

DOI: 10.11686/cyxb2024514

http://cyxb.magtech.com.cn

张胜辉, 朱平宗, 罗伏林, 等. 典型地表覆盖物对西南丘陵山区梯田边坎土壤可蚀性的影响. 草业学报, 2025, 34(11): 40—52.

ZHANG Sheng-hui, ZHU Ping-zong, LUO Fu-lin, *et al.* Effects of typical surface cover types on the soil erodibility of terrace risers in the hilly regions of southwestern China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(11): 40—52.

典型地表覆盖物对西南丘陵山区梯田边坎土壤可蚀性的影响

张胜辉^{1,2}, 朱平宗^{1,2}, 罗伏林^{1,2}, 王定斌^{1,2}, 陈晓燕^{1,2*}

(1. 西南大学水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400716; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要:西南丘陵山区新建梯田边坎易受到降水冲刷, 进而形成侵蚀沟, 导致严重的水土流失问题。本研究在重庆市石柱县新建高标准农田区选取了草本植被覆盖、生物结皮覆盖和裸地(对照)梯田边坎, 探究了典型地表覆盖物对梯田边坎土壤可蚀性的影响。结果表明, 相较于裸地边坎, 草本植被覆盖和生物结皮覆盖显著提高了梯田边坎的土壤饱和导水率、团聚体平均质量直径、平均水滴数和粘聚力, 显著降低了梯田边坎土壤可蚀性K因子、崩解速率、最大崩解率和土壤可蚀性能综合指数(CSEI)。与裸地边坎相比, 草本植被覆盖和生物结皮覆盖边坎的CSEI分别降低了57.7%和35.6%, 然而, 不同覆盖类型的梯田边坎在不同生长周期内CSEI的变化规律存在差异: 裸地和草本植被覆盖的CSEI呈逐渐减小趋势, 裸地CSEI由0.82减小到0.60, 草本植被CSEI由0.45减小到0.14; 而生物结皮覆盖的CSEI则表现为先减小后增大, CSEI由7月的0.45减小到8月的0.24, 然后增大到11月的0.58。通径分析表明, 草本植被覆盖边坎CSEI变化主要由植被生长驱动的土壤结构变化引起; 生物结皮覆盖的边坎变化则与生物结皮的固结作用密切相关; 裸地边坎的变化则主要受有机质含量变化的影响。本研究揭示了梯田边坎不同覆盖类型对土壤可蚀性的影响机制, 为提升梯田边坎稳定性提供了理论支持和实践依据。

关键词:土壤可蚀性; 梯田边坎; 地表覆盖物; 水土流失

Effects of typical surface cover types on the soil erodibility of terrace risers in the hilly regions of southwestern China

ZHANG Sheng-hui^{1,2}, ZHU Ping-zong^{1,2}, LUO Fu-lin^{1,2}, WANG Ding-bin^{1,2}, CHEN Xiao-yan^{1,2*}

1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of Chongqing, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: In the hilly and mountainous areas of southwest China, newly constructed terraced field embankments are highly susceptible to rainfall erosion, which can lead to the formation of eroded gullies and severe soil and water losses. In this study, we investigated the effect of different surface cover types on the soil erodibility of embankments. The study was conducted in a newly developed high-standard farmland area in Shizhu County, Chongqing, and soils from terraced embankments with herbaceous vegetation cover, biological crust cover, and bare land cover (control) were analyzed. The results demonstrated that, compared with soil from bare land embankments, soils from embankments with herbaceous vegetation cover and biocrust cover showed significantly

收稿日期: 2024-12-26; 改回日期: 2025-03-10

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-LUX0005), 重庆市水利科技项目(CQSLK-2023016)和西南大学研究生科研创新项目(SWUS23088)资助。

作者简介: 张胜辉(2001—), 男, 重庆北碚人, 在读硕士。E-mail: zsh15922607551@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: c400716@126.com

increased saturated hydraulic conductivity, mean weight diameter of aggregates, average number of droplets, and soil cohesion, and significantly lower soil erodibility (K-factor), disintegration rate, maximum disintegration rate, and comprehensive soil erodibility index (CSEI). The CSEI of soils from embankments with herbaceous vegetation cover and biological crust cover was 57.7% and 35.6% lower, respectively, than the CSEI of soil from bare land embankments. The changes in the CSEI of soils from different types of embankments were monitored from mid-summer (July) to early winter (November). The CSEI of soils changed over time, and the pattern of change differed among the three types of embankments. The CSEI of soils from embankments with bare land cover and with herbaceous vegetation cover exhibited a gradually decreasing trend over time. The CSEI of soil from bare land embankments decreased from 0.82 to 0.60, and the CSEI of soil from embankments with herbaceous vegetation cover decreased from 0.45 to 0.14. In contrast, the CSEI of soil from embankments with biological crust cover first decreased (from 0.45 in July to 0.24 in August) and then increased (to 0.58 in November). Path analysis indicated that the changes in the CSEI of soil in embankments with herbaceous vegetation cover were mainly driven by soil structural changes due to vegetation growth; the changes in the CSEI of soil in embankments with biological crust cover were closely related to the consolidation effect of the biological crust; and the changes in the CSEI of the soil in bare land embankments were primarily influenced by changes in organic matter content. The results of this study reveal the mechanisms by which different cover types affect the erodibility of soils in terraced embankments, providing scientific technical data and practical guidance for improving the stability of these structures.

Key words: soil erodibility; terrace ridges; surface cover; soil erosion

土壤可蚀性是衡量土壤对外营力侵蚀敏感程度的关键指标^[1],对区域水土流失预测、水土保持措施的实施及生态环境的改善具有重要意义^[2]。西南山区以丘陵山地为主。在《国务院关于全国土地整治规划(2016—2020年)的批复》^[3]实施背景下,该地区大部分耕地正在开展坡改梯的土地整治工程,梯田面积迅速增加。梯田边坎作为坡改梯工程的重要组成部分,不仅在防止水土流失,保持耕地的水分和养分方面发挥重要作用,还能显著延长梯田的使用寿命。然而,西南地区梯田边坎普遍具有坡面陡且高(通常在1 m以上,部分甚至可达2 m)的特点,在降水条件下,边坎坡面径流动能显著增强,对边坎坡面的冲刷可能导致沟蚀,严重时甚至引发边坎坍塌,威胁梯田的稳定性和功能。因此,在坡改梯工程实施后,如何提升梯田边坎土壤抗蚀能力,增强长期稳定性,已成为西南山区水土保持与土地整治亟待解决的核心问题。

植被恢复是提升土壤抗蚀性能、增强土地稳定性和阻控水土流失的有效措施,被广泛应用于不同地形和气候条件下。植被通过冠层覆盖消减雨滴动能,减少击溅侵蚀^[2,4-5],其冠层和茎秆对降水的截留作用减少了地表径流的形成^[6]。此外,植物根系通过物理锚固和化学粘聚作用增强土壤稳定性^[2,7-8],枯落物分解增加土壤有机质,促进团聚体形成并改善土壤结构,从而进一步降低土壤的可蚀性^[9]。生物结皮的发育在地表形成了一层致密的保护层^[10],有效削减雨滴击溅侵蚀。同时,其假根和菌丝通过缠绕和捆绑土壤颗粒,增强土壤团聚体的稳定性,降低土壤可蚀性^[11]。生物结皮在生长和代谢过程中产生多糖、酶等胞外分泌物^[12-13],进一步固定土壤颗粒,降低土壤可蚀性。

目前,关于梯田边坎的研究多集中于植物选择、配置方法及综合效益,研究热点包括生物边坎的护埂机理、生物边坎的生态功能提升以及水土保持的协同增效机制。在护埂机理研究方面,学者们通过根系—土壤互作研究揭示了深根植物的固土优势。Zhang等^[5]在黄土高原陡坡沟壑区的试验表明,白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等深根植物可显著降低土壤可蚀性67%以上,其根系网络通过增强土壤结构稳定性降低水土流失量。Wang等^[14]进一步量化了不同植被类型的护埂效能,发现深根系草地与灌木的土壤抗蚀性分别较耕地提升53%和77%,证实深根系的机械锚固与生物化学胶结作用具有更优的固土效应。在生态功能提升方面,生物结皮的水土保持机制研究取得重要突破。Liu等^[13]通过径流模拟试验证明,生物结皮可通过其表面覆盖、菌丝粘聚和孔隙调节三重机制,将坡面土壤剥蚀量降低至裸地的31%。Zhu等^[15]在三峡库区柑橘(*Citrus reticulata*)园的研究发现,生物结

皮通过促进有机质积累和土壤团聚体形成,可实现径流削减和水土流失量降低。然而,尽管已有研究关注植物选择及其配置对土壤水分、抗蚀性和生态效益的影响^[14-15],但关于草本植物和生物结皮对梯田边坎土壤可蚀性影响的研究目前仍未发现。特别是在西南丘陵山区复杂的地形条件下,新建高标准农田梯田边坎面临着严峻的水土流失问题,进而可能导致梯田边坎垮塌。因此,探究不同地表覆盖类型对土壤可蚀性的影响及其主控因素分析对于梯田边坎水土流失阻控和土地稳定性提升措施的布设具有重要意义,不仅能够有效提升边坎的生态和农业功能,还能为区域农业的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市石柱县鱼池镇高标准农田改造提升项目示范区(30°17'19" N, 108°14'4" E, 海拔 1082 m),地形为丘陵山区,属亚热带湿润季风气候,年均气温 12℃,降水量 1100 mm,夏季强降水频繁,侵蚀效应显著。土壤以紫色土和黄壤为主,土层浅、结构稳定性差。区域坡地资源丰富,但水土流失严重,特别是新建梯田边坎易受降水冲刷形成侵蚀沟,威胁边坎稳定性和农田可持续利用。

1.2 试验设计

本研究以 2022 年 11 月竣工的梯田工程为对象,在全面踏勘基础上以裸地边坎为对照选取两种典型的地表覆盖梯田边坎为试验处理(图 1):1)草本植被样地,优势种为马唐(*Digitaria sanguinalis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、土荆芥(*Dysphania ambrosioides*)、稗(*Echinochloa crusgalli*);2)生物结皮样地,优势种为苔藓结皮。样地筛选遵循均一性原则:1)各类型选取 3 条梯田边坎(埂长 30.0 m×坡高 1.5 m),坡度(55±2)°,坡向一致;2)草本样地植被覆盖度>40%,生物结皮样地覆盖度>25%,裸地样地覆盖度<5%;3)工程参数(夯筑工艺、土层厚度、养护周期)统一。每隔 20 d 进行动态监测,在每条边坎处设置 3 个采样点,均匀分布于中坡部,采样点按从左至右的顺序排列。采用野外采样与实验室分析相结合的方法,获取近地表土壤特征参数及可蚀性指标。每次野外测量和采样均避免在已受扰动区域进行。

1.3 近地表土壤性质和植被特性的测定

土壤性质测定:土壤容重、孔隙度和田间持水量采用环刀法^[7],每条边坎重复 3 次。测定过程中,用高 50 mm 和直径 50.46 mm 已知质量(m_0)和体积(V)的环刀在样地采集 0~5 cm 土层的原状土样,带回实验室后放入盆中,然后向盆中缓慢加水至 2~3 mm 水层,并保持水层深度不变,让土样自由吸水约 8 h 后,将环刀取出并用纸巾将环刀外壁水分擦干后称重(m_1),称重完成后将环刀重新放回盆内,继续加水直至水面低于环刀上端 2~3 mm,浸泡饱和后(约 10 h),将环刀放置到铺满风干土的盆内,环刀与风干土之间用滤纸隔开,让其自然排水 8 h 后称重(m_2),称量完成后将土样烘干(105℃, 24 h)并称重(m_3),则土壤容重(bulk density, BD)、总孔隙度(total porosity, TP)、毛管孔隙度(capillary porosity, CP)和田间持水量(field capacity, FC)计算公式如下所示:

$$BD = \frac{m_3 - m_0}{V} \quad (1)$$

$$TP = \left(1 - \frac{BD}{2.65}\right) \times 100 \quad (2)$$

$$CP = \frac{m_1 - m_3}{V} \times 100 \quad (3)$$

$$FC = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_0} \times 100 \quad (4)$$

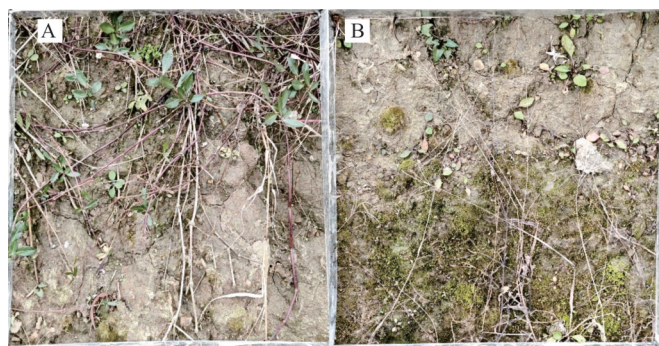


图 1 植被覆盖样地(A)与生物结皮覆盖样地(B)

Fig. 1 Vegetation-covered site (A) and biological crust-covered site (B)

此外,从每条边坎选取3个采样点的0~10 cm土层进行采样并混合,每条边坎共采集约1 kg的散状土壤样品。带回实验室自然风干后,去除砾石、枯落物及根系等杂质后,过2 mm土壤筛用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000,英国)测定土壤机械组成(砂粒、粉粒、粘粒的百分比);过0.25 mm筛采用重铬酸钾外加热法^[15]测定有机质含量,所有测定均重复3次。

植被与生物结皮特性测定:通过照相法^[15]测定植被盖度和生物结皮盖度。在试验点布设0.5 m×0.5 m样方框,用单反相机(EOS 850D,日本)从垂直坡面1 m处拍摄全景照片,利用Photoshop分析照片,计算植被和生物结皮的覆盖比例,每条边坎重复测定3次。生物结皮厚度用游标卡尺(精度0.01 mm)测量,每个监测点重复10次。

1.4 土壤可蚀性指标的测定

本研究基于前人研究^[1,3,5,11],选取可蚀性K因子、饱和导水率、土壤崩解速率、最大崩解率、平均重量直径、平均水滴数、土壤贯入阻力和粘聚力8个指标,以全面表征土壤的可蚀性。使用高63.7 mm、直径100 mm的环刀采集原状土样,采用常水头法测定土壤饱和导水率^[14-15],每个样地重复3次,共9个重复;使用高20 mm、直径61.8 mm的环刀采集原状土样,采用静水称重法^[16]测定土壤崩解速率和最大崩解率,每个样地重复3次,共9个重复;使用袖珍型贯入仪(Eijkelkamp 0603,荷兰)测量土壤贯入阻力,为消除土壤初始含水量对测定结果的影响,测定前用喷壶将选定的无扰动地表充分湿润至饱和,每条边坎测量20次取平均值;使用高20 mm、直径61.8 mm的环刀采集原状土样,通过直剪仪(ZJ,南京)测定粘聚力^[17],共3次重复;从每条边坎选择3个采样点,采集0~10 cm土层的土样并混合,每条边坎共采集约1 kg的原状土壤样品,采集后的土样置于塑料盒中,避免碰撞挤压土体,并在风干后采用湿筛法和水滴法^[11]测定团聚体平均重量直径和平均水滴数,每条边坎重复测量6次,共18个重复。土壤可蚀性K因子通过EPIC模型计算,并结合张科利等^[18]提出的中国土壤经验公式修正。

1.5 土壤可蚀性综合指数计算

为了综合评估土壤可蚀性能,基于测定的8个土壤可蚀性指标,采用加权求和法计算土壤可蚀性能综合指数(comprehensive soil erodibility index, CSEI),公式如下所示:

$$CSEI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (5)$$

式中:CSEI为土壤可蚀性能综合指数, W_i 为指标权重系数, S_i 为指标隶属度。 n 为指标数量(本研究中 $n=8$)。土壤可蚀性指标的权重通过因子分析法进行确定,隶属度得分采用“S”函数或反向“S”函数计算^[11,19]。

1.6 数据处理

不同地表覆盖物梯田边坎土壤性质、植被特性及可蚀性指标在整个调查期的整体差异采用单因素方差分析(ANOVA)法中的Duncan检验进行分析;土壤可蚀性能综合指数与近地表土壤理化性质之间的相关关系采用Pearson相关分析法进行分析。此外,采用通径分析法(path analysis)分析不同覆盖类型下梯田边坎CSEI变化的主要影响因素及其作用机制,并定量评估各因素对CSEI变化的直接与间接影响。所有统计分析均使用IBM SPSS Statistics 27软件完成,数据可视化则使用Origin 2021 Pro软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖类型梯田边坎土壤性质和植被特性的差异及其变化特征

草本植被覆盖边坎和生物结皮覆盖边坎的草本植被盖度、生物结皮盖度和生物结皮厚度分别为40.1%~54.8%、25.7%~37.1%和2.10~4.82 mm。草本植被盖度和生物结皮盖度的变化趋势基本一致,均呈先增加后减少的变化特征,且在10月10日达到峰值,分别为54.8%和37.1%。相比之下,生物结皮厚度的变化更为复杂,呈先增加、后减小、再增加的波动趋势,其峰值出现在9月,为4.82 mm(图2)。

不同植被覆盖边坎土壤物理性质存在差异。与裸地边坎相比,草本植被覆盖和生物结皮覆盖边坎的土壤砂粒含量和容重均显著降低,其中砂粒含量减少幅度达71.4%和56.6%,容重降低6.6%和8.4%。相反,土壤黏粒含量、总孔隙度、毛管孔隙度、田间持水量和有机质含量均显著提高,其中田间持水量增加14.0%和25.6%,有机质含量提升122.6%和110.6%。尽管粉粒含量略有增加,但差异不显著。此外,草本植被覆盖与生物结皮覆盖边坎之间的土壤性质比较显示,除田间持水量存在显著差异外,其他土壤物理性质均无显著差异(图3)。

不同覆盖类型梯田边坎近地表土壤性质随时间的变化存在差异(图4)。草本植被和生物结皮覆盖边坎的砂粒含量在9月达到峰值,10月30日降至最低,而黏粒含量呈相反趋势,其中草本植被覆盖边坎的黏粒含量在9月最低,10月10日升至最高值。裸地边坎的砂粒含量在9月最低,10月30日达到最高,而黏粒含量变化趋势相反。这一现象可以归因于9月发生了暴雨事件,24 h内降水达67.4 mm。强降水加剧了水土流失,尤其是在裸露的梯田边坎地区,细颗粒土壤(如粉粒和黏粒)易受到水流的冲刷和搬运,导致细颗粒的大量流失。随着这些细颗粒的流失,土壤中相对较大的颗粒——砂粒的比例逐渐增加。进入10月后,降水量减少,水土流失作用减弱,土壤结构逐渐稳定,因此,在10月的土壤质地测定中,砂粒含量提高。

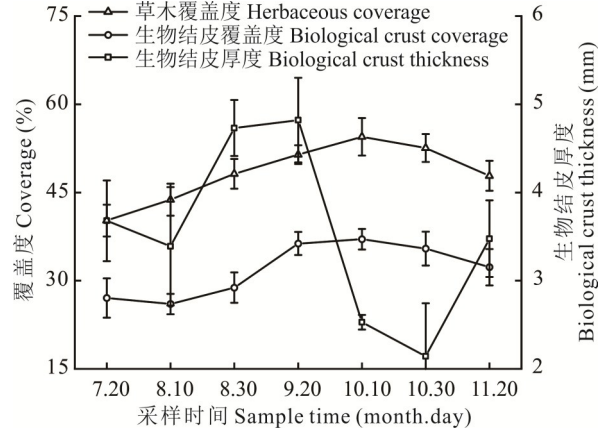


图2 草本植被和生物结皮生长特性

Fig. 2 Growth characteristics of herbaceous vegetation and biological crusts

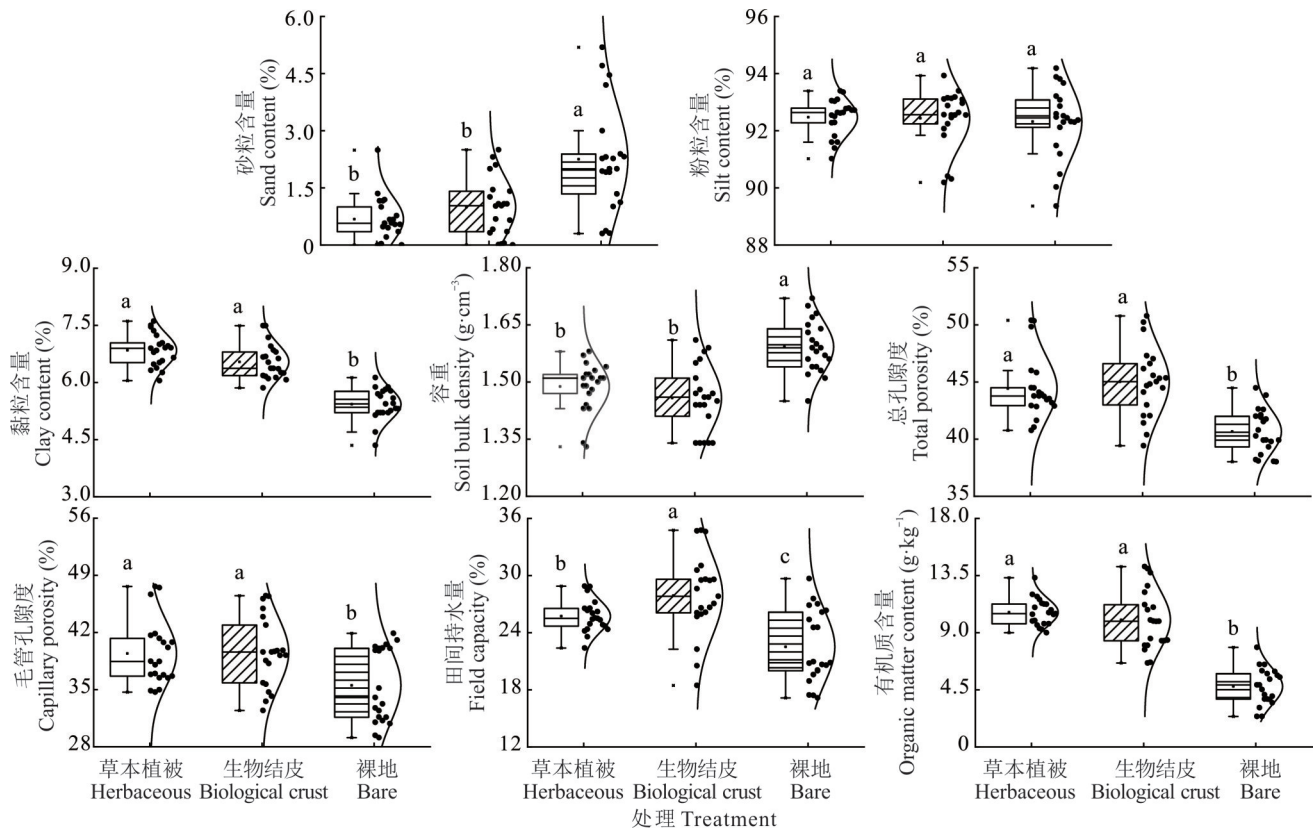


图3 不同地表覆盖类型梯田边坎近地表土壤性质差异

Fig. 3 Differences in near-surface soil properties of terrace embankments under different surface cover types

不同小写字母表示不同地表覆盖类型间差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different land cover types ($P < 0.05$). 下同 The same below.

3种覆盖类型的土壤容重均表现为先减小后增大趋势,其中草本植被覆盖边坎和裸地边坎的容重在10月最低,生物结皮覆盖边坎在9月最低。与容重变化相反,土壤总孔隙度、毛管孔隙度和田间持水量均表现为先增大后减小趋势。土壤有机质含量随时间的变化因覆盖类型不同而异,草本植被覆盖边坎无明显波动,生物结皮覆盖

边坎在 8 月 30 日达到峰值后逐渐下降,而裸地边坎的有机质含量随时间变化不断增加,从 7 月的 $4.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 11 月的 $5.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。生物结皮覆盖边坎的土壤黏粒含量、总孔隙度、毛管孔隙度和田间持水量与生物结皮厚度的变化趋势一致。

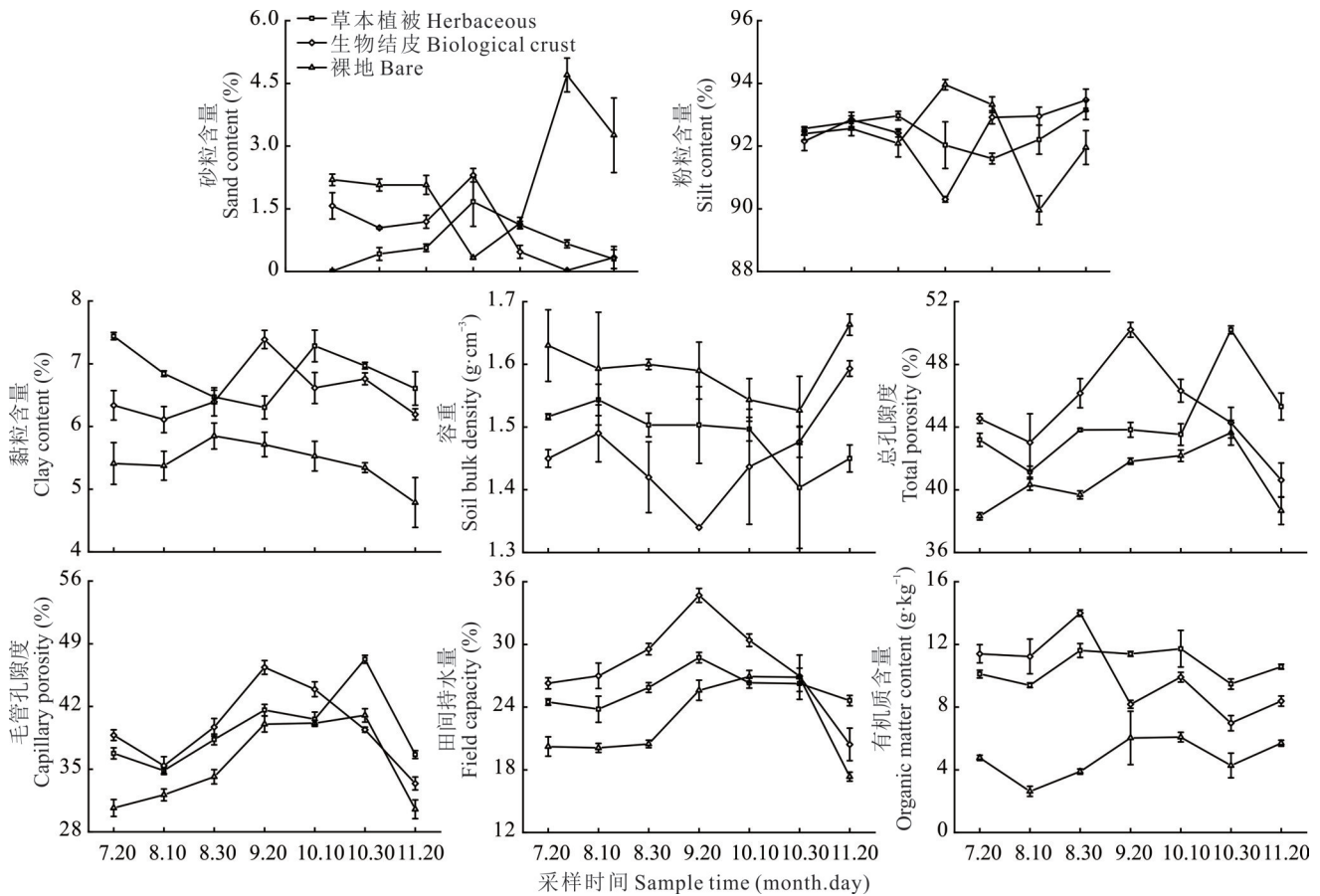


图 4 不同地表覆盖类型梯田边坎近地表土壤变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of near-surface soil in terrace embankments under different surface cover types

2.2 不同植被覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性指标的差异及其变化特征

不同覆盖类型梯田边坎的土壤可蚀性指标存在显著差异(图 5)。草本植被和生物结皮覆盖边坎的 K 因子、土壤崩解速率、最大崩解率和贯入阻力均显著低于裸地边坎,其中贯入阻力分别为 1079.8 和 1158.8 kPa,显著低于裸地边坎的 1791.0 kPa ($P < 0.05$)。相较于裸地边坎,饱和导水率、团聚体平均重量直径、平均水滴数和粘聚力显著提高,草本植被和生物结皮饱和导水率分别达到 0.53 和 $0.13 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,而裸地边坎仅为 $0.04 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。进一步比较草本植被与生物结皮覆盖边坎,除 K 因子无显著差异外,其他指标差异显著。例如,生物结皮覆盖边坎的土壤崩解速率和最大崩解率分别为 $2.0 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 26.1% ,显著高于草本植被覆盖边坎的 $1.1 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 17.6% ,而生物结皮覆盖边坎的贯入阻力更高。

不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性指标随时间的变化存在差异(图 6)。草本植被和生物结皮覆盖边坎的 K 因子在 9 月降到最低后逐渐增大,裸地边坎则在 7 月由 0.25 增至 9 月的 0.32 后又降至 11 月的 0.23。饱和导水率方面,草本植被覆盖边坎从 7 月的 $0.1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 增至 11 月的 $1.2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,生物结皮覆盖边坎在 8 月达到 $0.4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 后降至 11 月的 $0.1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,而裸地边坎无明显变化。3 种类型边坎土壤崩解速率和最大崩解率均随时间变化持续减少,草本植被和生物结皮覆盖边坎的崩解速率分别从 7 月的 1.66 和 $2.39 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 降至 11 月的 0.79 和 $2.01 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$,裸地边坎从 $6.35 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 减至 $2.48 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 。贯入阻力表现为先减小后增大趋势,草本植

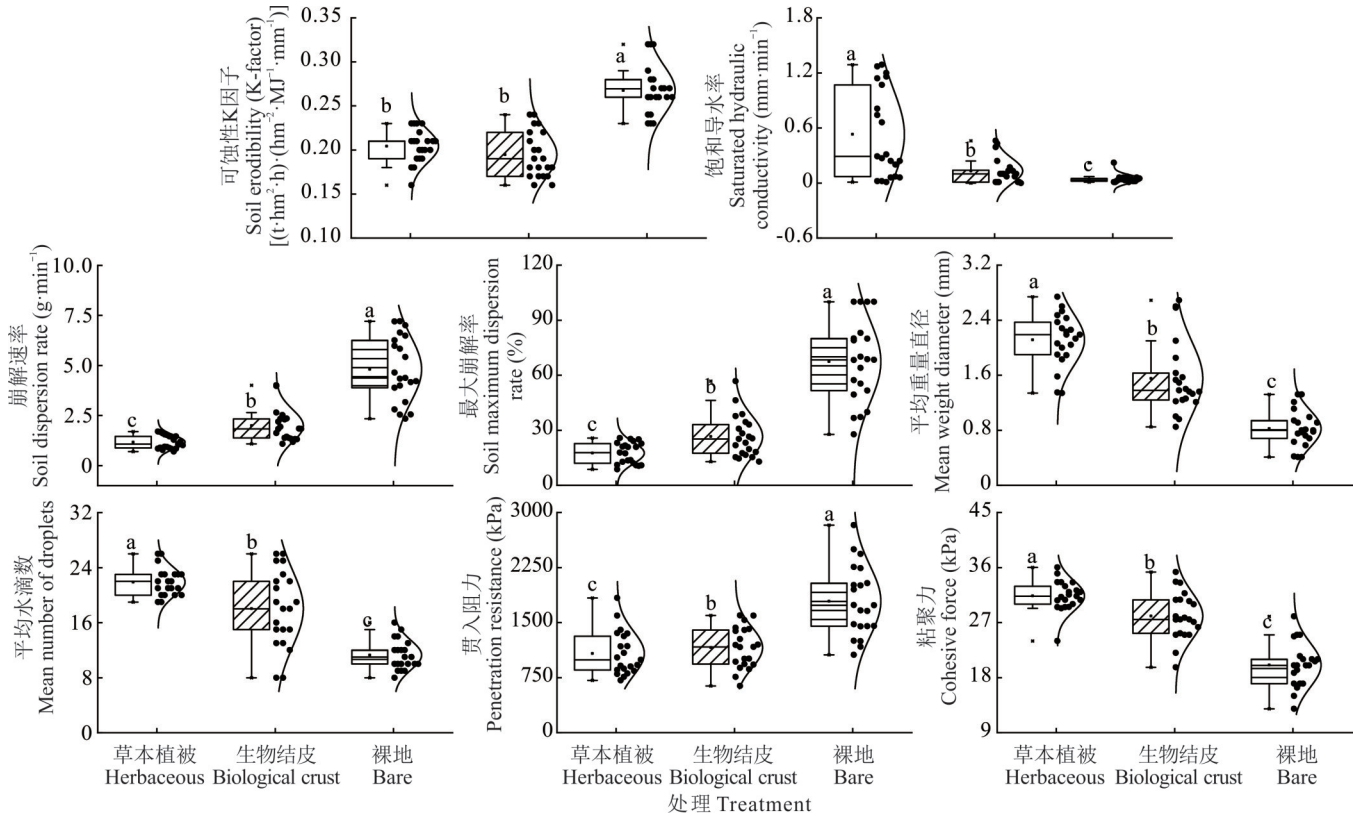


图5 不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性指标差异

Fig. 5 Differences in soil erodibility indicators of terrace embankments under different cover types

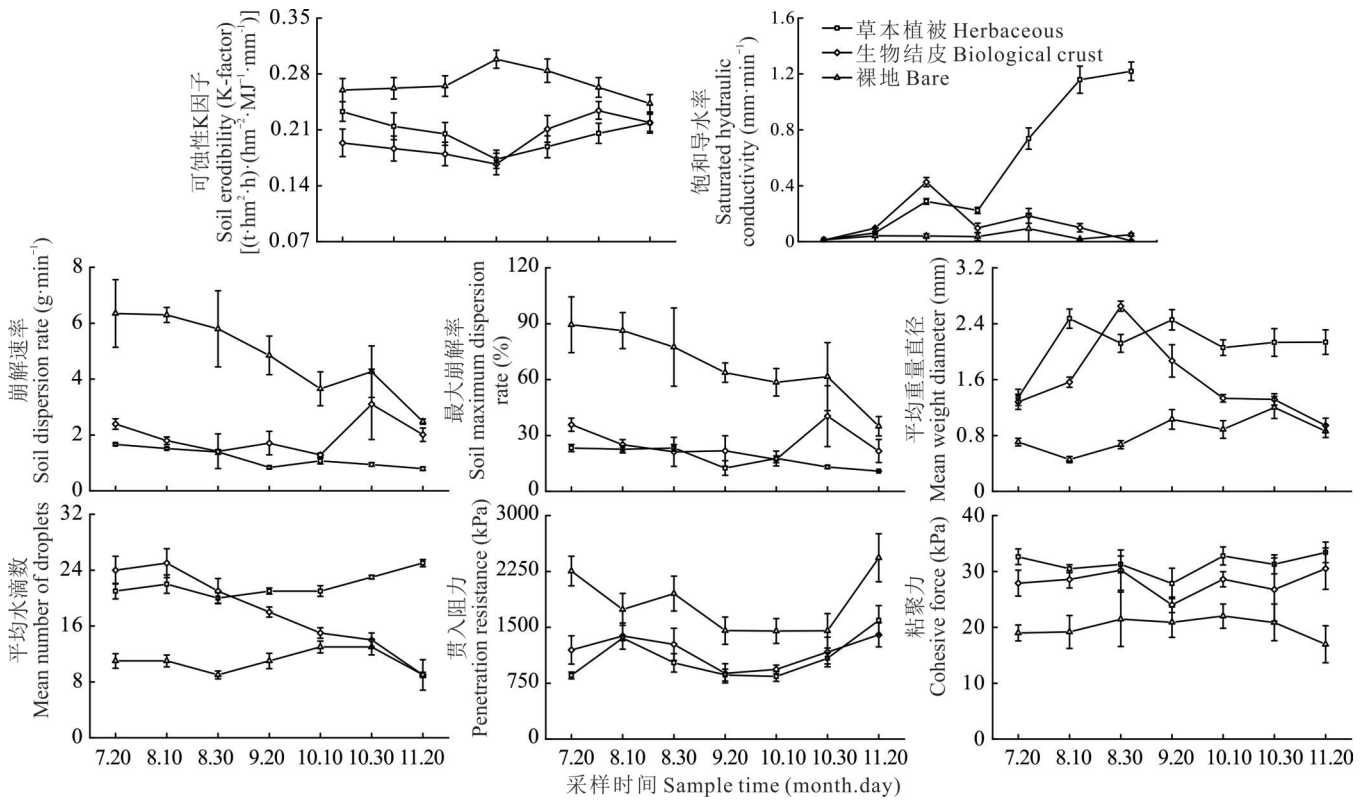


图6 不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性能变化

Fig. 6 Variation in soil erodibility indicators of edge ridges with different vegetation cover types

被和生物结皮覆盖边坎在 9 月最低,11 月达峰值,裸地边坎则从 7 月的 2255.1 kPa 降至 9 月的 1454.6 kPa 后增至 11 月的 2432.7 kPa。平均水滴数方面,草本植被覆盖边坎呈现持续缓增趋势,生物结皮覆盖边坎则从 7 月的 23.8 滴逐渐降至 11 月的 9.3 滴,而裸地边坎则随时间变化无明显变化趋势。平均重量直径也存在差异,草本植被覆盖边坎在 8 月 10 日达 2.47 mm 后趋于稳定,生物结皮覆盖边坎从 8 月 30 日的 2.65 mm 降至 11 月的 0.94 mm,裸地边坎则从 7 月的 0.71 mm 增至 11 月的 0.86 mm。3 种类型边坎土壤粘聚力随时间变化无明显变化趋势。

2.3 不同植被覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性能综合指数的差异及其变化特征

不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性能综合指数(CSEI)存在显著差异($P < 0.05$),总体上表现为裸地边坎 > 生物结皮覆盖边坎 > 草本植被覆盖边坎(图 7)。与裸地边坎相比,草本植被和生物结皮覆盖边坎 CSEI,分别显著降低了 57.7% 和 35.6%。

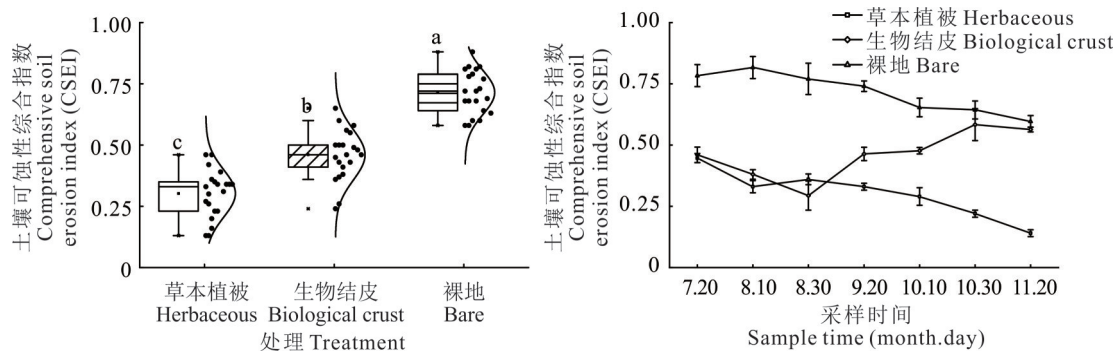


图 7 不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性综合指数差异及其变化特征

Fig. 7 Differences and variation in soil erodibility index for different vegetation cover types of edge ridges

草本植被覆盖和裸地边坎 CSEI 均呈逐渐减小的趋势,但草本覆盖边坎的 CSEI 下降幅度更明显。具体而言,草本植被覆盖边坎的 CSEI 从 0.45 降至 0.14,减小了 0.31;而裸地边坎的 CSEI 由 0.82 减少至 0.60,仅减小了 0.22。生物结皮边坎的 CSEI 表现为先减小后增大的变化趋势,从 2023 年 7 月 20 日至 8 月 30 日间生物结皮覆盖边坎的 CSEI 由 0.45 降至 0.24,随后逐渐上升至 0.58。值得注意的是,在 7—8 月期间,生物结皮覆盖边坎的 CSEI 下降速率高于同期裸地边坎的下降速率(图 7)。

2.4 土壤可蚀性综合指数变化的主要影响因素分析

不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性综合指数(CSEI)与土壤性质、植被和结皮生长特性显著相关(表 1)。相关分析结果显示,草本植被覆盖边坎的 CSEI 与植被覆盖度、土壤总孔隙度和毛管孔隙度呈显著负相关,而与土壤容重呈显著正相关。生物结皮覆盖边坎的 CSEI 与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量、粉粒含量和结皮厚度呈显著负相关,而与土壤容重、砂粒含量和结皮覆盖度显著正相关。裸地边坎的 CSEI 与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量和黏粒含量呈显著负相关,而与土壤容重呈显著正相关。

表 1 土壤可蚀性综合指数与近地表特征之间相关分析结果

Table 1 The result of Pearson correlation between comprehensive soil erodibility index and near surface characteristics

边坎类型 Edge type	地表覆 盖度 Coverage	结皮厚度 Biological crust thickness	砂粒含量 Sand content	粉粒含量 Silt content	黏粒含量 Clay content	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	田间持水 量 Field capacity	有机质含量 Organic mat- ter content
草本植被 Herbaceous	-0.53**	-	0.10	-0.12	0.04	0.51**	-0.51**	-0.06*	-0.21	-0.15
生物结皮 Biological crust	0.51**	-0.64**	0.38**	-0.38**	-0.14	0.29*	-0.29*	-0.17*	-0.17	-0.69**
裸地 Bare	-	-	-0.18	0.23	-0.35**	0.35**	-0.35**	-0.15*	-0.22	-0.80**

注: *表示相关显著($P < 0.05$), **表示相关极显著($P < 0.01$)。-表示该处理组在此指标上无相应数据。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$). The "-" indicates no corresponding data for this treatment group under the specified indicator.

由于不同植被覆盖类型边坎的CSEI变化规律与大多数植被特性和土壤性质呈显著相关,本研究通过途径分析进一步明确了不同覆盖类型边坎土壤抗蚀性能变化的主控因素(表2)。结果表明,草本植被覆盖边坎CSEI的变化主要受植被覆盖度、总孔隙度和毛管孔隙度的影响。其中,总孔隙度的直接途径系数绝对值最大(-0.519),表明其是控制CSEI变化的主导因子。总孔隙度通过根系生长直接提升土壤透水性和稳定性,同时间接改善土壤结构(间接途径系数-0.439)。草本植被边坎CSEI的变化主要由总孔隙度增加驱动。

生物结皮覆盖边坎CSEI的变化主要受生物结皮厚度、土壤有机质含量、毛管孔隙度和砂粒含量的影响(表3)。其中,生物结皮厚度的总途径系数绝对值最大(-0.863),且其直接、间接和总途径系数均为负,表明生物结皮厚度对CSEI的控制作用最为明显。生物结皮厚度不仅通过假根和菌丝的直接固结作用有效降低土壤可蚀性,还通过增加有机质含量(总途径系数-0.420)和提高毛管孔隙度(总途径系数-0.068)间接改善土壤结构,进一步减小CSEI。此外,生物结皮厚度的直接途径系数绝对值大于间接途径系数绝对值,凸显其对土壤抗蚀性能的直接作用是其主要机制。

裸地边坎CSEI的变化主要受土壤有机质含量和粉粒含量的影响,其中有机质含量的总途径系数绝对值最大(-0.760),凸显了其在控制土壤可蚀性中的核心作用。其直接途径系数绝对值远大于间接途径系数。这表明裸地边坎通过增加有机质含量直接降低土壤可蚀性的作用强于其通过改善土壤结构、促进团聚体形成的间接作用(表4)。

表2 草本覆盖边坎土壤可蚀性综合指数变化途径分析结果

Table 2 The path analysis result for seasonal variation in comprehensive soil erodibility index of herbaceous covered terraced edge

自变量 Argument	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient				总途径系数 Total path coefficient
		植被覆盖度 Vegetation coverage	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	合计 Total	
植被覆盖度 Vegetation coverage	-0.436	—	-0.153	-0.126	-0.279	-0.715
总孔隙度 Total porosity	-0.519	-0.182	—	-0.257	-0.439	-0.958
毛管孔隙度 Capillary porosity	-0.320	-0.107	-0.230	—	-0.337	-0.658

表3 生物结皮覆盖边坎土壤可蚀性综合指数变化途径分析结果

Table 3 The path analysis result for seasonal variation in comprehensive soil erodibility index of biocrust covered terraced edge

自变量 Argument	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient				总途径系数 Total path coefficient	
		有机质 Organic matter content	结皮厚度 Biological crust thickness	毛管孔隙度 Capillary porosity	砂粒含量 Sand content		合计 Total
有机质含量 Organic matter content	-0.299	—	-0.194	0.009	0.064	-0.121	-0.420
结皮厚度 Biological crust thickness	-0.528	-0.343	—	0.155	-0.147	-0.335	-0.863
毛管孔隙度 Capillary porosity	-0.271	0.008	0.134	—	0.060	0.203	-0.068
砂粒含量 Sand content	0.260	-0.056	0.002	-0.058	—	-0.111	0.149

表4 裸地梯田边坎土壤可蚀性综合指数途径分析结果

Table 4 The path analysis result for seasonal variation in comprehensive soil erodibility index of bare terraced edge

自变量 Argument	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient			总途径系数 Total path coefficient
		有机质 Organic matter content	粉粒含量 Silt content	合计 Total	
有机质含量 Organic matter content	-0.790	—	0.030	0.030	-0.760
粉粒含量 Silt content	0.197	-0.007	—	-0.007	0.190

3 讨论

3.1 不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性能差异

不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性能的差异主要源于覆盖物对土壤颗粒组成、结构稳定性的影响不同。研究表明,与裸地边坎相比,草本植被和生物结皮覆盖显著改善了土壤结构,提升了土壤抗蚀性能(图3和图5),这一结果与Liu等^[20]、Wang等^[14]在黄土高原和平原等^[21]在丹江口库区的研究一致。然而,两种地表覆盖类型在改善土壤结构和提升抗蚀性能的表现也存在显著差异。

草本植被覆盖边坎在提升饱和导水率、团聚体平均重量直径、平均水滴数和粘聚力等方面表现更优,显著改善土壤结构^[22]。这主要得益于草本植被根系的物理锚固和化学粘聚作用,以及枯落物分解增加有机质含量的贡献。根系增强了土壤颗粒间的粘聚力,促进团聚体的形成与稳定,同时提升了土壤的孔隙结构,进一步提高了土壤的持水能力和抗冲刷性能^[23-24]。相比之下,生物结皮覆盖边坎虽然在饱和导水率等指标上略逊于草本植被覆盖,但其形成的致密表层和胞外分泌物的生物化学作用显著固结了土壤颗粒,提高了黏粒含量和孔隙度(图3和图4)^[10,12],从而有效降低了土壤可蚀性K因子和崩解速率。此外,结皮中的菌丝和假根网络通过物理缠绕作用进一步增强了土壤表层的保护性能。裸地边坎由于缺乏植被或生物结皮的保护,土壤结构松散,砂粒含量高,容重大,总孔隙度和毛管孔隙度低,持水能力和抗蚀性能显著下降。在降水侵蚀过程中,裸地边坎表层土壤易发生颗粒分异,细颗粒流失更为严重,导致其土壤可蚀性K因子、崩解速率和最大崩解率显著高于覆盖边坎。

综合来看,草本植被覆盖显著改善了土壤入渗性能和团聚体稳定性,在固定土壤颗粒和增强表层保护方面表现出独特优势。这些差异表明,草本植被和生物结皮覆盖通过各自独特的作用机制,分别提升了边坎土壤的抗蚀能力。这为不同环境下的梯田边坎保护和水土保持提供了宝贵的实践参考。因此,梯田边坎建设完成后适当保留边坎杂草植被,并在生物结皮覆盖区和裸露边坎适时撒播草种,可以有效提升边坎的水土保持能力。

3.2 不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性能变化规律

不同覆盖类型梯田边坎土壤可蚀性能在覆盖物生命周期内表现出明显规律,这种变化由地表覆盖类型及其生长季节性特征主导,同时受土壤颗粒组成、结构稳定性、水分保持能力和有机质含量等多重因素的影响(表2)。研究表明,草本植被覆盖、生物结皮覆盖和裸地边坎的土壤可蚀性变化趋势差异明显。草本植被覆盖边坎的土壤可蚀性在草本植被生命周期内持续下降。这一变化主要由草本植被在生长期通过改善土壤结构稳定性、增加孔隙度和提升水分保持能力所驱动。在夏季植被生长旺盛时期,草本植被根系通过锚固和加筋作用固定土壤颗粒,并促进团聚体的形成,从而提高土壤的抗侵蚀性能。同时,枯落物分解提升有机质含量,进一步优化了土壤结构,使CSEI持续下降,尽管干旱可能引发波动,但整体趋势保持下降。

生物结皮覆盖梯田边坎土壤可蚀性能随时间的变化与其生物结皮厚度的变化密切相关。相关研究结果表明在亚热带湿润季风气候区,尤其是海拔1000 m以上的地区,生物结皮主要由藓类植物构成,而苔藓结皮厚度的变化极易受到降水量和土壤水分的影响。本研究区域(海拔约1082 m)的生物结皮以藓类植物为主导构成,7-9月丰沛降水为苔藓生长提供充足水分,生物结皮迅速发育,形成了3.4~4.8 mm致密结皮层,此时生物结皮固结土壤颗粒和改善土壤结构能力显著增加^[25-26],土壤可蚀性能综合指数(CSEI)也由0.45减小到0.24;而10-11月降水量锐减57%导致水分胁迫,叠加同期13.6℃的日均温下降和光照强度降低,造成藓类生理活性减弱甚至死亡,结皮厚度也迅速下降至2.1~3.5 mm,生物结皮出现退化,其对土壤可蚀性能的减小效果也降低,由0.24增加到0.58。宓桂音等^[27]在红壤丘陵区的研究也印证了这一机制,发现当秋季降水减少时,苔藓结皮覆盖度与厚度显著下降($P<0.01$)。本研究的动态监测表明,生物结皮抗蚀功能的时效性源于其生长衰退周期与降水季节分布的耦合效应。这种时间异质性提示,在生态工程设计中需重点加强秋冬季结皮退化期的土壤保育措施。

裸地边坎的CSEI则呈持续下降的变化趋势,这与土壤有机质含量的逐步积累密切相关。研究表明,裸地土壤有机质从7月的4.76 g·kg⁻¹增至11月的5.70 g·kg⁻¹,这一增加可能得益于微生物分解活动的作用。进入雨季适宜的气温和土壤含水量显著提高了土壤微生物的活性^[28],促进了有机质的分解与转化过程,分解产生的有机代谢产物被土壤颗粒吸附并固定,逐渐形成更加稳定的有机质形态,减少了其流失的可能性。随着有机质的积

累,土壤颗粒间的粘聚力显著增强,有利于团聚体的形成与稳定,从而改善了土壤结构,降低了土壤可蚀性。

3.3 不同植被覆盖类型土壤可蚀性能变化主控因素分析

虽然不同植被覆盖类型土壤可蚀性均与大多数植被特性和土壤性质显著相关(表1),但不同植被覆盖类型边坎土壤可蚀性变化的驱动机制完全不同。通径分析结果表明,草本植被覆盖边坎土壤可蚀性变化的主控因子是总孔隙度,其总通径系数最大(表2)。植被根系在生长期通过形成根孔隙直接增加总孔隙度,提升土壤的透水性和稳定性。此外,根系枯死后腐解释放的有机质通过促进团聚体形成间接增加了总孔隙度,进一步增强了土壤结构稳定性。这种直接作用显著降低了土壤的径流侵蚀强度,是影响土壤可蚀性的重要机制。查轩等^[29]在瓦窑沟流域的研究表明,土壤孔隙度下降44%导致土壤侵蚀量增加15倍,进一步验证了总孔隙度在土壤抗蚀性能中的关键作用。综上,草本植被通过根系生长和有机质积累显著提高总孔隙度,直接改善土壤结构,从而降低土壤可蚀性。通过促进植被生长和根系更新,可进一步优化土壤孔隙结构,减缓季节性侵蚀波动。这表明加强草本植被覆盖管理是提升梯田边坎抗蚀性能的有效途径。

生物结皮主要通过两种方式影响土壤可蚀性,其一是生物结皮假根和菌丝的捆绑作用和分泌胶结物质的胶结作用直接固结土壤,增强土壤的抗蚀性能;其二是生物结皮的发育通过增强微生物活性,提高土壤有机质含量,促进土壤团聚体发育等来改善土壤结构,间接提升土壤的抗蚀性能。而本研究的通径分析结果表明,生物结皮通过其直接固结作用(直接通径系数-0.528)来减小土壤可蚀性的作用大于其通过增加土壤有机质含量来间接减小土壤可蚀性(间接通径系数-0.194)的作用,表明本研究区生物结皮主要是通过其直接固结作用来减小土壤可蚀性,这与Zhu等^[15]在三峡库区的研究结果一致,但与Gao等^[30]在黄土高原的研究结果相反。Gao等^[30]的研究发现,黄土高原生物结皮主要通过间接影响土壤理化性质,改善土壤结构来减小土壤可蚀性性能,这种差异可能与区域气候特征、土壤类型等有关。

通径分析表明,裸地边坎土壤可蚀性的主控因子是土壤有机质含量。这表明裸地边坎主要是通过增加土壤有机质含量来改善土壤抗蚀性能,其直接作用尤为显著。有机质的直接效应通过增强颗粒间粘聚力和提升结构稳定性来减小土壤可蚀性,这一结果与Gong等^[31]在黄土高原丘陵山地的研究一致,进一步验证了土壤有机质在改善裸地土壤抗蚀性能中的作用。而间接效应则通过改善土壤结构和促进团聚体形成进一步降低土壤侵蚀风险,但贡献相对较小(表4)。尽管裸地土壤有机质含量的增加在一定程度上改善了抗蚀性能,但由于裸地缺乏植被或结皮覆盖的保护,受降水侵蚀的主导,提升幅度有限。综上,裸地边坎土壤可蚀性变化的主要驱动因素是土壤有机质含量的逐步积累,其直接影响明显大于间接效应。然而,由于裸地缺乏其他保护措施,土壤抗蚀性能提升空间有限,这表明增加外源有机质输入或结合覆盖管理可能是进一步改善裸地边坎土壤抗蚀性能的有效途径。

4 结论

本研究通过对不同覆盖类型梯田边坎的土壤可蚀性特征、变化规律及其驱动因素进行分析,得出以下主要结论:

1)梯田边坎覆盖可以显著减小土壤可蚀性,不同覆盖类型通过不同作用机制提升抗蚀性能。草本植被覆盖在改善水分传导性和团聚体稳定性方面优势显著,生物结皮覆盖在固定土壤颗粒和增强表层保护方面效果突出。与裸地边坎相比,草本植被覆盖和生物结皮覆盖边坎CSEI分别减小了57.7%和35.6%。

2)不同覆盖类型边坎土壤可蚀性能变化规律存在差异。草本植被覆盖边坎和裸地边坎CSEI呈逐渐下降趋势,但草本植被覆盖下降速率更快;生物结皮覆盖边坎则表现为先下降后上升的复杂趋势。草本植被在生长季持续提升抗蚀性能,而生物结皮覆盖的保护效应在秋冬季节相对减弱。

3)不同覆盖类型边坎土壤可蚀性能变化由不同主控因素驱动。草本植被通过根系生长和有机质积累提高总孔隙度,直接改善土壤结构,降低土壤可蚀性;生物结皮覆盖受结皮厚度的动态变化驱动。裸地边坎土壤可蚀性变化则由土壤有机质含量的逐步积累主导。

参考文献 References:

- [1] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, *et al.* Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14): 1725–1734.
- [2] Sun L, Zhang G H, Luan L L, *et al.* Temporal variation in soil resistance to flowing water erosion for soil incorporated with plant litters in the Loess Plateau of China. *Catena*, 2016, 145: 239–245.
- [3] China State Council. The state council's approval of the national land consolidation plan (2016–2020). *The State Council Gazette of the People's Republic of China*, 2017(2): 96–97.
国务院. 国务院关于全国土地整治规划(2016–2020年)的批复. *中华人民共和国国务院公报*, 2017(2): 96–97.
- [4] Stoof C R, Ferreira A J D, Mol W, *et al.* Soil surface changes increase runoff and erosion risk after a low-moderate severity fire. *Geoderma*, 2015, 239/240: 58–67.
- [5] Zhang B J, Zhang G H, Zhu P Z, *et al.* Temporal variations in soil erodibility indicators of vegetation-restored steep gully slopes on the Loess Plateau of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 286: 106661.
- [6] Yang F, Zhang K D, Yang M Y, *et al.* Experimental study on hydraulic characteristics of flow under vegetation stem. *Journal of Sediment Research*, 2016(4): 22–27.
杨帆, 张宽地, 杨明义, 等. 植物茎秆影响坡面径流水动力学特性研究. *泥沙研究*, 2016(4): 22–27.
- [7] Wang B, Zhang G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1567–1576.
- [8] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, *et al.* Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 266: 68–75.
- [9] Wang D D, Xu H C, Shan Z J, *et al.* Effects of *Robinia pseudoacacia* litter cover and roots on soil erosion in the Loess Plateau, China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 83–89.
王丹丹, 许海超, 单志杰, 等. 黄土高原刺槐林地根系与枯落物对土壤侵蚀的影响. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 83–89.
- [10] Davis D D, Horton R, Heitman J L, *et al.* Wettability and hysteresis effects on water sorption in relatively dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(6): 1947–1951.
- [11] Wang H, Zhang G H, Li N N, *et al.* Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2018, 325(4): 18–27.
- [12] Lan S, Wu L, Adessi A, *et al.* Cyanobacterial persistence and influence on microbial community dynamics over 15 years in induced biocrusts. *Environment Microbiology*, 2022, 24(1): 66–81.
- [13] Liu F, Zhang G H, Sun F, *et al.* Quantifying the surface covering, binding and bonding effects of biological soil crusts on soil detachment by overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(15): 2640–2648.
- [14] 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. *Catena*, 2019, 174(3): 24–35.
- [15] Zhu P Z, Feng T, Yang L, *et al.* Biological soil crusts decrease soil erodibility of economic fruit forests land through its consolidation effect in the Three Gorges Reservoir area. *Catena*, 2024, 243: 108200.
- [16] Zhang C H, Xiao B, Li S L, *et al.* Characteristics of biocrusts in croplands and their effects on surface soil disintegration in the black soil region of northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1773–1782.
张晨晖, 肖波, 李胜龙, 等. 东北黑土区农田生物结皮的特征及其对表层土壤崩解的影响. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1773–1782.
- [17] Zuo X F, Wang L, Zheng F L, *et al.* Effects of freeze-thaw cycles and soil properties on mollisol shear strength in Chinese black soil region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 30–35, 42.
左小锋, 王磊, 郑粉莉, 等. 冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 30–35, 42.
- [18] Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in china. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 7–13.
张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. *土壤学报*, 2007, 44(1): 7–13.
- [19] Cui X W, Zhang X F, Liang S M. Correlation between comprehensive soil erodibility index and environmental factors in the Qilian Mountains, China. *Mountain Research*, 2024, 42(1): 14–26.
崔晓薇, 张喜凤, 梁水明. 祁连山综合土壤可蚀性指数与环境因子的关联性. *山地学报*, 2024, 42(1): 14–26.
- [20] Liu G, Xu M, Ritsema C. A study of soil surface characteristics in a small watershed in the hilly, gullied area on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 2003, 54(1): 31–44.

- [21] 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. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 87–94.
平原, 澹腾辉, 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. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 87–94.
- [22] Zhang G H, Yi L, Ding W F, *et al.* Effects of moss biocrust on soil water infiltration in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1835–1842.
张冠华, 易亮, 丁文峰, 等. 三峡库区苔藓生物结皮对土壤水分入渗的影响. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1835–1842.
- [23] Baets S D, Poesen J, Gyssels G, *et al.* Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, 76(1/2): 54–67.
- [24] Gyssels G. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(2): 189–217.
- [25] Yang K, Zhao Y G, Ma X X. Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, northwest China. *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性. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 173–177.
- [26] Wang H, Zhang G H, Liu F, *et al.* Temporal variations in infiltration properties of biological crusts covered soils on the Loess Plateau of China. *Catena*, 2017, 159: 115–125.
- [27] Mi G Y, Ping Y, Zhao Y J, *et al.* Seasonal variation of soil detachment capacity induced by moss crusts in red soil hilly area. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22): 10391–10400.
宓桂音, 平原, 赵娅君, 等. 红壤丘陵区苔藓结皮土壤分离能力季节变化特征. *生态学报*, 2024, 44(22): 10391–10400.
- [28] Wang Y N, Ma J M, Liang Y M, *et al.* Variations of microbial communities and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils of aged *Loropetalum chinense* forests on Karst rocky mountains during dry and rainy seasons. *Guihaia*, 2024, 44(10): 1848–1863.
王雅楠, 马姜明, 梁月明, 等. 喀斯特石山老龄林檎木根际和非根际土壤微生物群落及酶活性的旱、雨季节变化. *广西植物*, 2024, 44(10): 1848–1863.
- [29] Zha X, Tang K L, Zhang K L, *et al.* Study on the influence of vegetation on soil characteristics and soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992(2): 52–58.
查轩, 唐克丽, 张科利, 等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究. *水土保持学报*, 1992(2): 52–58.
- [30] 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. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105(4): 49–58.
- [31] Gong J, Chen L D, Fu B J, *et al.* Effect of land use on soil nutrients in the loess hilly area of the Loess Plateau China. *Land Degradation and Development*, 2006, 5(17): 453–465.