

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.001

CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.001

祝文静,张昊,陈家宙.通城花岗岩崩岗区红壤湿胀特性驱动细沟发育试验研究[J].水土保持学报,2026,40(3):66-75.

ZHU Wenjing, ZHANG Hao, CHEN Jiazhou. Experimental study on rill development driven by moisture swelling characteristics of red soil in Tongcheng granite Benggang area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):66-75.

通城花岗岩崩岗区红壤湿胀特性驱动细沟发育试验研究

祝文静,张昊,陈家宙

(华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070)

摘要: [目的] 研究花岗岩红壤崩岗区残积土与坡积土的湿胀特性差异,阐明其对细沟发育的驱动机制。[方法] 采用土壤环刀样与整段原状未扰动土箱土体,动态监测吸水过程中残积红土、残积砂土、坡积红土、坡积砂土4种土壤的膨胀位移和膨胀力;设置从饱和到风干递变的4种干湿变化程度,通过静水崩解试验量化崩解率,结合放水冲刷试验追踪细沟发育形态和土壤流失特征。[结果] 1) 残积类土壤(残积红土和残积砂土)的吸湿膨胀应力更高,分别达5.9、4.6 kPa,稳定膨胀位移分别为1.0、0.3 mm;坡积类土壤(坡积红土和坡积砂土)膨胀应力分别为2.5、0.1 kPa,稳定膨胀位移分别为0.5、0.2 mm。2) 残积土崩解不完全,但崩解率随前期干湿变化程度升高显著增加;坡积土则不受干湿变化影响,短时间内完全崩解。3) 残积土细沟发育对干湿变化存在强依赖性,无干湿变化时几乎不发育,随干湿变化程度增高细沟尺寸增加,极高干湿变化程度下红土和砂土细沟深度分别为2.2、5.3 cm;坡积红土和坡积砂土细沟发育则不受干湿变化程度影响,最大沟深分别超过6、8 cm;4) 残积土细沟仅在冲刷初期一次微小发育后即停止扩大,而坡积土细沟随冲刷时间增加持续波动发育。[结论] 花岗岩残积土原始镶嵌结构具备较强抗冲性,但湿胀作用会破坏其薄层表土,成为细沟微弱发育的诱因;坡积土因自身特性更易发生崩解与细沟持续发育。研究结果为花岗岩红壤侵蚀防治提供了理论依据。

关键词: 花岗岩残积土;花岗岩坡积土;湿胀特性;室内冲刷;细沟侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)03-0066-10

Experimental Study on Rill Development Driven by Moisture Swelling Characteristics of Red Soil in Tongcheng Granite Benggang Area

ZHU Wenjing, ZHANG Hao, CHEN Jiazhou

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] To investigate the differences in moisture swelling characteristics between residual soil and colluvial soil in the granite red soil Benggang area and to clarify their driving mechanisms for rill development. [Methods] Using soil ring samples and undisturbed whole-section soil box samples, the swelling displacement and swelling force of four types of soil-residual red soil, residual sandy soil, colluvial red soil, and colluvial sandy soil were dynamically monitored during water absorption. Four degrees of dry-wet variation, ranging from saturated to air-dried, were established. The disintegration rate was quantified using a static water disintegration test, and rill development morphology and soil loss characteristics were tracked through runoff scouring tests. [Results] 1) The moisture swelling stress of the residual soil (residual red soil and residual sandy soil) was higher, reaching 5.9, and 4.6 kPa, respectively, with stable swelling displacements of 1.0, and 0.3 mm. The swelling stress of colluvial soil (colluvial red soil and colluvial sandy soil) was only 2.5, and 0.1 kPa, with stable swelling displacements of 0.5, and 0.2 mm. 2) The residual soil did not completely disintegrate, but its disintegration rate significantly increased with an increasing degree of initial dry-wet variation. In contrast, the colluvial soil was not affected by dry-wet

收稿日期:2025-10-16

修回日期:2025-11-20

录用日期:2025-11-22

网络首发日期(www.cnki.net):2026-01-19

资助项目:国家自然科学基金项目(42177307)

第一作者:祝文静(2001—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与坡面土壤侵蚀研究。E-mail:zhuwj01@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:陈家宙(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与土壤水分研究。E-mail:jzchen@mail.hzau.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

variation and completely disintegrated within a short period. 3) Rill development in the residual soil was strongly dependent on dry-wet variation. There was almost no rill development without dry-wet variation, and the rill size increased with an increasing degree of dry-wet variation. Under an extremely high degree of dry-wet variation, the rill depths for the residual red soil and residual sandy soil were 2.2, and 5.3 cm, respectively. Rill development in the colluvial red soil and colluvial sandy soil was not affected by the degree of dry-wet variation, with maximum rill depths exceeding 6, and 8 cm, respectively. 4) The rill in the residual soil underwent only one minor development during the initial scouring stage and then stopped expanding. In contrast, the rills in the colluvial soil exhibited continuous and fluctuating development with increasing scour time. [Conclusion] The original mosaic structure of granite residual soil has strong resistance to scouring, but the moisture swelling damages its thin surface layer, serving as the trigger for minor rill development. Colluvial soil, due to its inherent characteristics, is more prone to disintegration and continuous rill development. The findings of this study provide a theoretical basis for the prevention and control of erosion in granite red soil.

Keywords: granite residual soil; granite colluvial soil; moisture swelling characteristics; laboratory scouring experiment; rill erosion

Received: 2025-10-16

Revised: 2025-11-20

Accepted: 2025-11-22

Online(www.cnki.net): 2026-01-19

南方花岗岩红壤丘陵区的崩岗侵蚀是一种形态特殊的沟道侵蚀类型,也是我国侵蚀最严重的地区之一^[1]。针对崩岗侵蚀的影响因子和演化过程,学者们^[2-4]围绕土层特性、土体水分动态、裂隙发育等方面进行了大量研究。然而,崩岗侵蚀兼具发生随机性强、发育周期长、影响因素复杂等特点,其起源与演化机制目前尚未得到充分阐明^[5],尤其是崩岗侵蚀早期的侵蚀机理仍然有待进一步深入研究。早期研究^[6-7]多基于崩岗发育形态推断其起源,认为崩岗始于细沟或浅沟,但是野外浅沟的实际分布极少;也有研究^[8]提出,当细沟发育形成具有特定形态特征的瓮沟时,崩岗侵蚀才会发生,而且瓮沟的发生与花岗岩红壤性质的空间分异有关。因此,探究花岗岩红壤区不同性质土壤的细沟发育的影响因子和形态演化规律,对揭示崩岗侵蚀的起始发育具有重要意义。

细沟作为坡面土壤侵蚀的核心形式,其形态演化影响后续沟道侵蚀进程,从而作用于崩岗侵蚀的早期阶段,而细沟发育特征与土壤性质关系密切^[9]。在坡积母质发育的土壤中(如黄土^[10]、黑土^[11]、第四纪黏土红壤^[12-13]),细沟常呈现“V”形或“U”形断面,并逐渐向浅沟演化。但在残积母质发育的花岗岩红壤中,细沟在局部发生变深变宽的突变,形成上窄下宽的梯形断面^[14],可直接向崩岗发育而无需经历浅沟阶段。值得注意的是,我国花岗岩红壤区由于地形破碎复杂,表土同时存在残积土与坡积土,二者呈插花状覆盖在坡面不同位置,对细沟的影响存在明显分异:花岗岩残积土由花岗岩风化物就地成土且没有被搬运(仅表层可能被侵蚀),保留残积母质颗

粒之间咬合紧密的原始镶嵌结构,整体抗冲刷能力较强;而花岗岩坡积土是经过长期侵蚀或人为扰动后堆积于地表的土壤(如梯田田埂和田面),其原有结构被破坏,抗侵蚀能力弱且崩塌风险大^[15-16]。然而,目前针对这2类表土上细沟发育过程和影响因子的系统研究仍较为缺乏。

花岗岩残积红壤虽因结构未扰动而具备较强抗蚀性,但仍发生严重的细沟侵蚀甚至进一步发展为崩岗侵蚀,与其自身性质和气候条件相关^[17]。花岗岩红壤区夏季降雨集中且气候炎热,水分频繁入渗与蒸发使土体经历强烈的干湿变化,发生土壤吸水膨胀^[18],其中黏粒含量较高的红土层的膨胀变化幅度最大^[19],且膨胀过程十分迅速^[18]。但目前关于花岗岩红壤残积土和坡积土湿胀性质差异及其对细沟形态发育的影响仍缺乏系统研究。

因此,本研究以南方典型花岗岩红壤区的残积土与坡积土为对象,通过试验分析干湿变化下两类土壤的膨胀特性和膨胀应力,探讨其湿胀特性对土壤崩解、细沟形态、坡面土壤流失的作用机制。具体研究目的:1) 探明花岗岩残积土和坡积土的湿胀特性及其对崩解过程的影响;2) 剖析湿胀特性对花岗岩红壤细沟侵蚀的影响规律。本研究旨在揭示花岗岩红壤不同属性对细沟侵蚀的作用机理,为揭示崩岗侵蚀早期的沟道发育过程和坡面侵蚀防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与供试土壤

取样地位于湖北省咸宁市通城县典型崩岗区杨垄小流域(29°02'~29°24'N, 113°36'~114°04'E)。

通城县地处我国亚热带北缘,是崩岗集中分布的典型地区和全国崩岗防治重点县。据 2005 年崩岗普查,该县已发育崩岗 1 102 条,全县崩岗侵蚀总面积达到 166.4 km²,崩岗侵蚀年产沙量占该地区总侵蚀量的 50% 以上。该区地形为低山丘陵,土壤成土母质为花岗岩风化物,气候属于亚热带季风气候,年平均降水量 1 556 mm,主要集中于 4—8 月,约占全年雨量的 81%,雨热同期。在独特的湿热气候和成土母质下,花岗岩极易高度风化形成深厚的土层。强烈的风化和淋溶作用使花岗岩红壤形成了质地差异较大的土壤剖面层次,表层质地黏重,呈红色(俗称红土层);表下层质地较粗,颜色为浅灰红色(俗称砂土

层)(表 1),如果红土层被侵蚀,则砂土层出露为表土,因此土壤侵蚀的发生与演化,始终涉及这 2 种土壤的交替或并存。本文以残积土和坡积土 2 类表土为研究对象,共 4 种土壤类型:残积红土、残积砂土、坡积红土和坡积砂土。

用 100 cm³ 环刀采集上述 4 种土壤的原状土样,带回实验室进行吸水膨胀试验和静水崩解试验;用特制有机玻璃槽(长宽深为 30 cm×10 cm×15 cm)采集原状土(用土壤刀削出原状整块土体,不破坏土壤结构),用于室内放水冲刷试验;每种试验在不同处理下均设置 3 个平行,同时采集散土样,用常规方法测定土壤基本性质(表 1)。

表 1 花岗岩红壤残积土和坡积土的基本性质
Table 1 Basic properties of granite red residual soil and colluvial soil

土壤类型	体积质量/ (g·cm ⁻³)	总孔隙 度/%	饱和含 水率/%	有机质质量分数/ (g·kg ⁻¹)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	质地 (美国制)
残积红土	1.41	46.79	33.92	4.24	33.4	36.4	30.2	黏壤土
坡积红土	1.34	49.43	36.06	4.24	33.4	36.4	30.2	黏壤土
残积砂土	1.48	44.15	30.86	3.35	6.4	34.5	59.1	砂壤土
坡积砂土	1.45	45.28	32.56	3.35	6.4	34.5	59.1	砂壤土

注:文中所述“含水率”均为质量含水率。

1.2 土壤吸水膨胀试验

环刀土壤样品风干后进行吸水膨胀试验。试验开始前,环刀刀口面垫 1 层滤纸,覆 1 层纱布并用橡皮筋固定。用小刀挖去环刀另一面的表层 1.0 cm 土样并进行平整处理,放置与环刀内径一致的圆柱形海绵块,以便于土体吸水发生膨胀时激光测距仪可以准确测量膨胀位移。在环刀样品侧面插入厚度为 0.2 mm 的 Flexi force 薄膜压力传感器至环刀高度 1/2 处,USB 串口连接电脑,通过 XCOM 软件采集膨胀压力数据。在环刀样品上方安装 BOJKE 系列激光位移测距传感器,USB 串口连接电脑采集膨胀位移数据。传感器安装好后,将土样放入水位与环刀高度 1/3 处齐平的沙箱中吸水,吸水过程中每 60 s 记录 1 次压力和位移数据,直至吸水停止数据不再变化,根据试验条件将压力和位移数据换算成压强和轴向位移。

1.3 土壤静水崩解试验

对采集的原状环刀土样,首先通过水中浸泡达到饱和,再转移至 45℃ 恒温箱中进行脱湿处理,直至土壤含水率降至设计值,即“增湿-脱湿”为一个完整的干湿变化过程。设置由饱和到风干递变的 4 种干湿变化程度:极高程度(饱和含水率-3% 含水率)、高程度(饱和含水率-10% 含水率)、中程度(饱和含水率-20% 含水率)、低程度(饱和含水率-30% 含水率),通过称重法对土壤含水率进行动态监测。采用自制静水崩

解装置,该装置由 3 部分构成:圆柱有机玻璃水槽(直径 20 cm,高 90 cm,厚 5 mm)、浮筒(250 mL 量筒,最小量程 2.5 mL)和金属网板(尺寸 10 cm×10 cm,网格孔径 0.6 cm×0.6 cm)。试验过程中,将环刀土样放置于网板中央,迅速浸入盛有纯净水的水槽中,同时记录浸水起始时间及浮筒与水面齐平时的初始刻度值。随后持续记录时间及浮筒刻度变化,直至土样完全崩解穿过网格,或浮筒刻度在水面齐平位置保持稳定不再变化。崩解率的计算公式^[20]为:

$$A_t = \frac{R_0 - R_t}{R_0 - R_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_t 为试样在时间 t 时的崩解率,%; R_0 为试验开始时浮筒齐水面处刻度的瞬间稳定读数,cm; R_t 为试样在时间 t 时浮筒齐水面处刻度读数,cm; R_e 为完全崩解后浮筒齐水面处刻度读数,cm。

1.4 土槽放水冲刷试验

冲刷试验装置由采集的原状土有机玻璃槽(长宽深为 30 cm×10 cm×15 cm)、延长板和用于供水的马氏瓶组成(图 1)。该土槽规格即可保留土壤原状结构,满足试验要求。试验中产生的边壁效应可能影响径流泥沙,但不影响对不同土壤干湿效应的比较。试验设置的坡度为 40°(采样区的坡面坡度),供水流量为 0.6 L/min(75 mm/h 降雨强度在本研究尺度下的换算),每次放水冲刷时间为 10 min。土槽

中土样同样设置上述 4 种干湿变化程度。试验过程中用接样瓶收集泥沙径流样,每分钟换 1 次接样瓶,放水结束后测量细沟形态和土壤流失量等指标。

1) 细沟形态测量。冲刷结束后,使用钢尺(1 mm 精度),从细沟沟头开始每隔 1 cm 测量细沟深度。

2) 坡面深度和随机粗糙度测量。使用 GREENER 数字激光测距仪获得冲刷前后坡面土壤深度变化,制作二维云图,并计算土壤坡面随机粗糙度(SRR)^[21]:

$$K = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta H_i)^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中:K 为土壤坡面的随机粗糙度指数,cm;ΔH_i为激光测距仪测量点从土壤表面到基准面的高度变化,cm;n 为激光测距仪的测量点数;i=1,2,3...

3) 土壤流失量测量。放水过程中 1 个径流样为 1 min 内接样瓶的泥沙径流样,试验结束后将泥沙径流样称重,转移至 1 000 mL 烧杯中,于 105 °C 烘箱内烘干至恒重后称重,得到随时间变化的土壤流失量。

1.5 数据处理与统计方法

本研究数据采用 Excel 2021 软件处理,图表采用 Origin 2021 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 膨胀位移与膨胀力

花岗岩残积土和坡积土吸水膨胀位移均随时间增加而增大,但速度和幅度差异明显,残积土明显大于坡积土,红土明显大于砂土,残积红土的膨胀速度和幅度远大于另外 3 种土壤(图 2a)。含水率也随时间逐渐增加,说明 2 类表土膨胀位移随含水率的增加也呈先增大而后逐渐稳定的趋势。吸水膨胀过程大致可以分为快速、缓慢、稳定阶段 3 个阶段,4 种土壤均在 120 min 后膨胀达到稳定,其中,残积土在低含水率时迅速膨胀

且位移量大,前 60 min 吸水膨胀位移占到整个位移量的 80% 左右,而含水率较高之后继续吸水膨胀位移则明显降低。最终,残积红土稳定膨胀位移最大,为 1.0 mm,是坡积红土(0.5 mm)的 2.0 倍;残积砂土稳定膨胀位移为 0.3 mm,是坡积砂土(0.2 mm)的 1.5 倍,坡积砂土在吸水过程中无明显膨胀。

残积土和坡积土在吸水过程中产生稳定的不随时间变化的膨胀应力,其中残积土的膨胀应力远大于坡积土,膨胀应力大小顺序与膨胀稳定位移大小顺序有较好的对应关系(图 2b)。残积红土的最大膨胀力达到 5.9 kPa,而坡积红土的最大膨胀力仅为 2.5 kPa,前者是后者的 2.3 倍。残积砂土最大膨胀力达到 4.6 kPa,而坡积砂土的膨胀力仅为 0.1 kPa,几乎可以忽略。上述结果表明,4 种土壤的吸水膨胀应力和膨胀位移差异明显,具有不同的湿胀特征。

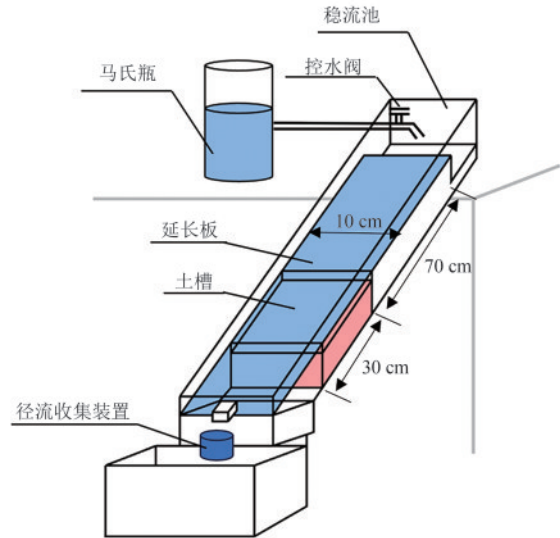


图 1 室内冲刷装置
Fig. 1 Laboratory scouring device

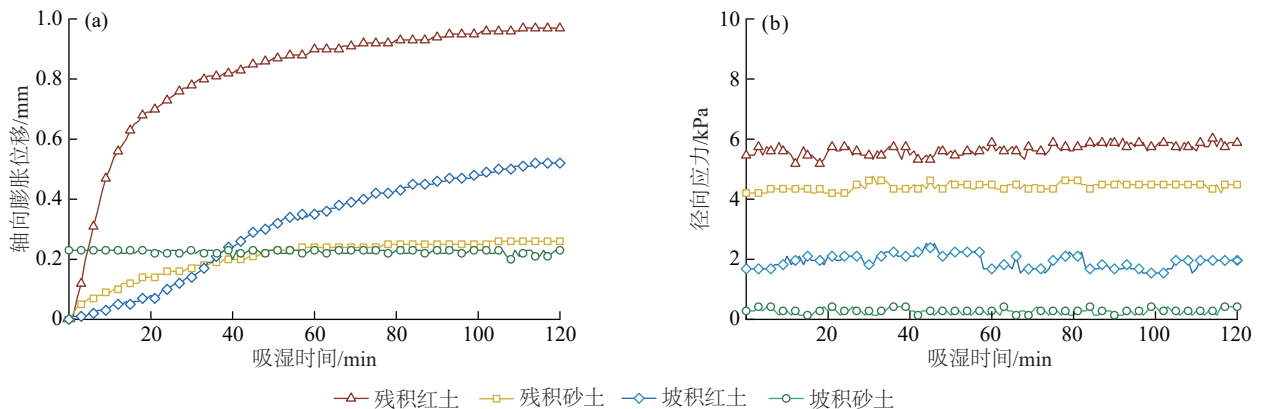


图 2 4 种土壤吸水过程中的膨胀位移和膨胀应力随时间的变化

Fig. 2 Variation of four soil types swelling displacement and swelling stress during water absorption process

2.2 静水崩解率

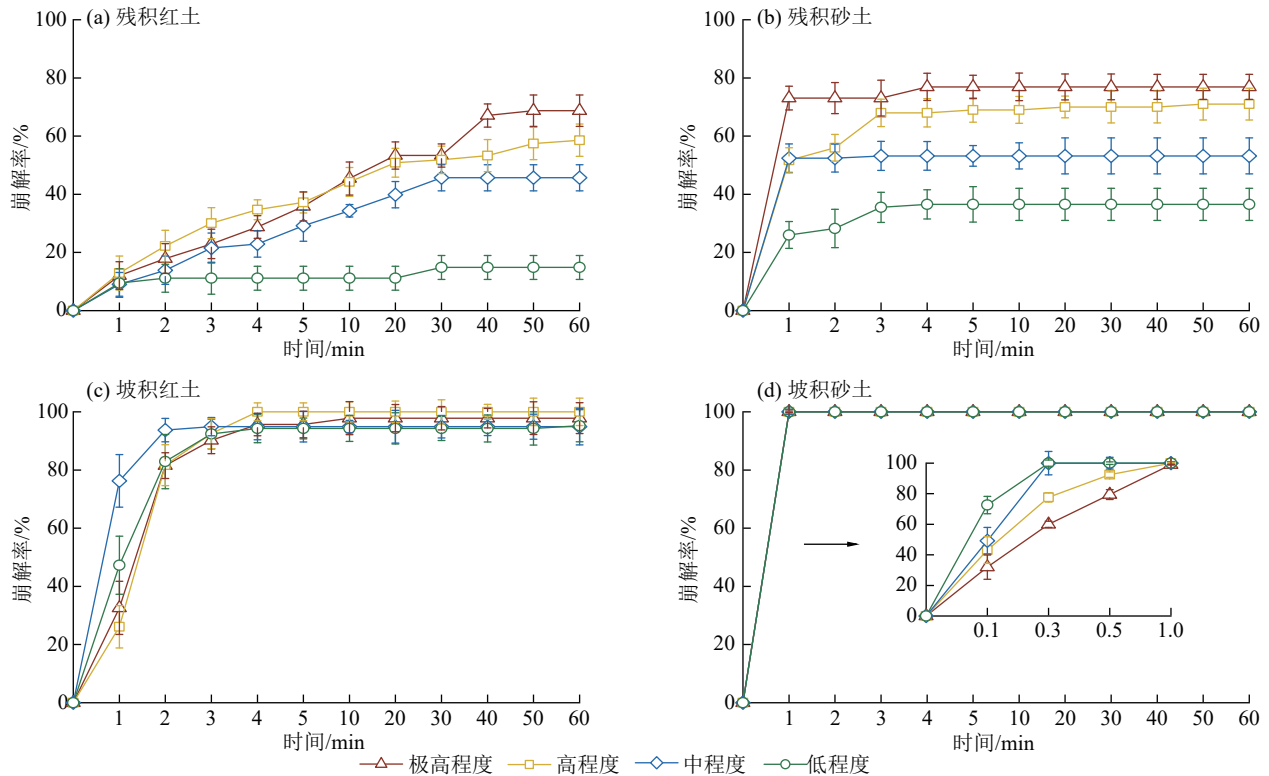
残积土在静水中的崩解率显著低于坡积土,且二

者对干湿变化的响应存在明显差异(图 3)。残积土的崩解率受干湿变化程度影响大,崩解率随干湿变化程

度增高而加大。残积红土崩解率在开始后 40 min 内趋于稳定,在低干湿变化程度下,稳定时崩解率仅为 4.1%,当干湿变化程度极高时,稳定时崩解率增加至 68.8%。残积砂土在开始 1 min 内崩解速度较快,随后崩解率趋于稳定,极高干湿变化程度下的崩解率为 76.9%,是低干湿变化程度下(36.5%)的 2.1 倍。

坡积土的崩解率受干湿变化程度影响小,遇水后在较短时间内便完全崩解(图 3c、图 3d)。在相同

干湿变化程度下,坡积红土稳定时的崩解率小于坡积砂土,坡积红土在开始 4 min 内崩解速度较快,之后趋于稳定,崩解率均超过 95%,当干湿变化程度较高时能够完全崩解。坡积砂土在遇水后 1 min 内均能达到完全崩解,当干湿变化程度为中和低时,完全崩解仅需时间 30 s。上述结果表明,表土类型和干湿状况对遇水时的崩解特性差异极大,这种差异会影响坡面侵蚀量和细沟发生速度。



注:极高程度为含水率由饱和-3%含水率;高程度为含水率由饱和-10%;中程度为含水率由饱和-20%含水率;低程度为含水率由饱和-30%含水率。

图 3 不同干湿变化程度下的 4 种土壤在静水中的崩解率

Fig. 3 Disintegration rates of four soil types in static water under different degrees of dry-wet variation

2.3 细沟形态及坡面粗糙度

残积红土在低干湿变化程度下冲刷后坡面变化极小,未形成明显细沟,因此没有对应的细沟坡面形态特征。

残积土的细沟发育表现出明显的干湿变化程度依赖性,干湿变化程度越高,细沟发育越显著,沟深变化幅度越大(图 4a、图 4b,图 5a、图 5b)。残积红土在径流冲刷之后,坡面形态变化较小,细沟发育轻微,最大沟深不超过 2.5 cm,细沟断面呈宽浅型;在极高干湿变化程度下,细沟轮廓清晰,最大沟深为 2.2 cm;随着干湿变化程度减小,细沟流路内出现多级小型跌坎,细沟变得不连续;低程度下,坡面变化极小,仅极薄的 0~0.6 cm 土层被冲刷,无明显细沟形成。与残积红土相比,残积砂土的坡面形态变化更为明显,细沟断面也呈宽浅型;在极高和高干湿变化程度下形成明显的

细沟,沟头部分侵蚀深度超过 4 cm,呈现树枝状冲刷网络和深切主流道,最大沟深分别为 5.3、4.2 cm;中程度下主沟道呈现相对简单的线性流路,最大沟深降低为 1.5 cm;低程度下细沟流路不连续,并出现多级深度仅为 0.8~1.4 cm 的小型跌坎细沟。总之,残积土的细沟发育程度随干湿变化程度升高而增强,干土吸水膨胀是细沟发生的原因。

与残积土相比,坡积土的坡面细沟形态发育强度明显更大,但对干湿变化程度的敏感性明显降低(图 4c、图 4d,图 5c、图 5d),在不同干湿变化程度下细沟发育均显著,沟深沿坡长呈先增后减的趋势,在坡面中下部达到最大值。坡积红土的细沟侵蚀以沟底下切为主,伴随细沟内跌坎的溯源侵蚀,细沟形态呈窄深型,除低程度外,最大沟深均超过 6 cm;在极高干湿变化程度,细沟沟道为简单线性流路,最大下切

深度达 7.5 cm,是残积红土的 3.4 倍;高程度下沟壁发生崩塌;中程度沟道呈线性集中,侵蚀范围有所减小;低程度下侵蚀程度显著减弱。与坡积红土相比,坡积砂土坡面侵蚀强度更高,沟岸崩塌作用显著增强,细沟发育最显著,最大沟深均超过 8.0 cm,细沟

形态呈窄深型;高程度下细沟最大侵蚀深度达到 9.8 cm,是残积砂土的 2.3 倍;中程度下达到 10.4 cm,是残积砂土的 6.9 倍,细沟发育强度最大。总之,坡积土上的细沟尺寸远大于残积土,且受干湿变化程度的影响不同。

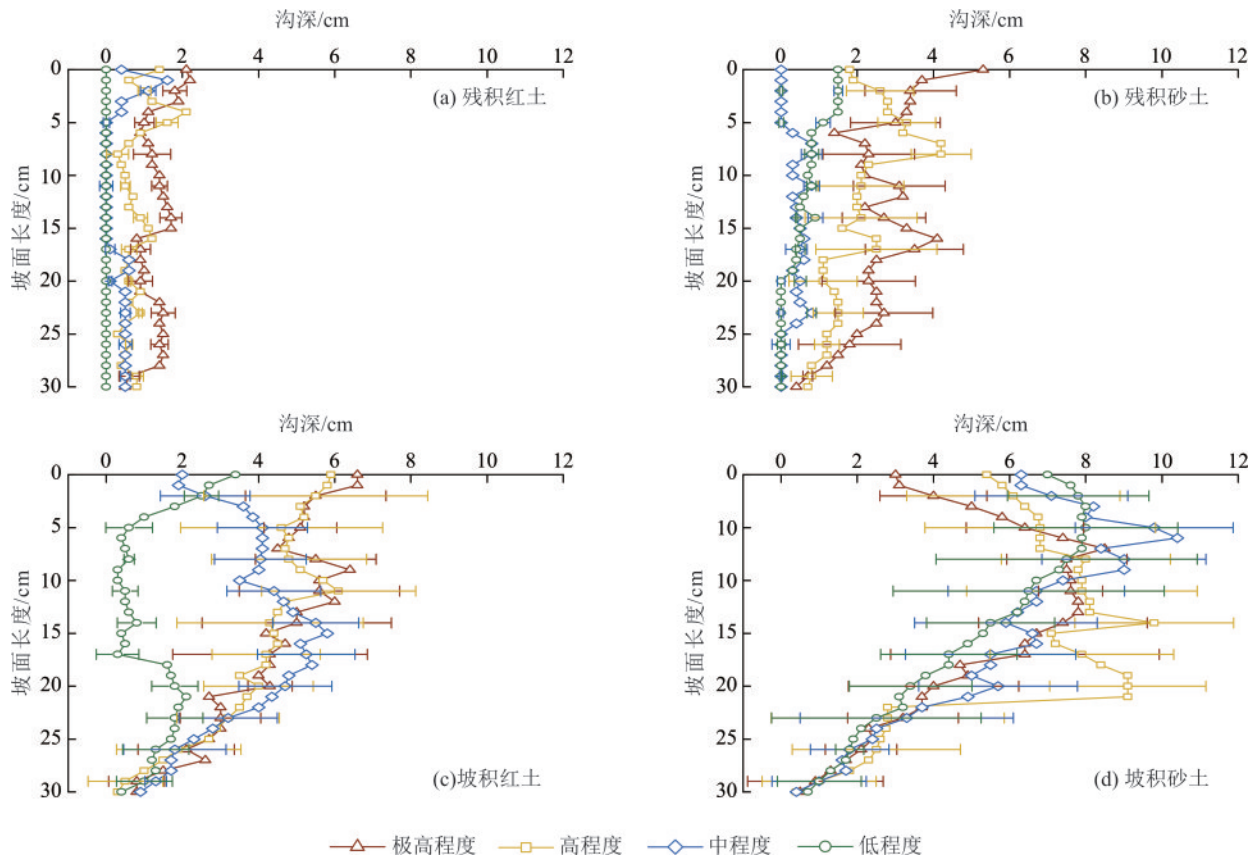


图 4 径流冲刷后 4 种土壤上细沟沟深沿坡长的变化

Fig.4 Variations in rill depth along slope length for four soil types after runoff scouring

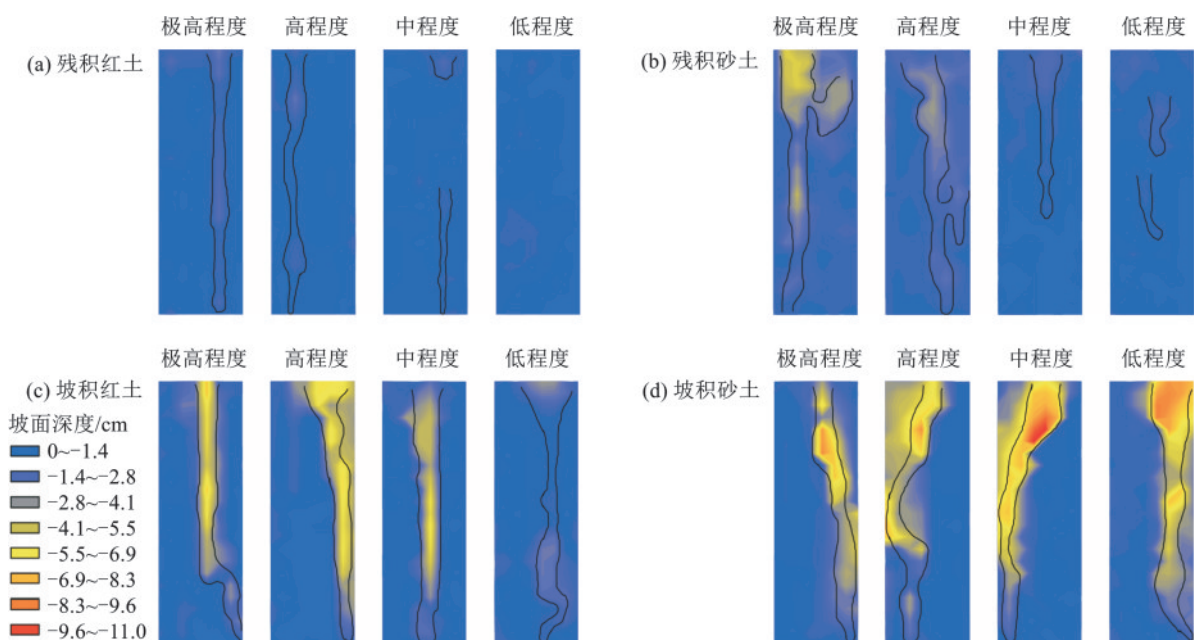


图 5 径流冲刷后 4 种土壤上的坡面深度变化

Fig. 5 Variations in slope surface depth for four soil types after runoff scouring

径流冲刷结束后,残积土与坡积土的坡面粗糙度对干湿变化的响应存在明显差异(图6)。残积土的坡面粗糙度与干湿变化程度呈正相关,干湿变化程度越低,坡面粗糙度越小。残积红土的坡面粗糙度最低且变化范围最小,各干湿变化程度下粗糙度保持在0.4~0.7 cm。残积砂土的粗糙度高于红土,在极高程度下达到最大值1.8 cm,随干湿变化程度降低逐渐减小至0.6 cm。坡积土的粗糙度显著高于残积土,其值随干湿变化程度降低而减小,除低程度外,粗糙度保持在1.7~2.2 cm。坡积砂土的坡面粗糙度均超过2.6 cm,且其值随干湿变化程度的变化趋势与残积砂土相反。上述结果表明残积土(红土和砂土)的坡面破坏程度明显小于对应的坡积土,而且差异主要源于细沟发育形态差异。

2.4 土壤流失量

残积土坡面土壤流失量远小于坡积土,而且残积土流失量随时间延长逐渐降低,而坡积土则在较高水平上波动(图7)。残积土的流失量相对较小,表现出明显的“早期峰值-快速衰减”模式,在冲刷开始的前2~3 min内达到流失峰值,随后下降至稳定的低水平。残

积土的总土壤流失量随干湿变化程度升高而增加。在低干湿变化程度下,残积红土的总流失量为98.2 g,而在极高程度下增至187.2 g,是低程度的2倍。残积砂土在极高程度下的总流失量为419.1 g,是低程度(60.0 g)的7倍。相比之下,坡积土的土壤流失量显著大于残积土,且砂土的流失量高于红土。在高干湿变化程度下,坡积红土的总流失量为731.7 g,是相同条件下残积红土(104.6 g)的7倍;坡积砂土的总流失量为746.4 g,是残积砂土(244.9 g)的3倍。

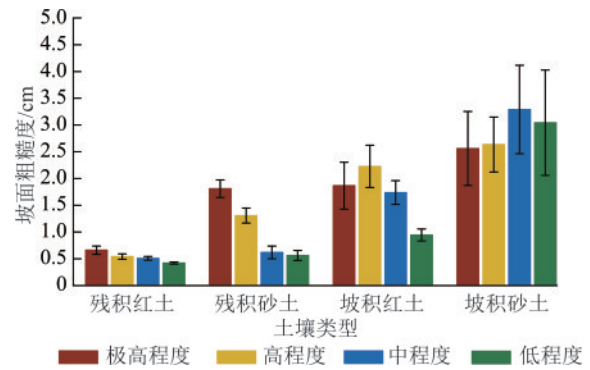


图6 径流冲刷后4种土壤上的坡面粗糙度

Fig. 6 Soil surface roughness of four soil types after runoff scouring

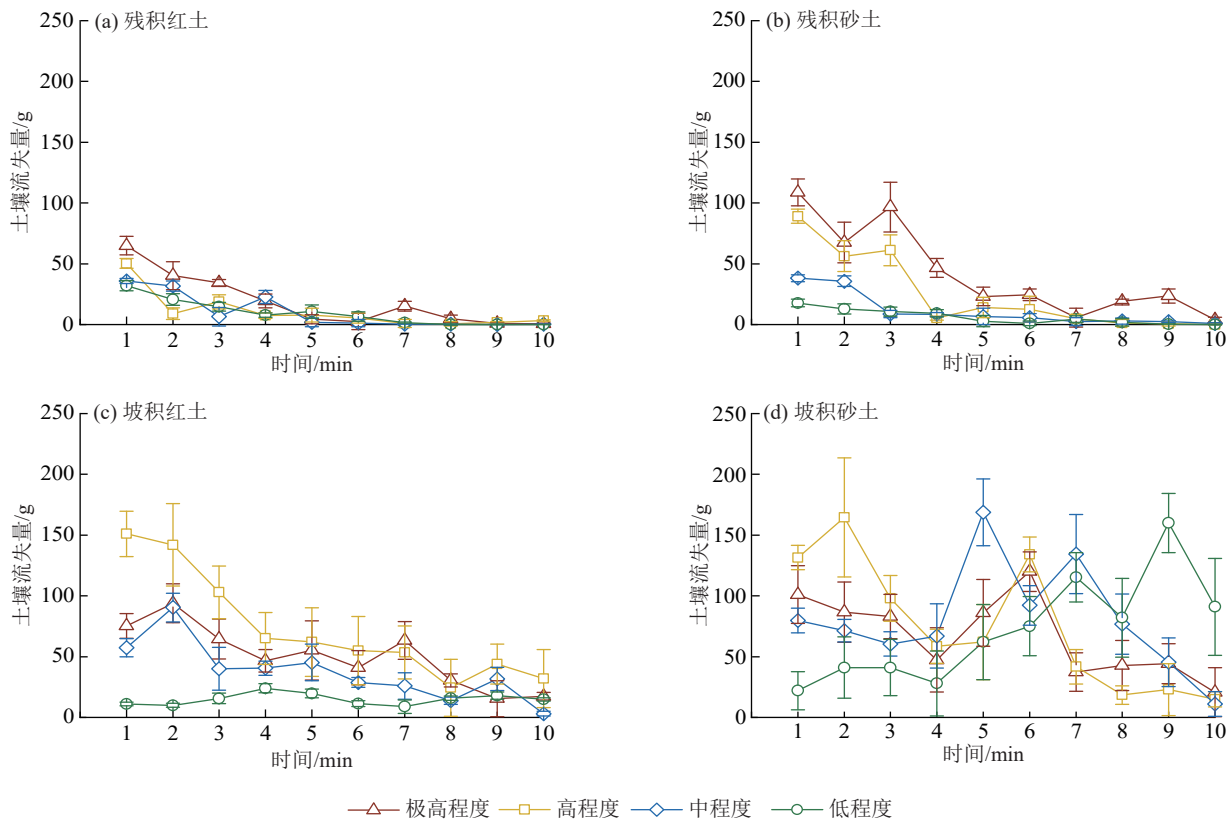


图7 径流冲刷下4种土壤坡面土壤流失量随时间变化

Fig. 7 Variation of slope surface soil loss with time for four soil types under runoff scouring

综上所述,残积土表现为一次性短期冲刷模式,总土壤流失量与干湿变化程度呈正相关,而坡积土

则呈持续性的“脉冲式供沙”模式,总土壤流失量始终处于较高水平,且不受干湿变化影响。此结果证

明残积土侵蚀量受冲刷刚开始时的湿胀影响,而持续径流对泥沙贡献量很小。

3 讨论

3.1 花岗岩红壤湿胀特性及其崩解响应

本研究比较花岗岩残积土(红土和砂土)和坡积土(红土和砂土)的湿胀特性及径流冲刷侵蚀特征发现,残积土冲刷泥沙量和细沟发育速度均受土壤湿胀特性显著影响。花岗岩母质发育的红壤黏粒含量与有机质含量相对较低(表1),黏土矿物组成以高岭石为主,伴生水云母及少量1.4 nm过渡矿物^[22-23],这种物质基础决定花岗岩红壤的胀缩性能并不突出。然而,吸水膨胀试验结果表明,残积土虽然膨胀位移并不大,却表现出较大的膨胀力(图2),是因为在强烈风化作用下,保持原始镶嵌结构的残积土存在风化膨胀力^[16],该应力在特定条件下释放可破坏表土结构并诱发侵蚀。当残积土吸水后,表层镶嵌结构被破坏,引起土壤膨胀并释放应力。本研究还表明,残积红土的黏粒含量为残积砂土的5.2倍,其膨胀应力和膨胀位移均显著大于砂土(图2),是由于黏粒含量增加导致土壤膨胀率升高^[24]。相比之下,花岗岩母质的坡积土因其内部应力状态遭到破坏,内在膨胀潜能提前释放,吸水过程中仅因孔隙充水引起体积微小增加,无论红土还是砂土,膨胀应力均很小(图2),干湿变化对其抗侵蚀能力影响较小。

静水崩解率可以作为湿胀作用破坏结构程度的量化指标,同时也反映土壤抗侵蚀能力。残积土的静水崩解率随干湿变化程度增高而增加,且残积红土的崩解率低于残积砂土(图3),该结果与已有研究^[25-26]结果相符,因其所用的土壤同为残积土,且残积红土具有较高的黏粒含量。坡积土的崩解率不受干湿变化程度影响,遇水后短时间内即近乎完全崩解,与刘昌鑫等^[27]的研究结果相符,因其研究对象为坡积土。上述研究中未对残积土与坡积土进行明确区分,进一步证实了在花岗岩红壤研究中区分二者属性的必要性。残积土因具备膨胀潜力,在干湿变化过程中会产生显著的湿胀。干湿变化程度较高时,残积土与水接触时产生的膨胀位移更大,导致崩解率增加,但由于残积土内部结构相对紧密,即使在较大的膨胀应力作用下也不能完全破坏整个土体结构,而只是使薄的表层破坏,因此表现为崩解不完全,LIU等^[26]报道了类似现象,表明花岗岩残积土具备较强的抗径流冲刷能力。坡积土因结构已经破坏,即使体积质量与残积土接近(表1),遇水后不膨胀也能够快速完全崩解。

综上所述,花岗岩残积土(包括红土和砂土)具有

较强的抗冲刷能力,但吸水膨胀导致其表层结构破坏,形成松散薄层土壤,易受冲刷。此结果解释为什么抗冲刷能力较强的花岗岩残积土仍然被侵蚀。

3.2 残积土湿胀对细沟侵蚀的影响

本研究比较残积土(保留土壤原始镶嵌结构)和坡积土(相当于重塑土)的坡面土壤流失量和细沟形态的差异发现,二者侵蚀特征显著不同。残积土(红土和砂土)细沟发育缓慢,土壤流失呈“早期峰值-快速衰减”模式(图7),表明薄层表土被冲刷后,下层土体难以继续侵蚀,被冲刷的薄层表土主要为吸水膨胀导致结构破坏的部分,而未被破坏的土体仍具较强抗冲刷能力。此外,峰值冲刷量受干湿变化程度影响,干湿变化程度越高,细沟发育越明显(图5),是因为低含水率时残积土的吸水膨胀位移更大(图2a),形成更多松散表土被径流冲刷,产生细小不连续细沟;而高含水率条件下吸水膨胀位移较小,冲刷后无明显细沟发育。结果还表明,残积土(尤其是残积红土)抗冲刷能力强,不容易被侵蚀,该结果与已有研究^[28]发现,花岗岩母质红壤土体松散、抗蚀性较弱、易发生侵蚀的观点有所不同,差异源于所采用土壤样品的不同。相比之下,坡积土细沟侵蚀强度显著高于残积土,坡积土呈“脉冲式供沙”模式,细沟发育对干湿变化不敏感而随冲刷持续发育。徐铭泽等^[28]采用风干过筛之后的重塑土所得结果与本研究坡积土的结果一致。因此,不能以花岗岩红壤区坡积土(重塑土)的侵蚀特性代表花岗岩红壤的侵蚀特性,本研究对采用花岗岩红壤重塑土(坡积土)进行侵蚀试验的代表性和合理性存疑。

残积砂土和残积红土呈现不同的细沟侵蚀特征,残积红土以沟底下切为主要侵蚀方式,黏粒胶结作用使沟壁不易崩塌,形成宽浅型细沟;残积砂土因缺乏胶结物质,侵蚀过程同时伴随沟底下切与沟壁崩塌,形成更深的宽浅型细沟。红土细沟发育速度小于砂土(图4),主要归因于高黏粒含量土壤的抗蚀性较强^[29-30]。花岗岩残积土特有的颗粒镶嵌结构以及“上红下砂”剖面构型,使其抗侵蚀能力和侵蚀过程区别于坡积母质发育的土壤,一旦抗侵蚀能力更强的“上红”(黏质红土表层)被细沟切穿而使“下砂”(砂土层)与径流接触,或者砂土层成为表土,坡面侵蚀过程将由单一的径流冲刷转变为冲刷和崩塌复合作用,侵蚀速度明显增强,可能发育出崩岗。

花岗岩红壤残积土和坡积土不同的侵蚀特征,为花岗岩红壤区土壤侵蚀防治提供了新思路。残积土因其特殊的形成环境和结构特征,表现出对干湿变化的高度敏感性,干湿变化程度越大,湿胀作用越

显著,从而促进细沟发育;坡积土由于结构被破坏,抗侵蚀能力降低,不需要经过强烈的干湿变化过程,便可产生大量侵蚀。因此,为阻控花岗岩红壤侵蚀,需要减少地表土壤扰动(维持残积土的原始结构状态),并降低地表干湿变化的幅度(如植被覆盖),维持土壤处于相对稳定的湿度环境中,可有效削弱湿胀的强度,从而缓解侵蚀形成与扩展。本研究结论基于通城细粒花岗岩得出,其他粗粒花岗岩区可能存在细微差异。

4 结论

1)花岗岩红壤残积土与坡积土的湿胀特性、崩解规律存在显著分异。残积土吸水时会产生膨胀应力,破坏表土薄层结构进而加速侵蚀,低含水率下吸水产生的膨胀位移更大,且红土受吸水膨胀的影响强于砂土;残积土崩解率随干湿变化程度的增大显著升高,但无法完全崩解。坡积土的膨胀应力与位移远小于残积土,湿胀特性极弱(尤其是坡积砂土,膨胀可忽略);且崩解率不受干湿变化影响,能在短时间内完全崩解。

2)残积土和坡积土细沟发育特征差异显著。残积土细沟发育对干湿变化响应强烈,随干湿变化程度增高,细沟发育加剧,且冲刷过程中细沟呈一次性发育模式,细沟深度和土壤流失量受干湿变化程度调控。坡积土细沟发育对干湿变化不敏感,冲刷时细沟呈脉冲式多次崩塌的发育特征,土壤流失量随冲刷时间延长持续增加。湿胀特性是驱动花岗岩红壤残积土侵蚀的关键因子。减少地表土壤扰动、降低地表干湿变化程度,可有效缓解花岗岩红壤坡面的细沟侵蚀。

参考文献:

- [1] ZHU X C, GAO L, WEI X R, et al. Progress and prospect of studies of Benggang erosion in southern China[J]. *Geoderma*, 2023, 438: e116656.
- [2] 冯延云,张晓明,朱丽丽,等.初始含水率对崩岗土体抗拉特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):41-49.
FENG Y Y, ZHANG X M, ZHU L L, et al. Effect of initial moisture content on tensile resistance of collapsed soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):41-49.
- [3] ZOU Z Q, TAO Y, GAO Y H, et al. Soil moisture dynamics near a gully head in relation to the trigger of collapse in granite red soil slope in southern China[J]. *Geomorphology*, 2023, 420: e108493.
- [4] 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 J X, DENG Z H, WANG J M, 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.
- [5] 廖义善,唐常源,袁再健,等.南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J].土壤学报,2018,55(6):1297-1312.
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.
- [6] 史德明.我国热带、亚热带地区崩岗侵蚀的剖析[J].水土保持通报,1984,4(3):32-37.
SHI D M. Analysis of collapse erosion in tropical and subtropical areas of China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1984, 4(3):32-37.
- [7] 张淑光,钟朝章.广东省崩岗形成机理与类型[J].水土保持通报,1990,10(3):8-16.
ZHANG S G, ZHONG C Z. The mechanism and types of the hillock collapsing forming in Guangdong Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1990, 10(3):8-16.
- [8] 高钰淇,陈家宙,邹自强,等.瓮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.
- [9] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊.细沟发育与形态特征研究进展[J].生态学报,2018,38(19):6818-6825.
SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L. A research review of rill development and morphological characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19):6818-6825.
- [10] GUO M M, YANG B, WANG W L, et al. Distribution, morphology and influencing factors of rills under extreme rainfall conditions in main land uses on the Loess Plateau of China[J]. *Geomorphology*, 2019, 345: e106847.
- [11] 车晓翠,赵文婷,沈海鸥,等.黑土坡面细沟形态及剖面特征试验研究[J].水土保持通报,2020,40(5):55-59.
CHE X C, ZHAO W T, SHEN H O, et al. Experimental study of rill morphology and its profile characteristics at Chinese mollisol hillslope [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5):55-59.
- [12] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.
NI S M, FENG S Y, WANG J G, et al. Relationship between rill erosion morphology and hydraulic characteristics and sediment yield on artificial soils slope with different textures [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15):149-156.
- [13] 郝好鑫,郭忠录,李朝霞,等.红壤坡面细沟横断面形态

- 及水动力学特性研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(2):363-370.
- HAO H X, GUO Z L, LI Z X, et al. Characteristics of rill cross-section morphology and hydrodynamics on red soil slope[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(2):363-370.
- [14] 刘子轩,高钰淇,陈家宙,等.土体构型对花岗岩红壤细沟发育形态的影响[J].水土保持学报,2023,37(6):74-82.
- LIU Z X, GAO Y H, CHEN J Z, et al. Influence of soil configuration on the morphology of the rill development in granitic red soil[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(6):74-82.
- [15] 阮伏水.福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J].福建师范大学学报(自然科学版),1996,12(增刊1):24-31.
- RUAN F S. Study on erosion mechanism of collapse gully in Fujian[J].Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition),1996,12(S1):24-31.
- [16] 张信宝.崩岗边坡失稳的岩石风化膨胀机理探讨[J].中国水土保持,2005(7):10-11.
- ZHANG X B. Discussion on the mechanism of rock weathering and expansion of landslide slope instability[J].Soil and Water Conservation in China,2005(7):10-11.
- [17] LIU X Y, ZHANG X W, GAO H D, et al. How climate-induced wetting-drying cycles contribute to gully erosion: A case study from southern China[J].Catena,2023,232:e107444.
- [18] 林敬兰.花岗岩崩岗红土层土体胀缩特性研究[J].水土保持学报,2019,33(2):87-92.
- LIN J L. Study on swelling and shrinkage characteristics of red soil layer in granite collapse[J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(2):87-92.
- [19] 章智,陈洁,林金石,等.含水率对安溪县花岗岩崩岗土体胀缩特性的影响[J].土壤学报,2020,57(3):600-609.
- ZHANG Z, CHEN J, LIN J S, et al. Effect of water content on swell-shrink characteristics of collapsed granite soil in Anxi County[J].Acta Pedologica Sinica,2020,57(3):600-609.
- [20] 张抒,唐辉明.非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J].岩土力学,2013,34(6):1668-1674.
- ZHANG S, TANG H M. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil[J].Rock and Soil Mechanics,2013,34(6):1668-1674.
- [21] LIAO Y S, YUAN Z J, ZHUO M N, et al. Coupling effects of erosion and surface roughness on colluvial deposits under continuous rainfall[J].Soil and Tillage Research,2019,191:98-107.
- [22] 杨德湧,蒋梅茵.我国东部花岗岩发育的红壤和黄壤的粘粒矿物组成及其演变[J].土壤学报,1991,28(3):276-283.
- YANG D Y, JIANG M Y. Clay mineral composition and evolution of red earths and yellow earths derived from granites in eastern China[J].Acta Pedologica Sinica,1991,28(3):276-283.
- [23] OUYANG N X, ZHANG Y Z, SHENG H, et al. Clay mineral composition of upland soils and its implication for pedogenesis and soil taxonomy in subtropical China[J].Scientific Reports,2021,11(1):e9707.
- [24] 戴福初,董文萍,黄志全,等.南水北调中线段原状膨土抗剪强度试验研究[J].工程科学与技术,2018,50(6):123-131.
- DAI F C, DONG W P, HUANG Z Q, et al. Study on shear strength of undisturbed expansive soil of middle route of south-to-north water diversion project[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(6):123-131.
- [25] 刘丹露,赵媛,丁树文,等.花岗岩剖面土壤崩解特性与初始含水率的关系[J].中国水土保持科学,2016,14(2):17-22.
- LIU D L, ZHAO Y, DING S W, et al. Correlation between initial soil moisture content and the characteristics of collapsing gullies in granite regions[J].Science of Soil and Water Conservation,2016,14(2):17-22.
- [26] LIU X Y, ZHANG X W, KONG L W, et al. Formation mechanism of collapsing gully in southern China and the relationship with granite residual soil: A geotechnical perspective[J].Catena,2022,210:e105890.
- [27] 刘昌鑫,潘健,邓羽松,等.干湿循环对崩岗土体稳定性的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):253-258.
- LIU C X, PAN J, DENG Y S, et al. The influence of wet-dry cycles on collapsing gully soil stability[J].Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(6):253-258.
- [28] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等.不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J].水土保持学报,2018,32(2):34-39.
- XU M Z, YANG J, LIU Y J, et al. The characteristics of runoff and sediment yield of red soil slope with different parent materials[J].Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(2):34-39.
- [29] 赵春红,高建恩.坡面不同侵蚀沟断面特征及水力几何形态[J].水科学进展,2016,27(1):22-30.
- ZHAO C H, GAO J E. Cross-section characteristics and hydraulic geometry of different erosion gullies on slopes[J].Advances in Water Science,2016,27(1):22-30.
- [30] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J].水科学进展,2014,25(1):90-97.
- HE J J, GONG H L, LI X J, et al. Effects of rill development on runoff and sediment yielding processes[J].Advances in Water Science,2014,25(1):90-97.