

DOI: 10.11766/trxb202501160034

CSTR: 32215.14.trxb202501160034

杨源峰, 杨岚惠, 张诗琴, 石静琴, 许静本, 谭咏诗, 王芳, 邓羽松. 喀斯特区生物结皮对不同岩性发育土壤分离过程的阻控效应研究[J]. 土壤学报, 2026, 63 (1): 179–194.

YANG Yuanfeng, YANG Lanhui, ZHANG Shiqin, SHI Jingqin, XU Jingben, TAN Yongshi, WANG fang, DENG Yusong. Effects of Biocrusts on Soil Detachment Process Across Different Lithology Development in Karst Regions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (1): 179–194.

喀斯特区生物结皮对不同岩性发育土壤分离过程的阻控效应研究^{*}

杨源峰, 杨岚惠, 张诗琴, 石静琴, 许静本, 谭咏诗, 王芳, 邓羽松[†]

(广西大学林学院广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 西南喀斯特区地质脆弱性和敏感性并存, 土壤侵蚀问题不容忽视。生物结皮作为广泛发育的地表覆盖物在调控土壤侵蚀方面起到关键作用, 但不同岩性条件下生物结皮覆盖程度对土壤分离阻控过程及其驱动因素尚不明确。本文选取白云岩和碎屑岩发育以苔藓为优势种的结皮样地, 以无结皮覆盖的裸地为对照。基于5个结皮盖度水平(1%~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%、80%~100%)原位测定结皮生长特性并采集原状土及散土, 在不同水动力侵蚀条件下(水流剪切力为1.68~12.87 Pa)进行冲刷试验, 建立结皮盖度与结皮生长特性、土壤性质和土壤分离能力及细沟可蚀性的定量关系, 分析不同岩性结皮覆盖下土壤抗水蚀性能的差异, 明确影响土壤分离及侵蚀阻力的主控因素。结果表明:(1)白云岩结皮总体覆盖的厚度和生物量明显低于碎屑岩, 糙度反之。两种岩性发育结皮厚度、糙度和生物量均随其盖度增加而呈幂函数或指数函数增长, 且土壤性质受岩性、结皮发育显著影响($P<0.05$)。(2)结皮盖度显著影响土壤分离能力和细沟可蚀性($P<0.05$), 白云岩和碎屑岩结皮覆盖细沟可蚀性分别降低54.57%~99.98%和69.11%~99.93%。(3)回归分析表明, 白云岩结皮覆盖土壤分离能力和细沟可蚀性受控于水稳定性团聚体和平均质量直径, 碎屑岩结皮覆盖土壤分离能力和细沟可蚀性受控于水稳定性团聚体。综上, 生物结皮的发育显著提升土壤抗蚀性能, 岩性差异引起的水稳定性团聚体和平均质量直径的变化是影响土壤抗蚀性能的重要因素, 研究结果以期为西南喀斯特区生态系统修复及生物结皮土壤侵蚀预测提供重要科学依据。

关键词: 生物结皮; 土壤分离能力; 细沟可蚀性; 白云岩; 碎屑岩

中图分类号: S154.1; S157.1 文献标志码: A

Effects of Biocrusts on Soil Detachment Process Across Different Lithology Development in Karst Regions

YANG Yuanfeng, YANG Lanhui, ZHANG Shiqin, SHI Jingqin, XU Jingben, TAN Yongshi, WANG fang, DENG Yusong[†]

(Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

* 国家重点研发计划项目(2023YFD1902801)和广西研究生教育创新计划项目(YCSW2024145)共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2023YFD1902801), and Innovation Project of Guangxi Graduate Education (No.YCSW2024145).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

作者简介: 杨源峰(1998—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持。E-mail: Ymarkscau001@163.com

收稿日期: 2025-01-16; 收到修改稿日期: 2025-04-08; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-24

Abstract: 【Objective】The southwestern karst region is characterized by both geological fragility and sensitivity, with soil erosion being a significant concern. Biological soil crusts, as widely developed surface coverings, play a crucial role in regulating soil erosion. However, the underlying mechanisms of how biocrust coverages at varying levels influence soil detachment control under different lithological conditions remain unclear. Therefore, it is essential to investigate the effects of different levels of biocrust coverages on the process of soil detachment and the main factors influencing this under varying lithological conditions in the southwestern karst region. 【Method】In this study, we selected moss-dominated biocrusts developed on dolomite and clastic rock, with undisturbed soil serving as a control. Biocrust growth characteristics were determined in situ at five levels of moss coverages (1%~20%, 20%~40%, 40%~60%, 60%~80%, 80%~100%). The soil samples, including undisturbed soil and loose soil, were collected, and scouring experiments were conducted under different hydrodynamic erosion conditions (shear force of water flow ranging from 1.68 to 12.87 Pa). Quantitative relationships between moss coverages, growth characteristics, soil properties, soil detachment capacity, and rill erodibility were established. The differences in soil resistance to water erosion under moss coverage of different lithologies were analyzed, and the main controlling factors influencing soil detachment and erosion resistance were identified. 【Result】The results indicate that: (1) The overall thickness and biomass of mosses on dolomite were significantly lower than those on clastic rock, while the roughness was the opposite. The thickness, roughness, and biomass of mosses increased with their coverage, following either a power function or exponential growth model, and soil properties were significantly affected by both lithology and moss development ($P<0.05$). (2) Moss coverages significantly affected soil detachment capacity and rill erodibility ($P<0.05$). The rill erodibility under moss coverages on dolomite decreased by 54.57%~99.98%, and on clastic rock by 69.11%~99.93%. (3) Regression analysis revealed that soil detachment capacity and rill erodibility in dolomite mosses were controlled by water-stable aggregates and mean weight diameter, while those in clastic rock mosses were controlled by water-stable aggregates. 【Conclusion】In conclusion, the development of biocrusts significantly improves soil erosion resistance, with variations in water-stable aggregates and mean weight diameter caused by lithology being critical factors influencing soil erosion resistance. The results provide important scientific insights for ecological restoration and biological crust-based soil erosion prediction in the southwestern karst region.

Key words: Biological crusts; Soil detachment capacity; Rill erodibility; Dolomite; Clastic rock

土壤侵蚀包括土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积^[1]。土壤分离能力 (Soil detachment capacity, D_c) 是描述土壤侵蚀起始的关键参数, 定义为含沙量为零时坡面径流的最大土壤剥离速率^[2]。土壤分离主要通过侵蚀动力 (降雨、径流) 与下垫面特征 (土壤侵蚀阻力) 相互作用将土壤颗粒与土壤表面基质剥离, 可为后续泥沙运输沉积提供先决条件^[3]。土壤分离过程主要受土壤性质的影响, 与植物根系、凋落物及生物结皮等近地表条件密切相关, 可直接影响侵蚀动力与下垫面特征, 从而对侵蚀过程产生显著作用^[4]。生物土壤结皮 (简称生物结皮, Biological soil crusts, BSCs) 是由土壤表面的微观生物 (细菌、真菌、蓝绿藻) 和宏观生物 (地衣、苔藓) 通过菌丝体、假根和分泌物等, 与下覆浅层土壤共同作用形成的有机复合体^[5-6]。生物结皮具有独特的自然生理机制和出色的抗逆适应能力^[7], 广泛分布于养分匮乏、维管植物覆盖不连续的恶劣栖息地^[8]。已有研究表明, 生物结皮发育会对土壤表层产生重要作用, 如改变土壤近地表特性^[9]、改善土壤属性和土壤结构^[10]、影响土壤表层水文循环^[11]等。因此, 生物结皮作为先锋植物在脆弱或受损生态系统中占据重要的生态位, 其发育演替势必对流域内坡面土壤表层的流动水力学和土壤侵蚀过程产生深远影响, 如何促进土壤发育和减少土壤侵蚀已逐渐为国内外生态学术界所关注。

尽管生物结皮在增强土壤抗侵蚀作用方面已在不同研究区域得到证实^[6], 其作用机理仍存争议。目前关于生物结皮如何影响土壤侵蚀变化研究主要包括内外双重机制。Gao 等^[12]发现, 结皮发育演替能显著改变土壤固有特征, 从而影响土壤可蚀性。有研究指出, 去除地表结皮组织后, 土壤对分离的抑制作用减弱, 但相较于裸土, 其抗侵蚀能力仍然

增强^[13]。杨凯等^[14]和 Rodriguez-Caballero 等^[15]认为生物结皮具有较强抗蚀能力的关键在于其稳定的层状结构, 通过“铠甲效应”影响侵蚀动力及坡面阻力来降低土壤可蚀性。Liu 等^[16-17]通过结皮地表覆盖、地下组织以及总效应全面揭示生物结皮对土壤分离的影响, 量化发现藻类和苔藓土壤分离能力分别减小 69.2% 和 89.8%, 其中地表覆盖作用分别为 37.7% 和 68.9%。干旱-半干旱地区由于受水分胁迫, 结皮通常薄而密集, 且具强耐旱性, 温带和亚热带地区丰富的水热条件非常有利于生物结皮发育, 湿润区的结皮更为多样化、结构复杂, 可参与更为深入的生态互作^[18]。目前, 生物结皮相关研究多集中于冻原、沙地及荒漠等干旱-半干旱极端环境^[19], 但关于我国西南喀斯特区湿润环境中生物结皮对土壤侵蚀的影响研究则鲜有报道。在喀斯特区高异质性环境中尤其是石漠化生境, 土壤侵蚀特征可能显著区别于其他地区, 虽然已有研究成果具有一定的借鉴意义, 但其适用性仍然有限。量化湿润区生物结皮对土壤分离的阻控效应及其驱动因素, 对于深入理解生物结皮在土壤抗侵蚀方面的作用具有特殊意义, 并能进一步完善其在生态系统恢复与重建中的应用价值。

我国西南喀斯特区因独特的地质背景及农业集约化生产, 人地矛盾尖锐, 水土流失和石漠化等土地退化问题尤为突出, 生态环境亟待改善^[20]。地质岩性是影响小流域地形地貌、土壤基质及植被的重要因素, 对土壤侵蚀过程具有深远影响^[21]。该区域内碳酸盐岩与非碳酸盐岩母质交错分布, 白云岩和碎屑岩为典型代表, 形成了喀斯特地带与非喀斯特地带土壤复区分布的独特格局^[22]。白云岩岩土界面分明, 土壤质地黏重且富钙, 利于钙凝腐殖质积累; 碎屑岩土层深厚, 土壤质地较轻。研究表明, 白云岩与碎屑岩因矿物组成及风化速率差异, 其土壤性质、岩土组构及石砾含量显著不同^[23-24], 进而可能对以白云岩和碎屑岩为下垫面的土壤侵蚀过程产生深刻影响。喀斯特区地质背景复杂, 岩性差异较大, 生物结皮及其下覆土壤表现出高空间异质性, 目前关于不同岩性条件下生物结皮对土壤分离及其驱动因素的研究尚显薄弱, 制约了对喀斯特区侵蚀效应的深入理解, 也限制了土地资源的合理利用。鉴于此, 本研究从岩性差异出发, 围绕生物结皮在调控土壤侵蚀方面的作用, 利用土壤分离能力、细沟可

蚀性和临界剪切力等定量表征手段, 揭示不同岩性条件下生物结皮的近地表特征、土壤性质及其对土壤分离与侵蚀阻力的影响。此研究为生物结皮的生态功能认识、资源管理与高效利用提供重要参考, 并为构建西南喀斯特区土壤侵蚀过程模型提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西河池市环江毛南族自治县木连屯小流域 ($24^{\circ}43'58.9''$ — $24^{\circ}44'48.8''$ N, $108^{\circ}18'56.9''$ — $108^{\circ}19'58.4''$ E) (图 1), 海拔 272.0~647.2 m, 呈现典型的喀斯特峰丛洼地与非喀斯特地貌交错并存的地貌类型。属亚热带季风气候, 山地气候显著, 雨热条件充沛, 年均气温 $18\sim20$ °C, 年均降水量 1300~1600 mm, 年均日照量约为 1451 h, 无霜期达 329 d。区内地表土壤主要为白云岩和碎屑岩发育形成的石灰土和红壤。其中, 白云岩区土层浅薄且分布不连续, 长期水土流失致基岩裸露约 15%, 表面多覆盖碎石, 土壤质地以粉壤土和黏壤土为主; 碎屑岩区土层较深厚, 土壤质地以壤土和壤砂土为主。流域内以山地和丘陵为主, 土地资源相对破碎, 适宜种植柑橘、柚子等耐旱果树, 果园为主要农业用地类型。受充足水热条件影响, 研究区生物结皮主要为苔藓结皮, 优势种类包括毛口藓 (*Trichostomum brachydontium*)、匐灯藓 (*Plagiommium cuspidatum*) 和薄壁卷柏藓 (*Racopilum cuspidigerum*) 等。

1.2 样品采集

在前期野外调查的基础上, 选取以苔藓为优势种的结皮样地, 采用网格法划分 $30\text{ cm}\times30\text{ cm}$ 样方测算结皮盖度, 用电子设备拍照并通过 Image-Pro Plus 验证, 将盖度设置为 5 个等级 (1%~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80% 和 80%~100%), 以无结皮覆盖的裸地作为对照。用电子游标卡尺测定生物结皮层厚度, 重复 20 次。用链条法测量地表糙度 (链条为长 1 m, 宽 3 mm 金属链条), 重复 10 次。用铝盒采集样方内不同处理原状苔藓结皮, 进行风干遮光保存。糙度计算公式为:

$$C = (1 - L_2 / L_1) \times 100\% \quad (1)$$

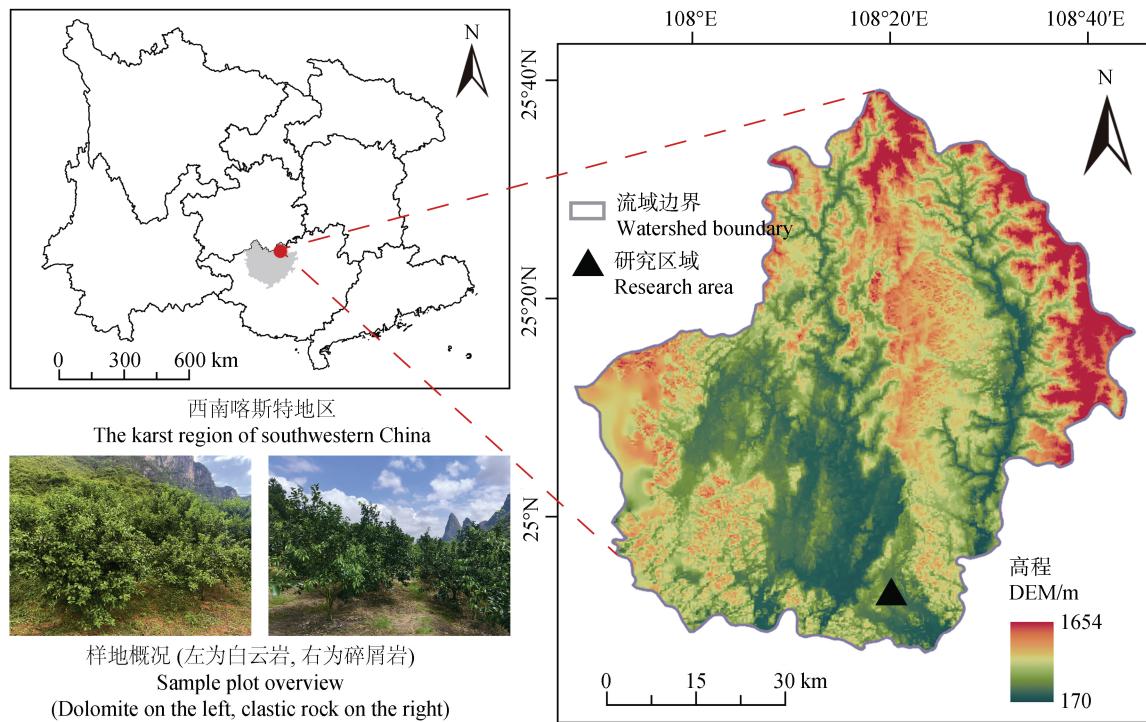


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the research area

式中, C 为糙度, %; L_1 为链条实际长度, cm; L_2 为链条铺设在地面后的水平长度, cm。

根据不同盖度处理, 采用 100 cm^3 小环刀取样重复 3 次, 用剖面刀采集 $0\sim5 \text{ cm}$ 原状土样和散土样, 各重复 3 次, 均用于土壤理化性质分析。冲刷土样采用大环刀(直径 10 cm , 高 7 cm)采集, 选取较为平整的坡面, 剪除杂草且用软毛刷扫去地表枯落物, 将大环刀垂直压入土壤, 确保土体完整进入环刀。当环刀上沿与生物结皮层平齐时盖上顶盖, 取出后并削去底部多余土壤, 盖好底盖封存, 用于土壤分离试验。

1.3 生物结皮层及下覆土壤理化性质测定

将风干后遮光保存的苔藓结皮放入网筛冲洗, 洗净后收集放至铝盒, 于烘箱中 85°C 杀青 30 min , 65°C 烘干至恒重, 称重计算单位面积苔藓生物量。散土样混匀风干后过 2 mm 筛, 用于测定以下指标: 土壤质地采用马尔文 MS2000 型激光粒度仪测定; 土壤容重采用环刀法测定; pH 采用酸度计测定(土水比为 $1:2.5$); 有机质采用硫酸-重铬酸钾氧化-外加热法测定。原状土样采用湿筛法测定水稳定性团聚体, 团聚体稳定性采用平均质量直径(MWD)进

行评价, 计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) \quad (2)$$

式中, MWD 为平均质量直径, mm; x_i 为两个相邻筛孔的平均直径, mm; w_i 为剩余在第 i 级筛子上的团粒质量占土样总质量的百分比。

1.4 水动力学特性测定

采用尺寸为 $3.8 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的变坡水槽(图 2)进行径流冲刷试验, 坡度可在 $0\sim57.74\%$ 范围调节。为模拟原生地表稳定糙度, 于水槽底部用鱼珠胶粘一层过 2 mm 筛的试验土样。水槽顶端连接规格为 $0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 的稳流槽, 流量由阀门组控制并通过电磁流量计观测。水流表面流速通过高锰酸钾染色法测定, 记录流过距水槽出水口 0.8 m 以上 2 m 的测区所需时间, 重复 10 次取平均值作为平均表面流速(\bar{V})。同时测定水温(T), 计算水运动黏滞系数(ν)和雷诺数(Re)判断水流流态, 通过校正系数(k)与平均表面流速(\bar{V})计算平均流速(V)。雷诺数、平均流速、径流深、水流剪切力计算公式为:

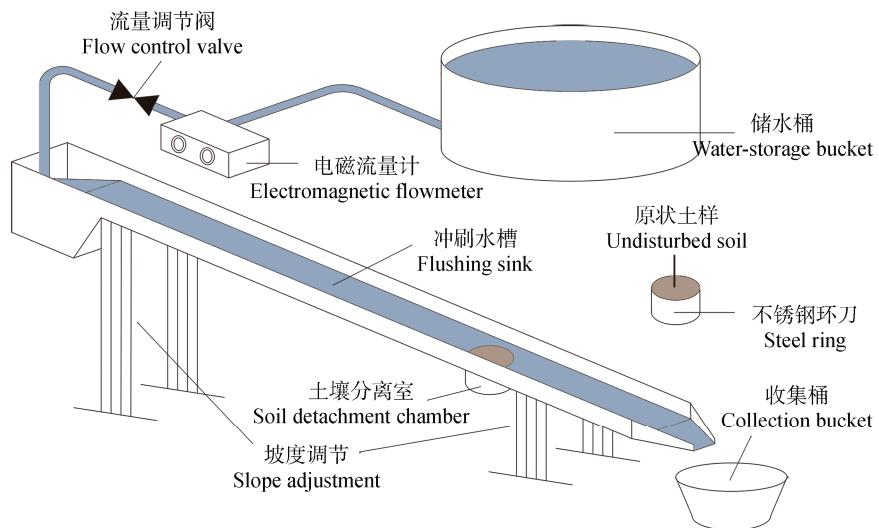


图 2 土壤分离试验装置示意图
Fig. 2 Diagram of the soil detachment experimental apparatus

$$Re = \frac{\bar{V}R}{\nu} \quad (3)$$

$$V = k\bar{V} \quad (4)$$

$$h = \frac{Q}{BV} \quad (5)$$

$$\tau = \rho ghJ \quad (6)$$

$$\nu = \frac{1.775 \times 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (7)$$

式中, Re 雷诺数, 无量纲; \bar{V} 为水流表面平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; R 为水力半径, m ; ν 为水运动黏滞系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; V 为水流平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为校正系数, 紊流取 0.8; h 为径流深, m ; Q 为流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; B 为水槽宽度, m ; τ 为水流剪切力, Pa ; ρ 为水密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; J 为径流能坡, 其值为坡度正弦值; T 为水温, $^\circ\text{C}$ 。

本研究通过不同坡度 (8.75%~46.63%) 和放水流量 ($0.20\sim1.00 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$) 组合, 设置 5 组水动力条件进行冲刷试验, 水流剪切力介于 $1.68\sim12.87 \text{ Pa}$, 其水动力学特性^[25]见表 1。各处理在不同侵蚀动力下重复冲刷 3 次, 共计 180 次有效冲刷试验。

1.5 土壤分离能力测定

试验在广西大学林学院试验基地进行。为保证冲刷土样的含水率相对一致, 试验前将大环刀土样

静置于水中, 水面保持在生物结皮表层以下, 8 h 后达到饱和状态, 随后取出并放于阴凉处静置 8 h 以去除重力水。冲刷前调试冲刷水槽的坡度和流量至设定值, 将土样移入土壤分离室, 确保其表面与水槽底部水平。进行冲刷试验时, 当观测生物结皮的冲破面积 $\geq 0.785 \text{ cm}^2$ 时, 记录结皮冲破时间 (t), 待土样任意位置的冲刷深度达到约 2 cm 时, 立刻停止冲刷, 记录冲刷总历时 (T)^[26]。将冲刷后的土样置于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重, 称量泥沙质量。土壤分离能力 (D_c) 计算公式为:

$$D_c = \frac{\Delta W}{AT} \quad (8)$$

式中, D_c 为土壤分离能力, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; ΔW 为冲刷输移土样质量, kg ; A 为环刀面积, m^2 ; T 为冲刷总历时, s , 上限 20 min。

细沟可蚀性 (K_r) 通过 WEPP 模型中相关公式估算细沟可蚀性指数和临界剪切力, 对径流剪切力下的土壤分离能力和径流剪切力进行线性回归, 拟合直线的斜率即为细沟可蚀性, 拟合直线在 x 轴上的截距为临界剪切力。公式如下:

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad (9)$$

式中, K_r 为细沟可蚀性指数, $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$; τ 为水流剪切力, Pa ; τ_c 为临界剪切力, Pa ; K_r 和 τ_c 被称为土壤侵蚀阻力参数。

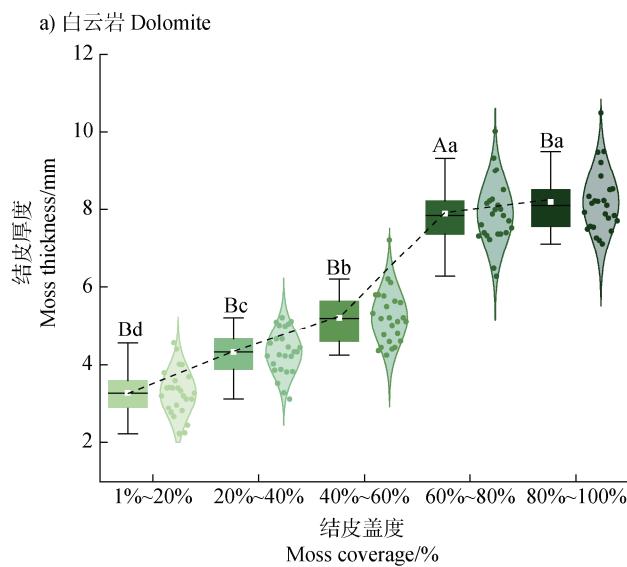
表1 不同水流剪切力下的坡面径流水动力学特性

Table 1 Hydrodynamic characteristics of slope runoff under different shear forces of water flow

流量 Flow rate/ (L· s ⁻¹)	坡度 Slope/%	平均流速 Average flow velocity/ (m· s ⁻¹)	径流深 Runoff depth/mm	流态 Flow state	水流剪切力 Shear force/Pa
0.20	8.75	0.51	1.97	紊流	1.68
0.40	17.63	0.82	2.44	紊流	4.15
0.60	26.79	1.04	2.89	紊流	7.34
0.80	36.40	1.41	2.84	紊流	9.53
1.00	46.63	1.61	3.11	紊流	12.87

1.6 数据统计分析

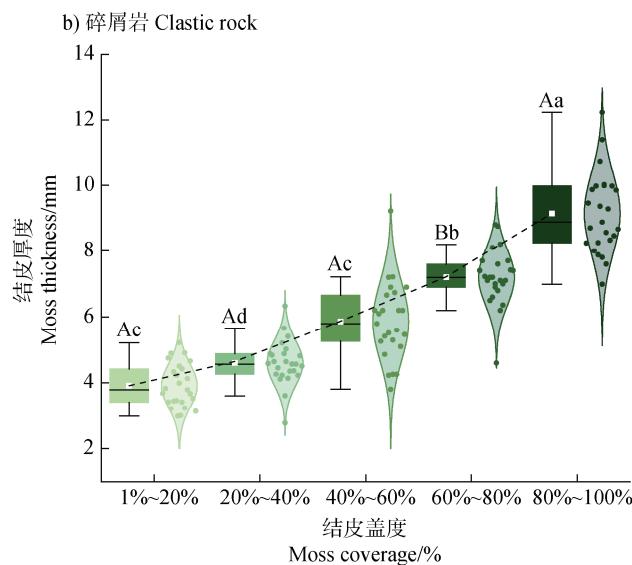
采用 Excel 2019 和 SPSS 19 软件进行数据处理与分析。不同盖度结皮生长指标、土壤性质及土壤分离能力差异性检验利用单因素方差分析 (One-way ANOVA)，不同岩性间相关指标差异通过独立样本 *t* 检验。通过回归分析拟合结皮盖度与其生长特性、结皮冲破时间、相对分离速率和细沟可蚀性之间关系。使用 Pearson 相关分析揭示土壤分离及侵蚀阻力与各指标之间相关性，进一步采用逐步回归识别影响土壤分离及侵蚀阻力主要因素。利用 Origin 2021 和 Photoshop 2021 软件拟合及绘图。



2 结果

2.1 生物结皮盖度对其生长特性的影响

两种岩性结皮覆盖后厚度变化规律如图 3。两种岩性结皮盖度变化显著影响结皮厚度 ($P<0.05$)，白云岩与碎屑岩发育结皮厚度均随着盖度等级增大而显著增大。白云岩发育结皮厚度变化范围在 2.22~10.49 mm 之间，平均结皮厚度为 $3.27\pm0.59\sim8.18\pm0.80$ mm，呈弱到中度变异 (CV 为 9.78%~18.00%)，其中，60%~80% 与 80%~100% 结皮高盖度处理间差异不显著。碎屑岩发育结皮厚度介于 2.97~12.23 mm



注：不同小写字母表示同一岩性结皮覆盖不同盖度水平之间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示相同盖度水平不同岩性结皮覆盖之间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between different lithological crusts covering the same cover level, while different uppercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between different cover levels of the same lithological crust. The same as below.

图3 不同结皮盖度的厚度变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of moss thickness under different coverages

之间, 平均厚度为 $3.91\pm0.65\sim9.14\pm1.21$ mm, 呈中度变异 (CV 为 $11.54\%\sim19.86\%$)。两种

岩性之间结皮厚度均差异显著 ($P<0.05$), 除 $60\%\sim80\%$ 盖度处理外, 其他盖度处理的结皮厚度均表现为碎屑岩显著高于白云岩。对于结皮糙度变化规律如图 4。仅碎屑岩发育结皮中高盖度处理 ($40\%\sim100\%$) 的结皮糙度显著大于低盖度处理 ($1\%\sim40\%$) 及裸土 ($P<0.05$)。白云岩发育结皮糙度变化为 $3.33\%\sim14.89\%$, 平均结皮糙度为 $7.70\pm2.45\%\sim10.05\pm2.90\%$, 呈中度变异 (CV 为

$20.59\%\sim31.89\%$)。碎屑岩发育结皮糙度为 $3.52\%\sim10.26\%$, 平均结皮糙度为 $4.61\pm0.44\%\sim8.78\pm1.25\%$, 呈弱到中度变异 (CV 为 $9.62\%\sim22.38\%$)。除高盖度处理 ($60\%\sim100\%$) 外, 白云岩发育结皮糙度显著高于碎屑岩 ($P<0.05$)。结皮生物量变化规律特征如图 5。两种岩性发育结皮高盖度处理 ($60\%\sim100\%$) 的生物量均显著高于中低盖度处理 ($1\%\sim60\%$) ($P<0.05$)。白云岩发育结皮生物量变化范围为 $0.18\sim1.17$ g·dm⁻², 平均生物量为 $0.22\pm0.14\sim0.99\pm0.16$ g·dm⁻²。碎屑岩发育结皮生物量为 $0.29\sim$

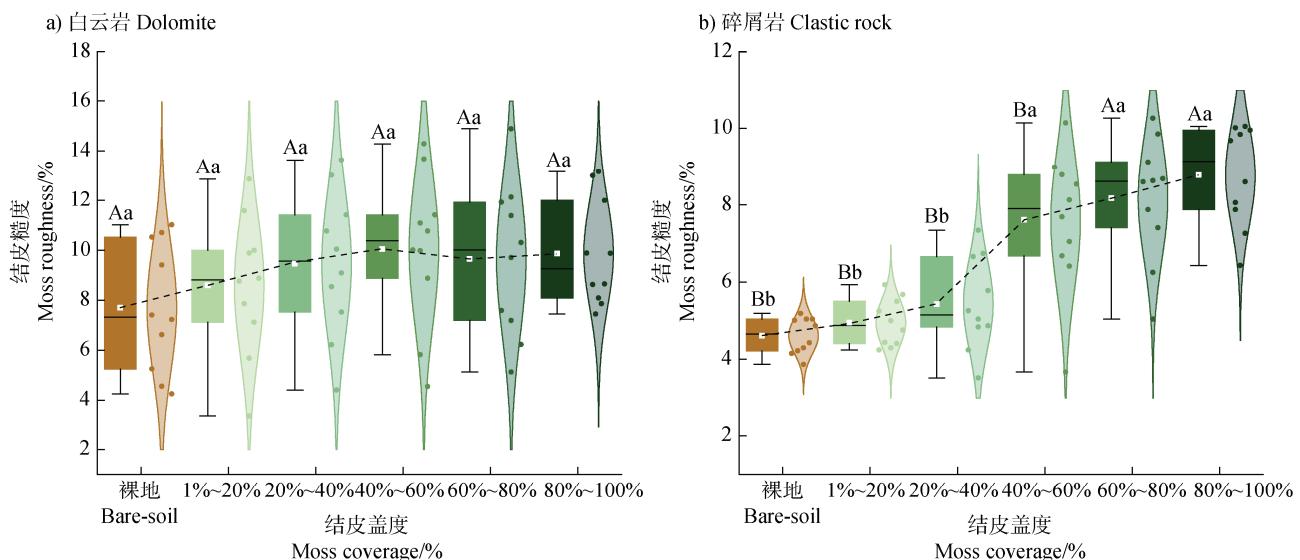


图 4 不同结皮盖度的糙度变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of moss roughness under different coverages

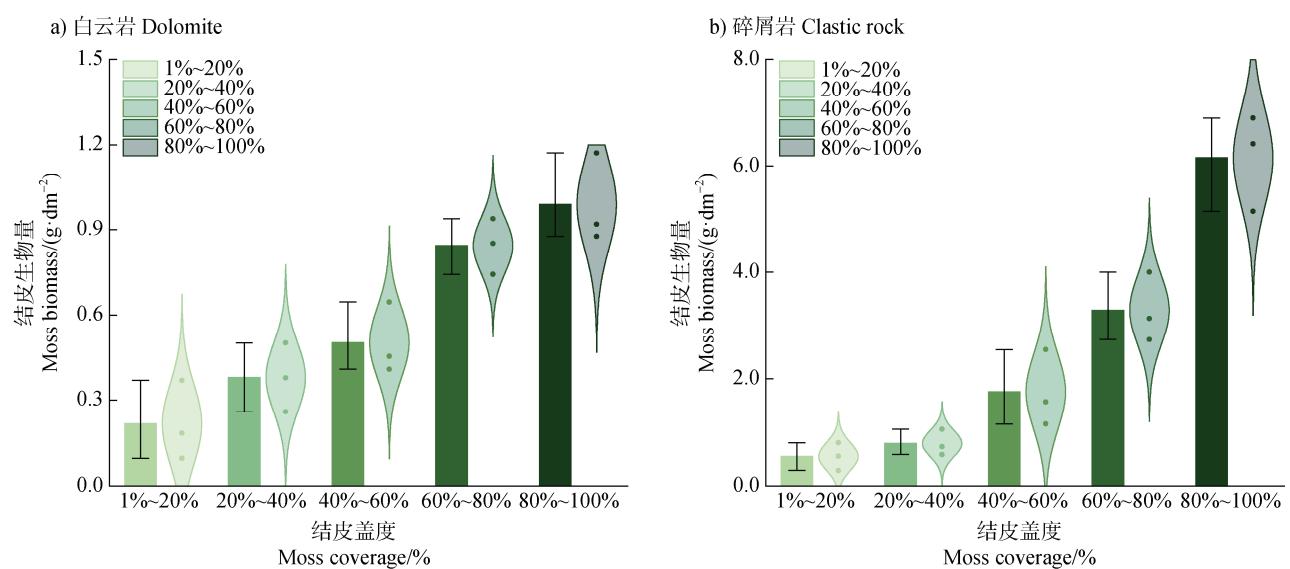
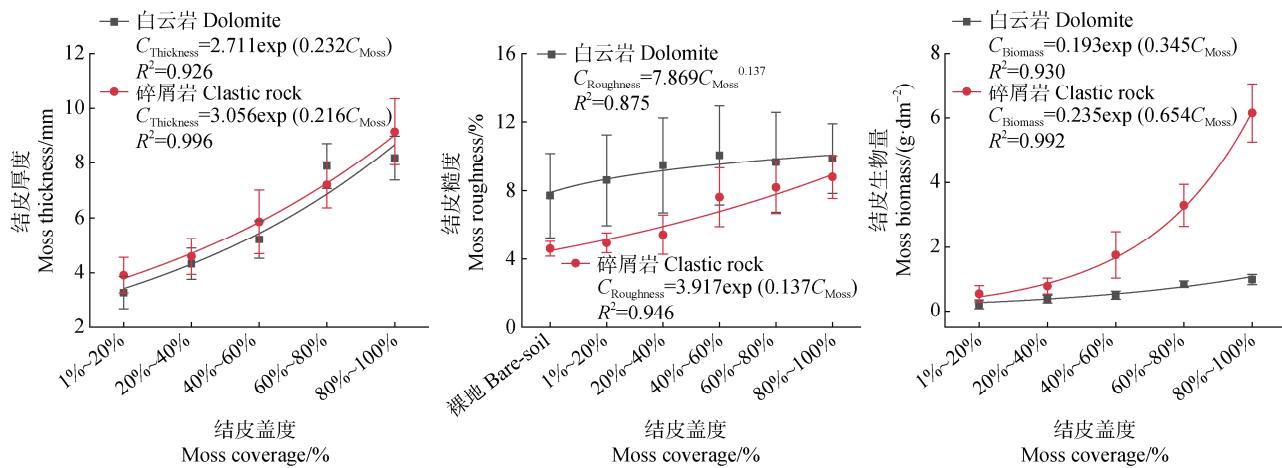


图 5 不同结皮盖度的生物量变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of moss biomass under different coverages

$6.90 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-2}$, 平均生物量为 $0.55 \pm 0.26 \sim 6.16 \pm 0.91 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-2}$ 。两种岩性之间仅中高盖度处理(40%~100%) 的生物量表现为碎屑岩显著高于白云岩



注: C_{Moss} 为结皮盖度, $C_{\text{Thickness}}$ 为结皮厚度, $C_{\text{Roughness}}$ 为结皮糙度, C_{Biomass} 为结皮生物量。下同。Note: C_{Moss} is moss coverages, $C_{\text{Thickness}}$ is moss thickness, $C_{\text{Roughness}}$ is moss roughness, and C_{Biomass} is moss biomass. The same as below.

图 6 结皮生长特性与结皮盖度(C_{Moss})的回归关系

Fig. 6 Moss growth characteristics as a regression relationship of moss coverages (C_{Moss})

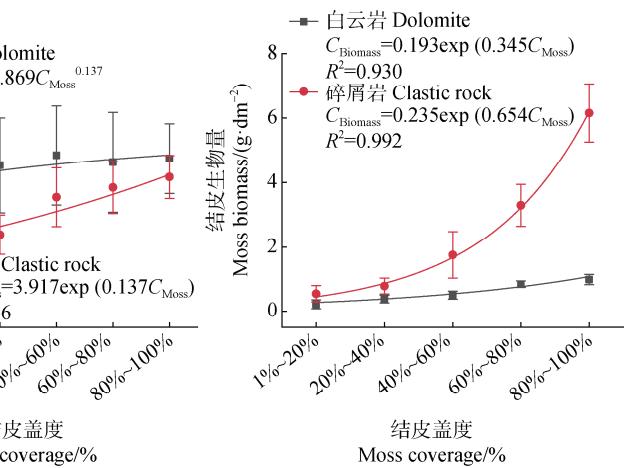
2.2 生物结皮盖度对土壤性质的影响

方差分析结果表明土壤理化性质受岩性和结皮发育显著影响($P<0.05$), 呈弱变异性, 且不同结皮盖度等级间存在一定差异。如表2所示, 白云岩和碎屑岩发育土壤有机质含量、粉粒含量、黏粒含量、水稳定性团聚体和平均质量直径均随结皮盖度增大而显著增加, 土壤容重、砂粒含量显著减少, 仅pH表现出相反的趋势。白云岩和碎屑岩结皮覆盖的土壤性质与裸地对照具有显著差异($P<0.05$)。其中, 白云岩结皮覆盖土壤有机质含量、粉粒含量、黏粒含量、水稳定性团聚体和平均质量直径平均增加3.20%、3.44%、27.99%、5.26%和9.30%, pH、土壤容重和砂粒含量平均减少1.60%、6.45%和13.86%; 碎屑岩结皮覆盖土壤pH、有机质含量、粉粒含量、黏粒含量、水稳定性团聚体和平均质量直径平均增加1.24%、7.70%、8.19%、86.03%、12.61%和27.72%, 土壤容重和砂粒含量平均减少5.54%和12.54%。独立样本t检验表明, 白云岩发育土壤pH、有机质含量、机械组成、水稳定性团聚体和平均质量直径显著高于碎屑岩($P<0.05$), 土壤容重显著低于碎屑岩($P<0.05$)。

2.3 生物结皮盖度对土壤分离能力的影响

土壤分离能力变化受结皮覆盖影响。因此, 土

($P<0.05$)。回归分析表明, 两种岩性发育结皮随其盖度增加, 仅有白云岩发育结皮糙度呈幂函数增加, 其余生长指标呈指数函数增加(图6)。



壤分离能力由生物结皮各盖度处理的土壤分离能力平均值代替。不同岩性发育土壤分离能力随结皮盖度变化如表3和表4。方差分析结果表明, 碎屑岩发育土壤分离能力显著强于白云岩, 且结皮盖度等级对土壤分离能力具有显著影响($P<0.05$), 各岩性发育土壤分离能力均随结皮盖度增加而呈现明显递减趋势。白云岩和碎屑岩发育裸地土壤分离能力为结皮覆盖土壤的2.64倍~5350.00倍和2.93倍~1300.00倍, 平均土壤分离能力分别从裸地的 $0.3324 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.297 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低至盖度为80%~100%的 $0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.0010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与裸地相比, 结皮覆盖土壤分离能力分别减少62.05%~99.98%和65.82%~99.92%, 可见80%~100%盖度时所产生的土壤侵蚀几乎可以忽略不计。生物结皮盖度亦显著影响结皮冲破时间($P<0.05$), 随着结皮盖度增加, 结皮冲破时间逐渐变长, 与1%~20%盖度相比, 白云岩和碎屑岩各盖度结皮冲破时间分别平均延长29.72%、68.92%、122.31%、182.69%和23.41%、75.19%、472.82%、615.85%。回归分析结果表明, 结皮冲破时间随着结皮盖度等级呈指数增长(图7)。

为方便量化和区别本研究与其他研究中结皮覆盖对土壤侵蚀速率的影响, 选取相对土壤分离速率

表 2 不同结皮盖度下白云岩和碎屑岩发育土壤性质变化

Table 2 Variation of soil properties in dolomite and clastic rock-developed soils under different moss coverages

岩性 Lithology	结皮盖度 Moss coverage/%	pH	有机质 Organic matter/ (g· kg ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g· cm ⁻³)	机械组成 Mechanical composition			水稳定性团聚体 Water-stable aggregates/%	平均质量直径 Mean weight diameter/mm		
					砂粒 Sand/%						
					粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%					
白云岩	裸地	7.88Aa	33.30Ac	1.21Ba	39.32Ba	47.02Ab	13.66Ab	82.57Ac	2.28Ac		
Dolomite	Bare soil										
	1~20	7.74Ac	33.11Ac	1.18Bab	35.90Bb	49.31Aa	14.79Ab	84.77Abc	2.27Ac		
	20~40	7.84Aab	33.17Ac	1.16Bb	36.80Bb	47.79Aab	15.41Ab	86.52Aab	2.42Ab		
	40~60	7.77Abc	34.04Ab	1.11Bc	31.87Bc	48.46Aab	19.67Aa	87.45Aab	2.53Aab		
	60~80	7.69Ac	35.55Aa	1.11Bc	33.15Bc	48.37Aab	18.49Aa	87.82Aa	2.61Aa		
	80~100	7.73Ac	35.95Aa	1.10Ac	31.63Bc	49.25Aa	19.11Aa	88.02Aa	2.63Aa		
碎屑岩	裸地	6.27Bb	16.93Bc	1.30Aa	58.72Aa	36.17Bc	5.12Bc	42.91Bc	0.57Bd		
Clastic rock	Bare soil										
	1~20	6.34Bab	16.80Bc	1.30Aa	57.44Aa	35.46Bc	7.10Bb	46.74Bab	0.58Bd		
	20~40	6.36Ba	18.24Bb	1.28Aab	52.73Ab	37.38Bbc	9.90Ba	46.45Bbc	0.71Bc		
	40~60	6.39Ba	18.26Bb	1.22Abc	51.30Ab	38.48Bb	10.22Ba	48.93Bab	0.74Bbc		
	60~80	6.33Bab	18.51Bb	1.20Acd	48.14Ac	42.46Ba	9.39Ba	49.26Bab	0.81Bab		
	80~100	6.32Bab	19.36Ba	1.14Ad	47.15Ac	41.86Ba	10.98Ba	50.23Ba	0.80Ba		

注: 砂粒为 2~0.05 mm, 粉粒为 0.05~0.002 mm, 黏粒为 <0.002 mm。下同。Note: 2~0.05 mm for sand, 0.05~0.002 mm for silt, and <0.002 mm for clay. The same below.

表 3 白云岩结皮覆盖土壤分离能力 (D_c) 和结皮冲破时间 (t) 统计特征Table 3 Statistical characteristics of soil detachment capacity (D_c) and moss breakthrough time (t) under dolomite moss coverages

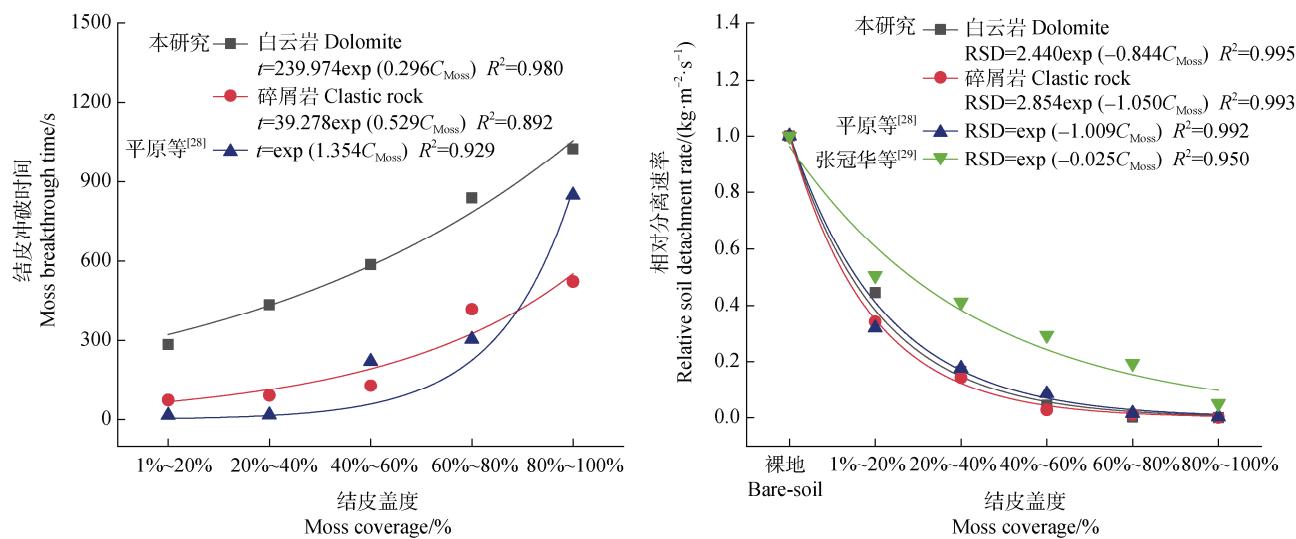
结皮盖度 Moss coverage/%	土壤分离能力						结皮冲破时间		
	Soil detachment capacity/ (kg· m ⁻² · s ⁻¹)						Moss breakthrough time/s		
	最小值			最大值			均值		
	Minimum	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean
裸地 Bare soil	0.0021	0.8775	0.3324±0.3469Ba	—	—	—	—	—	—
1~20	0.0010	0.4025	0.1481±0.1579Bb	4.55	1200	284.5±488.4Ac			
20~40	0.0004	0.1401	0.0548±0.0566Bb	11.61	1200	436.1±522.6Abc			
40~60	0.0002	0.0367	0.0145±0.0143Ab	56.83	1200	587.1±537.9Aabc			
60~80	0.0000	0.0023	0.0009±0.0009Bc	77.81	1200	838.8±493.8Aab			
80~100	0.0000	0.0002	0.0001±0.0001Bc	237.6	1200	1024±373.0Aa			

(Relative soil detachment rate, RSD) 作为指标。其中, 相对土壤分离速率为结皮覆盖土壤分离能力与裸地土壤分离能力的比值^[27]。回归分析如图 7 所示,

随着生物结皮盖度增加, 相对土壤分离速率呈指数衰减。与裸地相比, 白云岩和碎屑岩结皮覆盖为 20%~40% 时其相对土壤分离速率分别大幅降低

表4 碎屑岩结皮覆盖土壤分离能力 (D_c) 和结皮冲破时间 (t) 统计特征Table 4 Statistical characteristics of soil detachment capacity (D_c) and moss breakthrough time (t) under clastic rock moss coverages

结皮盖度 Moss coverage/%	土壤分离能力 Soil detachment capacity/ (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)			结皮冲破时间 Moss breakthrough time/s		
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean
裸地 Bare soil	0.0126	3.323	1.297±1.326Aa	-	-	-
1~20	0.0064	1.067	0.4432±0.4032Ab	0.91	327.0	73.22±117.4Bb
20~40	0.0026	0.4721	0.1856±0.1710Ab	1.35	364.0	90.36±124.8Ab
40~60	0.0005	0.0920	0.0358±0.0355Ab	2.14	507.0	128.3±176.7Bab
60~80	0.0003	0.0386	0.0149±0.0159Ab	4.73	1200	419.4±528.0Aab
80~100	0.0001	0.0024	0.0010±0.0010Ac	3.74	1200	524.2±584.4Aa

图7 结皮冲破时间 (t)、相对分离速率 (RSD) 与结皮盖度 (C_{Moss}) 的回归关系Fig. 7 Moss breakthrough time (t) and relative soil detachment rate (RSD) as a regression relationship of moss coverages (C_{Moss})

83.11%和74.46%，随后缓慢下降并相对稳定。

2.4 生物结皮盖度对土壤侵蚀阻力的影响

根据WEPP模型，将土壤分离能力与水流剪切力进行线性回归，拟合不同结皮盖度的土壤侵蚀阻力参数（细沟可蚀性和临界剪切力）。如表5、表6所示，白云岩、碎屑岩结皮覆盖土壤细沟可蚀性分别介于0.0001~0.0810 s·m⁻¹、0.0002~0.3101 s·m⁻¹，各岩性发育土壤细沟可蚀性均随着结皮盖度的增加而呈现明显递减趋势。与裸地相比，白云岩和碎屑

岩结皮覆盖土壤细沟可蚀性分别降低了54.57%~99.98%和69.11%~99.93%。白云岩结皮覆盖的平均细沟可蚀性（0.0107 s·m⁻¹）小于碎屑岩结皮覆盖（0.0296 s·m⁻¹），但独立样本t检验表明两者无显著差异。此外，白云岩和碎屑岩发育结皮土壤临界剪切力分别介于2.67~3.08 Pa和2.64~3.04 Pa，均呈现无规律变化趋势。进一步分析（图8）表明，两种岩性发育土壤均随着结皮盖度的增加细沟可蚀性呈指数衰减。

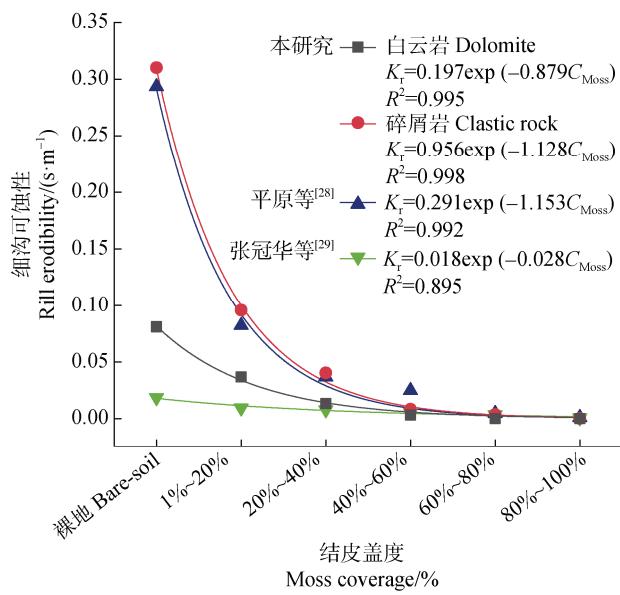
表 5 不同结皮盖度下白云岩发育土壤细沟可蚀性 (K_r) 和临界剪切力 (τ_c) 的变化Table 5 Variation of rill erodibility (K_r) and critical shear stress (τ_c) in dolomite-developed soils under different moss coverages

Moss coverage/%	Regression equation	Rill erodibility/ (s· m ⁻¹)	Critical shear stress/Pa	R^2
				结皮盖度
裸地 Bare soil	$D_c=0.0810-0.2442$	0.0810	3.01	0.930
1~20	$D_c=0.0368\tau-0.1134$	0.0368	3.08	0.923
20~40	$D_c=0.0132\tau-0.0391$	0.0132	2.96	0.924
40~60	$D_c=0.0034\tau-0.0094$	0.0034	2.80	0.942
60~80	$D_c=0.0002\tau-0.0006$	0.0002	2.91	0.904
80~100	$D_c=0.0001\tau-0.0001$	0.0000	2.67	0.863

注: D_c 为土壤分离能力, τ 为水流剪切力。下同。Note: D_c for soil detachment capacity, τ for water flow shear. The same below.

表 6 不同结皮盖度下碎屑岩发育土壤细沟可蚀性 (K_r) 和临界剪切力 (τ_c) 的变化Table 6 Variation of rill erodibility (K_r) and critical shear stress (τ_c) in clastic rock-developed soils under different moss coverages

Moss coverage/%	Regression equation	Rill erodibility/ (s· m ⁻¹)	Critical shear stress/Pa	R^2
				结皮盖度
裸地 Bare soil	$D_c=0.3101\tau-0.9095$	0.3101	2.93	0.932
1~20	$D_c=0.0958\tau-0.2385$	0.0958	2.49	0.972
20~40	$D_c=0.0403\tau-0.1014$	0.0403	2.51	0.951
40~60	$D_c=0.0082\tau-0.0227$	0.0082	2.76	0.913
60~80	$D_c=0.0037\tau-0.0111$	0.0037	3.04	0.900
80~100	$D_c=0.0002\tau-0.0006$	0.0002	2.64	0.886

图 8 细沟可蚀性 (K_r) 与结皮盖度 (C_{Moss}) 的回归关系Fig. 8 Rill erodibility (K_r) as a regression relationship of moss coverages (C_{Moss})

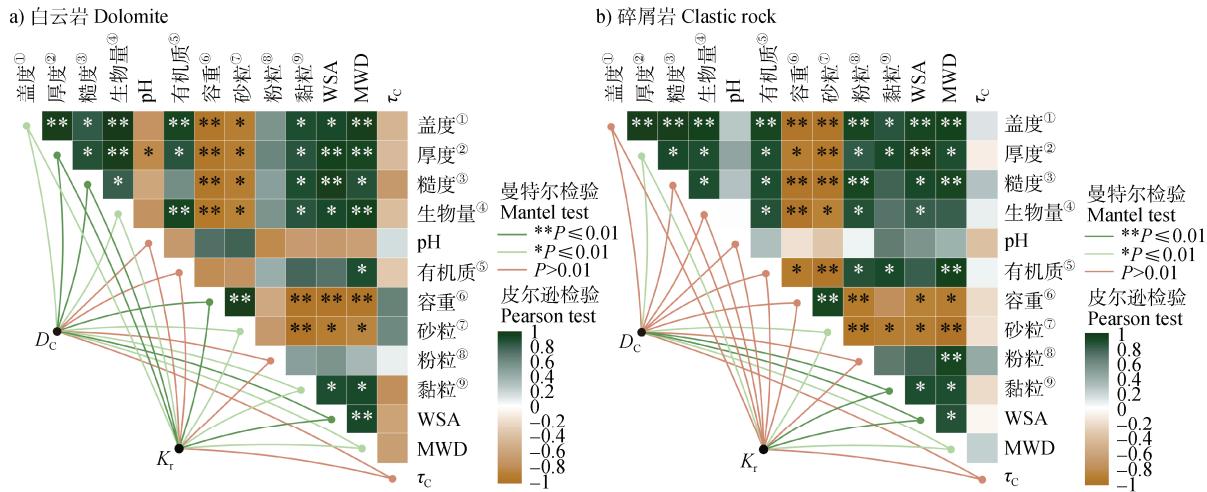
2.5 土壤分离过程主要影响因素

图 9 相关分析显示, 两种岩性发育土壤分离能力和细沟可蚀性与生物生长因子及土壤理化性质存在相关性, 临界剪切力与所有指标无显著关联。对于结皮生长因子, 白云岩土壤分离能力和细沟可蚀性与结皮盖度、厚度、糙度和生物量呈显著或极显著负相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 碎屑岩土壤分离能力和细沟可蚀性仅与结皮厚度呈显著负相关 ($P<0.05$)。对于土壤理化性质而言, 白云岩和碎屑岩土壤分离能力和细沟可蚀性与黏粒含量、水稳定性团聚体和平均质量直径呈显著或极显著负相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 但白云岩与土壤容重、砂粒含量呈显著或极显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 碎屑岩与砂粒含量呈显著正相关 ($P<0.05$)。此外, 两种岩性发育土壤结皮生长因子指标间均密切相关。除了 pH, 其他土壤理化性质指标间及其与结皮生长

因子存在密切相关。

为了进一步验证基于相关性分析评价结果的准确性, 明确影响土壤分离及侵蚀阻力的主控因素, 本研究以土壤分离能力 (D_c) 和细沟可蚀性 (K_r) 为自变量, 以与自变量呈显著相关水平以上 ($P < 0.05$) 相关指标为因变量进行逐步回归分析(表 7)。

对白云岩结皮覆盖土壤分离能力和细沟可蚀性起主导作用的是水稳定性团聚体和平均质量直径, 其解释率为 99.4% 和 99.8%; 对碎屑岩结皮覆盖土壤分离能力和细沟可蚀性起主导作用的是水稳定性团聚体, 其解释率为 84.5% 和 83.2%。上述结果表明, 岩性差异对土壤分离及侵蚀阻力的影响因素差异较大。



注: D_c 为土壤分离能力, K_r 为细沟可蚀性, τ_c 为临界剪切力, WSA 为水稳定性团聚体, MWD 为平均质量直径。下同。Note:

① Coverage, ②Thickness, ③ Roughness, ④ Biomass, ⑤Organic matter, ⑥ Bulk density, ⑦ Sand, ⑧ Silt, ⑨ Clay; D_c for soil detachment capacity, K_r for rill erodibility, τ_c for critical shear stress, WSA for water-stable aggregates, and MWD for mean weight diameter. The same as below.

图 9 土壤分离及侵蚀阻力、结皮生长特性和土壤性质相关系数矩阵

Fig. 9 Correlation matrix of soil detachment and erosion resistance, moss growth characteristics, and soil properties

表 7 不同岩性结皮覆盖影响土壤分离及侵蚀阻力的主控因素

Table 7 Dominant factors of soil detachment and erosion resistance under different lithological moss coverages

岩性 Lithology	最优拟合公式 Best-fit formula	R^2	F	P
白云岩 Dolomite	$D_c = -0.087X_1 + 0.411X_2 + 6.580$	0.994	392.424	0.000
碎屑岩 Clastic rock	$K_r = -0.020X_1 + 0.074X_2 + 1.547$	0.998	1507.972	0.000
	$D_c = -0.177X_3 + 8.723$	0.845	28.194	0.006
	$K_r = -0.042X_3 + 2.070$	0.832	25.707	0.007

注: X_1 表示白云岩-水稳定性团聚体 WSA, X_2 表示白云岩-平均质量直径 MWD, X_3 表示碎屑岩-水稳定性团聚体 WSA。Note: X_1 denotes dolomite-water stable aggregates WSA, X_2 denotes dolomite-mean weight diameter MWD, and X_3 denotes clastic rock-water stable aggregates WSA.

3 讨论

3.1 生物结皮发育对结皮表面特征及下覆土壤特性的影响

生物结皮的发育不仅体现在盖度变化上, 厚度、糙度和生物量等指标也呈现显著变化, 并对土壤的

内在属性、侵蚀阻力及可蚀性产生潜在影响^[28]。本研究表明, 随着结皮生长发育, 上述指标呈幂函数或指数函数增长趋势。与裸地或 1%~20% 低盖度相比, 结皮生长特性明显提高, 80%~100% 高盖度表现尤为突出, 且各指标之间存在显著相关性 ($P < 0.05$), 这表明厚度、糙度和生物量是衡量生物

结皮生长发育的重要表征指标^[29]。白云岩和碎屑岩结皮覆盖总体比较中,发现后者结皮发育状况优于前者,与 Bowker 等^[30]研究结论相反,即高等藓类植物更适于钙质土壤生长。这种差异可能源于喀斯特区白云岩发育土壤具有高浓度钙镁离子和高 pH 特性, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 过量会抑制苔藓的孢子萌发及丝状体发育,同时藓类植物更适应微酸性环境,与肖露梅等^[31]研究结果一致。结皮发育受限的原因还包括白云岩土层不连续、土壤与母岩结合力差以及高水分渗透性等因素,极大削弱了表层土壤的水分储存能力,且由于其表面多覆盖碎石,显著抑制了结皮的水平扩展和垂直堆积^[32]。

在喀斯特区由于受地质背景和母岩类型的影响,同等水热条件下土壤的内在属性表现出明显差异,但生物结皮的发育仍能显著影响或改变表层土壤的理化性质^[33]。本研究发现,白云岩和碎屑岩结皮层发育均显著提高了土壤有机质含量和黏粒含量,降低土壤容重和砂粒含量,改善土壤团粒结构及其稳定性,与前人研究结果一致^[15, 34]。生物结皮能进行光合作用吸收固定光合同化碳,同化碳会以胞外多糖分泌和残体分解等方式输入土壤,促进表层有机质的富集,有利于团聚体的形成并改善土壤结构^[35]。细粒物质是生物结皮形成的前提条件和物质基础,结皮发育增加了土壤表面粗糙度,捕获大气降尘能力也逐渐增强,促使优化土壤粒度组成,间接减少砂粒含量百分比,使土壤颗粒趋于细化,整体呈向均匀和对称分布演化的趋势^[36],这一过程对喀斯特地区土壤发育演变过程具有积极影响。土壤结构在结皮作用下表现出更高稳定性,除结皮层的发育促进粗粉砂风化增加黏粒含量外^[37],主要归因于络状菌丝体的机械束缚和微生物分泌物的黏结作用,加之苔藓的锚定结构^[38],显著提高了土壤机械强度和团聚体稳定性。相关系数矩阵显示,生物结皮发育显著改善了土壤结构(水稳定性团聚体和平均质量直径增加,容重减少),土壤抗侵蚀能力明显增强。生物结皮作为重要的生态过程,在一定程度上缓解或改变了因母岩类型影响导致的土壤表层性质差异。生物结皮土壤较裸土在抗侵蚀方面的优势,不仅体现在其物理覆盖作用,还可能反映了土壤性质的综合变化,尤其在贫瘠且风化严重的喀斯特地区^[27]。

3.2 生物结皮发育对土壤分离过程的影响

本研究引入结皮冲破时间指标,发现随着结皮覆盖程度的增加,所需冲破时间逐渐延长,且白云岩和碎屑岩的结皮冲破时间与结皮盖度高度相关(分别为 $R^2=0.980$ 和 $R^2=0.892$),一定程度上可反映结皮盖度增加显著提升了土壤抗蚀性。已有研究表明,苔藓覆盖度超过 36%时生物结皮可完全保护土壤免受径流侵蚀^[39]。本研究结皮覆盖度达到 40%时,白云岩和碎屑岩土壤分离能力大幅降低 83.11% 和 74.46%,随后分离能力维持较低水平,80%~100% 盖度时土壤几乎不发生侵蚀,这与 Gao 等^[5]和冉茂勇等^[40]研究一致,表明高盖度的结皮覆盖可有效延缓或避免土壤侵蚀的发生。WEPP 模型分析显示,细沟可蚀性均随结皮盖度增加呈指数衰减趋势。正如前述,生物结皮通过“结皮-土壤”的长期复合生态反馈作用,改善了土壤性质和团聚体稳定性,从而提升土壤抗蚀性能。地下部分的菌丝和假根通过缠绕、捆绑表层土壤颗粒以及分泌物的胶结吸附作用,形成锚定结构,有效稳定土体结构,增强土壤抗侵蚀能力^[38]。此外,生物结皮的强稳定层状结构是其增强土壤抗蚀性能的关键之一。结皮覆盖度越高,其厚度和生物量的增加使结皮层状结构愈加强韧稳定,且藓结皮通常具有密集的丛状、垫状或毯状藓株,能通过其表面崎岖的形态影响地表径流的流程、滞留时间以及土-水接触面积,抵抗外界破坏干扰能力增强,从而能更好地减缓对下覆土壤的径流冲刷,抑制产流产沙^[41]。同时,生物结皮通过改变地表微地形、增加表面粗糙度,发挥截流消能作用,对坡面地表径流的形成具有一定调控效果^[42]。综上,生物结皮在喀斯特区对土壤抗蚀性具有重要的生态价值。

结皮对土壤保护作用与其表面覆盖呈正相关,这主要得益于结皮通过其类型组成、微观结构和生长指标等因素形成的复合体,有效保护易受侵蚀的表层土壤。一个常被忽视但合理的机制是,这些因素共同作用改变结皮层及其下覆土壤的固有特征,降低土壤可蚀性,影响土壤侵蚀发生过程^[12]。逐步回归分析表明,不同岩性结皮覆盖的土壤分离能力和细沟可蚀性受不同因素主导。白云岩结皮覆盖土壤分离能力和细沟可蚀性受控于水稳定性团聚体和平均质量直径,白云岩发育土壤中黏粒含量较高,与

钙质矿物结合有助于形成较大的团粒，有利于提高水稳定性团聚体的比例，不仅能增强土壤的抗侵蚀性能，同时还能提高土壤对水分的保持能力，减少表面径流的生成^[43]。因而，较大的平均质量直径土壤团聚体具有较强的分离阻控作用。相比之下，碎屑岩由于砂粒含量较高，不易形成团粒结构，受平均质量直径的影响较小，水稳定性团聚体则成为主导因素。这表明，不同岩性土壤的抗蚀性主导因素存在差异，这些差异可能源于土壤的矿物组成、质地特征及团粒结构等因素。

本研究还发现，碎屑岩发育裸地土壤分离能力实测值偏高，这可能与研究区内非喀斯特土壤受径流侵蚀严重、抗蚀性较差有关^[44]。与前人研究^[45]相比，相对土壤分离降低幅度不同的原因在于地质背景、土壤性质及年降雨量等环境因素的差异。此外，土壤分离能力和细沟可蚀性与结皮生长特性及土壤性质的多数指标显著相关($P<0.05$)，但临界剪切力与上述指标均未表现出显著相关性，这一结果与 Liu 等^[17]和张冠华等^[45]的研究一致，可能是因为临界剪切力对结皮生长特性和土壤属性细微差异的敏感性不如细沟可蚀性高，或其自身具有较大的随机性和不确定性。因此，后续研究仍需深入探讨临界剪切力的内在机制，进一步揭示其作用规律。

4 结 论

生物结皮发育可改善结皮生长特性和土壤性质，且受岩性影响显著($P<0.05$)；两种岩性发育结皮覆盖度增加能够显著降低相对土壤分离速率和细沟可蚀性，高盖度结皮覆盖可有效延缓或避免土壤侵蚀发生，土壤抗蚀性能明显提升；土壤分离及侵蚀阻力受结皮生长特性、土壤性质多因素影响，呈现显著或极显著相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$)；逐步回归表明，水稳定性团聚体是驱动白云岩和碎屑岩结皮覆盖土壤分离及侵蚀阻力变化特征的主要因素。因此，在西南喀斯特区生态系统恢复过程，可以通过提高或维持生物结皮覆盖水平等方式间接改变水稳定性团聚体含量，实现提高土壤结构稳定性，从而增强土壤的抗侵蚀能力。

参考文献 (References)

[1] Zhang G H. Advances in study of runoff detachment

processes based on hydraulics[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 395—402. [张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395—402.]

- [2] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2015, 124: 9—17.
- [3] Shi Z H, Song C Q. Water erosion processes: A historical review[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 1—10. [史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 1—10.]
- [4] Zhang G H. Potential effects of changes in near soil surface characteristics driven by farmland abandonment on soil erosion[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(4): 143—154. [张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 143—154.]
- [5] Gao L Q, Bowker M A, Sun H, et al. Linkages between biocrust development and water erosion and implications for erosion model implementation[J]. *Geoderma*, 2020, 357: 113973.
- [6] Zhang G H, Hu J J. Advances in soil-hydrology-erosion effects of biological soil crusts[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 1—8. [张冠华, 胡甲均. 生物结皮土壤-水文-侵蚀效应研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 1—8.]
- [7] Cao Y S, Xiao B, Li S L, et al. Effects of biocrusts on dustfall retention and soil fixation and their influencing factors in the Chinese Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(6): 1610—1625. [曹尤淞, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原生物结皮的纳尘与固土效应及其影响因素[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1610—1625.]
- [8] Liu Y M, Yang H Y, Li X R. Effects of biological soil crusts on soil microbial biomass in desert area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 394—401. [刘艳梅, 杨航宇, 李新荣. 生物土壤结皮对荒漠区土壤微生物生物量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 394—401.]
- [9] Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49: 96—105.
- [10] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Chamizo S, et al. Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion[J]. *Geomorphology*, 2012, 145: 81—89.
- [11] Guida G, Nicosia A, Settanni L, et al. A review on effects of biological soil crusts on hydrological processes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 243: 104516.
- [12] Gao L Q, Bowker M A, Xu M X, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 49—58.

- [13] Zhang G H, Ding W F, Pu J, et al. Effects of moss-dominated biocrusts on soil detachment by overland flow in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17 (10): 2418—2431.
- [14] Yang K, Zhao Y G, Ma X X. Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (1): 173—177. [杨凯, 赵允格, 马昕昕. 黄土丘陵区生物土壤结皮层水稳定性[J]. 应用生态学报, 2012, 23 (1): 173—177.]
- [15] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Lazaro R, et al. Cross-scale interactions between surface components and rainfall properties: Non-linearities in the hydrological and erosive behavior of semiarid catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 815—825.
- [16] Liu F, Zhang G H, Sun L, et al. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41 (7): 875—883.
- [17] Liu F, Zhang G H, Sun F B, et al. Quantifying the surface covering, binding and bonding effects of biological soil crusts on soil detachment by overland flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42 (15): 2640—2648.
- [18] Corbin J D, Thiet R K. Temperate biocrusts: Mesic counterparts to their better-known dryland cousins[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2020, 18 (8): 456—464.
- [19] Belnap J, Weber B, Büdel B. Biological soil crusts as an organizing principle in drylands[M]//*Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 3—13.
- [20] Guo F, Jiang G H, Yuan D X, et al. Evolution of major environmental geological problems in Karst areas of Southwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69 (7): 2427—2435.
- [21] Ma S B, An Y L, Yang G B. Analysis of vegetable NDVI variation on various lithology in Karst area based on GIS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24 (2): 202—206, 212. [马士彬, 安裕伦, 杨广斌. 基于GIS的喀斯特区域不同岩性基底植被NDVI变化分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24 (2): 202—206, 212.]
- [22] Yang Y F, Wei H, Wang J Y, et al. Infiltration characteristics and influencing factors of two types of lithological soils in Karst regions[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44 (6): 1103—1116. [杨源峰, 韦慧, 王建羽, 等. 喀斯特区两种岩性发育土壤入渗特征及其影响因素[J]. 农业现代化研究, 2023, 44 (6): 1103—1116.]
- [23] Wei H, Yang Y F, Wang J Y, et al. A comparison of preferential flow characteristics and influencing factors between two soils developed in the Karst region of Southwest China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 241: 106132.
- [24] Dong L L, He T B, Liu Y S, et al. Changes of soil physical-chemical properties derived from different parent materials/rocks in Karst Mountain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39 (3): 471—474. [董玲玲, 何腾兵, 刘元生, 等. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要理化性质差异性分析[J]. 土壤通报, 2008, 39 (3): 471—474.]
- [25] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 80 (1/2): 75—109.
- [26] Zhang G H. Uncertainty analysis of soil detachment capacity measurement[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (2): 1—6. [张光辉. 土壤分离能力测定的不确定性分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (2): 1—6.]
- [27] Knapen A, Poesen J, Galindo-Morales P, et al. Effects of microbiotic crusts under cropland in temperate environments on soil erodibility during concentrated flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32 (12): 1884—1901.
- [28] Wang H, Zhang G H, Li N 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.
- [29] Wang B, Zhang G H, Zhang X C, et al. Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 (2): 589—597.
- [30] Bowker M A, Belnap J, Davidson D W, et al. Correlates of biological soil crust abundance across a continuum of spatial scales: Support for a hierarchical conceptual model[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43 (1): 152—163.
- [31] Xiao L M, Zhang W, Wang C Y, et al. Functional traits of bryophytes and their response and adaptation to soil factors in different vegetation restoration methods in a typical Karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (23): 9769—9779. [肖露梅, 张伟, 王彩艳, 等. 典型喀斯特区不同植被恢复方式苔藓功能性状及其对土壤因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42 (23): 9769—9779.]
- [32] Liu W, Wang S J, Luo W J, et al. Comparative research on soil water movement between Karst and non-karst plots in Libo County of Guizhou Province, China[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39 (2): 137—149. [刘伟, 王世杰, 罗维均, 等. 贵州荔波喀斯特与非喀斯特地区土壤水运移的对比研究[J]. 地球与环境, 2011, 39 (2): 137—149.]
- [33] Zhao Y G, Xu M X, Wang Q J, et al. Physical and

- chemical properties of soil bio-crust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8): 1429—1434. [赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1429—1434.]
- [34] He M Z, Hu R, Jia R L. Biological soil crusts enhance the recovery of nutrient levels of surface dune soil in arid desert regions[J]. Ecological Indicators, 2019, 106: 105497.
- [35] Yang J G, Zhang L W, Guo X, et al. Vertical distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon under biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2946—2954. [杨军刚, 张玲卫, 郭星, 等. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮下土壤有机碳垂直分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2024, 44(7): 2946—2954.]
- [36] He F L, Guo C X, Wu H, et al. Effect of biological soil crust succession on soil texture, nutrient contents, and microbial populations of dune surfaces at the edge of the Minqin Oasis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6064—6073. [何芳兰, 郭春秀, 吴昊, 等. 民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮发育对浅层土壤质地、养分含量及微生物数量的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6064—6073.]
- [37] Zhang Y H, Zhang S Y, Zhang S H, et al. Effect of moss crust on sandy soil properties and bacterial community in Mu Us sandy land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1585—1597. [张雨虹, 张韶阳, 张树輝, 等. 毛乌素沙地苔藓结皮对沙化土壤性质和细菌群落的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1585—1597.]
- [38] Li N N, Zhang G H, Wang H, et al. Soil anti-erodibility influenced by biological crusts in Loess Hilly and Gully Region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1): 42—48. [李宁宁, 张光辉, 王浩, 等. 黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 42—48.]
- [39] Zhang B C, Wu Z F, Li B. Progress and prospect of biological soil crusts in Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1123—1131. [张丙昌, 武志芳, 李彬. 黄土高原生物土壤结皮研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1123—1131.]
- [40] Ran M Y, Zhao Y G, Liu Y L. Soil anti-scourability of biological soil crust with different coverage in Loess Hilly Region[J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(12): 43—45, 67. [冉茂勇, 赵允格, 刘玉兰. 黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究[J]. 中国水土保持, 2011(12): 43—45, 67.]
- [41] Guo Q, Wang Z L, Shen N, et al. Impacts of biocrusts on sheet erosion and its detachment- and transport-limited processes: A case study from the Loess Plateau, China[J]. Biosystems Engineering, 2022, 223: 18—28.
- [42] Zhang X Q, Long H Y, Liu T L, et al. Comparison of water absorption characteristic and water retention capacity of five epilithic mosses in the Karst areas of Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(6): 835—841. [张显强, 龙华英, 刘天雷, 等. 贵州喀斯特地区 5 种石生藓类的持水性能及吸水特征比较[J]. 中国岩溶, 2018, 37(6): 835—841.]
- [43] Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81—85. [卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81—85.]
- [44] Ping Y, Tan T H, Li Y C, et al. Soil properties change and soil detachment response driven by biocrusts in typical small watershed of DanJiangkou Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 87—94. [平原, 滕腾辉, 李雨晨, 等. 丹江口库区典型小流域生物结皮驱动土壤性质变化及分离响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 87—94.]
- [45] Zhang G H, Yi L, Ding W F, et al. Effects and mechanism of biocrusts on soil detachment process by overland flow in the Three Gorges Reservoir area[J]. Soils, 2021, 53(3): 610—619. [张冠华, 易亮, 丁文峰, 等. 三峡库区生物结皮对土壤分离过程的影响及其机制[J]. 土壤, 2021, 53(3): 610—619.]

(责任编辑: 檀满枝)