

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.038

陈钧儒, 江子昊, 肖波, 等. 黄土丘陵区人工移植生物结皮集雨面的集雨效率及其抗侵蚀破损能力[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 29-36.

CHEN Junru, JIANG Zihao, XIAO Bo, et al. Performance of artificially transplanted biocrusted soil-surfaces in rainwater harvesting and their capability to resist erosion in the hilly region of Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 29-36.

## 黄土丘陵区人工移植生物结皮集雨面的集雨效率及其抗侵蚀破损能力

陈钧儒<sup>1</sup>, 江子昊<sup>1</sup>, 肖波<sup>1,2</sup>, 窦韦强<sup>1</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. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 为探讨黄土丘陵区不同类型人工生物结皮集雨面的集雨效果及抗侵蚀破损能力。[方法] 以人工移植培养的藻类和藓类生物结皮为研究对象, 以裸土为对照, 分别对其进行野外模拟降雨和抗侵蚀试验(坡面冲刷、土壤静水崩解和单雨滴溅蚀试验), 分析不同类型集雨面的集雨效率与土壤抗冲系数、土壤崩解速率和溅蚀量等抗侵蚀能力指标的差异。[结果] (1) 生物结皮集雨面显著提高集雨效率。当雨强为 100 mm/h 时, 相较于裸土, 生物结皮集雨面的集雨效率显著提高 33.3% ( $F=300.12, p<0.001$ )。 (2) 生物结皮显著降低产沙量并提高抗冲系数。与裸土相比, 藻结皮和藓结皮的产沙量分别减少 178.8% 和 364.6%, 藓结皮和藻结皮的最大抗冲系数分别是裸土的 4.6, 2.8 倍。 (3) 生物结皮显著降低土壤崩解速率和最大崩解率, 且不同生物结皮类型差异显著。与裸土(6.46 g/min)相比, 藻结皮和藓结皮的土壤崩解速率分别降低 35.0% 和 60.2%; 生物结皮平均最大崩解率较裸土降低 23.8%。 (4) 生物结皮显著提高临界击穿雨滴动能并降低土壤溅蚀量。藓结皮和藻结皮的临界击穿雨滴动能分别是裸土(0.5 J)的 3.9, 21.9 倍。同时, 生物结皮较裸土(0.156 g)的单雨滴溅蚀量平均减少 75.3%。[结论] 人工移植培养的生物结皮集雨面显著提高集雨效率和表层土壤的抗侵蚀能力, 对旱区集雨措施的可持续利用和水土保持方面具有重要意义。

**关键词:** 生物土壤结皮; 集雨造林; 水土保持; 生态恢复; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0029-08

### Performance of Artificially Transplanted Biocrusted Soil-surfaces in Rainwater Harvesting and Their Capability to Resist Erosion in the Hilly Region of Chinese Loess Plateau

CHEN Junru<sup>1</sup>, JIANG Zihao<sup>1</sup>, XIAO Bo<sup>1,2</sup>, DOU Weiqiang<sup>1</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The purpose of the study was to explore the rainwater harvesting effect and erosion damage resistance of different types of artificial biocrusted soil surfaces in the hilly region of Chinese Loess Plateau. [Methods] The biocrusted soil surfaces were taken as the research object, and the bare soil surfaces as the control. The study conducted field simulated rainfall and erosion resistance experiments (slope scouring, soil disintegration, and single raindrop splash erosion experiments) on them, respectively. Differences in the erosion resistance among different types of soil surfaces were analyzed. [Results] (1) Biocrusted soil surfaces significantly improved rainwater harvesting efficiency. At a rainfall intensity of 100 mm/h, the rainwater harvesting efficiency of the biocrusted soil surfaces was significantly increased by 33.3% compared to bare soil ( $F=300.12, p<0.001$ ). (2) Biocrusted soil surfaces significantly reduced the

收稿日期: 2023-12-23

修回日期: 2024-01-25

录用日期: 2024-02-27

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-04-29

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42077010); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目(2019)

第一作者: 陈钧儒(1997—), 男, 江苏句容人, 博士研究生, 主要从事土壤物理与水土保持研究。E-mail: Chenjunru@cau.edu.cn

通信作者: 肖波(1981—), 男, 陕西西乡人, 教授, 博士, 博士生导师, 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

sand production and increased the coefficient of erosion resistance. Compared with bare soil, the sand production of cyano and moss biocrusted soil surfaces was reduced by 178.8% and 364.6%, respectively. Compared to bare soil, moss and cyano biocrusts had 4.6 and 2.8 times, respectively, the maximum coefficients of resistance to washout. (3) Biocrusts significantly reduced the soil disintegration rate and maximum disintegration rate, and the differences were significant. Compared with bare soil (6.46 g/min), the disintegration rates of cyano and moss biocrusts were reduced by 35.0% and 60.2%, respectively and the maximum disintegration rate of biocrusts was reduced by 23.8%. (4) Biocrusts significantly increased the raindrop kinetic energy and reduced soil spallation. The critical kinetic energy of moss and cyano biocrusts was 3.9 and 21.9 times higher than that of bare soil (0.5 J), respectively. Meanwhile, the soil splash erosion of the biocrusts was reduced by 75.3% on average compared to bare soil (0.156 g). [Conclusion] Biocrusted soil surfaces significantly improved the erosion resistance and rainwater harvesting effect, which is of great significance in terms of sustainable utilization and soil and water conservation in dry areas.

**Keywords:** biological soil crusts; rainfed afforestation; soil and water conservation; ecological restoration; soil erosion

Received: 2023-12-23

Revised: 2024-01-25

Accepted: 2024-02-27

Online(www.cnki.net): 2024-04-29

干旱是世界农牧业生产和自然环境保护面临的重要威胁之一。气候变暖加速全球水文循环,农业和水文干旱在许多地区大幅增加,尤其是干旱和半干旱地区<sup>[1]</sup>。黄土丘陵区作为我国典型的干旱和半干旱地区,降雨稀少、蒸发剧烈导致的水资源匮乏是限制地区经济和生态发展的关键因素<sup>[2]</sup>。因此,自 20 世纪末,政府大力倡导并实行降雨蓄积措施,促使旱地农林业从被动抗旱向主动避旱模式转变<sup>[3]</sup>。其中,雨水集流系统作为集雨措施之一,被广泛利用于黄土丘陵区灌溉和生活用水蓄积。

雨水集流系统通常由集雨面和储水系统组成。其中,集雨面作为汇集径流的重要组成,其制作材料显著影响集雨效率、径流水质等关键指标<sup>[4]</sup>。随着科技发展,大量化工材料(如混凝土、塑料薄膜、土壤固化剂和化学阻渗剂等)被加速应用于集雨面制作中,但其应用较难避免污染土壤环境等问题<sup>[5-6]</sup>。此外,由于集雨面往往布设于农户的庭前院内、野外自然坡地等,人畜踩踏干扰和极端水文事件均造成集雨面的残缺破损继而降低集雨效率。因此,传统集雨面后期需加固或更换材料以维持集雨效率,难以推广。目前,亟需开发新型集雨材料,使其具有优良集雨性能、保护生态环境并能抵抗干扰而长效使用。自 19 世纪末退耕还林还草政策实施以来,黄土丘陵区植被覆盖率显著增加,生物结皮广泛发育,部分地区覆盖度高达 60%~70%<sup>[7]</sup>。生物结皮作为旱地重要的地表覆盖类型,其实质是由藻类、地衣、苔藓等隐花植物及其菌丝、分泌物等与土壤砂砾黏结形成的复合物<sup>[8]</sup>。生物结皮因其特殊的物质构成和生态功能对土壤多功

能性的影响主要表现在:(1)生物结皮能改变表层土壤孔隙结构和粒径分布而降低水分入渗并增加地表径流<sup>[9]</sup>;(2)作为生物结皮最关键的生态功能,其能通过生物风化作用提高土壤有机质含量并增加团聚体数量,以提升土壤稳定性和抗侵蚀能力<sup>[10]</sup>;(3)自然生长的生物结皮具有抵抗踩踏扰动的能力,并且适当踩踏能增加苔藓结皮的粗糙度和抗剪强度<sup>[11]</sup>;(4)生物结皮具有自我修复功能,其能依托周围结皮为种源,进行自主扩繁<sup>[12]</sup>,此特点使其显著区别于其他集雨面材料。综上所述,生物结皮是极具潜力的集雨面营建材料。目前,有关生物结皮对坡面产流产沙的影响研究较多,大部分研究结果均表明,生物结皮增加地表径流并减少坡面侵蚀,但真正应用于实践场景中的研究较少,且局限于单一生物结皮种类对坡面径流和土壤抗侵蚀性的影响。

基于此,以黄土丘陵区人工移植的生物结皮集雨面为研究对象,以裸土对照,通过野外培养、室内分析及模拟冲刷试验等,比较不同结皮类型(藻结皮、藓结皮)的集雨效率和抗侵蚀破坏能力的变化规律和内在机制,进一步明确生物结皮作为集雨面营建材料的优势和作用,以期为干旱和半干旱地区建立生物结皮集雨措施提供理论基础和数据支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市六道沟流域(38°46′—38°51′ N, 110°21′—110°23′ E),海拔为 1 094.0~1 273.9 m,流域面积为 6.89 km<sup>2</sup>。地形为典型的盖

沙黄土丘陵地貌,属于风蚀—水蚀交错的脆弱生态区。气候属温带半干旱气候类型,年平均气温9~14℃,雨季为6—9月,年平均降水量和蒸发量分别为454,1337mm。土壤以风沙土和黄绵土为主。流域现已形成以灌草丛为主的植被类群,包括柠条(*Caragana korschinskii*)、沙柳(*Salix psammophila*)、苜蓿(*Medicago sativa*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等。

## 1.2 样地选择与处理

试验于2022年5—9月进行,在研究区域内选择远离植物灌丛且坡向一致的裸土坡面。样地坡度为20°并设置3种处理(裸土、藻结皮、藓结皮),每种处理5个重复,共建设15个集雨小区。利用厚度约0.1cm、宽度约0.2m的铁皮进行集雨小区圈建,小区面积为 $1.2 \pm 0.1 \text{ m}^2$ ,底部为圆锥形集雨坑。所有生物结皮取样均在约500m<sup>2</sup>的平坦区域进行,以限制生物结皮特征、土壤质地、坡度和坡向等条件的变化。研究使用0.5m×0.5m的平整铁皮铲起地表0—1cm的典型生物结皮,挑选完整度较高的生物结皮为种源进行坡面覆盖移植,移植盖度为80%。为保证移植的生物结皮发挥其生态功能,集雨小区布设完毕后,连续培养60天,适时浇水并清理杂草以备后续试验。

## 1.3 模拟降雨试验设计

培养结束后采用便携式模拟降雨水泵进行降雨。选择无风晴朗天气,降雨高度为1m,分别模拟60,100mm/h雨强降雨(水源为当地天然水体),每场降

雨持续时间为30min,重复3次。每场降雨间隔3~5天以保证试验前土面干燥。

## 1.4 抗侵蚀试验设计

1.4.1 集雨面冲刷试验 降雨试验结束4周后,利用水泵及供水箱对3种不同地表覆盖类型的集雨面(裸土、藻结皮和藓结皮)进行冲刷试验(图1a),流量大小设置为4L/min,冲刷时间为15min。冲刷区域由铁皮圈建,面积为1.2m×0.1m。待集水槽出现连续水流时开始计时,于第1,2,3,6,9,12,15min时取浑水样。试验结束后倒掉上清液,分别将水样烘干称重。

1.4.2 土壤崩解试验 用1cm高培养皿在集雨面表层采集裸土与生物结皮土壤样品,风干后置于金属网板上,缓慢加水直到完全浸没土样。同时,利用艾德堡HP-5数显推拉力计(量程5N,分辨率0.001N)记录崩解过程(图1b),试验时间为30min;若试验时间内完全崩解,则记录时间。

1.4.3 土壤单雨滴溅蚀试验 单雨滴溅蚀的试验装置由雨滴发生器、滤纸和筛网等组成(图1c)。单雨滴发生器的降雨高度为1.2m,雨滴初速度为0m/s,雨滴频率为1滴/s,雨滴直径为9mm。使用直径和高分别为9,2cm的培养皿采集土壤样品。将土样置于筛网中央,周围铺满滤纸用于盛接溅蚀颗粒。记录开始击溅时单雨滴发生器的刻度(mL)和击穿生物结皮时的刻度(mL),试验结束后,收集滤纸上的溅蚀颗粒并烘干称重。

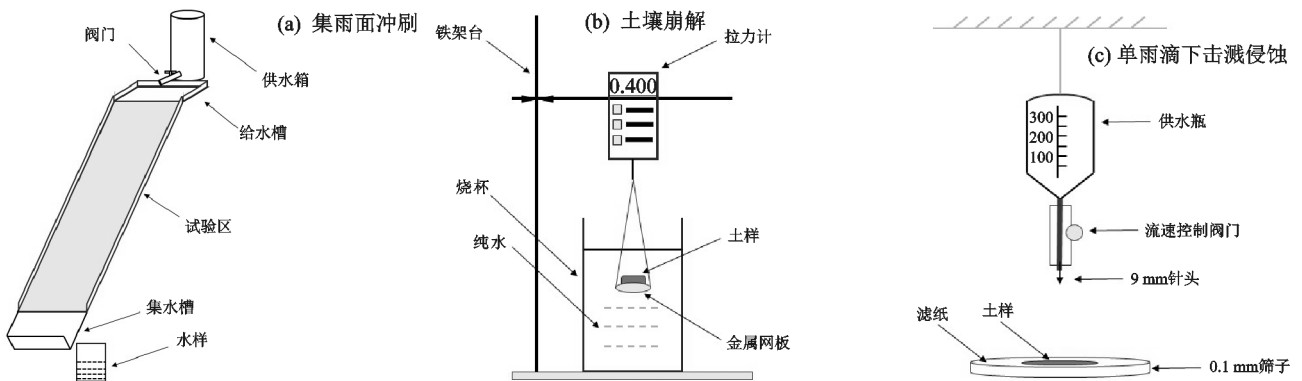


图1 土壤抗侵蚀试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the soil erosion resistance experiment

## 1.5 测定指标与方法

1.5.1 土壤物理性质测定 结皮培养结束后,生物结皮盖度用网格法测定;结皮厚度用游标卡尺测定;用烘干法测定距地表0—5cm土层土壤的容重、饱和含水量、田间持水量及结皮的生物量;地表粗糙度用链条法测定,计算公式为:

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

式中: $C_r$ 为粗糙度(%); $L_1$ 为链条原长度(mm); $L_2$ 为链条形变后长度(mm)。

1.5.2 集雨指标测定 野外模拟降雨试验结束后,根据降雨强度和集雨量计算集雨效率,公式为:

$$E = \frac{W}{P \times S} \times 10^3 \times 100\% \quad (2)$$

式中: $E$ 为集雨效率(%); $W$ 为集雨量(m<sup>3</sup>); $P$ 为降雨量(mm); $S$ 为集雨面积(m<sup>2</sup>)。

### 1.5.3 抗侵蚀能力测定

#### (1) 土壤抗冲系数:

$$AS = \frac{f \times t}{W_0} \quad (3)$$

式中:AS 为土壤抗冲系数(L/min); $f$  为冲刷流量(L/min); $t$  为冲刷时间(min); $W_0$  为烘干泥沙质量(g)。

#### (2) 土壤崩解率:

$$S_0 = \frac{M_0 - M_a}{M_0 - M_b} \quad (4)$$

式中: $S_0$  为崩解时段内的土壤崩解率(%); $M_0$  为崩解开始时的读数(g); $M_a$  为  $a$  时间时天平的读数(g); $M_b$  为崩解结束时天平的读数(g)。

#### (3) 土壤崩解速率:

$$V_b = \frac{M_1 - M_2}{T_1 - T_2} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $V_b$  为土壤崩解速率即单位时间内的土壤崩解量(g/min); $M_1$  为  $T_1$  时刻的土壤崩解读数(g); $M_2$  为  $T_2$  时刻的土壤崩解读数(g); $T_2$  和  $T_1$  为崩解的时间(s)。

#### (4) 雨滴击穿动能:

$$E_r = \frac{1}{2}MV^2 \quad (6)$$

$$V = 4.8 [D \times (1 - e^{-0.85H/D})]^{0.5} \quad (7)$$

$$M = (L_3 - L_4)\rho_w \quad (8)$$

式中: $E_r$  为雨滴击穿动能(J); $M$  为雨滴总质量(g); $V$  为雨滴终点速度(m/s); $D$  为雨滴直径(mm); $H$  为降雨高度(m); $\rho_w$  为雨滴密度(1.0 g/cm<sup>3</sup>); $L_3$  为发生击溅时雨滴发生器的刻度(mL); $L_4$  为击穿生物结皮时的刻度(mL)。

### 1.6 数据处理与统计方法

利用 Microsoft Excel 2021 软件进行数据记录与处理,数据结果表示为平均值±标准差,利用 Origin Pro 2021 软件进行图表绘制,利用 IBM SPSS Statistic 27 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)及多重比较,显著性水平设为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 人工生物结皮发育特征及土壤性质

生物结皮显著改变表层土壤物理属性,不同类型生物结皮的发育特征具有显著差异(表 1)。培养 60 天后,生物结皮的平均粗糙度是裸土的 6.3 倍( $p < 0.05$ );同时,藓结皮厚度和生物量显著高于藻结皮,约为藻结皮的 2 倍。生物结皮的盖度均高于移植盖度(80%)。另外,生物结皮和裸土的土壤容重(0—5 cm)和水分状况也存在显著差异( $p < 0.05$ )。生物结皮的土壤容重比裸土降低 8.4%,生物结皮的饱和含水量和田间持水量均显著高于裸土(平均增幅分别为 25.0%和 16.4%)。

表 1 生物结皮的发育特征及土壤性质

Table 1 Developmental characteristics of the biocrusts and soil properties

地表覆盖类型	粗糙度/%	盖度/%	生物量/(g·cm <sup>-2</sup> )	厚度/mm	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和含水量/%	田间持水量/%
裸土	1.14c	—	—	—	1.56a	23.50c	20.26c
藻结皮	6.32b	88.03a	0.11b	5.92b	1.56a	26.89b	22.59b
藓结皮	8.07a	86.69a	0.22a	12.01a	1.39b	31.88a	24.57a

注:同列不同小写字母表示不同地表覆盖类型间差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.2 人工生物结皮对集雨效率的影响

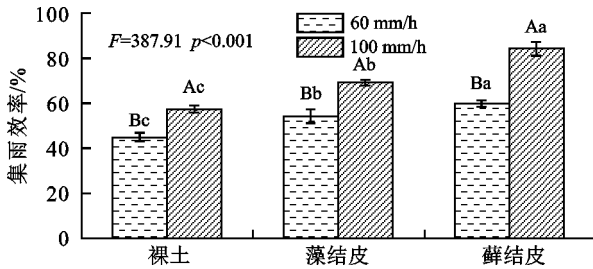
由图 2 可知,相同雨强下,不同地表覆盖类型的集雨效率具有显著差异,且生物结皮的集雨效率显著高于裸土( $p < 0.001$ )。具体而言,当雨强为 60 mm/h 时,藓结皮的平均集雨效率较藻结皮和裸土分别增加 10.4%和 32.9%(图 2a);当雨强为 100 mm/h 时,相较于裸土,生物结皮集雨面显著提高集雨效率,增幅为 33.3%(图 2b)。随着雨强提高,生物结皮集雨面的集雨效率呈增加趋势。

### 2.3 人工生物结皮对土壤抗冲性的影响

生物结皮覆盖显著影响集雨坡面产沙过程,且不同类型集雨面的冲刷产沙量存在较大差异(图 3a)。

藓结皮、藻结皮和裸土集雨面的产沙量均呈先下降后平稳的趋势。前 3 min 径流产沙量锐减,最大降幅达 51.0%;3~6 min 减少趋势逐渐变缓;6~15 min 产沙量逐渐达到稳定。其中,裸土集雨面的产沙量最大,时间为 15 min 时,藻结皮、藓结皮集雨面产沙量较裸土分别减少 178.8%和 364.6%。由图 3b 可知,3 种类型集雨面的土壤抗冲系数均随冲刷时间的延长而增大。抗冲系数为藓结皮>藻结皮>裸土,藓结皮的最大抗冲系数是裸土的 4.6 倍,而藻结皮是裸土的 2.8 倍。藓结皮抗冲系数的平均增幅达到 0.82 L/g,高于藻结皮(0.49 L/g)与裸土(0.17 L/g)。因此,生物结皮覆盖能够显著提高集雨面的抗冲性。





注:不同大写字母表示不同降雨强度间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示不同地表覆盖类型间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 2 不同雨强下生物结皮与裸土集雨面的集雨效率  
Fig. 2 Rainwater harvesting efficiency of biocrusted and bare soil surfaces under different rainfall intensities

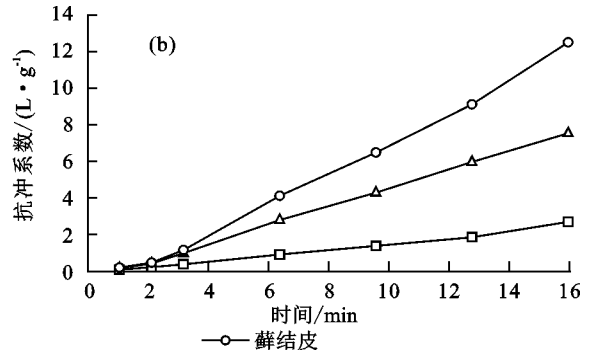
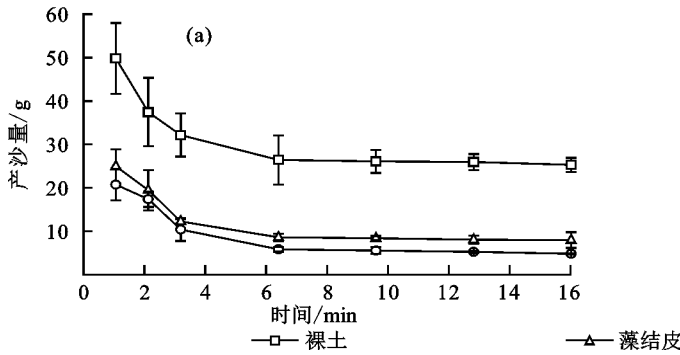


图 3 生物结皮与裸土集雨面的冲刷产沙量和抗冲系数

Fig. 3 Sand production and coefficient of flushing resistance of biocrusted and bare soil surfaces

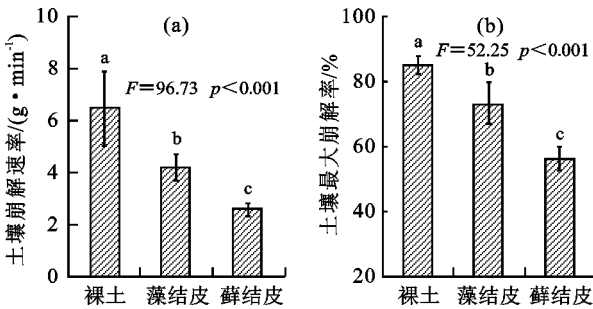


图 4 生物结皮与裸土集雨面的土壤崩解速率和土壤最大崩解率

Fig. 4 Soil disintegration rate and maximum disintegration rate of biocrusted and bare soil surfaces

由图 5 可知,裸土和生物结皮的土壤崩解率变化规律相似,均为快速增长后保持稳定。其中,藻结皮与藓结皮崩解率均在前 100 s 呈指数增长,随后缓慢增长至保持稳定;而裸土崩解率指数增长时间则延迟至 200 s,达到稳定时藻结皮与藓结皮土壤崩解率分别较裸土降低 19.3%,39.8%。

2.5 人工生物结皮对土壤抗溅蚀性的影响

生物结皮与裸土集雨面的临界击穿雨滴动能见图 6a。随着生物结皮的物种演替,临界击穿雨滴动能逐渐增大( $p < 0.001$ )。具体而言,裸土、藻结皮和藓结皮的临界击穿雨滴动能分别为 10.94, 1.94, 0.50 J;藓结皮和藻结皮的临界击穿雨滴动能分别是裸土的 3.9, 21.9 倍;同时,生物结皮较裸土的临界击穿雨

2.4 人工生物结皮对土壤抗崩解性的影响

裸土、藻结皮和藓结皮的土壤崩解速率差异显著(图 4a,  $p < 0.001$ ),具体表现为裸土 > 藻结皮 > 藓结皮。其中,裸土的土壤平均崩解速率为 6.46 g/min,藻结皮、藓结皮的崩解速率分别减小至 4.20, 2.57 g/min,较裸土分别降低 35.0%, 60.2%,生物结皮的土壤平均崩解速率较裸土平均降低 47.6%。裸土、藻结皮和藓结皮的土壤最大崩解率(崩解过程结束时的崩解率)分别为 85.1%, 73.4%, 56.3%(图 4b),生物结皮平均最大崩解率较裸土降低 23.8%。

滴动能平均增加 11.9 倍。生物结皮集雨面显著减少单雨滴溅蚀量(图 6b,  $p < 0.001$ );裸土、藻结皮和藓结皮集雨面的单雨滴溅蚀量分别为 0.156, 0.064, 0.013 g;藻结皮和藓结皮集雨面的单雨滴溅蚀量较裸土分别减少 59.0%, 91.7%。

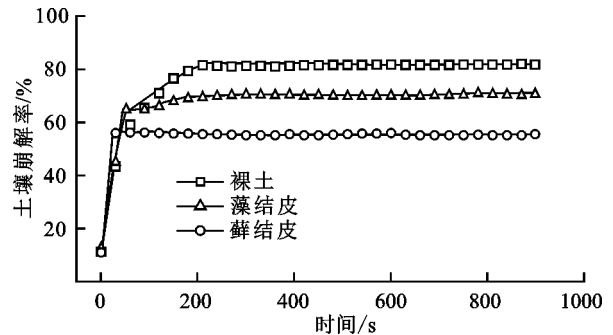


图 5 生物结皮与裸土集雨面的土壤崩解率

Fig. 5 Soil disintegration rate of biocrusted and bare soil surfaces

3 讨论

3.1 生物结皮对集雨效率的影响

生物结皮集雨面显著增加集雨效率,且随雨强增大而提高;其中,藓结皮的集雨效率明显优于藻结皮。集雨效率作为反映集雨面集雨能力的指标,实际为集雨面增加并收集径流量的能力。本研究发现,在降雨强度和坡度相同的情况下,生物结皮显著增加地表径流量且藓类结皮效果更佳。可能与生物结皮厚度、生

物量及其对表土理化性质的影响有关。首先,生物结皮通过其层状结构和发育程度直接影响水分入渗过程<sup>[9]</sup>。具体而言,生物结皮通过菌丝、藻丝体、假根等与土壤颗粒缠绕胶结<sup>[9]</sup>;且随发育程度提高,其厚度和吸水性也相应增加,从而阻碍水分入渗。CHAMIZO 等<sup>[13]</sup>研究表明,生物结皮易与下层土壤间形成空气层,从而影响水分输入。其次,生物结皮通过微生物群落的生物风化效应和固土纳尘作用增加表土粉、黏粒含量,其内部存在的细颗粒富集层改变土壤的孔隙结构,从而阻碍水分入渗<sup>[12]</sup>;同时,生物结皮胞外聚合物(EPS)遇水膨胀,其堵塞生物结皮表面微观孔隙并减少雨水下渗<sup>[9]</sup>。由于生物结皮具有抗侵蚀能力,其能拦截部分上游泥沙于表面而堵塞孔隙,进而增加地表径流。综上所述,生物结皮通过其特殊的物质组成和对表土属性的影响,能显著增加地表径流量,提高集雨效率。

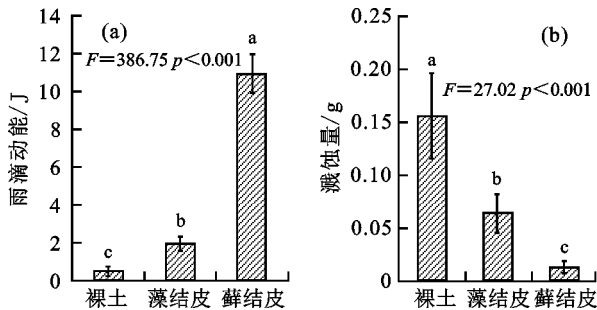


图 6 生物结皮与裸土集雨面的临界击穿雨滴动能和土壤溅蚀量

Fig. 6 Raindrop kinetic energy and soil splash erosion of biocrusted and bare soil surfaces

### 3.2 生物结皮对土壤抗冲性的影响

本研究表明,较裸土集雨面,人工移植的生物结皮集雨面能显著降低产沙量,且藓结皮抗冲性强于藻结皮。一方面,可能归因于生物结皮通过假根、菌丝体等与周围土壤颗粒胶结形成稳定的聚合体。已有研究<sup>[14]</sup>表明,人工接种的蓝藻生物结皮稳定流沙的能力强于细菌生物结皮,是由于蓝藻生物结皮在定植前期开始迅速分泌的大量胞外聚合物与土壤颗粒结合,宏观表现为藻类生物结皮厚度显著高于细菌生物结皮。在本研究中,藓结皮的厚度(约 12.01 mm)显著高于藻结皮(约 5.92 mm),可能导致藓结皮的抗冲性优于藻结皮。生物结皮显著增加土壤黏粒和有机质,改善团粒结构并降低表土容重,从而增加土壤稳定性<sup>[9-12]</sup>,与本研究结果一致;另一方面,生物结皮通过其层状结构对地表微地形的影响而减缓水流冲击并降低坡面流速。郭雅丽等<sup>[15]</sup>研究表明,植物和生物结皮共同覆被的坡面流速显著低于单一植物覆被,说明生物结皮因其特殊的形貌表征(粗糙

度、厚度等)有显著降低流速的作用。抗冲刷试验表明,不同类型的集雨面产沙量均随着时间的延长呈先降低后平稳的趋势,约 6 min 后各集雨面的产沙量几乎稳定,与许欢欢等<sup>[16]</sup>研究结果一致。然而,本研究的产沙量明显提高,可能是由于冲刷形成的径流大小和强度远高于降雨,同时,人工种植结皮的方式及应用场景不同,也影响生物结皮的稳定性。因此,在旱区生物结皮集雨面投入使用前,应注意生物结皮的人工培育方式和发育时间等。综上,生物结皮通过层状结构对水流的缓冲作用和对表土属性的影响,共同限制径流对土壤颗粒分离的能力,而生物结皮发育程度显著影响集雨面的产沙量和抗冲性。

### 3.3 生物结皮对土壤抗蚀性的影响

本研究发现,与裸土相比,生物结皮的土壤崩解速率和最大崩解率显著降低。生物结皮显著削减表层土壤在击溅过程中受到的雨滴动能,并且显著减少单雨滴溅蚀量;同时,随着生物结皮发育程度提高,溅蚀量显著降低。可能归因于:(1)生物结皮加强集雨面表层土粒的胶结程度;(2)生物结皮作为集雨面表土的保护层,通过物理保护作用减缓雨滴击溅速度并降低溅蚀产沙量。具体而言,生物结皮在代谢生长过程中能够分泌胞外多糖等活性胶结物质并黏结固定土粒,溅蚀大土壤团聚体则需要更高的雨滴动能,间接提高集雨面的抗溅蚀与崩解能力。随着生物结皮发育时间越长,其黏结作用越明显<sup>[12]</sup>。生物结皮发育过程中,其假根系的缠绕和固结作用显著提高土壤的稳定性。由于微生物细胞通常带负电荷,静电引力促使土壤颗粒黏结<sup>[17]</sup>,从而增强土壤抗崩解性能并显著减少单雨滴溅蚀量。生物结皮在发育过程中在土表形成蜡质层,进而提高土壤斥水性和抗蚀性<sup>[18]</sup>。但本研究中生物结皮的土壤崩解率显著高于张晨晖等<sup>[19]</sup>的研究结果,其原因可能是本试验对象为人工移植的生物结皮,较农田生物结皮,其对表层土壤的黏结性及属性影响较弱,团聚体水稳定性较低,因此置于静水中易崩解塌落。李聪会等<sup>[20]</sup>研究表明,土壤崩解量与生物结皮生长年限有关,且随生长年限的增加,土壤崩解量呈显著下降后稳定的趋势;发育期为 10 年的生物结皮去除后,土壤崩解量变化率可达 43.5%。已有研究<sup>[21]</sup>表明,生物结皮抗蚀性与结皮厚度及生物量呈正相关。生物结皮抗蚀性还受冻融交替或干湿交替次数和地理位置差异影响,即存在时空变异性。其原因可能是自然条件影响生物结皮的粒径组成、水稳性团聚体等含量,其驱动机制仍需进一步研究。

### 3.4 旱地生物结皮集雨面建设的生态及水土保持意义

在传统径流造林模式中,裸土集雨面因表土松

散,径流泥沙直接堆积于集雨面下方的植树穴中并影响幼苗的存活率。作为人畜生活用水时,产沙量过多使集流水质浑浊不清,缩短可利用时限,进而造成水资源浪费。而本试验表明,人工生物结皮集雨面显著提高集雨效率和抗侵蚀能力。具体而言,一方面,生物结皮通过改变土壤孔隙结构、粒径分布阻碍水分入渗,继而增加地表径流并提高集雨效率;另一方面,生物结皮通过对表层土壤的黏结聚合作用和物理保护能力增加地表稳定性,从而减少径流产沙量和溅蚀量。由于生物结皮属绿色天然材料,因此,从根本上避免化学物质对径流水质的污染。ROCHA 等<sup>[22]</sup>评价旱生植物及生物结皮作为绿色屋顶的覆被材料对集雨量和水质的影响表明,生物结皮集流水质符合欧盟饮用水水质标准。同时,由于生物结皮对岩石、沙砾等的生物化学风化作用,收集的径流可能存在部分矿质离子(如  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  等),而适量的离子浓度是饮用水和灌溉水中必不可少的成分<sup>[23]</sup>。沙质土表面发育的生物结皮具有极强的抗逆性,能利用逆境胁迫维持自身的生物多样性;若生物结皮受自然或人为干扰而破损,其能利用四周结皮为种源进行自主扩繁,保证生态系统的良性循环<sup>[24]</sup>,使生物结皮显著区别于其他集雨面材料。基于此,可以认为生物结皮作为旱区集雨面材料具有增加径流、净化水质和提高土壤抗侵蚀性的功能,对解决旱区水资源供应不足、改善黄土丘陵区生态环境等方面具有积极意义。目前培育生物结皮的方式通常有 2 种:(1)以天然生物结皮碎片为种源,进行野外移植或撒播培育;(2)以天然碎片为种源进行室内培育扩繁,然后以人工碎片为种源进行撒播培育。有研究<sup>[25]</sup>表明,人工生物结皮种源与天然生物结皮种源培养效果类似,但天然生物结皮的大量采集将导致新的地表破坏和生态脆弱区的形成。因此,若进行大面积生物结皮集雨面建设时,以人工生物结皮种源为优。

## 4 结论

(1)生物结皮显著提高集雨面的集雨效率且藓结皮效果优于藻结皮。当雨强为 60 mm/h 时,藓结皮的平均集雨效率较藻结皮和裸土分别增加 10.4%, 32.9%。同时,集雨效率随雨强增大而提高。

(2)相较于裸土,生物结皮集雨面通过自身结构的缓冲能力与对表土理化性质的影响,显著提升集雨面的抗侵蚀能力且藓结皮效果优于藻结皮。藓结皮的最大抗冲系数是裸土的 4.6 倍,而藻结皮是 2.8 倍;藻结皮、藓结皮的崩解速率较裸土分别降低 35.0%, 60.2%;藻结皮和藓结皮集雨面的单雨滴溅蚀量较裸土分别减少 59.0%, 91.7%。

(3)生物结皮集雨面的抗侵蚀能力受生物结皮移植方式、发育程度等影响。因此,在实际应用中,应尤其关注结皮生物量、盖度等生长指标。

### 参考文献:

- [1] ZHENG K, WEI J Z, PEI J Y, et al. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 660: 236-244.
- [2] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.
- [3] 成六三, 李小雁, 高前兆. 干旱半干旱区集雨绿化系统研究现状及其发展趋势[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(6): 781-788.
- [4] CHENG L S, LI X Y, GAO Q Z. Actuality and development trend of afforestation by rainwater-gathering in arid and semiarid regions[J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(6): 781-788.
- [4] 徐振远, 徐振, 邢尚军, 等. 半干旱地区雨水高效收集利用技术研究综述[J]. *山东林业科技*, 2012, 42(5): 91-95, 46.
- [5] XU Z Y, XU Z, XING S J, et al. Summary of research on efficient rainwater collection and utilization technology in semi-arid areas[J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2012, 42(5): 91-95, 46.
- [5] 肖国举, 王静. 黄土高原集水农业研究进展[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 1003-1011.
- [6] XIAO G J, WANG J. Research on progress of rainwater harvesting agriculture on the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 1003-1011.
- [6] 冯学赞, 张万军, 赵艳敏, 等. 生物集雨面营建技术及其集雨效率的研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 145-149.
- [7] FENG X Z, ZHANG W J, ZHAO Y M, et al. Construction technology and rainwater harvesting efficiency of biological rainwater catchment[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(1): 145-149.
- [7] QIU D X, BOWKER M A, XIAO B, et al. Mapping biocrust distribution in China's drylands under changing climate[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: e167211.
- [8] WEBER B, BELNAP J, BÜDEL B, et al. What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community[J]. *Biological Reviews*, 2022, 97(5): 1768-1785.
- [9] XIAO B, SUN F H, HU K L, 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.



- [10] 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.
- [11] GAO L Q, SUN H, XU M X, et al. Biocrusts resist runoff erosion through direct physical protection and indirect modification of soil properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 133-142.
- [12] XIAO B, BOWKER M A, ZHAO Y G, et al. Biocrusts: Engineers and architects of surface soil properties, functions, and processes in dryland ecosystems[J]. *Geoderma*, 2022, 424: e116015.
- [13] CHAMIZO S, MUGNAI G, ROSSI F, et al. Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils: Gaining insights for applicability in soil restoration[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: e49.
- [14] KHEIRFAM H, ASADZADEH F. Stabilizing sand from dried-up lakebeds against wind erosion by accelerating biological soil crust development[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, 98: e103189.
- [15] 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速的削减作用[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1871-1877.
- GUO Y L, ZHAO Y G, GAO L Q, 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.
- [16] 许欢欢, 张宝琦, 汪建芳, 等. 黄土高原典型生物结皮对坡面产流产沙过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 8-13.
- XU H H, ZHANG B Q, WANG J F, et al. Effects of typical biological crusts on slope runoff and sediment load in Loess Plateau region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 8-13.
- [17] LAN S B, WU L, ADESSI A, et al. Cyanobacterial persistence and influence on microbial community dynamics over 15 years in induced biocrusts[J]. *Environmental Microbiology*, 2022, 24(1): 66-81.
- [18] DAVIS D D, HORTON R, HEITMAN J L, et al. Wettability and hysteresis effects on water sorption in relatively dry soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(6): 1947-1951.
- [19] 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 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[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1773-1782.
- [20] 李聪会, 朱首军, 陈云明, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 6-10.
- LI C H, ZHU S J, CHEN Y M, et al. Effects of biological crusts on soil anti-erodibility in loess hilly areas[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3): 6-10.
- [21] 李金峰, 孟杰, 叶菁, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 67-79.
- LI J F, MENG J, YE J, et al. The development characteristics and formation process of biological soil crusts in wind-water erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 67-79.
- [22] ROCHA B, PAÇO T, LUZ A, et al. Are biocrusts and xerophytic vegetation a viable green roof typology in a Mediterranean climate? A comparison between differently vegetated green roofs in water runoff and water quality[J]. *Water*, 2021, 13(1): e94.
- [23] KIDRON G J, STARINSKY A, XIAO B. The enigmatic enrichment of potassium and magnesium in runoff and floodwater in the Negev: Do biocrusts hold the key? [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 911: e168753.
- [24] JIA R L, ZHAO Y, GAO Y H, et al. Antagonistic effects of drought and sand burial enable the survival of the biocrust moss *Bryum argenteum* in an arid sandy desert[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(4): 1161-1172.
- [25] 赵燕翘, 连煜超, 许文文, 等. 人工培育生物结皮形成和发育对单次降雨量变化的响应[J]. *生态学报*, 2024, 44(2): 723-732.
- ZHAO Y Q, LIAN Y C, XU W W, et al. Response of formation and development of artificial biocrusts to changes in single rainfall [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(2): 723-732.