

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.03.024 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.03.024

陈昱仰,周怡阳,蒙颖,等.花岗岩崩壁土壤扰动前后的侵蚀阻力特征及影响机制[J].水土保持学报,2026,40(3):58-65.

CHEN Yuyang, ZHOU Yiyang, MENG Ying, et al. Erosion resistance characteristics and influencing mechanisms of granite collapse wall soils before and after disturbance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):58-65.

花岗岩崩壁土壤扰动前后的侵蚀阻力特征及影响机制

陈昱仰¹, 周怡阳¹, 蒙颖¹, 李小林¹, 张越¹,

张翔², 林金石¹, 黄炎和¹, 蒋芳市¹

(1.福建农林大学资源与环境学院,福州 350002; 2.福建农林大学林学院,福州 350002)

摘要: [目的] 土壤侵蚀阻力是表征土壤抵抗侵蚀能力的重要指标,包括细沟可蚀性与土壤临界剪切力。探究崩壁原状土与扰动土侵蚀阻力的演变规律,揭示土壤理化性质对侵蚀阻力的作用机制。[方法] 以福建安溪花岗岩崩壁5个土层的原状土和模拟扰动土(模拟崩积体)为对象,测定土壤理化性质、抗剪强度等指标,通过室内水槽冲刷试验获得侵蚀阻力,结合相关分析、回归分析和结构方程模型解析影响机制。[结果] 原状土侵蚀阻力存在显著垂直分异,崩壁表层土壤的细沟可蚀性显著低于深层,各土层扰动后细沟可蚀性增幅达65~3 571倍,其中红土-砂土层对扰动最为敏感;除碎屑层外,其余土层扰动后土壤临界剪切力均降低,降低幅度为0.21~0.65倍。黏粒含量、游离氧化铝含量等与细沟可蚀性呈极显著负相关,其中黏粒含量是影响原状土和扰动土细沟可蚀性的核心因子,土壤硬度在理化性质对可蚀性的影响中发挥重要中介作用。[结论] 土体扰动显著降低崩壁侵蚀阻力,黏粒等胶结物质对维持土壤抗侵蚀能力至关重要,研究成果为崩壁综合治理提供了依据。

关键词: 土壤侵蚀; 原状土; 扰动土; 细沟可蚀性; 临界剪切力

中图分类号: S154.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)03-0058-08

Erosion Resistance Characteristics and Influencing Mechanisms of Granite Collapse Wall Soils Before and After Disturbance

CHEN Yuyang¹, ZHOU Yiyang¹, MENG Ying¹, LI Xiaolin¹, ZHANG Yue¹,

ZHANG Xiang², LIN Jinshi¹, HUANG Yanhe¹, JIANG Fangshi¹

(1.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2.Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Objective] Soil erosion resistance is an important indicator characterizing the ability of soil to resist erosion, including rill erodibility and critical shear stress. This study aims to explore the evolution characteristics of erosion resistance in undisturbed and disturbed soils in the collapse wall of Benggang, and to reveal the mechanisms by which soil physical and chemical properties affect erosion resistance. [Methods] Undisturbed soil samples and simulated disturbed soils (simulating colluvial deposits) from five soil layers of a granite Benggang in Anxi County, Fujian Province, were used as research objects. Soil physical and chemical properties, shear strength, and other indicators were measured. Erosion resistance was obtained through indoor flume scouring experiments. The influencing mechanisms were analyzed using correlation analysis, regression analysis, and structural equation modeling. [Results] Significant vertical differentiation was observed in the erosion resistance of undisturbed soils. The rill erodibility of surface soil on the collapse wall was significantly lower than that of deep layers. After disturbance, the rill erodibility of each soil layer increased by 65-3 571 times, among which the

收稿日期:2026-02-27 修回日期:2026-03-26 录用日期:2026-04-05 网络首发日期(www.cnki.net):2026-04-28

资助项目:国家自然科学基金项目(42577381,42407484);福建省自然科学基金项目(2021J01120).

第一作者:陈昱仰(2002—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail:13960980728@163.com

通信作者:蒋芳市(1979—),男,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail:jfsfafu@163.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

laterite - sand layer was the most sensitive to disturbance. Except for the clastic layer, the critical shear stress of other soil layers decreased after disturbance, with reductions of 0.21-0.65 times. Clay content and free alumina content showed extremely significant negative correlations with rill erodibility. Specifically, clay content was the core factor affecting rill erodibility of both undisturbed and disturbed soils, and soil hardness played an important mediating role in the influence of physical and chemical properties on erodibility. [Conclusion] Soil disturbance significantly reduces the erosion resistance of Benggang. Cementing agents such as clay particles are crucial for maintaining soil resistance to erosion. The findings provide a scientific basis for the comprehensive control of Benggang.

Keywords: soil erosion; undisturbed soil; disturbed soil; rill erodibility; critical shear stress

Received: 2026-02-27

Revised: 2026-03-26

Accepted: 2026-04-05

Online(www.cnki.net): 2026-04-28

土壤侵蚀是指土壤在外营力作用下发生分离、搬运和沉积的过程^[1],土壤抵抗外营力影响的能力被称为土壤侵蚀阻力^[2]。土壤侵蚀阻力是(water erosion prediction project, WEPP)模型的关键参数,其中土壤细沟可蚀性与临界剪切力是表征土壤侵蚀阻力的关键指标^[3]。细沟可蚀性(K_r)反映土壤对外界侵蚀作用的敏感程度,属于土壤抵抗侵蚀破坏的固有属性;临界剪切力(τ_c)则为土壤抵御坡面水流侵蚀的临界动力阈值。二者均受土壤理化性质显著影响,与土壤体积质量^[4]、有机质含量^[5]、粉粒含量^[6]及黏粒含量^[7]等密切相关。土壤分离过程发生在径流和土壤的界面,不同的土壤属性形成的土壤侵蚀阻力(细沟可蚀性和临界剪切力)也存在明显差异,进而使土壤分离过程呈显著的异质性。明确径流作用下土壤理化性质对侵蚀阻力的调控机制,可为区域土壤侵蚀预报与水土流失防控提供理论依据。

崩岗侵蚀是我国南方红壤丘陵区最具破坏性的侵蚀类型之一^[8],其地貌系统由集水坡面、崩壁、崩积体及洪积扇等要素构成^[9]。其中,崩壁崩塌与崩积体再侵蚀作为驱动崩岗发育演进的关键过程,直接主导侵蚀强度与范围的扩张^[10]。崩壁失稳产生大量松散堆积物并形成崩积体,而与崩壁原状土相比,崩积体的抗侵蚀能力呈现显著衰减特征^[11]。已有研究^[12]表明,崩积体的黏聚力仅为崩壁土体的35%,崩解速率提升48%,抗冲性更是大幅下降90%,这种力学与侵蚀特性的剧烈变化为崩积体再侵蚀过程提供有利条件。现有研究虽已认识到崩壁崩塌可显著改变土体结构,但针对崩积体(扰动土)与崩壁原状土之间侵蚀阻力的对比研究仍较为缺乏,二者差异的内在成因尚未得到深入剖析,限制对崩岗侵蚀过程机制的进一步认识。

因此,本研究以典型崩岗崩壁不同土层的原状土与扰动土(模拟崩塌作用后的崩积体)为研究对

象,分析土壤扰动前后侵蚀阻力的演变规律,揭示土壤颗粒组成、有机质、游离铁铝氧化物等理化性质对细沟可蚀性及土壤临界剪切力的作用机制,筛选关键影响因子并构建定量关系模型。研究成果可为深入阐明崩岗侵蚀机理、制定科学高效的崩岗综合治理对策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验用土采自福建省安溪县龙门镇洋坑村(24°57'N, 118°05'E)。研究区属亚热带季风气候,年平均气温19℃,年平均降水量1800mm。该地区为低丘地貌,土壤发育于中粗粒酸性花岗岩,砾石(粒径 ≥ 2 mm)含量高,是典型的土石混合物;同时粒径 < 2 mm的颗粒主要是粉粒和砂粒,黏粒含量少,土体可蚀性高,易形成崩岗。据调查,安溪县现有崩岗26024处,约占福建省崩岗总量的50%;其中龙门镇崩岗1228处,约占安溪县崩岗总数的10%。因此选择龙门镇作为研究区域具有典型性和代表性。

1.2 土样的采集与处理

1.2.1 原状土样的采集与处理 在安溪县龙门镇洋坑小流域,选取1处典型崩岗的崩壁采集土壤样品。先刮去崩壁表层20cm土壤,再自下而上按照土壤发生层进行取样。根据崩壁出露的土壤颜色和表面形态,将土壤剖面划分为5个明显层次:红土层(0~0.9m)、红壤-砂土层(0.9~1.1m)、砂土层(1.1~2.6m)、砂土-碎屑层(2.6~3.0m)和碎屑层(3.0~6.0m),各层次深度均为铅直向下深度。将内径100mm、高63mm及内径50.46mm、高50mm的不锈钢采样环刀垂直压入土壤,确保环内被土壤充分填满之后,盖上环刀上方的盖子,将环刀外侧的土壤刨开至超过采样环约2cm,再将其从土壤中取出。取出后,将土样翻转,用剖面刀从环底仔细切割多余的土壤,盖上底部盖子,将环刀盒用保鲜膜包裹,防止运输途中对土

样造成影响。

土壤颗粒组成按照美国制分类,采用激光粒度仪(BT-9300ST)测定;土壤体积质量采用环刀法测定;土壤pH采用pH计法(BPH-7200,贝尔)测定,土水比为1:2.5;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤游离氧化铁、铝采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠(DCB)法提取测定。各土层土壤物质组成及其性质见表1和表2。

表1 试验土壤的机械组成

土层	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 ($0.002\sim 0.05$ mm)	砂粒 ($0.05\sim 2$ mm)	砾石 (>2 mm)
红土层	10.48	41.00	25.42	23.11
红土-砂土层	7.47	36.47	28.17	27.89
砂土层	5.03	30.09	37.63	27.25
砂土-碎屑层	3.82	29.38	40.54	26.25
碎屑层	3.99	30.31	47.35	18.36

表2 试验土壤的化学性质

土层	pH	有机质/ ($g\cdot kg^{-1}$)	游离氧化铁/ ($g\cdot kg^{-1}$)	游离氧化铝/ ($g\cdot kg^{-1}$)
红土层	5.11	9.89	11.05	3.50
红土-砂土层	5.39	3.34	10.92	3.13
砂土层	5.36	2.45	7.83	2.49
砂土-碎屑层	5.29	2.67	7.10	2.06
碎屑层	5.27	2.45	7.49	1.78

1.2.2 扰动土样的采集与处理 崩壁土壤在崩落过程后再坡脚堆积,形成崩积体。由于野外崩积体空间变异性极强,且难以与原始崩壁对应土层建立关联,无法精准对比崩积体与对应崩壁原状土的侵蚀阻力特征。为保证试验的可行性与一致性,采集崩壁各层原状土样,经风干、充分混匀后过2 mm筛,分离细粒土(<2 mm)与砾石(≥ 2 mm),再将各层细粒土与砾石分别按原比例重新混合。参照野外自然状态下崩积体的平均体积质量($1.35 g/cm^3$),将土料装入2种规格不锈钢环刀:内径100 mm、高63 mm用于土体分离试验,内径50.46 mm、高50 mm用于抗剪强度和硬度试验;制样采用分层击实法,2种规格环刀装样均将土料均分3层装入,每层高度约占总高度1/3;为防止分层,每层表面均进行刻痕处理,并用压实锤按预定次数敲击,确保环体内部密度均匀。装样完成后,将含有土壤样本的环刀用塑料薄膜密封,静置24 h后进行试验。

1.3 土壤抗剪强度及硬度的测定

采用袖珍剪力测量仪(14.10 pocket vane tester)

对原状土及扰动后的土壤样本进行剪切强度测定。该仪器的叶片测量范围为0~100 kPa。测试前,先对环刀土壤样本进行饱和处理。待样本完全饱和后,取出并静置0.5 h以排出重力水。随后将叶片完全插入土壤,顺时针旋转测试仪,并记录刻度读数。每组样本进行10次测量,剔除最大值和最小值后,取剩余8次测量的平均值作为剪切强度。采用便携式土壤硬度计(06.03 pocket penetrometer)测定原状土和扰动土硬度。测定前采用与剪切强度试验样本相同的饱和方法处理环刀中的样本。随后将便携式土壤硬度计快速插入土壤表层,直至刻度线与土面平行,读取黑色橡皮圈处数值并记录,每次读数后需将黑色橡胶环复位。测量次数及数据处理方法与土壤剪切强度测定采用的方案保持一致。各土层平均抗剪强度及硬度见表3。

表3 原状土及扰动土的抗剪强度及硬度

Table 3 Shear strength and hardness of undisturbed and disturbed soils

土层	抗剪强度		硬度	
	原状土/ kPa	扰动土/ kPa	原状土/ MPa	扰动土/ MPa
红土层	19.96±4.16	5.40±0.40	17.59±1.52	3.30±0.68
红土-砂土层	17.55±4.90	5.14±0.23	15.95±2.03	2.42±0.30
砂土层	15.04±0.39	2.76±0.26	10.38±2.98	1.65±0.85
砂土-碎屑层	16.84±2.34	3.04±0.35	11.69±3.45	2.10±0.43
碎屑层	21.46±5.42	2.97±0.13	13.28±1.64	3.22±1.22

注:表中数据为平均值±标准差。

1.4 土壤分离能力试验

1.4.1 试验设备 试验装置是由供水系统、放样孔和冲刷水槽3个部分组成(图1)。在冲刷水槽附近放置1个10 m³的储水桶作为供水系统,并由软管供水保证桶内水量充足。流量控制采用双蠕动泵(WT600-4F-C),冲刷水槽由规格为4 m(长)×0.2 m(宽)×0.1 m(高)的钢板制造而成。本试验设计的6个流量梯度换算为单宽流量为 $0.21\times 10^{-3}\sim 2.08\times 10^{-3} m^2/s$,通过流量和流速的关系式换算得到,水流在20 cm宽水槽内的水深为0.5~2.1 mm,属于典型薄层水流范畴(<5 mm);且水槽底部黏结的崩积土颗粒模拟了野外糙率,可有效避免股流形成,保证水流均匀漫流。野外调查发现,崩积体细沟床面土壤以粒径 <5 mm的颗粒为主。因此,本试验将粒径 <5 mm的崩积土颗粒黏结于水槽底部,厚度为1 cm,以保证水槽糙率与野外坡面相近。水槽顶部设有溢流槽,规格为0.3 m(长)×0.2 m(宽)×0.3 m(高)。

在溢流槽顶端下方0.1 m处嵌入1块隔板,尺寸为0.2 m(宽)×0.15 m(高),隔板顶部与溢流槽上沿齐平,隔板下方形成0.15 m高的取样安放空间。试样安放孔位于距冲刷水槽出水口0.1 m处,孔径0.12 m,孔深0.08 m,略大于环刀土样。环刀与孔壁间隙填充防水密封泥,确保冲刷过程中环刀土样与放样孔紧密贴合、不漏水。放样孔底部随机打若干个小孔,以便重力水可自由渗出。

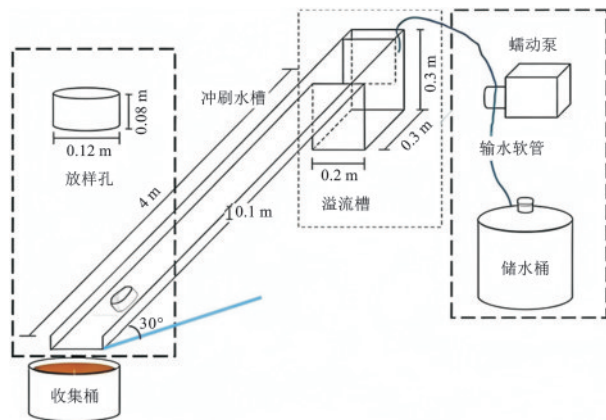


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1.4.2 试验设计 本研究对崩壁土体原状土和扰动土(模拟崩积体)进行分离试验,试验流量设计根据研究区暴雨扰动频率及其产生的单宽流量换算得到,故设计6个流量梯度2.5、5、10、15、20、25 L/min(换算成单宽流量为 0.21×10^{-3} 、 0.42×10^{-3} 、 0.83×10^{-3} 、 1.25×10^{-3} 、 1.67×10^{-3} 、 2.08×10^{-3} m²/s);结合野外调查结果,崩积体坡度较陡,平均坡度约30°,因此本试验坡度设定为30°。根据试验设计进行室内水槽冲刷试验,测定各土层不同处理的土壤分离能力及土壤侵蚀阻力。试验共设60组,每组重复3次,共计180次试验。

1.4.3 土壤分离能力试验过程 试验开始前将环刀土样饱和,方法同上。吸水饱和后的环刀土样取出静置0.5 h,重力水去除后将其嵌入水槽底部的放样孔内,保证土样表面高度与水槽表面高度一致,盖上滑盖。变坡水槽调整至预设坡度,蠕动泵调节至预设流量后开始试验。流速采用高锰酸钾染色法测定,每次冲刷试验重复测定10次,剔除最大值与最小值后,取剩余8组数据的平均值作为表面流速,并分别采用层流、过渡流和紊流对应的修正系数(0.67、0.70、0.80)进行修正。水流黏滞系数由温度计实测的水流温度,参照《水力学》^[13]查表获取;水深依据流量与流速的相关关系计算得出。上述水力学参数用于径流剪切力的求解[公式(1)]。

水流基本水力学参数测定完毕后迅速取下放样孔上的滑盖,开始进行土壤分离试验,用塑料桶在水槽出水口处接泥沙样,并用秒表记录每次取样的时间。当土样下切约2 cm时停止冲刷。试验结束后,将收集的泥沙样静置一段时间,倒去上清液,将泥沙样洗入铝盒,在105 °C下烘干称重,测定泥沙干重。土壤分离能力通过烘干泥沙样质量计算得到[公式(2)],并利用分离能力与径流剪切力计算获得侵蚀阻力(细沟可蚀性和土壤临界剪切力)[公式(3)]。

1.5 指标的测定与计算

1) 径流剪切力的计算

$$\tau = \rho g R S \quad (1)$$

式中: τ 为水流剪切力,Pa; ρ 为水体密度,kg/m³;g为重力加速度,9.8 m/s²;S为坡度,m/m;R为水力半径,m。

2) 土壤分离能力的计算

$$D_c = \frac{W}{t \times A} \quad (2)$$

式中: D_c 为土壤分离能力,kg/(m²·s);W为流失土壤干重,kg;t为冲刷时间,s;A为土样环面积,m²。

3) 侵蚀阻力的计算

通过公式(2)计算获得水力学参数,根据 WEPP 模型,当水流剪切力大于临界剪切力(τ_c)出现土壤分离,表达式为:

$$D_c = k_r (\tau - \tau_c) \quad (3)$$

式中: k_r 为细沟可蚀性,s/m; τ 为水流剪切力,Pa; τ_c 为土壤临界剪切力,Pa。

4) 模型有效系数的计算

纳什效率系数一般用于验证模型模拟结果的好坏,其中当NSE ≥ 0.70 时,表示模型较好;当 $0.40 < \text{NSE} < 0.70$ 时模型一般;当NSE < 0.40 时,表示模型较差^[14]。

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_c)^2} \quad (4)$$

式中: Q_o 为第t个样本实测值; Q_m 为第i个样本预测值; Q_c 为实测平均值。

1.6 数据统计与分析

利用Excel 2016软件进行数据处理和统计;采用SPSS 26软件进行方差分析、回归、非线性拟合检验;采用Origin 2025B软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 崩壁土体扰动前后土壤侵蚀阻力比较

由表4可知,原状土细沟可蚀性为 $9.09 \times 10^{-5} \sim 6.80 \times 10^{-3}$ s/m,不同土层可蚀性有显著差异,红土

层及红土-砂土层的细沟可蚀性远低于砂土层、砂土-碎屑层、碎屑层,而不同土层的土壤临界剪切力差异较小。扰动土侵蚀阻力各土层差异较为显著,可蚀性为 0.04~0.46 s/m,临界水流剪切力为 0.49~2.50 Pa,二者随着土层深度的增大整体呈增大趋势,但各土层间差异不显著。

表 4 原状土及扰动土细沟可蚀性的比较

Table 4 Comparison of rill erodibility between undisturbed and disturbed soils

土层	$k_{\tau\text{原状}}/(s \cdot m^{-1})$	$k_{\tau\text{扰动}}/(s \cdot m^{-1})$	$k_{\tau\text{扰动}} - k_{\tau\text{原状}}/(s \cdot m^{-1})$	$k_{\tau\text{扰动}}/k_{\tau\text{原状}}$
红土层	$9.23 \times 10^{-5} \pm 1.83 \times 10^{-5}c$	0.04±0c	0.04	444
红土-砂土层	$7.01 \times 10^{-5} \pm 0.45 \times 10^{-5}c$	0.32±0.02b	0.32	3 572
砂土层	$1.17 \times 10^{-3} \pm 0.06 \times 10^{-3}b$	0.42±0.11a	0.42	354
砂土-碎屑层	$6.80 \times 10^{-3} \pm 0.44 \times 10^{-3}a$	0.46±0.02a	0.45	68
碎屑层	$6.51 \times 10^{-3} \pm 0.17 \times 10^{-3}a$	0.43±0.03a	0.42	66

注:同列不同小写字母表示不同土层间侵蚀阻力参数存在显著差异($p < 0.05$)。下同。

表 5 原状土和扰动土临界剪切力的比较

Table 5 Comparison of critical shear stress between undisturbed and disturbed soils

土层	$\tau_{\text{原状}}/Pa$	$\tau_{\text{扰动}}/Pa$	$\tau_{\text{扰动}} - \tau_{\text{原状}}/Pa$	$\tau_{\text{扰动}}/\tau_{\text{原状}}$
红土层	3.75±0.12b	1.20±0.29b	-2.55	0.32
红土-砂土层	1.29±0.14d	0.76±0.14c	-0.53	0.58
砂土层	5.37±0.18a	1.24±0.23b	-4.73	0.21
砂土-碎屑层	3.76±0.14b	2.44±0.42a	-1.32	0.65
碎屑层	1.80±0.23c	2.50±0.10a	0.70	1.38

2.2 侵蚀阻力和土壤性质的关系

由表 6 可知,原状土细沟可蚀性与黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、游离氧化铁及游离氧化铝含量呈极显著负相关($p < 0.01$),与硬度及有机质含量呈显著负相关($p < 0.05$);临界剪切力仅与抗剪强度呈显著负相关。扰动土细沟可蚀性与黏粒含量、粉粒含量、有机质含量、游离氧化铁含量、游离氧化铝含量及硬度呈极显著负相关($p < 0.01$),与砂粒含量呈

对原状土及扰动土侵蚀阻力比较可知,各土层土壤细沟可蚀性经扰动后均呈增大趋势,较原状土分别增大 443、3 571、353、67、65 倍,其中红土-砂土层可蚀性受扰动影响最大。除碎屑层外,其他层次土壤扰动后,临界剪切力均降低,分别为原状土的 0.32、0.58、0.21、0.65 倍(表 5)。

极显著正相关($p < 0.05$);临界剪切力与黏粒含量、粉粒含量、游离氧化铁含量、游离氧化铝含量及硬度呈显著负相关($p < 0.01$),与砂粒含量呈显著正相关($p < 0.05$)。

将侵蚀阻力与土壤性质指标进行逐步回归分析,以筛选出影响土壤侵蚀阻力的关键因子。原状土的临界剪切力仅与抗剪强度呈显著负相关,难以有效表征抗剪强度对临界剪切力的影响机制;扰动土的临界剪切力虽与游离氧化铁、游离氧化铝及黏粒含量呈负相关,但该相关性并不能真实反映上述指标升高会导致临界剪切力降低的内在规律,也无法揭示土壤性质对临界剪切力的实际作用机制。因此,本研究未对原状土临界剪切力开展逐步回归分析,也未对扰动土与游离氧化铁、游离氧化铝及黏粒含量开展回归分析。由表 7 可知,原状土的细沟可蚀性可用游离氧化铝含量表达,扰动土的细沟可蚀性也可用黏粒含量表达,扰动土的临界剪切力可用砂粒表达。拟合方程的 NSE 均在 0.75 以上(> 0.70),拟合效果良好。

表 6 侵蚀阻力与土壤性质的相关性

Table 6 Correlation between soil erosion resistance and soil properties

供试土壤	指标	Cy	St	Sd	Gl	H	τ_f	OM	Fed	Ald
原状土	k_{τ}	-0.80**	-0.74**	0.87**	-0.48	-0.52*	0.25	-0.52*	-0.83	-0.90**
	τ_c	-0.04	-0.18	-0.01	0.28	-0.45	-0.52*	0.18	-0.33	0.01
扰动土	k_{τ}	-0.95**	-0.94**	0.79**	0.08	-0.86**	-0.38	-0.94**	-0.83**	-0.84**
	τ_c	-0.75**	-0.75**	0.86**	-0.47	-0.64**	0.13	-0.44	-0.88**	-0.86**

注: k_{τ} 为细沟可蚀性; τ_c 为土壤临界水流剪切力;Cy为黏粒含量;St为粉粒含量;Sd为砂粒含量;Gl为砾石含量;H为土壤硬度; τ_f 为土壤抗剪强度;OM为有机质;Fed为游离氧化铁;Ald为游离氧化铝;*表示显著相关($p < 0.05$);**表示极显著相关($p < 0.01$)。

表 7 侵蚀阻力与土壤性质参数的拟合方程
Table 7 Fitting equations between soil erosion resistance and soil property parameters

供试土壤	侵蚀阻力	方程	R^2	NSE	p
原状土	细沟可蚀性	$k_t = -0.004Ald + 0.01$	0.89	0.88	<0.01
	临界剪切力	—	—	—	—
扰动土	细沟可蚀性	$k_t = -0.06C_y + 0.71$	0.82	0.83	<0.01
	临界剪切力	$\tau_c = 0.08Sd - 1.26$	0.75	0.75	<0.01

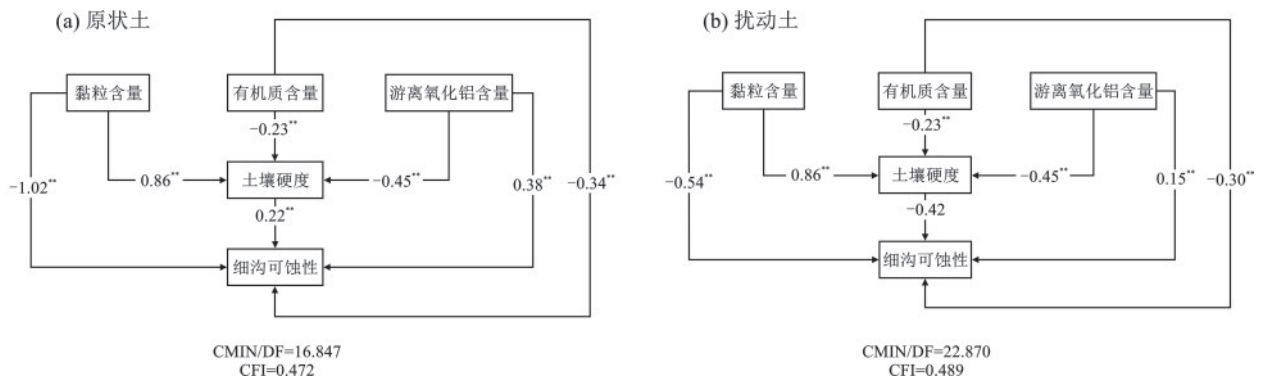
注: k_t 为细沟可蚀性, s/m; τ_c 为临界剪切力, Pa; C_y 为黏粒含量, %; Sd 为砂粒含量, %; Ald 为游离氧化铝含量, g/kg。

2.3 影响侵蚀阻力的路径分析

为揭示土壤理化性质对侵蚀阻力的影响路径, 本研究采用结构方程模型(SEM)开展分析。鉴于本研究中土壤临界剪切力变异性较大, 且与土壤理化性质间的作用关系不明确, 因此未将其纳入结构方程模型, 仅针对细沟可蚀性进行分析。同时, 结合相关分析结果, 黏粒含量、有机质含量及游离氧化铝含量与细沟可蚀性相关性较高, 而土壤硬度与细沟可蚀性相关性也较高, 同时可综合反映土壤物理结构特征, 故选取上述指标构建结构方程模型, 解析土壤性质对细沟可蚀性的影响机制。

由图 2 可知, 黏粒含量与有机质对原状土细沟可蚀性呈显著负向影响, 通径系数分别为 -1.02 和 -0.34 ($p < 0.01$); 而游离氧化铝含量与土壤硬度则表

现为显著正向影响, 通径系数分别为 0.38 和 0.22 ($p < 0.01$)。对各影响因子通径系数的对比显示, 黏粒含量的作用强度显著高于有机质、游离氧化铝及土壤硬度, 表明黏粒含量是调控原状土可蚀性的核心因子。针对扰动土的分析进一步发现, 黏粒含量对可蚀性的通径系数为 -0.54 ($p < 0.01$), 其影响程度同样大于有机质、游离氧化铝和硬度, 说明黏粒含量亦是扰动土可蚀性的关键控制因子。综合来看, 黏粒含量对原状土与扰动土可蚀性均起主导作用, 但土体经扰动后, 其通径系数明显降低, 对可蚀性的贡献程度减弱。模型结果显示, 黏粒含量、有机质及游离氧化铝含量可通过土壤硬度间接影响细沟可蚀性, 表明土壤硬度在本研究模型中发挥重要中介作用, 介导黏粒、有机质与游离氧化铝对细沟可蚀性的部分效应。



注: **表示 $p < 0.01$ 。

图 2 土壤性质对细沟可蚀性的影响路径

Fig.2 Influence path of soil properties on rill erodibility

3 讨论

本研究表明, 不同土层侵蚀阻力有显著差异, 红土层及红土-砂土层的细沟可蚀性远小于砂土层、砂土-碎屑层、碎屑层, 其原因是花岗岩风化垂直分异引发的土壤理化性质和结构特性差异^[15], 红土层及红土-砂土层黏粒、粉粒占比高、砂粒含量低, 颗粒间黏结力强^[16], 遇水不易崩解; 而深层土壤砂粒含量显著高于表层, 虽然砂粒与砾石形成刚性骨架结构^[17], 但铁铝氧化物虽含量较低, 与砂粒间的物理化学联结作用弱^[18], 因此可蚀性更高。对原状土样的分析表明, 土壤分离能力随土层深度的增加而增大。此现

象说明, 表层土壤结构更为致密, 抗侵蚀能力更强; 而底层土壤结构疏松, 抗侵蚀能力较弱。这种上强下弱的土层结构存在显著安全隐患, 极易导致底部土体率先软化、崩解, 进而在崩壁上形成临空面, 大幅增加土体整体崩塌的风险^[19]。红土层作为该区域土壤的重要稳定层, 具有较高的抗剪强度^[20], 能够有效约束下伏松散土层, 抑制土体整体崩塌^[21]。然而, 在降雨或地下水入渗作用下, 土壤含水率显著升高, 不仅大幅增加土体自重, 还导致红土层抗剪强度急剧降低, 使其失去稳定约束作用, 最终引发红土层整体崩塌^[22]。因此, 在我国南方花岗岩地区, 必须严格

防范人为破坏植被及红土层的侵蚀。一旦红土层遭到侵蚀,将加速崩岗的发育演化,并对当地土地利用、生态安全和可持续发展产生深远的负面影响。

本研究发现,崩壁土体各土层的细沟可蚀性在遭受扰动后均呈显著增大态势,增幅达65~3 571倍。此现象可能源于原状土紧实的土壤结构在扰动作用下发生疏松化转变,颗粒间的作用力减弱^[23],导致土壤硬度及抗剪强度显著降低(本研究中扰动土的平均硬度及抗剪强度仅为原状土的0.18、0.21倍),土壤的抗侵蚀能力降低,进而使得细沟可蚀性升高。其中红土-砂土层的可蚀性扰动后增幅达3 571倍,为各土层中受扰动影响最大的土层,其原因可能是红土-砂土层作为红土层与砂土层的风化过渡层,其结构的非均质性与胶结作用的夹层效应使其成为整个崩壁剖面中对扰动最敏感的土层^[24]。对土壤临界剪切力分析发现,除碎屑层外,其他层次扰动土的土壤临界剪切力均比原状土低,说明土壤扰动后,土壤表面颗粒更易被径流分离。说明崩壁崩塌后,土壤侵蚀阻力下降,尤其是可蚀性参数。因此,在崩岗治理中,要注意崩积体的治理,如造林种草、施用高分子化合物等,均能提高崩积体的结构性,增加侵蚀阻力。

相关分析结果表明,原状土与扰动土的细沟可蚀性均与黏粒含量、有机质含量、游离氧化铝含量及土壤硬度等指标呈极显著负相关。SEM分析显示,黏粒含量、有机质及游离氧化铝含量可通过土壤硬度间接影响细沟可蚀性,表明土壤硬度在本研究模型中发挥重要中介作用,介导黏粒、有机质与游离氧化铝对可蚀性的部分效应。同时,SEM分析表明,黏粒含量对细沟可蚀性的负向作用起核心作用,说明土壤理化性质对原状土和扰动土的细沟可蚀性的影响规律具有一致性。主要是由于黏粒粒径细小、比表面积大,可通过胶结作用增强粗颗粒间的黏聚作用,降低土壤可蚀性,进而形成较强的抗侵蚀阻力^[25]。但SEM分析又发现,黏粒含量对扰动土可蚀性的负向通径系数低于原状土,主要是由于土壤经扰动后,黏粒对土颗粒间的黏结作用减弱。相关分析进一步显示,扰动土的临界剪切力与游离氧化铁、游离氧化铝及黏粒含量等呈负相关,但这并不意味着上述物质含量越高,临界剪切力就越低。其原因在于,本研究的供试土壤中,黏粒、铁铝氧化物等胶结物质本底含量较低,土体扰动后,此类胶结物质对颗粒的胶结程度进一步减弱,导致土壤对径流冲刷的抵抗能力减弱。而由于供试土壤砂粒含量较高,径流需达到一定剪切力才能分离砂粒等粗颗粒,因此扰动土

临界剪切力与砂粒含量呈正相关。总体而言,土壤临界剪切力与土壤理化性质之间的关系较为复杂,二者的内在作用机制仍有待进一步深入研究。

4 结论

1)花岗岩崩岗不同土层原状土的侵蚀阻力呈显著的垂直分异特征,红土层、红土-砂土层的细沟可蚀性远低于砂土层、碎屑层及其他深层土壤。

2)土体经扰动后,各土层细沟可蚀性均大幅提升,增幅达65~3 571倍,且除碎屑层外,其余土层临界剪切力均降低,红土-砂土层作为风化过渡层,对扰动响应最为敏感,崩积体抗侵蚀能力呈现显著衰减特征。

3)黏粒含量是控制原状土与扰动土细沟可蚀性的核心因子,土壤硬度可介导黏粒、有机质、游离氧化铝等对可蚀性的间接影响。土壤结构的破坏是崩岗侵蚀阻力下降的关键原因,因此在崩岗治理中,需重点加强崩积体的防护,通过造林种草、改良土壤结构等方式提升崩积体结构稳定性,增强其侵蚀阻力。

参考文献:

- [1] SHEN, H, CHEN, Y, ZHU, Z, et al. Effect of polyacrylamide applying on soil-rock mixture detachment and prediction of detachment capacity using machine learning[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2025, 89: e70161.
- [2] 张宁, 张光辉, 邢书昆. 东北黑土区土壤侵蚀阻力对土地利用类型的响应与影响因素[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5): 40-48.
ZHANG N, ZHANG G H, XING S k. Soil resistance and its influencing factors under different land use types in the black soil region of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 40-48.
- [3] TIAN G, ANURAG S, FLANAGAN D C. Improving and calibrating channel erosion simulation in the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 291: 112616-112616.
- [4] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 1-12.
ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Research progress and prospect of soil erosion in black soil region of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 1-12.
- [5] ZHANG Y T, ZHANG G H, ZHANG N, et al. Response of soil erosion resistance to incorporated straw affected by different microbial inoculants in the black soil region of northeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2025, 392: e109765.

- [6] LI Z W, ZHANG G H, GENG R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129: 248-257.
- [7] WANG H, ZHANG G, LI N, et al. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2019, 174: 24-35.
- [8] 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.
- [9] 罗舒玉, 何玲, 林哲, 等. 桂东南崩岗侵蚀区崩壁穴窝的形态及空间分布特征 [J]. *水土保持学报*, 2025, 39(5): 63-70.
- LUO S Y, HE L, LIN Z, et al. Morphological and spatial distribution characteristics of niches in collapsing walls in southeastern Guangxi Benggang erosion area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(5): 63-70.
- [10] SHEN H M, WANG H, HA F, et al. Evaluation of the applicability of three sediment transport capacity equations on steep colluvial slopes and their modifications [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2024, 49(15): 5117-5132.
- [11] ZHANG L T, ZHAN Z Z, ZHANG Z G, et al. Morphological and structural characteristics of preferential flow and its influencing factors on colluvial deposits of Benggang [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2024, 49(9): 2870-2883.
- [12] 蒋芳市. 花岗岩崩岗崩积体侵蚀机理研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- JIANG F S. Erosion mechanism of colluvial deposits in granite Benggang [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [13] 赵振兴, 何建京, 王村. 水力学 [M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- ZHAO Z X, HE J J, WANG C. *Hydraulics* [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [14] WU B, WANG Z L, SHEN N, et al. Modelling sediment transport capacity of rill flow for loess sediments on steep slopes [J]. *Catena*, 2016, 147: 453-462.
- [15] 徐加盼, 邓羽松, 陈峰云, 等. 花岗岩崩岗不同层次土壤抗冲性及其影响因素 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 9-13.
- XU J P, DENG Y S, CHEN F Y, et al. Anti-scourability on different soil horizons of granite collapsing gully and its driving force [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 9-13.
- [16] 谢福倩, 韦真茜, 廖达兰, 等. 桂东南花岗岩红壤区典型崩岗剖面风化强度对理化特性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 122-131.
- XIE F Q, WEI Z Q, LIAO D L, et al. Effect of weathering intensity on physical and chemical properties of typical Benggang profile in granite red soil area of southeast Guangxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 122-131.
- [17] 区晓琳, 陈志彪, 陈志强, 等. 闽西南崩岗土壤理化性质及可蚀性分异特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(3): 84-92.
- QU X L, CHEN Z B, CHEN Z Q, et al. Variation of soil physical-chemical property and erodibility in the area of collapse mound of southwestern Fujian [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(3): 84-92.
- [18] 马高峰, 邹伟林, 马亚鑫, 等. 游离氧化铁对花岗岩残积土崩解和抗剪强度的影响 [J]. *河南城建学院学报*, 2024, 33(4): 10-18.
- MA G F, ZOU W L, MA Y X, et al. Effect of free iron oxide on disintegration and shear strength of granite residual soil [J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2024, 33(4): 10-18.
- [19] DENG Y S, DUAN X Q, DING S W, et al. Suction stress characteristics in granite red soils and their relationship with the collapsing gully in south China [J]. *Catena*, 2018, 171(11): 505-522.
- [20] YANG M J, CEN N B, ZHOU B N, et al. Influence of slope crest soil cracks on water dynamics and gully wall stability under varying rainfall patterns [J]. *Catena*, 2025, 260: e109469.
- [21] DUAN X Q, DENG Y S, TAO Y, et al. 2021. The soil configuration on granite residuals affects Benggang erosion by altering the soil water regime on the slope [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(3): 419-432.
- [22] ZHANG L T, SUN S, LIN M, et al. Study on soil-water characteristic curves in the profiles of collapsing walls of typical granite Benggang in southeast China [J]. *Peer J*, 2022, 10: e13526.
- [23] YE J, LI J, DI Y J, et al. Effect of tillage practices on soil erodibility in wind-water erosion crisscross region [J]. *Catena*, 2026, 262: e109662.
- [24] 郑勤敏, 王祖梅, 黄奕铭, 等. 东南崩岗侵蚀区崩壁土壤岩土特性的空间分异特征 [J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(1): 53-62.
- ZHENG Q M, WANG Z M, HUANG Y M, et al. Spatial differentiation of geotechnical characteristics of soil in a Benggang gully wall in southeast China [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(1): 53-62.
- [25] SHERIDAN J G, SO B H, LOCH J R, et al. Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties [J]. *Soil Research*, 2000, 38(2): 265-284.