

[文章编号] 1003-4684(2022)01-0086-05

# 库水位下降速率对上孝仁村滑坡的稳定性影响

钟 瑶

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 为探寻三峡坝址水库蓄水水位在日降幅(0.6 m/d、0.8 m/d、1.0 m/d、1.2 m/d)的情况下对上孝仁滑坡稳定性的影响。通过监测数据及 Geo-Studio 数值分析软件模拟出不同工况条件下的滑坡渗流场,在此基础上计算获得了不同工况条件下的滑坡稳定系数。得出的结论表明:上孝仁村滑坡现阶段正处于基本稳定状态,滑坡的稳定性系数随着水库蓄水水位减小而降低,当水库蓄水水位下降到 145 m 时,滑坡稳定性数值最小。水库蓄水水位下降速率越大,滑坡稳定性数值下降越大。在排除降雨条件的情况下,稳定性系数的下降幅度会随着下降速率的增加而升高。

**[关键词]** 滑坡; 库水位下降速率; 稳定性系数; 降雨

**[中图分类号]** TU43 **[文献标识码]** A

三峡水库蓄水后,每年都存在蓄水和泄洪时期,在降低蓄水水位的全过程中,水库蓄水量的急剧下降改变了坡体内液体在土壤空隙中的流动场,对滑坡的安全性和稳定性有极大的影响,另一方面,长期蓄水后泄洪引起的水位骤降是造成山体滑落的主因之一,水库蓄水水位会造成库岸边坡发生滑坡等地质灾害问题<sup>[1-4]</sup>。因此有必要对库水位升降速率与滑坡的稳定性进行相关性的分析。郑颖人等根据包辛涅斯克(Boussinesq)方程,通过拉普拉斯矩阵变换,得到了水库蓄水水位下降时的浸润线简化公式,证明了库岸边坡土壤中水对滑坡体的稳定系数有很大影响<sup>[5]</sup>。卢书强等以白水河滑坡为例,分析其变形机理、影响因素及稳定性,分析认为,滑坡的稳定性降低是由于坡体内渗透性能较差从而导致土壤内的地下水不能及时排出<sup>[6]</sup>。廖红建等针对复杂的库岸边坡地质条件,对不同渗透系数的边坡在不同的库水位下降速率条件下进行数值计算和分析,提出了不同的水库蓄水水位降低速率在同一渗透系数下的稳定性系数变化曲线是相近的<sup>[7]</sup>。涂国祥等结合数值模拟与刚体极限平衡的方法对滑坡内渗流场及稳定性进行分析,提出水库蓄水水位升降速率对某一时刻的渗流场有较大影响<sup>[8]</sup>。仇文岗等采用 FLAC 对库水位下降过程进行数值计算并同时考虑坡度、渗透系数与库水位下降速率的不同条件下的孔隙水压力变化,提出了水库蓄水水位下降过程中在滑坡体 1/3 处存在一个最不利水位,此时滑坡体

稳定系数最小<sup>[9]</sup>。Yingfa Lu 详细介绍了推移式和牵引式滑坡的渐进破坏机理,同时也根据剪应力和应变的特点,提出了推移式滑坡的两种破坏模式和牵引式滑坡的三种破坏模式<sup>[10]</sup>。同时降雨入渗也是边坡失稳破坏的最常见的诱导因素。在大气降雨时,土体内渗流场分布对其稳定性有着不可忽视的影响<sup>[11-14]</sup>。银晓鹏等针对不同的土体性质,运用饱和-非饱和渗流理论及降雨入渗理论,分析了不同降雨条件对土坡渗流场和稳定性的影响<sup>[15]</sup>。还有许多国内外学者如 Palazzolo Nunziarita 等对滑坡建立 SCOOPS 3D、Green I Ampt 模型和松散耦合的液-气-固三相模型,分析降雨入渗过程中渗流场的变化并对滑坡的稳定性进行评价从而优化改进滑坡的预测<sup>[16-19]</sup>。

本文以上孝仁滑坡为例,通过数值模拟软件 Geo-Studio 模拟出不同下降速率条件下的渗流场计算,并结合 Morgenstern-Price 极限平衡法进行稳定性分析评价,表明滑体稳定性与水库蓄水水位的下降速率密切相关,在叠加降雨的情况下,滑坡稳定系数将下降得更显著。

## 1 上孝仁村滑坡基本概况

### 1.1 滑坡地质概况

上孝仁村滑坡地处长江右岸,距三峡坝址 25 km,坡向 40°,地形坡度呈明显的上陡下缓特点,坡度 28—31°,地表发育多条冲沟,冲沟走向近南北

[收稿日期] 2021-03-23

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(42071264);三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005)

[第一作者] 钟 瑶(1997-),男,湖北孝感人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土力学的理论

向,切坡深度一般 5~10 m,沟底未见基岩,在约 400 m 高程形成后缘崩滑体平台。下伏基岩为砂质页岩、页岩、泥质粉砂岩,滑坡结构类型为斜逆向坡滑坡,滑坡体的构成主要为碎块石土,碎石成份为灰岩、砂质泥岩等。滑带厚 1~2 m,主要为粘性土夹碎石角砾。滑床的构成主要为砂质页岩、泥质粉砂岩、页岩(图 1)。

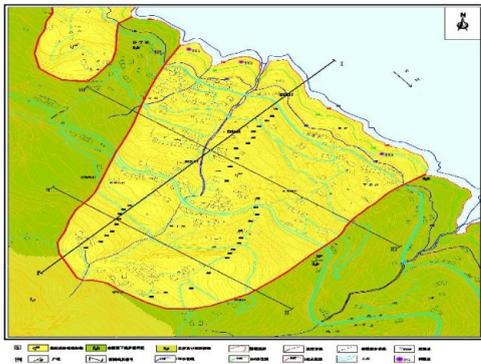


图 1 上孝仁村滑坡工程地质平面图

## 1.2 滑坡类型、形态及规模

上孝仁村滑坡为碎屑土质滑坡,按照水库滑坡分类,属于动水压力+降雨型滑坡。滑坡后缘以平缓的崩滑体平台向较陡的岩质斜坡转折的过渡带为界,东西两侧 175 m 高程以上以基岩山脊为界,175 m 高程以下以自然冲沟为界,前缘为长江库水淹没。滑坡平面形态为箕形,剖面形态为阶梯形,两侧的基岩山梁和后山陡坡共同围成了“圈椅状”,地形坡度呈明显的上陡下缓的特点,整体坡度 28~31°,地表发育多条冲沟,冲沟走向近南北向,切坡深度一般 5~10 m。滑坡主滑方向约 40°,前缘高程 105 m,后缘高程 435 m,纵长约 925 m,宽度约 600 m,平均厚度约 45 m,面积 50×104 m<sup>2</sup>,体积约 2200×104 m<sup>3</sup>。

## 2 滑坡成因机制及变形特征

### 2.1 成因机制分析

滑坡所在斜坡地层存在岩性较为松散的志留系泥岩和粉砂岩;上部为坚硬的砂岩和灰岩为崩塌的发生提供了良好的岩石组合条件。新构造运动导致地壳抬升,河流下切,为崩塌的发生提供了陡立的地形条件。斜坡附近区域内降雨量充沛,并且有连续的强降雨,长期降雨使滑坡体土处于饱水状态,自重增加,土体的抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值降低,而渗透力的存在降低了滑坡的稳定性。当库水位下降时,会产生两个不利于滑体稳定的作用,一是短时间内滑坡体内部的地下水未能及时排出,则会在坡体内部形成动水压力,二是滑坡体内部的地下水会降低岩土体力学性能从而软化滑带。

## 2.2 变形监测及趋势分析

上孝仁村滑坡被纳入三峡库区秭归县专业监测,目前滑坡上共布设 3 个 GPS 监测点。3 个 GPS 监测点分别是 ZG115、ZG116、ZG117,分别分布在滑体中部高程 182 m、235 m、282 m 处,3 个深部位移钻孔倾斜监测点位置与之相对应,形成一个纵向监测剖面,各监测点位的布置详见图 1。监测间隔为 1 次/月,汛期根据需要不定期监测。监测结果见图 2。

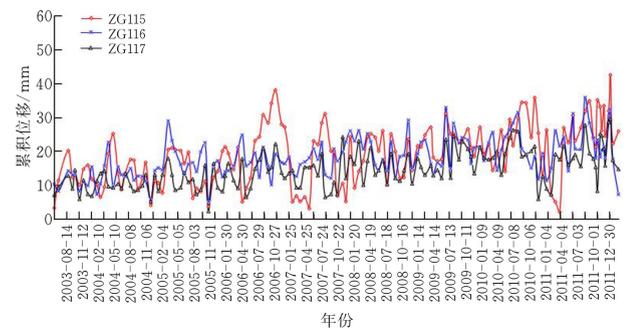


图 2 GPS 专业监测点累积位移曲线图

由上孝仁村滑坡 GPS 专业监测点累积位移曲线图分析可以看出自 2003 年 6 月监测以来,上孝仁村滑坡变形不明显,专业监测数据表明多年累积位移基本没有增大,变形的跳动为测量误差所致。上孝仁村滑坡在水库蓄水期间位移无明显变化,当库水位缓慢下降时,滑坡的位移也随之有些许增长,当水位下降速率突变时,位移也对应的跳动增长,因此表明滑坡稳定性降低与库水位升降有一定关系。

## 3 滑坡稳定性分析

### 3.1 计算方法

利用数值模拟软件 Geo-Studio 中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 两大模块,对上孝仁村滑坡进行渗流场分析和稳定性计算。SEEP/W 是分析地下水渗流的模块,该模块可以对饱和一非饱和土在特定工况条件下完成特定时刻的渗流场分析,从而得到某一时刻下的渗流场分布。SLOPE/W 模块是进行稳定性计算的模块,在充分考虑滑坡体的自重以及滑坡前缘蓄水水位对滑坡的压力,结合 SEEP/W 模块计算所得到的渗流场分布的情况下,选择上孝仁村滑坡的主剖面 I-I' 进行稳定性计算,SEEP/W 模块中选择 Morgenstern-Price 极限平衡法对主剖面进行稳定性建模分析,由于 Morgenstern-Price 极限平衡法考虑到足够多的条块之间力的相互作用,所以计算的过程一般而言会比较复杂,但是计算精度较高。

### 3.2 模型及参数

在实际现场地质勘察及分析收集资料的基础

上,选定滑坡体计算剖面为主剖面 I-I'(图3)。斜坡体长 1050 m,高 330 m。

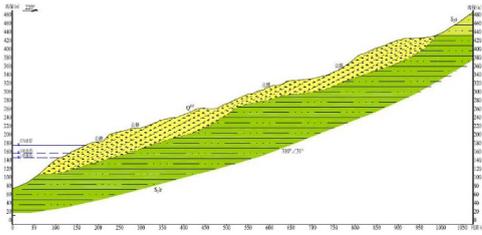


图3 上孝仁村滑坡主剖面 I-I'图

依据上孝仁村滑坡的地质主剖面图 I-I'采用 SLOPE/W 模块对其进行网格划分,建立相对应的有限元计算模型,节点数总共为 7196,单元数总共为 7114,网格划分模型见图 4。

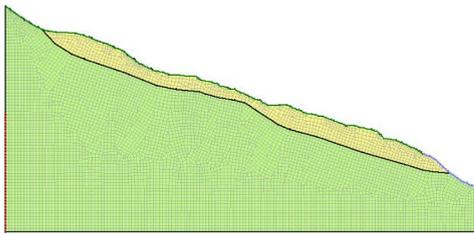


图4 上孝仁村滑坡网格划分图

在实际现场的地质勘察报告提供的建议参数值基础上,参考对比其它相似滑坡岩土体的物理力学性质参数值,最终确定了上孝仁村滑坡的计算参数(表1),上孝仁村滑坡的土水特征曲线及滑体相对对应渗透函数曲线见图 5。

表1 上孝仁村滑坡计算参数

	滑体	滑带	滑床
容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	18	17	25.6
粘聚力 C/kPa	17.9	18	3080
摩擦角/( $^{\circ}$ )	19.8	10.3	34.5
弹性模量 E/MPa	16.6	12.4	$6.1 \times 10^4$
泊松比 $\mu$	0.21	0.32	0.28
渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.003	0.0004	0.00006
$K = \frac{Q}{F} / (^{\circ})$	10	5	19

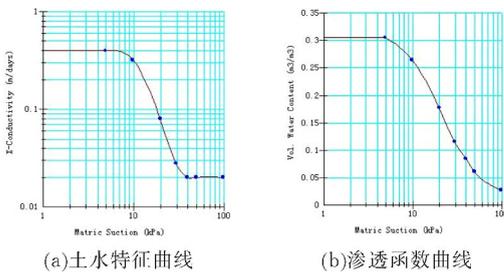


图5 滑体特征及函数曲线

### 3.3 分析工况及荷载

本次对主剖面进行稳定性分析评价采用的计算工况组合和荷载组合详见表 2。此次渗流计算时,

初始库水位为 175 m,在 175 m 降至 159 m 之间按照常规库水位降速,在库水位从 159 m 降至 145 m 时按表 2 的工况。工况组合 II 中三天降雨在 151.4 m 时叠加。

### 3.4 滑坡地下水渗流分析

运用数值模拟软件 Geo-Studio 的 SEEP/W 模块对上孝仁村滑坡进行渗流场模拟分析,滑坡在各工况下的地下水位如图 6 所示。库水位下降对滑坡的影响主要体现为动水压力的影响,SEEP/W 程序中将动水压力等效为容重和孔隙水压力的影响。

表2 上孝仁村滑坡计算参数

水库运行水位	工况组合编号	库水位下降速率/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	荷载组合内容
非汛期水位降落	I	0.6	自重+地表荷载+坝前水位从 159 m 降至 145 m
		0.8	
		1.0	
		1.2	
	II	0.6	自重+地表荷载+坝前水位从 175 m 降至 145 m+非汛期 50 年一遇暴雨
		0.8	
		1.0	
		1.2	

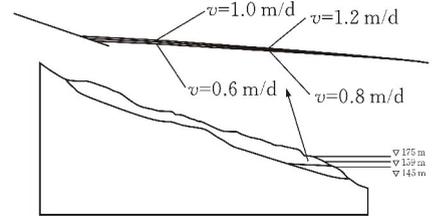


图6 库水位不同下降速率的地下水位线示意图

对比图 6 可知,当库水位以  $v = 0.6 \text{ m/d}$ 、 $0.8 \text{ m/d}$ 、 $1 \text{ m/d}$ 、 $1.2 \text{ m/d}$  的下降速率从 159 m 的水位下降至 145 m 水位时,地下水位线呈显著的上凸形态,且滑坡体内地下水位线均随着库水位的下降而下降,而滑坡体内地下水位线位置在不同库水位下降速率工况条件下形态没有发生明显的变化。

而在降雨的过程中,雨水的渗入不仅会导致边坡土体的含水量随着降雨时间而增长,还会改变边坡土体中的渗流场<sup>[20]</sup>。研究库水位下降速率和降雨共同作用下对渗流场的影响则需要进行降雨模拟。通过在 SEEP/W 模块在模型边坡的地表线位置设置边界条件来模拟降雨强度,故选取表面雨水渗入速度作为降雨强度,此时的边界条件即为计算时的流量边界。根据现场取样分析报告,取渗透系数为  $3.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,将其作为本次降雨模拟时的流量边界,并计算得出库水位以  $0.6 \text{ m/d}$  从 159 m 下降至 145 m 并叠加 50 年一遇 3 日暴雨工况的孔隙水压力分布图(图 7)。

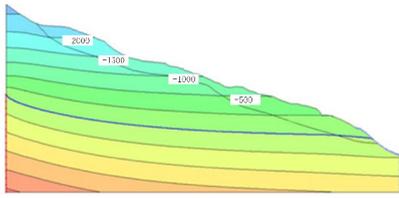


图 7 库水位以 0.6 m/d 从 159 m 下降至 145 m 并叠加 50 年一遇 3 日暴雨工况滑体内孔隙水压力分布图

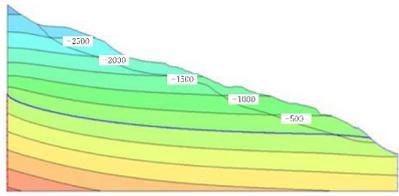


图 8 库水位以 0.6 m/d 从 159 m 下降至 145 m 不叠加暴雨工况滑体内孔隙水压力分布图

图 7、图 8 分别给出了库水位降速为 0.6 m/d 叠加暴雨工况下滑体内孔隙水压力等值线图及库水位降速为 0.6 m/d 不叠加暴雨工况下滑体内孔隙水压力等值线图。对比分析图 7 和图 8 可知,库水位下降叠加降雨对滑坡地下水渗流场有一定影响,由于暴雨渗入滑坡体后,将会导致滑坡体内土壤的孔隙气压力与孔隙水压之间的压力差值降低,地下水位也有所抬升,此时叠加暴雨比不叠加暴雨滑体内地下水位会有所升高。因此,在遇上暴雨的条件下库水位的下降将对滑坡稳定性造成无法控制的影响。

### 3.5 滑坡稳定性计算评价

在 SEEP/W 模块计算所得到的渗流场分布的基础上,用 Morgenstern-Prince 法对上孝仁村滑坡的地质主剖面图 I-I' 进行稳定性计算,得到非汛期水位降落条件下两种工况组合的上孝仁滑坡的稳定性系数表(表 3),并根据稳定性系数表绘制出两种工况组合情况下的稳定系数变化曲线如图 9 所示。

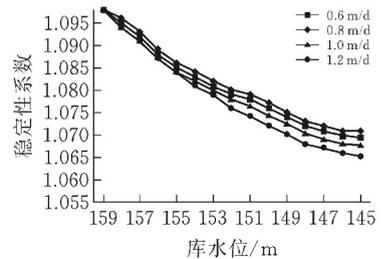
表 3 两种工况下稳定性系数表

工况组合	库水位下降速率/(m·d <sup>-1</sup> )	稳定系数
159 m 下降至 145 m 过程	$v=0.6$	1.0709
	$v=0.8$	1.0695
	$v=1.0$	1.0677
	$v=1.2$	1.0652
175 m 下降至 145 m 叠加降雨过程	$v=0.6$	1.0610
	$v=0.8$	1.0589
	$v=1.0$	1.0567
	$v=1.2$	1.0550

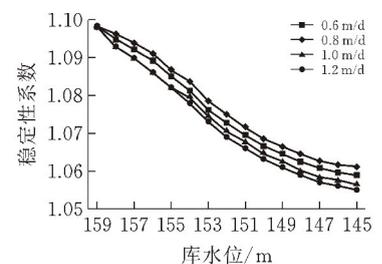
根据表 3 可知当库水位以  $v=0.6$  m/d 下降时,稳定性系数从刚开始的 1.098 减小到 1.0709 左右。库水位以  $v=1.2$  m/d 下降时,稳定性系数从刚开始

的 1.098 减小到 1.0652 左右。由图 9 中的稳定性系数的变化可知,当库水位以  $v=0.6$  m/d、0.8 m/d、1 m/d、1.2 m/d 的下降速率从 159 m 的蓄水位下降至 145 m 蓄水位时,上孝仁村滑坡稳定系数会随着库水位的下降而减小,滑坡稳定性系数下降到最小时正是库水位下降到 145 m 的时候。而滑坡稳定性也会受到下降速率的影响,不同的下降速率影响也不相同。当库水位下降速率增大时,滑坡稳定性系数会因为动水压力的作用减小幅度而增大,滑坡稳定性系数曲线也会越陡。

对比图 9a 可知图 b 中是在库水位从 175 m 下降至 145 m 的情况上叠加了 50 年一遇 3 日暴雨条件,其稳定性系数会小于不叠加降雨的稳定性系数,降雨对安全系数的影响一直持续到计算时段的最后一天,说明降雨对滑坡的影响是长期的,且有一定的滞后效应。50 年一遇 3 日暴雨会使稳定性系数有一定幅度的下降,但其影响较小,且库水位下降速率大的情况下再叠加降雨条件,稳定性系数受到的影响也会增大。在克服降雨条件的同时,稳定性系数的下降幅度会随着下降速率的增加而升高。



(a) 159 m 下降至 145 m 工况



(b) 175 m 下降至 145 m 叠加降雨工况

图 9 两种工况下稳定性系数变化曲线分布图

### 3.6 滑坡变形机理分析

由上述稳定性计算评价可知,降雨和库水位升降是影响上孝仁村滑坡变形的两个主要因素。当降雨渗入滑坡体后,会导致滑坡体内土壤的孔隙气压力与孔隙水压之间的压力差值降低,增大滑体重量并产生渗透力,降低滑坡稳定性。当库水位下降时,因滑坡体内土体的渗透性较差,滑坡体内地下水排出的速度远跟不上库水位下降的速度,这会导致滑坡体内地下水位高于库水位,而水位的高度差越大,所产生的水压就越大,因此水库蓄水水位下降之后滑

坡体内动水压力作用明显增大,从而影响滑坡的稳定性。

## 4 结论

以三峡库区上孝仁村滑坡为依托,通过有限元模型,对库水位下降速率和降雨联合作用下的渗流场进行计算分析,并对滑坡的稳定性和变形机理进一步探讨,得到以下结论:

1)上孝仁村滑坡的稳定性系数会随着库水位下降速率的增大而减小。

2)上孝仁村滑坡变形主要由库水位下降及降雨引起,按照水库滑坡分类,属于动水压力+降雨型。现阶段上孝仁村滑坡仍处于基本稳定的状态,预计库水位下降速率增加到 1.2 m/d 条件时滑坡的变形将进一步增大。

3)通过数值模拟软件 GEO-Studio 对上孝仁村滑坡的主剖面 I-I' 进行稳定性计算分析,可知滑坡处于基本稳定的状态是在日降幅 0.6 m 的条件下。在增大日降幅到 1.2 m 时,滑坡的稳定系数为 1.0652,此时滑坡体仍处于基本稳定的状态。对比日降幅 0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m 的稳定性系数可知,库水位在日降幅从 0.6 m 增大到 1.2 m 这个阶段时对滑坡的稳定性影响较小。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘庆丽,殷坤龙,刘磊.三舟溪滑坡在非汛期增加库水位下降速率对其稳定性的影响[J].安全与环境工程,2016,23(2):102-109.
- [2] 陆世轩,肖诗荣,周俊,等.库水升降速率对老蛇窝滑坡稳定性影响分析[J].人民长江,2017,48(8):38-43.
- [3] 李壮壮,张勇,程英建.库水位骤降条件下滑坡稳定性分析[J].桂林理工大学学报,2017,37(3):489-494.
- [4] GUO M, GE X. Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(3): 282-288.
- [5] 郑颖人,时卫民,孔位学.库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J].岩石力学与工程学报,2004(18):3203-3210.
- [6] 卢书强,易庆林,易武,等.库水下降作用下滑坡动态变形机理分析——以三峡库区白水河滑坡为例[J].工程地质学报,2014,22(5):869-875.
- [7] 廖红建,高石秀,盛谦,等.渗透系数与库水位变化对边坡稳定性的影响[J].西安交通大学学报,2006(1):

- 88-92.
- [8] 涂国祥,邓辉,黄润秋.水位变动速度对某库区岸坡堆积体稳定性的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(4):63-70.
- [9] 仇文岗,王尉,高学成.库区水位下降对库岸边坡稳定性的影响[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(1):21-26.
- [10] YINGFA LU. Deformation and failure mechanism of slope in three dimensions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(2): 109-119.
- [11] 李全文,常金源,徐文刚,等.Geostudio 软件模拟降雨入渗过程中边界条件的探讨[J].水利规划与设计,2019(2):54-57+87.
- [12] 黄新智,刘俊俊.基于 SEEP/W 的降雨条件下黄土边坡稳定性分析[J].铁道勘察,2015,41(5):41-44.
- [13] 王力.库水联合降雨作用下三峡库区树坪滑坡复活机理研究及预测评价[D].宜昌:三峡大学,2014.
- [14] 曹启增.基于 Geo-studio 的降雨条件下隧道弃渣场边坡稳定性分析[D].西安:长安大学,2019.
- [15] 银晓鹏.降雨条件下的边坡渗流数值模拟及稳定性分析[D].兰州:兰州理工大学,2008.
- [16] PALAZZOLO NUNZIARITA, PERES DAVID J, BORDONI MASSIMILIANO, et al. Improving spatial landslide prediction with 3D slope stability analysis and genetic algorithm optimization: application to the oltrepò pavese[J]. Water, 2021, 13(6).
- [17] ZHANG YU, YANG LIXIA, HAN BINGBING, et al. Impact of the rainfall intensity and seepage on slope stability in loess plateau[J]. Earthquake Research in China, 2020, 34(4): 560-579.
- [18] LIU ZI-ZHEN, YAN ZHI-XIN, QIU ZHAN-HONG, et al. Stability analysis of an unsaturated soil slope considering rainfall infiltration based on the Green-Ampt model[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(10): 2577-2590.
- [19] DONG-MEI SUN, XIAO-MIN LI, PING FENG, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope during rainfall infiltration using coupled liquid-gas-solid three-phase model[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(03): 183-194.
- [20] MOSSA ABDULRAHMAN SULTAN. Slope stability and the rainfall effect analysis by using 2D physical and numerical method[D]. 绍兴:绍兴文理学院,2020.