

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.036

韩杰欣, 邓芷慧, 王旌靡, 等. 干湿交替条件下花岗岩崩岗区土壤裂隙发育规律[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 262-271.

HAN Jiexin, DENG Zhihui, WANG Jingmi, et al. Development of soil cracks in granite Benggang area under wetting-drying cycles [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 262-271.

干湿交替条件下花岗岩崩岗区土壤裂隙发育规律

韩杰欣¹, 邓芷慧¹, 王旌靡¹, 邓羽松², 黄智刚¹, 段晓倩¹

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 广西大学林学院, 南宁 530004)

摘要: [目的] 土体裂隙可以改变土壤结构, 降低土体稳定性, 进而加速崩岗发育。深入探究干湿交替条件下花岗岩崩岗区裂隙发育规律, 具有重要的现实意义。[方法] 以花岗岩坡面土壤的 7 个样点为研究对象, 分别为坡上红土层(US)、坡中红土层(MS)、坡下红土层(DS)、崩壁红土层(RL)、崩壁过渡层(TL)、崩壁砂土层 1(SL1)和崩壁砂土层 2(SL2), 进行干湿循环试验, 结合数字图像处理技术对土体表面裂隙进行定量分析。[结果] (1) 花岗岩崩岗区土体 R_{sc} 、 N_a 和土体破碎化程度随含水量的降低而增加, 7 个样点的 R_{sc} 、 N_a 、 W_a 、 L_a 均随干湿交替次数增加而逐渐降低; (2) 集水坡面坡上、坡中红土层及崩壁砂土层裂隙连通度与砂粒呈显著正相关; 各样点 R_{sc} 与饱和水含量、有机质、阳离子交换量、游离氧化铁呈显著正相关, 黏粒/砂粒高的样点 R_{sc} 与黏粒/砂粒呈显著正相关。[结论] 花岗岩崩岗区土壤不同土层之间的干缩裂隙发育存在差异, 但发育规律基本为发育准备期、快速发育期、发育稳定期 3 个阶段; 花岗岩土壤坡上红土层裂隙主要为干缩裂隙, 坡下红土层干缩裂隙较少。

关键词: 崩岗侵蚀; 花岗岩红壤; 干湿交替; 裂隙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0262-10

Development of Soil Cracks in Granite Benggang Area Under Wetting-drying Cycles

HAN Jiexin¹, DENG Zhihui¹, WANG Jingmi¹, DENG Yusong², HUANG Zhigang¹, DUAN Xiaoqian¹

(1. Agricultural College of Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Forestry College of Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: [Objective] Soil cracks can change soil structure, reduce soil stability, and then accelerate the development of hill collapse. It is of great practical significance to study deeply the fracture development law of granite Benggang area under wetting-drying cycles. [Methods] 7 samples of granite slope soil were taken as the research objects, including the upper part of the slope (US), the middle part of the slope (MS), the lower part of the slope (DS), the red soil layer of wall collapse (RL), the transition layer of wall collapse (TL), the sand layer1 of wall collapse (SL1) and the sand layer2 of wall collapse (SL2). The wetting-drying cycles experiments were carried out with these samples. Combined with digital image processing technology, the soil surface cracks are quantitatively analyzed. [Results] (1) Soil R_{sc} , N_a and soil fragmentation degree in granite Benggang area increase with the decrease of water content, the R_{sc} , N_a , W_a and L_a of 7 sample points show a gradual decrease with the increase of dry and wet alternating times. (2) The connectivity of cracks in the red soil layer in the upper part of the slope, the middle part of the slope and the sand layer of the wall collapse are significantly positively correlated with the sand content. The R_{sc} at each sampling point is significantly positively correlated with saturated water content, organic matter content, cation exchange capacity, and free iron oxide content. Sampling points with high clay/sand content show a significant positive correlation with clay/sand content. [Conclusion] There are differences in the development of dry shrinkage

收稿日期: 2024-06-02

修回日期: 2024-07-06

录用日期: 2024-07-22

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-19

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42107350); 中央引导地方科技发展资金项目 (桂科 ZY21195022)

第一作者: 韩杰欣 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: hjx220609@163.com

通信作者: 段晓倩 (1992—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤物理、土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: duanxq2020@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

cracks in different layers of soil of granite Benggang area, but the development rules are basically three stages: preparation stage, rapid development stage and stable development stage. The cracks of red soil layer on the upper part of the slope of granite soil are mainly shrinkage cracks, and the shrinkage cracks of red soil layer in the lower part of the slope are less.

Keywords: Benggang erosion; granitic red soil; wetting-drying cycles; fissure

Received: 2024-06-02

Revised: 2024-07-06

Accepted: 2024-07-22

Online(www.cnki.net): 2024-09-19

崩岗作为一种特殊的土壤侵蚀地貌,是在重力破坏崩塌和水力冲刷的综合作用下,山坡土体或岩体风化壳分离、崩塌、堆积的侵蚀现象^[1],也是华南花岗岩红壤区侵蚀最为严重、危害最大的一种典型土壤侵蚀方式^[2],预防和治理崩岗侵蚀至关重要,探究崩岗形成机理具有重大意义。

华南花岗岩崩岗区土壤以红壤为主,亚热带高温多雨的气候条件导致该区风化作用十分剧烈^[3]。由于花岗岩红壤具有液限高、孔隙比大、水稳定性差^[4]的特性,其在经历降雨、蒸发和温度变化时发生反复胀缩^[5],导致岩体内各种裂隙、节理和大孔隙等发育程度更高,即原生裂隙扩展、次生裂隙产生,形成更为复杂的裂隙网^[6]。在对花岗岩崩岗裂隙研究中,普遍认为崩岗坡面原生裂隙和次生裂隙均有发育,其中次生裂隙主要是在降雨-入渗-蒸发过程中受干湿循环作用形成的干缩裂隙^[7]。裂隙的存在改变水文流动路径,削弱土壤保水能力,加速水分入渗,从而影响土体自重和土壤抗剪强度;裂隙的发育破坏土壤的结构和完整性,使土壤各方向受力不均,降低土体凝聚力,进而造成土体稳定性降低,加剧崩岗侵蚀的发育过程^[8-9]。因此,探明干缩裂隙对崩岗发育的影响具有重要意义。

干缩裂隙的演化受土壤机械组成等性质的影响,土壤黏粒可改变膨胀土的收缩特性与团聚体稳定性,进而影响土壤干燥开裂,土壤黏粒含量越高,干缩裂隙发育倾向也越高^[10]。目前,有部分学者已开展干缩裂隙的相关研究,ALBRECHT等^[11]进行干湿循环试验并在干燥过程中进行导水率测试表明,干缩裂隙的演化受到土壤含水率性质变化的影响;ZHU等^[12]对红黏土进行干燥试验表明,初始含水率越高,压实试样干密度越低,裂隙愈合速度越快;也有学者^[13-14]采用分布式光纤感测技术对边坡干缩裂隙现场监测,通过建立土体裂隙模型明确干缩裂隙产生的土体特点;设计红土干燥试验、模拟降雨-蒸发条件的裂隙演化试验,并获得土样干缩开裂、湿化愈合的动态演化过程等^[15-16]。已有研究^[17-18]探明干缩裂隙的形成原因、发育形态特点及裂隙对于土壤结构的影响机制等,但都集中于关注均质土体或单一土层,而花岗岩残积土具有各向异性和非均质性,其不同土

层、不同坡位土壤颗粒组成、孔隙结构、持水能力和土壤力学性质的空间分异,有可能对干缩裂隙产生影响,进而影响崩岗侵蚀,然而目前对于花岗岩崩岗区干缩裂隙受不同土层、不同坡位异质性的综合影响及其与崩岗侵蚀的关系还尚不明确。因此,探究花岗岩红壤土体裂隙在干湿循环条件下的发育规律、分析土壤异质性对干缩裂隙的影响有助于探明崩岗的形成因素,为崩岗侵蚀的防治提供理论依据。本研究以花岗岩崩岗区坡面土壤为研究对象,进行干湿交替试验,旨在:(1)探究花岗岩崩岗区坡面土壤裂隙发育与含水率的关系;(2)干湿交替条件下花岗岩崩岗区坡面土壤裂隙发育规律;(3)分析其他理化因素对土壤裂隙发育的影响,以期揭示花岗岩土壤裂隙的发育过程和影响因素提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本试验所用土样采集自广西壮族自治区梧州市龙圩区(原苍梧县)(22°58'10"—23°27'24"N,110°06'42"—111°22'52"E),地处广西东南部,北回归线横跨该区北部。该地区属亚热带季风气候区,气候温热,雨量充沛,光照充足,无霜期长,年平均气温 21.4℃,年日照时间 2 004.7 h,夏季日照时间长,气温高,降雨集中,局部有洪涝;冬季日照时间短,天气干暖。受西南暖湿气流和北方变性冷气团的交替影响,干旱、大风、雷暴、暴雨洪涝、热带气旋、低温阴雨等气象灾害时有发生。梧州市龙圩区以低山丘陵为主,平原较少,海拔约为 18~474 m,总体地势南高北低,常年高温多雨,水热条件良好,主要土壤类型为红壤,残积红土发育旺盛;花岗岩风化壳厚,最深可超过 50 m,崩岗侵蚀较快,是广西崩岗发育的集中区。2005 年调查数据显示,该区域有面积>60 m²的崩岗 1 592 个,总面积高达 378.13 hm²^[19]。样地植被覆盖类型以马尾松(*Pinus massoniana*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、欆木(*Loropetalum chinensis*)、箬竹(*Indocalamus tessellatus*)和铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等为主。

1.2 样品采集与测定

完整的崩岗由集水坡面、崩壁、崩积堆、沟道和洪积扇 5 个单元组成,本研究根据崩岗不同部位的划分,考虑到干湿交替环境对暴露在外的土壤影响较大,故在集水坡面坡上、坡中、坡下 3 处红土层、崩壁的红土层、过渡层和砂土层处采集各样点原状土和散土。各采样点设计 3 个 1 m×1 m 样方,重复采样 3 次。用环

刀垂直采集各样点原状土,在采样点内的 1 个 1 m×1 m 样方内采集散土,每层重复 3 次取样混合成 1 个样品,每个样品取 1~2 kg,采样后立即进行密封以防止水分蒸发。采用常规方法测定其土壤理化性质。土壤自然风干和过筛后用于土壤理化性质的测定(表 1),其中有机质过 100 目筛(0.147 mm),其他理化性质过 2 mm 筛;采用重铬酸钾加热法进行土壤有机质测定。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

土层 样点	体积质量/ (g·cm ⁻³)	土壤密度/ (g·cm ⁻³)	饱和体积 分数/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	游离氧化铁/ (g·kg ⁻¹)
US	1.16	2.65	38.31	21.94	20.14	38.71	30.85	30.43	21.05
MS	1.12	2.64	39.26	19.85	17.80	37.65	30.39	31.96	22.23
DS	1.02	2.59	31.96	12.53	9.53	43.29	36.05	20.66	16.40
RL	1.15	2.66	34.14	7.36	7.86	39.96	35.93	24.11	19.04
TL	1.24	2.62	31.13	3.91	5.26	46.38	37.48	16.14	13.01
SL1	1.31	2.64	30.95	3.03	3.28	52.26	36.77	10.98	10.24
SL2	1.35	2.61	29.55	1.06	1.17	63.92	28.35	7.73	7.23

注:US 为坡上红土层;MS 为坡中红土层;DS 为坡下红土层;RL 为崩壁红土层;TL 为崩壁过渡层;SL1 为崩壁砂土层 1;SL2 为崩壁砂土层 2。下同。

1.3 试验方法

将风干土处理后的土壤样本过 2 mm 筛,称量试验所用底部有浸水小孔的有机玻璃容器(规格为 20 cm×14 cm×7 cm),记录模具质量(M , kg);根据土壤密度和容重计算所用土样的质量(M_0 , kg),设置土体高度为 2 cm,加水至初始含水率达到约 600 g/kg,搅拌并连续振荡模具 5 min 使土壤分布均匀,使用工具平整土体表面,浸入盛满水的托盘中浸泡 12 h,浸泡过后试样的总质量基本维持稳定,托盘中的水分含量也保持不变,此时可以认为试样土壤中的水分与外界环境达到动态平衡,即试样已达到饱和。土壤饱和后,采用低温(70 ℃)模拟脱模法对试样进行 24 h 的连续烘干,每隔 2 h 记录土体重量(M_n , kg),并拍摄记录土壤裂隙发育高清图像(采用唐朝生等^[20]裂隙图像采集方法,将相机固定于天平的正上方位置,垂直进行拍摄),利用差值法计算土壤含水量。当第 1 次 24 h 烘干结束并完成图像采集后,此为 1 次干湿循环,随后将土体再次按照同样的浸泡方法浸润,并连续低温(70 ℃)烘干 24 h,共计 7 次干湿循环,每次干湿循环后拍照记录土体表面裂隙发育状况。

1.4 裂隙图像处理及参数计算

1.4.1 裂隙图像处理 试验所得的图像使用 Photoshop 2019 软件进行初步剪裁预处理,去除边界效应;由于 PCAS 裂隙分析软件测量的图像数据均以像素为单位,为了方便阅读和数据分析,需要对图片进行分辨率的处理,利用 72 dpi 分辨率的转换关系(28.346 像素=1 cm)将像素转换为厘米^[21],避免土

体表面的漂浮颗粒造成的微小凹凸被识别为微裂隙。达到 PCAS 软件分析处理要求后,再采用其进行数据提取,将预处理的图像导至 PCAS 后进行二值化操作,使其转化为灰度图像,调整对比度阈值,使得图像中裂隙清晰可见,并剔除图像中非裂隙化的杂点;在 Region 版面导出区块参数,在 Crack 版面进行裂隙图像骨架化操作,导出裂隙发育玫瑰图及相关裂隙参数指标^[22-23],用于进行后续裂隙发育规律的归纳总结。采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件对试验数据进行分析处理,用 Origin 2021 软件制作数据图表。

1.4.2 参数计算 在首次干湿循环的过程中,土壤含水率(WC , g/kg)的变化是影响土壤裂隙发育过程的重要因素^[24],其计算公式为:

$$WC = (M_n - M_0 - M) / M_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_n 为第 n 次称量时土壤试样的总重量(kg); M 为试验所用模具的质量(kg); M_0 为土壤干重(kg)。

裂隙平均长度(L_a , cm)是描述其形态结构和几何特征的基本指标,可表示裂隙的发育程度,公式为:

$$L_a = TLC / N \quad (2)$$

式中:TLC 为裂隙总长度(cm); N 为裂隙条数。

裂隙平均宽度(W , cm)是裂隙网络的基本几何指标,公式为:

$$W = AAC / ALC \quad (3)$$

式中:AAC 为裂隙平均面积(cm²)。

裂隙面积与土体的收缩量有一定的正相关关系,常用其表示土体的裂隙化程度。常用裂隙强度因子(R_{sc})

来代表土体裂隙率,表示单位土体所包含的裂隙总面积,即土体开裂面积与原始试样面积之比,公式为:

$$R_{sc} = TAC/TA \quad (4)$$

式中: TAC 为裂隙总表面积(cm^2); TA 为土体表面积(cm^2)。

用相交点数(I)和端点数(E)的比值来定义裂隙网络的连通度(K),表示裂隙产生和相互交叉连接^[25],公式为:

$$K = I/E \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 土体裂隙发育与含水率的关系

由图 1 可知,7 个样点的初始体积分数为 440~680 g/kg,24 h 烘干完成后最终体积分数降至 10~120

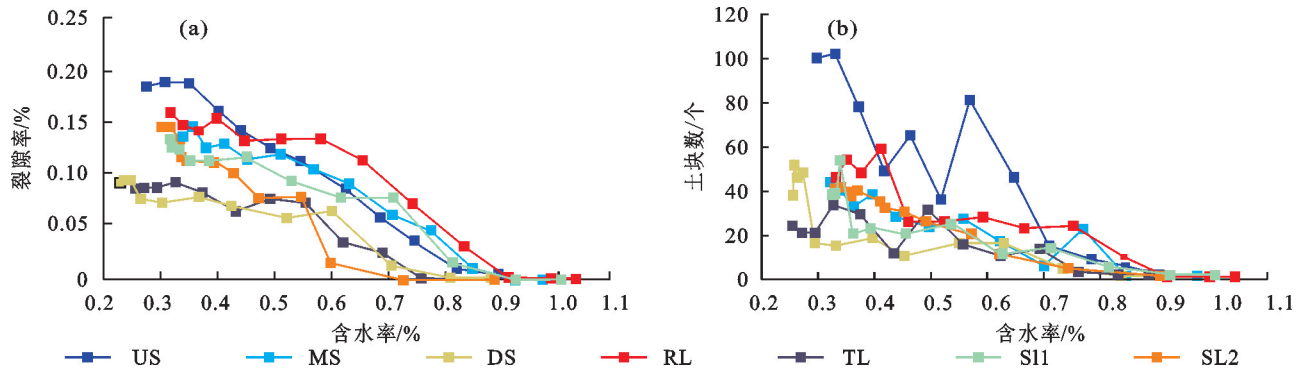


图 1 7 个样点土壤含水率与裂隙发育的关系

Fig. 1 Relationship between soil moisture content and crack development in 7 samples

2.2 干湿交替条件下土壤裂隙发育规律特征

2.2.1 土体裂隙几何网络基础指标 由图 2 可知,在干湿循环过程中, R_{sc} 阈值为 3%~15%,随着干湿交替的进行,土体浸湿膨胀后再干缩开裂,7 个样点表现出较好的规律性,裂隙逐渐收缩并最终趋于稳定,但各试样下降速率表现出较明显的差异,裂隙收缩幅度表现

g/kg。当含水率为 400~500 g/kg 时,裂隙发育缓慢,基本产生于土体表面;含水率为 150~400 g/kg 时,裂隙发育迅速,逐渐形成裂隙网络,土体愈发破碎;含水率为 0~150 g/kg 时,新裂隙基本不再产生,仅有土块数与土壤表面裂隙率在小范围内波动,裂隙网络化形态固定。总体上,7 个样点的表面裂隙率(R_{sc})和土块个数(N_a)均随着体积分数的下降呈上升趋势,其中最大 R_{sc} 为 US (18.99%)>RL(16.51%)>MS(14.61%)>SL (13.10%)>DS (9.46%)>TL(8.96%),表现为随着含水率的下降,US 和 RL 裂隙化程度相对更高;最大 N_a 为 US(103 个)>RL(59 个)>SL(57 个)>MS (47 个)>DS(45 个)>TL(31 个),US 显著多于其他土样,TL 显著低于其他土样。

为 US>SL1>RL>DS>MS>TL>SL2。其中,US 呈现非线性的减小趋势,在循环前期 R_{sc} 处于较高水平,随循环进行下降较快, R_{sc} 由 14.50% 降低至 10.70%,经历 3~4 次循环后, R_{sc} 变化趋于平缓,仅由 9.28% 降低至 7.97%;TL 与 SL2 的 R_{sc} 普遍较小,SL2 整体裂隙水平较低,发育平稳,并无明显变化趋势。

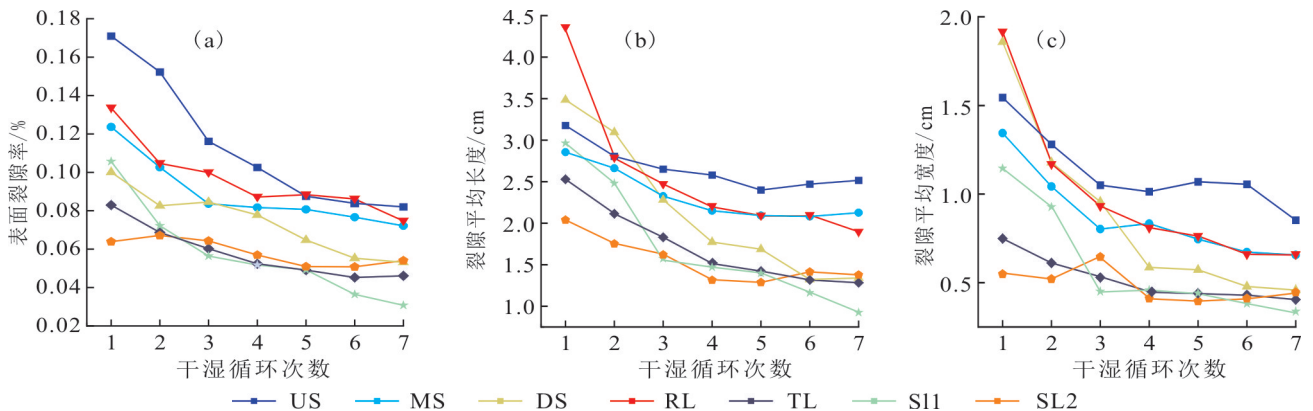


图 2 表面裂隙率(R_{sc})、平均宽度(W_a)、平均长度(L_a)随干湿循环的变化

Fig. 2 Surface crack rate (R_{sc}), average width (W_a), and average length (L_a) change with the wetting-drying cycles

平均宽度(W_a)和平均长度(L_a)是定量研究裂隙发育特征的重要参数。循环过程中, W_a 阈值为 0.3~2.3 cm,随干湿交替的进行,7 个样点 W_a 均逐渐减小

并最终趋于稳定,但各试样下降速率表现出较明显的差异, W_a 减小幅度表现为 MS>DS>US>RL>SL1>SL2>TL。其中,MS 与 DS 在前 4 次循环中下降较

快,由 2.3 cm 降至 0.5 cm,第 4 次循环后其变化逐渐趋于平缓,在 0.6~0.7 cm 波动;SL2 与 TL 的 W_a 整体变化较小,整个循环过程中仅由 0.7 cm 降至 0.4 cm。 L_a 阈值为 0.5~5.5 cm,随干湿交替的进行,7 个样点 L_a 变化规律与 W_a 变化规律相近, L_a 减小幅度表现为 $DS>MS>SL1>TL>RL>SL2>US$ 。其中,DS 在循环前期下降较快,由 5.2 cm 降至 2.2 cm,第 4 次循环后其变化逐渐趋于平缓,在 2.0 cm 左右波动;SL2 与 US 的 L_a 整体变化较小,整个循环过程中变化 0.8 cm 左右。

2.2.2 土体裂隙破碎化程度分析 由图 3 可知,首次干湿交替过程中,TL 的斑块数(28 个)最多,US (24 个)与 DS(24 个)次之,SL1 斑块数(15 个)最少;第 3,4,5 次干湿循环结束后,TL 斑块数(58,51,39 个)仍明显高于其他土样;第 6 次干湿循环后,US 斑块数(36 个)最高,TL 斑块数(27 个)仍处于较高水平;7 次干湿循环完成后,TL 斑块数(57 个)明显高

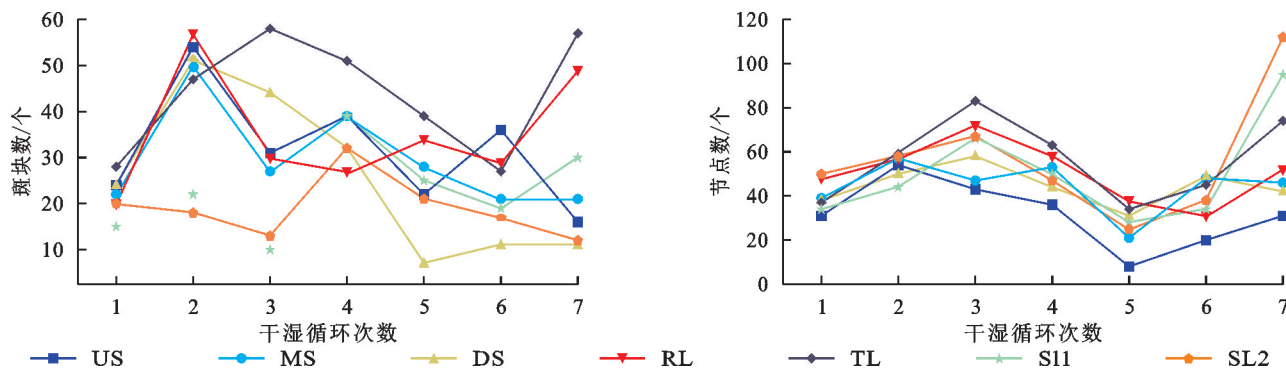


图 3 土体斑块数、节点数随干湿循环的变化

Fig.3 Changes of soil patch number and node number with wetting-drying cycles

2.3 裂隙连通度、表面裂隙率与基础理化性质的相关性

在干湿交替过程中,裂隙连通度不断变化(图 5),总体上呈现随干湿循环进行而略微升高的规律,但各土样连通度变化波动较大。在 7 次干湿循环过程中,SL2 的土体裂隙连通度处于较高水平;比较第 1 次和第 7 次干湿循环,7 个样点的裂隙连通度都呈上升趋势,裂隙连通性提高,土体稳定性降低。由图 6 可知,土体裂隙连通度的变化与土壤机械组成密切相关,US、DS、SL2 的裂隙连通度与土壤砂粒呈显著正相关,MS 的裂隙连通度与粉粒呈显著负相关;DS 的裂隙连通度与土壤体积质量呈显著负相关;SL1、SL2 的裂隙连通度与土壤密度呈显著负相关。

在烘干过程中,不同试样的含水率降低速率不同,裂隙发育过程也存在较大差距,由图 2 可知,7 个样点的裂隙发育程度呈现出 $US>RL>MS>DS>SL2>TL>SL1$, R_{sc} 与土壤性质密切相关(图 6),其中 US、DS、RL、SL2 R_{sc} 均与饱和体积分数、有机质、阳离子交

于其他土样。总体上,斑块发育数在第 3,4 次达到峰值,最高斑块数常出现在 TL,最低斑块数无明显规律性。同时,最高节点数常出现在 TL,最低节点数常出现于 US。首次干湿交替过程中,SL2 的节点数(50 个)最多,RL(48 个)次之,US(31 个)最少;第 2,3,4 次循环中,TL 节点数(59,83,63 个)均达到最大;7 次干湿循环完成后,SL2 节点数(112 个)最大,SL1 节点数(95 个)次之,US 节点数(31 个)最低。随干湿循环次数的增加,节点数整体上呈现增大的趋势,即土体的破碎化程度增加。

2.2.3 裂隙发育玫瑰图分析 在裂隙发育的玫瑰图中(图 4),7 个样点的裂隙发育差异明显,其中,US、MS、RL3 个样点的裂隙发育程度较高,且在各个方向均有发育;DS、TL2 个样点裂隙在整个发育过程中波动较小;在砂土层的 2 个样点中,SL1 裂隙发育程度较 SL2 低,SL1 裂隙发育方向基本一致,SL2 发育方向复杂多样,波动性大。

换量、黏粒、游离氧化铁呈显著正相关;MS 的 R_{sc} 与饱和体积分数和阳离子交换量呈显著正相关;TL 的 R_{sc} 与饱和体积分数、有机质、阳离子交换量、砂粒、黏粒和游离氧化铁呈显著正相关;SL1 的 R_{sc} 与饱和体积分数、有机质、砂粒和游离氧化铁呈显著正相关。

3 讨论

3.1 裂隙发育规律及其影响因素

试验过程中,随着干湿循环次数的增加,土体表面 R_{sc} 、 L_a 、 W_a 都呈下降趋势(图 2),但裂隙的破碎化程度上升,并在循环后期明显观察到土体出现下凹现象,可能是由于裂隙循环过程中内部土体结构严重破坏,发生崩解,而表面趋于裂隙愈合,这与汪时机等^[10]的研究结果一致。除岩土性质外,土体常年处于雨热频繁交替的环境下,土体因持续降雨吸水饱和,随后在蒸发失水的脱湿过程中,土壤微结构变化在土体结构薄弱处产生大量裂隙,土体强度显著下降^[26]。在反复的饱和-失水过程中,裂隙土体内产生

不可逆的裂隙发育,发生多次崩解和表面愈合,形成相互贯通的复杂裂隙网^[27]。

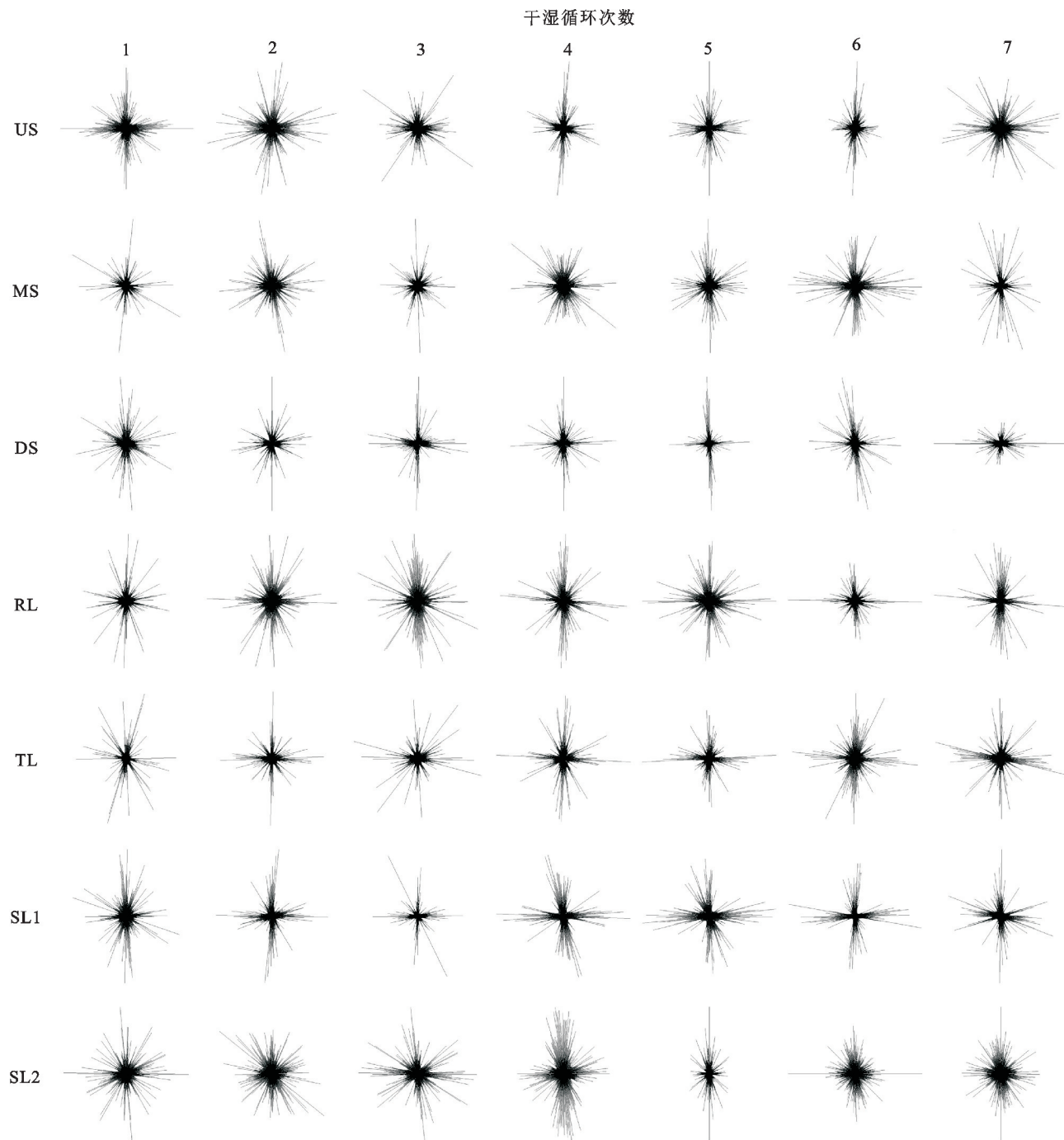


图 4 裂隙发育玫瑰图

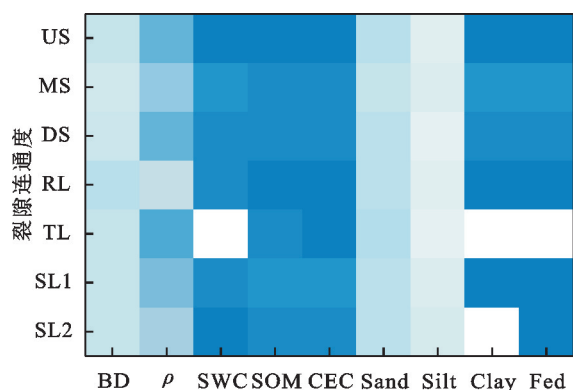
Fig.4 Rose diagram of fracture development

根据研究结果及对花岗岩红壤性质特点的综合分析,可以将土体裂隙发育过程概括为 3 个阶段:(1)发育准备期,此时表面裂隙尚未产生,土壤水分逐渐蒸发,导致土壤孔隙缩小,孔隙水表面张应力逐渐增大,超过土颗粒之间的黏结强度后开始在土体表面生成裂隙^[7];(2)快速发育期,由土体表面应力集中处及结构脆弱区域逐渐开裂,裂隙随之拓展延伸, R_{sc} 随含水量的下降而逐渐增加;(3)发育稳定期,水分持续蒸发后,土体的抗拉强度随着含水率的降低而逐渐提

高,裂隙发育时释放土体的张拉应力,当抗拉强度大于张拉应力时,土体裂隙发育逐渐稳定, R_{sc} 仅在阈值内小范围波动,与刘俊东等^[28]研究结果具有相似性。

通过图 6 中裂隙 R_{sc} 和裂隙连通度与土壤理化性质的相关性分析发现,土壤颗粒组成对裂隙发育具有显著影响。结合图 4 可以看出,US、MS 与 RL 在干湿循环中率先出现裂隙且发育较快,其共同特点表现为黏粒质量分数较高,土壤质地黏重,保水能力强,对比已有研究^[29]结果表明,土壤黏粒与土壤 R_{sc} 呈线性关

系;DS、TL、SL1、SL2 在干湿循环中裂隙出现较晚且发育速度较慢,砂粒质量分数较高,土壤水分渗透能力较强,结构松散、胶结性弱,极易在内应力的影响下使坡面表层形成大型的土体裂隙并不断拓宽加深^[10]。在实际降雨发生时,花岗岩坡面上层土壤极有可能汇集大量雨水,导致土壤自重增加,对坡面下层土壤产生较大压力,当压力超过下层土的承载极限时,土体易发生崩塌。同时,从表土层到砂土层,裂隙的发育过程明显不同,土壤裂隙发育状况与土体颗粒组成、游离氧化铁质量分数、饱和体积分数呈显著的正相关关系^[30],相邻土层间裂隙发育的差异破坏土体结构的稳定性,在实际情况下极易加快崩壁的崩塌过程。



注:BD 为体积质量; ρ 为土壤密度;SWC 为饱和含水量;SOM 为有机质;CEC 为阳离子交换量;Sand 为砂粒;Silt 为粉粒;Clay 为黏粒;Fed 为游离氧化铁。

图 6 裂隙连通度、表面裂隙率与土壤基本理化性质相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of fracture connectivity, surface fracture rate and basic physical and chemical properties of soil

花岗岩崩岗区红壤土体具有明显异质性,且裂隙与大孔隙分布较多^[18]。调查^[31]显示,广东省德庆县 1 km² 范围内 127 个崩岗中,受裂隙控制的崩岗有 109 个,占测定崩岗总数的 85.8%。同时,相关研究^[32]表明,崩岗坡面不同土层的裂隙分布特点差异显著,红土层裂隙分布较其他土层密集。裂隙的存在增大土体的入渗能力,其分布差异导致坡面不同部位水分特征不同,进而影响崩岗发育^[18]。本研究结果显示,US(坡上红土层)、MS(坡中红土层)干缩裂隙发育较快、发育程度较高(图 6),而对比已有研究^[17,33]显示,通常坡下大孔隙丰富、产生裂隙较多,造成此种差异可能的原因是由于花岗岩风化红壤亲水性弱,土壤力学性质易受体积分数影响,当产生拉应力超过土壤抗拉强度时,坡下产生较多拉张裂隙^[18]。由此可知,花岗岩红壤坡上红土层表面主要受干湿循环的环境条件影响,产生较多干缩裂隙,坡下土壤干缩裂隙较少,拉张裂隙较多。

3.2 裂隙对崩岗侵蚀的影响

相关研究^[17]表明,崩岗上层土壤的裂隙可以减少地表径流,使降水大量进入土体内部并加速入渗到

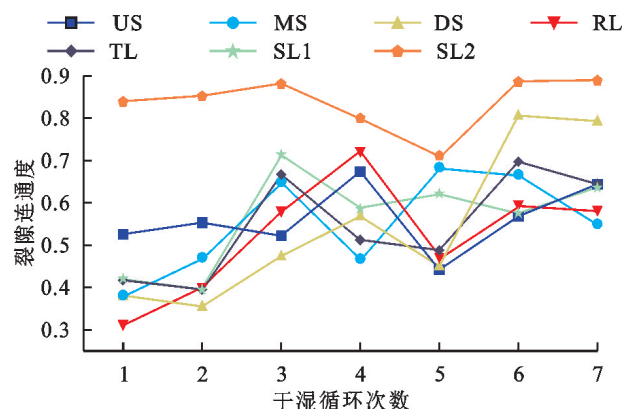
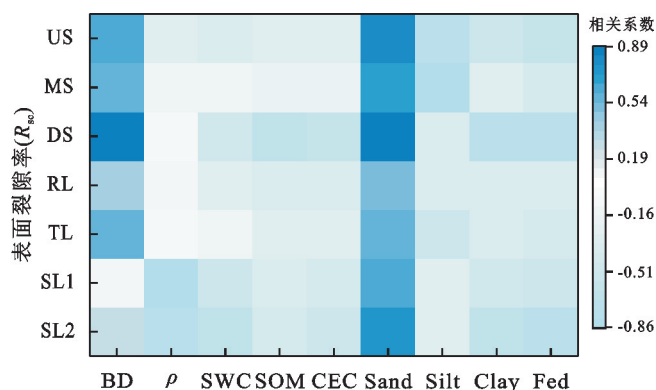


图 5 裂隙连通度随干湿循环的变化

Fig.5 Variation of fracture connectivity with wet-dry cycle



更深的土层,壤中流可以冲刷土壤中的细小土壤颗粒,造成裂隙进一步扩大加深,降低土壤强度,破坏土体结构。当土体持续吸水导致重力不断增加,直至超过土体可承受的应力后,便沿着裂隙结构面坍塌,促进崩岗侵蚀发生^[34]。本研究中,US 产生的土壤裂隙发育程度较高,土块数较少,易出现渗漏现象,且基于土体异质性,优先流发生概率较高^[35]。同时,出现的最大的裂隙平均宽度不超过 2 cm,最大裂隙平均长度低于 4 cm,整体裂隙水平呈现出狭长状态,这与崩岗侵蚀前期形成的窄深型浅沟在表观形态上十分相似^[36],可以认为裂隙引起雨水下渗侵蚀,形成“瓮沟”,进而诱发崩岗侵蚀。

崩岗坡面上不同土层的试样土壤在干燥过程中,土体裂隙发育形态存在较大差异,这些裂隙在岩土体中形成软弱地带,导致其机械强度下降^[37]。在夏季高温多雨的条件下,崩壁表层土壤由于频繁干湿交替产生许多裂隙,土壤表面结构变松散,原生裂隙区的土体经历反复的开裂-愈合过程,土壤结构遭到巨大破坏,土壤黏聚力降低,容易被地表径流冲刷产生流沙,进而暴露出下层土壤^[38]。本研究中,坡上红土层

干缩裂隙发育程度较高,即水分下渗速度快,而坡中、坡下红土层干缩裂隙发育速度变缓,这种相邻土层间裂隙发育的异质性加剧土体破坏过程,在高温降雨所形成的反复干湿循环作用下,土壤裂隙发育愈发强烈,土体稳定性大幅下降。土体结构脆弱区不断经历饱和-失水过程,裂隙不断发育,花岗岩残积土中的横向裂隙促进土壤的入渗作用^[17],随着裂缝宽度的增加,入渗作用逐渐增加,对裂隙两侧的土壤水力侵蚀作用增加,加快崩岗侵蚀过程。

4 结论

(1)花岗岩崩岗区土体 R_{sc} 、 N_a 和土体破碎化程度随体积分数的降低而增加,7个样点的 R_{sc} 、 N_a 、 W_a 、 L_a 均随干湿交替次数增加而逐渐降低。

(2)集水坡面坡上、坡中/坡下红土层裂隙连通度与砂粒/土壤体积质量呈显著正相关,崩壁砂土层裂隙连通度与土壤砂粒呈显著正相关;各样点 R_{sc} 与饱和体积分数、有机质、阳离子交换量、游离氧化铁呈显著正相关,黏粒/砂粒高的样点 R_{sc} 与黏粒/砂粒呈显著正相关。

(3)花岗岩红壤不同土层之间的干缩裂隙发育存在差异,但发育规律基本为发育准备期、快速发育期、发育稳定期3个阶段。

(4)花岗岩红壤坡上红土层裂隙主要为干缩裂隙,坡下红土层干缩裂隙较少。

参考文献:

- [1] 邓羽松.南方花岗岩区崩岗特性、分布与地理环境因素研究[D].武汉:华中农业大学,2018.
DENG Y S. Characteristics, distribution and geographical environmental factors of collapsing gully in granite region of Southern China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2018.
- [2] LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of Southern China[J]. Acta Pedologica Sinica,2018,55(6):1297-1312.
- [3] 吴志峰,王继增.华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J].水土保持学报,2000,14(2):31-35.
WU Z F, WANG J Z. Relationship between slope disintegration and rock-soil characteristics of granite weathering mantle in South China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2000,14(2):31-35.
- [4] XIE Y H, ZHANG B H, LIU B C, et al. Shrinkage cracking and strength deterioration of red clay under cyclic drying and wetting [J]. Alexandria Engineering Journal,2022,61(3):2574-2588.
- [5] STEWART R D, RUPP D E, ABOU NAJM M R, et al. A unified model for soil shrinkage, subsidence, and cracking[J]. Vadose Zone Journal,2016,15(3):1-15.
- [6] 胡节.干湿交替对鄂南崩壁不同岩土层抗侵蚀特性的影响[D].武汉:华中农业大学,2019.
HU J. Effects of wet-dry cycles on erosion resistance characteristics of different soil layers of collapse wall in South Hubei [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2019.
- [7] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology,2008,101(3):204-217.
- [8] ZHANG Y, HUANG Y M, WANG Z M, et al. A quantitative study on the characteristics of desiccation cracks and their effect on the shear failure characteristics of granite red soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2024,83(1):e27.
- [9] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等.崩岗土体的渗透性能机理研究[J].水土保持学报,2013,27(2):53-56.
LIN J L, HUANG Y H, JIANG F S, et al. Study on the mechanism of different soil layer's permeability in Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(2):53-56.
- [10] 汪时机,杨振北,李贤,等.干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J].农业工程学报,2021,37(5):113-122.
WANG S J, YANG Z B, LI X, et al. Experimental study on crack evolution and strength attenuation of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(5):113-122.
- [11] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of desiccation on compacted natural clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2001,127(1):67-75.
- [12] ZHU Y B, ZHENG H T, LAN H X, et al. Effect of initial water content and dry density on the self-healing of desiccation cracks in compacted hipparion red clay[J]. Frontiers in Earth Science,2022,10:e963086.
- [13] 唐朝生,施斌,崔玉军.土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J].岩土工程学报,2018,40(8):1415-1423.
TANG C S, SHI B, CUI Y J. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(8):1415-1423.
- [14] 赵洪岩.基于 DFOS 的膨胀土裂隙发育过程监测试验研究[D].南京:南京大学,2012.
ZHAO H Y. Research on the monitoring of expansive soils' fissures development process based on DFOS tech-

- nology[D].Nanjing: Nanjing University,2012.
- [15] 曹玲,王志俭,张振华.降雨-蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):413-421.
- CAO L, WANG Z J, ZHANG Z H. Experimental research of cracking process of expansive soil under rainfall infiltration and evaporation[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(2):413-421.
- [16] LIN L, TANG C S, CHENG Q, et al. Desiccation cracking behavior of soils based on digital image correlation technique[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(7):1311-1318.
- [17] 周小荃.花岗岩风化岩土体裂隙发育特征及其对崩壁失稳的影响[D].武汉:华中农业大学,2023.
- ZHOU X Q. Crack development for granitic weathered soil and its influence on wall collapse of Benggang[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University,2023.
- [18] 段晓倩.花岗岩土体异质性与崩岗坡面土壤水文过程[D].武汉:华中农业大学,2020.
- DUAN X Q. Heterogeneity of granite soil and hydrological process on Benggang slope[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University,2020.
- [19] 黄婉霞,邓羽松,谢福倩,等.花岗岩崩岗不同部位土壤饱和导水率特征及其影响因素[J].应用生态学报,2020,31(7):2431-2440.
- HUANG W X, DENG Y S, XIE F Q, et al. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity on different positions and their controlling factors of granite collapsing gullies[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(7):2431-2440.
- [20] 唐朝生,王德银,施斌,等.土体干缩裂隙网络定量分析[J].岩土工程学报,2013,35(12):2298-2305.
- TANG C S, WANG D Y, SHI B, et al. Quantitative analysis of soil desiccation crack network[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(12):2298-2305.
- [21] 曹玲,王志俭.土体表面干缩裂隙的形态参数定量分析方法[J].长江科学院院报,2014,31(4):63-67.
- CAO L, WANG Z J. A quantitative analysis system for morphological parameters of surface desiccation cracks in clay[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2014,31(4):63-67.
- [22] 王佳妮,马戎,张晓明.干湿循环下崩岗土体裂隙发育对其渗透性能的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):90-95.
- WANG J N, MA X, ZHANG X M. Effect of fissure development of collapsed soils on their permeability under dry-wet cycle[J].Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(1):90-95.
- [23] 董薇,黄待望.干湿循环作用下红黏土裂隙发育试验研究[J].科技和产业,2022,22(10):346-350.
- DONG W, HUANG D W. Experimental study on fracture development of red clay under wetting and drying cycles[J].Science Technology and Industry,2022,22(10):346-350.
- [24] 朱磊,陈玖泓,刘德东.土壤表面干缩裂隙形态定量分析及其数值模拟[J].农业工程学报,2016,32(14):8-14.
- ZHU L, CHEN J H, LIU D D. Morphological quantity analysis of soil surface shrinkage crack and its numerical simulation[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(14):8-14.
- [25] 周明涛,杨森,秦健坤,等.土壤裂隙研究的回顾与展望[J].土壤通报,2017,48(4):988-995.
- ZHOU M T, YANG S, QIN J K, et al. Review on the research of soil cracks[J].Chinese Journal of Soil Science,2017,48(4):988-995.
- [26] 朱伟振.干湿循环作用下红黏土裂隙发育规律及强度劣化机理研究[D].广西 桂林:桂林理工大学,2023.
- ZHU W Z. Study on crack development and strength deterioration mechanism of red clay under dry-wet cycle[D].Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology,2023.
- [27] 施斌,唐朝生,王宝军,等.粘性土在不同温度下龟裂的发展及其机理讨论[J].高校地质学报,2009,15(2):192-198.
- SHI B, TANG C S, WANG B J, et al. Development and mechanism of desiccation cracking of clayey soil under different temperatures[J].Geological Journal of China Universities,2009,15(2):192-198.
- [28] 刘俊东,唐朝生,曾浩,等.干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征[J].岩土力学,2021,42(10):2763-2772.
- LIU J D, TANG C S, ZENG H, et al. Evolution of desiccation cracking behavior of clays under drying-wetting cycles[J].Rock and Soil Mechanics,2021,42(10):2763-2772.
- [29] ZHOU R, WANG B T, HAN S Y, et al. Mechanisms of crack development and strength deterioration in compacted expansive soils under controlled wetting-drying conditions[J].Engineering Failure Analysis,2024,159:e108133.
- [30] 刘春,王宝军,施斌,等.基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J].岩土工程学报,2008,30(9):1383-1388.
- LIU C, WANG B J, SHI B, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(9):1383-1388.
- [31] 周红艺,李辉霞,叶奇,等.华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究[J].水土保持研究,2016,23(1):338-342.
- ZHOU H Y, LI H X, YE Q, et al. Simulation of morphological development of soil cracks in the collapsing

- hill region of Southern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 338-342.
- [32] 魏玉杰, 吴新亮, 蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 153-159.
WEI Y J, WU X L, CAI C F. Spatial variability of soil shrinkage characteristics in profile of slope disintegration body[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 153-159.
- [33] 王娜, 王佳妮, 张晓明, 等. 控制厚度条件下崩岗土体的裂隙演化特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 175-182.
WANG N, WANG J N, ZHANG X M, et al. Evolution characteristics of cracks in Benggang soil under controlled thickness[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 175-182.
- [34] 陶禹. 崩岗坡面壤中流及其水动力特征与崩岗侵蚀的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
TAO Y. The effect of subsurface flow along a hillslope of Benggang and its hydrodynamic characteristics on Benggang erosion[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [35] 段晓倩, 倪晨, 陈姣, 等. 基于含水量高频监测的花岗岩崩岗侵蚀红壤优先流研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 82-88.
- DUAN X Q, NI C, CHEN J, et al. Study on the preferential flow of red soil erosion in granite slope collapse with high frequency monitoring of water content[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 82-88.
- [36] 高钰淇, 陈家宙, 邹自强, 等. 宽沟是崩岗早期发育的形态标志[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 105-111.
GAO Y H, CHEN J Z, ZOU Z Q, et al. Niche-like ephemeral gully is a morphological symbol of the early development of Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 105-111.
- [37] 陈亮, 卢亮. 土体干湿循环过程中的体积变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 229-235.
CHEN L, LU L. Investigation on the characteristics of volumetric change during the wet-dry cycle of the soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 229-235.
- [38] 黄琬云. 土壤侵蚀预报模型中的生物结皮因子研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
HUANG W Y. A study on biological soil crust factors in soil erosion mode[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.

(上接第 261 页)

- [28] WU Q H, ZHANG S X, REN Y, et al. Soil phosphorus management based on the agronomic critical value of Olsen P[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49(8): 934-944.
- [29] 严玉梅, 李水利, 李茹, 等. 陕西省耕地土壤养分现状与分布特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1298-1305.
YAN Y M, LI S L, LI R, et al. Current situation and distribution characteristics of soil nutrients in cultivated land of Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1298-1305.
- [30] 邵云, 李昊烺, 翁正鹏, 等. 不同茬口对小麦养分利用和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(3): 356-363.
SHAO Y, LI H Y, WENG Z P, et al. Effects of different previous crops on nutrient utilization and yield of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(3): 356-363.
- [31] BAI Z H, MA L, MA W Q, et al. Changes in phosphorus use and losses in the food chain of China during 1950—2010 and forecasts for 2030[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 104(3): 361-372.
- [32] 张磊, 都钧, 孔丽丽, 等. 施磷对东北黑土区春玉米产量、磷素吸收利用及土壤磷素平衡的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(5): 38-42.
ZHANG L, DU J, KONG L L, et al. Effects of phosphorus fertilizer application on yield, phosphorus absorption and utilization, soil phosphorus balance of spring maize in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(5): 38-42.
- [33] 郭大勇, 袁玉玉, 曾祥, 等. 石灰性土壤施用不同磷肥对玉米苗期生长和土壤无机磷组分的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 243-249.
GUO D Y, YUAN Y Y, ZENG X, et al. Effect of phosphorus fertilizer on maize growth and inorganic phosphorus fractions in a calcareous soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 243-249.