlak,2002;郑文彬等,2019;Yang et al.,2021;Zhang et al.,2021b)。属性依赖度概念是建立在数学集合论中的近似概念基础上的,其可以对原始数据集在不降低数据分类能力前提下分辨各条件属性对决策属性的重要度,计算过程主要是依托数学集合论的近似概念求解近似,基本不需人为干预及外部参数(徐波,2019;李冬等,2020)。借助属性间依赖度算法,可判识降雨、库水位和库水位变动速率这3类诱发因素对溪沟湾滑坡活跃区和非活跃区的变形影响程度。

(1) 构建溪沟湾滑坡形变信息系统 $IS = (U, A)$,其中 U 为样本集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, A 为样本的属性集合 $\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$,反映样本的特征,可细化为条件属性集 C 与决策属性 D 的并集。此次研究条件属性集选取的是与降雨、库水位和库水变动有关的因子,为了分析短期内的滑坡体形变与上述因子的关系,决策属性集选取为监测点位J2和J3的日位移速率,具体见表1。

(2) 求解样本集合 U 中每个样本邻域,对于 $\forall x \in U$,其在样本集合 U 中的领域 $\delta(x)$ 可以表示如下:

$$\delta(x) = \{x_i \mid x_i \in U, \Delta(x, x_i) \leq \delta, \delta > 0\} \quad (1)$$

其中, δ 为邻域半径,各条件属性的领域半径值通常取各自数据的统计标准差; Δ 为距离函数,对



a—滑坡位置与区域地形地貌；b—高库水位时滑坡前端淹没状态；c—低库水位时滑坡前端淹没状态

图 1 溪沟湾滑坡概况

Fig. 1 The overview map of the Xigouwan landslide

(a) Landslide location and regional topography; (b) landslide front submerged state at high reservoir level; (c) landslide front submerged state at low reservoir level

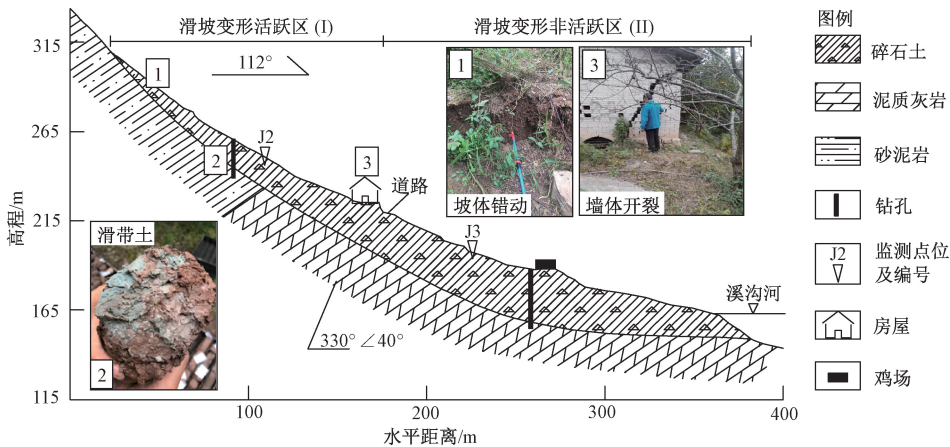


图 2 溪沟湾滑坡地质剖面及变形情况

Fig. 2 Geological profile and deformation of the Xigouwan landslide

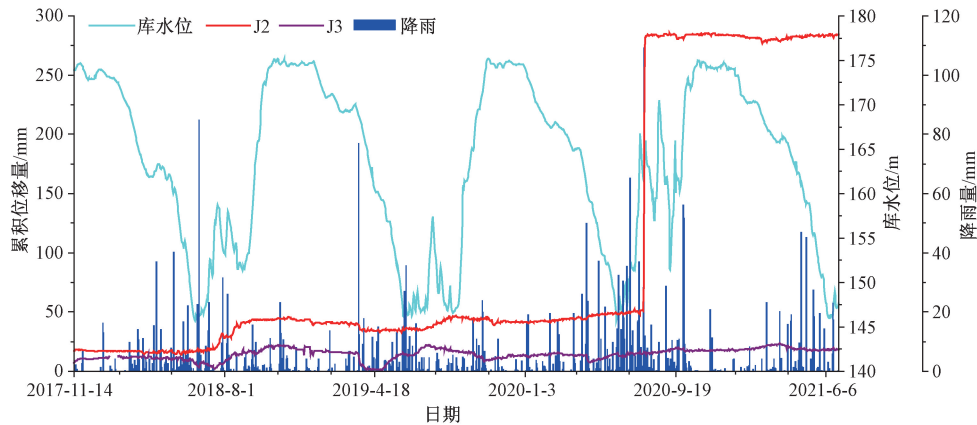


图 3 溪沟湾滑坡体地表位移曲线

Fig. 3 Surface displacement curve of the Xigouwan landslide body

表 1 溪沟湾滑坡变形信息系统属性指标

Table 1 Attribute index of the information system for the Xigouwan landslide deformation

条件属性 C			
指标	描述	指标	描述
a_1	当日降雨量	a_9	过去 15 日平均库水位
a_2	过去 3 日平均降雨量	a_{10}	过去 30 日平均库水位
a_3	过去 7 日平均降雨量	a_{11}	当日库水位变动率
a_4	过去 15 日平均降雨量	a_{12}	过去 3 日平均库水位变动率
a_5	过去 30 日平均降雨量	a_{13}	过去 7 日平均库水位变动率
a_6	当日库水位	a_{14}	过去 15 日平均库水位变动率
a_7	过去 3 日平均库水位	a_{15}	过去 30 日平均库水位变动率
a_8	过去 7 日平均库水位		
决策属性 D			
a_{16}	J_2 监测点位日位移速率	a_{17}	J_3 监测点位日位移速率

于 $\forall x_1, x_2 \in \mathbf{U}$, x_1, x_2 两个样本在属性 a_i 下的欧式距离可以表示如下:

$$\Delta(x_1, x_2) = \left(\sum_{i=1}^N (f(x_1, a_i) - f(x_2, a_i))^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

(3) 求解决策属性 $\mathbf{D}$ 关于属性集合 $\mathbf{C}$ 中每个属性的依赖度, 首先利用决策属性 $\mathbf{D}$ 将样本集合 $\mathbf{U}$ 划分为 n 种类别 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 由于监测仪器误差等原因, 滑坡体日位移速率有一部分为负值, 按照先前相关研究模式 (Song et al., 2018; Yao et al., 2019; Li et al., 2021), 在计算时直接剔除。经数据统计分析后, 溪沟湾滑坡体监测点日位移速率大体可划分为 4 种类别: 极缓慢 ($<0.1 \text{ mm/d}$), 缓慢 ($0.1 \sim 1.5 \text{ mm/d}$), 加速 ($1.5 \sim 5.0 \text{ mm/d}$) 和快速 ($>5.0 \text{ mm/d}$), 统计结果见图 4。然后, 对于 $\forall a \in \mathbf{C}$, 决策属性 $\mathbf{D}$ 关于条件属性 a 的近似 $N_a(\mathbf{D})$ 为:

$$N_a(\mathbf{D}) = \bigcup_{i=1}^n N_a X_i \quad (3)$$

其中, $N_a X_i = \{x \mid \delta(x) \subseteq X_i, x \in \mathbf{U}\}$
最后, 决策属性 $\mathbf{D}$ 对条件属性 a 的依赖度为:

$$\gamma_a(\mathbf{D}) = \frac{|N_a(\mathbf{D})|}{|\mathbf{U}|} \quad (4)$$

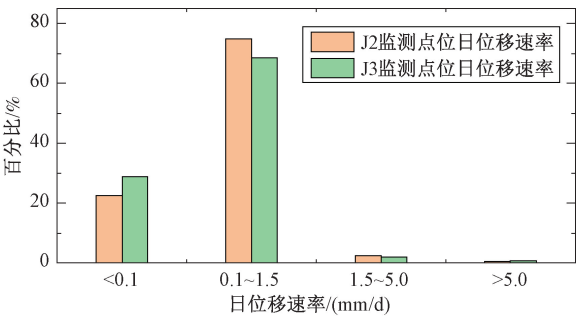


图 4 溪沟湾滑坡体日变形速率数据统计结果

Fig. 4 Statistical results of daily deformation rate of the Xigouwan landslide

根据计算结果可知, 溪沟湾滑坡活跃区变形主要受过去 7 日降雨因素影响, 并与短期库水位变化率因素存在一定关联 (图 5)。溪沟湾滑坡非活跃区的微弱变形与过去 3 日库水位变化率因素关联性最大 (图 6)。此外, 溪沟湾滑坡活跃区和非活跃区变形对库水位因素均不敏感。为了进一步判识滑坡体受库水位上升还是下降因素影响, 分别利用库水位上升期数据和下降期数据进行依赖度计算, 结果显示 (图 7), 溪沟湾滑坡活跃区变形与库水位下降因素存在关联, 而溪沟湾滑坡非活跃区的微弱变形对库水位下降因素和上升因素具有相似的依赖度, 说明非活跃区滑体的微弱变形与库水位波动存在一定的关联。

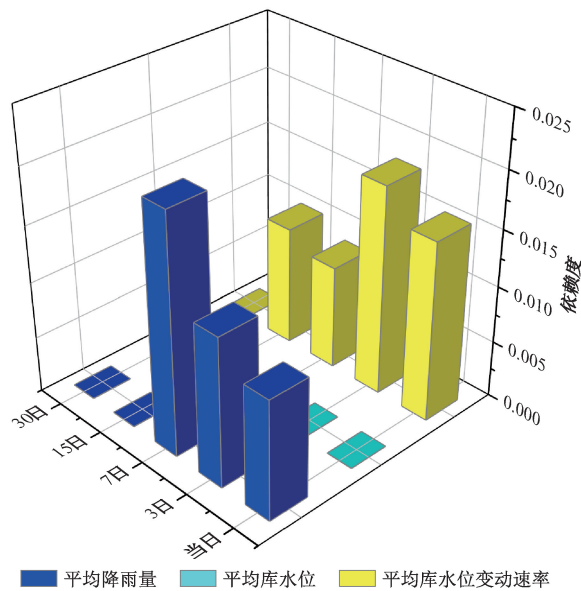


图5 滑坡活跃区变形对相关因子的依赖度计算结果

Fig. 5 The dependence values of the landslide body deformation on the correlation factors in the active area

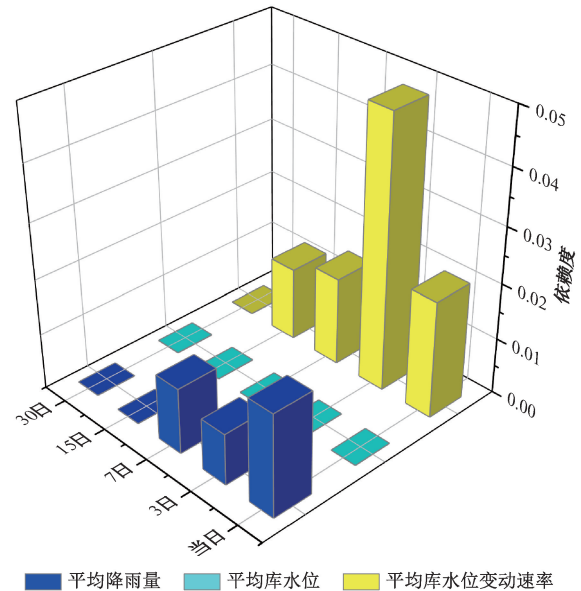


图6 滑坡非活跃区变形对相关因子的依赖度计算结果

Fig. 6 The dependence values of the landslide body deformation on the correlation factors in the inactive area

3 前期降雨与库水位变动因素影响

在分析诱发因素的基础上，选取 15 mm 以上

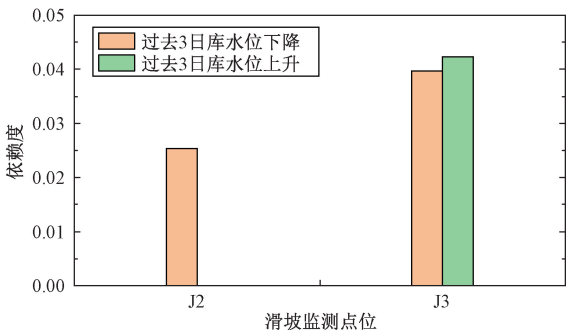


图7 滑坡各区域变形对过去3日库水位上升和下降速率的依赖度计算结果

Fig. 7 The dependence of the landslide deformation on the rising and falling rates of the reservoir level in the past three days in each area

的过去7日平均降雨量数据、过去3日库水位变动速率和J2监测点位变形速率数据来分析溪沟湾滑坡活跃区变形特征（图8），选取过去3日库水位变动速率在2 mm/d以上的库水位变形速率和J3变形速率数据来分析溪沟湾滑坡非活跃区变形特征（图9）。从图8可以看出，2020年7月26日到31日期间，过去7日平均降雨量达到了20 mm以上。26日滑坡活跃区变形开始加速，日位移速率达到了22 mm/d，27日滑坡活跃区发生剧烈变形，日变形速率达到了170 mm/d。此后，由于27日滑坡活跃区剧烈变形导致前期降雨引发的滑体内部动水压力快速消散，27日以后，滑体逐渐趋于新的稳定状态。另外，27日前，过去3日库水位下降速率达到0.7 m/d，但下降态势并未加剧26日滑坡活跃区的变形，在某种程度上说明库水位下降因素对滑坡活跃区变形的促进作用较小。此外，2018年6月18日到21日和2020年10月4日到8日期间，过去七日平均降雨量低于20 mm，滑坡活跃区变形微弱。综合来看，可将过去7日平均降雨量20 mm作为溪沟湾滑坡活跃区剧烈变形预警阈值之一。从图9可以看出，滑坡非活跃区的微弱变形在库水位上升期和下降期都存在，说明非活跃区滑体的微弱变形与库水位波动确实存在一定的关联性。

4 前期降雨与库水位变动影响机理

通过对溪沟湾滑坡变形诱发因素和变形特征分析，结果显示滑坡活跃区变形与过去7日降雨因素密切相关，库水位下降因素对其变形影响较小，

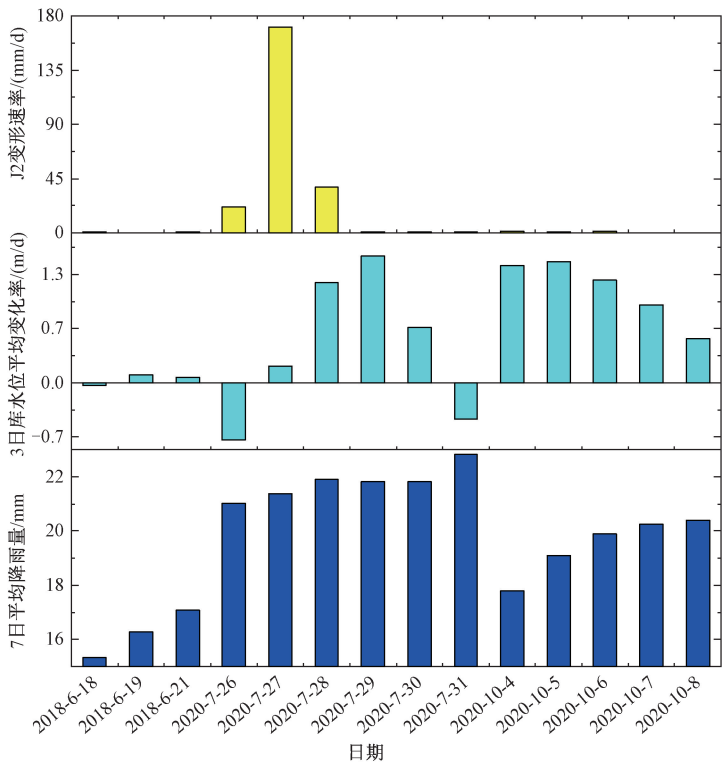


图 8 滑坡变形活跃区变形与库水位变动及降雨关系

Fig. 8 The relationship between the landslide deformation in the active area and reservoir level fluctuation and rainfall

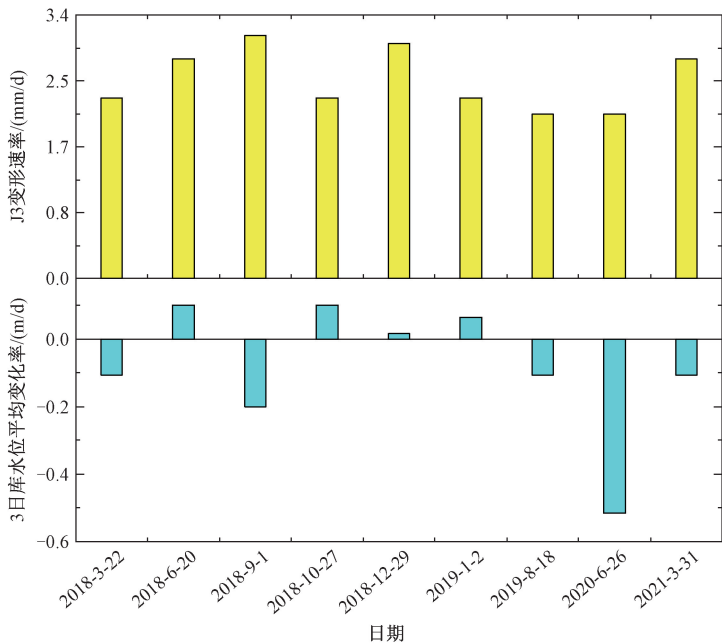


图 9 滑坡变形非活跃区变形与库水位变动关系

Fig. 9 The relationship between the landslide deformation in the inactive area and reservoir level fluctuation

滑坡非活跃区的微弱变形与库水位波动存在一定的关联。为了辨识前期降雨因素对滑坡活跃区变形影响程度，文章采用非饱和土渗流模型进行数值分析（王惠卿等，2020；饶鸿等，2021；辛鹏

等，2023），首先设定 1 mm/d，12 mm/d 和 20 mm/d 3 种强度的长历时前期降雨来模拟前期降雨情形下溪沟湾滑坡活跃区滑体内部渗流场状况，并对滑坡活跃区滑体受前期降雨影响下的稳定状态进行

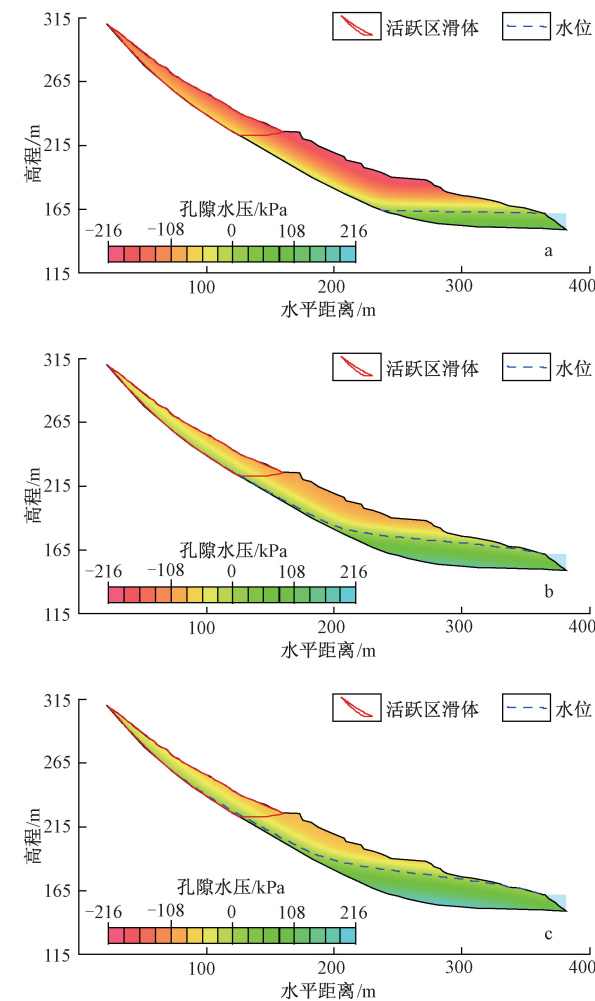
分析, 评估前期降雨对溪沟湾活跃区滑体变形的影响程度。针对模型参数, 溪沟湾滑体和滑带物质物理力学性质参数根据区域资料及岩土体测试结果进行设置 (表 2; 向玲等, 2014; 闫国强等, 2018; Zhao et al., 2019), 滑坡体物质物理力学性质参数选取见表 2, 土水特征曲线样式参照文献 Zhao et al. (2019) 和闫金凯等 (2020) 进行设置。前期降雨影响分析时, 库水位设定为 162 m, 为 2020 年 7 月 26 日溪沟湾滑坡活跃区剧烈变形前的库水位, 降雨设定为上述 3 种长历时前期降雨, 以此进行溪沟湾滑坡体内渗流场状况计算, 然后将渗流场状况作为滑坡活跃区滑体稳定性分析初始条件, 滑面进口端设定为活跃区滑体后缘错动位置附近, 出口端设定为开裂房屋所在位置附近, 以此进行滑面搜索计算 (韩旭东等, 2021)。此外, 为了便于对比分析上述设定的三种长历时前期降雨对坡体变形的影响程度, 在滑坡体内部渗流场计算过程中, 将前期降雨下坡体的渗流状态都计算到稳定流状态。

表 2 溪沟湾滑坡体物质物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of the Xigouwan landslide body

部位	容重/ (KN/m ³)	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	渗透系数/ (m/d)	孔隙比
滑体	21	13	33	2.16	1.22
滑带	18	18	16	0.1	0.67

在上述基础上, 为了分析库水位下降因素对滑坡活跃区变形影响程度, 在设定的 3 种长历时前期降雨工况下, 增加库水位快速下降条件, 库水位下降速率设定为 1 m/d, 下降区间设定为 162 m 至 155 m。

基于 GeoStudio 软件平台 (GEO-SLOPE International Ltd, 2012), 计算溪沟湾滑坡体渗流场状况及活跃区滑体稳定性状况 (图 10, 图 11), 库水位下降引发的溪沟湾滑体内部渗流场变化状况计算结果见图 12。首先, 从图 10 和图 11 可以看出, 随着降雨的强度增大, 滑坡体内部孔隙水压增大, 水位抬升并不断向滑坡活跃区延伸, 造成活跃区滑体物质抗剪强度降低, 利用摩根斯坦-普里斯法、毕肖普法和简布法三种方法 (Janbu 1954; Bishop and Morgenstern, 1960; Morgenstern and Price, 1965) 计算的稳定性系数从 1.08 ~ 1.32 降至 0.94~1.17, 活跃区滑坡体由稳定状态降至欠稳定状态。从图 10 和图 12 对比分析中可以看出, 库水



a—前期降雨强度为 1 mm/d 时; b—前期降雨强度为 12 mm/d 时; c—前期降雨强度为 20 mm/d 时

图 10 前期降雨引发的溪沟湾滑体内部渗流场状况

Fig. 10 Seepage feilds in the Xigouwan landslide body caused by antecedent rainfall

(a) Antecedent rainfall intensity at 1 mm/d; (b) Antecedent rainfall intensity at 12 mm/d; (c) Antecedent rainfall intensity at 20 mm/d

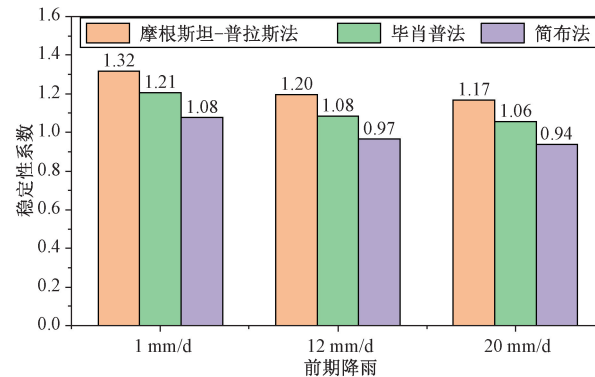
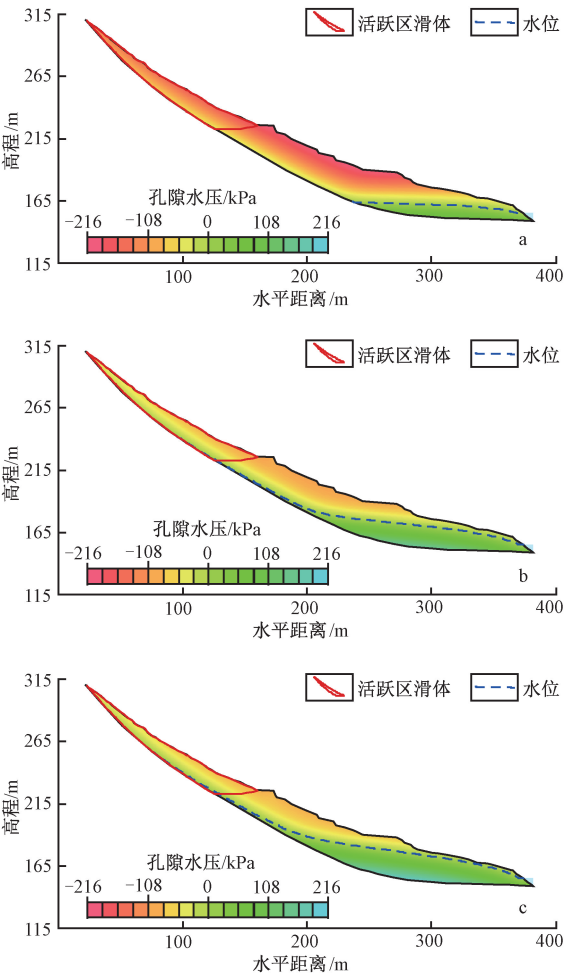


图 11 不同水压力状况下滑坡活跃区滑体稳定性系数

Fig. 11 Stability coefficient of the landslide body in the active area under different water pressure



a—前期降雨强度为 1 mm/d 时；b—前期降雨强度为 12 mm/d 时；
c—前期降雨强度为 20 mm/d 时

图 12 库水位下降引发的溪沟湾滑体内部渗流场状况

Fig. 12 Seepage field in the Xigouwan landslide body caused by the drawdown of the reservoir level
(a) Antecedent rainfall intensity at 1 mm/d; (b) Antecedent rainfall intensity at 12 mm/d; (c) Antecedent rainfall intensity at 20 mm/d

位下降因素对滑坡活跃区渗流场基本无影响，但库水位变动对滑坡非活跃区内部渗流场影响较大，说明滑坡非活跃区的微弱变形受库水位波动影响。通过上述数值分析，进一步表明前期降雨的强度对诱发溪沟湾活跃区滑坡体剧烈变形具有重要影响，同时也揭示了诱发活跃区滑体剧烈变形的前期降雨类型在满足长历时外，如过去 7 天连续降雨，也必须要有 一定强度的降雨量。综上并结合第三节变形特征分析，诱发溪沟湾滑坡活跃区剧烈变形的过去 7 天平均降雨量定为 20 mm 是合理的。

5 结论

通过对三峡库区溪沟湾滑坡诱发因素、变形特征、前期降雨及库水位变动影响分析，得到以下结论。

(1) 溪沟湾滑坡活跃区变形主要受过去 7 日降雨因素影响，非活跃区滑体的微弱变形受库水位波动影响，过去 7 日平均降雨量 20 mm 可作为诱发溪沟湾滑坡活跃区剧烈变形预警阈值之一。

(2) 数值计算结果显示长历时下的前期降雨强度由 1 mm/d 增至 20 mm/d 时，溪沟湾滑坡体内部孔隙水压力增大，滑坡体内水位抬升并向滑坡体活跃区延伸，造成活跃区滑坡体由稳定状态降至欠稳定状态，进而促发滑坡体变形加剧。

References

BISHOP A W, MORGENSTERN N, 1960. Stability coefficients for earth slopes [J]. *Géotechnique*, 10 (4): 129-153.

DAI Z W, YIN Y P, WEI Y J, et al., 2016. Deformation and failure mechanism of Outang landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 24 (1): 44-55. (in Chinese with English abstract)

GEO-SLOPE International Ltd, 2012. *Stability modeling and seepage modeling with GeoStudio* [M]. Calgary, Alberta, Canada.

GU D M, HUANG D, YANG W D, et al., 2017. Understanding the triggering mechanism and possible kinematic evolution of a reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir [J]. *Landslides*, 14 (6): 2073-2087.

HAN X D, FU J, LI Y Y, et al., 2021. A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu county [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48 (6): 180-186. (in Chinese with English abstract)

HU Q H, YU D R, LIU J F, et al., 2008. Neighborhood rough set based heterogeneous feature subset selection [J]. *Information Sciences*, 178 (18): 3577-3594.

HU X L, WU S S, ZHANG G C, et al., 2021. Landslide displacement prediction using kinematics-based random forests method: a case study in Jinping Reservoir Area, China [J]. *Engineering Geology*, 283: 105975.

HUANG D, KUANG X B, LUO S L, 2019. A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46 (5): 127-135. (in Chinese with English abstract)

HUANG D, LUO S L, ZHONG Z, et al., 2020. Analysis and modeling of the combined effects of hydrological factors on a reservoir bank slope in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Engineering*

- Geology, 279: 105858.
- JANBU N, 1954. Application of composite slip surface for stability analysis [C]. Proceedings of European conference on stability of earth slopes, 3: 43-49.
- LI D, JIANG Y, BAO Y W Y, 2020. Attribute reduction of variable precision neighborhood rough sets based on attribute quality [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 43 (4): 560-568. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, UTILI S, MILLEDGE D, et al., 2021. Chasing a complete understanding of the failure mechanisms and potential hazards of the slow moving Liangshuijing landslide [J]. Engineering Geology, 281: 105977.
- MORGENSTERN N R, PRICE V E, 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces [J]. Géotechnique, 15 (1): 79-93.
- PAWLAK Z, 2002. Rough sets and intelligent data analysis [J]. Information Sciences, 147 (1-4): 1-12.
- RAO H, WANG J S, ZHAO Z M, et al., 2021. An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 48 (1): 154-162. (in Chinese with English abstract)
- SHANG M, LIAO F, MA R, et al., 2021. Quantitative correlation analysis on deformation of Baijiabao landslide between rainfall and reservoir water level [J]. Journal of Engineering Geology, 29 (3): 742-750. (in Chinese with English abstract)
- SHENG K, BIAN X F, DONG H, et al., 2020. Attribute reduction of mixed data based on neighborhood rough set combination metrics [J]. Computer Applications and Software, 37 (2): 234-239. (in Chinese with English abstract)
- SONG K, WANG F W, YI Q L, et al., 2018. Landslide deformation behavior influenced by water level fluctuations of the Three Gorges Reservoir (China) [J]. Engineering Geology, 247: 58-68.
- TAN L Y, HUANG R Q, FENG X L, et al., 2020. Monitoring features and induced mechanism analysis of typical landslide in Three Gorges Reservoir area of Chongqing [J]. Geological Review, 66 (S1): 171-174. (in Chinese with English abstract)
- TAN L Y, HUANG R Q, PEI X J, 2021. Deformation characteristics and inducing mechanisms of a super-large bedding rock landslide triggered by reservoir water level decline in Three Gorges Reservoir area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40 (2): 302-314. (in Chinese with English abstract)
- TANG H M, WASOWSKI J, JUANG C H, 2019a. Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China-Lessons learned from decades of research [J]. Engineering Geology, 261: 105267.
- TANG M G, XU Q, YANG H, et al., 2019b. Activity law and hydraulics mechanism of landslides with different sliding surface and permeability in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Engineering Geology, 260: 105212.
- WANG H Q, FENG C J, QI B S, et al., 2020. Analysis of the stability of the Lisizhuang landslide in Shunping County, Hebei Province [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 595-603. (in Chinese with English abstract)
- XIANG L, WANG S M, WANG L, 2014. Response of typical hydrodynamic pressure landslide to reservoir water level fluctuation: Shuping landslide in Three Gorges Reservoir as an Example [J]. Journal of Engineering Geology, 22 (5): 876-882. (in Chinese with English abstract)
- XIN P, WANG T, LIU J M, et al., 2022. The geological structure and sliding mode of the slopes in the Yigong landslide source area, Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 1012-1023.
- XU B, 2019. Research on heuristic attribute reduction algorithm for neighbourhood rough set [D]. Chengdu: Sichuan Normal University. (in Chinese with English abstract)
- YAN G Q, YI W, TONG S A, et al., 2018. Stability analysis prediction and deformation mechanism of Baijiabao landslide in Three Gorges Reservoirs Area [J]. Bulletin of Science and Technology, 34 (5): 29-34. (in Chinese with English abstract)
- YAN J K, HUANG J B, LI H L, et al., 2020. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 481-491. (in Chinese with English abstract)
- YANG X L, CHEN H M, LI T R, et al., 2021. Neighborhood rough sets with distance metric learning for feature selection [J]. Knowledge-Based Systems, 224: 107076.
- YAO W M, LI C D, ZUO Q J, et al., 2019. Spatiotemporal deformation characteristics and triggering factors of Baijiabao landslide in Three Gorges Reservoir region, China [J]. Geomorphology, 343: 34-47.
- ZHANG C Y, YIN Y P, YAN H, et al., 2021a. Reactivation characteristics and hydrological inducing factors of a massive ancient landslide in the three Gorges Reservoir, China [J]. Engineering Geology, 292: 106273.
- ZHANG K, ZHANG K, BAO R, et al., 2021. Intelligent prediction of landslide displacements based on optimized empirical mode decomposition and K-Mean clustering [J]. Rock and Soil Mechanics, 42 (1): 211-223 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG X Y, FAN Y R, Yang J L, 2021b. Feature selection based on fuzzy-neighborhood relative decision entropy [J]. Pattern Recognition Letters, 146: 100-107.
- ZHAO N H, HU B, YAN E C, et al., 2019. Research on the creep mechanism of Huangniba landslide in the Three Gorges Reservoir Area of China considering the seepage-stress coupling effect [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78 (6): 4107-4121.
- ZHENG W B, LI J J, HE Q H, 2019. Attribute reduction algorithm for neighborhood rough sets with variable precision based on attribute importance [J]. Computer Science, 46 (12): 261-265. (in Chinese with English abstract)
- ZHU W, WANG K W, WEI D, et al., 2017. Qualitative and quantitative analysis of deformation influencing factors of Baijiabao landslide [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 39 (5): 6-11. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 代贞伟, 殷跃平, 魏云杰, 等, 2016. 三峡库区藕塘滑坡变形失稳机制研究 [J]. 工程地质学报, 24 (1): 44-55.
- 韩旭东, 付杰, 李严严, 等, 2021. 舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究 [J]. 水文地质工程地质, 48 (6): 180-186.

黄达, 匡希彬, 罗世林, 2019. 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 46 (5): 127-135.

李冬, 蒋瑜, 鲍杨婉莹, 2020. 基于属性质量度的变精度邻域粗糙集属性约简 [J]. 四川师范大学学报 (自然科学版), 43 (4): 560-568.

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 等, 2021. 基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析 [J]. 水文地质工程地质, 48 (1): 154-162.

尚敏, 廖芬, 马锐, 等, 2021. 白家包滑坡变形与库水位、降雨相关性定量分析研究 [J]. 工程地质学报, 29 (3): 742-750.

盛魁, 卞显福, 董辉, 等, 2020. 基于邻域粗糙集组合度量的混合数据属性约简算法 [J]. 计算机应用与软件, 37 (2): 234-239.

谭淋耘, 黄润秋, 冯晓亮, 等, 2020. 三峡重庆库区典型滑坡监测特征与诱发机制 [J]. 地质论评, 66 (S1): 171-174.

谭淋耘, 黄润秋, 裴向军, 2021. 库水位下降诱发的特大型顺层岩质滑坡变形特征与诱发机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 40 (2): 302-314.

王惠卿, 丰成君, 戚帮申, 等, 2020. 河北省顺平县李思庄滑坡稳定性分析 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 595-603.

向玲, 王世梅, 王力, 2014. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应: 以三峡库区树坪滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 22 (5): 876-882.

辛鹏, 王涛, 刘甲美, 等, 2022. 西藏易贡滑坡源区坡体赋存的地质结构及其滑动模式 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 1012-1023.

徐波, 2019. 邻域粗糙集的启发式属性约简算法研究 [D]. 成都: 四川师范大学.

闫国强, 易武, 童时岸, 等, 2018. 三峡库区白家包滑坡变形机理及稳定性分析预测 [J]. 科技通报, 34 (5): 29-34.

闫金凯, 黄俊宝, 李海龙, 等, 2020. 台风暴雨型浅层滑坡失稳机理研究 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 481-491.

张凯, 张科, 保瑞, 等, 2021. 基于优化经验模态分解和聚类分析的滑坡位移智能预测研究 [J]. 岩土力学, 42 (1): 211-223.

郑文彬, 李进金, 何秋红, 2019. 基于属性重要度的变精度邻域粗糙集属性约简算法 [J]. 计算机科学, 46 (12): 261-265.

朱伟, 王孔伟, 魏东, 等, 2017. 白家包滑坡变形影响因素定性及定量分析 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 39 (5): 6-11.