

植被增渗效应对花岗岩残积土浅层滑坡的影响机理研究

陈敬业, 王 钧, 宫清华, 袁少雄, 许安泽, 罗依珍

Influence mechanism of vegetation infiltration effect on shallow landslides of granite residual soil

CHEN Jingye, WANG Jun, GONG Qinghua, YUAN Shaoxiong, XU Anze, and LUO Yizhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改良花岗岩残积土进失水能力及接触角试验研究

Water entrance-and-release capacity and contact angle of improved granite residual soil

汤连生, 刘其鑫, 孙银磊, 许瀚升 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 144-156

非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟

Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil

蔡沛辰, 阙云, 李显 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 54-63

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型

A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression

方然可, 刘艳辉, 苏永超, 黄志全 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 181-187

西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析

An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas

高杨, 贺凯, 李壮, 高浩源, 卫童瑶, 邢爱国, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 14-23

全风化花岗岩地层中高固相离析浆液灌浆机理研究

A study of grouting mechanism of high solid phase segregation grout in fully weathered granite

赵钰, 郑洪, 曹函, 林飞, 王旭斌, 贺茉莉 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 78-88



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205054

陈敬业, 王钧, 宫清华, 等. 植被增渗效应对花岗岩残积土浅层滑坡的影响机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 115-124.

CHEN Jingye, WANG Jun, GONG Qinghua, *et al.* Influence mechanism of vegetation infiltration effect on shallow landslides of granite residual soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 115-124.

植被增渗效应对花岗岩残积土浅层滑坡的影响机理研究

陈敬业^{1,2}, 王 钧², 宫清华², 袁少雄², 许安泽¹, 罗依珍³

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650031;

2. 广东省地理空间信息技术与应用公共实验室/广东省科学院广州地理研究所, 广东 广州 510070;

3. 广东省有色矿山地质灾害防治中心, 广东 广州 510080)

摘要: 华南地区台风暴雨诱发的滑坡往往呈浅层、流态化、群发性等特征, 大量调查发现植被增渗效应对花岗岩残积土滑坡的形成具有显著影响, 但目前研究大多探讨植被根系对土体渗透性的影响, 未能揭示植被增渗效应对浅层滑坡的影响机理。基于此, 以“2019.6.9”广东省龙川县群发性滑坡灾害为例, 通过大量现场勘查, 查明滑坡区域地质环境条件与植被发育情况, 分析植被对浅层滑坡的增渗效应; 采用“双环入渗法”测得不同植被样地的入渗速率, 分析其下渗过程和渗透规律; 选取典型滑坡剖面, 建立地质模型, 运用 Geo-Studio 软件对强降雨条件下浅层滑坡渗流规律和土体应力-应变特征进行模拟; 最后结合模拟结果和现场调查情况, 分析强降雨条件下植被增渗效应对浅层滑坡的影响机理。结果表明: 植被能够有效地增强土壤渗透能力, 渗透能力大小依次为针叶林地、灌木林地、裸土地; 在植被增渗效应影响下, 雨水入渗到根土复合层底部会发生滞水现象, 浅层土体迅速趋于饱和, 土体中孔隙水压力及渗流力瞬时剧增, 土体饱水使得残积土发生软化, 同时边坡自重增加, 最终导致斜坡失稳。研究结果可为华南地区暴雨群发性滑坡的形成机理、预警预报等提供科学依据, 具有重要的意义。

关键词: 花岗岩残积土; 植被根系; 增渗效应; 滑坡灾害; 成灾机理

中图分类号: X43; P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0115-10

Influence mechanism of vegetation infiltration effect on shallow landslides of granite residual soil

CHEN Jingye^{1,2}, WANG Jun², GONG Qinghua², YUAN Shaoxiong², XU Anze¹, LUO Yizhen³

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan

650031, China; 2. Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application/

Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510070, China;

3. Guangdong Nonferrous Mining Geological Disaster and Control Center,

Guangzhou, Guangdong 510080, China)

Abstract: The landslides induced by typhoons and rainstorms in Southern China are often shallow, fluidized and

收稿日期: 2022-05-20; 修订日期: 2022-08-19

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42101084; 42271091; 41977413); 广东省自然科学基金项目(2022A1515011898)

第一作者: 陈敬业(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害方面的研究。E-mail: 1256189263@qq.com

通讯作者: 王钧(1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地质灾害方面的研究。E-mail: wangjun@gdas.ac.cn

clustered. A large number of investigations have shown that vegetation infiltration has a significant impact on the formation of granite residual soil landslides. However, most of the current studies have focused on the effect of vegetation roots on soil infiltration. The influence mechanism of vegetation infiltration enhancement effect on shallow landslides has not been revealed. Therefore, the mass landslide disaster on September 9, 2019 in Longchuan County in Guangdong is taken as an example, and a large number of landslide site investigations are made to identify the geological environment conditions and vegetation development in the landslide area and analyze the infiltration effect of vegetation on shallow landslides. The “double-ring method” is used to measure infiltration rate of different vegetation types, and to analyze the infiltration process and infiltration law of different vegetation types. A typical landslide profile is selected to establish a geological model, and the Geo-Studio software is used to simulate the seepage law of shallow landslide and the stress-strain characteristics of the soil under heavy rainfall conditions (250 mm/d). Finally, combined with the simulation results and field investigations, the infiltration effects of vegetation and their response mechanisms to shallow landslides under heavy rainfall are analyzed. The results show that vegetation can effectively enhance the permeability of soil, and the order of permeability is coniferous forest land, shrub forest land and bare land. Under the influence of vegetation infiltration effect, rainwater infiltration to the bottom of the root-soil composite layer will cause water stagnation, the shallow soil tends to be saturated rapidly, the pore water pressure and seepage force in the soil increase instantaneously, the soil is saturated with water, the residual soil softens, and the weight of the slope increases, which eventually leads to the overall instability of the slope. The research results explain the formation mechanism of granite residual soil landslide in high vegetation covered area under heavy rainfall in Southern China, and provide scientific basis for early warning and prediction of such disasters, which are of great significance.

Keywords: granite residual soil; vegetation root system; infiltration effect; landslide disaster; disaster mechanism

坡体的变形破坏是地质、地貌、降雨、人类活动等内外因素综合作用的结果^[1-4]。华南地区由于极端的台风暴雨天气、巨厚的花岗岩风化壳和脆弱的山地丘陵地貌环境,滑坡往往呈现浅层、流态化、群发性等特征,严重威胁当地居民的生命财产安全。2019年6月9日(简称“2019.6.9”),广东省龙川县发生特大暴雨,境内发生大规模地质灾害。灾害发生后,作者对此次事件中典型的30余处滑坡进行了详细的调查,发现大多数滑坡发生在1~5m深度范围内,属于典型的浅层土质滑坡。植被茂盛是该地区的一个显著特征,高植被覆盖区土体中往往发育团聚体孔隙、根-土间隙、腐烂根系通道等大孔隙结构^[5],这些大孔隙结构使岩土体渗透性能得到提高,雨水更容易渗入坡体内部,对边坡造成不利的影 响,因此该地区滑坡的形成机理不同于一般土质滑坡,具有特殊性。

一般认为根系对土体的加固效应是显著的,植被能够有效地遏制滑坡的发生^[6-8],但统计分析发现强降雨作用下植被发育的斜坡更易发生滑坡^[9-11],这引发了学者对植被与滑坡关系更加深入的思考。大量试验和研究已证实植被能显著地提高土体的渗透

性^[12-14],强降雨过程中植被发育斜坡对雨水入渗的响应比裸土斜坡更为强烈^[15],同时大多数植被根系地下延深的极限为1.5m,根系加固作用范围十分有限^[16]。彭书生等^[17]发现降雨入渗发生在根系区浅层土体中,主要影响边坡浅层稳定性;McDonnell^[18]在新西兰松发育的斜坡上进行监测,发现强降雨雨水直接通过根系大孔隙快速入渗到土-岩分界面并产生滞水;黄月华等^[19]通过数值模拟发现降雨强度到达某一阈值时,植被将不利于边坡的稳定性;此外极端降雨下不同类型植被覆盖对边坡稳定性产生不同影响,狗牙根、四季青等草本植物对边坡稳定的效果为正,而油松、华山松等乔木植物为负^[20-21]。现有研究大多围绕根土之间相互作用产生的力学、渗透性能,描述强降雨下植被发育斜坡雨水入渗规律及其对边坡稳定性的影响,但关于强降雨下植被增渗对浅层滑坡的影响机理还缺少系统深入的研究,造成华南地区对此类浅层滑坡灾害的预警和防治能力不足,防灾减灾措施跟不上现实需求。因此,亟需开展植被增渗效应对华南地区花岗岩残积土浅层滑坡的影响机理研究,以为华南地区暴雨浅层滑坡防灾减灾提供科学依据。

为此,本文以“2019.6.9”广东省龙川县群发性滑坡灾害为例,首先通过对滑坡区详细的现场勘查和调查,查明区域内的地质环境条件与植被发育情况,分析植被的增渗效应;其次选取区域内的典型滑坡剖面,建立滑坡地质模型,运用Geo-Studio软件对强降雨条件下边坡降雨入渗和土体应力-应变特征进行模拟;最后结合数值模拟结果和现场调查情况,深入剖析强降雨条件下植被的增渗效应对浅层滑坡的影响机理。

1 研究区概况

1.1 地形地貌

龙川县位于广东省东北部,东接梅州市五华县、兴宁市,南接东源县,西临和平县,北接江西省定南县、寻乌县,地处赣闽隆起区,总面积约3 089 km²,地理位置如图1所示。研究区山河相间,山间谷地、丘陵盆地、江河冲积地交错分布。山脉海拔由四周向中间递减,西北较高,东南较低;山脊大多由西北向西南,以东江、韩江的流向为走向,少数横亘山脉则为西东走向,构成山地、丘陵、谷地相间分布的格局,最高海拔1 270 m,最低海拔12 m。山地丘陵地区是一个地表过程变化复杂而脆弱的不稳定系统,地形切割强烈,在丘陵区内普遍发育5~20 m厚的风化土层,局部厚达50 m,往往存在一系列威胁居民生命财产安全的自然灾害。本次降雨滑坡事件的受灾区域主要位于该县北部、中部和南部的山地丘陵区。

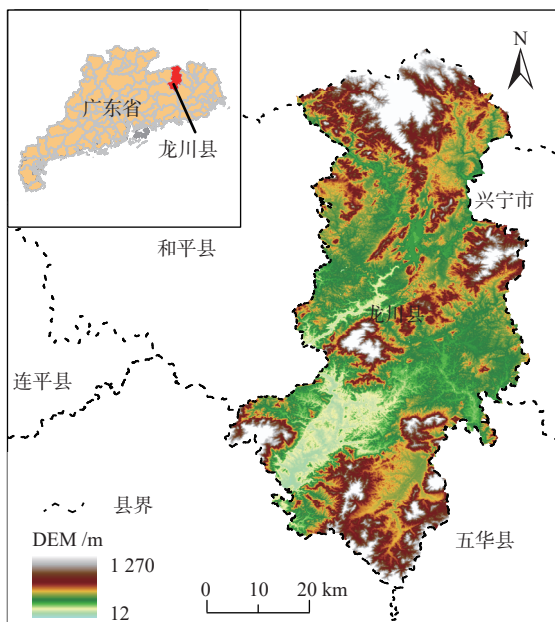


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 地层与岩性

研究区大面积出露中生代酸性侵入岩,主要为黑云母花岗岩和花岗闪长岩,约占总面积的54.33%,除此之外出露的岩类主要为火山碎屑岩类、混合变质岩类、碎屑沉积岩类。调查发现本次滑坡灾害多发生在花岗岩区。华南地区高温多雨,化学风化作用强烈,花岗岩易形成巨厚的风化壳,风化壳内结构面发育,含有大量岩浆侵入冷凝时形成的原生裂隙,加之植被发育,团聚体间孔隙、根土间隙、腐烂根系通道等大孔隙结构发育^[2],为雨水的入渗提供了良好的通道;此外花岗岩残积土遇水极易软化,丧失抗剪强度,在强降雨条件下,花岗岩区易发生滑坡。

1.3 气象

研究区属于亚热带季风气候区,年平均气温18.4~21.5℃;根据1998—2018年气象资料^[22],龙川县年平均降水量为1 611 mm,但年际差异较大,丰水年高达2 554 mm(2016年);此外降雨集中在每年的4—7月,降水量约占全年的52%。此次“2019.6.9”滑坡灾害的日降水量高达171.6 mm,小时最大降水量甚至达到18.8 mm。

1.4 植被

研究区的植被覆盖度高,植被覆盖率达90%以上。植被类型主要以杉木、松木为主,局部为灌木,地表有少量草本植物。

1.5 “2019.6.9”滑坡灾害概况

2019年6月9日,广东省龙川县发生强降雨,诱发龙川县发生大规模群发性浅层滑坡灾害,造成13人死亡,直接经济损失超10亿元。灾后通过对研究区大量的浅层滑坡野外调查发现,近80%以上的浅层滑坡集中分布于植被发育较好的山体上;而植被发育较差的山体很少发生滑坡,在强降雨条件下较好地维持了山体的稳定。从受灾最为严重的米贝村可以清楚地看出,浅层滑坡大多发生在植被茂密、一级支沟两侧的山坡上,有些甚至转化为影响范围更大的泥石流灾害(图2)。可见,极端降雨条件下该地区植被不利于斜坡的稳定,亟需开展植被对浅层滑坡影响机理的研究。

2 研究方法

2.1 双环入渗法

基于浅层滑坡特征及植被类型,选择代表性的原位实验场地。采用双环入渗法测定研究区代表性植被下土壤的入渗性能。本次试验使用的双环入渗仪



图 2 米贝村滑坡灾害无人机影像图

Fig. 2 UAV images of the landslide disaster in Mibei Village

试环规格为高 20 cm, 内外环直径分别为 25 cm 和 50 cm。试验场地位于龙川县米贝村滑坡区, 选择具有代表性的 3 种类型试验样地: 针叶林地、灌木林地、裸土地, 每种类型各设 3 块样地, 所有试验区下覆岩土体性质基本一致, 均为黑云母花岗岩风化土体。

试验具体步骤如下: (1) 将 2 个试环放置于地面同一圆心处, 将试环压入土层 10 cm, 注意压入试环时尽量不扰动土体结构; (2) 通过流量瓶向圆环注水, 当内环和外环中的水柱高度均为 10 cm 时, 开始计时读数; (3) 整个试验过程中的时间序列为: 1 min、2 min、3 min、4 min、5 min、10 min、15 min、20 min、……, 在每个时间间隔内, 观察水面下降情况并记录注水量, 当连续两次观测的注水量之差不大于 10% 时, 试验结束, 取最后一次注水量为计算值。在整个试验过程中必须使内外环的水柱高度保持 10 cm。

2.2 数值模拟

以龙川县米贝村某典型浅层滑坡为研究对象, 通过数值模拟来探讨植被增渗效应对浅层滑坡的影响。滑坡区平面图如图 3 所示。通过详细的地质调查可知, 该典型浅层滑坡的地层结构自上而下可划分为: 砂质黏性土, 由下伏花岗岩风化残积而成, 主要由黏土和石英颗粒组成; 全风化花岗岩, 岩石风化剧烈, 原岩结构尚可辨, 除石英外其他矿物已被风化; 强风化花岗岩, 岩石风化强烈, 原岩结构清晰可见, 主要矿物为石英、长石、云母; 中风化花岗岩, 岩石风化中等, 花斑状、粗粒结构, 块状构造, 主要矿物为石英、长石、黑云母。滑坡的典型剖面图如图 4 所示。

该滑坡地表植被发育, 以杉木、松木为主, 为典型的针叶林地。对滑坡后缘显露的根系长度进行实地测量, 主要根系在 80 ~ 120 cm 范围内, 平均长度为 100 cm (图 5)。在上述调查的基础上, 本文运用 Geo-Studio

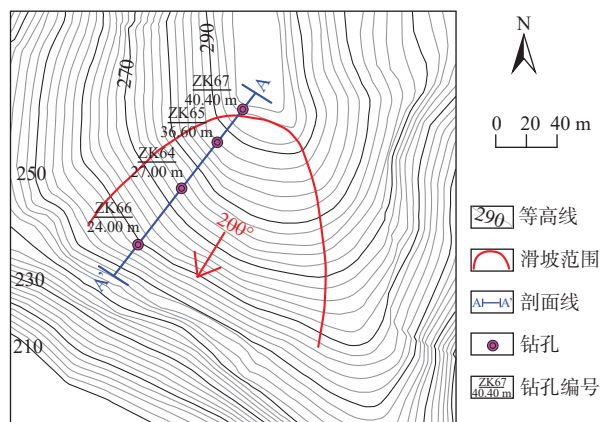


图 3 滑坡区平面图

Fig. 3 Plane maps of the landslide area

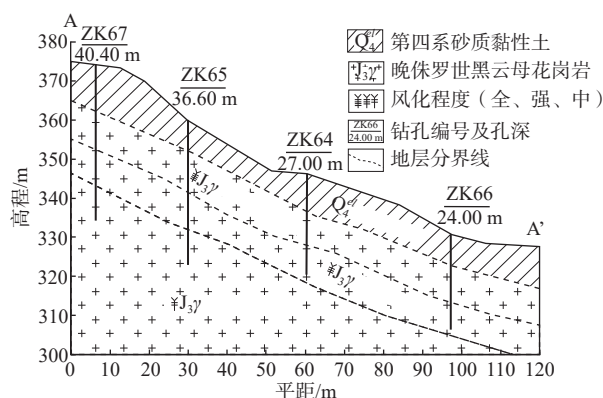


图 4 滑坡区典型地质剖面 A-A' 剖面图

Fig. 4 Typical geology section of the landslide area

软件建立地质模型, 对该典型滑坡在强降雨条件下受植被增渗效应影响的边坡渗流规律和土体应力-应变特征等进行模拟。

2.2.1 模型建立

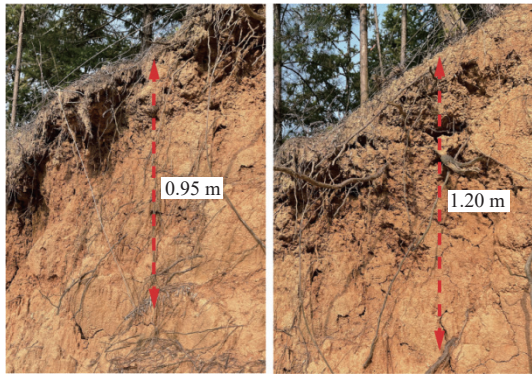
本文概化的滑坡数值分析模型如图 6 所示。将地表深 100 cm 范围内的土体定义为根土复合体, 并简化成均匀的土体材料, 通过增大渗透系数来模拟植被的增渗效应, 通过增大黏聚力来模拟植被的固坡效应^[23]。结合前期研究区勘察与滑坡地质条件, 将模型分为 5 层: 根土复合层、砂质黏土层、全风化花岗岩层、强风化花岗岩层、中风化花岗岩层。

2.2.2 岩土体参数

在双环入渗试验的基础上, 根据《水利水电工程注水试验规程》(SL 345—2007)^[24] 计算根土复合层和砂质黏土层的饱和渗透系数, 取其平均值作为模型参数的最终输入值。同时, 对杉木、松木根系分别调查并进行根系抗拉强度试验, 根据修正的 Wu-Waldron 模型^[25-26] 计算得出根土复合层的附加黏聚力。其余数据均通过原位试验和室内试验测得, 由广东省有色



(a) 浅层滑坡现场调查



(b) 滑坡后缘根系深度调查

图 5 米贝村某处典型浅层滑坡调查

Fig. 5 Field surveys of a typical shallow landslide in Mibei Village

表 1 岩土体相关物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil and rockmass

层序号	岩土体名称	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m·s ⁻¹)	饱和含水率/%	弹性模量/MPa	泊松比
1	根土复合层	19.1/19.6	45.8/25.7	22.3/19.5	3.78×10 ⁻⁴	27.7	22.6	0.31
2	砂质黏土	19.1/19.6	36.4/16.3	22.3/19.5	2.34×10 ⁻⁵	27.7	22.6	0.31
3	全风化花岗岩	19.1/19.6	34.2/18.8	21.8/17.6	6.59×10 ⁻⁶	26.8	26.1	0.29
4	强风化花岗岩	19.8/20.6	43.4/25.6	27.4/21.9	5.50×10 ⁻⁶	25.3	39.4	0.27
5	中风化花岗岩	22.0/22.2	200.0/140.0	35.0/30.0	1.23×10 ⁻⁷	5.0	1 000.0	0.31

注: 19.1/19.6, 斜线左为天然条件下的参数, 斜线右为饱和条件下的参数。

雨水入渗情况, 选取特征点 A—F 进行研究; 最后对渗流计算结果与 SIGMA/W 模块进行耦合分析, 得出各时步应力场的计算结果。

3 结果

3.1 入渗速率

将双环入渗试验得到的不同植被样地的入渗实测数据进行整理并绘制入渗速率曲线(图 8), 可以看出尽管不同植被样地具体的入渗过程存在差异, 但总体趋势一致。初始阶段土体的入渗速率高, 并在很短的时间内迅速降低, 随后入渗速率降低且变化速率变缓, 最终趋于一个稳定值。

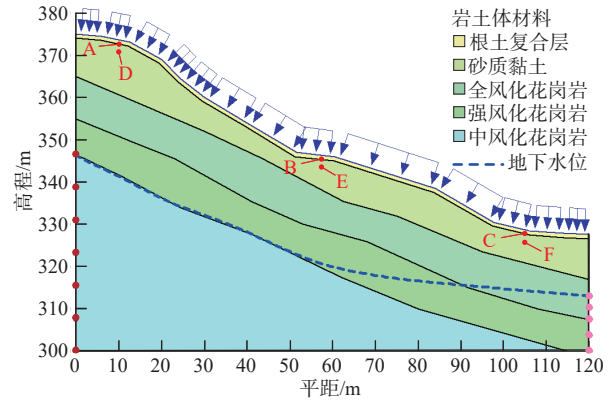


图 6 边坡数值计算模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the numerical calculation model of the slope

矿山地质灾害防治中心提供。具体各土层的基本物理力学参数如表 1 所示。

2.2.3 计算分析方法

本文首先用研究区年平均地下水位线作为两侧常水头边界条件, 采用 SEEP/W 模块的稳态分析确定坡内体积含水率分布, 见图 7; 根据龙川县 6 月 9 日实际降雨情况, 选取特大暴雨(250 mm/d)作为流量边界, 采用 SEEP/W 模块进行持续 12 h 入渗模拟, 得出各时步的渗流场计算结果, 为了方便分析降雨下坡内

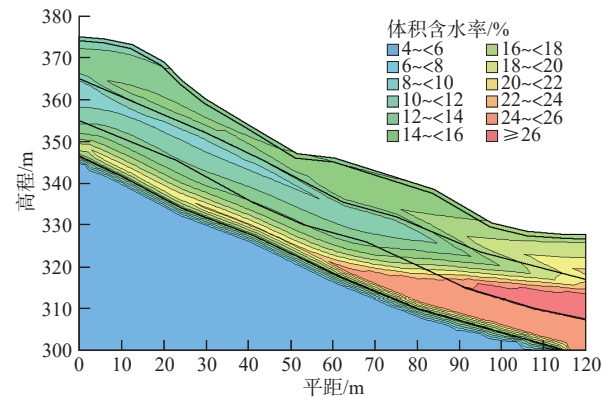


图 7 初始时刻边坡含水率分布

Fig. 7 Distribution of slope moisture content at the initial time

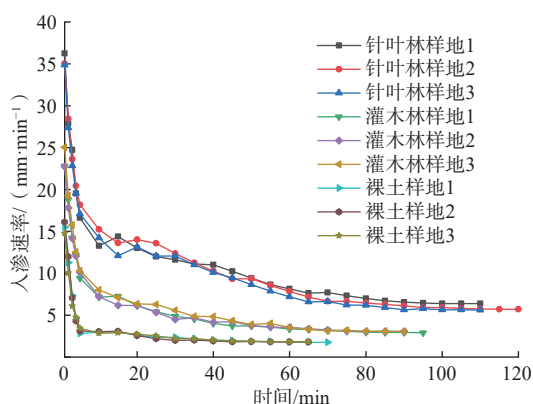


图 8 不同植被样地的土壤入渗过程

Fig. 8 Soil infiltration process of different vegetation plots

本文选取初渗速率与稳渗速率这 2 个指标来分析植物样地土壤渗透性的强弱^[27], 其中, 初渗速率用 1 min 时的入渗速率表示, 稳渗速率为土壤入渗达到稳定阶段时所对应的入渗速率, 结果见表 2。从表 2 可以看出, 针叶林地的初渗速率和稳渗速率均最高, 灌木林地次之, 裸土地最低。

表 2 3 种不同植被样地入渗性能比较

Table 2 Comparison of infiltration performance of three different vegetation plots

样地类型	初渗速率/(mm·min ⁻¹)			稳渗速率/(mm·min ⁻¹)		
	样地1	样地2	样地3	样地1	样地2	样地3
针叶林地	36.24	35.05	34.87	6.38	5.70	5.62
灌木林地	22.82	22.75	25.02	2.91	3.08	3.05
裸土地	15.49	16.13	14.77	1.67	1.81	1.81

3.2 边坡体积含水率特征

将特征点 A—F 随降雨入渗在不同时间下的体积含水率绘制成图, 得到体积含水率随时间的变化关系 (图 9)。可以看出: (1) 随着强降雨的持续, 点 A、B、C 的体积含水率迅速增加。点 A、B、C 初始状态的体积含水率分别为 11.62%、14.18%、16.59%, 降雨 12 h 后的体积含水率分别为 27.66%、27.70%、27.70%, 同初始状态相比, 点 A 含水率增加 16.04%, 点 B 增加 13.52%, 点 C 增加 11.11%, 此时点 A、B、C 几乎都处于饱和状态。(2) 点 D、E、F 的体积含水率增加极其缓慢。点 D、E、F 初始状态的体积含水率分别为 12.12%、14.73%、17.58%, 降雨 12 h 后的体积含水率分别为 15.29%、16.43%、19.76%, 同初始状态相比, 点 D 含水率增加 3.17%、点 E 增加 1.70%、点 F 增加 2.18%, 可见点 D、E、F 受降雨影响较弱。

图 10 为降雨 12 h 后边坡体积含水率分布情况。可以看出, 根土复合层内体积含水率均大于 26%, 表

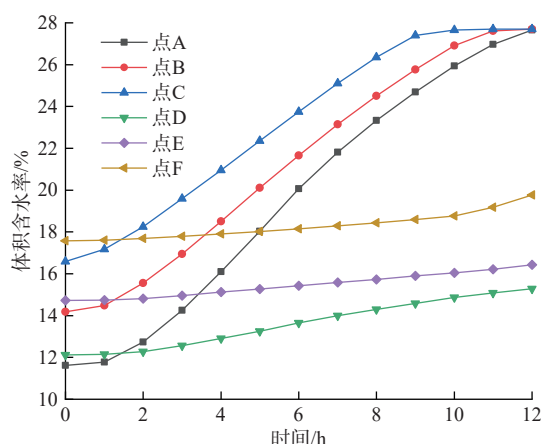


图 9 特征点体积含水率随时间变化图

Fig. 9 Changes of volumetric moisture content at characteristic points with time

层土体几乎饱和, 而砂质黏土层受到降雨入渗影响不强烈, 体积含水率等值线密集, 数值变化范围大。

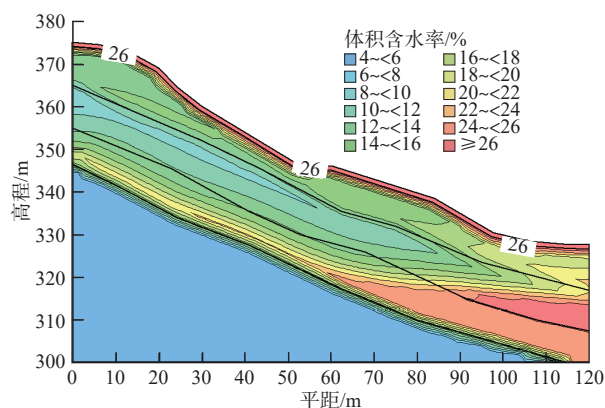


图 10 降雨 12 h 边坡含水率分布图

Fig. 10 Distribution of slope moisture content for 12 hours of rainfall

4 分析与讨论

4.1 增渗效应对降雨入渗的影响

从上文可知, 植被增渗效应对降雨入渗的影响是显著的, 当雨水在下渗过程中抵达砂质黏土层时, 其渗透系数低于上层土体, 导致雨水入渗受到更大阻碍, 下伏黏土层形成相对隔水层, 水分垂向渗入受到抑制, 在土层分界处滞留, 下层土体入渗缓慢, 对降雨入渗响应不强烈, 而上层土体更快地趋于饱和。

结合特征点体积含水率的变化规律, 得出强降雨下受植被增渗效应的影响, 雨水入渗过程中在根土复合层与砂质黏土层间出现滞水现象, 表层土体迅速趋于饱和, 形成暂态饱和区。龙川地区之所以以浅层滑坡为主, 这与降雨入渗的深度密不可分。

4.2 增渗效应诱发滑坡成因分析

4.2.1 孔隙水压力变化

通过对雨水入渗规律分析可知, 植被增渗效应对边坡影响强烈的区域主要位于坡体表层。为了分析雨水入渗对坡内孔隙水压力的影响, 选取图中分别位于坡顶、坡中、坡脚的点 A、B、C, 它们都位于根土复合层与砂质黏土层之间, 具有代表性。将各点随降雨入渗在不同时间的孔隙水压力绘制成图, 得到孔隙水压力随时间变化的关系(图 11)。随着强降雨持续进行, 点 A、B、C 的孔隙水压力均持续升高。降雨 12 h 后, 点 A 孔隙水压力接近于 0, 点 B 和点 C 甚至出现了正孔隙水压力, 根据有效应力原理, 土体的有效应力减小。雨水入渗使土中应力发生变化, 边坡向临空面发生变形, 在坡体的中、后部产生拉张裂隙, 当裂隙中充满水则会产生极大静水压力, 促使滑坡启动。

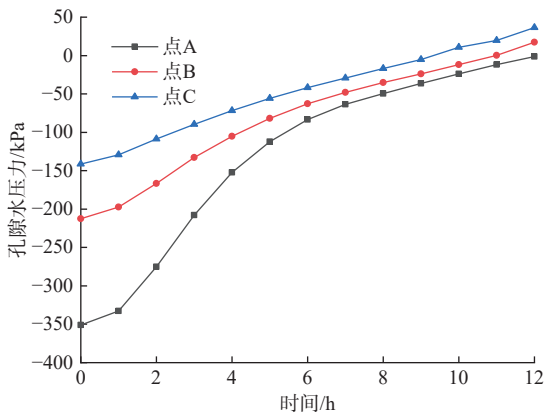


图 11 孔隙水压力随时间的变化图
Fig. 11 Variation of pore water pressure with time

4.2.2 总水头变化

图 12 为降雨 12 h 后边坡内总水头分布情况。可以看出, 图中根土复合层内总水头等值线与边坡坡面线垂直, 单位流量的矢量线与岩层倾向一致, 说明在该区域内出现了沿边坡表层的顺层渗流, 雨水在表层土体是以侧向渗流为主。一方面水流在土体内部产生渗流力(j), 单位土体内土粒上受到的渗流力为 $j = \gamma_w i$, 其中 γ_w 为水的容重, i 为水力坡降, γ_w 是定值, 因此 j 只与 i 有关; 研究区内边坡的坡度大多数为 $45^\circ \sim 55^\circ$, 水力坡降较大, 故对整体稳定性影响较大。另一方面龙川地区砾质花岗岩残积土级配较差, 土体细颗粒容易被渗流带走, 形成局部变形破坏, 不利于边坡稳定。

4.2.3 抗剪强度变化

土体的抗剪强度能够很好地反映边坡抵抗变形

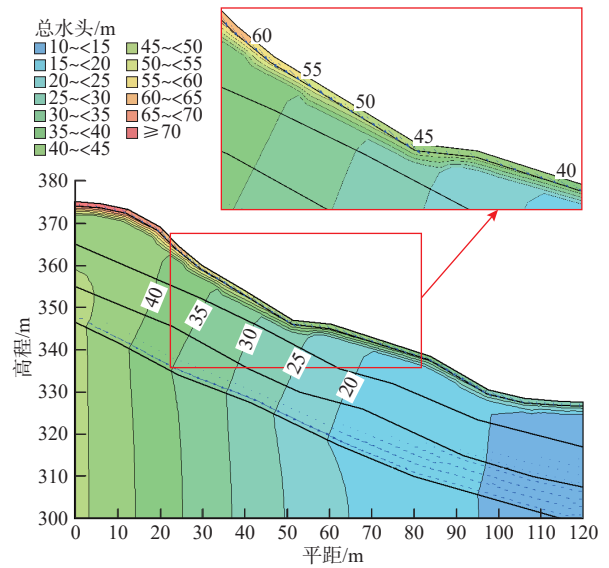


图 12 降雨 12 h 边坡总水头分布与顺层渗流图

Fig. 12 Total water head distribution and bedding seepage of slope in 12 hours of rainfall

破坏的能力, 图 13 反映降雨前和降雨 12 h 后边坡内部土体抗剪强度情况。天然状态下相对干燥的砂质

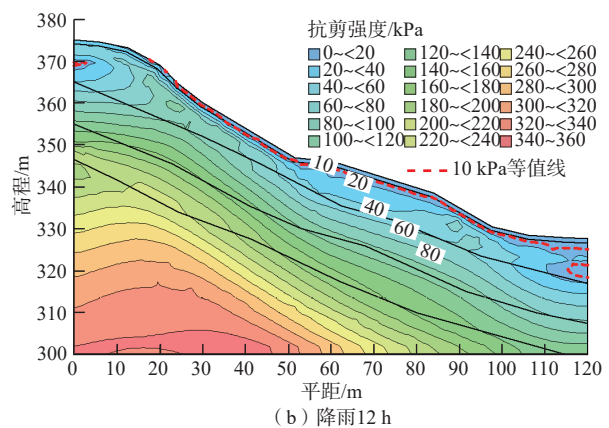
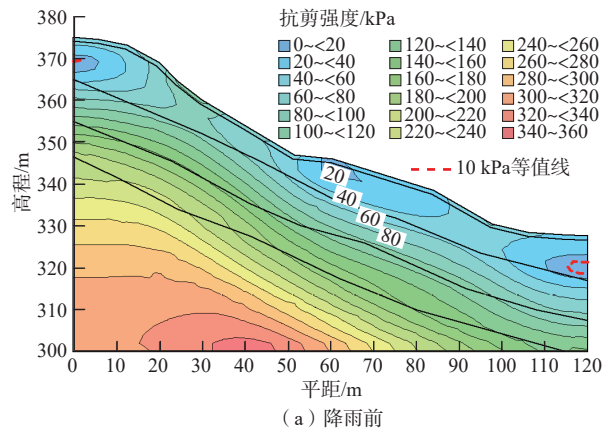


图 13 不同时刻边坡最大抗剪强度等值线图

Fig. 13 Contour map of the maximum shear strength of slope at different times

黏性土具有较好的力学性能,其黏聚力与内摩擦角均较高,此外植被根系对边坡具有力学加固作用,此时边坡的稳定性系数为1.43,处于稳定状态,数值模拟结果显示只有坡顶和坡脚小部分范围土体抗剪强度小于10 kPa。降雨12 h后,受植被增渗效应的影响,浅表层土体几乎饱和,土体的基质吸力几乎为0;此外花岗岩残积土具有遇水软化的特性,即随着含水率的增加,其黏聚力迅速丧失,内摩擦角锐减。根据Fredlund抗剪强度理论,非饱和土的抗剪强度与黏聚力、内摩擦角、基质吸力这3个因素正相关^[28],因此表层土体宏观上表现为其抗剪能力急剧下降;在等值线图表现为除了坡顶少数区域外,根土复合层内土体的抗剪强度均小于10 kPa,此时边坡的稳定性系数为0.86,处于极不稳定状态。同时降雨12 h后边坡的潜在滑移面位置明显上移,位于根土复合层与砂质黏土层交界面的下方附近(图14),表现为浅层滑坡。可见在强降雨工况下,植被增渗效应是导致表层土体抗剪能力迅速衰减的重要因素。

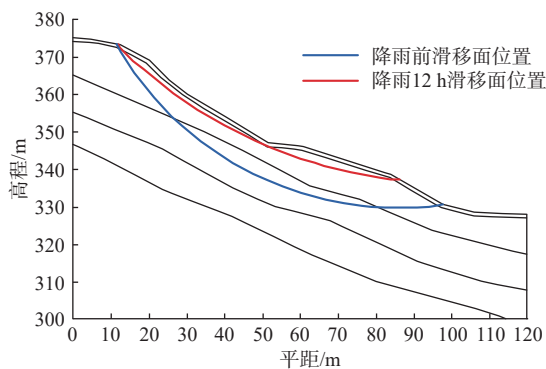


图14 边坡潜在滑移面位置图

Fig. 14 Position of the slope dangerous slip surface

4.3 讨论

从模拟计算结果来看,极端降雨天气下,山体受到植被增渗效应的影响,根土复合层迅速趋于饱和状态,不仅使得坡体重度增大,土体抗剪强度也大大降低,同时斜坡受到渗流及静水压力影响,最终使斜坡发生浅层滑动。降雨诱发滑坡的本质是渗入坡内的雨水与岩土体之间发生了一系列作用,强度再高的降雨只要不渗入坡内,几乎不会对斜坡稳定性构成威胁^[29]。高植被覆盖区地表有机质丰富,表土层易形成大孔隙结构的团聚体;此外根系在生长过程中挤压临近土体,不断交替地吸收和吐出水,周围土体发生干湿循环、硬化软化循环,在根土之间形成间隙,当植被根系腐烂后易形成大孔隙^[30-32]。这些大孔隙结构

为雨水的入渗提供了良好的通道,表现在增加土体的渗透性能,雨水迅速入渗使得边坡应力环境急剧恶化从而诱发滑坡灾害。可见植被的增渗效应在降雨诱发滑坡,尤其是极端降雨下,起到了至关重要的作用。因此,在研究华南地区强降雨诱发群发性浅层滑坡的机理时,必须要考虑华南高覆盖植被对滑坡形成过程的影响,否则会造成很大的误差,不利于滑坡的预警与防治。

本文通过Geo-Studio模拟发现降雨入渗影响的区域主要为根土复合层,下层土体对降雨入渗响应并不强烈。但龙川县调查的30余处滑坡大多发生在1~5 m深度范围内,明显大于根土复合层的厚度,产生这一矛盾的主要原因是花岗岩风化壳存在着深入岩体内部的原生节理、裂隙,现实中雨水顺着这些便捷的通道入渗到下层土体更深的位置,而本次模拟未能体现这些节理的影响。此外本文并未探讨不同植被覆盖类型与不同降雨强度下植被增渗效应对边坡失稳的影响,有待于进一步研究。

5 结论与建议

(1) 滑坡区高植被覆盖是“2019.6.9”龙川县群发性滑坡灾害事件的一个显著特征。通过双环入渗试验发现,滑坡区针叶林地土体的渗透性能明显优于灌木林地和裸土地。强降雨下,植被高覆盖区将获得更大的地下水补给,这将不利于斜坡的稳定性。

(2) 数值模拟结果显示强降雨下植物的增渗效应使得边坡浅层土体迅速饱和,形成暂态饱和区。暂态饱和区内土体重度增加使边坡下滑力增大,体积含水率的增大使土体发生软化;基质吸力的丧失和正孔隙水压力使土体抗剪强度急剧降低;饱和区内易产生渗流力与静水压力,这些是诱发滑坡的主要因素。同时植被根系影响着降雨入渗的范围,这是研究区多为浅层滑坡的重要原因。

受植被增渗效应影响,强降雨导致边坡浅层形成暂态饱和区是诱发浅层滑坡的重要因素。因此对于高植被覆盖区滑坡的防治,重点工作在于排水。如根据地形条件在坡面上修建截水沟和排水沟,可以有效减少降雨入渗。

参考文献 (References):

- [1] 谭银龙,许万忠,曹家菊,等.基于Midas-GTS的三峡库区金鸡岭滑坡成因机制与稳定性分析[J].水文地质工程地质,2023,50(1):113-121. [TAN Yinlong,

- XU Wanzhong, CAO Jiaju, et al. Mechanisms and stability analysis of the Jinjiling landslide in the Three Gorges Reservoir area based on Midas-GTS[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 113 - 121. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张勇, 温智, 程英建. 四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 178 - 182. [ZHANG Yong, WEN Zhi, CHENG Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 178 - 182. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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 Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, 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 with English abstract)]
- [4] 邹凤钗, 冷洋洋, 陶一郎, 等. 基于斜坡单元的滑坡风险识别——以贵州万山浅层土质斜坡为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 114 - 122. [ZOU Fengchai, LENG Yangyang, TAO Xiaolang, et al. Landslide hazard identification based on slope unit: A case study of shallow soil slope in Wanshan, Guizhou Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 114 - 122. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张家明, 徐则民, 裴银鸽. 植被发育斜坡非饱和带大孔隙[J]. *山地学报*, 2012, 30(4): 439 - 449. [ZHANG Jiaming, XU Zemin, PEI Yinge. Macropores in vadose zone of well vegetated slopes[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(4): 439 - 449. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(11): 2220 - 2225. [QI Guoqing, HU Liwen. Study on mechanism and application of slope protection with vegetation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(11): 2220 - 2225. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 肖本林, 罗寿龙, 陈军, 等. 根系生态护坡的有限元分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(6): 1881 - 1885. [XIAO Benlin, LUO Shoulong, CHEN Jun, et al. Finite element analysis of eco-protection slope through roots[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(6): 1881 - 1885. (in Chinese with English abstract)]
- [8] GRAY D H, OHASHI H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(3): 335 - 353.
- [9] 许增旺. 香港大屿山岛自然滑坡的空间分布与影响因素浅析[J]. *自然灾害学报*, 2001, 10(4): 76 - 83. [XU Zengwang. Analysis of spatial distribution and contribution factors of natural landslides in Lantau Island of Hong Kong[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2001, 10(4): 76 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [10] CARDINALI M, GALLI M, GUZZETTI F, et al. Rainfall induced landslides in December 2004 in south-western Umbria, central Italy: Types, extent, damage and risk assessment[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2006, 6(2): 237 - 260.
- [11] CHIGIRA M. Micro-sheeting of granite and its relationship with landsliding specifically after the heavy rainstorm in June 1999, Hiroshima Prefecture, Japan[J]. *Engineering Geology*, 2001, 59(3/4): 219 - 231.
- [12] 徐宗恒, 徐则民, 李凌旭. 植被发育斜坡非饱和带土体优先域及其对水分入渗的贡献——以云南省呈贡和昭通玄武岩质斜坡为例[J]. *地理科学*, 2017, 37(5): 783 - 791. [XU Zongheng, XU Zemin, LI Lingxu. Preferential domain types of basalt slope unsaturated zone soil and the contribution to water infiltration: A case study of basalt slope in Chenggong and Zhaotong of Yunnan Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(5): 783 - 791. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王志良, 年玉泽, 申林方, 等. 植被发育斜坡土体大孔隙三维重构模型渗流场的LBM数值模拟[J]. *岩土力学*, 2018, 39(10): 3821 - 3829. [WANG Zhiliang, NIAN Yuze, SHEN Linfang, et al. Numerical simulation of macropores seepage field in the 3D reconstruction model of well vegetated slope soil based on LBM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(10): 3821 - 3829. (in Chinese with English abstract)]
- [14] ZHAN T L, NG C W, FREDLUND D G. Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(4): 392 - 408.
- [15] 徐则民, 黄润秋. 山区流域高盖度斜坡对极端降雨事件的地下水响应[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(6): 598 - 607. [XU Zemin, HUANG Runqiu. The response of the groundwater in vegetated slopes in mountainous catchments to heavy rain events[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6): 598 - 607. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 438 - 450. [XU Zemin, HUANG Runqiu,

- TANG Zhengguang, et al. Limitations of biotechnical slope protection and contribution of vegetation to deep seated landslide preparation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 438 - 450. (in Chinese with English abstract)
- [17] 彭书生, 王永波, 盛谦, 等. 植被增加边坡降雨入渗对边坡稳定性影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(增刊1): 1274 - 1278. [PENG Shusheng, WANG Yongbo, SHENG Qian, et al. Study on enhancement of precipitation infiltration by vegetation and its effect on slope stability[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(Sup 1): 1274 - 1278. (in Chinese with English abstract)]
- [18] MCDONNELL J J. The influence of macropores on debris flow initiation[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1990, 23(4): 325 - 331.
- [19] 黄月华, 周成, 李红梅. 降雨中有植被覆盖土坡大孔隙结构对边坡稳定性的影响[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(3): 132 - 137. [HUANG Yuehua, ZHOU Cheng, LI Hongmei. Combined effects of trees and macropores on slope stability subjected to rainfall[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(3): 132 - 137. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 宋享桦, 谭勇, 张生杰. 暴雨气候下砂土边坡植被护坡模型试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(5): 123 - 133. [SONG Xianghua, TAN Yong, ZHANG Shengjie. Investigation on effects of vegetations on stability of sandy slope by indoor rainfall model test[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(5): 123 - 133. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 李牧阳, 王云琦, 王玉杰, 等. 甘肃天水浅表层滑坡易发区滑坡分布与植被根系特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 101 - 109. [LI Muyang, WANG Yunqi, WANG Yujie, et al. Landslide distribution and vegetation root characteristics in shallow landslide-prone area of Tianshui, Gansu[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 101 - 109. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 祝小辉. 广东省龙川县地质灾害特征及影响因素分析[J]. *西部资源*, 2021(2): 106 - 108. [ZHU Xiaohui. Analysis on the characteristics and influencing factors of geological disasters in Longchuan County, Guangdong Province[J]. *Western Resources*, 2021(2): 106 - 108. (in Chinese with English abstract)]
- [23] WU T H. Root reinforcement of soil: Review of analytical models, test results, and applications to design[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(3): 259 - 274.
- [24] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程注水试验规程: SL 345—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of water injection test for water resources and hydropower engineering: SL 345—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [25] WU T H, MCKINNELL W P, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19 - 33.
- [26] 朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 等. 基于植物生长过程的根系固土机制及Wu模型参数优化[J]. *林业科学*, 2018, 54(4): 49 - 57. [ZHU Jinqi, WANG Yunqi, WANG Yujie, et al. Analyses on root reinforcement mechanism based on plant growth process and parameters optimization of Wu model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(4): 49 - 57. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. *生态学报*, 2011, 31(8): 2331 - 2340. [LIU Jie, LI Xianwei, JI Zhonghua, et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2331 - 2340. (in Chinese with English abstract)]
- [28] FREDLUND D G, XING Anqing. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521 - 532.
- [29] 徐则民. 植被与斜坡非饱和带大空隙[J]. *地学前缘*, 2007, 14(6): 134 - 142. [XU Zemin. Vegetation and macropores in vadose zones of hill slopes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 134 - 142. (in Chinese with English abstract)]
- [30] VINTHER F P, EILAND F, LIND A M, et al. Microbial biomass and numbers of denitrifiers related to macropore channels in agricultural and forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(4): 603 - 611.
- [31] PASSIOURA J B. 'Soil conditions and plant growth'[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(2): 311 - 318.
- [32] PETH S, HORN R, BECKMANN F, et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 897 - 907.

编辑: 汪美华
刘真真