

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.021

CSTR: 32310.14.stbxb.2026.05.021

许维, 沈思铭, 陈钧儒, 等. 黄土高陡边坡生物结皮的抗蚀性及其对水力侵蚀的防护作用[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 143-151.

Xu Wei, Shen Siming, Chen Junru, et al. Erosion resistance of biocrusts and their protective function against water erosion on loess steep slopes[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 143-151.

## 黄土高陡边坡生物结皮的抗蚀性及其对 水力侵蚀的防护作用

许维<sup>1</sup>, 沈思铭<sup>1</sup>, 陈钧儒<sup>1</sup>, 钟丰阳<sup>1</sup>, 肖波<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 农业农村部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193; 2. 西北大学文化遗产学院, 中国—中亚人类与环境“一带一路”联合实验室, 文化遗产研究与保护技术教育部重点实验室, 西安 710027)

**摘要:** [目的] 探讨黄土丘陵沟壑区高陡边坡生物结皮发育后对土壤基本性状、抗蚀性及径流水动力学特性的影响, 分析其对边坡水力侵蚀的减控作用, 为黄土边坡防护和沟道侵蚀治理提供科学依据。

[方法] 通过模拟冲刷、单雨滴击溅及静水崩解试验, 测定 3 种坡度、3 种雨强下生物结皮边坡与裸土边坡的初始产流时间、坡面流速和侵蚀量等差异, 对比分析生物结皮对边坡侵蚀的防护效应及其途径。

[结果] 1) 高陡边坡生物结皮覆盖下土壤有机质含量较无结皮覆盖土壤平均升高 124.3%, 团聚体含量显著提高 44.9%, 土壤饱和含水量和饱和导水率分别平均降低 7.9% 和 39.5%, 生物结皮显著改善高陡边坡土壤的基本理化性质。2) 与无结皮土壤相比, 生物结皮覆盖边坡土壤的击穿动能平均为无结皮土壤的 5.6 倍, 单雨滴击溅量减少 83.7%, 坡面初始产流时间提前 38.2 s, 坡面流速提高 6.2%, 总径流量增加 7.2%, 生物结皮显著增强边坡土壤的抗蚀性, 并影响径流水动力学特性。3) 高陡边坡生物结皮覆盖可显著削弱土壤径流侵蚀量, 且减蚀效应随坡度增大和降雨强度提升呈增强趋势。在 80、100、120 mm/h 雨强下, 结皮覆盖坡面径流侵蚀量显著低于无结皮覆盖坡面, 平均降幅分别为 63.3%、46.3%、64.5%; 在 40、60、80、100、120 mm/h 雨强下, 55°、65°、75°坡面的径流侵蚀量分别平均降低 40.3%、62.1%、63.6%。[结论] 生物结皮可通过表面覆盖、改善土壤理化性质、增加土壤抗蚀性并影响坡面径流水动力学特性等途径, 显著降低降雨诱发的黄土高陡边坡侵蚀, 对黄土丘陵沟壑区自然和人为边坡具有良好的防护作用, 可广泛用于黄土高陡边坡侵蚀防控和生态修复。

**关键词:** 黄土高原; 黄土丘陵沟壑区; 生物土壤结皮; 抗蚀性; 边坡侵蚀; 边坡防护

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0143-09

## Erosion Resistance of Biocrusts and Their Protective Function Against Water Erosion on Loess Steep Slopes

Xu Wei<sup>1</sup>, Shen Siming<sup>1</sup>, Chen Junru<sup>1</sup>, Zhong Fengyang<sup>1</sup>, Xiao Bo<sup>1,2</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Key Laboratory of Farmland Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; 2. School of Culture Heritage, Northwest University, China-Central Asia "Belt and Road" Joint Laboratory on Human and Environment Research, Key Laboratory of Cultural Heritage Research and Conservation, Ministry of Education, Xi'an 710027, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the effects of biocrust development on basic soil properties, erosion resistance, and runoff hydrodynamic characteristics on steep slopes in the loess hilly and gully region, and to analyze its role in reducing and controlling hydraulic erosion on slopes. The findings provide a scientific basis for loess slope protection and gully erosion control. [Methods] Simulated scouring experiments, single-raindrop

收稿日期: 2026-03-10

修回日期: 2026-04-05

录用日期: 2026-04-16

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-08-17

资助项目: 中国—中亚人类与环境“一带一路”联合实验室, 文化遗产研究与保护技术教育部重点实验室青年开放课题项目 (2024KGFR10); 国家自然科学基金面上项目 (42477359); 北京市自然科学基金面上项目 (8262024); 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站开放研究基金项目 (YSS202405); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2024BEG03002)

第一作者: 许维 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事生物结皮修复研究。E-mail: xw@cau.edu.cn

通信作者: 肖波 (1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤物理与水土保持研究。E-mail: xiaobo@cau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

splash tests, and static water disintegration tests were conducted to compare the initial runoff time, slope flow velocity, and erosion amount between biocrust-covered slopes and bare slopes under three slope gradients and three rainfall intensities. The protective effects of biocrusts on slope erosion and their pathways were then comparatively analyzed. **[Results]** 1) Compared with bare soil, biocrust coverage on steep slopes increased soil organic matter content by an average of 124.3% and aggregate content by 44.9%, while saturated volumetric water content and saturated hydraulic conductivity decreased by averages of 7.9% and 39.5%, respectively, significantly improving the basic physicochemical properties of steep-slope soils. 2) Compared with bare slopes, biocrust-covered slopes showed a 5.6-fold increase in penetration kinetic energy, an 83.7% decrease in splash erosion from a single raindrop, a 38.2 s advance in initial runoff time, a 6.2% increase in slope flow velocity, and a 7.2% increase in total runoff volume. Biocrusts significantly enhanced soil erosion resistance and altered runoff hydrodynamic characteristics on slopes. 3) Biocrust coverage on steep slopes significantly reduced runoff erosion, and the erosion-reduction effect became stronger with increasing slope gradient and rainfall intensity. Under rainfall intensities of 80, 100, and 120 mm/h, runoff erosion on biocrust-covered slopes was significantly lower than that on bare slopes, with average reductions of 63.3%, 46.3%, and 64.5%, respectively. Under rainfall intensities of 40, 60, 80, 100, and 120 mm/h, runoff erosion on 55°, 65°, and 75° slopes decreased by average values of 40.3%, 62.1%, and 63.6%, respectively. **[Conclusion]** Biocrusts can significantly reduce rainfall-induced erosion on steep loess slopes through surface coverage, improvement of soil physicochemical properties, enhancement of soil erosion resistance, and modification of runoff hydrodynamic characteristics. They provide effective protection for natural and artificial slopes in the loess hilly-gully region and can be widely used in erosion control and ecological restoration on steep loess slopes.

**Keywords:** Loess Plateau; loess hilly-gully region; biocrusts; erosion resistance; slope erosion; slope protection

**Received:** 2026-03-10

**Revised:** 2026-04-05

**Accepted:** 2026-04-16

**Online**(www.cnki.net): 2026-08-17

黄土高原作为我国典型的生态脆弱区,其下垫面条件复杂、沟壑纵横,侵蚀沟道共 60 万余条,占比高达 83.46%,是世界上水土流失最严重的区域之一<sup>[1]</sup>。区域内的黄土母质具有高孔隙度、垂直节理发育及弱胶结等特征,干燥状态下表现出较强的直立性,易形成近垂直的崖壁<sup>[2]</sup>。在降雨入渗等作用下易发生水软化或结构破坏,常在自重作用下趋于失稳<sup>[3]</sup>。受黄土地貌特征与降雨径流侵蚀的共同作用,黄土塬面不断遭受沟蚀作用,沟谷下切与溯源侵蚀致使塬缘后退,形成大量高达数十米的黄土陡崖,最终形成广泛分布的自然高陡边坡<sup>[4]</sup>。同时在公路、铁路及其他工程建设过程中,因黄土良好的直立性和短期自稳能力<sup>[5]</sup>,大量人工高陡边坡未采取精细的工程防护和植被覆盖措施,长期裸露于自然环境中,进一步加剧区域水土流失风险<sup>[6]</sup>。无论是自然形成还是人为扰动产生的高陡边坡,在持续性降雨或短历时高强度降雨作用下均易发生坡面地质灾害<sup>[7]</sup>,对区域生态安全及居民生命财产构成长期威胁<sup>[8]</sup>。因此,采取有效措施防治水土流失,对黄土高原生态安全与可持续发展具有重要意义。

黄土高原高陡边坡普遍裸露,土体结构松散,且养分匮乏、水分条件恶劣,植被恢复困难,在降雨冲刷下极易发生水力侵蚀与坡面破坏<sup>[9]</sup>。受降雨溅蚀与坡面径流影响,边坡表层土壤持续被剥蚀、搬运,不仅造成表层土体流失、坡面退化,还易诱发滑坡、泥石流等地质灾害<sup>[10]</sup>。其中,水力侵蚀是高陡边坡失稳与物质输出的主要驱动力,既直接加剧泥沙入沟过程,还削弱坡面结构稳定性<sup>[11]</sup>,间接强化风蚀与重力侵蚀作用,进一步提高边坡失稳风险。在这种极端环境下,生物结皮作为由藻类、地衣、藓类及其共生微生物与表层土壤颗粒胶结形成的复合体<sup>[12]</sup>,因需水量低、对养分依赖弱等特性,得以在黄土高陡边坡广泛分布并稳定存在。同时生物结皮形成的坚固土壤表面覆盖层,能有效削弱雨滴动能、减缓土壤颗粒的分散与流失,从而显著降低水土流失强度<sup>[13]</sup>。有研究<sup>[14]</sup>表明,自然发育的生物结皮无需额外投入即可发挥稳坡作用,且能在植被尚未建立或覆盖率较低阶段为高陡边坡提供初步防护,弥补生态防护措施在早期的不足。然而,已有研究多关注于生物结皮本身的生态功能,其在高陡边坡水蚀防护中的作用仍缺乏系统研究,制约了对水力侵蚀防护功能的深入理解与应用。

基于此,本研究以黄土高陡边坡生物结皮为研究对象,以裸土为对照,在室外条件下通过模拟不同坡度和降雨强度的冲刷试验,系统评估生物结皮对土壤基本性质、抗蚀性的影响,以揭示其在水力侵蚀过程中的防护作用。研究结果有助于深化对生物结皮在黄土高陡边坡生态防护功能的认识,明确其在坡面稳定和水土保持中的应用潜力,为黄土高陡边坡的水力侵蚀防控与生态防护实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土丘陵沟壑区地处黄土高原中北部(35°36′~40°36′ N,107°10′~114°30′E),总面积约 14 万 km<sup>2</sup>,属半干旱暖温带气候区,是黄河流域最具代表性的地貌单元。研究区内水系大多为黄河一级或二级支流,主要包括汾河、无定河和洛河等,且位于黄河中游多沙区。区域内年平均气温在 6~12℃,降雨时空分布极不均匀,主要集中在 7—9 月,年平均降水量为 300~600 mm,水力侵蚀剧烈。该区域地形破碎,沟壑纵横,水土流失面积占比超过 90%;地势整体呈东高西低态势,地貌以梁状、峁状丘陵为主,坡度 15°以上的土地面积占比达 50%~70%,沟壑密度高达 2.0~7.6 km/km<sup>2</sup>。土壤类型以黄绵土为主,质地疏松,结构松散,保水保肥性能较差,导致区域内水力侵蚀、边坡失稳问题突出,成为黄土高原水土流失防控的重点区域。为明确生物结皮对黄土高陡边坡水力侵蚀过程的调控机制与作用效果,本研究选取黄土高原北部陕西省神木市六道沟小流域作为试验研究区。

1.2 样地选择与处理

试验于 2023 年 5—9 月进行,在研究区域内选择高度 10 m 以上、坡度>50°、坡面起伏较小且草灌植被极少的无干扰黄土高陡边坡。所选边坡均为自然侵蚀形成,形成历史约 20 a,土壤类型为典型黄绵土。依据坡度梯度设置 3 个试验组,分别为 54°~56°、64°~66°和 74°~76°,每组在相邻坡段设置生物结皮覆盖区(处理组)与无生物结皮覆盖区(对照组)。对照组通过人工剥离表层生物结皮的方式构建,以严格控制坡度、土壤母质及微地形差异<sup>[15]</sup>。处理组生物结皮发育状况良好,覆盖度稳定维持在 90% 以上,以藓结皮为优势类型,占比达 80% 以上。对处理组和对照组进行生物结皮原状样品采集,每个处理设置 3 次重复。为消除土壤基质异质性对试验结果的干扰,对样地土壤机械组成进行测定,结果显示,黏粒、粉粒、砂粒的质量分数分别为 26.7%、24.3%、49.0%。

沿坡面方向系统设置坡上、坡中、坡底 3 个典型坡位,在各坡位对自然发育的生物结皮进行原位特征测定,结皮厚度为 7.48~13.29 mm。为保证样地代表性,

每个坡位设置 10 次重复试验,重点测定结皮厚度、穿透阻力、抗剪强度及黏结力等核心发育特征,测定结果用于表征试验前生物结皮的初始力学状态(表 1)。

表 1 研究区高陡边坡生物结皮基本特征  
Table 1 Basic characteristics of biocrusts on steep slopes in study area

| 坡位 | 厚度/<br>mm   | 穿透阻力/<br>N | 抗剪强度/Pa     | 黏结力/Pa     |
|----|-------------|------------|-------------|------------|
| 坡上 | 13.29±1.35a | 6.33±0.83a | 1.91±0.42ab | 3.21±0.27a |
| 坡中 | 9.29±0.68b  | 4.38±0.63b | 2.27±0.28a  | 3.45±0.23a |
| 坡底 | 7.48±0.77c  | 2.98±0.55c | 1.71±0.31b  | 2.27±0.28c |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同坡位间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

1.3 试验设计与指标测定

1.3.1 土壤基本理化性质 土壤体积质量采用环刀法测定;土壤饱和含水量采用烘干法测定;饱和导水率采用环刀定水头法测定;土壤有机质采用重铬酸钾氧化-加热法测定;采用湿筛法测定水稳性团聚体<sup>[16]</sup>。所有指标均设置 5 次重复,取平均值作为测定结果。

1.3.2 土壤崩解试验 土壤崩解试验采用艾德堡 HP-20 数显推拉力计(量程 20 N,分辨率 0.001 N),对土壤在静水条件下的崩解过程进行连续监测与记录。在推拉力计下方的传感器上悬挂细线以连接并固定金属网板,网板下方放置盛装去离子水的烧杯。风干后的土样置于金属网板上,并逐步、缓慢加水,使样品在无水动力干扰条件下完全浸没。为保证各次试验条件一致,加水速度严格控制,以减小人为误差的影响。试验期间水体温度应恒定控制在 20℃,以避免温度变化对试验结果产生干扰。其中,土壤崩解速率根据推拉力计记录计算<sup>[17]</sup>。每个处理设置 5 次重复。

1.3.3 单雨滴击溅试验 单雨滴击溅试验的试验装置由雨滴发生器、筛网和滤纸组成。雨滴发生器包括支架、供水瓶、流速控制器及 9 mm 针头,雨滴自距样品表面 1.2 m 处自由下落,初速度为 0 m/s,降落频率控制为 1 滴/s。试验过程中,将样品置于筛网中央,周围铺设滤纸以收集溅蚀颗粒。分别记录试验开始及生物结皮破碎瞬间供水瓶的水位刻度。试验结束后,将滤纸上收集的溅蚀颗粒于 105℃条件下烘干至恒重,并称量计算单雨滴击溅侵蚀量。以结皮破碎前后的溅蚀量差值,反映其对溅蚀的削减效果;雨滴击穿动能结合雨滴直径、终端速度及降落高度综合计算,以结皮破碎前后的动能差值表征其对雨滴冲击动能的削减能力<sup>[18]</sup>。每种处理设置 5 次重复。

1.3.4 模拟降雨试验 采用便携式模拟降雨装置进行降雨试验。选择无风、晴朗的天气条件,降雨喷头距地面高度设定为 0.5 m,设置 40、60、80、100、120

mm/h 5 个降雨强度,为避免降雨历时过长导致边坡土体过度饱和、诱发重力侵蚀等非目标干扰,将单次降雨历时设定为 15 min,雨强范围与降雨历时均依据黄土高原典型强降雨特征设定<sup>[19]</sup>。水源采用当地地下水出流形成的水库,每个处理重复 5 次。为评估模拟降雨试验能否反映真实野外情况,并完整描述水流状态与坡面侵蚀能力,本研究采用经典流体力学指标以判断不同土面覆盖下流动特征的差异。

坡面水流表面流速采用高锰酸钾染色法测定,因不同流态下阻力规律的不同,对实测水流表面流速进行修正,乘以相应修正系数(层流 0.67、过渡流 0.70、紊流 0.80)以获得径流平均流速<sup>[20]</sup>。

雷诺数( $Re$ )用于判定流体流动状态(层流或紊流),反映惯性力与黏滞力的相对大小。

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (1)$$

式中: $V$ 为平均流速, m/s;  $h$ 为水流特征深度, m;  $\nu$ 为流体运动黏滞系数,  $m^2/s$ 。其中, $\nu$ 的计算公式为:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.337t + 0.00221t^2} \quad (2)$$

式中: $t$ 为水温,  $^{\circ}C$ 。

弗劳德数( $Fr$ )用于判断水流状态(缓流或急流),反映惯性力与重力的相对大小。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

式中: $g$ 为重力加速度,通常取  $9.8 m/s^2$ 。

径流剪切力( $\tau$ , Pa)表示径流对土壤颗粒的冲刷能力:

$$\tau = \rho ghS \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为水密度,  $kg/m^3$ ;  $S$ 为坡度正弦值;  $g$ 为重力加速度;  $h$ 为水深, m。

水流功率 $[\omega, N/(m \cdot s)]$ 表示单位面积水流消耗功率:

$$\omega = V\tau \quad (5)$$

Darcy-Weisbach阻力系数( $f$ )用于反映水流与坡面界面之间的阻力,其值依据径流平均流速与坡面坡度计算确定,与坡面平均流速的平方呈反比,与水力坡度的正切值呈正比。

## 2 数据分析

利用 Excel 2019 软件完成试验数据的记录与整理,采用 IBM SPSS Statistics 27 软件开展统计分析;对于符合正态性和方差齐性的指标,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)结合多重比较(LSD法)进行组间差异检验( $p < 0.05$ );通过 Spearman 相关性分析探究生物结皮与土壤基本属性、径流及侵蚀的关联程度;运用 Smart PLS 4 软件构建生物结皮与土壤基本属性、径流及侵蚀的结构方程模型,用于解析各因子对侵蚀过程的直接和间接影响路径;图表绘制使用 GraphPad Prism 软件完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 生物结皮覆盖对土壤基本属性的影响

不同坡度条件下,生物结皮覆盖后土壤体积质量呈现显著变化,其中  $65^{\circ}$  和  $75^{\circ}$  边坡土壤体积质量分别较  $55^{\circ}$  边坡土壤体积质量下降 11.2% 和 5.3%,而无结皮覆盖坡面土壤体积质量在  $65^{\circ}$  降低后于  $75^{\circ}$  有所回升。生物结皮覆盖使得  $55^{\circ}$ 、 $65^{\circ}$  和  $75^{\circ}$  边坡土壤有机质含量分别是无结皮覆盖边坡土壤有机质含量的 1.9、1.8、3.1 倍( $p < 0.05$ ),且高坡度条件下的增幅相对更为明显。尽管生物结皮覆盖总体降低土壤饱和含水量,但该变化随坡度增加而逐渐减弱;无结皮覆盖坡面的饱和导水率显著高于结皮覆盖坡面,其值分别为结皮覆盖坡面的 2.6、1.6、1.2 倍,整体表现为随坡度增加先升高后降低的变化特征(表 2)。

表 2 高陡边坡生物结皮对土壤基本属性的影响  
Table 2 Effects of biocrusts on basic soil properties of steep loess slopes

| 坡度/ $^{\circ}$ | 覆盖类型 | 体积质量/<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 有机质含量/<br>( $g \cdot kg^{-1}$ ) | 饱和导水率/<br>( $mm \cdot min^{-1}$ ) | 饱和含水量/%            |
|----------------|------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 55             | 有结皮  | $1.53 \pm 0.07a$               | $4.54 \pm 0.46a$                | $0.31 \pm 0.02d$                  | $34.40 \pm 1.24d$  |
|                | 无结皮  | $1.53 \pm 0.01a$               | $2.43 \pm 0.60b$                | $0.81 \pm 0.04a$                  | $37.57 \pm 3.25cd$ |
| 65             | 有结皮  | $1.35 \pm 0.03b$               | $4.61 \pm 0.09a$                | $0.37 \pm 0.02cd$                 | $43.58 \pm 0.79ab$ |
|                | 无结皮  | $1.38 \pm 0.03b$               | $2.60 \pm 0.66b$                | $0.61 \pm 0.07b$                  | $47.99 \pm 0.83a$  |
| 75             | 有结皮  | $1.44 \pm 0.01ab$              | $2.61 \pm 0.48b$                | $0.43 \pm 0.01c$                  | $41.74 \pm 0.30bc$ |
|                | 无结皮  | $1.36 \pm 0.01b$               | $0.85 \pm 0.51c$                | $0.53 \pm 0.04b$                  | $44.92 \pm 0.10ab$ |

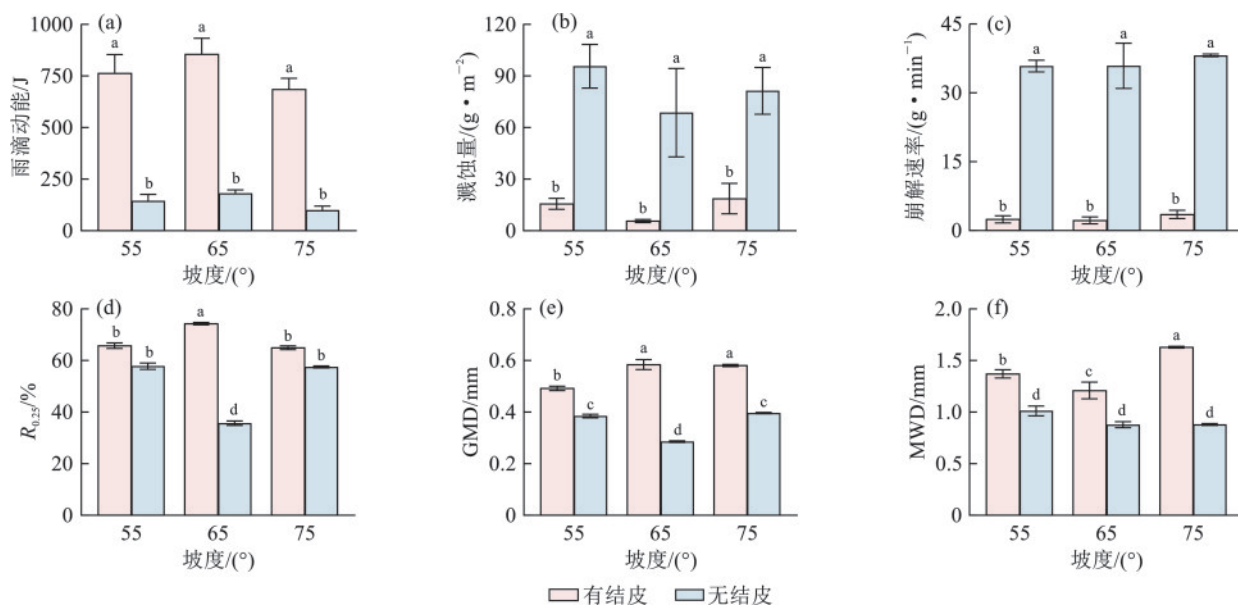
### 3.2 生物结皮覆盖对高陡边坡土壤抗蚀性的影响

生物结皮显著影响黄土高陡边坡土壤抗溅蚀能力(图 1)。在  $55^{\circ}$ 、 $65^{\circ}$  和  $75^{\circ}$  坡度下,生物结皮覆盖后的击穿动能分别是无结皮土壤的 5.3、4.7、6.8 倍( $p <$

0.05)(图 1a);生物结皮覆盖显著降低边坡溅蚀量( $p < 0.05$ ),无结皮覆盖裸土坡面的溅蚀量是生物结皮覆盖土壤的 6.0、11.5、4.3 倍,结皮覆盖条件下单雨滴溅蚀量平均减少 83.7%。其次,生物结皮覆盖显著

降低高陡边坡土壤的崩解速率( $p < 0.05$ );在55°、65°、75°坡度下,无结皮裸土坡面的崩解速率分别为35.8、35.9、38.2 g/min,分别是结皮覆盖边坡土壤的14.6、16.1、10.8倍,且不同坡度间崩解速率差异不显著(图1c)。同时,生物结皮覆盖显著提高65°坡面的大团聚

体含量,在55°和75°坡面上未表现出显著增加。在55°、65°和75°坡度下,有结皮覆盖土壤的平均重量直径(MWD)较无结皮裸土分别提高35.6%、37.5%和85.2%( $p < 0.05$ ),其几何平均直径(GMD)分别是无结皮覆盖土壤的1.3、2.0、1.4倍( $p < 0.05$ )。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图1 生物结皮覆盖对高陡边坡抗蚀性的影响

Fig. 1 Effects of biocrusts on erosion resistance of steep loess slopes

### 3.3 生物结皮覆盖对高陡边坡水动力学及产流产沙的影响

水动力学参数表明,本研究坡面径流雷诺数为900~1700,属于过渡流;弗劳德数为1.4~2.1,属于急流。在黄土高陡边坡上,生物结皮覆盖在55°、65°、75°

边坡上坡面径流雷诺数较无结皮坡面分别提高2.9%、6.5%、8.6%(图2a)。弗劳德数随坡度的增大而增大,在55°、65°、75°边坡上,生物结皮覆盖坡面径流的弗劳德数较无结皮覆盖坡面分别提高19.0%、9.7%、2.0%。而随着坡度增加,坡面阻力系数呈明显下降趋势。

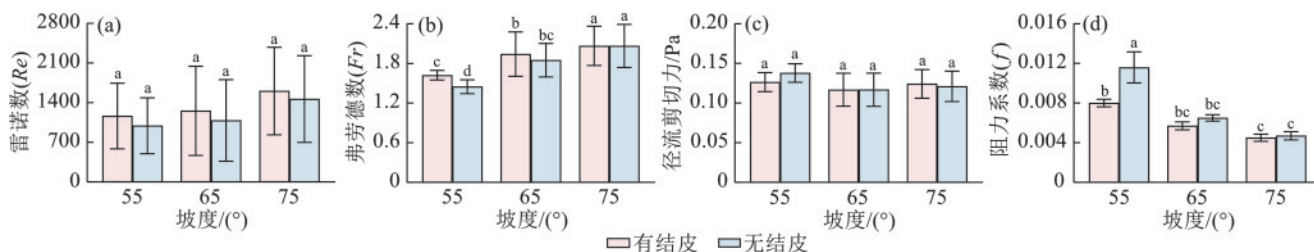


图2 生物结皮覆盖下高陡边坡的径流水动力学特性变化

Fig. 2 Variations in runoff hydrodynamic characteristics of steep loess slopes under biocrust coverage

在55°、65°和75°边坡上,无结皮覆盖坡面的初始产流时间分别是生物结皮覆盖坡面的2.6、2.8、2.6倍( $p < 0.05$ )(图3a),而生物结皮覆盖坡面的径流流速较无结皮覆盖坡面分别提高13.4%、1.4%、3.8%。同时,随着降雨强度增大,3种坡度的黄土高陡边坡生物结皮覆盖坡面的径流量均大于无结皮覆盖坡面,在55°坡面上仅在120 mm/h雨强下径流量增加差异显著(图4a)。在65°坡面上,生物结皮覆盖平均径流量在80、100、120 mm/h雨强下均为无结皮覆盖的1.1倍( $p < 0.05$ )。生物结皮覆盖后可显著降低黄

土高陡边坡的土壤径流侵蚀量,且其减蚀效应随坡度增大、降雨强度提升呈增强趋势。55°坡面上,生物结皮覆盖坡面的径流侵蚀量较无结皮坡面呈显著降低趋势,在80、100、120 mm/h雨强下的降幅分别为54.0%、33.3%、61.5%。在65°坡面上,60、80、100、120 mm/h雨强下,生物结皮覆盖坡面的径流侵蚀量显著低于无结皮坡面,平均降幅为67.3%。在75°坡面上,生物结皮的减蚀效应覆盖所有雨强梯度,5种雨强下结皮覆盖坡面的径流侵蚀量均显著小于无结皮覆盖坡面,平均降幅为63.6%(图4)。

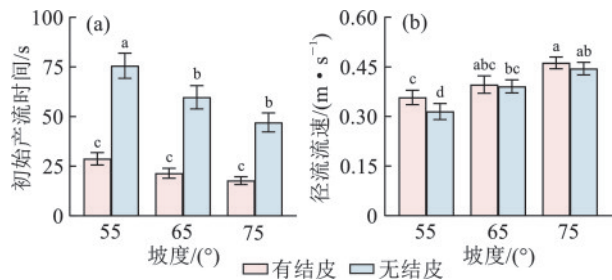


图3 生物结皮覆盖下高陡边坡径流形成特征变化  
Fig.3 Variations in runoff generation characteristics of steep loess slopes under biocrust coverage

3.4 生物结皮对高陡边坡土壤侵蚀的调控路径

Spearman 相关性分析结果(表3)显示,生物结皮的存在与土壤有机质( $r=0.70$ )、GMD( $r=0.87$ )呈显著正相关( $p<0.01$ )。同时,生物结皮的存在与土壤

饱和导水率( $r=-0.86$ )呈显著负相关( $p<0.01$ )。生物结皮与初始产流时间( $r=-0.76$ )、径流侵蚀量( $r=-0.84$ )呈显著负相关( $p<0.01$ )。结构方程模型(SEM)的模型拟合优度(GOF)为0.65,说明该模型的解释能力较好,该模型解释结果较可靠。SEM表明,生物结皮对土壤性质具有极显著的正向影响( $\beta=2.00$ ),其解释程度为93.7%( $p<0.05$ ),其中有机质、GMD和饱和导水率对土壤性质潜变量的影响显著( $p<0.01$ ),其因子载荷分别为0.73、0.89、0.88;土壤性质对径流( $\beta=-0.65$ )及侵蚀( $\beta=-0.99$ )的影响均未达到显著水平;径流对侵蚀具有正向的驱动作用( $\beta=0.02$ ),解释程度达57.2%;生物结皮对侵蚀还存在显著的负向调控作用( $\beta=-3.45$ )( $p<0.05$ ),且对径流也有直接负向影响( $\beta=-0.11$ )(图5)。

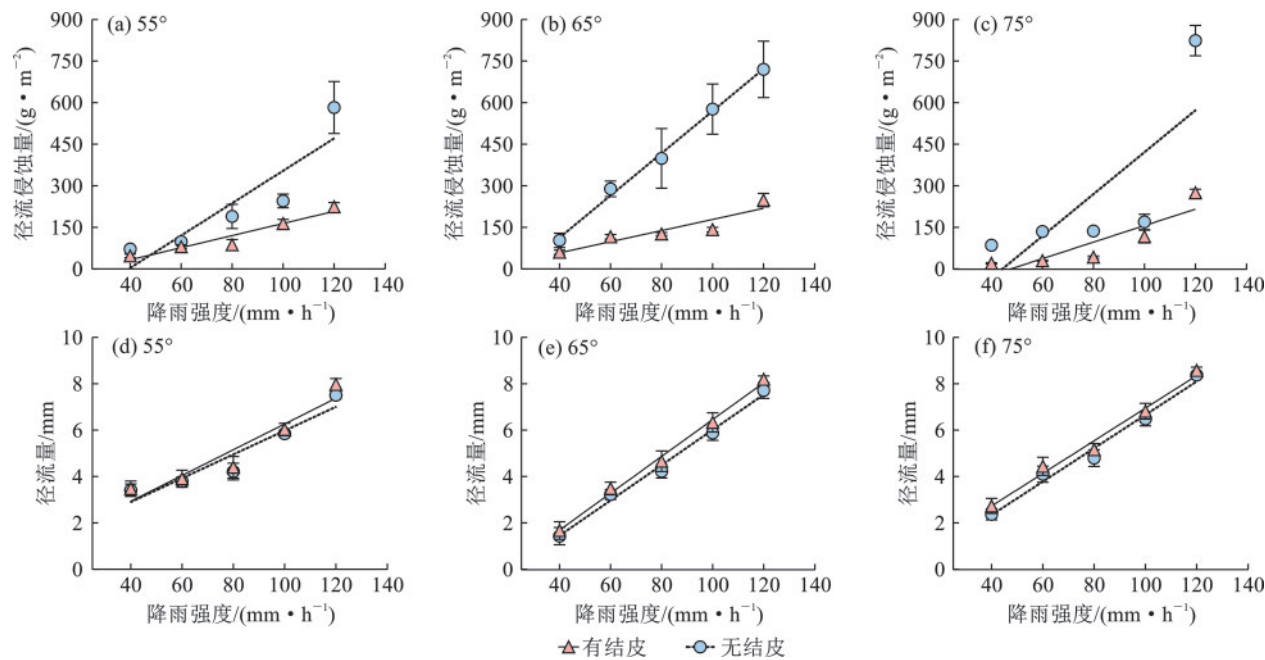
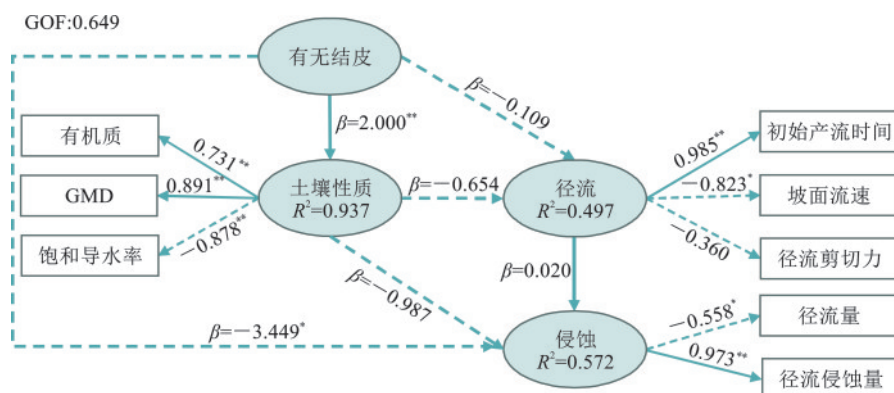


图4 生物结皮覆盖对高陡黄土边坡产流产沙过程的影响  
Fig. 4 Effects of biocrust coverage on runoff and sediment yield processes on steep loess slopes

表3 高陡边坡土壤抗蚀指标与影响因素的Spearman相关性

| Table 3 Spearman correlation of soil erosion-resistance indicators and influencing factors on steep slopes |      |        |         |         |       |         |         |         |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|--------|
| 变量                                                                                                         | 有无结皮 | 有机质    | 饱和导水率   | GMD     | 径流剪切力 | 初始产流时间  | 坡面流速    | 径流侵蚀量   | 径流量    |
| 有无结皮                                                                                                       | 1.00 | 0.70** | -0.86** | 0.87**  | -0.08 | -0.76** | 0.19    | -0.84** | 0.14   |
| 有机质                                                                                                        |      | 1.00   | -0.64** | 0.48**  | -0.05 | -0.35   | -0.02   | -0.47** | 0.01   |
| 饱和导水率                                                                                                      |      |        | 1.00    | -0.69** | 0.18  | 0.66**  | -0.19   | 0.61**  | -0.09  |
| GMD                                                                                                        |      |        |         | 1.00    | -0.09 | -0.76** | 0.32    | -0.77** | 0.07   |
| 径流剪切力                                                                                                      |      |        |         |         | 1.00  | -0.32   | 0.54**  | -0.10   | 0.14   |
| 初始产流时间                                                                                                     |      |        |         |         |       | 1.00    | -0.72** | 0.64**  | 0.13   |
| 坡面流速                                                                                                       |      |        |         |         |       |         | 1.00    | -0.24   | -0.26  |
| 径流侵蚀量                                                                                                      |      |        |         |         |       |         |         | 1.00    | -0.39* |
| 径流量                                                                                                        |      |        |         |         |       |         |         |         | 1.00   |

注:\*和\*\*分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 的显著性差异;GMD为几何平均直径。



注:实线与虚线分别表示正负相关;\*\*表示具有极显著影响( $p < 0.01$ );\*表示具有显著影响( $p < 0.05$ );GMD为几何平均直径。

图5 生物结皮影响高陡边坡侵蚀的路径关系

Fig.5 Pathways by which biocrusts influence erosion on steep slopes

## 4 讨论

### 4.1 高陡边坡生物结皮覆盖影响土壤抗蚀性的途径

生物结皮作为干旱与半干旱生态系统中的关键地表覆被,对高陡边坡土壤抗蚀性的调控作用主要通过间接改善土壤基本性质与直接强化地表抗蚀屏障功能两大路径来实现。从土壤基本性质的间接调控来看,生物结皮对土壤体积质量的影响随坡度呈现差异化特征。本研究中,在75°坡度条件下,生物结皮覆盖下土壤体积质量显著降低,有利于改善孔隙结构,提高坡面抗蚀性(表2)。同时生物结皮覆盖下土壤有机质含量显著升高;研究表明有机质积累不仅为土壤肥力提升以及植物根系生长提供基础,还能通过增强土壤颗粒间的胶结作用间接促进团聚体的形成<sup>[21]</sup>,进而显著提高各坡度边坡土壤的平均重量直径(MWD)与几何平均直径(GMD),其中65°边坡大团聚体含量提升尤为显著,增强土壤结构稳定性,从而降低土体在水力作用下的崩解与流失风险<sup>[22]</sup>。Spearman相关性分析进一步佐证此规律,生物结皮与土壤有机质、GMD呈显著正相关(表3),说明结皮可通过改善土壤结构、提升团聚体稳定性来降低土壤可蚀性,这是关键途径之一。

就直接调控路径而言,生物结皮可显著改变高陡边坡土壤的持水与导水特性,使土壤饱和含水量、饱和导水率均显著降低(表2),此过程既通过影响土壤颗粒组成、体积质量、有机质含量等基本性质间接实现<sup>[23]</sup>,也由生物结皮自身的厚度、藻丝体及分泌物直接驱动,最终共同削弱水分的入渗能力<sup>[24]</sup>。而水分入渗的抑制效应,对高陡边坡抗蚀性提升具有多重价值,一方面可以减少入渗、加快产流,提升坡面抵御暴雨冲刷的能力,增强抗水蚀效果;另一方面,通过调控土壤含水量、降低土体质量增量,同时减少软弱面形成的风险,有效抑制重力侵蚀,减少滑坡、泻溜等灾害风险<sup>[25]</sup>。生物结皮自身的假根、菌丝网络可直接胶结土粒,提高表层土体整体结构稳定性和抗剪强度,从而增强坡面土壤在雨滴反复冲击和短时积水作用下

的抗崩解能力<sup>[26]</sup>。本研究中,结皮覆盖后土壤临界雨滴击穿孔动能平均提升4.6倍,崩解速率降至裸土的7.5%,溅蚀量减少83.7%(图1),并改变坡面微地形、增加地表粗糙度,削弱雨滴击溅动能与坡面径流的连续性冲刷效率<sup>[27]</sup>,直接阻滞溅蚀向径流侵蚀的演化进程,为高陡边坡抗蚀性能提升提供直接保障。

### 4.2 高陡边坡生物结皮覆盖影响坡面水蚀的途径

土壤可蚀性是坡面水蚀发生的内在基础,其效应取决于土壤结构稳定性及对外界扰动的抵抗能力<sup>[28]</sup>,本研究结果表明,生物结皮通过显著改善高陡边坡表层土壤结构特征,提高GMD和MWD等团聚体稳定性指标,从而在结构层面降低土壤的内在可蚀性。在生物结皮增强土壤结构稳定性、降低土壤可蚀性总体趋势上,与张慧妮等<sup>[29]</sup>在黄土丘陵区的研究结论具有一致性,但其作用强度及过程表现出明显的坡度依赖性,反映高陡边坡特殊生境下生物结皮抗蚀机制的差异性。同时,本研究中3种坡度下生物结皮覆盖均降低边坡坡面阻力系数,可能与高陡边坡径流能量本底值较高有关,使生物结皮覆盖对部分水动力学参数的调节效应被削弱或掩盖<sup>[30]</sup>。结构方程模型结果表明,生物结皮对土壤性质具有极显著的正向影响,说明在高陡边坡条件下,结皮对可蚀性的调控核心仍以改善土壤结构稳定性为主。

生物结皮对径流过程的影响呈现显著的坡度依赖性,具体表现为显著缩短初始产流时间、提高径流流速与径流量,且径流流速与径流量随坡度增加呈上升趋势,与郭雅丽等<sup>[31]</sup>、杨凯等<sup>[32]</sup>研究结论相反。可能与黄土高陡边坡的超渗产流机制有关<sup>[33]</sup>,即生物结皮的拒水效应及对土壤水力特性的改造,降低水流与坡面的摩擦阻力,促使雨水入渗受阻、产流时间提前,进而增加径流流速与径流量。同时Spearman相关分析进一步揭示,生物结皮与径流剪切力呈负相关(表3),说明尽管生物结皮在高陡边坡生境下表现出增加径流量的趋势,但其对径流侵蚀动力的削弱作用依然存在。结合水动力学参数结果

可知,生物结皮对径流雷诺数、弗劳德数的影响均不显著(图2),进一步印证结皮对径流动力的调控以削弱剪切力为主,而非改变径流流态。

生物结皮对坡面侵蚀效应的最终影响,是其调控土壤可蚀性与径流过程的综合结果,尽管生物结皮在高陡边坡上表现出促使径流量增加的趋势,但其对坡面侵蚀效应的防护作用依然显著。本研究生物结皮覆盖可大幅降低径流侵蚀量,且坡度越陡、雨强越大则生物结皮的减蚀效应越强。与Kakeh等<sup>[34]</sup>的核心研究结论一致,其研究发现生物结皮覆盖下土壤产沙量显著降低94.7%,证实生物结皮在不同坡度和雨强条件下抗蚀防护效应的稳定性。结合结构方程模型结果,生物结皮是调控高陡边坡侵蚀的核心驱动因素,生物结皮对侵蚀存在显著的直接负向调节作用。既可通过假根、菌丝网络胶结土粒,同时增加地面粗糙度,直接阻滞侵蚀发生,又能改良土壤性质,间接削弱径流动力,而径流作为驱动侵蚀的关键中介因子,其动力弱化可直接降低坡面产沙量。因此,生物结皮可作为黄土高陡边坡侵蚀防控的潜在生态技术手段。

## 5 结论

1)生物结皮可通过调控土壤基本性质、优化团聚体结构、调节坡面水文过程,显著提升黄土高陡边坡土壤抗蚀能力,削弱水力侵蚀强度,是区域重要的生态防蚀因子。

2)生物结皮对水力侵蚀的防护兼具直接效应与多重间接生态调控作用,能够有效稳固表层土体、降低坡面物质松散度,减少由水力侵蚀诱发的风蚀、重力侵蚀及滑坡、泻溜等次生灾害风险。

3)生物结皮可显著阻滞坡面泥沙输移,削减坡面与沟道核心泥沙源的产沙量,有利于遏制区域水土流失、改善沟道水文环境、维持坡沟系统稳定性,为黄土高原生态脆弱区综合治理与可持续发展提供重要生态支撑。

### 参考文献:

- [1] 王鑫盈,马超,吕立群,等.黄土高原不同土地利用类型区浅层滑坡侵蚀特征分析:以蔡家川滑坡事件为例[J].干旱区研究,2024,41(4):697-705.  
Wang Xinying, Ma Chao, Lyu Liqun, et al. Erosion characteristics of shallow landslides under various land-use conditions: An example of the Caijiachuan landslide [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 697-705.
- [2] 廖建红,李涛,彭建兵.高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J].岩土力学,2011,32(7):1939-1944.  
Liao Hongjian, Li Tao, Peng Jianbing. Study of strength characteristics of high and steep slope landslide mass loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1939-1944.
- [3] Li Yanrong, Wang Yuanyuan, Aydin A. Loess structure: Evolution and a scale-based classification[J]. Earth-

Science Reviews, 2024, 249: e104665.

- [4] Jin Zhao, Peng Jianbing, Zhuang Jianqi, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(4): 821-839.
- [5] 马蓓青,杜玉鹏,王怀星,等.持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验研究[J].水土保持学报,2021,35(5):50-56.  
Ma Beiqing, Du Yupeng, Wang Huaixing, et al. Experimental study on stability of loess slope stability under continuous rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 50-56.
- [6] 朱兆华,赵其国,赖庆旺,等.我国南方工程边坡土壤生态修复技术创新的认知与实践[J].土壤,2017,49(4):643-650.  
Zhu Zhaohua, Zhao Qiguo, Lai Qingwang, et al. Cognition and practice on technological innovation of ecological restoration of engineering slope soil in South China [J]. Soils, 2017, 49(4): 643-650.
- [7] Li Mingli, Zhang Xiaochao, Yang Zongji, et al. The rainfall erosion mechanism of high and steep slopes in loess tablelands based on experimental methods and optimized control measures [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(9): 4671-4681.
- [8] 李新荣,张元明,赵允格.生物土壤结皮研究:进展、前沿与展望[J].地球科学进展,2009,24(1):11-24.  
Li Xinrong, Zhang Yuanming, Zhao Yunge. A study of biological soil crusts: Recent development, trend and prospect [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(1): 11-24.
- [9] Tuo Mengyao, Qiao Hailiang, Xu Guoce, et al. Effects of vegetation types on hillslope runoff and soil erosion on the Loess Plateau [J]. Catena, 2025, 260: e109487.
- [10] Zhu Pingzong, Zhang Guanghui, Wang Hongxiao, et al. Effectiveness of typical plant communities in controlling runoff and soil erosion on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 602: e126714.
- [11] Dou Weiqiang, Xiao Bo, Revillini D, et al. Biocrusts enhance soil organic carbon stability and regulate the fate of new-input carbon in semiarid desert ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2024, 918: e170794.
- [12] 吉静怡,赵允格,郭雅丽,等.草地生物结皮分布格局影响坡面水土流失的动力机制[J].农业工程学报,2025, 41(6):137-144.  
Ji Jingyi, Zhao Yunge, Guo Yali, et al. Dynamical mechanisms of soil and water loss as influenced by the distribution pattern of biocrusts in grassland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(6): 137-144.
- [13] Wu Jiuling, Zha Ruibo, Chen Shiting, et al. Biocrust effects on soil stability and hydrodynamic erosion in southern China's red soil [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 391: e126458.
- [14] Gao Liqian, Bowker M A, Xu Mingxiang, 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.

- [15] Chamizo S, Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, et al. Penetration resistance of biological soil crusts and its dynamics after crust removal: Relationships with runoff and soil detachment[J]. *Catena*, 2015, 126: 164-172.
- [16] 赵洋毅,周运超,段旭. 黔中石灰岩喀斯特表层土壤结构性与土壤抗蚀抗冲性[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(2): 18-21.  
Zhao Yangyi, Zhou Yunchao, Duan Xu. Surface soil structure and its relationship with soil anti-erosion and soil anti-scour under the limestone region of karst area in the middle of Guizhou[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(2): 18-21.
- [17] 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[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1773-1782.  
Zhang Chenhui, Xiao Bo, Li Shenglong, et al. Characteristics of biocrusts in croplands and their effects on surface soil disintegration in the black soil region of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1773-1782.
- [18] Zhao Yunge, Qin Ningqiang, Weber B, et al. Response of biological soil crusts to raindrop erosivity and underlying influences in the hilly Loess Plateau region, China[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(7): 1669-1686.
- [19] 焦菊英,王万中,郝小品. 黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J]. *干旱区资源与环境*, 1999, 13(1): 34-42.  
Jiao Juying, Wang Wanzhong, Hao Xiaopin. Precipitation and erosion characteristics of rain-storm in different pattern on Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(1): 34-42.
- [20] 杨茹珍,张风宝,杨明义,等. 急陡黄土坡面细沟侵蚀的水动力学特性试验研究[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 31-36.  
Yang Ruzhen, Zhang Fengbao, Yang Mingyi, et al. Hydraulic characteristics of rill erosion on steep loess slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 31-36.
- [21] 乔丹丹,吴名宇,张倩,等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 92-99.  
Qiao Dandan, Wu Mingyu, Zhang Qian, et al. Effect of bio-char and straw with chemical fertilizers on soil aggregate distribution and organic carbon content in yellow cinnamon soil [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2018(3): 92-99.
- [22] 曹尤淞,张晨晖,肖波,等. 黑土区农田藻藓两类结皮发育对土壤团聚体稳定性和击溅侵蚀的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 892-902.  
Cao Yousong, Zhang Chenhui, Xiao Bo, et al. Effects of cyanobacteria-and moss-biocrusts on soil aggregate stability and splash erosion in croplands of the China mollisols area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4): 892-902.
- [23] Cao Yousong, Bowker M A, Delgado-Baquerizo M, et al. Biocrusts protect the Great Wall of China from erosion [J]. *Science Advances*, 2023, 9(49): eadk5892.
- [24] Xiao Bo, Sun Fuhai, Hu Kelin, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 792-802.
- [25] 白洁,王兵,杨艳芬,等. 黄土高原生物结皮混合群落对坡面流流体阻力特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(4): 177-186.  
Bai Jie, Wang Bing, Yang Yanfen, et al. Effects of mixed communities of biological crusts on fluid resistance characteristics of overland flow on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(4): 177-186.
- [26] 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, 145/146: 81-89.
- [27] Fullhart A T, Nearing M A, McGehee R P, et al. Temporally downscaling a precipitation intensity factor for soil erosion modeling using the NOAA-ASOS weather station network[J]. *Catena*, 2020, 194: e104709.
- [28] Fan Jun, Shao Mingan, Wang Quanjiu, et al. Toward sustainable soil and water resources use in China's highly erodible semi-arid Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 93-100.
- [29] 张慧妮,王兵,张宝琦,等. 黄土丘陵区生物结皮对坡面流水动力特征的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 16-21.  
Zhang Huini, Wang Bing, Zhang Baoqi, et al. Effects of biocrusts on hydrodynamic characteristics of slope flow in hilly regions of Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 16-21.
- [30] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [31] 郭雅丽,赵允格,高丽倩,等. 黄土丘陵区草本植物覆盖下生物结皮对坡面径流流速的削减作用[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1871-1877.  
Guo Yali, Zhao Yunge, Gao Liqian, et al. Reduction of flow velocity by biological soil crust of revegetated grassland in the hilly Loess Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1871-1877.
- [32] 杨凯,赵军,赵允格,等. 生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 154-160.  
Yang Kai, Zhao Jun, Zhao Yunge, et al. Characteristics of runoff on biological soil crust slope in different rainfall durations [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(23): 154-160.
- [33] Bu Chongfeng, Wu Shufang, Han Fengpeng, et al. The combined effects of moss-dominated biocrusts and vegetation on erosion and soil moisture and implications for disturbance on the Loess Plateau, China [J]. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0127394.
- [34] Kakeh J, Gorji M, Mohammadi M H, et al. Biocrust islands enhance infiltration, and reduce runoff and sediment yield on a heavily salinized dryland soil [J]. *Geoderma*, 2021, 404: e115329.