

暴雨条件下典型红壤区生物结皮坡面水土流失过程研究

陈诗婷^{1,2}, 查 轩^{1,2}, 黄少燕^{1,2}, 毛兰花^{1,2},
姜兴雪^{1,2}, 吴洁玲^{1,2}, 黄博文^{1,2}, 周飞华^{1,2}, 张 柳^{1,2}

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.福建省亚热带资源与环境重点实验室,福州 350007)

摘要:为探明暴雨条件下典型红壤区生态恢复工程实施后生物结皮覆盖对坡面水土流失过程的影响,通过模拟降雨和室内分析试验,探究不同结皮覆盖度(0%,20%,40%,60%,80%)坡面的土壤物理属性、水动力学特征及产流产沙过程。结果表明:(1)生物结皮覆盖下的红壤坡面土壤黏结力平均增加 13.26%,土壤容重与穿透阻力平均分别减小 8.97%和 61.51%,表明生物结皮可有效增强红壤区坡面土壤稳定性,提升土壤抗蚀能力;(2)相较对照坡面,其余盖度坡面均可有效改善水流流态,坡面径流剪切力介于 0.08~0.12。水流功率和断面单位能量分别减小 12.22%~78.89%,8.32%~53.15%,坡面阻力系数增大 1.09~1.50 倍;(3)各生物结皮盖度坡面减流、减沙效益分别介于 12.50%~78.76%,17.03%~94.31%,其中高覆盖度(80%)坡面土壤侵蚀强度较小。研究结果为有效防治红壤区坡面水土流失工作提供理论依据和实践参考。

关键词:生物结皮;模拟降雨;水土流失;典型红壤区

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)06-0095-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.013

Soil Erosion Process on Slope with Biological Soil Crusts Under
Rainstorm in Typical Red Soil Region

CHEN Shiting^{1,2}, ZHA Xuan^{1,2}, HUANG Shaoyan^{1,2}, MAO Lanhua^{1,2}, JIANG Xingxue^{1,2},
WU Jieling^{1,2}, HUANG Bowen^{1,2}, ZHOU Feihua^{1,2}, ZHANG Liu^{1,2}

(1.College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2.Fujian Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, Fuzhou 350007)

Abstract: In order to reveal the effect of biological soil crusts on process of soil and water loss on the slope after the implementation of ecological restoration project in typical red soil region under rainstorm, simulated rainstorm experiments and indoor experiments were conducted. In this research, the soil physical properties, hydrodynamic characteristics, runoff and sediment yield processes of slopes with different biological soil crusts coverages (0, 20%, 40%, 60% and 80%) were explored. The results showed that: (1) Under different coverages of biological soil crusts, the soil cohesion of red soil slope increased by 13.26% on average, while the soil bulk density and penetration resistance decreased by 8.97% and 61.51% on average, respectively, indicating that biological soil crusts effectively enhanced soil stability and soil anti-erodibility in red soil area. (2) Compared with the control slope, biological soil crusts effectively improved the flow pattern of slope, and the values of runoff shear stress ranged from 0.08 to 0.12. The water flow power and section unit energy reduced by 12.22%~78.89% and 8.32%~53.15%, respectively, and the slope resistance coefficient increased by 1.09~1.50 times. (3) The benefits of runoff reduction and sediment reduction on the slope surface of each biological crust coverage were between 12.50% and 78.76%, 17.03% and 94.31%, respectively, in which the soil erosion intensity of the slope with high coverage (80%) was the lowest. The results provided theoretical basis and practical references for effective prevention and control of soil and water loss on slope in red soil area.

Keywords: biological soil crusts; simulated rainstorm; soil and water loss; typical red soil area

收稿日期:2022-04-11
资助项目:国家重点研发计划项目“南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”(2017YFC05054);国家科技支撑计划项目“福建红壤区生态修复和持续经营关键技术集成和示范”(2014BAD15B02)
第一作者:陈诗婷(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: cst.chen@qq.com
通信作者:查轩(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

生物土壤结皮简称生物结皮,是由藻类、地衣、苔藓等生物组分及其代谢产物与土壤颗粒胶结、捆绑而形成的结构复合体^[1]。结皮生物组分对水分、光热等极端条件的忍耐力较强,广泛存在于不同的气候区。生物结皮作为近地表特征的重要组分,其对不同生态区的土壤环境^[2]、水文环境^[3]、地表侵蚀过程^[4-5]均发挥着积极的作用。张思琪等^[6]研究认为,生物结皮所具有的生物(固碳、固氮)、物理、化学作用可以显著增强土壤黏结力,增加土壤有机质与养分含量,进而稳定土壤使之不易被侵蚀;也有研究^[7]表明,退耕还林(草)等工程实施后土壤近地表层特性发生显著变化,诸如植被覆盖率提高、植被茎秆及枯枝落叶层出现、生物结皮发育等,从而显著影响坡面流流速、削弱径流剪切力,地表物理覆盖显著减小坡面侵蚀动力,但对土壤属性的影响较小;Gao 等^[8]研究指出,生物结皮的发育可通过有效占据植被间隙空地对地表土壤起直接保护作用,同时显著改善土壤属性来增强土壤稳定性,进而缓解坡面水土流失。

红壤丘陵区是仅次于黄土高原水土流失最为严重的地区之一。针对红壤区侵蚀退化地水土流失严重、生态恢复难度大等典型问题,该区从 20 世纪 80 年代开始实施退耕还林、天然林保护、矿区修复等一系列生态恢复工程^[9],坡面土壤侵蚀量显著降低,侵蚀环境发生变化。经过实地考察,该区部分造林地、林草间隙广泛发育生物结皮,对地表水土流失过程和植被群落的发育产生深刻影响^[10]。以往有关生物结皮对坡面水土流失过程的影响研究主要集中于干旱半干旱地区,而对红壤区生物结皮的研究较少;此外,生物结皮覆盖度如何影响坡面水土流失过程,并且能否通过改变土壤属性影响坡面水土流失过程等问题尚缺乏明确的解释。

因此,本研究针对红壤丘陵区侵蚀环境变化下生物结皮覆盖对坡面水土流失过程的影响进行研究。结合研究区的地形和降雨条件,开展生物结皮不同盖度下红壤侵蚀退化地坡面的模拟降雨试验,揭示不同盖度生物结皮坡面的土壤物理特性、水动力学特性及产流产沙过程,并分析其水土保持效益。加强地表生物土壤结皮对侵蚀过程的影响研究,可为构建花岗岩红壤侵蚀退化地土壤侵蚀预报模型提供基础资料,同时也为红壤区土壤侵蚀防治提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 试验样品 试验土壤采自福建省长汀县河田镇,长汀县是我国红壤侵蚀最为严重的区域之一。根据均匀分布、随机抽样的原则进行土样采集,保证采样结果的典型性与代表性。为研究花岗岩红壤坡面

在不同生物结皮覆盖度下的水土流失过程,本研究以自制土槽内自然发育(2 年)的生物结皮为研究对象,设计 4 个生物结皮盖度梯度 20%,40%,60%,80%,裸土坡面为对照。运用网格法测定坡面结皮盖度,并辅以 Photoshop 软件对坡面数码照片进行测算,最终确定结皮盖度。生物结皮为苔藓—藻类混合结皮,藓类植物以真藓(*Bryum argenteum*)、细叶真藓(*Bryum capillare*)为主,藻类植物以绿藻(*Chlorophyta*)为主。

1.1.2 模拟降雨装置 本试验采用的降雨设备为 BX—1 型侧喷式降雨系统。降雨时供水压强由阀门控制,降雨强度主要通过喷片孔板的孔径来调节,降雨高度为 6 m,降雨均匀度在 85%以上,降雨强度调控范围 20~200 mm/h,满足试验要求。依据中国气象局颁布的降水强度等级划分标准,定义日降雨量 0.1~9.9 mm 为小雨日,10.0~24.9 mm 为中雨日,25.0~49.9 mm 为大雨日, ≥ 50.0 mm 为暴雨日。本研究结合长汀县的降雨特征,试验降雨强度为 2.0 mm/min,场降雨历时 30 min,场降雨量 60 mm。

1.1.3 试验土槽 试验小区是规格为 1.5 m×0.5 m×0.35 m 的可调式钢槽,共 10 个。本研究根据长汀县地形特征,试验坡度设计为 15°,各组试验重复 2 次。试验小区设置 4 组结皮盖度梯度(20%,40%,60%和 80%),设置 1 组对照(无结皮裸地),每个处理 2 次重复。

1.2 试验设计

试验地位于福建师范大学地理科学学院试验场(26°04'N,119°30'E),试验场处于开阔地带,周围无遮挡,符合试验要求。填土前将供试土壤风干并过 10 mm 筛,在试验土槽底部装填 2 cm 厚的天然细沙,而后在其上方铺设透水纱布,保障试验期间土槽的排水状况良好。填土时均匀铺层,每层 3 cm 厚,边填土边压实。装填完毕后整平土壤,保证与自然土壤条件的一致性。同时注意控制填土容重保持在 1.26~1.33 g/cm³。经测定试验土样 >3.0 、3.0~2.0、2.0~1.0、1.0~0.5、0.5~0.25、 <0.25 mm 的团聚体颗粒质量比重分别为 24.76%,13.95%,8.29%,23.14%,10.06%,19.86%。

降雨试验开展于 2021 年 9 月 10 日至 10 月 10 日。降雨试验前需对雨强进行率定,以保证每次降雨的均匀度均达到 85%以上,并用 0.5 mm/min 降雨强度进行预降雨至坡面产流为止。静置 24 h 后,对各坡面含水量进行测量,确保试验前各坡面含水量基本一致。降雨试验开始后,观察记录坡面初始产流时间,用容积为 1 000 mL 的编号塑料瓶接取坡面径流泥沙,每 3 min 接 1 次样,并按顺序摆好进行称重、记录。整个降雨过程连续接样,每 3 min 用高锰酸钾溶液测定流速。在降雨前、中、后 3 个时段记录坡面水温。降雨试验结束后记录取样瓶编号,将其带回实验

室进行泥沙沉淀。径流量和泥沙量的测定均按照《水土保持试验规程》^[11] 执行。

1.3 指标测定与数据处理

(1) 本试验采用环刀法测定土壤容重和土壤水分, 每个处理均重复测定 2 次。生物结皮厚度运用游标卡尺根据网格布点进行测定, 同时利用便携式剪切仪(洪堡 H—4212M)测定土壤黏结力, 利用土壤硬度计(TYD—1 型速测仪)测定土壤穿透阻力, 每个处理均重复测定 25 次。

(2) 本试验中所运用水动力参数主要为雷诺数(Re)、弗劳德数(Fr)、阻力系数(f)、径流剪切力(τ)、水流功率(ω)和断面单位能量(E), 计算公式为:

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

$$h = \frac{q}{V}$$
(2)

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.00221t^2}$$
(3)

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$
(4)

$$f = \frac{8gRJ}{V^2}$$
(5)

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J \cdot g$$
(6)

$$\omega = \tau \cdot V$$
(7)

$$E = \frac{aV^2}{2g} + h \cos \theta$$
(8)

式中: q 为单宽流量(m^2/s); V 为水流流速(m/s); h 为水深(m); ν 为运动黏滞系数(m^2/s); R 为水力半径(m); t 为水温($^{\circ}\text{C}$); g 为重力加速度(m/s^2); J 为水力能坡(Pa); γ 为含沙水流密度(kg/m^3); a 为能动校正系数, $a=1$; θ 为坡度($^{\circ}$)。

(3) 针对地表生物结皮覆盖下不同水土流失治理效果, 对不同盖度结皮分布下坡面的减流减沙效益进行综合分析。根据《水土保持综合治理效益计算方法(GB/T 15774—2008)》^[12], 计算公式为:

$$f_r = \frac{(L_d - L_c)}{L_d} \times 100\%$$
(9)

$$f_s = \frac{(S_d - S_c)}{S_d} \times 100\%$$
(10)

式中: f_r 、 f_s 为各生物结皮覆盖小区的减流率(%) 和减沙率(%); L_d 、 L_c 为对照与各处理小区的径流量(L); S_d 、 S_c 为对照与各处理小区的泥沙量(g)。

2 结果与分析

2.1 生物结皮盖度对土壤物理特性的影响

生物结皮厚度特征是国内外研究中表征结皮形成阶段的常用指标。本研究中不同盖度下各处理坡面结皮厚度最小值为 8.13 mm(20%), 最大值为

15.97 mm(80%), 80% 盖度坡面结皮厚度显著大于其余坡面(表 1)。在土壤物理属性方面, 土壤容重和穿透阻力均随生物结皮盖度增大而显著减小, 土壤黏结力呈显著增大趋势。与对照坡面相比, 结皮覆盖下土壤黏结力平均增加 13.26%, 而土壤容重与穿透阻力平均减小 8.97% 和 61.51%(表 1)。

表 1 不同生物结皮盖度坡面土壤物理特性及结皮厚度特征

覆盖度/%	结皮 厚度/mm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏结力/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	穿透 阻力/ MPa
0	—	1.31a	7.01a	1.09a
20	10.55a	1.27b	7.53b	0.76b
40	11.36b	1.26b	7.77b	0.63c
60	11.65b	1.19c	8.07c	0.58d
80	13.33c	1.05d	9.13d	0.52d

注: 同列不同小写字母表示不同盖度处理间差异显著($p < 0.05$)。

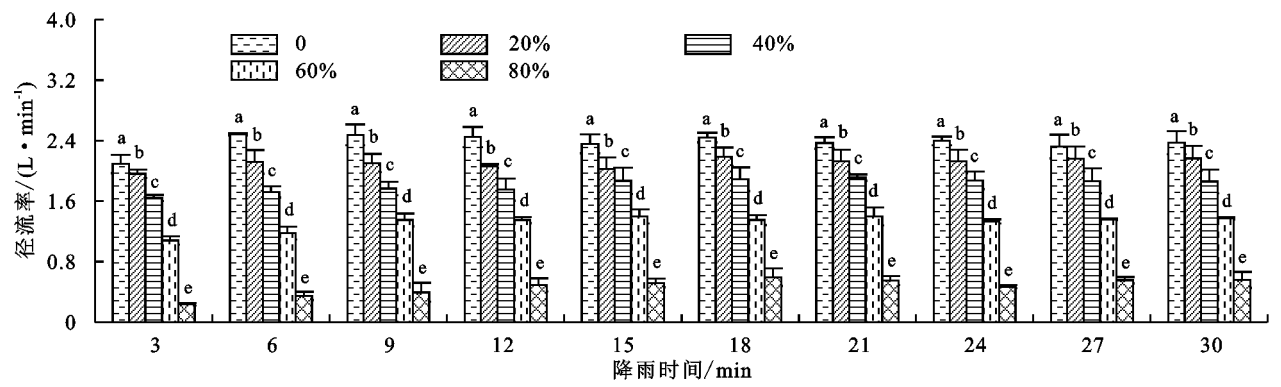
2.2 生物结皮盖度对坡面产流特征的影响

生物结皮本身具有吸水能力且其发育可改善土壤属性、坡面贮水量增大, 故初始产流时间较长。由表 2 可知, 2.0 mm/min 雨强条件下, 各坡面初始产流时间随着生物结皮盖度的增大而延长。各坡面初始产流时间表现为生物结皮盖度 80% > 60% > 40% > 20% > 0。与对照坡面相比, 其余坡面初始产流时间分别延长 2.25(20%), 2.75(40%), 4.75(60%), 6.25 倍(80%), 说明生物结皮覆盖可有效延长侵蚀退化地坡面的初始产流时间, 且 80% 盖度效果最为显著。在不同生物结皮盖度下, 产流峰值较对照均有不同程度的缩减, 80% 盖度下坡面产流量峰值最低且有效延缓峰值出现时间, 产流峰值仅为对照坡面的 23.79%, 说明生物结皮可有效改善土壤结构, 增强土壤保水能力, 延缓坡面产流峰值出现时间。

表 2 不同生物结皮盖度坡面产流特征

覆盖度/%	初始产流 时间/min	产流量峰值/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	峰值出现 时间/min
0	0.4	2.48	6
20	0.9	2.18	18
40	1.1	1.91	21
60	1.9	1.39	21
80	2.5	0.59	18

在不同生物结皮盖度下, 各坡面径流过程总体上变化规律类似。降雨初期(0~9 min), 坡面径流率随降雨时间的增加呈上升趋势, 随后发生波动变化; 在降雨后期(21~30 min) 径流进入较稳定的状态(图 1)。不同生物结皮坡面径流率均随结皮盖度的增大而逐渐减小, 其平均径流率分别为 2.42(0), 2.11(20%), 1.83(40%), 1.35(60%), 0.51 L/min(80%), 0~80% 生物结皮坡面不同降雨历时径流率比值为 1 : 0.87 : 0.75 : 0.55 : 0.21。



注:图中同一降雨时间内不同字母表示不同盖度间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同生物结皮盖度坡面径流率变化特征

随着降雨时间的延长,各坡面累积径流量不断增大(图 2)。按坡面累积径流量大小排序,不同生物结皮盖度表现为 $0>20\%>40\%>60\%>80\%$,对照坡面累积径流量分别为 20%~80%结皮盖度坡面累积径流量的 1.14,1.32,1.79,4.71 倍。在 2.0 mm/min 的雨强条件下,80%生物结皮盖度对坡面减流效果最为显著。

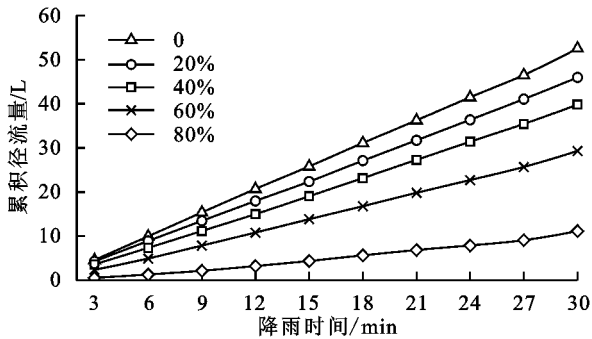


图 2 不同生物结皮盖度坡面累积径流量变化特征

2.3 生物结皮盖度对坡面产沙特征的影响

当生物结皮盖度在 0~40%时,随着降雨时间的延长,坡面土壤侵蚀速率呈波动变化趋势,对照坡面侵蚀率变化较为复杂,出现多峰多股现象。而当生物结皮盖度 $\geq 60\%$,坡面的土壤侵蚀速率变化较为稳定,保持较低水平(图 3)。在产沙过程中,降雨迅速转化为坡面径流,坡面出现较多浅层片流,表层土粒疏松使得地表微地形起伏,形成多方向细状水流,导致坡面出现差异性侵蚀,从而引发土壤侵蚀速率随降雨时间出现起伏较大的现象。

随着生物结皮盖度的增加,各坡面的土壤侵蚀速率基本呈下降趋势。0~80%坡面平均土壤侵蚀速率分别为 0.417,0.334,0.164,0.059,0.024 g/($\text{m}^2 \cdot \text{min}$)。无生物结皮覆盖(盖度为 0)时的侵蚀速率比生物结皮覆盖坡面大,其中 20%盖度坡面侵蚀速率的变化较对照坡面差异较小, $\geq 40\%$ 结皮盖度坡面差异较为显著。

随着生物结皮盖度的提高,累积泥沙量逐渐降低(图 4)。5 个坡面累积产沙量表现为生物结皮盖度 $0>20\%>40\%>60\%>80\%$,对照坡面的累积泥沙量最大,80%盖度坡面相对较低,20%~80%结皮盖度

坡面与对照坡面相比,累积泥沙量分别减少 26.70%,60.61%,85.92%,94.31%,说明生物结皮可有效削弱坡面侵蚀强度,拦蓄水土。试验结果表明,2.0 mm/min 的雨强条件下,在生物结皮盖度达到 80%后坡面能保持较高的减沙效益。

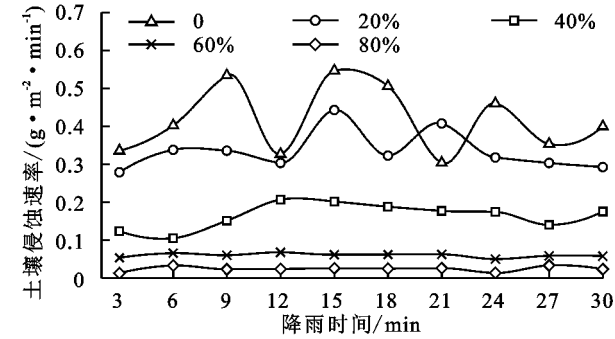


图 3 不同生物结皮盖度坡面土壤侵蚀速率变化特征

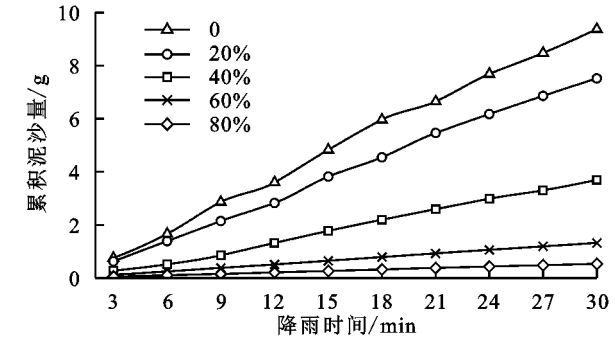


图 4 不同结皮覆盖度坡面累积泥沙量变化特征

2.4 生物结皮盖度对坡面水动力学特性的影响

2.4.1 运动指标 雷诺数是表征水流紊动状态的重要因素,在相同流量条件下,坡面流雷诺数(Re)越大,水流紊动度越大,流水对坡面土壤侵蚀能力也越强。坡面流弗劳德数(Fr)主要用于表征水流的重力与惯性力两者之间的对比关系,当 $Fr>1$ 时,惯性力起主导作用,水流为急流;当 $Fr<1$ 时,重力起主导作用,水流为缓流;当 $Fr=1$ 时,重力、惯性力相等,水流为临界流。在本试验中,坡面流雷诺数随着结皮盖度的增加而下降, $Re<500$,坡面水流流态表现为层流(表 3)。相对于对照坡面,生物结皮覆盖下 Re 平均减少 47.46%。其变化主要原因为随着地表生物

结皮覆盖量的增大地表粗糙度减小,坡面水流紊动程度减弱。生物结皮覆盖对坡面 Fr 的变化也有一定影响。当降雨强度一定时, Fr 随着盖度的增加呈下降趋势。在 2.0 mm/min 雨强下,除 60%与 80%生物结皮覆盖坡面为缓流外,其余均属于急流,其他生物结皮坡面 Fr 相较于 20%盖度坡面分别减小 1.67%,45.83%,67.50% (表 3),说明较高盖度的生物结皮覆盖可有效改善坡面水流流态,进而削弱坡面径流冲刷能力。

2.4.2 力学指标 坡面阻力系数表示坡面流在运动过程中受到的反作用力。径流剪切力是指水流冲刷土表、破坏土壤结构,进而将土壤冲出径流断面的能力,是表征水动力特性的重要参数。由表 3 可知,总体上坡面流阻力系数随着地表结皮盖度的增加而增大,取值范围为 1.52~14.32。原因在于生物结皮的覆盖削减径流做功能量越大,拦截径流能力增强。在一定的降雨强度下,生物结皮坡面径流剪切力均小于裸地坡面,当生物结皮盖度从 20%增加到 80%,对照坡面径流剪切力分别是结皮坡面的 1.09,1.20,1.33,

1.50 倍,表明生物结皮可有效缓解径流对坡面土壤的冲刷作用,并且生物结皮盖度不同,径流剪切力的下降幅度亦不相同。

2.4.3 能量指标 水流功率表示土壤侵蚀过程中径流顺坡流动时消耗势能的功率大小。断面单位能量是表征坡面径流土壤侵蚀力和泥沙携带能力的水动力学参数。在 2.0 mm/min 的雨强条件下,生物结皮覆盖坡面水流功率较对照分别减少 12.22%,24.44%,44.44%,78.89%。原因在于结皮的覆盖增大坡面径流动能,减小势能,进而水流功率下降。5 种生物结皮盖度坡面水流功率大小排序为生物结皮盖度 0>20%>40%>60%>80%。随着结皮盖度的不断增加,其坡面流断面单位能量在同一雨强条件下逐渐减小,相较于对照处理,不同覆盖度结皮处理坡面断面单位能量减少量大小排序为生物结皮盖度 20%>40%>60%>80%,相较于盖度最小的 20%生物结皮坡面,其他处理坡面较其分别减少 9.51%,22.25%和 48.90%,这表明地表生物结皮随盖度增加显著降低坡面水流功率。

表 3 不同结皮覆盖度坡面水动力学参数

覆盖度/%	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	雷诺数	弗劳德数	阻力系数	径流 剪切力/Pa	水流功率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	断面单位 能量/m
0	0.78a	35.64a	1.19a	1.52a	0.12a	0.90a	7.45a
20	0.75a	31.17a	1.20a	1.50a	0.11a	0.79b	6.83b
40	0.71a	26.98b	1.18a	1.54a	0.10a	0.68c	6.18b
60	0.43b	19.87c	0.65b	5.04b	0.09b	0.50d	5.31c
80	0.22c	7.56d	0.39c	14.32c	0.08c	0.19e	3.49d

注:同列不同小写字母表示不同盖度处理间差异显著($p<0.05$)。

3 讨论

3.1 生物结皮盖度对坡面土壤物理特性的影响

生物结皮可通过增加地表粗糙度、改善土壤紧实程度来稳定土壤结构,提升土壤吸水性,进而影响坡面的侵蚀过程^[13]。在本试验中,地表生物结皮的形成对坡面土壤物理特性具有显著影响,结皮的生长减小坡面土壤容重和土壤穿透阻力、增强土壤黏结力,其影响效果随盖度的增大而增强。Gao 等^[8]研究认为,生物结皮生长初期分泌大量的胞外多糖,可提升土壤的黏结力,加之结皮层菌丝结构可有效固定土壤颗粒,对坡面起直接保护作用,坡面土壤抵抗径流冲刷的能力随之提高。生物结皮覆盖下土壤与苔藓根茎体交织缠绕,形成稳定的层状结构,不仅能改善土壤稳定性,还能为自身提供生长发育的能量。此外,生物结皮对土壤属性的改善也从另一方面解释土壤抗冲抗蚀性能的提升。

3.2 生物结皮盖度对坡面水动力学特性的影响

受到水—土交互影响,坡面含沙水流的冲刷是土壤侵蚀的主要动力,因此深入剖析坡面水动力学特性是土壤侵蚀动力学研究的基础。本研究试验土为花岗岩红壤土,在南方暖湿气候的作用下,脱硅富铝化现象

明显,形成硅铝铁质红壤土。这类土壤结构疏松,含沙量大,质地较黏重,持水性差,抗蚀能力低^[14]。而在生物结皮覆盖下,坡面的粗糙度高于裸露土表,生物结皮盖度不断上升使得坡面径流剪切力得到显著削弱,阻力系数增强,坡面拦阻径流效果明显。同时生物结皮的存在对坡面土壤起直接和间接的保护作用,可有效削弱雨滴动能,减缓坡面薄层水流流速,减少径流对土壤颗粒的分离与剥蚀^[15]。易婷等^[16]研究发现,生物结皮在被径流冲刷的过程中吸水膨胀,形成致密层,增加地表糙度的同时也削弱水流的能量;吉静怡等^[17]研究认为,生物结皮显著影响水动力学特性,相对于裸地处理结皮覆盖坡面平均流速和弗劳德数降低 50%以上,平均水深增加 80%以上,阻力系数是裸地处理的 10.68 倍,与本研究结果一致。

3.3 生物结皮盖度对坡面水土流失过程的影响

生物结皮坡面的水土流失过程受到土壤性质、生物作用、地表微地形、生物结皮盖度、生物结皮类型、发育阶段及本地区降雨特点等因素的综合影响。本研究表明,在 2.0 mm/min 雨强条件下,生物结皮覆盖使红壤坡面产流产沙均明显减少,并随降雨时间的

增加呈现出先逐渐上升后缓慢下降并趋于平稳的趋势。其原因主要为降雨初期在雨滴击打、径流冲刷作用下,坡面土壤颗粒在植被覆盖较少的情况下极易被径流搬运形成侵蚀泥沙。随着降雨时间的延长,生物结皮覆盖下土壤与苔藓根茎体交织缠绕形成复杂的网状结构,土壤黏结力加强,加上部分坡面在降雨过程中形成结构性结皮对坡面土壤起直接保护作用,从而导致土壤侵蚀速率和径流率达到峰值之后逐渐下降。不同生物结皮盖度对坡面水土流失过程的影响效应不同,研究表明高覆盖度下其作用最为显著。冉茂勇等^[18]同样认为,黄土高原生物结皮较高盖度下显著改善土壤本身的理化属性,增强土壤黏力,提升土壤抗冲抗蚀性,与本研究结果一致;Rey 等^[19]研究发现,发育稳定的苔藓结皮覆盖度 $\geq 50\%$ 时生物结皮有效起到保护地表土壤的作用;许欢欢等^[20]研究认为,混合生物结皮(发育 2 个月)坡面的侵蚀泥沙量与结皮覆盖度关系较不显著,但由于空间的异质性及所用生物结皮的差异性,不可一概而论。本研究通过将典型红壤区不同盖度生物结皮坡面作为研究对象,所用结皮为生长期较长的苔藓—藻类混合结皮,生物结皮层厚度较大,其对土壤属性的影响较显著,拦截径流泥沙能力增强,使得坡面抗冲抗蚀性能较强,因此随着坡面生物结皮盖度(0~80%)的不断上升,其侵蚀泥沙量在同一雨强条件下呈现显著下降趋势。张冠华等^[21]的研究表明,在不同生物结皮盖度下红壤坡面产流、产沙量均降低,土壤侵蚀能力随生物结皮盖度的增加逐渐减小,与本研究结果一致。本文根据公式(9)和公式(10)计算不同结皮覆盖度坡面减流减沙效益。坡面减流率、减沙率大小排序均为生物结皮盖度 $80\% > 60\% > 40\% > 20\%$,不同生物结皮盖度坡面减沙率较减流率差异更为显著(图 5)。高丽倩等^[22]通过生物结皮对土壤可蚀性的影响研究发现,坡面土壤可蚀性随生物结皮生物量的增加呈降低趋势,模拟降雨条件下生物结皮的发育使土壤可蚀性较对照降低约 90%,径流调控率达 22.7%~43.0%。生物结皮覆盖后均可有效缓解雨滴击溅侵蚀,改善土壤结构,进而可提升坡面涵养水源的能力,发挥减流减沙效益^[19]。

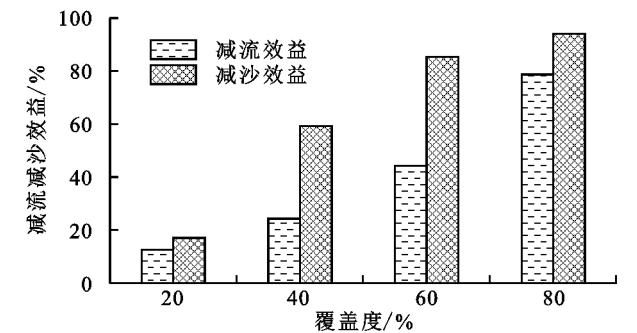


图 5 不同生物结皮盖度坡面减流减沙效益对比

4 结论

(1)生物结皮能够有效增强红壤区坡面土壤稳定性,提升土壤抗蚀能力。在不同盖度生物结皮坡面上,坡面土壤容重和穿透阻力均随生物结皮盖度增大而显著减小,土壤黏结力呈显著增大趋势。坡面土壤黏结力平均增加 13.26%,土壤容重与穿透阻力平均减小 8.97%和 61.51%。

(2)生物结皮可通过改变水动力学特性来缓解坡面水土流失状况。生物结皮覆盖均可有效改善水流流态,坡面径流剪切力介于 0.08~0.12。水流功率和断面单位能量分别减小 12.22%~78.89%,8.32%~53.15%,坡面阻力系数增大 1.09~1.50 倍。

(3)生物结皮在水土流失过程中可有效减少坡面产流、产沙量,起到贮水保土的作用。各生物结皮盖度坡面减流减沙效益分别介于 12.50%~78.76%,17.03%~94.31%,其中高覆盖度(80%)坡面土壤侵蚀强度较小。

参考文献:

[1] 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.

[2] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(10):3050-3056.

[3] 王浩,张光辉,刘法,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤入渗的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):117-123.

[4] Maier S, Schmidt T, Zheng L J, et al. Analyses of dryland biological soil crusts highlight lichens as an important regulator of microbial communities[J].Biodiversity Conservation,2014,23:1735-1755.

[5] 郝旺林,夏彬,许明祥.黄土丘陵区侵蚀坡面 CO₂ 通量空间分异格局驱动机制[J].中国环境科学,2021,41(12):5875-5884.

[6] 张思琪,张科利,曹梓豪,等.喀斯特坡面生物结皮发育特征及其对土壤水分入渗的影响[J].应用生态学报,2021,32(8):2875-2885.

[7] 李林,赵允格,王一贺,等.不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响[J].自然资源学报,2015,30(6):1013-1023.

[8] 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 Soil and Sediments,2020,20(1):133-142.

[9] 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.

[10] 欧阳帅,项文化,陈亮,等.南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制[J].水土保持学报,2021,35(5):1-9.

附性能研究[J].中国给水排水,2008,24(5):98-101.

[13] 蓝剑强,安黛宗,萧劲东.发泡陶土在城市绿化中的应用研究[J].广东建材,2007(1):10-11.

[14] 梁进秋,申彦波,胡丽琴,等.FY-4A 地表太阳入射辐射产品在山西高原的适用性研究[J].气象,2020,46(12):1575-1585.

[15] 郁丽萍.功能型复合高吸水树脂的制备及其性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.

[16] 郭华,樊贵盛.考虑土壤结构变形的 Kostiakov 入渗模型参数非线性预报模型[J].节水灌溉,2015(12):11-15.

[17] 侯党员.空气—沙子热交换器传热特性的实验研究[D].北京:华北电力大学,2021.

[18] 陈超萍,乔丽芳,韩阳,等.景观环境常用有机地表覆盖物的吸水性能研究[J].中国园林,2020,36(11):79-83.

[19] 杨静静,王秀峰,魏珉,等.保水剂吸水、释水及吸肥特性研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(5):696-700.

[20] 姜雄,铁生年,膨润土/聚丙烯酰胺复合吸水保水材料的制备及性能研究[J].硅酸盐通报,2014,33(4):731-735.

[21] 马文博.不同用量保水剂对玉米生育性状、产量与土壤性质的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.

[22] 王立宁,陈振,张增志.发泡剂对矿渣地质聚合物气孔结构及吸水性的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(7):2085-2091.

[23] 曹丹妮,邸涵悦,郭忠录,等.演替梯度下土壤优先流特征及影响因素[J].水土保持研究,2021,28(2):99-107.

[24] 吕文聪,邱阳,谢忠奎,等.砾石覆盖粒径对土壤入渗过程的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):46-51.

[25] 李晓菊,单鱼洋,王全九,等.腐殖酸对滨海盐碱土水盐运移特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):288-293.

[26] 孙池涛,邓亚鹏,张俊鹏,等.秸秆覆盖条件下滨海土壤蒸发阻力模型研究[J].农业机械学报,2020,51(12):284-291.

[27] 蔡永坤,李毅,冯浩.不同砂石覆盖度和粒径对土壤水分蒸发的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):273-277,297.

[28] Edward C, Melamie L, Andrea V, et al. Obstacles, interfacial forms, and turbulence: A numerical analysis of soil-water evaporation across different interfaces [J]. Transport in Porous Media, 2020, 134(2):275-301.

(上接第 100 页)

[11] 中华人民共和国水利部.SL 419—2007 水土保持试验规程[S].北京:北京科文图书业信息技术有限公司,2008:5-9.

[12] 中华人民共和国水利部.GB/T 15774—2008 水土保持综合治理效益计算方法[S].北京:中国标准出版社,2009:11-13.

[13] 李新荣,谭会娟,回嵘,等.中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J].科学通报,2018,63(23):2320-2334.

[14] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.花岗岩红壤区不同治理模式土壤抗冲性因素试验[J].水土保持学报,2019,33(5):34-40,49.

[15] 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):135-141.

[16] 易婷,张光辉,王兵,等.退耕草地近地表层特征对坡面流流速的影响[J].山地学报,2015,33(4):434-440.

[17] 吉静怡,赵允格,杨凯,等.黄土丘陵区生物结皮坡面产流产沙与其分布格局的关联[J].生态学报,2021,41(4):1381-1390.

[18] 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].中国水土保持科学,2011,12(12):43-45,67.

[19] Rey A, Carrascal L M, Báez G G, et al. Impact of climate and land degradation on soil carbon fluxes in dry semiarid grasslands in SE Spain[J]. Plant and Soil, 2021,461(1/2):1-17.

[20] 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.

[21] 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):630-639.

[22] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤蚀性的影响[J].应用生态学报,2013,24(1):105-112.