

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.02.037

CSTR:32310.14.stbxb.2026.02.037

代四学,王儒章,杨娅,等.岩面附着苔藓生物膜对石芽-溶沟坡地产生产沙过程影响的模拟试验[J].水土保持学报,2026,40(2):232-241,252.

DAI Sixue, WANG Ruzhang, YANG Ya, et al. Simulation experiments on effects of rock-attached moss biofilms on runoff and sediment yield processes in clint-grike slopes[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 232-241, 252.

岩面附着苔藓生物膜对石芽-溶沟坡地 产流产沙过程影响的模拟试验

代四学¹, 王儒章¹, 杨娅¹, 刘冬冬^{1,2}

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与地质环境教育部重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: [目的]旨在量化岩面苔藓覆盖度对产流产沙的抑制效应并确定其关键阈值。[方法]通过室内模拟降雨试验,以15°坡地、80 mm/h雨强、1 h降雨时长为条件,设置0%、25%、50%、75%、100% 5种岩面苔藓覆盖度,探究其对坡地产流产沙及水动力参数的影响。[结果]1)高岩面苔藓覆盖处理($\geq 75\%$)可显著抑制坡面产流,产流速率较裸岩与低覆盖处理($\leq 50\%$)分别降低29.03%与30.45% ($p < 0.05$)。2)岩面苔藓覆盖对产沙过程亦表现出明显调控作用,第1场降雨(E_1),高苔藓覆盖处理对产沙的抑制效果较裸岩与低苔藓覆盖处理分别提高46.51%和152.00%。3)连续降雨下($E_1 + E_2$),岩面苔藓整体抑沙效应有所减弱,但25%、75%覆盖处理的抑沙效应降幅较小,表现出相对稳定的抑沙性能。[结论]岩面苔藓通过改变石芽-溶沟坡地岩面水动力参数间接影响岩面水动力参数,如75%覆盖处理较裸露处理降低岩面流速降幅达84.48%,间接降低土面流速80.85%,从而影响坡面侵蚀过程。在试验条件下,岩面苔藓覆盖度75%可作为抑制产流产沙的关键阈值,试验研究结果可为喀斯特区水土保持与生态修复提供理论依据和数据支持。

关键词: 苔藓生物结皮; 模拟降雨; 产流产沙; 水动力参数; 喀斯特地貌; 生态阈值

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0232-10

Simulation Experiments on Effects of Rock-Attached Moss Biofilms on Runoff and Sediment Yield Processes in Clint-Grike Slopes

DAI Sixue¹, WANG Ruzhang¹, YANG Ya¹, LIU Dongdong^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] This study aims to quantify the inhibitory effect of rock-attached moss coverage on runoff and sediment yield and to determine its critical threshold. [Methods] Indoor simulated rainfall experiments were conducted on a 15° slope under a rainfall intensity of 80 mm/h for 1 h. Five rock-attached moss coverage levels (0, 25%, 50%, 75%, and 100%) were set to investigate their effects on slope runoff, sediment yield, and hydrodynamic parameters. [Results] 1) High rock-attached moss coverage treatments ($\geq 75\%$) significantly inhibited slope runoff, reducing the runoff rate by 29.03% and 30.45% compared to bare rock and low coverage treatments ($\leq 50\%$), respectively ($p < 0.05$). 2) Rock-attached moss coverage also exhibited a significant regulatory effect on the sediment yield process. During the first rainfall event (E_1), the sediment reduction effect of high moss coverage treatments increased by 46.51% and 152.00% compared to bare rock and low moss coverage treatments, respectively. 3) Under consecutive rainfall events ($E_1 + E_2$), the overall sediment reduction effect of rock-attached moss weakened, but the decreases for the 25% and 75% coverage treatments were smaller, demonstrating relatively stable sediment reduction performance. [Conclusion] Rock-attached moss indirectly affects the soil surface hydrodynamic parameters by altering the rock surface hydrodynamic parameters of

收稿日期: 2025-10-12

修回日期: 2025-11-06

录用日期: 2025-11-14

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(42567044); 贵州省基础重点项目(黔科合基础ZD[2025]068); 贵州大学实验室开放项目(SYSKF2025-116)

第一作者: 代四学(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶区生态水文过程研究。E-mail: 1243301608@qq.com

通信作者: 刘冬冬(1989—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土过程与控制策略研究。E-mail: liudongdongcn@foxmail.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

clint-grike slopes. For example, compared to bare rock treatment, the 75% coverage treatment reduced rock surface flow velocity by 84.48% and indirectly decreased the soil surface flow velocity by 80.85%, thereby influencing the slope erosion process. Under the experimental conditions, 75% rock-attached moss coverage can serve as a critical threshold for inhibiting runoff and sediment yield. The research results provide a theoretical basis and data support for soil and water conservation and ecological restoration in karst areas.

Keywords: moss biocrust; simulated rainfall; runoff and sediment yield; hydrodynamic parameters; karst landform; ecological threshold

Received: 2025-10-12

Revised: 2025-11-06

Accepted: 2025-11-14

Online(www.cnki.net): 2026-01-04

西南喀斯特地区是全球岩溶发育最强烈、连片裸岩面积最大的生态敏感区,是以岩溶充分发育为核心的脆弱地质-生态系统^[1]。喀斯特地区在过度开垦、滥砍滥伐等不合理人为活动干扰下,植被退化加剧,水土流失频发,进而推动石漠化进程,成为区域生态安全与经济社会可持续发展的核心制约^[2-3]。有研究^[4]表明,西南喀斯特地区水土流失敏感性与碳酸盐岩碎屑岩含量、地形起伏及降雨特征密切相关。西南喀斯特地区丰富的降水与频发的暴雨^[5],叠加石芽-溶沟典型微地貌具有的地表破碎裸露、土壤层浅薄等特性,形成“强降雨-脆弱微地貌”的耦合效应,使得地表径流拦蓄能力锐减,快速汇集的径流对坡面产生强烈冲刷,导致水土流失问题尤为突出^[6]。中国生态环境敏感性区域差异研究^[7]亦指出,喀斯特地区因独特的下垫面条件,生态系统抗干扰能力弱,进一步凸显石芽-溶沟坡地水土保持与生态修复的迫切性。

目前,喀斯特石漠化治理已形成工程措施、生物措施与农业技术措施相协同的技术框架^[8]。其中,生物措施因成本低、可持续性强,成为长期治理的核心方向,而苔藓植物凭借高吸水性、强耐旱性、抗冲刷性及良好环境适应性,被证实是喀斯特石漠化区生态修复的先锋地被^[9]。张显强等^[10]对贵州喀斯特5种石生藓类的研究表明,苔藓持水性能优异,可有效滞留降雨;刘润等^[11]进一步指出,苔藓可通过改变微环境为后续植被定居创造条件;蒋娟等^[12]研究发现,苔藓覆盖能使喀斯特林地坡面流速降低20.6%,延长雨水入渗时间以减少产流产沙;代丽华等^[13]研究证实,苔藓保土量较同生物量藻类、地衣分别提高62.15%、128.31%,水土保持效益显著;张宝琦^[14]在黄土丘陵沟壑区的研究发现,苔藓盖度与坡面产流流速呈明确关联,其中80%盖度时产流速率最小,为喀斯特地区相关研究提供非喀斯特背景的参考。然而,现有研究仍存在关键缺口,难以支撑喀斯特石芽-溶沟微地貌的精准修复。其一,苔藓水土保持效应研究多集中于非喀斯特区域或宏观坡面尺度,针对石芽-溶沟特殊

微地貌下岩面苔藓的作用研究匮乏;其二,岩面苔藓覆盖度与石芽-溶沟坡地产流产沙的定量响应关系不明,不同盖度下的调控阈值缺乏系统分析;其三,现有研究多聚焦于土面苔藓的直接水土保持机制,如增加土壤入渗、减少溅蚀等。然而,岩面苔藓对喀斯特石芽-溶沟坡地的调控机制尚未系统化。

鉴于此,本研究以喀斯特石芽-溶沟坡地为研究对象,通过室内模拟降雨试验,设置0%、25%、50%、75%、100% 5种岩面苔藓覆盖度处理,在15°坡度、80 mm/h侵蚀性雨强条件下,量化苔藓覆盖对坡地产流产沙的抑制效应,明晰其关键调控阈值,并揭示苔藓通过改变坡面水动力参数(流速、径流深、剪切力等)影响侵蚀过程的机制,旨在为喀斯特石芽-溶沟微地貌的生态修复方案优化与水土保持实践提供量化数据与理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤、岩石和苔藓

选用西南喀斯特典型黄壤^[15],其外观呈黄色或蜡黄色。通过Bettersize 3000 Plus激光/图像粒度粒形分析仪测定,0.05~0.1、0.002~0.05、<0.002 mm颗粒粒径占比分别为83.09%、2.82%和13.11%。依据美国农业部土壤分级标准,试验土壤被界定为砂土。试验中采用烘干法测定土壤的初始水分体积分数,将其控制在(12.5±1.5)%范围内。选取喀斯特地区典型碳酸盐岩(灰岩),其主要成分为碳酸钙。岩石设计加工为长49.5 cm、宽20.5 cm、高30 cm、倾斜角度67°的似三棱柱状岩块。岩块表面保留自然喀斯特地貌中的石芽-溶沟结构:石芽为溶蚀过程中残余的突出部分,溶沟为地表水沿坡面流动溶蚀形成的沟槽,以此复现喀斯特地区岩石裸露的下垫面状况。

采用人工培育青藓^[11],该苔藓环境适应性强,可在贫瘠岩面稳定生长,生长速度较快且繁殖方式多样,适配喀斯特石漠化区生态修复的特性。苔藓布设采用量化控制方案,将人工培育青藓剪切成5 cm×5 cm标准斑块状。岩面苔藓覆盖度按0、

25%、50%、75%、100% 梯度设置,其中 25%、50%、75% 采用等间距布设,100% 处理实现岩面全覆盖。车前籽与水按照 1:5 的质量体积比(车前籽 20 g+蒸馏水 100 mL)配制黏接剂^[16]。将黏接剂均匀涂抹于岩面后,按不同盖度设计粘贴苔藓,并通过 Image-ProPlus 软件验证实际盖度偏差 $\leq 5\%$ 。

1.2 试验装置

试验采用双喷头脉冲式模拟降雨系统与可调式亚克力土槽,构建喀斯特石芽-溶沟坡地降雨侵蚀模拟体系。双喷头脉冲式模拟降雨系统主要由供水模块、喷头组件、控制系统及支撑框架 4 部分构成。供水模块通过大容量储水箱储备水源,依托水泵将水体抽出并加压输送至喷头组件。喷头组件根据研究需求通过终端控制系统调节喷头类型和喷头摇摆频率,从而调控雨滴形态与降雨分布。控制系统主要通过压力表监测供水管水压,结合球阀手柄对水泵功率调节实现供水压力与降雨强度调整。通过终端控制器调节水泵工作频率与喷头开闭脉冲参数,模拟自然降雨的间歇性与脉冲性特征。支撑框架以高强度金属框架承载喷头、管道及水流冲击荷载,喷头处槽状收集沟可收集飞溅雨滴以减少用水损耗。降雨系统整体经透明塑料篷布围合形成独立试验空间,既隔绝外界气流、灰尘干扰以保障降雨稳定性,而透明材质便于观测内部降雨与土槽的相互作用过程。

试验土槽规格为长(50 cm)×宽(50 cm)×深(35 cm),采用高强度亚克力材料制作。土槽排水孔设置于土槽底部和距底部 15 cm 与 30 cm 处中间位置,用于保障水分自由排出,避免淤积改变土壤物理性质。土槽 15 cm 处排水孔在降雨试验中可用于收集径流数据与沉积物样品,最底层排水孔用于土槽水分自由流出。将 2 个土槽拼接固定于带丝杆调节装置的支撑架上,形成重复试验单元,以减少偶然因素干扰。土槽基质构建采用分层填充法保障模拟真实性,基质层填充高度要与土槽 15 cm 处排水孔处于同一平面上。具体操作:土槽底层铺设 4 cm 厚石英砂透水层并抚平,其上铺设 53 cm×53 cm 纱布作为隔离层;将似三棱柱状石灰岩块紧贴槽壁布设,岩块间隙用泡沫胶填充密封;泡沫胶凝固后铺设 5 cm 厚石英砂层形成双重透水结构;土壤层按喀斯特浅层土壤特征设计为 5 cm 厚,以土壤体积质量 1.30 g/cm³ 控制分层装填(每 1 cm 为 1 层)^[17]。每层需戴上针织手套抚平,模仿自然土面。

1.3 模拟降雨试验

模拟降雨试验于 2025 年 4 月 15 日至 5 月 10 日在贵州大学资源与环境工程学院室内开展。土槽坡度固定

为 15°^[18],选用区域地表产流临界雨强为 80 mm/h^[19]。进行 2 场连续降雨处理(E_1 和 E_2),首场降雨持续 60 min,间隔 6 h 后进行第 2 场 60 min 降雨。设计连续降雨的主要原因是考虑到喀斯特地区独特的地质条件,单次降雨事件不会导致水土流失,而持续降雨对水土流失或泥沙输送具有不成比例的影响^[20]。

模拟降雨开始前,需用雨量筒再次校准雨强至 80 mm/h。随后关闭降雨系统,将试验土槽推入模拟降雨系统下方指定位置并固定。使用秒表记录试验时间,观察到雨滴落在土槽时开始计时。试验过程中,采用胭脂红示踪法以 8 min 为间隔测定坡面流速并同步摄像记录流态^[21];产流产沙数据通过距土槽底部 15 cm 处排水孔采集,每 2 min 收集 1 次径流样品。2 场模拟降雨间隔 6 h,其间使用篷布将土槽覆盖,避免环境干扰。每个盖度处理设 2 次重复,试验结束后按规范清理土槽基质以待下组岩面盖度试验。

模拟降雨结束后,将采集的产流产沙样品进行称重,使用滤纸进行过滤处理。过滤完全后,将附有泥沙的滤纸折叠规整置于 60 °C 恒温条件下烘箱内烘干 24 h,冷却后再次称重确定样品的径流量和产沙量。同时利用高清摄像机中的视频确定研究面最大流速(V_{max} , m/s),随后将测得的最大表面流速乘以转换因子 0.67 以获得平均流速(V_a , m/s)^[22];再将获得的流速数据进行其他侵蚀水动力特征参数的计算。

土面径流的流动深度(h)计算公式为:

$$h = \frac{q}{V} \quad (1)$$

式中: q 为单宽流量, cm²/s; V 为土面流速, cm/s。单宽流量(q)的计算公式为:

$$q = \frac{Q}{B} \quad (2)$$

式中: Q 为流量, cm³/s; B 为土槽宽度, cm。

岩面径流的流动深度(h_r)使用相对比值法计算,计算公式为:

$$h_r = h \frac{V_s}{V_r} \quad (3)$$

式中: h 为土面径流深, cm; V_s 为土面流速, cm/s; V_r 为岩面流速, cm/s。

雷诺数(Re)和弗劳德数(Fr)的计算公式为:

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (4)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

式中: ν 为运动黏度, cm²/s; g 为重力加速度, cm/s²; 在试验过程中,水温通常保持约 15 °C。因此, ν 为 1.1404×10^{-6} cm²/s²。

流动阻力由达西-魏斯巴赫方程给出的 f 量化公式为:

$$f = \frac{8ghS}{V^2} \tag{6}$$

式中: S 为倾斜角 (α) 的正切值。

水力剪切应力 (τ) 和流功率 (ω) 的计算公式为:

$$\tau = \rho_w ghS \tag{7}$$

$$\omega = \rho_w ghSV \tag{8}$$

式中: ρ_w 为水密度, g/m^3 ; τ 为剪切应力, $g/(cm \cdot s^2)$; ω 为流功率, g/s^3 。

1.4 数据处理

采用统计分析方法评估苔藓盖度与降雨场次对产流产沙过程及水动力参数的影响。首先,通过 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验分别验证数据的正态性与方差齐性显示,所有观测数据均不符合正态分布 (Shapiro-Wilk 检验, $p < 0.05$), 因此采用克鲁斯卡尔-沃利斯检验 (Kruskal-Wallis H 检验) 进行显著性分析,该方法适用条件为:非正态分布数据、多组独立样本的差异比较,无需满足正态分布和方差齐性假设。

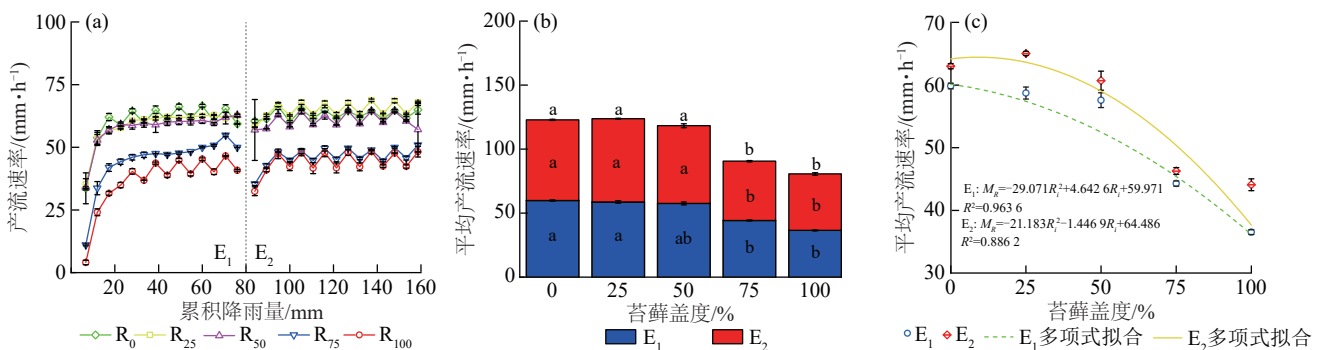
显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$, 在主效应显著的前提下,采用 Dunn's 事后检验进行两两比较,分别检验同一盖度处理下不同降雨场次之间,以及同一场次降雨下不同盖度处理之间的差异显著性,所有检验结果均标注精确 p 值。各变量间相关性分析采用 Spearman 等级相关检验 (适配非正态分布数据,无需正态性假设,用于衡量变量间单调关联强度)。水动力参数与

产沙速率的关系通过线性回归分析量化,以决定系数 (R^2) 评估模型拟合优度。所有数据预处理及统计分析都在 IBM SPSS Statistics 22 软件中完成,图表绘制采用 Origin 2024 和 GraphPad Prism 软件实现。

2 结果与分析

2.1 不同岩面苔藓盖度对石芽-溶沟坡地产流过程的影响

岩面苔藓覆盖对喀斯特石芽-溶沟坡地的产流过程具有显著调控效应,其作用机制与苔藓盖度、降雨场次密切相关。第 1 次降雨 (E_1) 中,产流速率随累积降雨量从 0~20 mm 快速上升,20 mm 后缓慢增加并趋于稳定;第 2 次降雨 (E_2) 中,产流速率在累积降雨量 14 mm 后即趋于稳定,且稳定产流速率高于 E_1 (图 1a)。单场降雨 (E_1 、 E_2) 及连续降雨 ($E_1 + E_2$) 下,高苔藓覆盖度处理 (岩面苔藓覆盖度 $\geq 75\%$) 与低苔藓覆盖度处理 (岩面苔藓覆盖度 $\leq 50\%$)、裸露岩面处理的平均产流速率存在显著差异 ($p < 0.05$, 图 1b)。岩面苔藓覆盖度与产流速率呈显著负相关,而与降雨次数仅为弱相关。低岩面苔藓覆盖度对石芽-溶沟坡地产流速率抑制效应不显著 (p 分别为 0.79、0.09), 当岩面苔藓覆盖度 $\geq 75\%$ 后产流速率显著降低,且高苔藓覆盖度处理间无显著差异 ($p = 0.16$)。 E_1 、 E_2 中苔藓盖度与产流速率均呈抛物线关系 (R^2 为 0.89~0.96), 且在 50%~75% 盖度区间产流速率对盖度变化的响应最敏感。在坡度 15° 、80 mm/h 降雨强度下,75% 岩面苔藓覆盖度可作为岩面苔藓显著削弱石芽-溶沟坡地产流速率的控制阈值。



注:图(b)中不同小写字母表示相同降雨条件下不同苔藓盖度处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 岩面苔藓盖度与坡地产流速率的关系

Fig. 1 Relationship between rock-attached moss coverage and slope runoff rate

2.2 不同岩面苔藓盖度对石芽-溶沟坡地产沙过程的影响

岩面苔藓覆盖对喀斯特石芽-溶沟坡地的产沙过程具有显著调控作用,其效应随苔藓覆盖度呈现明显分异特征。 E_1 中,产沙速率随累积降雨量在初期 (≤ 20 mm) 迅速增大,之后逐渐趋于平缓; E_1 中 100% 岩面苔藓覆盖度处理产沙速率最慢,25%、75% 岩面

苔藓覆盖度处理产沙速率相近且显著低于 0、50% 岩面苔藓覆盖度处理 ($p < 0.05$, 图 2a)。 E_2 中裸露岩面、50% 和 100% 岩面苔藓覆盖度处理的坡地产沙速率随累积降雨量都在递增,仅 25% 和 75% 苔藓覆盖度处理的产沙速率在连续降雨中相对稳定,100% 岩面苔藓覆盖度处理产沙速率依旧较其他处理低。连续降雨中,25%、75% 及 100% 岩面苔藓盖度处理的

产沙速率显著低于 0、50% 岩面苔藓盖度处理 ($p < 0.01$, 图 2b)。岩面苔藓盖度与产沙速率呈显著负相关 ($p < 0.01$, $r = -0.41$), 而降雨次数对产沙速率无显著相关性 ($p = 0.48$)。E₁ 中苔藓盖度与产沙速

率均呈抛物线关系 ($M_{S1} = -881.09R_i^2 + 207.48R_i + 1198.9$), R^2 为 0.755 4; 而 E₂ 中苔藓盖度与产沙速率的回归方程 $R^2 = 0.096 9$, 拟合效果极差。在本试验条件下, 75% 苔藓覆盖度表现出最优抑制效果。

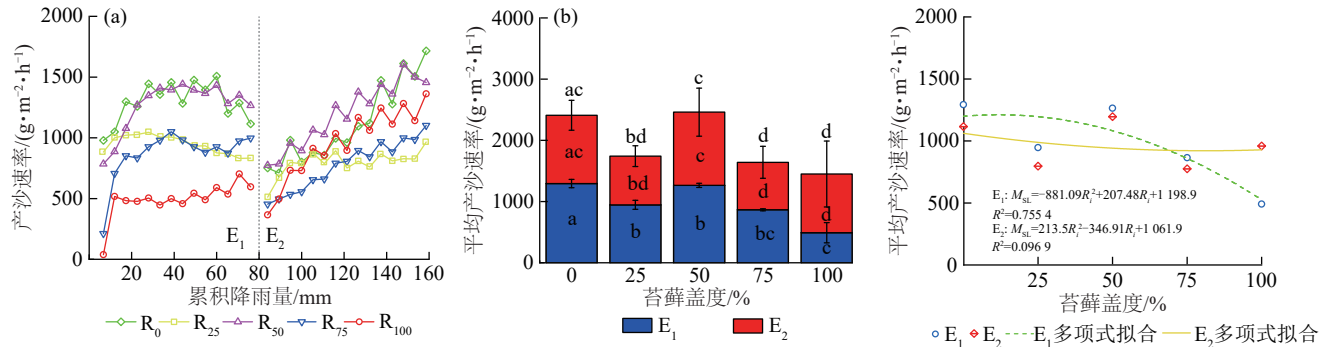


图 2 岩面苔藓盖度与坡地产沙速率的关系

Fig. 2 Relationship between rock-attached moss coverage and slope sediment yield rate

2.3 不同岩面苔藓盖度对石芽-溶沟坡地土面水力参数的影响

岩面苔藓覆盖对喀斯特石芽-溶沟坡地土面的水力参数具有一定调控作用, 其中高岩面苔藓覆盖度对土面水力参数影响显著 ($p < 0.05$)。随岩面苔藓覆盖度增加, 土面平均流速呈降低趋势 (图 3a)。25% 和 75% 岩面苔藓覆盖度处理相较于裸露岩面处理, 土面流速在 2 次降雨中分别降低 41.53%~59.77% 和 69.85%~80.85%。土面平均流速与岩面苔藓覆盖度呈开口向下的抛物线关系 ($R^2 = 0.954 7$)。岩面苔藓覆盖度达 75% 时, 岩面苔藓显著降低坡地土面径流深, 25% 和 50% 岩面苔藓覆盖度处理对径流深影响不显著 (图 3b)。75% 和 100% 岩面苔藓覆盖度处理的土面 f 值, 较 0、25%、50% 岩面苔藓覆盖度处理显著增加 ($p < 0.01$), 连续降雨下较裸露岩面分别增加 229.24% 和 379.89% (图 3c)。土面阻力系数与岩面苔藓覆盖度呈开口向上的抛物线关系 ($R^2 = 0.972 6$)。在连续降雨情况下, 苔藓覆盖度变化对土面曼宁系数的影响不显著 ($p \geq 0.05$); 单次降雨下, 高盖度苔藓覆盖显著增加土面曼宁系数 ($p < 0.01$, 图 3d)。高苔藓覆盖度处理显著降低坡地土面的雷诺数 (Re) 和弗劳德数 (Fr), 低苔藓覆盖度处理影响不显著 ($p \geq 0.05$, 图 3e、图 3f)。以明渠流均匀流为判定依据, Fr 和 Re 临界值分别取 1 和 500, 试验中 Fr 和 Re 参数表明坡面流主要为层流缓流。 Re 值为 30.05~193.35, 远 < 2000 , 说明岩面苔藓盖度变化不会改变坡地土面的径流流态。随岩面苔藓盖度增加, 径流剪切力和水流功率均呈减少趋势。高岩面苔藓覆盖度处理显著降低径流剪切力和水流功率; 低岩面苔藓覆盖对径流剪切力和水流功率的抑制效果不显著 ($p \geq 0.05$, 图 3g、图 3h)。

岩面苔藓覆盖度与平均产沙速率、水力参数之间的关系呈散点分布。不同岩面苔藓盖度处理的水力参数与其对应的平均产沙速率数据点分布区间范围有异。各水力参数对石芽-溶沟坡地产沙速率的影响显著 ($p < 0.05$), 产沙速率与各水力参数的相关系数为 $-0.29 \sim 0.49$ 。岩面苔藓覆盖度增加到 75% 后使土面流速和平均产沙速率降低, 高岩面苔藓覆盖处理较低岩面苔藓覆盖处理的数据点更集中 (图 3i)。高岩面苔藓覆盖明显降低坡地土面的径流深, 而低岩面苔藓覆盖与裸露岩面的径流变化差异不明显。连续降雨下, 不同岩面苔藓覆盖度处理的径流深有 1 个限值, 如 100% 岩面苔藓覆盖处理的最大径流深为 2 mm (图 3j)。低岩面苔藓覆盖和裸露岩面处理的土面阻力系数均低于 0.3, 且对应的平均产沙速率较高; 高岩面苔藓覆盖阻力系数变化较大, 对应产沙速率较低, 同时 100% 岩面苔藓覆盖度处理在同一阻力系数区间对应的平均产沙速率要明显低于 75% 岩面苔藓覆盖度处理 (图 3k)。不同岩面苔藓覆盖度下, 曼宁系数与平均产沙速率的关系与阻力系数与平均产沙速率的关系相似, 但曼宁系数的值域小于阻力系数的值域 (图 3l)。不同岩面苔藓盖度下, 雷诺数、弗劳德数与平均产沙速率的关系相似于土面流速与平均产沙速率的关系, 高岩面苔藓覆盖处理使得雷诺数和弗劳德数稳定在 100 和 0.35 以下 (图 3m、图 3n)。不同岩面苔藓覆盖下的径流剪切力与平均产沙速率关系相似于径流深度与平均产沙速率的关系, 不同盖度下的径流剪切力也有一限值, 如 75% 岩面苔藓覆盖度处理水流剪切力的限制为 $62 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。同时高岩面苔藓覆盖度下, 径流剪切力降低, 对应的平均产沙速率也有所减弱 (图 3o)。水流功率在不同岩面苔藓覆盖下与平均

产沙速率的关系与雷诺数与平均产沙速率的关系相似,高岩面苔藓覆盖对水流功率和平均产沙速率的降低有显著的影响(图 3p)。25% 岩面苔藓覆盖处

理在其水力参数不同于高岩面苔藓覆盖处理的情况下,其对平均产沙速率的影响与高岩面苔藓覆盖处理具有相同的效果。

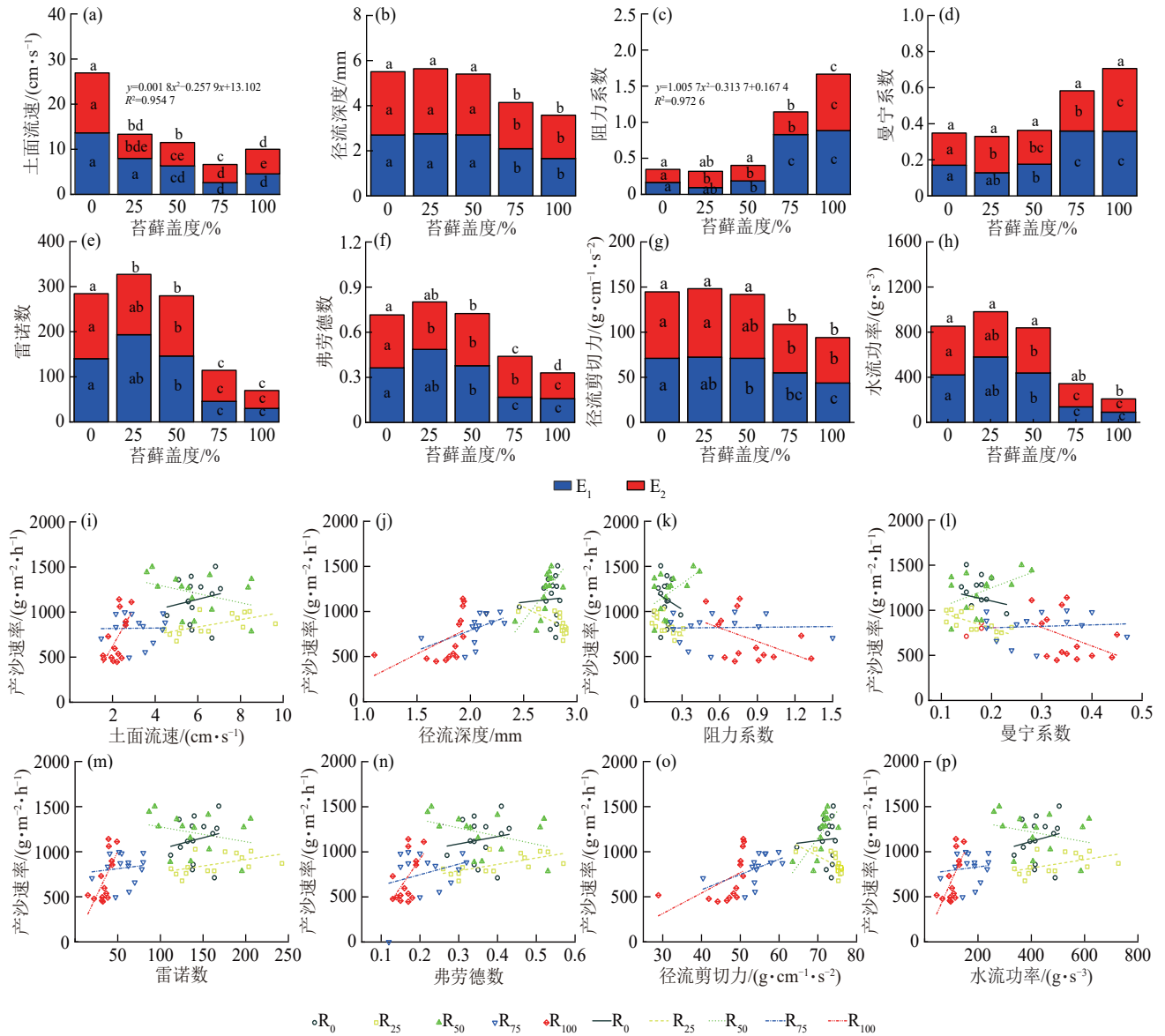


图 3 不同苔藓盖度下水力参数与平均泥沙损失速率的关系

Fig. 3 Relationship between hydraulic parameters and average sediment loss rate under different moss coverage levels

2.4 岩面与土面水动力参数的关联分析

岩面苔藓盖度是调控喀斯特石芽-溶沟坡地水动力参数与产沙过程的关键因素。随着苔藓盖度增加,岩面阻力系数显著上升, f_r 较裸岩处理增加约 4 381%, 且岩面苔藓盖度在 50%~75% 变化时阻力系数增速明显加快(图 4a)。岩面阻力系数与岩面流速呈显著负相关 ($p < 0.01, r = -0.93$), 随着阻力系数增大, 岩面流速显著降低, 且在 2 场降雨试验中均表现出较高的拟合度 (R^2 分别为 0.97 和 0.95, 图 4b)。

岩面流速变化直接影响土面流速, 二者呈二次函数关系, 其中 E_1 拟合度中等 ($R^2 = 0.56$), 而 E_2 拟

合度较低 ($R^2 = 0.23$, 图 4c)。坡面产沙速率随岩面流速的变化呈先上升后下降趋势, 存在 1 个使产沙速率达到峰值的岩面流速区间(图 4d)。岩面流速与产沙速率呈二次函数关系, 拟合程度较好 (R^2 为 0.50~0.93)。岩面水动力参数对土面水动力参数影响的相关性为流速 > 阻力系数 > 弗劳德数 ($0.56 > 0.13 > 0.12$)。综合来看, 苔藓通过增加岩面粗糙度, 显著降低流经岩面的水流速度, 而此减速效应继而传递至土面, 导致土面流速和剪切力降低, 最终显著抑制坡面产沙。

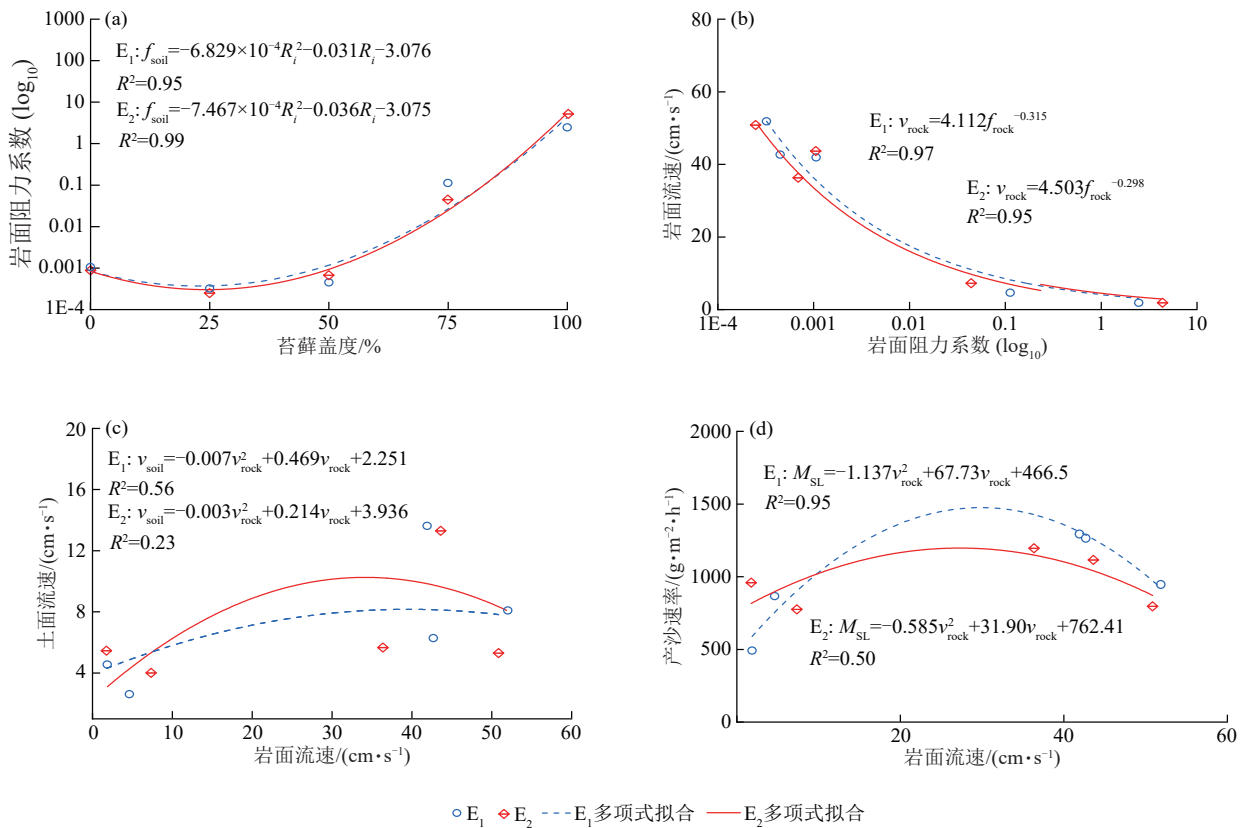


图 4 岩面流速与土面参数的关系

Fig. 4 Relationship between rock surface flow velocity and soil surface parameters

3 讨论

3.1 岩面苔藓对坡地产流产沙过程的调控效应及阈值机制

岩面苔藓对产流的调控呈现显著的“阈值效应”，75%的覆盖度成为产流抑制的关键节点。当覆盖度低于此阈值时，产流速率随盖度增加缓慢下降；但当覆盖度达到或超过75%，产流速率较裸露处理骤降29.03%以上，且100%覆盖度处理与75%处理间无显著差异($p=0.186$)。表明岩面苔藓需形成一定规模的连续覆盖层才能有效发挥其持水与消能功能，可能与试验中岩面粘贴苔藓的分布格局有关。在低盖度下，苔藓斑块呈离散分布，雨水可通过斑块间隙快速形成径流，导致其调控作用被削弱。在产沙调控方面，高盖度苔藓($\geq 75\%$)在首场降雨中展现出极强的抑制效果，减沙效率较裸岩提升46.51%，但连续降雨后其效应出现分化。100%覆盖度处理的抑沙效果显著减弱，而75%覆盖度处理变化较小，此差异可能源于高饱和水分条件下苔藓层的物理稳定性。100%全覆盖的苔藓层在持续水流剪切力作用下，与岩面的黏接界面易发生局部剥离，导致其拦截泥沙的能力下降^[23]；而75%覆盖度的苔藓斑块间存在适度间隙，可释放部分水流压力，降低苔藓层自身的侵蚀风险，从而维持稳定的抑沙性能。

张宝琦^[14]在黄土高原坡面对苔藓结皮的研究表明，苔藓的盖度对坡面产流产沙速率具有显著影响，且随着盖度增加，产流产沙速率逐渐降低，最佳阈值为80%。该阈值与研究中75%的岩面苔藓阈值相近，但岩面苔藓对坡面产流产沙过程的调控机制与土面苔藓的调控机制不同。岩面苔藓主要通过改变岩面径流路径和消能降低水流到达土面的流速与能量，而土面苔藓则通过直接覆盖的方式达到减轻降雨溅蚀动力，以达到降低径流初始速率的作用，且苔藓结皮盖度的增加，可以增加土壤入渗有效降低坡面地表径流量，从根本上减轻径流对土壤的侵蚀^[24]。而本研究的结果与张文烽^[24]和曾卓^[25]的研究结果有所差异，他们的研究指出，平直型岩面苔藓覆盖增加产流速率和产沙速率，可能与试验所用的岩面形状及试验设计坡度和降雨强度控制不同有关。苔藓对产流的抑制机制主要源于其自身的特性：一是其具有较强的持水能力，冷廷娇^[26]的研究表明，苔藓组织可吸收相当于自身干重3~20倍的水分，形成临时性储水层，从而延长雨水在坡面的滞留时间，延缓径流形成；二是苔藓覆盖层对雨滴动能的显著削弱作用，秦宁强等^[27]进一步证实，这种削弱效果与苔藓生物量呈正相关，从而减轻雨滴对岩面的击溅作用，间接调控产流产沙过程。

试验过程中观察到黏接于岩石表面的苔藓可直接截留雨滴击溅起的土壤颗粒,从而减少土面泥沙损失。现有研究多关注苔藓通过改变水文过程间接影响产沙,而忽略其直接截沙作用,此机制的发现可以丰富苔藓调控产沙的理论框架,后续研究需进一步量化直接截沙量及其在总减沙效应中的占比,从而更全面地揭示苔藓的减沙机制。

3.2 岩面苔藓对土面水力参数的影响及作用路径

研究通过对岩面与土面水动力参数的同步监测,在定量层面上证实岩面苔藓通过“岩-土水动力联动”间接调控侵蚀的机制。当苔藓覆盖于岩面时,其核心作用是成为 1 个“能量耗散器”。岩面高苔藓覆盖度($\geq 75\%$)使岩面阻力系数(f_r)大幅提升,且岩面弗劳德数(Fr_r)下降至 1 以下,导致径流在岩面阶段即发生显著减速(图 5b、图 5c)。岩面水动力参数对土面水动力参数影响的相关性为流速 $>$ 阻力系数 $>$ 弗劳德数,其中 2 种坡面流速的相关性系数较另外 2 个参数高,因此,岩面对土面的间接作用主要通过减缓岩面流速来降低岩面流达到土面的初始流速,

使得到达土面的径流能量(体现为 V_s 和 τ_s)已大为削弱,不足以大量搬运土壤颗粒,与曾卓^[25]在石漠化坡面侵蚀过程机制解释中的描述相符,即降雨在岩面上形成的径流所具有的水动力参数,直接调控着土壤坡面的水动力过程特征,进而对坡地产沙过程产生关键影响,如岩面苔藓的引入显著降低岩石露头的流速且增加土面的曼宁粗糙系数和摩擦系数等;张文烽^[24]在对多露石石漠化区苔藓结皮对坡面径流输出及侵蚀的影响中也发现,高盖度岩面苔藓能够有效降低岩面流速,导致其汇入地表的径流流速也有所降低,使得地表产沙过程更加稳定。而土面苔藓直接覆盖在土面上,通过自身的抗侵蚀性保护土壤,JIANG 等^[28]研究发现,土面苔藓覆盖可使喀斯特坡地土壤阻力系数增加;敬俊^[29]研究表明,土面苔藓盖度的增加使地表粗糙度增大,减缓坡面流流速,径流在坡面停留时间相对延长,从而促进地表径流向地下转化;张宝琦^[14]研究指出,苔藓覆盖显著影响土面的剪切力、阻力系数、弗劳德数和水流功率等。

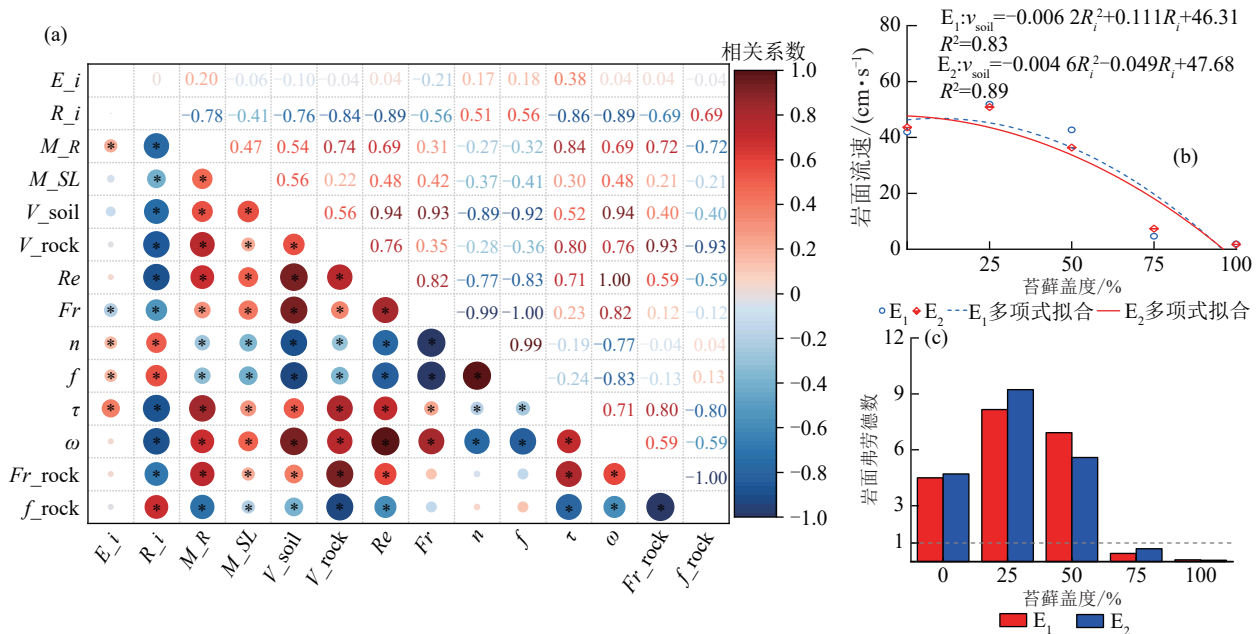


图 5 苔藓盖度与坡面水动力参数相关性、岩面流速及岩面弗劳德数的关系

Fig. 5 Correlations between moss coverage and slope hydrodynamic parameters, rock surface flow velocity and rock surface Froude number

在试验条件下,研究揭示的 75% 岩面苔藓覆盖度阈值,其内在水动力学本质在于能量耗散效率的阶跃。当覆盖度低于此阈值时,苔藓斑块对水流的阻滞呈局部扰动特征,岩面径流主体仍能维持较高动能。而当覆盖度达到或超过 75% 时,苔藓斑块在岩面上形成连续或近连续的能量耗散带,使水流状态发生改变。该点从水动力参数上得到明确印证,即 75% 覆盖处理下,岩面阻力系数(f_r)激增

4 381%,岩面流速(v_r)降幅高达 84.48%,并伴随岩面弗劳德数(Fr_r)降至 1 以下,表明水流由急流转变为缓流,携沙能力被根本性削弱。此阈值可被视为石芽-溶沟微地貌岩面苔藓从“参与调控”到“主导控制”径流能量的临界点。

试验中,25% 与 75% 岩面苔藓盖度处理在连续降雨下均表现出相对稳定的抑沙性能,但其背后的水动力机制有所不同。对于 75% 岩面苔藓盖度处理,主要

是因为全局性能量耗散,使到达土面的径流初始能量始终维持在低水平。而25%低盖度处理之所以能表现出相当的抑沙稳定性,推测与其节点控制效应有关。在石芽-溶沟这一特殊微地貌中,25%的苔藓若布设于溶沟入口、石芽侧面等水流通行的关键节点位置时,便能有效拦截、疏导并初步减速径流,虽未改变全局流态,但切断优势流路的形成,避免能量集中对土面的冲刷,解释了为何其整体水动力参数虽不如高盖度处理,却能通过优化水流空间分配实现有效地抑沙。

3.3 不足与展望

本研究通过室内模拟试验揭示岩面苔藓对喀斯特石芽-溶沟坡地产流产沙及水力参数的调控机制,但仍存在一定局限性:一是仅探讨特定降雨强度下岩面苔藓覆盖的调控效应,未考虑不同降雨强度和历时的影响;二是未深入分析土面微地表变化(如微起伏、结皮形成等)与岩面苔藓覆盖调控的交互作用对侵蚀过程的影响;研究中岩面径流深是基于相对比值法的估算值,与实际值可能存在偏差;三是不同岩面苔藓的分布格局对喀斯特坡地水动力特征也有影响^[30];四是试验中岩面苔藓采用车前籽胶黏接,虽然便于控制盖度,但其对苔藓覆盖界面水文的连通性与抗冲刷能力的潜在影响仍需进一步评估;五是试验中仅使用青藓,不同苔藓物种在水文功能上可能存在差异^[11]。

未来研究可开展的方向为:一是量化不同降雨强度和历时下岩面苔藓覆盖的产流产沙阈值,明确其在自然降雨条件下的适用性;二是结合三维激光扫描等技术,量化土面微地形特征,进一步探究其与岩面苔藓覆盖的交互作用对水力参数及侵蚀过程的影响;三是开展长期定位观测,分析不同苔藓群落演替过程中调控效应的动态变化,为喀斯特石漠化生态修复提供更精准的科学依据;四是将苔藓在试验岩面上进行人工培育,以进一步模拟野外真实场景。

4 结论

1)当岩面苔藓覆盖度达到75%以上时,对坡面产流和土面流速均表现出显著抑制效应($p < 0.01$)。与裸露岩面相比,高覆盖处理的产流速率降低29.03%~30.45%,土面流速最大降幅达62.63%。

2)岩面苔藓覆盖在一定程度上抑制石芽-溶沟坡地土面的产沙过程,且产沙过程呈现阶段性差异。在 E_1 中,高岩面苔藓覆盖处理对土面产沙的抑制效果比低岩面苔藓覆盖($\leq 50\%$)处理分别提高46.51%和152.00%。但随着持续降雨,抑制效果可能因为岩面苔藓持水饱和而遭到削弱。

3)岩面苔藓覆盖通过对岩面水动力参数的影响间接改变石芽-溶沟坡地土面水动力参数,从而影响坡地的产流产沙过程,且岩面苔藓覆盖度越高,影响

越明显,如75%岩面苔藓盖度处理下岩面流速与土面流速的相关系数为0.56。

4)在首次降雨(E_1)中,苔藓盖度与产流产沙速率呈显著的二次回归关系;但在连续降雨下,产沙过程可能受到多重因素(如苔藓饱和、土壤结构变化)影响,盖度与产沙的定量关系减弱。

综合各项指标,试验中喀斯特石芽-溶沟坡地在坡度15°、降雨强度80 mm/h条件下,高岩面苔藓覆盖度(75%)对坡地的产流产沙过程综合抑制效果最佳。因此75%岩面苔藓覆盖度可作为石芽-溶沟坡地达到显著抑制产流产沙效果的关键阈值,可为喀斯特石漠化生态修复提供关键目标数值参考。

参考文献:

- [1] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [2] 余辉,方荣杰,余佳峻,等.生物炭对西南喀斯特区石灰土水分入渗特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5): 225-235.
YU H, FANG R J, YU J J, et al. Effect of biochar on water infiltration characteristics of limestone soil in southwest karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 225-235.
- [3] 王世杰.喀斯特石漠化:中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 120-126.
WANG S J. The most serious eco-geologically environmental problem in southwestern China: Karst rocky desertification[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 120-126.
- [4] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6353-6362.
FAN F D, WANG K L, XIONG Y, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6353-6362.
- [5] 周利,彭韬,王世杰.中国西南喀斯特水源涵养特点及其生态功能[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(3): 1-14.
ZHOU L, PENG T, WANG S J. Characteristics and ecological functions of water conservation in karst regions of southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3): 1-14.
- [6] 王玉玺,解运杰,王萍.东北黑土区水土流失成因分析[J]. *水土保持科技情报*, 2002(3): 27-29.
WANG Y X, XIE Y J, WANG P. Cause analysis of soil erosion in black soil region of northeast China[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2002(3): 27-29.

- [7] 刘军会,高吉喜,马苏,等.中国生态环境敏感区评价[J].自然资源学报,2015,30(10):1607-1616.
LIU J H, GAO J X, MA S, et al. Evaluation of ecological sensitivity in China[J].Journal of Natural Resources, 2015,30(10):1607-1616.
- [8] 崔静,温庆忠,黄佳健.喀斯特地区石漠化综合治理研究[J].中国水土保持,2024(4):49-52.
CUI J, WEN Q Z, HUANG J J. Comprehensive management of stony desertification in karst areas[J].Soil and Water Conservation in China,2024(4):49-52.
- [9] 陈栋.喀斯特退化生境中生石苔藓功能性状及可塑性研究[D].贵阳:贵州师范大学,2025.
CHEN D. Study on functional traits and plasticity of Epilithic bryophytes in degraded karst habitats[D].Guiyang: Guizhou Normal University,2025.
- [10] 张显强,龙华英,刘天雷,等.贵州喀斯特地区5种石生藓类的持水性能及吸水特征比较[J].中国岩溶,2018,37(6):835-841.
ZHANG X Q, LONG H Y, LIU T L, et al. Comparison of water absorption characteristic and water retention capacity of five epilithic mosses in the karst areas of Guizhou Province[J].Carsologica Sinica,2018,37(6):835-841.
- [11] 刘润,申家琛,张朝晖.4种苔藓植物在喀斯特石漠化地区的生态修复意义[J].水土保持学报,2018,32(6):141-148.
LIU R, SHEN J C, ZHANG Z H. Study on the significance of ecological restoration of four bryophytes in karst rocky desertification area[J].Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(6):141-148.
- [12] 蒋娟,曾昊,刘冬冬,等.苔藓覆盖对喀斯特林地碳酸盐岩红土剥蚀过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):92-98.
JIANG J, ZENG H, LIU D D, et al. Effects of moss cover on detachment process of carbonate derived laterite from karst forest land[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(2):92-98.
- [13] 代丽华,林涛,唐金刚.喀斯特石漠化地区苔藓植物生长状况及其保土保水作用[J].耕作与栽培,2021,41(5):47-51.
DAI L H, LIN T, TANG J G. Soil and water conservation effects of nine bryophyte biological crusts in karst rocky desertification area[J].Tillage and Cultivation, 2021,41(5):47-51.
- [14] 张宝琦.生物结皮覆盖对坡面产流产沙过程的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
ZHANG B Q. The influence of biological soil crust covering slope on the process of runoff and sediment production[D].Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2021.
- [15] 魏成全,高英,苟久兰,等.播种量和播种方式对冬油菜养分吸收利用及产量的影响[J].中国农业科技导报,2022,24(8):182-191.
WEI Q Q, GAO Y, GOU J L, et al. Effects of different sowing rates and sowing methods on the nutrient absorption, utilization and yield of winter rapeseed in yellow soil[J].Journal of Agricultural Science and Technology, 2022,24(8):182-191.
- [16] 张一博.苔藓结皮毯石质坡面附着研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2025.
ZHANG Y B. Research on the adhesion of moss crust blanket on rock slope surfaces[D].Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2025.
- [17] 冯梦蝶,陈展鹏,何丙辉,等.不同土壤容重水平下喀斯特黄壤分离能力水动力学特性[J].水土保持学报,2021,35(2):1-7.
FENG M D, CHEN Z P, HE B H, et al. Hydraulic characteristics related to karst yellow soil detachment capacity under different bulk densities[J].Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(2):1-7.
- [18] 杨浪,毛天旭,张连菠,等.冲刷条件下生物质炭添加对喀斯特黄壤坡面产流产沙的影响[J].土壤通报,2025,56(1):107-116.
YANG L, MAO T X, ZHANG L B, et al. Effects of biochar application on runoff generation and sediment yield in karst yellow soil slope under scouring flow[J].Chinese Journal of Soil Science,2025,56(1):107-116.
- [19] 胡奕,戴全厚,王佩将.喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(6):46-51.
HU Y, DAI Q H, WANG P J. Runoff features and the influencing factors on karst sloping farmland[J].Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(6):46-51.
- [20] CAO L, LIU S, WANG S J, et al. Factors controlling discharge-suspended sediment hysteresis in karst basins, southwest China: Implications for sediment management[J].Journal of Hydrology,2021,594:e125792.
- [21] LIU D D, SHE D L. Sodicty effects on hydrological processes of sodic soil slopes under simulated rainfall[J].Hydrological Processes,2017,31(5):981-994.
- [22] LI G, ABRAHAMS A D. Effect of saltating sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow[J].Water Resources Research,1997,33(2):341-347.
- [23] WANG B, ZHANG G H, ZHANG X C, et al. Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland[J].Soil Science Society of America Journal,2014,78(2):589-597.
- [24] 张文峰.多露石石漠化区苔藓结皮对坡面径流输出及侵蚀的影响[D].贵阳:贵州大学,2025.
ZHANG W F. Impact of moss crust on slope runoff and erosion in dolomite desertification areas[D].Guiyang: Guizhou University,2025.