

欧阳琦,陈欣,危润初,等.紫鹊界梯田失稳机制.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):581-591. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220268.

Ouyang Qi, Chen Xin, Wei Runchu, et al. Destabilization Mechanism of Ziquejie Terrace. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2): 581-591. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220268.

紫鹊界梯田失稳机制

欧阳琦^{1,2,3}, 陈欣¹, 危润初^{1,2,3}, 伍诗梦⁴, 朱志远⁵

1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 长沙 410004

2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410004

3. 长沙理工大学洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410004

4. 湖南衡阳水文水资源勘测中心, 湖南 衡阳 421001

5. 湖南娄底水文水资源勘测中心, 湖南 娄底 417000

摘要:为厘清降雨入渗作用对花岗岩区梯田边坡稳定性的影响,本文以湖南省紫鹊界梯田为例,在分析紫鹊界梯田地质条件的基础上,基于有限元数值模拟软件 Geostudio 多模块的耦合,分析了不同边坡坡度和不同土层厚度在暴雨条件下的渗流场和稳定性。研究结果表明:在降雨强度为 90 mm/d、降雨历时为 5 d 的工况下,坡度为 35°和 40°的边坡处于失稳状态,稳定性系数与边坡坡度负相关;全风化土层越厚的边坡稳定性系数越低;在降雨历时 5 d 后,不同土层工况下的稳定性系数相差不大,但无降雨时,全风化土层越薄的边坡明显更加稳定。

关键词:紫鹊界梯田;花岗岩;降雨入渗;边坡稳定性;坡度;土层厚度

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220268

中图分类号:P642.2

文献标志码:A

Destabilization Mechanism of Ziquejie Terrace

Ouyang Qi^{1,2,3}, Chen Xin¹, Wei Runchu^{1,2,3}, Wu Shimeng⁴, Zhu Zhiyuan⁵

1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Water and Sediment Science and Water Disaster Prevention and Control, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Water Environment Treatment and Ecological Restoration of Dongting Lake, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China

4. Hunan Hengyang Hydrology and Water Resources Survey Center, Hengyang 421001, Hunan, China

5. Hunan Loudi Hydrology and Water Resources Survey Center, Loudi 417000, Hunan, China

收稿日期:2022-09-28

作者简介:欧阳琦(1991-),男,讲师,博士,主要从事水文地质工程地质方面的研究, E-mail:449240305@qq.com

基金项目:湖南省教育厅优秀青年项目(21B0314);国家自然科学基金项目(41602264);湖南省自然科学基金项目(2020JJ5572, 2023JJ40021);长沙理工大学“双一流”科学研究国际合作拓展项目(2019IC08)

Supported by the Outstanding Youth Project of Hunan Provincial Department of Education (21B0314), the National Natural Science Foundation of China (41602264), the Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ5572, 2023JJ40021) and the “Double First-Class” Scientific Research International Cooperation Expansion Project of Changsha University of Science & Technology (2019IC08)

Abstract: In order to discuss the influence of rainfall infiltration on the stability of granite terrace slope, this paper takes the Ziquejie terrace in Hunan Province as an example. Based on the analysis of the geological conditions of Ziquejie terrace, the seepage field and stability of different slope gradients and different soil layer thicknesses under rainstorm conditions were analyzed based on the coupling of multiple modules of the finite element numerical simulation software Geostudio. The results show that under the working condition of 90 mm/d rainfall intensity and 5 days rainfall duration, the slopes with 35° and 40° gradients are in a state of destabilization, and the stability coefficient is negatively correlated with the increase of slope gradient; The thicker the fully weathered soil layer is, the lower the safety factor of the slope is. After 5 days of rainfall, the stability coefficients of different soil layers under different working conditions are similar. However, when there is no rainfall, the thinner the fully weathered soil layer is, the more stable the slope is.

Key words: Ziquejie terrace; granite; rainfall infiltration; slope stability; gradient; soil layer thickness

0 引言

紫鹊界梯田位于湖南省新化县,被列入首批世界灌溉工程遗产名录^[1]。梯田是我国重要的文化遗产,梯田保护始终是梯田管理工作的核心任务。近年来,随着极端降水事件频率增加,紫鹊界梯田失稳崩塌事件频率也明显增加,梯田失稳已成为梯田保护亟待解决的首要问题。

目前,有关学者对边坡稳定性问题开展了大量研究,对相关问题的认识也已非常深入。梯田作为一种特殊边坡形态,其稳定性研究还有待细化。有学者对北方黄土梯田边坡开展研究后发现:降雨入渗后土体中含水率增加使有效应力降低,导致梯田边坡的抗剪强度显著降低,对坡体的稳定性会产生影响^[2-4];随着降雨的进行,边坡在变形演化的过程中会出现坡顶裂隙,致使滑坡土体的松散性增加,加快边坡的失稳^[4-5];降雨入渗对边坡坡脚处的孔隙水压力和安全因素影响最大,边坡失稳主要表现在浅层滑动面的失稳^[6-8]。在此基础上,程圣东等^[9]对坡改梯修建前后梯田的整体稳定性进行了对比,发现不同土层厚度、田坎坎度和田面宽度都会对梯田整体的稳定性产生影响。

根据对已有北方梯田安全稳定性研究和紫鹊界梯田观测资料的对比可以发现,与北方黄土区梯田相比,紫鹊界梯田田面宽度和田坎高度都比黄土梯田小得多^[2,10-16]。湖南紫鹊界基岩为二长花岗岩,其风化土壤具有孔隙度大、砂粒含量高等特点,同时又受耕作灌水的影响,其失稳机制具有独特性,目前

还未见有专门的研究成果。因此,有必要对紫鹊界梯田边坡在暴雨条件下的稳定性进行研究,分析其边坡渗流场和稳定性系数变化规律,综合评价不同因素对梯田边坡稳定性的影响。本文选取紫鹊界梯田为研究区,并将有限元数值模拟软件 Geostudio 中的 SEEP 和 SLOPE 模块进行耦合来分析其边坡失稳机制,以期为类似工程提供参考和依据,也为南方花岗岩区梯田边坡稳定性研究提供的有益补充。

1 研究区概况

紫鹊界梯田位于湖南省新化县水车镇,地处湘中(图 1a),属雪峰山主脉。梯田依山就势开凿,区内共有梯田 500 多级,约 10 万余丘,呈带状分布于海拔 500~1 200 m、坡度 $25^\circ\sim40^\circ$ 的山坡,向东北方向呈扇形展开,面积约 93 km^2 ^[12],介于 $110^\circ52'E-111^\circ06'E$, $27^\circ37'N-27^\circ48'N$ 之间(图 1b)。与北方黄土梯田相比,紫鹊界梯田每级梯田田面宽度很窄,仅为 2.0~2.5 m,坎高 1.0~2.0 m^[17]。

该地区气候上属于亚热带季风气候区,年平均降水量达 1 650~1 700 mm。虽然降水量丰富,但时间分布不均匀,降水主要集中在 4—7 月,占全年降水量的 55%~65%。地质构造属雪峰山弧形构造,基岩岩性以二长花岗岩为主,属白马寺复式岩体,于加里东期(志留纪)侵入^[14]。该区地形独特,属浅切中低山地貌和浅切馒头状丘陵地貌,地势向东南倾斜。土质为花岗岩风化形成的黄砂土、红砂土和麻砂土,有机质丰富,结构性好,透水性强,呈酸性或中性^[15]。

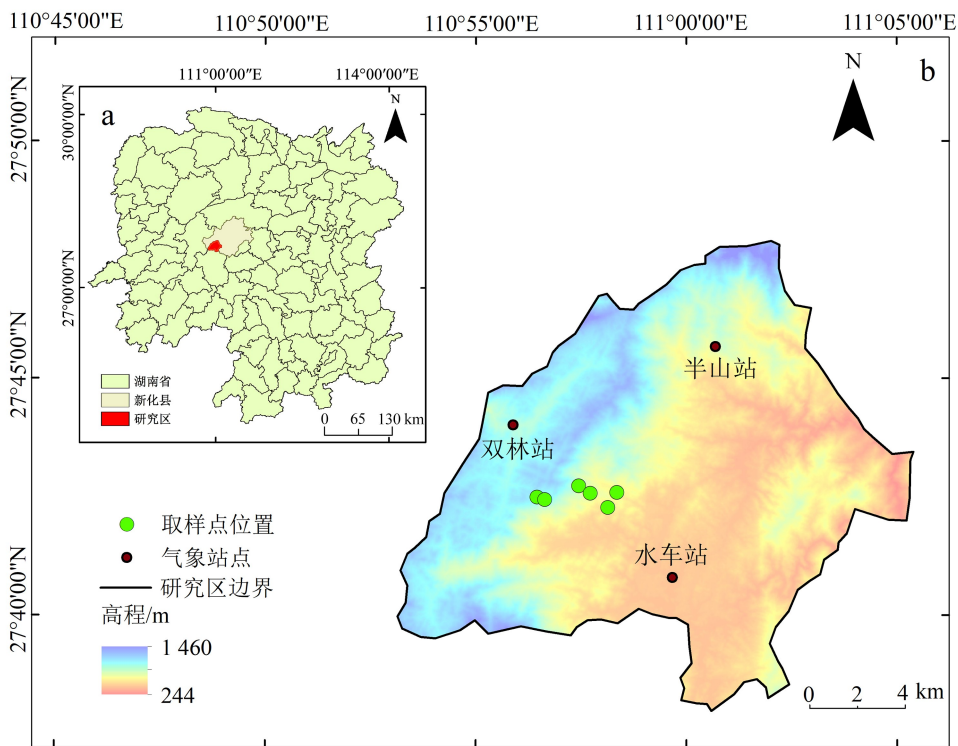


图 1 紫鹊界梯田地理位置(a)及研究区取样点分布(b)图

Fig.1 Location of Ziquejie terrace (a) and distribution of sampling points in the study area (b)

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究先后两次对紫鹊界梯田开展了调查、取样工作,取样点分布如图 1b 所示,获取了相关的野外实测数据。通过对李桂元等^[16]在紫鹊界梯田的地质钻探成果和工程地质手册类似工程经验数据^[18]进行类比和验证,综合实测数据得出了紫鹊界梯田不同土层的物理力学参数。本文概化的数值分析模型所用到的物理力学参数如表 1 所示。本研究还收集了紫鹊界周边水文站点 1986—2019 年的逐日降水数据,主要为水车站、双林站和半山站等地方防汛气象监测站(图 1b),数据来自湖南省水文与水资源勘测中心。

2.2 研究方法

本研究采用 GeoStudio2018 软件进行数值模拟研究。GeoStudio2018 是全球最通用的岩土工程分析软件之一,目前已被广泛应用于岩土渗流分析中,其中,在模拟降雨入渗对边坡的影响时,该软件能够充分开展基质吸力、流固耦合、渗流场分析等方面的模拟^[19-22]。

本研究进行的分析将用到 GeoStudio2018 软件中的 SEEP 和 SLOPE 模块。先通过 SEEP 模块计算出降雨条件下梯田边坡不同时间的含水率和孔隙水压力;再导入 SLOPE 模块进行边坡的瞬态稳定性分析,计算其稳定性系数,从而可分析不同条件下梯田边坡的稳定性情况。

表 1 研究区各土层物理学参数

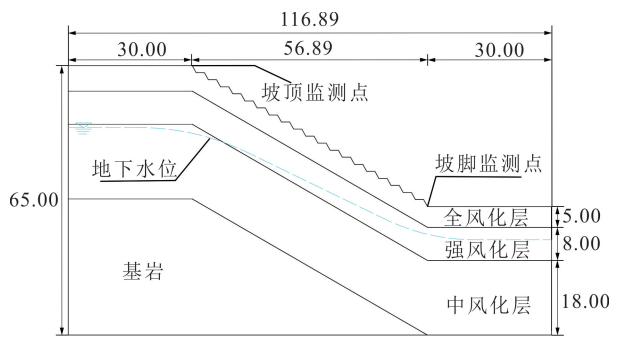
Table 1 Physical parameters of each soil layer in the study area

土层	泊松比	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	饱和含水率/%	渗透系数/(10 ⁻⁵ m/s)
全风化层	0.19	18.8	20.8	25	35.25	4.30
强风化层	0.30	20.5	30.5	29	16.02	0.89
中风化层	0.35	24.0			5.11	0.30

3 数值模型

3.1 模型建立

根据紫鹊界梯田的地质钻探成果,结合地质条件,本文概化的数值分析模型如图 2 所示(以 30°边坡为例)。建模时做出如下简化和假设:1)将梯田的边坡地质剖面划分为 4 层,其中上面 3 层分别为全风化花岗岩、强风化花岗岩和中风化花岗岩,最底层为基岩。2)斜坡各岩土层均为平行坡面,所构建的模型通过控制网格模块进行网格划分,在模型中对于全风化层、强风化层和中风化层进行网格细化处理,整个模型中最大单元格的长度设为 3.00 m,最小单元格的长度设定为 0.05 m。3)根据李桂元等^[16]地下水位观测井的结果,设定本研究初始水位位于山顶埋深 15.00 m、山脚埋深 8.00 m 处,在各模型中均保持不变。4)在构建不同边坡模型时,梯田的田面宽度和田坎高度分别为 2.00 和 1.70 m,田坎



图中单位为 m。
图 2 紫鹊界 30°梯田边坡剖面图
Fig.2 Profile of 30° terrace slope at Ziquejie

坎度为适应不同边坡坡度而合理变化。5)根据紫鹊界周边水文站点(水车站、双林站和半山站)的降雨数据可知,暴雨情况集中发生在 6—7 月。为探究暴雨条件下梯田边坡的稳定情况,结合气象部门对降雨强度的相关规定^[23],本次均采用降雨强度为 90 mm/d 的暴雨雨强条件进行模拟,观察分析边坡渗流场的变化情况,所设定的降雨范围是整个坡面和坡顶。参考已有的对边坡稳定性的有限元模拟研究^[24-25],本研究将降雨历时均设定为 5 d。6)不同工况条件如表 2 所示,其中工况一到工况四保持各土层厚度不变,改变梯田的整体坡度,以探究不同坡度对梯田边坡稳定性的影响;工况五到工况八保持梯田的坡度为 30°不变,改变全风化土层和强风化土层的厚度,以探究不同土层厚度对梯田边坡稳定性的影响。中风化土层厚度维持不变。

3.2 岩土层参数设定

詹良通等^[26]通过大量研究,获得了中国东南部层状边坡的土壤分布和特征。该边坡主要结构自上而下为坡积土、强风化岩石和下部基岩,各层的产状基本相似。因此,本研究将各层的孔隙分布状态和渗透系数设定为各向同性。

在利用 GeoStudio 的 SEEP/W 板块进行边坡渗流场分析前,需提供各土层的渗透系数曲线和土-水特征曲线^[27-28]。本文先采用 GeoStudio 的相关函数对两条曲线进行拟合,三种土层的渗透系数曲线和土-水特征曲线如图 3 所示。其中模型中各土层的土-水特征曲线基于土层的饱和体积含水量和 SEEP/W 的样本函数。再根据土层的饱和渗透系数和土-水特征曲线,采用 Van Genuchten(VG)模型模拟渗透系数曲线。

表 2 不同工况条件设置
Table 2 Different working conditions

	工况	梯田整体 坡度/(°)	降雨强度/ (mm/d)	全风化层 厚度/m	强风化层 厚度/m	中风化层 厚度/m
不同坡度的 影响	一	20	90	5	8	18
	二	25	90	5	8	18
	三	30	90	5	8	18
	四	40	90	5	8	18
不同土层厚度 的影响	五	30	90	1	12	18
	六	30	90	2	11	18
	七	30	90	3	10	18
	八	30	90	4	9	18

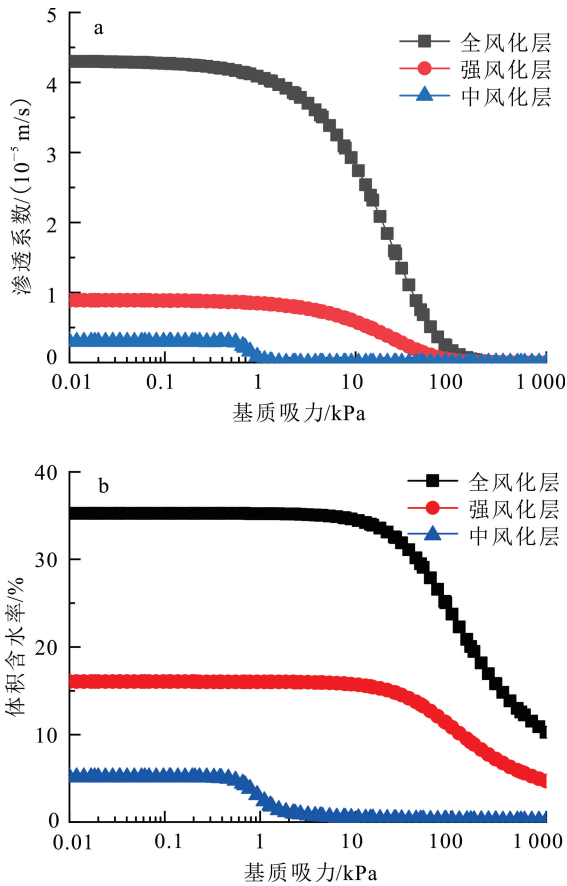


图 3 研究区各层土体的渗透系数曲线(a)和土-水特征曲线(b)

Fig.3 Permeability coefficient curve (a) soil-water characteristic curve (b) of each layer of soil mass in the study area

在降雨入渗条件下,边坡稳定性系数随非饱和和土层孔隙水压力和土体重力的增加而降低^[29-30]。本文对边坡进行非饱和-饱和渗流分析,确定降雨入渗条件下的孔隙水压力场,然后进行边坡稳定性分析,计算稳定性系数。在边坡稳定性分析中,采用非饱和和极限平衡法求解稳定性系数。非饱和和极限平衡法是以 Fredlund 强度理论为指导,考虑孔隙水压力对边坡稳定性的影响,分析非饱和边坡的稳定性^[31]。Fredlund 等^[32]提出了非饱和土的抗剪强度公式,即

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (1)$$

式中: τ 为抗剪强度, kPa; c' 为有效黏聚力, kPa; σ 为剪破面上的法向总应力, kPa; u_a 为破坏时破坏面上的孔隙气压, kPa; u_w 为破坏时破坏面上的孔隙水压力, kPa; $\sigma - u_a$ 为净法向应力, kPa; $u_a - u_w$ 为基

质吸力, kPa; φ' 为对应的净法向应力变量的内摩擦角, ($^\circ$); φ^b 为基质吸力对抗剪强度的贡献所对应的摩擦角, ($^\circ$), 反映抗剪强度增长率与基质吸力之间的关系^[10,23]。通过查阅相关规范^[16], 本文的边坡稳定分析按 3 级滑坡来考虑, 稳定性系数 (F_s) 的控制标准取 $F_s = 1.15$ 。

4 结果分析

4.1 不同坡度对花岗岩梯田的影响

在降雨初期, 孔隙水压力随深度的变化而均匀变化, 30° 梯田边坡孔隙水压力变化如图 4 所示: 水位线位置的孔隙水压力为 0 kPa, 水位线上方的孔隙水压力小于 0 kPa, 且距离地表越近, 负孔隙水压力越大; 水位线下方的孔隙水压力大于 0 kPa, 往地下越深, 正孔隙水压力越大。

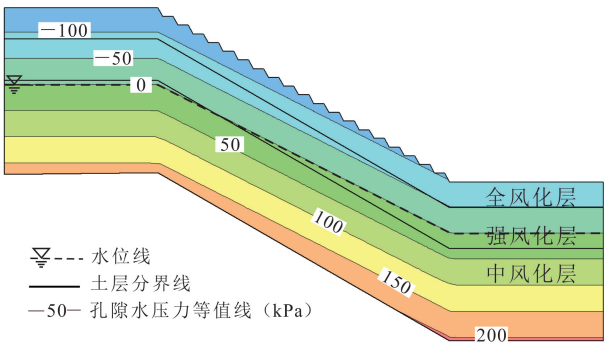


图 4 研究区 30° 梯田边坡初始状态下孔隙水压力分布
Fig.4 Pore water pressure distribution in the initial state of 30° terraced slope in the study area

图 5 为不同坡度的梯田边坡在降雨历时 5 d 后孔隙水压力的分布状态, 可见各工况下孔隙水压力随深度的变化规律基本一致。从图 5 还可以发现, 受到雨水影响的区域主要是上层全风化层与强风化层分布的区域, 因此, 可以推测降雨导致的边坡失稳主要集中在表现在边坡的浅表层区域。就孔隙水压力变化来看, 边坡内部的孔隙水压力的变化趋势大致相近, 坡脚处的孔隙水压力变化最为明显(图 5)。这说明在降雨过程中, 坡脚处于最危险的地方, 可能的原因是内部土体渗透性小, 大多数的雨水难以渗入到边坡内部; 且水分的汇集作用致使高程较高处的水分在势能的作用下向坡脚移动, 水分得到不断补充, 直至渗透到坡体内部。

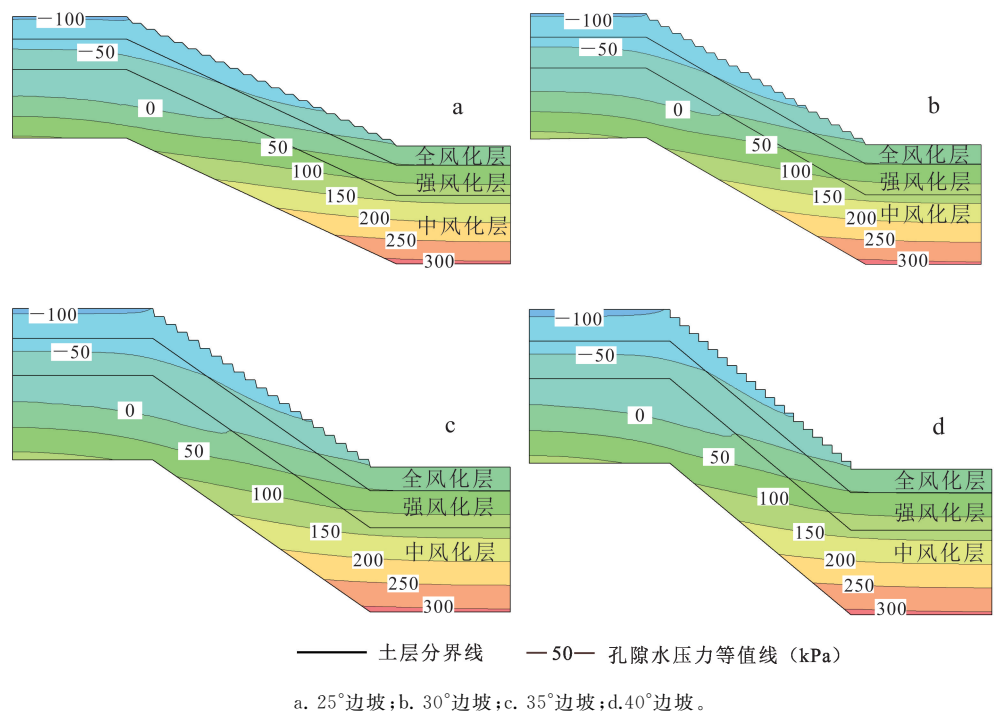


图 5 研究区不同坡度的梯田边坡降雨 5 d 后孔隙水压力分布

Fig.5 Pore water pressure distribution of terraced slopes with different gradient slopes after 5 days of rainfall in the study area

为更加深入地研究孔隙水压力随时间的变化,选取不同坡度梯田坡顶及坡脚处进行监测,结果见图 6。由图 6 可知:对于各不同坡度工况下的梯田边坡,土体在降雨初期未达到饱和状态;随着降雨历时的增加,雨水入渗使坡面潜水位上升,坡顶和坡脚的孔隙水压力都在不断增大。这是由于随着降雨入渗量的增加,边坡表层土体逐渐由非饱和状态向饱和状态转变。对于坡顶而言(图 6a),降雨开始后,

边坡浅土层中的孔隙水压力增加显著,孔隙水压力的变化随坡度的增加变化程度增大。对于坡脚位置(图 6b):40°边坡坡脚出现 0 kPa 孔压的历时为 4.5 d,其他三种工况为 5 d;25°和 30°边坡坡脚处变化幅度一致,坡度越陡的边坡所需的降雨历时越短。分析可知,当降雨持续 4.5 d 时,湿润锋到达坡脚底部,此时,孔隙水压力上升至 0 kPa,甚至产生正孔隙水压力,表明土层底部已经开始存在滞水。

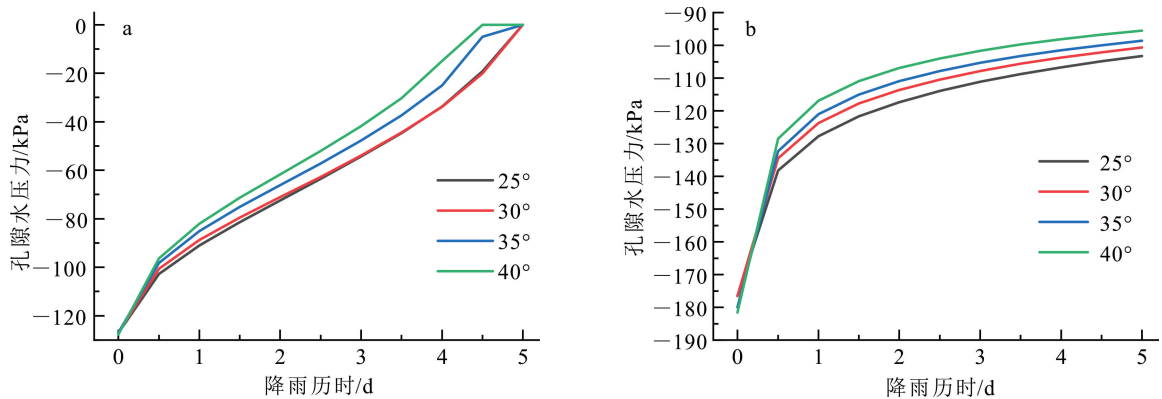


图 6 研究区不同坡度梯田坡顶(a)和坡脚(b)处孔隙水压力变化曲线

Fig.6 Variation curve of pore water pressure at the top (a) and the toe (b) of terraces with different gradient slopes in the study area

非饱和和极限平衡法计算所得不同坡度下梯田的边坡稳定性系数随时间变化的关系曲线图如图 7 所示。由图 7 可以看出:在无降雨条件下,各坡度梯田 $F_s > 1.15$,均处于稳定状态,同一田面宽度和田坎高度梯田边坡的安全稳定性大体上随坡度的增加而减弱,且减幅度逐渐降低。在降雨条件下,随降雨时长的增加,各坡度梯田边坡稳定性系数先维持一个稳定值,后续再不断减小;25°边坡在第 4 天开始减小,30°和 35°边坡在第 3.5 天开始减小,40°梯田边坡在第 3 天开始减小;各坡度梯田稳定性系数减小的幅度不断下降,且 35°和 40°梯田 $F_s < 1.15$,处于失稳状态。这是由于在降雨过程中,随着雨水的不断渗透,边坡土体中含水率增大,土体的渗透能力增强,从而引起土体间的黏聚力降低,故边坡稳定性的特征参数不断降低。

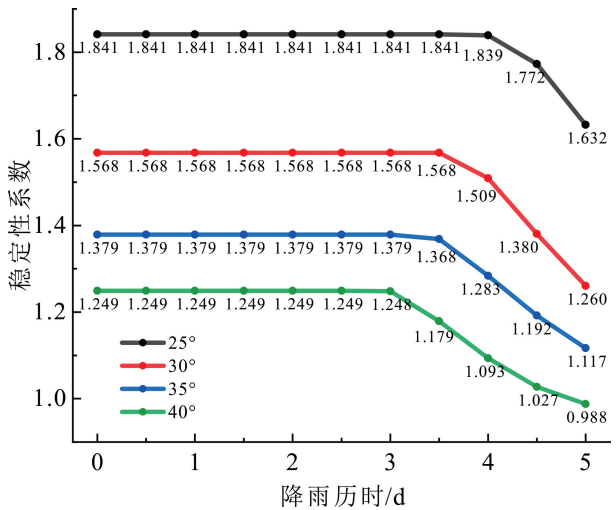


图 7 研究区不同坡度梯田的边坡稳定性系数变化曲线
Fig.7 Variation curve of slope stability coefficient of terraces with different slopes in the study area

可能的原因是:在降雨初期,由于边坡处于非饱和状态,此时的降雨全部渗入土壤,不会在边坡上汇聚形成径流;因此,降雨入渗对边坡稳定性系数的影响在降雨初期主要体现在边坡自重的增加和下滑力的增加。随着降雨的持续,边坡已达到饱和状态,并形成暂态饱和区,此时雨水的入渗变成有压入渗,坡面上会形成径流,雨水不能完全渗入土壤;因此在边坡暂态饱和区的形成过程中,边坡稳定性系数下降最快。

4.2 不同土层厚度对花岗岩梯田的影响

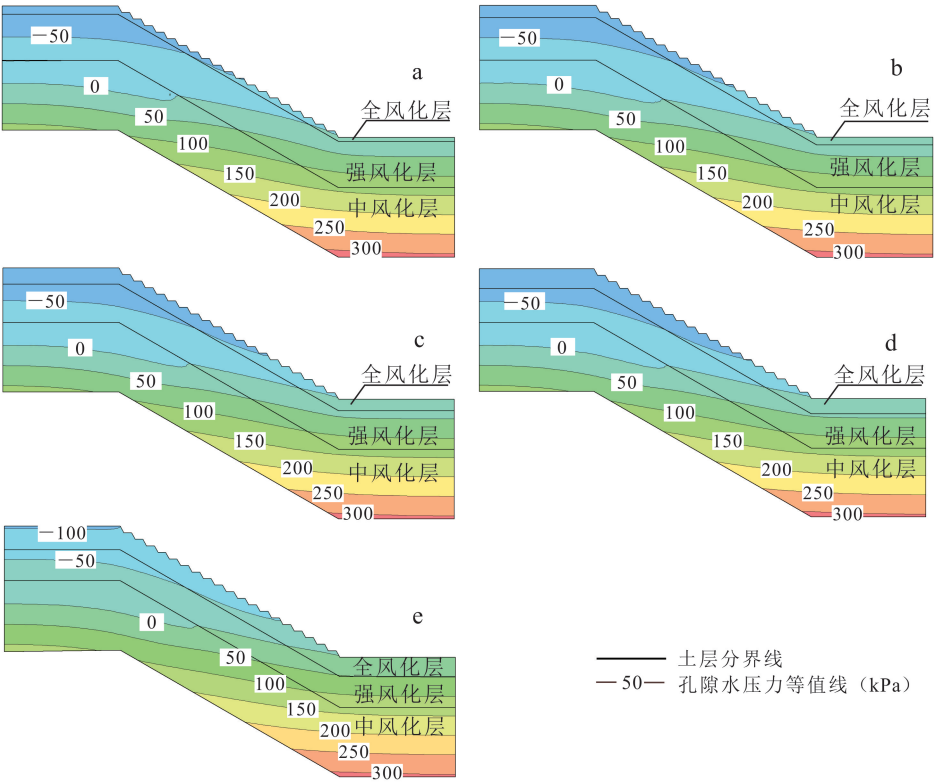
图 8 为不同土层厚度的梯田边坡在降雨历时达

到 5 d 后的孔隙水压力的分布状态,可以发现各工况下的孔隙水压力随深度的变化规律基本一致。在降雨 5 d 后,零孔隙水压力线都到达了坡脚位置;最大正孔隙水压力均大于 300 kPa,分布于土体最底层;最小孔隙水压力都出现在坡顶位置,但不同土层厚度最小孔隙水压力各不相同,全风化土层厚度为 1~4 m 的工况最小孔隙水压力未达到 -100 kPa,全风化土层厚度为 5 m 的工况下最小孔隙水压力超过 -100 kPa。就孔隙水压力分布情况来看,5 种工况下 -50~0 kPa 的孔隙水压力在 5 d 后的分布区域最广,零孔隙水压力线在中风化层和强风化层的过渡处均发生了小幅度不连贯波动情况。

同样地,选取各梯田的坡顶、坡脚处为监测点分析孔隙水压力变化,结果如图 9 所示。由图 9 可见:坡顶的孔隙水压力变化幅度随着全风化土层厚度的增加呈现减小趋势,但减小的幅度逐渐减小。坡脚的孔隙水压力在全风化土层厚度为 1 m 和 2 m 的工况下,出现零孔压的时间为 4 d,3 m 的为 4.5 d,4 m 和 5 m 均在 5 d 出现零孔压;表明随着降雨渗流过程的影响,全风化土层越薄,意味着土体越容易由非饱和状态向饱和状态转化,湿润锋能更快地到达坡脚底部。由图 9 各工况对比可知,坡顶和坡脚处的孔隙水压力随时间变化的抬升幅度与土层厚度负相关;由此可知同等条件下全风化土层越厚,降雨入渗深度越大,湿润锋到达坡脚所需的时间越久,故全风化土层厚度为 5 m 的工况坡顶的孔隙水压力变化幅度会小于其他工况。

非饱和和极限平衡法计算所得不同土层厚度条件下梯田的边坡稳定性系数随时间变化的关系曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出:在无降雨条件下,同一田面宽度和田坎高度梯田边坡的稳定性系数随全风化土层厚度的增加而减少;在降雨发生时,各工况下的稳定性系数均随着降雨历时的增加呈现先不变后减小的趋势,其中全风化土层厚度较薄(1~3 m)的梯田边坡比较厚(4~5 m)边坡的稳定性系数要率先开始减小。

降雨 5 d 后,各土层厚度梯田边坡的稳定性变化如图 11 所示。由图 10 和图 11 可知:梯田的稳定性系数随着全风化层土层厚度的增大而降低;各工况下的梯田边坡稳定性系数在 5 d 后处在 1.260~1.286 区间内,均大于 1.150,相差不大且近似呈线性减小,可视为都处于基本稳定状态。可能的原因是,随着全风化土层厚度的增加,降雨入渗深度增



a. 全风化土层厚度为 1 m;b. 全风化土层厚度为 2 m;c. 全风化土层厚度为 3 m;d. 全风化土层厚度为 4 m;e. 全风化土层厚度为 5 m。

图 8 研究区不同土层厚度梯田边坡降雨 5 d 后孔隙水压力分布

Fig.8 Pore water pressure distribution of terraced slopes with different thickness soil layers after 5 days of rainfall in the study area

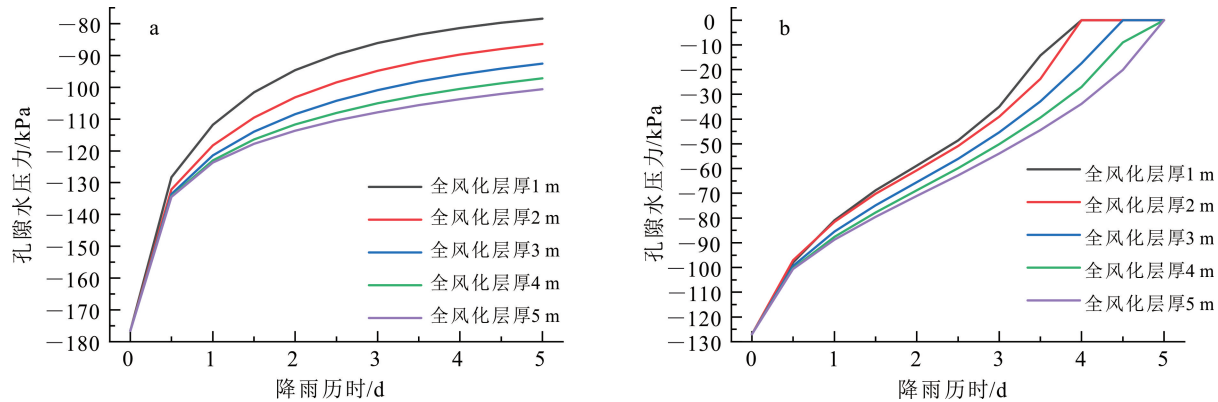


图 9 研究区不同土层厚度梯田坡顶(a)和坡脚(b)处孔隙水压力变化曲线

Fig.9 Variation curve of pore water pressure at the top (a) and the toe (b) of terrace slope with different thickness soil layers in the study area

加,但内部土体的渗透系数较小;经过一段时间的降雨,土体的入渗深度不会相差很大,故各工况的稳定性系数在经过 5 d 降雨后大致相近,且趋于稳定。依此可以推测,在无降雨条件下,对于梯田边坡而言,全风化土层越薄的地方,边坡稳定性会更加稳

固,在持续的降雨过程中,各土层厚度的梯田边坡稳定情况趋于相近。

综合梯田整体坡度在降雨过程中对梯田稳定性的影响,由图 7 和图 10 可以看出,在降雨 5 d 后,不同坡度的梯田边坡稳定性系数在 0.988~1.632 内,

相差较大;不同土层厚度的梯田边坡稳定性系数在处在 1.260~1.286 区间,相差较小。所以可以得出,在相同的降雨强度下,梯田边坡整体坡度对稳定性的影响大于不同土层厚度的影响。

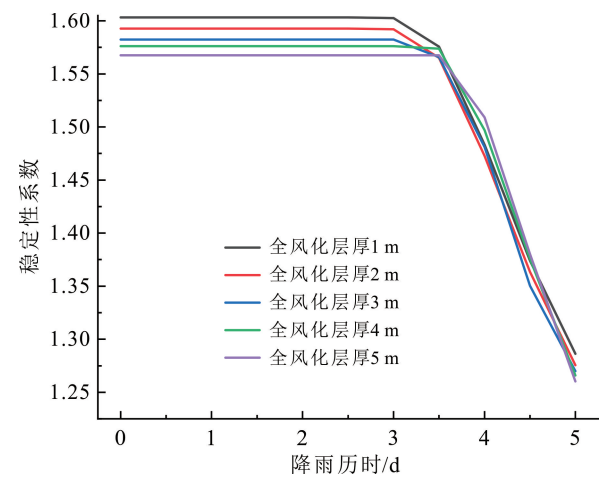


图 10 研究区不同土层厚度梯田的边坡稳定性系数变化曲线

Fig.10 Variation curve of slope stability coefficient of terraces with different thickness soil layers in the study area

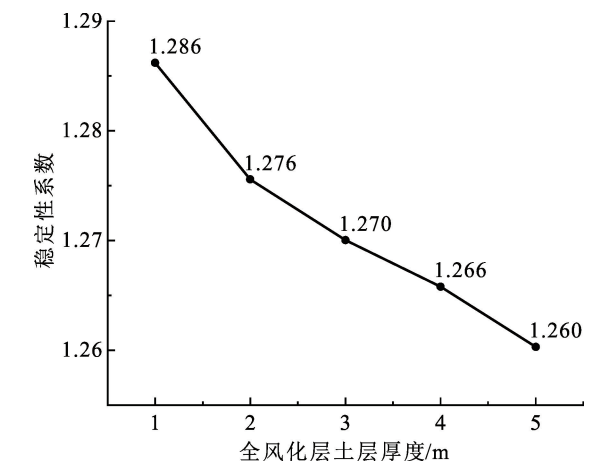


图 11 研究区不同土层厚度降雨 5 d 后梯田的边坡稳定性系数变化曲线

Fig.11 Slope stability coefficient change curve of terraces after 5 days of rainfall with different soil layers in the study area

5 结论与建议

1)紫鹊界梯田的边坡稳定受诸多因素影响,除降雨外,梯田的整体坡度和梯田不同的土层厚度都

对梯田的稳定性产生影响,但在相同的降雨强度下,梯田边坡整体坡度对稳定性的影响大于全风化土层厚度的影响。

2)对于花岗岩区梯田边坡,其安全稳定性随着边坡坡度的增大呈现减小趋势,且 35°和 40°边坡经过强度为 90 mm/d 的降雨 5 d 后,已经变为失稳状态。随着降雨历时的增加,坡脚处的孔隙水压力的变化最为明显,可以合理推测,在经历强降雨时,35°以上的边坡可以认定为欠稳定状态。

3)花岗岩区梯田边坡的稳定性与土层厚度有一定关系,全风化土层越薄,梯田的稳定性越好;但随着降雨入渗过程的持续,土层厚度对边坡稳定性的影响会逐渐降低,最终表现为强降雨对边坡稳定性系数的影响。

4)紫鹊界梯田边坡坡度多分布在 25°~40°之间,其中大部分为 30°左右的边坡,在暴雨发生时,应重点预防 35°~40°边坡失稳情况的发生,做好高坡度边坡的加固处理。全风化土层厚度更薄的边坡会有更好的稳定性。

参考文献 (References):

[1] 潘旭涛.流淌千年的治水智慧[N].人民日报海外版, 2022-06-23(007).
Pan Xutao. Water Control Wisdom Flowing for Thousands of Years [N]. People's Daily Overseas Edition, 2022-06-23(007).

[2] 温永福,高鹏,穆兴民,等.极端降雨作用下陕北梯田边坡稳定性分析[J].水土保持研究,2018,25(4): 365-369.
Wen Yongfu, Gao Peng, Mu Xingmin, et al. Analysis on the Stability of Slope in Northern Shaanxi Under Extreme Rainfall [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(4): 365-369.

[3] 宋宜祥,尹子航,黄达.基于 Green-Ampt 模型的多层结构边坡降雨入渗改进计算方法及稳定性影响研究[J].水文地质工程地质,2022,49(6): 162-170.
Song Yixiang, Yin Zihang, Huang Da. Rainfall Infiltration Process of Multi-Layer Slope Based on Improved Green-Ampt Model Stability Analysis [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 162-170.

[4] 马蓓青,杜玉鹏,王怀星,等.持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验研究[J].水土保持学报,2021,35(5): 50-56.
Ma Beiqing, Du Yupeng, Wang Huaixing, et al.

- Experimental Study on Stability of Loess Slope Stability Under Continuous Rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35 (5): 50 - 56.
- [5] 宋琨, 陈伦怡, 刘艺梁, 等. 降雨诱发深层老滑坡复活变形的动态作用机制[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3665 - 3676.
- Song Kun, Chen Lunyi, Liu Yiliang, et al. Dynamic Mechanism of Rain Infiltration in Deep-Seated Landslide Reactivate Deformation[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3665 - 3676.
- [6] Ma S G, Han T C, Xu R Q, et al. Effects of Intense Rainfall on Stability of Infinite Terraced Slope[J]. Journal of Central South University, 2014, 21 (4): 1534 - 1545.
- [7] 李同录, 李颖喆, 赵丹旗, 等. 对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 25 - 32.
- Li Tonglu, Li Yingzhe, Zhao Danqi, et al. Thoughts on Modes of Loess Slope Failure Triggered by Water Infiltration and the Principals for Stability Analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 25 - 32.
- [8] 王一兆, 隋耀华. 降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(4): 122 - 125.
- Wang Yizhao, Sui Yaohua. Influence of Rainfall Infiltration on Slope Stability at Shallow Layer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34 (4): 122 - 125.
- [9] 程圣东, 杭朋磊, 李鹏, 等. 陕南土石山区坡改梯对坡面稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 157 - 161.
- Cheng Shengdong, Hang Pinglei, Li Peng, et al. Analysis on the Stability of Slope in Northern Shaanxi Under Extreme Rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25 (5): 157 - 161.
- [10] 杨柳, 郝仕龙, 范云鹏. 豫西南土坎水平梯田田坎稳定性分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 282 - 286.
- Yang Liu, Hao Shilong, Fan Yunpeng. Analysis of the Ridge Stability of Level Terrace in Southwest Henan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25 (1): 282 - 286.
- [11] 李耀楠. 降雨入渗条件下边坡的稳定性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- Li Yaonan. Study on Slope Stability Under Rainfall Infiltration [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [12] 马吉倩, 付宏渊, 王桂尧, 等. 降雨条件下成层土质边坡的渗流特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 464 - 471.
- Ma Jiqian, Fu Hongyuan, Wang Guiyao, et al. Seepage Characteristics of Layered Soil Slopes Under Rainfall Conditions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49 (2): 464 - 471.
- [13] 刘艺, 段建南, 周阳, 等. 湖南省紫鹊界景区土地利用功能分区研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(22): 5584 - 5587.
- Liu Yi, Duan Jiannan, Zhou Yang, et al. Research on Functional Division of Land Use of Ziquejie in Hunan Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54 (22): 5584 - 5587.
- [14] 危润初, 张豪, 龙秋波, 等. 湖南紫鹊界梯田自流灌溉系统降水条件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 967 - 978.
- Wei Runchu, Zhang Hao, Long Qiubo, et al. Rainfall Condition of Artesian Irrigation System of Ziquejie Terrace in Hunan Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (3): 967 - 978.
- [15] 徐义军, 李桂元. 紫鹊界原生态自流灌溉系统形成机理初探[J]. 湖南水利水电, 2012, 56(4): 19 - 20.
- Xu Yijun, Li Guiyuan. Preliminary Study on the Formation Mechanism of the Original Ecological Gravity Irrigation System in Ziquejie [J]. Hunan Hydro & Power, 2012, 56 (4): 19 - 20.
- [16] 李桂元, 肖红宇, 刘思妍. 紫鹊界古梯田区域地下水储量及其运移转化规律研究[J]. 湖南水利水电, 2014, 58(5): 31 - 34, 39.
- Li Guiyuan, Xiao Hongyu, Liu Siyan. Study on Groundwater Reserves and Its Migration and Transformation Law in the Ancient Terrace Area of Ziquejie[J]. Hunan Hydro & Power, 2014, 58 (5): 31 - 34, 39.
- [17] 聂芳容. 独具特色的紫鹊界梯田[J]. 中国水土保持, 2013, 34(3): 35 - 36.
- Nie Fangrong. Unique Purple Magpie Terrace [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013, 34 (3): 35 - 36.
- [18] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- Editorial Committee of Engineering Geology Handbook. Engineering Geology Handbook [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2007.
- [19] 陈万雄, 陈玉峰. 基于 GEOSTUDIO 分析吸力对非饱

- 和土边坡稳定的影响[J].山西建筑,2017,43(8):71-73.
- Chen Wanxiong, Chen Yufeng. On Influence of Suction on Stability of Unsaturated Soil Slopes Based on GEOSTUDIO[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43 (8): 71-73.
- [20] 雷怡,帅飞翔,孙红月,等.边坡负压排水非稳定流研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(1):162-170.
- Lei Yi, Shuai Feixiang, Sun Hongyue, et al. Study on Unsteady Flow of Slope Self-Starting Drainage Method[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1):162-170.
- [21] 程彬,卢靖.基于 GeoStudio 的边坡渗流场与应力场耦合分析[J].山西建筑,2010,36(3):146-147.
- Cheng Bin, Lu Jing. Coupling Analysis of Seepage Field and Stress Field of Slope Based on GeoStudio [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36 (3): 146-147.
- [22] 杨柳,万学渊,石艺锦.岩质边坡稳定分析中 Geostudio 软件的应用[J].甘肃水利水电技术,2016,52(2):20-22.
- Yang Liu, Wan Xueyuan, Shi Yijin. Application of Geostudio Software in Rock Slope Stability Analysis [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2016, 52 (2): 20-22.
- [23] 降水量等级:GB/T 28592—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- Grade of Precipitation: GB/T 28592—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [24] 芮勇勤,王振华.降雨入渗下的路堑边坡动态渗流稳定性分析[J].水力发电,2022,48(4):37-43,64.
- Rui Yongqin, Wang Zhenhua. Dynamic Seepage Stability Analysis of Cutting Slope Under Rainfall Infiltration[J]. Water Power, 2022, 48 (4): 37-43, 64.
- [25] Cho E S. Probabilistic Stability Analysis of Rainfall-Induced Landslides Considering Spatial Variability of Permeability[J]. Engineering Geology, 2014, 171: 11-20.
- [26] 詹良通,李鹤,陈云敏,等.东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J].岩土力学,2012,33(3):872-880,886.
- Zhan Liangtong, Li He, Chen Yunmin, et al. Parametric Analyses of Intensity-Duration Curve for Predicting Rainfall-Induced Landslides in Residual Soil Slope in Southeastern Coastal Areas of China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (3): 872-880, 886.
- [27] Tohari A. Study of Rainfall-Induced Landslide: A Review [J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2018, 118 (1): 012036.
- [28] 郑敏洲,晏鄂川,叶龙珍,等.非饱和土土水特征曲线的拟合研究[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(3):144-149.
- Zheng Minzhou, Yan Echuan, Ye Longzhen, et al. Fitting Study on Soil-Water Characteristic Curve of Unsaturated Soil [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29 (3): 144-149.
- [29] Zhang L L, Zheng Y F, Zhang L M, et al. Probabilistic Model Calibration for Soil Slope Under Rainfall: Effects of Measurement Duration and Frequency in Field Monitoring [J]. Géotechnique, 2014, 64(5):365-378.
- [30] Tang Y M, Xue Q, Li Z G, et al. Three Modes of Rainfall Three Modes of Rainfall Infiltration Inducing Loess Landslide[J]. Natural Hazards, 2015, 79 (1): 137-150.
- [31] 石爱红,李国庆,丁德民,等.考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价[J].水文地质工程地质,2022,49(6):141-151.
- Shi Aihong, Li Guoqing, Ding Demin, et al. Deformation Mechanism and Stability Evaluation of Dingjiapo Landslide Considering the Matric Suction of Unsaturated Soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 141-151.
- [32] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. New York: Wiley, 1993: 401-405.