

# 苔藓覆盖对喀斯特林地碳酸盐岩红土剥蚀过程的影响

蒋娟<sup>1,2</sup>, 曾昊<sup>3</sup>, 刘冬冬<sup>1,2</sup>, 车陆禄<sup>1,2</sup>, 张广映<sup>1,2</sup>

(1 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3 湖州南太湖水利水电勘测设计院有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315300)

**摘要:** 为探究苔藓覆盖对喀斯特山地土壤剥蚀过程影响的机理, 通过野外采集原状土样, 结合上方来水冲刷剥蚀试验, 分析了不同坡度(5°, 20°)与不同土壤含水率(饱和含水率、田间含水率)条件下苔藓盖度与土壤分离能力间的定量关系, 解析了坡面水力特征参数对苔藓覆盖的响应规律。结果表明: 在5°和20°坡度下, 苔藓覆盖下饱和土壤的土壤剥蚀率分别比田间含水率土壤高33.9%和10.8%。与裸土层相比, 苔藓覆盖能够在高土壤含水率条件下有效抑制土壤剥蚀率, 且在低坡度下效果更显著。田间含水率土壤的剥蚀率随着苔藓盖度的增加呈线性减小趋势( $R^2 > 0.995$ )。此外, 苔藓覆盖对5°坡度的坡面水力特征参数有显著影响, 饱和土壤条件下的苔藓覆盖显著改变坡面流态( $P < 0.05$ )。与裸土层相比, 苔藓覆盖显著降低坡面流速(20.6%)、雷诺数(0.6%)、弗劳德数(28.6%)和径流功率(0.8%), 显著增加径流深(27.8%)、水流切应力(26.9%)和阻力系数(117.0%)。然而20°坡度下苔藓覆盖对坡面水力特征参数并没有显著影响。总体而言, 苔藓覆盖下碳酸盐岩红土的土壤剥蚀率与坡面水力特性没有显著相关性。研究结果可为探明苔藓覆盖在喀斯特山地的水土保持效应提供试验依据。

**关键词:** 苔藓覆盖; 喀斯特林地; 碳酸盐岩红土; 剥蚀过程

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0092-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.012

## Effects of Moss Cover on Detachment Process of Carbonate Derived Laterite from Karst Forest Land

JIANG Juan<sup>1,2</sup>, ZENG Hao<sup>3</sup>, LIU Dongdong<sup>1,2</sup>, CHE Lulu<sup>1,2</sup>, ZHANG Guangying<sup>1,2</sup>

(1. College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025; 3. Huzhou Nantai Lake Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co. Ltd., Ningbo Branch, Ningbo, Zhejiang 315300)

**Abstract:** The influences of moss cover on detachment process of carbonate derived laterite in karst mountainous lands were explored and analysed. Undisturbed soil samples were collected and subjected to flow scouring in a 3.5 m long hydraulic flume. Two degrees of slope (5°, 20°) and two soil water contents (saturated soil water content, field capacity) were selected to quantify the relationship between moss coverage and soil detachment rate. The responses of hydraulic characteristics of slope runoff to moss cover were also analyzed. Compared to the field capacity, the results indicated that the detachment rate of saturated soil under moss cover increased by 33.9% and 10.8% at slopes of 5 and 20 degrees, respectively. The effects of moss cover on reducing soil detachment rate were more effective than that of bare soil without moss cover, and its effects were more obvious at lower slopes. The detachment rate under field capacity soil condition decreased in a linear trend with increasing moss coverage ( $R^2 > 0.995$ ). The moss cover had significant effects on the hydraulic characteristics of runoff flow at the slope of 5 degrees. The moss cover under saturated soil condition significantly changed the flow regime of surface runoff ( $P < 0.05$ ). Compared to bare soil without moss cover, the moss cover significantly reduced the runoff velocity (-20.6%), Reynolds number (-0.6%), Froude number (-28.6%) and runoff power (-0.8%), increased the runoff depth (+27.8%),

收稿日期: 2021-09-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(41807016); 黔科合支撑项目([2020]4Y010); 贵州省水利科技经费项目(KT201803); 贵州省研究生基金立项课题项目(黔教合 YJSCXJH[2020]094)

第一作者: 蒋娟(1998—), 女, 硕士生, 主要从事岩溶区生态水文研究。E-mail: 1977164433@qq.com

通信作者: 刘冬冬(1989—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地球关键带水土过程及生态环境效应研究。E-mail: liudongdongcn@fox-mail.com

flow shear stress (+26.9%) and Darcy-Weisbach resistance coefficient (+117.0%). Besides, the moss cover had no significant effects on the hydraulic characteristics of slope runoff at the slope of 20 degrees. Overall, no significant correlation exhibited between the hydraulic characteristics of runoff flow and the soil detachment rate of carbonate derived laterite covered with moss. These results can provide the experimental data for the study of applying moss cover to soil and water conservation in karst mountainous lands.

**Keywords:** moss cover; karst forest land; carbonate derived laterite; detachment process

我国西南喀斯特地区是世界上连片裸岩面积最大、岩溶发育最强烈的生态脆弱区<sup>[1]</sup>。由于特殊的水文地质条件及强烈的岩溶作用,加上不合理的人类活动影响使得该区域水土流失问题和石漠化现象严重,从而阻碍了当地生态恢复及社会经济的可持续发展<sup>[1-3]</sup>。喀斯特地区在特殊的空间二元结构下形成独特的产流产沙过程<sup>[2]</sup>,而坡面流作为坡面土壤流失的主要驱动力之一,可通过流速、径流功率等水力学参数的变化规律来解析坡面侵蚀的主控因素<sup>[4]</sup>,从而明确喀斯特山地坡面土壤侵蚀水动力学机制。苔藓作为西南喀斯特地区常见的地表组成成分,其种类丰富且分布广泛。谈洪英<sup>[5]</sup>在贵州 4 个喀斯特沟谷的苔藓植物进行调查发现,苔藓植物共 55 科 126 属 346 种。对贵州老万场金矿石灰岩表面的藓类研究发现,其优势藓类的生物量最高可达 854 g/m<sup>2</sup><sup>[6]</sup>。有研究<sup>[7-8]</sup>表明,苔藓覆盖能够显著影响地表土壤剥蚀过程及其坡面径流水力学特性,因此探究苔藓覆盖对喀斯特山地土壤剥蚀过程影响的机理,对于岩溶地区水土流失阻控技术研发有重要的意义。

苔藓覆盖作为苔藓植物及其假根粘结土壤颗粒而形成的地表复合体,是生物结皮正向演替的高级阶段<sup>[9]</sup>。作为干旱、半干旱区普遍存在的地被物,苔藓覆盖能够改变土壤表面粗糙度<sup>[10]</sup>、改善土壤团粒结构<sup>[11]</sup>、增强土壤表面稳定性<sup>[12]</sup>及提高土壤抗侵蚀能力。有研究<sup>[5]</sup>发现,苔藓覆盖可通过增强土壤团聚体稳定性及表面覆盖作用降低土壤剥蚀能力,其作用随苔藓覆盖盖度、厚度、种类及区域生境条件的变化而产生差异<sup>[11]</sup>。另有研究<sup>[13]</sup>表明,苔藓覆盖有很强的斥水性,能降低土表入渗能力,增加产流从而增强坡面径流侵蚀动力<sup>[14]</sup>。当前对苔藓覆盖影响土壤剥蚀过程的研究主要集中于表面覆盖间的差异性<sup>[15]</sup>。Belnap<sup>[9]</sup>研究发现,冲刷前对苔藓覆盖进行预饱和处理的时间越长,土壤剥蚀越强烈。当苔藓覆盖进行 24 h 的预饱和处理后,土壤剥蚀能力显著增强<sup>[16]</sup>;其次,苔藓覆盖的发育情况也能显著影响坡面的坡度与土壤剥蚀速率间的相互关系,发育越差的苔藓覆盖其下伏土壤剥蚀能力对坡度的变化越敏感<sup>[17]</sup>。

目前对苔藓覆盖影响土壤剥蚀过程的研究主要集中于诸如黄土高原的干旱半干旱地区,对南方喀斯

特湿润地区的研究还处于初始认知阶段。苔藓覆盖及其下伏土壤存在明显的地域差异<sup>[11]</sup>,不同地区苔藓覆盖对下伏土壤剥蚀过程的作用应存在一定的不同。因此,本研究的主要目的是:(1)明确不同坡度和土壤含水量条件下苔藓覆盖对喀斯特林地碳酸盐岩红土剥蚀过程的影响;(2)分析不同条件下苔藓覆盖与坡面流体力学特征的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区(106°39'09"E, 26°26'52"N)的 40 年生马尾松林,林地总面积达 0.17 km<sup>2</sup>。该区属亚热带季风气候,年均降水量约 1 185 mm,年均气温约 15 °C,年均蒸发量约 830 mm,降水集中于 5—10 月,约占全年降水的 78%。土壤类型为碳酸盐岩红土,是一种具有高黏粒含量,又有较多胶体物质黏结土粒的特殊土。红土结构致密,具有高含水量、低渗透性等物理特征。林下植被层次结构简单且类型稀少,主要由荚蒾(*Viburnum dilatatum*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、白茅(*Imperata cylindrical* (L.) Beauv.)等组成。林下苔藓植物发育良好,常见的苔藓覆盖主要由小灰藓(*Hypnum cupressiforme*)构成,隶属灰藓科,株高约 0.5~1 cm。苔藓覆盖的土壤内部存在约 1~5 mm 的假根黏结土壤,使苔藓紧紧依附于地表表层。研究区的苔藓覆盖呈斑块分布,多见于水源及光照充足的树林间隙中。

所有样品采集于 2019 年 3—4 月。通过布设样地、原状土采样和室内土槽冲刷试验分析苔藓覆盖对下伏土壤理化性质和剥蚀过程的影响。选择 4 块 10 m×10 m 的马尾松林地作为研究样地,利用样点法(25 cm×25 cm 样方)布设样方,根据样地形状在每个样地内随机布设 10 个样方,主要调查每块样地的地形(坡度、坡向)、植被状况、苔藓盖度等(表 1),根据调查情况估算得出每块样地中的苔藓盖度在 30%~55%。在每块样地选取人为干扰小、苔藓厚度相对均匀且地势较平坦的区域采集苔藓覆盖土样,同时每个苔藓覆盖土样周围选取土层完整且无苔藓生长的区域采集森林裸土样。样品采集时去除表面枯枝落叶,避免苔藓和裸土层的表面受严重破坏。参照 Liu 等<sup>[7]</sup>土槽冲刷试验样品的规格(直径 10 cm×高 5 cm),使用同

样规格的钢制环刀采集土壤表层 0—5 cm 的原状土样。每块样地进行 3~5 次取样,最终分别得到 20 个苔藓盖度不同的原状土样和 20 个土壤质地均匀的森林裸土样,总计 40 个土样。

样品采集后利用相机垂直拍摄土表,并用 Image-Pro 6.0 软件处理拍摄图像及识别苔藓盖度。采用塑料膜密封土样以防止土表蒸发,然后带回实验室进行后续的室内土槽冲刷试验。在每个采样点附近采集表层土壤并分析各样点的土壤理化性质:利用烘干法测量土壤初始含水量和土壤干容重,负压真空饱和器饱和土样以测量饱和含水量,Walkley-Black 法

测定土壤有机质含量,电导仪法测定土壤 pH 和  $EC_{1:5}$ ,MasterSizer 2000 激光粒度分析仪法测定土壤机械组成。每个土壤理化性质均重复测定 3 次,不同苔藓覆盖和裸土样的土壤理化性质见表 2。

表 1 样地基本情况

样地 编号	坡度/ (°)	坡向/ (°)	主要植被 类型	苔藓 盖度/%
I	5	东南 175	马尾松树、火棘、荚蒾	32
II	17	东南 120	马尾松树、火棘、鬼针	38
III	13	东南 110	马尾松树、茅草、火棘、荚蒾	48
IV	7	东 90	马尾松树、火棘	53

表 2 苔藓覆盖对土壤理化性质的影响

处理	田间含水率/ ( $g \cdot g^{-1}$ )	饱和含水率/ ( $g \cdot g^{-1}$ )	土壤容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	土壤有机质含量/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	pH	电导率/ ( $\mu S \cdot cm^{-1}$ )	机械组成/%			样品 数量
							黏粒	粉粒	砂粒	
苔藓覆盖	0.38±0.02a	0.51±0.07a	1.03±0.11a	56.92±5.22a	5.47±0.26b	66.82±15.10a	30.84±15.62a	69.03±15.54a	0.13±0.31a	20
裸土层	0.38±0.04a	0.48±0.05a	1.08±0.08a	56.60±5.96a	5.98±0.26a	77.28±19.10a	21.60±8.61a	77.76±7.58a	0.64±1.22a	20

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。

利用长 3.50 m、宽 0.35 m 的变坡水槽进行上方来水冲刷试验,试验仪器改进自张光辉等<sup>[18]</sup>课题组设计的变坡水槽(图 1)。该装置由 5 个部分组成:(1)供水系统;(2)明渠;(3)试验区;(4)坡度调节系统;(5)收集系统。通过供水池供应自来水平稳地溢流进入水槽表面,水槽底面保持足够光滑,使水流流态为均匀流。上方来水流量可通过调节潜水泵的功率控制,本次试验过程中固定上方来水流量为 1.05 L/s。在距离水槽底部 50 cm 处设置直径为 10 cm 的空孔,用于放置原状环刀样。利用坡面径流冲刷土样表面使土壤颗粒逐渐剥蚀,然后通过收集系统测定土壤剥蚀量。水槽坡度可通过手动滑轮进行调节,可调节范围为  $5^\circ \sim 60^\circ$ 。每次上方来水冲刷试验前将土样放置于试验区,保持土面高程与水槽底面一致。冲刷试验持续时间为 600 s,冲刷开始 5 min 后,在距离试验区上端 0.1 m 处用针管注射高锰酸钾溶液,采用高清相机记录冲刷过程并用 Kmplayer Plus 软件处理染色图像,计算坡面流表面流速(m/s),利用修正系数  $\alpha$  值对表面流速进行修正。Horton 等研究得出不同流态条件下的  $\alpha$  值:层流为 0.67,过渡流为 0.70,紊流为 0.80。修正系数  $\alpha$  值的确定方法为:首先假设水流呈某种流态,通过雷诺公式计算出雷诺数并判定水流流态,然后检验假设是否成立,最终得出所有冲刷试验的水流流态为紊流。因此,断面平均流速通过表面流速乘以系数 0.80 得出。

冲刷试验前,参照 Belnap 等<sup>[17]</sup>对土壤的饱和处理模式,50% 的样品用超纯水饱和 24 h,剩余样品保持原状土壤含水量,获得 2 种不同饱和度的样品。由于该地区碳酸盐岩红土颗粒间的连结力强,一般的浸

水不易破坏粒间连结,使得红土在浸水条件下难以达到饱和条件,因此本试验利用负压真空饱和器辅助土样饱和,使土壤能够在 24 h 内达到饱和状态。由于研究样地坡度范围为  $5^\circ \sim 20^\circ$ ,水槽设定为 2 种坡度(低坡度  $5^\circ$  和高坡度  $20^\circ$ )。通过设置不同土壤初始含水量和水槽坡度分析不同条件下苔藓覆盖对土壤剥蚀过程及坡面水力特征参数的影响。

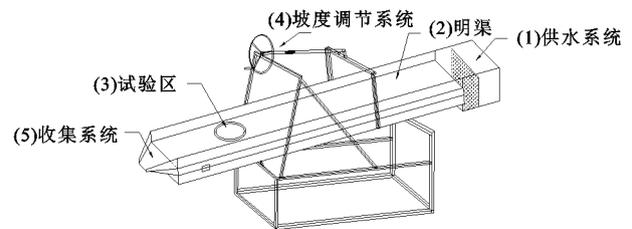


图 1 变坡水槽试验装置示意

## 1.2 数据分析

通过测定冲刷前后的土样干重估算水槽冲刷试验的土壤剥蚀速率( $D_c$ )( $kg/(m^2 \cdot h)$ ):

$$D_c = \frac{W_b - W_e}{A \times t} \quad (1)$$

式中: $W_b$  为试验前土样干重(g); $W_e$  为试验后土样干重(g); $A$  为土样表面面积( $7.85 \times 10^{-3} m^2$ ); $t$  为试验时间(600 s)。

径流深  $h$  (m) 计算公式为:

$$h = \frac{Q}{BV} \quad (2)$$

式中: $Q$  为流量( $m^3/s$ ); $B$  为水槽宽度(0.35 m); $V$  为断面平均流速(m/s)。

雷诺数( $Re$ )和弗劳德数( $Fr$ )计算表达式为:

$$Re = \frac{hV}{\nu} \quad (3)$$

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

式中: $v$ 为20℃时水的运动黏性系数( $1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ); $g$ 为重力加速度( $9.81 \text{ m/s}^2$ )。

由曼宁公式和Darcy-Weisbach公式计算阻力系数 $n$ 和 $f$ :

$$n = \frac{h^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (5)$$

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot h \cdot s}{V^2} \quad (6)$$

式中: $s$ 为坡度( $\varphi$ )的正切值。

水流切应力( $\tau$ )和径流功率( $\omega$ )的计算公式为:

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot s \quad (7)$$

$$\omega = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot s \cdot V \quad (8)$$

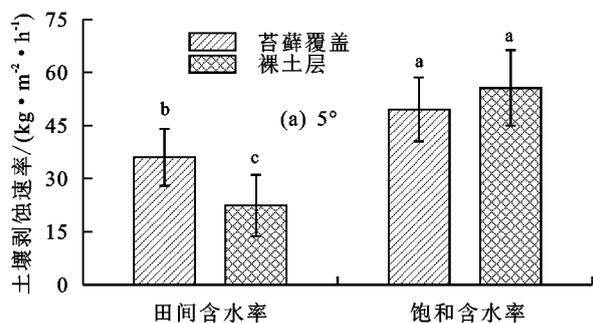
式中: $\rho_w$ 为水的密度( $\text{g/cm}^3$ ); $\tau$ 为切应力( $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}^2)$ ); $\omega$ 为水流功率( $\text{g/s}^3$ )。

采用Excel 2010和R程序等软件进行数据处理和作图分析,利用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)分析各处理间土壤剥蚀速率及水力特征参数值的差异,Pearson相关系数对各变量之间的关系进行回归分析,用决定系数( $R^2$ )评价回归方程的性能。

## 2 结果与分析

### 2.1 苔藓覆盖对土壤剥蚀速率的影响

对于低坡度而言,苔藓下伏土壤和裸土的剥蚀速率随着土壤初始含水率的增大而显著加强( $P < 0.05$ );苔藓覆盖土壤和裸露土壤的剥蚀速率在田间含水率



注:图中不同字母表示差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。

图2 不同坡度条件下苔藓覆盖与裸土层下的土壤剥蚀速率( $D_c$ )

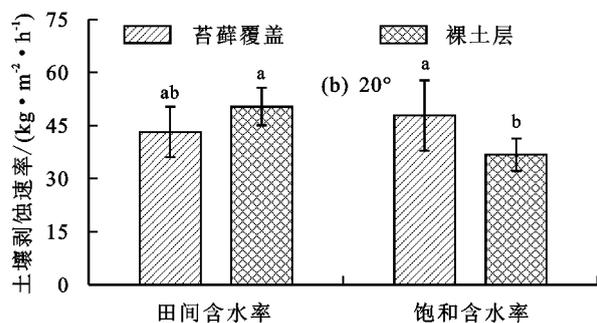
### 2.2 坡面流水力特征参数对苔藓覆盖的响应规律

整个试验过程中雷诺数( $Re$ )值在2 908.16~2 942.85,弗劳德数( $Fr$ )值在2.64~5.61(表3),根据明渠均匀流判定标准,所有试验处理的坡面流流态均为紊流和急流<sup>[20]</sup>。

饱和土壤条件下5°坡度时苔藓覆盖对坡面流水力特征参数的影响显著,然而田间含水率条件下5°坡度时苔藓覆盖与裸土的坡面流水力特征参数无显著差异性。饱和土壤含水率条件下5°坡度时苔藓覆

条件下差异显著( $P < 0.05$ ),然而在饱和含水率下差异不显著( $P > 0.05$ )(图2)。具体来说,对于5°坡度,饱和含水率条件下苔藓下伏和裸露土壤的剥蚀速率分别比田间含水率条件下大33.8%和148.3%;田间含水率条件下苔藓下伏土壤的剥蚀速率比裸露土壤的剥蚀速率高60.6%,而在饱和含水率条件下时二者的差距不大。表明当土壤干旱时苔藓下伏土壤的剥蚀速率比裸土快,然而随着土壤湿度变高,二者之间的差异减小。这可能是因为土壤润湿时土壤内部黏聚力及紧实度遭到破坏所导致<sup>[19]</sup>。当土壤含水率增加时,苔藓覆盖及裸土层下的土壤剥蚀率也随之增加,且苔藓覆盖能缓解该作用。另一方面,苔藓下伏土壤与裸土在高坡度下的差异规律与低坡度条件不一致。高坡度条件下原状土壤含水率对土壤剥蚀速率没有显著影响,然而土壤湿度较高时苔藓下伏土壤的剥蚀速率比裸土的高30.2%。

田间含水率条件下苔藓盖度与土壤剥蚀速率之间存在明显的函数关系( $R^2 \geq 0.995$ )(图3)。例如,20°坡度下土壤剥蚀率随着苔藓盖度的增大呈幂指数下降关系,土壤剥蚀率随苔藓盖度增加先急剧减弱后逐渐趋于平稳;5°坡度下的苔藓盖度与土壤剥蚀速率呈抛物线关系( $R^2 = 0.995$ )。然而,饱和含水率条件下低坡度时苔藓盖度与土壤剥蚀率之间无显著关系,而高坡度时存在一定的线性关系( $R^2 = 0.467$ )。表明土壤含水率的变化能影响苔藓盖度对土壤剥蚀率的抑制作用,当土壤含水率达到饱和时,苔藓盖度与土壤剥蚀率之间无显著相关性。



盖处理的雷诺数( $Re$ )、弗劳德数( $Fr$ )和径流功率( $\omega$ )值分别比裸土小0.6%,28.7%,0.8%,而径流水深( $h$ )和径流剪切力( $\tau$ )分别比裸土高27.8%,26.9%(表3)。饱和土壤条件下5°坡度时苔藓覆盖的断面平均流速值最低为0.587 m/s,比裸土层低20.6%,阻力系数比裸土层高117.0%。另外,5°坡度时苔藓覆盖不同的土壤含水率条件能够显著影响坡面流流态等水力特征(图4)。5°坡度时苔藓覆盖饱和土壤含水率条件下的( $Re$ )、( $Fr$ )和( $\omega$ )分别比田间含水

率条件下低 0.3%, 17.5%, 0.4%, 而径流水深( $h$ )和

径流剪切力( $\tau$ )分别高 15.7%, 15.1%。

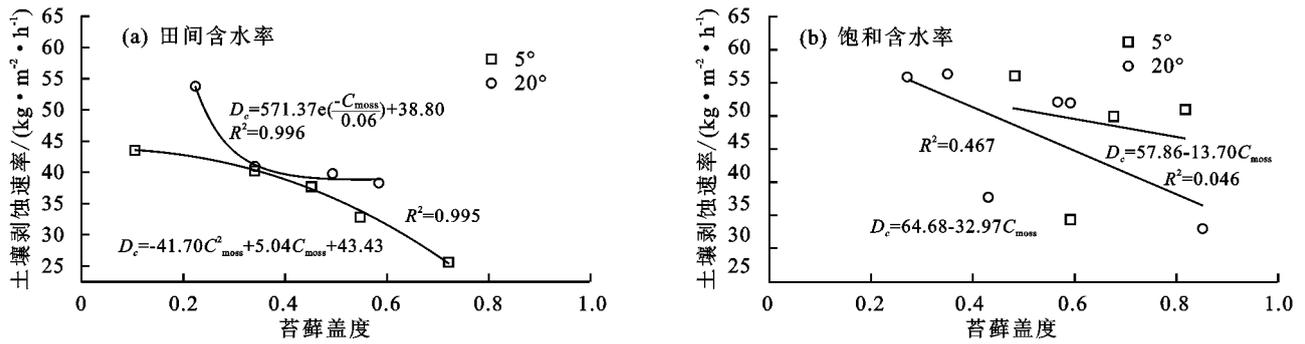
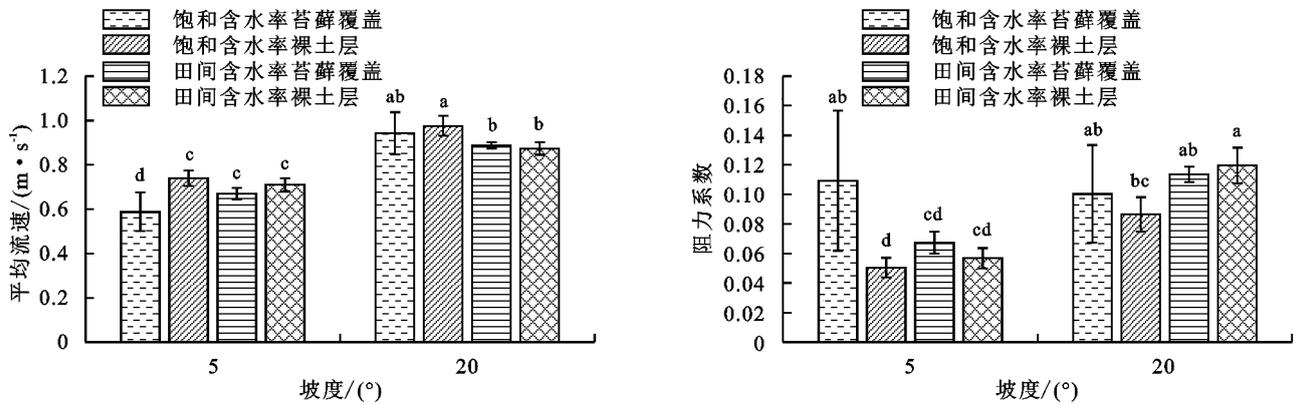


图 3 不同含水率条件及不同坡度下  $D_c$  与苔藓盖度的关系

表 3 苔藓覆盖及裸土层在不同条件下的各水力特征参数

坡度/(°)	土壤含水率	处理	$h/mm$	$Re$	$Fr$	$\tau/Pa$	$\omega/(kg \cdot s^{-3})$
5	饱和含水率	苔藓覆盖	5.22±0.76a	2908.16±13.34c	2.64±0.58d	4.33±0.62c	2.50±0.01d
		裸土层	4.09±0.19b	2926.58±3.08b	3.70±0.27c	3.41±0.15d	2.52±0c
	田间含水率	苔藓覆盖	4.51±0.17b	2919.72±2.82b	3.19±0.19cd	3.76±0.14cd	2.51±0cd
		裸土层	4.25±0.18b	2923.83±2.87b	3.48±0.22c	3.55±0.14d	2.52±0c
20	饱和含水率	苔藓覆盖	3.23±0.34c	2940.65±5.67a	5.34±0.80a	10.64±1.11ab	9.94±0.02ab
		裸土层	3.10±0.14c	2942.85±2.33a	5.61±0.39a	10.21±0.46b	9.94±0.01a
	田间含水率	苔藓覆盖	3.40±0.05c	2937.90±0.87a	4.87±0.11b	11.18±0.17a	9.93±0b
		裸土层	3.45±0.12c	2936.94±1.90a	4.75±0.23b	11.36±0.37a	9.92±0.01b

注:表中数据为平均值±标准差, 同列不同字母表示不同处理间差异性显著( $P<0.05$ )。



注:图中不同字母表示不同处理间差异达显著水平( $P<0.05$ )。

图 4 不同坡度条件下苔藓覆盖与裸土层的断面平均流速与阻力系数

对全体数据的 Pearson 相关性分析表明, 苔藓覆盖下土壤剥蚀率与水力学特征参数值之间无显著相关性, 且各水力特征参数值不受苔藓盖度变化的影响(表 4、表 5)。产生这种结果的原因可能在于, 本试验采用的是上方来水冲刷方法, 苔藓覆盖对坡面径流的微弱作用不能显著改变上方来水的径流特征, 在今后的研究中应通过土槽模拟降雨试验研究苔藓覆盖对坡面流径流水力特征参数的影响规律; 另外, 较少的试验样本量也导致苔藓盖度未能涵盖所有情况, 在以后的区域研究中应将样本量提高至千位级, 或者通过 Meta 分析比较不同研究区的结果。值得注意的是, Pearson 相关系数表征的是 2 个变量之间线性关系强度的统计量, 而苔藓盖度与土壤剥蚀速率在 20°坡

度的非饱和土壤条件下存在明显的幂函数关系(图 3), 使得 Pearson 相关系数在该情况下不适用。

### 3 讨论

#### 3.1 苔藓覆盖对土壤剥蚀速率和坡面径流水力学特征参数的影响

目前苔藓覆盖或生物结皮增强土壤抗侵蚀能力的作用在不少区域得到证实(表 6)。广义来讲, 苔藓覆盖作为生物结皮的一种类型, 可通过自身覆盖及改变土壤特性来影响土壤剥蚀能力及坡面径流的水力特性<sup>[11]</sup>, 其影响力不仅受苔藓自身条件(如厚度、盖度、种类)控制, 还受外在条件(如坡度、土壤含水率)的约束<sup>[17]</sup>。本研究表明, 在 5°和 20°坡度下, 饱和苔藓覆盖下的土壤剥蚀率比田间含水率苔藓覆盖下高 33.8%, 10.8%; 较裸土层相

比,苔藓覆盖抑制土壤剥蚀的能力随土壤含水量的增加而增强,且在 5°坡度时抑制效应更强。原因在于:首先,土壤含水量的增加能降低土壤黏聚力和破坏土壤紧实度<sup>[19]</sup>,从而降低土壤抗蚀能力;其次,苔藓覆盖在饱和过程中吸水膨胀,增大苔藓生物体的表面积,使其产生较强的表面覆盖效应<sup>[9]</sup>,从而削弱因土壤含水量增加所导致的土壤剥蚀能力增强。20°坡度时苔藓覆盖不能削弱该作用,可能是由强径流的冲刷作用导致(表 3),然而冲刷过程中的坡度、径流量与苔藓覆盖间的作用关系尚不明确,可能存在类似坡度阈值等问题,需进一步试验研究探讨。在田间含水率土壤条件下,土壤剥蚀率与苔藓盖度呈负相关关系(图 3),这

表 4 5°坡度下苔藓盖度、土壤剥蚀速率与坡面水力特征参数的相关系数矩阵

指标	田间含水率					饱和含水率				
	$C_{\text{moss}}$	$D_c$	$V$	$\tau$	$f$	$C_{\text{moss}}$	$D_c$	$V$	$\tau$	$f$
$C_{\text{moss}}$	1	-0.899*	0.261	-0.258	-0.255	1	-0.216	-0.353	0.321	0.291
$D_c$		1	-0.145	0.133	0.121		1	0.137	-0.080	-0.029
$V$			1	-1	-0.999**			1	-0.990**	-0.960**
$\tau$				1	1				1	0.990**
$f$					1					1

注: \* 表示显著相关( $P < 0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ )。下同。

表 5 20°坡度下苔藓盖度、土壤剥蚀速率与坡面水力特征参数的相关系数矩阵

指标	田间含水率					饱和含水率				
	$C_{\text{moss}}$	$D_c$	$V$	$\tau$	$f$	$C_{\text{moss}}$	$D_c$	$V$	$\tau$	$f$
$C_{\text{moss}}$	1	-0.863	-0.346	0.346	0.346	1	0.548	0.794	-0.774	-0.749
$D_c$		1	0.329	-0.329	-0.329		1	0.473	-0.410	-0.341
$V$			1	-1	-1			1	-0.997**	-0.989**
$\tau$				1	1				1	0.997**
$f$					1					1

表 6 苔藓覆盖或生物结皮对不同区域土壤剥蚀/侵蚀过程的影响规律

试验地点	土壤类型	试验方法	试验面积/ $\text{m}^2$	结皮类型	生物结皮对土壤表面的影响	参考文献
黄土高原	黄土	土槽冲刷	$0.78 \times 10^{-2}$	苔藓结皮,蓝藻结皮	土壤剥蚀能力随生物结皮的演替而显著降低	Liu 等 <sup>[7]</sup>
西班牙东南部	砂质壤土	模拟降雨	7	蓝藻结皮,地衣结皮,苔藓结皮	生物结皮能改变土表微观地形,增加土表粗糙度	Caballero 等 <sup>[10]</sup>
三峡库区	紫土	土槽冲刷	$0.20 \times 10^{-2}$	苔藓结皮	生物结皮可通过自身覆盖和改变土壤性质来降低土壤剥蚀能力	Zhang 等 <sup>[11]</sup>
六道沟小流域	砂质壤土	土槽冲刷	2	苔藓结皮,蓝藻结皮	苔藓结皮覆于土壤表面能增加初始产流时间	李林等 <sup>[12]</sup>
六道沟小流域	砂质壤土	酒精溶液入渗	$2.25 \times 10^{-2}$	苔藓结皮	苔藓结皮的发育显著增强土壤表面的斥水性	郭成久等 <sup>[13]</sup>
陕西省安塞县	黄土	土槽冲刷	0.1	苔藓-蓝藻混合结皮	生物结皮能显著降低水流对土壤的侵蚀性	Wang 等 <sup>[14]</sup>
黄土高原	黄土	模拟降雨	$0.64 \times 10^{-2}$	苔藓结皮,蓝藻结皮	生物结皮提高了土壤表面对雨落动能的抵抗能力	Zhao 等 <sup>[21]</sup>
陕西省安塞县	黄土	人工模拟降雨	2	苔藓结皮,蓝藻结皮	生物结皮的斑块破碎度越大,土壤侵蚀越剧烈	吉静怡等 <sup>[22]</sup>
陕西省安塞县	黄土	模拟降雨	$0.64 \times 10^{-2}$	苔藓结皮,蓝藻结皮	生物结皮能削减雨滴动能,起到保土减蚀的作用	秦宁强等 <sup>[23]</sup>
塔布尔纳斯沙漠	粉质壤土	土槽冲刷	1	苔藓-蓝藻混合结皮	生物结皮能显著降低水流对土壤的侵蚀性	Chamizo 等 <sup>[24]</sup>

不同土壤含水率、不同坡度下苔藓覆盖对坡面径流水力学参数的影响差异明显。本次研究结果表明,较裸土层相比,5°坡度下的饱和和苔藓覆盖能显著降低坡面流流速,增加径流阻力系数,而田间含水率苔藓

与 Zhang 等<sup>[11]</sup> 研究结果一致。Zhang 等<sup>[11]</sup> 研究认为,苔藓覆盖能通过改善土壤特性来促进土壤团聚体稳定性,然而本研究的苔藓覆盖仅能降低下伏土壤的 pH,对其他土壤性质无显著影响(表 2),进一步说明西南喀斯特林地的苔藓覆盖主要是通过表面覆盖作用来调控土壤剥蚀过程。饱和土壤条件下的苔藓盖度与土壤剥蚀率无显著关系,这可能是因为在饱和和处理过程中苔藓覆盖下土壤的团聚体稳定性遭到不同程度的崩解破坏<sup>[25]</sup>,使得苔藓覆盖下的土壤剥蚀能力受苔藓盖度、土壤稳定性等多种因素影响。对于苔藓覆盖在饱和处理后的土壤稳定性变化情况,目前仍不清楚,需进一步通过微观途径分析。

覆盖对各水力特征参数值的影响不显著。这是因为饱和处理过后的苔藓覆盖能吸收大量水分并发生膨胀,与裸土层相比增大表面粗糙度<sup>[10]</sup>,从而增加坡面流阻力,使其降低坡面流流速。20°坡度时苔藓覆盖

对水力特征参数值无显著影响,这可能是因为强径流作用下苔藓覆盖对坡面径流的拦截作用效果不显著。其次,苔藓覆盖可能在较大水流切应力下产生破坏<sup>[14]</sup>,使土壤表面逐渐失去苔藓覆盖拦截水动力的作用。Zhang 等<sup>[11]</sup>研究表明,水流切应力( $\tau$ )与苔藓覆盖的土壤剥蚀能力有明显的函数拟合关系。然而本研究结果表明,苔藓覆盖下的土壤剥蚀率与坡面流的各水力特征参数值无显著相关性,这可能是因为区域间土壤特性的差异所导致。Zhang 等<sup>[11]</sup>研究的紫土是一种具有强烈侵蚀性的土壤<sup>[26]</sup>,本研究区的碳酸盐岩红土可蚀性明显弱于紫土<sup>[27]</sup>。其次,由于气候、土壤及生境条件的多样性,苔藓覆盖与下伏土壤的联结作用和反馈机制在不同区域发生变化,从而产生不同的互馈关系<sup>[11]</sup>。此外,本次试验在考虑不破坏苔藓覆盖的情况下仅探讨坡面流的切应力在 3.5~11.5 Pa 的情况,而更强的坡面流与碳酸盐岩红土剥蚀能力之间是否存在相关性需进一步试验研究。

### 3.2 苔藓覆盖对喀斯特石漠化防治的启示

西南喀斯特石漠化现象导致当地出现水土流失加剧、土壤肥力下降、生物多样性降低等多种问题<sup>[28]</sup>。为此,我国开展封山育林育草、人工造林种草等石漠化综合治理工程<sup>[29]</sup>,使西南地区石漠化现象得到有效抑制。苔藓覆盖作为岩溶山地区一种常见的表面覆盖现象,具有增强地表抗剥离能力、调控降水下渗、改变土壤水分再分配格局及促进土壤微生物和植被演替的作用<sup>[30]</sup>。根据本研究结果显示,苔藓覆盖在低坡度条件下有明显的水土保持效益,但在高坡度下作用不明显,其中区域土壤水分特征条件能够显著影响苔藓覆盖的水土保持效益。因此,在喀斯特石漠化防治的过程中,应综合考虑区域气候、地形条件及植物特性,才能达到最佳的调控效果。

## 4 结论

(1) 苔藓覆盖对土壤剥蚀率的影响受土壤含水率的影响,田间含水率条件下的苔藓盖度与土壤剥蚀率呈负相关,而饱和土壤条件下的苔藓盖度与土壤剥蚀率无明显关系。

(2) 苔藓覆盖在土壤含水率增加时可有效抑制土壤剥蚀能力的增加,且在低坡度(5°)下的作用效果更强。

(3) 苔藓覆盖在低坡度(5°)时降低坡面流流态,增强坡面流阻力,然而在高坡度(20°)时对坡面流流态无显著影响。

(4) 当坡面流的切应力在 3.5~11.5 Pa 时,西南喀斯特地区苔藓覆盖下的土壤剥蚀速率不能通过坡面径流水力特征参数的相关表达式表示出来。

该结论可为西南喀斯特地区的水土流失防治奠定试验基础,并为苔藓覆盖碳酸盐岩红土坡面侵蚀模型提供科学依据。

### 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] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [3] 陈洪松, 付智勇, 张伟, 等. 西南喀斯特地区水土过程与植被恢复重建[J]. *自然杂志*, 2018, 40(1): 41-46.
- [4] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. *泥沙研究*, 1996(1): 74-82.
- [5] 谈洪英. 贵州喀斯特沟谷苔藓植物物种多样性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [6] 汪文云, 张朝晖. 老万场金矿石灰岩与红土矿体藓类植物生物量及吸水量比较研究[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(3): 319-323.
- [7] Liu F, Zhang G H, Sun F B, et al. Quantifying the surface covering, binding and bonding effects of biological soil crusts on soil detachment by overland flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(15): 2640-2648.
- [8] Gao L Q, Hui S, 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.
- [9] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20: 3159-3178.
- [10] 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.
- [11] Zhang G H, Ding W F, Jian P U, et al. Effects of moss-dominated biocrusts on soil detachment by overland flow in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(10): 2418-2431.
- [12] 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.
- [13] 郭成久, 陈乐, 肖波, 等. 黄土高原苔藓结皮斥水性及其对火烧时间的响应[J]. *沈阳农业大学学报*, 2016, 47(2): 212-217.
- [14] 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.

- pendent root extraction function[J].Journal of Hydrology, 1976,31(1/2):13-26.
- [11] Prasad R. A linear root water uptake model[J].Journal of Hydrology, 1988,99(3/4):297-306.
- [12] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology, 1995,109(1):7-13.
- [13] Murielle G, Sidle R C, Alexia S. The influence of plant root systems on subsurface flow; Implications for slope stability[J].Biological Science, 2011,61(11):869-879.
- [14] Leung A K, Garg A, Coe J L, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity [J]. Hydrological Processes, 2015,29(15):3342-3354.
- [15] 马瑶.植被护坡水文效应对边坡稳定性影响的研究[D].西安:西安理工大学, 2018.
- [16] 朱景汕.降雨—蒸发环境下黄土边坡破坏机理试验研究[D].兰州:兰州交通大学, 2017.
- [17] Chui T F M, Freyberg D L. The use of COMSOL for integrated hydrological modeling [R]. Proceedings of the COMSOL Conference. Boston, 2007:217-223.
- [18] 张攀,徐永福,武孝天.植物根系吸水对边坡稳定性的影响[J].长江科学院院报, 2020,37(8):120-125,136.
- [19] Genuchten V T M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [20] Charles W W, Zhang Q, Ni J J, et al. A new three-dimensional theoretical model for analysing the stability of vegetated slopes with different root architectures and planting patterns [J]. Computers and Geotechnics, 2021,130(1):1-11.
- [21] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978,15(3):313-321.
- [22] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报, 2017,39(1):1-47.
- (上接第 98 页)
- [15] Wei L H, Zhang B, Wang M Z. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems [J]. Agricultural Water Management, 2007,94(1):54-62.
- [16] Belnap J, Wilcox B P, Van Scoyoc M V, et al. Successional stage of biological soil crusts: An accurate indicator of ecohydrological condition [J]. Ecohydrology, 2013,6(3):474-482.
- [17] Belnap J, Weber B, Büdel B, et al. Biological Soil Crusts: An organizing principle in drylands[M].Switzerland: Springer, 2016:305-320.
- [18] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J].土壤学报, 2002,39(4):882-886.
- [19] 罗爽,黄选华,高华端.黔中喀斯特坡耕地土壤含水量对土力学性质的影响[J].西南农业学报, 2020,33(12):2879-2884.
- [20] 陈椿庭.关于明渠水流的六区流态[J].人民长江, 1995,26(3):43-46.
- [21] Zhao Y G, Qin N Q, Bettina W, et al. Response of biological soil crusts to raindrop erosivity and underlying influences in the hilly Loess Plateau region[J].Biodiversity and Conservation, 2014,23(7):1669-1686.
- [22] 吉静怡,赵允格,杨凯,等.生物结皮分布格局对坡面流水动力特征的影响[J].应用生态学报, 2021,32(3):1015-1022.
- [23] 秦宁强,赵允格.生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用[J].应用生态学报, 2011,22(9):2259-2264.
- [24] Sonia C, Emilio R C, José R R, et al. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall[J].Catena, 2017,148:117-125.
- [25] 彭新华,张斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J].生态学报, 2003,23(10):2176-2183.
- [26] 刘涓,杜静,魏朝富,等.紫色土区土地整理年限对土壤理化特性的影响[J].农业工程学报, 2015,31(10):254-261.
- [27] 梁音,刘宪春,曹龙熹,等.中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J].中国水土保持, 2013(10):35-40,79.
- [28] 杜文鹏,闫慧敏,甄霖,等.西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J].生态学报, 2019,39(16):5798-5808.
- [29] 郑智恒,熊康宁,容丽,等.生物土壤结皮在喀斯特生态治理中的应用潜力[J].西北植物学报, 2020,40(6):1075-1086.
- [30] Jackson T A. Secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment[J].Geoderma, 2015,251/252:78-91.