

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.152



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 库水位-降雨耦合作用下凉水井滑坡的变形机制

陈超<sup>1,2</sup>, 王煜成<sup>1</sup>, 王鲁琦<sup>1</sup>, 方祥位<sup>1</sup>, 王凯<sup>3</sup>, 王子乾<sup>1</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司, 重庆 400016; 3. 重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401147)

**摘要:**库水位变化和降雨是影响三峡库区滑坡失稳破坏的主要因素,凉水井滑坡受库区试验性蓄水影响变形后发布预警,目前滑坡活动趋于稳定但变形机制仍不明确。结合凉水井滑坡近年来的监测数据,在考虑滑坡位移阶跃演进变化的基础上,利用多年库水位变化和降雨数据,建立滑坡的水力计算模型,研究库水位变动和降雨共同作用下滑坡的渗流场、稳定性和位移变化规律,探讨凉水井滑坡的内在变形机制。结果表明:滑坡前部和后部的渗流场分别主要受库水位和降雨影响,中部则受到两者的联合作用;滑坡稳定性系数随库水位涨落而呈周期性变化,降雨进一步降低了滑坡的整体稳定性;滑坡地表位移呈阶跃式上升趋势,库水位下降引起位移跃迁增长,库水位上升使位移变化趋于稳定。总体上,在库水位变动和降雨共同作用下,地下渗流场发生变化,引起水力条件改变,导致滑坡产生变形,目前滑坡变形主要集中在坡脚处,变形范围逐渐向后延伸,滑坡中后部变形稳定;库水位变化对滑坡变形影响较明显,在库水位变化速率较大的年份,应当注意加强对滑坡变形的预警监测。

**关键词:**凉水井滑坡;库水位;降雨;数值计算;变形机制

中图分类号:P642.22 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)06-0052-11

## Mechanism of Liangshuijing landslide deformation under coupled effect of reservoir water level fluctuation and rainfall

CHEN Chao<sup>1,2</sup>, WANG Yucheng<sup>1</sup>, WANG Luqi<sup>1</sup>, FANG Xiangwei<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>3</sup>,  
WANG Ziqian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. CCTEG Chongqing Engineering (Group) Co., LTD., Chongqing 400016, P. R. China; 3. Nanjiang Hydro-geology and Engineering Geology Team of Chongqing Geology Mineral Bureau, Chongqing 401147, P. R. China)

**Abstract:** Reservoir water level fluctuations and rainfall are the primary factors to the destabilization and

收稿日期:2023-10-24

基金项目:重庆英才创新创业示范团队项目(cstc2024ycjh-bgzxm0012);中国博士后科学基金(2021M700608);重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-bsh0047);中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司科研项目(No. H20230317)

作者简介:陈超(1993-),男,博士生,主要从事地质灾害治理研究,E-mail:657616428@qq.com。  
方祥位(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:fangxiangwei1975@163.com。

Received: 2023-10-24

**Foundation items:** Chongqing Talent Innovation and Entrepreneurship Demonstration Team Projects (No. cstc2024ycjh-bgzxm0012); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2021M700608), the Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2021jcyj-bsh0047); Scientific Research Project of CCTEG Chongqing Engineering (Group) Co., LTD. (No. H20230317).

**Author brief:** CHEN Chao (1993-), PhD candidate, main research interest: prevention and control of geological hazards, E-mail: 657616428@qq.com.

FANG Xiangwei (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: fangxiangwei1975@163.com.

damage of landslides in the Three Gorges Reservoir Area (TGRA). This Liangshuijing landslide is influenced by experimental water storage in the reservoir area, which triggers an early warning. Although the landslide activity has stabilized, the underlying deformation mechanism remains indistinct. Consequently, the investigation of the landslide deformation mechanism in the TGRA has gained significant attention since the impoundment of the Three Gorges Reservoir. By utilizing recent monitoring data and focusing on the stepwise evolution of displacement, this study establishes a hydraulic calculation model for the Liangshuijing landslide. The research incorporates long-term data on reservoir water level fluctuations and rainfall to investigate the seepage field, stability, and displacement patterns under the combined influence of reservoir water level fluctuations and rainfall. Additionally, the study explores the intrinsic deformation mechanism of the Liangshuijing landslide. The results indicate that the seepage field in the front and back of the landslide is primarily influenced by the reservoir water level and rainfall, respectively, while the middle part is affected by the combination of both. The stability coefficient exhibits periodic changes corresponding to the rise and fall of the reservoir water level, and rainfall further diminishes the overall landslide stability. The surface displacement demonstrates an incremental trend, with a decrease in reservoir water level causing the displacement to increase incrementally, while an increase in reservoir water level tends to stabilize the displacement. Overall, the deformation of the Liangshuijing landslide is primarily caused by reservoir water level fluctuations and rainfall, which subsequently impact the underground seepage field and hydraulic conditions, resulting in deformation. Generally, the current deformation is primarily concentrated at the foot of the slope, gradually extending towards the rear. Stabilization of deformation is observed in the middle and rear regions. Changes in the reservoir water level have a more pronounced impact on landslide deformation, and during years with greater fluctuations in the reservoir water level, it is crucial to enhance early warning monitoring of the deformation.

**Keywords:** Liangshuijing landslide; reservoir water level; rainfall; numerical calculations; deformation mechanism

三峡地区历来是地质灾害频发的区域,自2008年库区进入正常水库调度运行以来,在145~175 m水位高程间形成垂直高差30 m的消落带,致使区域内工程地质条件劣化,滑坡灾害加剧<sup>[1]</sup>。据统计,库区内存在4 664个崩塌滑坡堆积体,其中涉水滑坡2 619个,在三峡水库首次蓄水后有674个滑坡堆积体发生明显变形<sup>[2-3]</sup>。研究表明,周期性的库水位涨落和降雨是诱发三峡库区库岸滑坡发生变形和失稳破坏的重要因素<sup>[4-6]</sup>,例如,白家包滑坡<sup>[7]</sup>、千将坪滑坡<sup>[8]</sup>、凉水井滑坡<sup>[9]</sup>等。因此,深入研究库岸边坡在降雨和库水位共同作用下的变形机制,对灾害预警及保障广大人民的生命财产安全具有重要意义。

降雨诱发滑坡产生变形破坏,主要是因为雨水入渗坡体后滑坡非饱和区域土体含水量增加,基质吸力降低,孔隙水压力增加,抗剪强度降低,导致滑带土软化变形,最终使滑坡失稳破坏<sup>[10]</sup>。李江等<sup>[11]</sup>结合现场观察和室内试验研究发现,降雨对滑带土具有软化作用,原状滑带土经饱水软化后,抗剪强度、黏聚力和内摩擦角呈现不同程度衰减。汪丁建等<sup>[12]</sup>提出了滑坡降雨入渗模型,研究表明,降雨历时对滑坡的稳定性影响不同,降雨初期,滑坡稳定性下降较快;降雨后期,稳定性下降速率放缓。

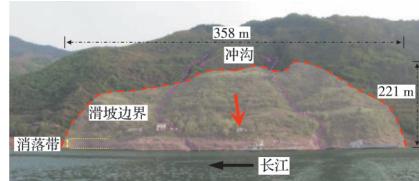
长时间降雨会对库岸滑坡的稳定性构成威胁,且三峡库区降雨期间还伴随着库水位涨落变化,岸坡水力作用也会影响库区滑坡的稳定性。库水位周期性涨落会引起库岸边坡地下渗流场发生变化,库水位升降速率越大,坡内地下水位调整的滞后效应越明显,从而引起的坡体内外水位落差越大,产生的渗透压力越大,进而影响滑坡的稳定性<sup>[13]</sup>。卫童谣等<sup>[14]</sup>以巫山塔坪H1滑坡为例,通过数值模拟分析发现,库水位周期性波动控制着滑坡前缘涉水区域稳定性变化,短时强降雨会加速滑坡中前部区域稳定性快速下降。陈涛等<sup>[15]</sup>指出,凉水井滑坡在库区蓄水扰动影响下出现了重新复活的迹象,但由于滑坡下部产生锁固效应,滑坡未发生失稳,只是处于持续变形中。肖诗荣等<sup>[16]</sup>结合现场调查和勘探监测资料认为,库水位浸泡软化和骤升浮托作用诱发凉水井滑坡活化变形,而暴雨和久雨是库水运行期间影响滑坡稳定性的主要因素。

许多学者对凉水井滑坡在考虑降雨、库水位或两者共同作用下的滑坡稳定性分析和变形特征进行了大量研究<sup>[17-18]</sup>,但对凉水井滑坡在降雨和库水位共同影响下的滑坡变形机制研究仍不够深入。笔者结合近年的现场监测数据,在考虑滑坡位移阶

跃演进变化的基础上,利用多年库水位变化和降雨数据,建立滑坡水力计算模型,采用数值分析方法研究库水位涨落和降雨共同作用下凉水井滑坡的渗流变化特征、稳定性变化规律以及位移变化,分析滑坡的变形机制。

## 1 滑坡简介及地质特征

凉水井滑坡位于重庆市云阳县故陵镇水让村8组长江右岸陡、斜坡地带,距离三峡坝址约206 km,全貌如图1所示。滑坡属于构造剥蚀丘陵地貌和河流阶地地貌,平面形态呈“U”形,后部地形呈近似圈椅状,南北纵向长约434 m,东西横向宽约358 m,面积约 $11.82 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,滑体平均厚度约34.5 m,总体积约 $407.79 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,滑坡分布高程100.0~319.5 m,相对高差约221.5 m<sup>[15-16]</sup>。滑坡东西部均有一冲沟,走向分别为342°和351°,长分别为250、220 m,纵向坡度40°~60°,截面大多为“V”型,仅雨季有流水,水量直接受降雨影响<sup>[19]</sup>。在长江库水位周期涨落侵蚀、剥蚀作用下,滑坡前缘形成了临空面,滑坡后部地形陡峭,后部基岩与峭壁呈现脱离趋势,后部滑坡自重对滑坡中前部具有一定加载作用。



(a) 全景照片



图1 凉水井滑坡全貌及平面图

Fig. 1 General view of the Liangshuijing landslide

图2为凉水井滑坡1-1'地质剖面图。勘查探槽、钻孔及探井结果表明,滑体由覆盖在滑坡之上的第四系堆积体( $Q_4^{\text{del}}$ )构成,其主要成分为粉质黏土和碎块石土。滑坡滑动带由上覆堆积层和下部基岩之间接触带组成,总厚度3~5 cm,组成成分主要为角砾粉质黏土和粉质黏土。滑床为侏罗系中统沙溪庙组( $J_2^s$ )互层砂岩和泥岩,泥岩不易透水,隔水性

好,因此,地下水易富集在滑带附近,砂岩中发育有大量裂隙、空隙,导致地下水不易赋存。基岩岩层产状为 $340^\circ \angle 45^\circ \sim 51^\circ$ ,基岩接触面后部陡峭,中前部平缓,整体形态与滑面相似,近似呈靠椅状。

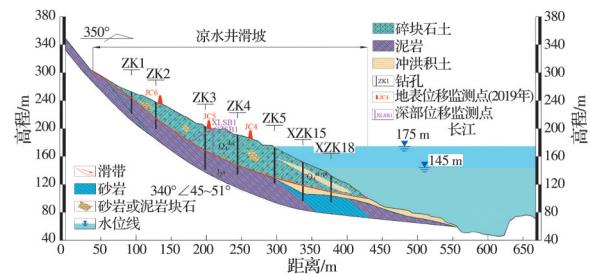


图2 凉水井滑坡1-1'地质剖面图

Fig. 2 Geologic profile 1-1' of the Liangshuijing landslide

## 2 凉水井滑坡变形监测

在2008年发生险情后,为保障长江航道安全,在2012年对凉水井滑坡布置了监测系统,沿滑坡南北纵向共设置有5个监测剖面,主要包括24个地表水平位移监测点、12个地表裂缝监测点、7个深部位移测斜孔、3个光纤推力监测孔、3个地下水位监测孔以及1个雨量监测点<sup>[16]</sup>。为加强对凉水井滑坡的预警监测,在沿用以往监测网的基础上,2019年分别在4-4'、1-1'、5-5'剖面增设了9个地表位移监测点GNSS-JC1~JC9、沿用了2个深部位移监测点,凉水井滑坡监测点布置系统如图3所示。

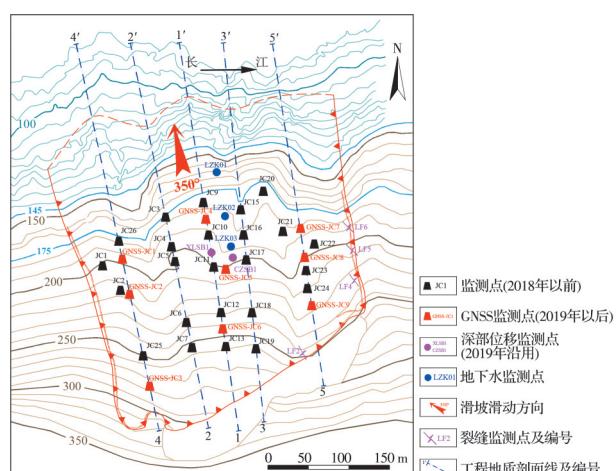


图3 凉水井滑坡监测点布置图

Fig. 3 Layout map of monitoring points for the Liangshuijing landslide

2019年6月至2023年2月,凉水井滑坡的地表位移监测数据如图4所示。由图4可以发现,4-4'剖面上监测点的位移逐年缓慢增长,累计变形35~45 mm。1-1'剖面的变形较4-4'剖面大,且变形主要集中在滑坡前缘,变形量由前向滑坡后缘逐渐递减,累计变形量在40~60 mm。5-5'剖面的滑坡变形

最大,其中滑坡中部变形最为突出,累计变形量可达140 mm,从中部向两侧递减至40~60 mm。监测数据表明,从空间分布上看,前缘和右侧滑坡位移较大,并沿后缘和左侧逐渐减小,目前滑坡整体上处于持续变形阶段,但局部区域的变形较大,有一定的滑移风险。

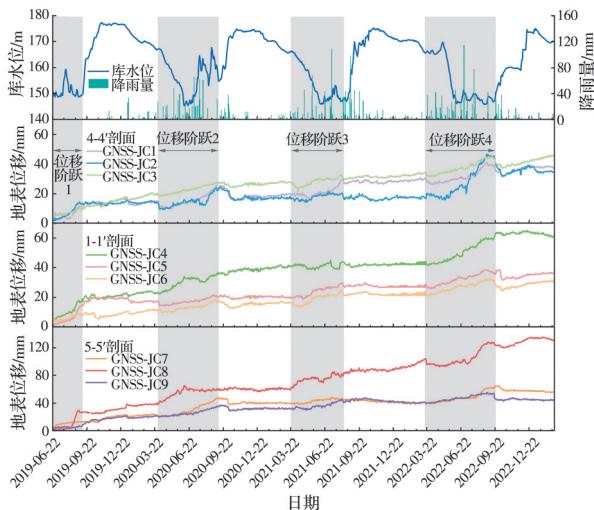


图4 凉水井滑坡GNSS-JC1~JC9监测点地表位移与库水位周期变化、降雨关系曲线

Fig. 4 Relationship between surface displacements of GNSS-JC1~JC9 monitoring points of the Liangshuijing landslide, periodic variations of reservoir water level and rainfall

### 3 库水位-降雨耦合作用数值分析

#### 3.1 计算模型

依据凉水井滑坡工程地质勘查资料以及近几年相关监测数据分析可知,滑坡地表的位移变形主要发生在每年降雨充沛且库水位波动比较强烈的5月—9月。为进一步分析降雨和库水位升降作用下滑坡渗流的变化规律、稳定性变化以及变形机制,采用大型岩土工程仿真分析软件GeoStudio,以凉水井滑坡1-1'剖面为研究对象,建立数值计算模型,研究在多年降雨和库水位波动条件下滑坡的渗流场、稳定性和变形场。

根据勘测资料描述的1-1'剖面的地层分布和滑坡物质结构组成,建立的数值模型主要包括滑体、滑带和基岩3部分,其中滑体为碎块石层,滑带为粉质黏土层,基岩层主要为砂、泥岩互层,透水性较差,将其视为不透水层。网格模型采用非结构化划分网格,最大单元尺寸4 m,最小单元尺寸2 m,共划分7 857个节点,7 685个单元,如图5所示。结合勘查报告以及三峡库区大量滑坡的试验统计资料,综合确定凉水井滑坡数值模拟的岩土体物理力学计算参数,见表1。

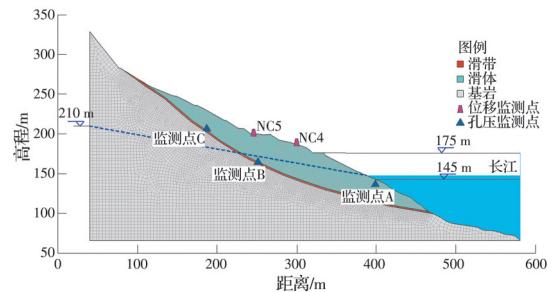


图5 凉水井滑坡数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model of the Liangshuijing landslide

表1 凉水井滑坡数值计算岩土体参数

Table 1 Geotechnical parameters for numerical calculation of the Liangshuijing landslide

滑坡结构	重度 $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)	渗透系数 $K$ / (m/d)	有效弹性模量 $E'$ / MPa	泊松比 $\nu$
滑体	23	36	29	0.32	180	0.24
滑带	21	18	24	1	40	0.24
基岩	26				30 000	0.26

数值模拟计算主要利用GeoStudio软件内部的SEEP/W、SLOPE/W以及SIGMA/W模块建立相应的渗流、稳定性以及体积变化等分析模块,各模块可以分别定义相应的材料参数和边界条件,其中SLOPE/W和SIGMA/W模块的分析计算可以继承SEEP/W模块的孔隙水压力计算结果。

在SEEP/W有限元饱和/非饱和渗流分析计算中,初始渗流状态下的地下水位条件根据滑坡前缘水位高度和滑坡后缘地下水位高度确定,地下水位线采用直线型。在研究时间段内,坡岸库水位在145~175 m范围内波动,将滑坡坡面175 m高程以下设置为变水头边界,水位变化规律依据地下水位监测点LZK01采集的数据;坡面175 m高程以上设置为单位流量边界条件,模拟降雨变化,单位流量的设置采用降雨监测点YLJ01采集的数据。滑带性质软弱,厚度较小,对滑坡稳定性影响较大,因此,在SLOPE/W稳定性分析中完全指定滑带与基岩的土岩接触面作为确定滑动面,计算方法采用Morgenstern-Price极限平衡法。在SIGMA/W有限元应力和变形分析中,滑坡底部固定约束全位移,侧面仅约束法向位移。另外,计算时将基岩视作线弹性材料,滑体和滑带采用摩尔-库伦模型耦合孔隙水压力变化。

在滑坡网格模型表面设置数值模拟位移监测点NC5和NC6,对比实际位移监测点JC5和JC6。在滑坡前缘145 m高程处设置监测点A、滑坡中部靠近滑带175 m高程附近设置监测点B、滑坡中上部临近滑带区域设置监测点C,以监测孔隙水压力

在滑坡内部的变化。

### 3.2 数值模型验证

图 6 为计算点 NC4、NC5 和实际监测点 JC4、JC5 从 2019 年 6 月至 2023 年 2 月间的位移变化曲线, 不难看出, 计算位移与监测位移都表明滑坡前部位移变化大, 滑坡中后部位移变化小, 且位移增长都主要集中在库水位下降和低库水位时期, 两者位移增加趋势相似, 位移累积增长量也相当。在监测时期内的 2021 年度, JC4 位移没有明显变大, 除此之外的年度, 位移增长量都维持在 20 mm 左右。NC4 年度位移增量也近 20 mm, 但在每年库水位上升期位移会下降 10 mm 左右; JC5 年度位移增长约 10 mm, 而 NC5 年度位移增长仅 5 mm。JC4 和 JC5 位移变化量之间的差值逐年渐增, 类似地, NC4 和 NC5 之间位移变化差值增加更明显。以上分析结果表明, 虽然计算位移结果和实际监测位移之间存在一定差距, 但考虑到数值模型采用的材料参数、边界条件无法完全反映滑坡实际条件, 在合理偏差允许范围内, 可以认为本文建立的数值计算模型有效可行, 能反映滑坡在库水位和降雨共同作用下的响应特征。

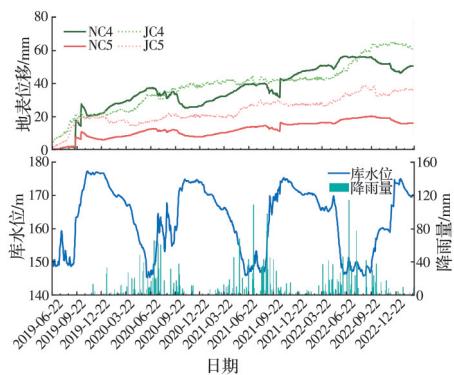


图 6 凉水井滑坡位移监测和计算曲线

Fig.6 Displacement monitoring and calculation curves for the Liangshuijing landslide

### 3.3 滑坡渗流场变化特点

#### 3.3.1 监测点孔隙水压力变化

图 7 为 2019—2022 年 3 个监测点孔隙水压力模拟计算结果。由图 7 可以发现, 3 个监测点孔隙水压力均因受到库水位和降雨的影响而呈现出周期性涨落变化的规律, 且越靠近滑坡水位变动区, 孔隙水压力的变化幅度越明显。滑坡表面监测点 A 位于库水位变动区, 主要受滑坡前缘水位变动控制, 其孔隙水压力变化曲线和库水位变化曲线非常吻合。滑体内部监测点 C 位于最高库水位以上, 孔隙水压力变化受降雨的直接影响。在计算开始一段时间内, 由于降雨较少, 滑坡上部浸润线没有延伸至 C 点, C 点孔隙水压力低于 0 且保持稳定; 进入

雨季后, 浸润线沿滑带不断向下伸长, C 点处的孔隙水压力逐渐增大, 雨季过后, 孔隙水压力有一定回落。经过 1 个水文年后, 滑坡上部浸润线与地下水位线连通, C 点位于浸润线以下, 孔隙水压力起伏和降雨量变化保持一致。滑体内部监测点 B 位于最高库水位以下, 其孔隙水压力的变化受降雨和库水位的共同影响。由于 B 点距离 A 点和 C 点都具有相当长度的渗流路径, 库水位升降和降雨量变化对 B 点处孔隙水压力影响都具有时间上的滞后作用, 滞后时间与滑坡体渗透性、水位上升速率以及降雨强度等有关<sup>[20]</sup>。

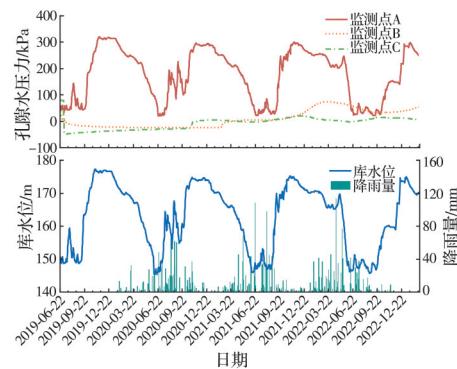


图 7 凉水井滑坡孔隙水压力变化曲线

Fig.7 Pore water pressure change curves for the Liangshuijing landslide

图 8 是 1 个水文年内的孔隙水压力变化曲线。由图 8 可以发现, A 点孔隙水压力峰值时间与高库水位时期相对应; C 点孔隙水压力峰值期比较接近降雨量丰沛期; 而监测点 B 的孔隙水压力峰值均滞后于 A、C 两点, 且孔隙水压力变化介于 A、C 两点之间。由此可见, 滑坡体内孔隙水压力变化受到降雨量变化和库水位升降的影响, 但两者作用在滑坡上的主要影响区域不同, 而在远离降雨和库水位控制区域, 其对孔隙水压力的影响表现出明显的滞后效应。

#### 3.3.2 渗流场水文年变化规律

为了研究 1 个完整水文年内滑坡内部渗流场的

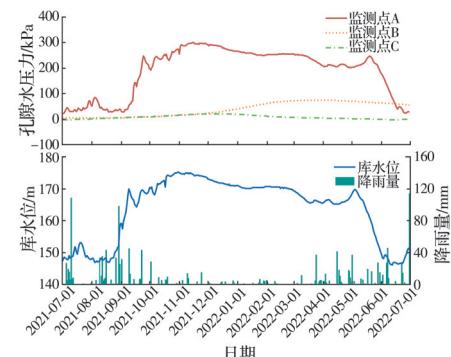


图 8 1 个水文年内凉水井滑坡孔隙水压力变化曲线

Fig. 8 Pore water pressure change curves of the Liangshuijing landslide in one hydrologic year

变化规律,图9给出了2021-07-01—2022-07-01期间具有代表性的4类凉水井滑坡渗流场分布,其中图9(a)、(b)、(c)、(d)分别为低水位、水位上升、高水位、水位下降4个不同库水位条件下的渗流场分布。

从图9(a)可知,2021年7月1日,滑坡内部地下水在不断向坡体外排水,此时滑坡前端低库水位与滑坡中后部地下水位具有一定的水头差,导致滑坡内部地下水不断向外渗流,形成了向下倾斜的浸润线。另外,此时正值降雨量丰沛的雨季,坡体后部表面的降雨自上向下入渗,最终汇聚形成了沿滑带与滑坡前部地下水位线贯通的浸润线。浸润线以下的滑坡区域处于饱和状态,从滑坡上部到前端构成连通的渗流路径,疏通上部滑坡入渗的雨水,其余滑坡区域则处于非饱和状态,区域内孔隙水压力变化主要受降雨控制。

从8月20日开始,库水位开始不断上涨,平均上升速率达1.13 m/d,到9月9日水位上涨迎来1个峰值169.85 m,滑坡前部地下水入渗速度落后于水位上涨速度,造成前端地下水入渗的单位流量远大于同年其他时期,浸润线向坡体内部弯曲,表现为凹型,如图9(b)所示。由于降雨持续不断,对比图9(a)可以发现,滑坡后部浸润线沿滑带向上不断延伸,此时凉水井滑坡内部不断地向内吸水,滑体饱和区域逐渐扩大。

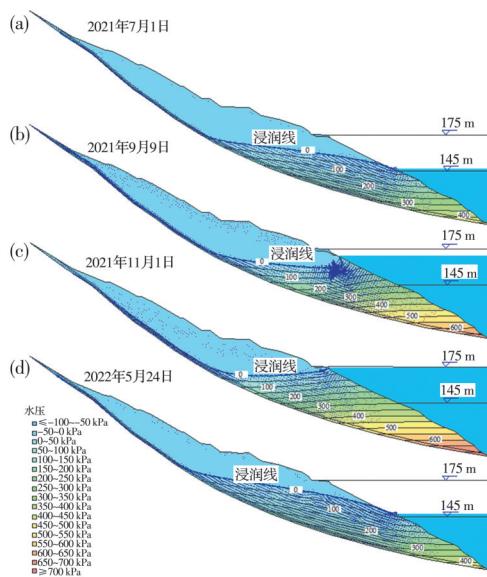


图9 1个水文年内不同时期的渗流场

Fig. 9 Seepage fields at different times within a hydrological year

自11月1日开始,滑坡前端水位维持在高位175 m左右,此时滑坡内部饱和区域达到最大,在滑坡坡脚入渗以及坡内外流的地下水交汇作用下,滑坡前部浸润线逐渐向上抬升,最后直至与库水位持平,见图9(c)。之后,随着降雨逐渐减少,滑坡上部

入渗的雨水不断向滑坡中下部流失,浸润线在沿滑带不断下降的同时也缓慢向上抬升。

2022年5月4日以后,库水位开始急剧下降至低水位145 m左右,带动了滑坡前端地下水位下降,但因为储存在坡体内部深处的地下水与坡外存在较大渗流距离而不能及时排出,如图9(d)所示。滑坡浸润线向坡体外突出,形状为前低后高的凸形,与图9(a)类似,此时滑坡内部地下水向外排水。在库水位处于低位不变的时间段里,滑坡地下水也在不断流失。由图9(a)可知,坡脚浸润线在缓慢下降,但因为汛期充足的降雨从滑坡上部入渗,对地下水进行了补充,坡体内浸润线最终无法像图9(c)那样与库水位持平。

综合以上分析可以发现,滑坡内部的地下水流动整体上是在排水和吸水之间不断变化,库水位涨落直接影响坡脚区域渗流场,进而影响滑坡非饱和区域范围大小,降雨则主要通过雨水入渗作用调控滑坡中上部浸润线变化。

### 3.4 稳定性分析

图10为凉水井滑坡稳定性系数变化曲线。由图10可知,无论是否考虑降雨影响,滑坡稳定性系数变化曲线都与库水位调度曲线相似,呈周期性升降变化,说明滑坡稳定性主要受库水位涨落影响。库水位上升,滑坡稳定性系数随之提高,这是由于凉水井滑坡属于动水压力型滑坡,在库水上升阶段,库水不易进入滑坡内部,滑坡体内外具有一定的水头差,其浸润线呈“凹形”(图9(b)),形成了施加在滑坡体上的动水压力,同时水位上升还产生垂直于滑坡体表面的静水压力,两者都有利于增加滑坡整体稳定性<sup>[21]</sup>。反之,库水位下降,滑坡稳定性系数也下降,类似地,在库水位下降阶段,滑坡内地下水不易渗出坡体外,坡内水头高于坡外,浸润线形状呈现“凸形”(图9(d)),形成的动水压力指向坡外,滑坡下滑力增加,抗滑力减小,滑坡整体稳定性降低,且水位下降速率越大,产生的动水压力越显著,滑坡稳定性降低越快<sup>[22]</sup>。

对比是否考虑降雨的两条滑坡稳定性系数变化曲线可以发现,降雨不仅会降低滑坡稳定性系数波谷值,使其呈现逐年递减的变化规律,而且还导致两条曲线之间的差值也逐年增大。可能是由于降雨入渗不仅增加滑坡体容重,还引起坡体内基质吸力减小、孔隙水压力增加,浸泡等软化作用减弱了土体抗剪强度,从而加剧了滑坡稳定性的降低<sup>[23]</sup>。由此可见,除了库水位主要影响滑坡稳定性变化,降雨对滑坡稳定性的不利影响也不可忽视,特别是对于库水位调度速率明显较大的年份。

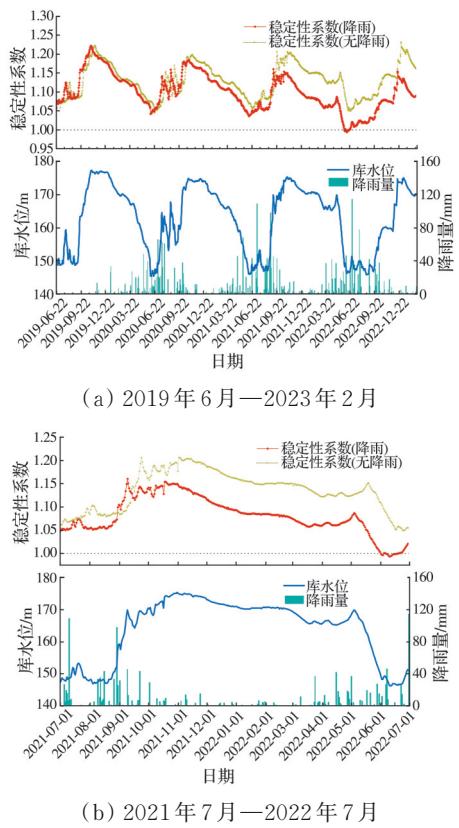


图 10 凉水井滑坡稳定性系数变化曲线

Fig.10 Change curves of factor of safety for the Liangshuijing landslide

图 10(b) 为从 2021 年 7 月 1 日到 2022 年 7 月 1 日 1 个水位年期间滑坡稳定性系数变化曲线。此水位年内的库水位变动以及降雨量变化比其他水文年更强烈, 滑坡稳定性系数变化幅度的波动也更明显, 滑坡稳定性系数达到最低, 因此, 研究该期间滑坡稳定性变化更能突显库水位变动和降雨的影响。

2021-07-01—2021-08-19, 库水位在 145 m 低位处波动, 滑坡稳定性系数也处于低值, 变化比较平稳, 维持在 1.05 左右, 随后, 10 月 31 日水位上升, 库水位持续上升到最高 175.25 m。9 月 10 日之前的水位平均上升速率达到 1.09 m/d, 在滑坡前缘部分受地下水位上升产生的动水压力和静水压力共同作用下, 滑坡抗滑力显著增加, 其稳定性系数持续增长, 峰值最高为 1.16, 之后回落到 1.14 附近。11 月 1 日至次年 4 月 15 日, 库水位从 175 m 缓慢下降至 165 m, 平均下降速率约 0.06 m/d, 滑坡稳定性系数也逐渐下降至 1.06。显然, 此时滑坡稳定性系数下降速度明显大于库水位下降速度, 可能是由于在经历汛期久雨和暴雨后, 滑坡滑带土软化效应明显, 其土体强度下降, 塑性区范围进一步扩大, 在滑坡上部雨水下渗流失过程中滑坡内部孔隙水压力增大, 对滑坡形成较大推动力, 滑坡下滑力增加, 因而其稳定性系数下降速度较水位下降速度更明显。

通过对对比两条稳定性系数变化曲线可以发现, 两条曲线之间稳定性系数的差值明显增大, 说明在此期间降雨进一步降低了滑坡整体稳定性。2022-05-04—2022-06-12, 水位快速下降, 库水位下降速率比往年同时期显著增加, 平均下降速率约为 0.59 m/d, 导致滑坡稳定性系数急剧下降, 滑坡发生滑移的风险提高。根据整个水位年内滑坡稳定性的变化规律可以发现, 库水位涨落会引起滑坡阻滑段静动水压力变化, 使滑坡稳定性处于不断调整的过程中, 而降雨会长期不断地劣化滑坡体岩土参数的强度, 同时造成滑坡主滑段孔隙水压力场变化, 使滑坡整体稳定性进一步降低, 在久雨和暴雨作用下, 未来库水位变动可能会触发滑坡发生滑移。

### 3.5 滑坡位移变化规律

图 6 表明, 在 2019 年 6 月—2023 年 2 月研究时间段内, 凉水井滑坡共计发生了 4 次位移增加, 每次位移增加主要始于库水位下降时期, 持续到水位开始上升后趋于稳定, 不再继续增大, 滑坡累计变形-时间曲线表现为阶跃式上升与平缓变化交替出现的特征, 因此, 凉水井滑坡属于典型的阶跃演进型滑坡<sup>[24]</sup>。数值模拟位移计算结果复现了滑坡阶跃式变形的特点, 表明滑坡位移跃迁增长主要受库位下降的影响, 位移跃迁期与库水位下降期大致相符。模拟计算结果还表明, 在库水位上升阶段位移会明显下降, 表现出“回弹”趋势, 而实际监测点位移在该时期内则保持稳定不变, 但在其他剖面监测点, 发现实际位移变化曲线也有位移“回弹”现象(图 4), 比如在 2022 年 9 月—10 月库水位上升期间, 4-4' 剖面监测点位移就发生过明显下降, 说明在库水位上升期间滑坡位移也有一定变化。

监测数据和计算结果都表明, 在周期性水文年变化下, 在 2021-07-01—2022-07-01 水文年内, 库水位波动和降雨量变化最显著, 与滑坡渗流场和稳定性系数变化规律相似, 滑坡第 4 次位移跃迁也表现得更明显, 因此, 分析滑坡第 4 次位移跃迁规律更具有代表性意义。图 11 为此水文年内滑坡位移计算曲线图。由图 11 可知, 在起初低库水位时期, 滑坡位移相对稳定不变, NC4 位移保持在 40 mm, NC5 位移保持在 14 mm, 滑坡前部位移比后部位移更大。之后库水位进入上升期, NC4 和 NC5 位移开始缓慢下降, NC4 约下降 8 mm, NC5 约下降 3 mm。结合图 9(b) 渗流场变化可知, 在水位上升期, 滑坡内部和外部具有相当高度的水头差, 滑坡受到较大渗透力, 方向指向滑坡内部, 且水位上升滑坡还受到垂直于坡面的静水压力, 促使滑坡改变了变形方

向,滑坡位移出现下降,因此,滑坡位移变化曲线整体上呈“回弹”趋势。

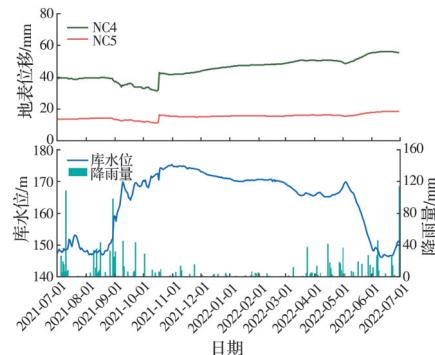


图 11 1 个水文年内凉水井滑坡位移计算曲线

Fig. 11 Displacement calculation curves for the Liangshuijing landslide within a hydrological year

2021年10月16日,库水位高度为172.5 m,17日水位下降至170.5 m,降幅为2 m,18日水位又上升到173.8 m,增幅为3.3 m,导致岸坡在短期内突然经历比较剧烈的水位升降作用,坡脚处水力作用变化强烈,土体单元发生屈服,位移发生突变,致使NC4位移跃迁约10 mm,NC5跃迁约5 mm。然后进入高库水位运行期,水位开始缓慢下降,下降速率约0.06 m/d,滑坡也开始缓慢变形,NC4位移增长至51 mm左右,增幅约9 mm,位移平均增长速率为0.055 mm/d。相比之下,NC5位移几乎维持不变,这是因为NC5位于滑坡中后部,远离岸坡,受库水位扰动影响小,且该时期内降雨量和降雨强度逐渐达到年内最小,降雨对滑坡变形影响渐微,因此滑坡中后部变形不明显。库水位下降期间,平均水位下降速率约0.59 m/d,NC4位移有明显增长,位移平均增长速率约0.19 mm/d,最高增长到56.12 mm;NC5位移也呈增长趋势,但位移平均增长速率较小,约0.071 mm/d,最高增长至18.46 mm。分析NC4和NC5的位移变化规律可知,滑坡位移增长主要集中在前部,中后部位移变化不明显,库水位下降会引起滑坡位移增加,反之,库水位上升滑坡位移略微减少,而降雨对滑坡中后部位移变化有影响。

### 3.6 凉水井滑坡变形机制

在周期性库水位变动和降雨变化共同作用下,凉水井滑坡渗流场的饱和与非饱和区域大小不断变化,坡内孔隙水压力场也随之改变,滑坡稳定性系数因为地下水压力条件改变而呈现周期性变化规律,滑坡地表位移呈现阶跃式上升变化,其位移跃迁期与库水位下降期对应。在考虑滑坡地质条件基础上,通过对滑坡4次变形的云图分析,结合库水位升降和降雨变化联合作用下滑坡渗流特征、稳

定性变化和位移跃迁规律,深入分析凉水井滑坡的变形机制。图12为滑坡在2019年6月—2023年2月期间4次变形位移云图,选取了滑坡在低库水位期间位移增长趋于稳定时的位移场,以便能直观地反映滑坡变形演化趋势。

图12(a)是滑坡的第1次变形,变形主要集中在前端,位移最大的区域发生在与水位持平的坡面处,由坡面向内部位移逐渐减小。经过长期周期性库水涨落的剥蚀作用,坡岸临空条件良好,导致滑坡坡脚易受库水位升降的水力作用而发生变形。滑体为砂岩层,渗透系数较大,属于强透水层,因此,水位涨落对滑坡地下渗流场的扰动明显。水位下降会引起地下水向外渗流,滑坡内部地下水持续向外排水,紧邻自由水面处的坡面地下水单位渗流量最大(图9(a)),滑坡体内外形成较大的水头差,由此产生较大渗透推力,使滑坡发生变形,滑坡稳定性明显下降(图10)。基岩层主要是砂、泥岩互层,泥岩透水性差,隔水性好,渗透系数小,属于不透水层,基岩内部渗流场未受到降雨或库水位涨落影响,如图9所示,因此,基岩也不易发生变形,在图12(a)、(b)中未考虑基岩内部变形场。

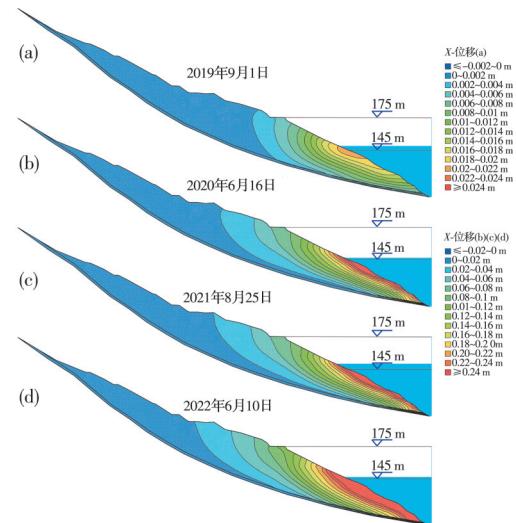


图 12 凉水井滑坡变形云图

Fig. 12 Deformation contours of the Liangshuijing landslide

图12(b)为历时1 a后滑坡发生的第2次变形。可以看出,滑坡位移仍集中在前端,但有明显增长,滑坡中后部位移变化稳定,无明显增加,滑坡变形范围在向后扩大,变形程度相较第1次有明显加剧。库水位涨落主要导致坡体内外形成一定高度的水头差,引起地下水发生渗流(图9(b)、(d)),滑坡内部产生较大的动水压力,进而导致滑坡产生位移,对比图9(d)和图12(b)也可以发现,滑坡变形场等值线分布形状和地下水渗流路径有一定相关性。

滑坡地形陡峭, 区域内发育有两条自然冲沟, 地表径流和排水条件良好, 降雨入渗坡体的雨量有限, 加之计算模型未考虑滑体内部砂岩块石裂隙和孔隙, 在滑坡中后部雨水入渗强度较弱且雨量较小, 导致滑坡中后部变形不明显, 因此, NC5 计算点的位移跃迁变化幅度较小, 见图 6。

对比图 12(b)、(c)可以发现, 滑坡第 3 次变形场较前一次变形场的变化并不明显, 仅变形范围略微扩大, 位移大小稍有增加, 滑坡变形场等值线形状变化不大, 说明滑坡进入周期性变形发展阶段, 主要表现为蠕滑变形。图 6 位移变化曲线也可以证实, 2020—2021 年期间位移增长相对较平缓。值得注意的是, 由表 1 可知, 滑带土渗透系数低于滑体, 因此, 地下水和下渗雨水容易在滑带附近富集, 滑坡中后部浸润线和地下水位线相连接, 在滑坡内部形成自上而下完整的渗流路径, 如图 9 所示。降雨主要控制滑坡中后部浸润线变化, 库水位涨落显著影响滑坡前部地下水位线变化。降雨和库水位周期性变化的共同作用影响滑坡内部渗流场, 其中汛期雨季伴随水位下降, 滑坡内部地下水向外排水, 浸润线内高外低呈凸形, 滑坡向外的渗透力增大, 见图 9(d), 滑坡变形显著; 而非汛期降雨少, 库水位上升, 滑坡吸水饱和, 浸润线向滑坡内部弯曲呈凹形, 见图 9(b), 渗透力大小增加但方向指向滑坡内部, 使滑坡变形稳定或发生相反方向的变形。滑坡地表位移监测数据表明, 滑坡位移呈阶跃式上升和平缓稳定的交替变化, 如图 4 所示, 在降雨和库水位耦合作用下, 滑坡变形场的发展进入周期性增长阶段。

由图 12(d)所示滑坡第 4 次变形场可以发现, 滑坡变形程度明显加剧, 变形范围也显著扩大, 滑坡变形场等值线进一步发展。对比图 6 中前几年库水位监测数据可知, 2022-05-04—2022-06-12 期间, 库水位平均下降速率是前几年的 2 倍左右, 为 0.59 m/d, 同时期 2021 年、2020 年库水位平均下降速率为 0.32、0.27 m/d。库水位下降速率增加导致短时间内坡体内外水头差加大(图 9(d)), 滑坡前部渗流强度加剧, 渗透力增强, 下滑力增加, 导致滑坡变形场发展得比前几年更明显。

凉水井滑坡是典型的推移式滑坡, 自 2008 年开始监测滑坡变形以来, 滑坡后缘裂缝已基本贯通, 后部基岩与峭壁脱离。在常年降雨作用下, 后缘滑体自重对滑坡中前部形成加载作用, 同时, 受到三峡水库首次蓄水水位变动影响, 滑坡上部发生变形错动, 诱发古滑坡复活<sup>[15]</sup>。从滑坡 1-1' 剖面位移变

化特征可以看出, 现阶段滑坡变形主要集中在前缘, 中后部坡体变形比较稳定, 滑坡进入周期性变形增长阶段, 其变形程度与库水位下降速率呈正相关性。在库水位下降过程中, 坡脚消落带出露, 滑坡具备良好临空条件, 内部应力得到调整释放, 坡内渗流指向坡外, 且水位下降速率越快, 渗流强度越大, 滑坡整体稳定性下降且易发生变形; 库水位上升阶段, 地下水渗流方向转向坡内, 滑坡坡脚受到库水位的静动水压力作用, 整体稳定性提高并进入变形稳定阶段。降雨主要通过入渗作用影响滑坡中上部浸润线, 使其呈周期性变化, 进一步与库水位升降共同影响滑坡的地下渗流场, 从而促进滑坡变形场的发展。

## 4 结论

1) 受到库水位涨落和降雨联合作用时, 滑坡内部地下水流动在排水和吸水之间周期性交替变化, 进而影响滑坡饱和与非饱和区域大小, 滑坡前部浸润线主要受库水位变化的直接影响, 后部区域主要受降雨作用, 靠近滑带的中部区域则主要受降雨和库水位涨落联合作用的影响。

2) 受库水位涨落影响, 滑坡稳定性呈现周期性变化规律, 且库水位速率变动越大, 滑坡稳定性波动越强烈; 降雨进一步降低了滑坡整体稳定性, 久雨或暴雨可能会触发滑坡发生滑移。

3) 滑坡位移变化呈阶跃式上升和平缓变化交替发展趋势, 滑坡位移发展主要受库水位变化影响, 水位下降引起位移跃迁增长, 水位上升导致位移变化趋于平缓甚至出现“反弹”, 远离库水位变动区的滑坡中后部位移变化不明显。

4) 滑坡变形主要集中在滑坡前部, 滑坡中后部变形缓慢。库水位变化和降雨的共同作用引起滑坡地下渗流场发生变化, 产生动水压力, 从而促使滑坡发生变形, 且库水位下降速率越大, 滑坡变形越明显。

5) 凉水井滑坡目前进入受库水位变动和降雨周期性影响的阶段, 但对于库水位调动速率比较大的年份, 滑坡稳定性显著下降, 滑坡变形将加剧, 滑移风险也会提高, 此时应当加强对滑坡安全的预警监测。

## 参考文献

[1] YIN Y P, HUANG B L, WANG W P, et al. Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5):

577-595.

[2] 汤明高, 杨何, 许强, 等. 三峡库区滑坡土体渗透特性及参数研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 325-332.  
TANG M G, YANG H, XU Q, et al. Permeability and parameters of landslide bodies in Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27 (2): 325-332. (in Chinese)

[3] 杨何, 汤明高, 许强, 等. 三峡库区石榴树包滑坡近期变形特征与机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 67-74.  
YANG H, TANG M G, XU Q, et al. Recent deformation characteristics and mechanism of the Shiliushubao landslide in the Three Gorges Reservoir Area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 67-74. (in Chinese)

[4] HUANG D, GU D M, SONG Y X, et al. Towards a complete understanding of the triggering mechanism of a large reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir [J]. Engineering Geology, 2018, 238: 36-51.

[5] 刘磊, 殷坤龙, 徐勇, 等. 考虑降雨及库水位变动的区域滑坡灾害稳定性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 403-414.  
LIU L, YIN K L, XU Y, et al. Evaluation of regional landslide stability considering rainfall and variation of water level of reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 403-414. (in Chinese)

[6] 肖捷夫, 李云安, 胡勇, 等. 库水涨落和降雨条件下古滑坡变形特征模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42 (2): 471-480.  
XIAO J F, LI Y A, HU Y, et al. Model tests on deformation characteristics of ancient bank landslide under water level fluctuation and rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 471-480. (in Chinese)

[7] YAO W M, LI C D, ZUO Q J, et al. Spatiotemporal deformation characteristics and triggering factors of Baijiabao landslide in Three Gorges Reservoir Region, China [J]. Geomorphology, 2019, 343: 34-47.

[8] WANG F W, ZHANG Y M, HUO Z T, et al. The July 14, 2003 Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides, 2004, 1(2): 157-162.

[9] LI Y, UTILI S, MILLEDGE D, et al. Chasing a complete understanding of the failure mechanisms and potential hazards of the slow moving Liangshuijing landslide [J]. Engineering Geology, 2021, 281: 105977.

[10] 王力, 南芳芸, 王世梅, 等. 三峡库区降雨型滑坡入渗特征及变形机制: 基于一维和二维模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1363-1374.  
WANG L, NAN F Y, WANG S M, et al. Infiltration characteristics and deformation mechanism of rainfall-induced landslides in Three Gorges Reservoir Area based on 1D and 2D model tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1363-1374. (in Chinese)

[11] 李江, 许强, 王森, 等. 川东红层地区降雨入渗模式与岩质滑坡成因机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 4053-4062.  
LI J, XU Q, WANG S, et al. Study on rainfall infiltration model and formation mechanism of rock landslide in red bed area of East Sichuan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 2): 4053-4062. (in Chinese)

[12] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 439-445.  
WANG D J, TANG H M, LI C D, et al. Stability analysis of colluvial landslide due to heavy rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 439-445. (in Chinese)

[13] 谭淋耘, 黄润秋, 裴向军. 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, 2021, 40(2): 302-314.  
TAN L Y, HUANG R Q, PEI X J. 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, 2021, 40 (2): 302-314. (in Chinese)

[14] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73-81.  
WEI T Y, YIN Y P, GAO Y, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73-81. (in Chinese)

[15] 陈涛, 赵鹏, 王凯, 等. 三峡库区凉水井滑坡成因及复活机制探讨[J]. 工程地质学报, 2014, 22(增刊1): 277-283.  
CHEN T, ZHAO P, WANG K, et al. Discussion on the formation mechanism of Liangshuijing landslide in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(Sup 1): 277-283.

[16] 肖诗荣, 卢树盛, 管宏飞, 等. 三峡库区凉水井滑坡地质力学模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3534-3542.  
XIAO S R, LU S S, GUAN H F, et al. Study of geomechanical model of Liangshuijing landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3534-3542. (in Chinese)

[17] MIAO F S, WU Y P, LI L W, et al. Centrifuge model test on the retrogressive landslide subjected to reservoir water level fluctuation [J]. Engineering Geology, 2018, 245: 169-179.

[18] WANG H L, XU W Y. Stability of Liangshuijing landslide under variation water levels of Three Gorges

Reservoir [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013, 17(Sup 1): s158-s177.

[19] 王其洪. 三峡库区蓄水影响下的凉水井滑坡复活机制与稳定性演化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.  
WANG Q H. Study on resurrection mechanism and evolution stability of the Liang Shui Jing landslides under the running of the three gorges reservoir [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

[20] 闵弘, 谭国焕, 戴福初, 等. 蓄水期库岸古滑坡的水动力学响应监测: 以三峡库区泄滩滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3721-3726.  
MIN H, TAN G H, DAI F C, et al. Hydrodynamic monitoring of a preexisting landslide during reservoir filling: A case history of Xietan Landslide, the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3721-3726. (in Chinese)

[21] 向玲, 王世梅, 王力. 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, 2014, 22(5): 876-882.  
XIANG L, WANG S M, WANG L. 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, 2014, 22(5): 876-882. (in Chinese)

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

[23] REID M E, IVERSON R M. Gravity-driven groundwater flow and slope failure potential: 2. Effects of slope morphology, material properties, and hydraulic heterogeneity [J]. Water Resources Research, 1992, 28(3): 939-950.

[24] 刘传正. 累积变形曲线类型与滑坡预测预报[J]. 工程地质学报, 2021, 29(1): 86-95.  
LIU C Z. Three types of displacement-time curves and early warning of landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 86-95. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)