

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.06.011

CSTR:32310.14.stbcb.2025.06.011

陆钰,刘之葵,罗玉兰,等.生物炭结合藓类植物对土壤稳定性的影响[J].水土保持学报,2025,39(6):247-255.

LU Yu, LIU Zhikui, LUO Yulan, et al. Influence of biochar combined with moss plants on soil stability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):247-255.

## 生物炭结合藓类植物对土壤稳定性的影响

陆钰<sup>1</sup>, 刘之葵<sup>1,2</sup>, 罗玉兰<sup>1</sup>, 张恺熙<sup>1</sup>, 蒋明婕<sup>1</sup>, 贾晓晨<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学土木工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** [目的] 生物炭作为土壤改良剂可增大土壤孔隙结构, 提高土壤肥沃程度, 改良土壤酸碱平衡度。[方法] 利用玉米秸秆生物炭改良剂对石漠化区土壤进行物理改良(生物炭施入量设置为0、5%和10%), 并在生物炭改良土中采用碎皮法接种本土优势藓(高接种量为1 200 g/m<sup>2</sup>, 低接种量为600 g/m<sup>2</sup>), 进行直剪试验及酸碱度测量, 通过Spearman相关性分析藓种类、生物炭施入量及藓接种量三者的耦合关系, 探究生物炭和藓在石漠化土壤上的改良效果。[结果] 1) 生物炭施入量及藓接种量会影响植物生长, 5%生物炭施入量下的真藓株密度可达137株/cm<sup>2</sup>, 高于同条件下毛口藓10.48%。2) 藓接种量及生物炭施入量对红黏土的酸碱平衡具有调节作用, 其中10%的生物炭施入量叠加高接种量真藓土壤pH可达6.98。3) 不同施入量生物炭及藓种类对石漠化土壤抗剪强度影响差异显著, 其中5%的生物炭施入量叠加高接种量毛口藓(*Trichostomum brachydontium*)黏聚力可高达82.78 kPa, 其次为含有10%生物炭的红黏土上播种高接种量真藓(*Bryum argenteum*), 黏聚力为81.81 kPa。4) 生物炭与藓类植物结合时, 毛口藓与生物炭施入量的Spearman相关性优于真藓(毛口藓 $D=0.79$ ), 5%的生物炭施入量叠加接种量为1 200 g/m<sup>2</sup>的毛口藓改良效果最佳, 10%的生物炭施入量叠加接种量为1 200 g/m<sup>2</sup>的真藓次之。[结论] 基于生物炭改良红黏土的藓固土试验结果显著, 石漠化土壤得到有效改善。

**关键词:** 石漠化; 生物炭; 苔藓植物; 改良土; 优势物种

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0247-09

## Influence of Biochar Combined with Moss Plants on Soil Stability

LU Yu<sup>1</sup>, LIU Zhikui<sup>1,2</sup>, LUO Yulan<sup>1</sup>, ZHANG Kaixi<sup>1</sup>, JIANG Mingjie<sup>1</sup>, JIA Xiaochen<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** [Objective] As a soil amendment, biochar can increase soil pore structure, improve soil fertility, and optimize soil pH balance. [Methods] Biochar derived from corn stalks was used as a soil amendment to improve the physical properties of soil in rocky desertification areas (with biochar application rates set at 0, 5%, and 10%). Native dominant moss species were inoculated in the biochar-amended soil using the fragmentation method (with high inoculation amount of 1 200 g/m<sup>2</sup> and low inoculation amount of 600 g/m<sup>2</sup>). Direct shear tests and pH measurements were performed. Spearman correlation analysis was used to explore the coupling relationship among moss species, biochar application rate, and moss inoculation amount, in order to investigate the improvement effects of biochar and moss on rocky desertification soil. [Results] 1) Both biochar application rate and moss inoculation amount influenced plant growth. At a biochar application rate of 5%, *Bryum argenteum* achieved a density of 137 plants/cm<sup>2</sup>, which was 10.48% higher than that of *Trichostomum brachydontium* under the same conditions. 2) Moss inoculation amount and biochar application rate regulated the pH balance of red clay soil. When a biochar application rate of 10% combined with a high inoculation amount of *Bryum argenteum*, the soil

收稿日期: 2025-04-18

修回日期: 2025-05-23

录用日期: 2025-06-11

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(41867039); 广西岩土力学与工程重点实验室项目(桂科能20-Y-XT-03); 南方石山地区矿山地质环境修复工程技术创新中心项目(CXZX12020002)

第一作者: 陆钰(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: 1020230773@glut.edu.cn

通信作者: 刘之葵(1968—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: liuzhikui@126.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

pH reached 6.98. 3) Different biochar application rates and moss species significantly influenced the shear strength of rocky desertification soil. Among them, the combination of 5% biochar application rate and high inoculation amount of *Trichostomum brachydontium* achieved the highest soil cohesion, reaching 82.78 kPa. Following this, 10% biochar application rate combined with high inoculation amount of *Bryum argenteum* on red clay soil achieved a cohesion of 81.81 kPa. 4) When biochar was combined with moss plants, the Spearman correlation between *Trichostomum brachydontium* and biochar application rate was stronger than that of *Bryum argenteum* (*Trichostomum brachydontium*  $D=0.79$ ). The optimal improvement effect was achieved by 5% biochar application rate with 1 200 g/m<sup>2</sup> *Trichostomum brachydontium*, followed by 10% biochar with 1 200 g/m<sup>2</sup> *Bryum argenteum*. [Conclusion] The moss-based soil stabilization experiments using biochar-amended red clay yield significant results, effectively improving the condition of rocky desertification soils.

**Keywords:** rocky desertification; biochar; moss plants; amended soil; dominant species

Received: 2025-04-18

Revised: 2025-05-23

Accepted: 2025-06-11

Online(www.cnki.net): 2025-07-28

石漠化作为一种特殊的土地退化类型,对区域生态系统有巨大影响<sup>[1]</sup>。该区域的植被种类稀少,土壤受到严重的风雨侵蚀有明显的岩石裸露迹象<sup>[2]</sup>。脆弱的生态系统制约着当地的社会与经济发展,叠加人类不合理的开采与利用,石漠化水土流失的问题日益严重<sup>[3]</sup>。严重的石漠化甚至对当地的水文地质条件及生态系统造成恶劣影响,为洪涝灾害及边坡失稳等地质灾害提供破坏条件<sup>[4]</sup>。中国西南地区喀斯特水土流失严重,植被覆盖率低,岩石裸露率较高,因此二者成为评价石漠化生态指标的关键<sup>[5]</sup>。当地独特的碳酸盐岩溶于渗透进入岩石的水通常呈微酸性<sup>[6]</sup>,改善土壤理化性能是石漠化治理的一部分,通过添加生物炭,物理改良土壤,对石漠化地区土壤进行有效治理。

生物炭密度低,比表面积较高,作为改良剂引起土壤孔隙大小的变化<sup>[7]</sup>。生物炭的加入可以改变土壤结构,增加土壤孔隙度的同时降低体积质量,改善土壤团聚体的分布,近年来作为土壤改良剂被广泛运用<sup>[8-9]</sup>。除可以有效改变土壤的理化性能及力学性质,还进一步提高团聚体的稳定性<sup>[10]</sup>,已有研究<sup>[11]</sup>表明,多孔物质可以有效提高土壤的持水能力,改善水力参数,对提高作物的产量有显著作用。在沙质土壤上的应用表明,生物炭的施用比例与水文物理性质的改变有很大关系<sup>[12]</sup>。已有研究<sup>[13-15]</sup>表明,通过生物炭的介入,可以有效提高土壤的肥沃程度,进一步提高植物的生长能力,缓解石漠化植被稀少的问题。在不同土体结构中生物炭的作用也不一样,在富铝土中掺入生物炭可减少水土流失<sup>[16]</sup>。掺入生物炭的硅砂,可增加土体的孔隙体积,进一步提高土壤保水性<sup>[17]</sup>。但现有研究多开展在沙质土、富铝土及硅砂上,针对桂北红黏土施入生物炭后土壤理化性质的

研究较少,已有生物炭在红黏土上的研究也只是针对土壤饱和持水量进行统计,土壤酸碱度及抗剪强度没有详细观测。由于生物炭对植物的影响为有利因素,其应用也延伸到地球环境工程中,尤其是有植被覆盖的边坡生物工程<sup>[18]</sup>。已有研究<sup>[19]</sup>证明,有植被的生物炭改良花岗岩土壤具有更强的进气值,可提高斜坡的持水能力。但多数研究利用的维管植物在桂北石漠化区难以存活,不能因地制宜,非维管植物的存活能力较强,针对藓类植物在桂北地区的研究甚少。苔藓植物作为最低等的高等植物,将其与生物炭共同作用于石漠化土壤,探讨二者协同作用对土壤理化性质的改良效果。

生物土壤结皮是由细菌、真菌及苔藓等结合形成的一种复合物<sup>[20]</sup>。苔藓作为生态修复的先锋植物,被广泛应用于水土流失的修复,其简单的结构及微小的形态,在喀斯特石漠化区也能大面积覆盖<sup>[21]</sup>。苔藓作为非维管植物,在恶劣环境中也能先于维管植物生长<sup>[22]</sup>。作为生物结皮的后期,苔藓结皮改善土壤结构,增强土壤蓄水能力,使得生态环境中的物种丰富度进一步提高,促进微生物活动<sup>[23]</sup>。在喀斯特区域的治理中,苔藓改善土壤结构,影响养分循环,有利于保持地表稳定性,为恶劣环境地区植被繁衍提供重要基础<sup>[24]</sup>。此外,有藓覆盖的土壤水分蒸发比非藓覆盖的林地更加稳定<sup>[25]</sup>。当前藓结皮在生态修复与水土保持领域的研究空间分布存在显著区域失衡,上述苔藓结皮的生态修复、水土保持方面的研究工作大多开展在贵州、云南等地,针对桂北石漠化地区藓类植物的试验仍属空白,解析不同岩溶地貌背景下藓类植物对土壤的响应机制尤为重要。

目前对生物炭改良的研究,多集中在改善农田土壤的理化性质及促进维管植物的生长方面,针对

桂北典型石漠化地区红黏土上非维管植物的研究甚少。本文旨在探讨生物炭改良及其与本土优势藓的协同修复效应,通过碎皮法在生物炭改良后的石漠化土壤基质中接种苔藓结皮,探究藓类植物-生物炭复合体系对土壤抗剪强度的影响及对土体理化性能的改变,同时观察藓类植株在改良基质中的生长情况,兼顾力学性能与可持续植被恢复,多维度综合评价修复效果。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究所用土取自广西壮族自治区恭城县,恭城瑶族自治县是我国典型的岩溶石漠化地区之一,位于广西壮族自治区东北部,地理坐标为 $24^{\circ}37'15''\sim 25^{\circ}17'00''\text{N}$ , $110^{\circ}36'05''\sim 111^{\circ}10'18''\text{E}$ 。恭城县气候属中亚热带季风气候,年平均日照时间 $1\,413.7\text{ h}$ ,年平均气温 $20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年降水量 $1\,453.1\text{ mm}$ ,年平均相对湿度 $74\%$ ,恭城县裸露碳酸盐岩面积 $490.02\text{ km}^2$ ,占该县土地面积的 $22.47\%$ <sup>[26]</sup>。

### 1.2 供试材料

石漠化主要发生在灰岩区和白云岩与灰岩互层区,其面积分别占恭城县石漠化总面积的 $71.42\%\sim 75.85\%$ 和 $16.96\%\sim 21.86\%$ ,其余岩性区发生石漠化的面积 $<12\text{ km}^2$ 。恭城县石漠化在空间上呈现由北向南发展的格局,其中西岭镇的石漠化最为严重,其次为莲花镇和平安镇。所用藓为真藓(*Bryum argenteum*)和毛口藓(*Trichostomum brachydontium*),采集于恭城西岭镇大岭山,基岩主要以石灰岩为主,土质呈黏性,土壤类型主要是由第四纪石灰岩发育而成的红色或红褐色红黏土。采集地内典型生境类型主要有裸岩、草地、灌丛,苔藓植物共有5科,分别是丛藓科、珠藓科、绢藓科、真藓科、灰藓科。原始藓覆盖度平均为 $450\text{ g/m}^2$ 。所用红黏土为原始藓类植物生长体系的底层基质,土壤天然含水率为 $28.6\%$ ,体积分数为 $1.66\text{ g/cm}^3$ ,液塑限分别为 $68.2\%$ 和 $35.8\%$ ,最大干密度为 $1.51\text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为 $28.6\%$ ,有机质质量分数为 $8.72\text{ g/kg}$ ,全氮磷钾质量分数分别为 $1.13$ 、 $0.19$ 、 $11.00\text{ g/kg}$ ,有效氮磷钾质量分数分别为 $0.040$ 、 $0.003$ 、 $0.160\text{ g/kg}$ 。

### 1.3 试验设计

在模拟室外的环境下进行平行对照试验,2种藓类植物(毛口藓,真藓) $\times$ 3种藓接种量( $0$ 、 $600$ 、 $1\,200\text{ g/m}^2$ ) $\times$ 3种生物炭施入量( $0$ 、 $5\%$ 、 $10\%$ )。试验装置为长 $30\text{ cm}$ 、宽 $21\text{ cm}$ 、高 $5\text{ cm}$ 的浅盘,生物炭种类为玉米秸秆生物炭,与红黏土进行机械混合搅拌。碎皮法接种是指通过机械破碎将成熟藓植

株切割为微小碎片,在生物炭改良后的石漠化土壤表面,利用其顶端分生组织重新分化形成新植株。藓接种量分别为不覆盖组、低接种量组和高接种量组,高接种量组为 $1\,200\text{ g/m}^2$ ,即先在浅盘中均匀铺设 $1\,500\text{ g}$ 土壤,随后在表层均匀铺撒约 $75.6\text{ g}$ 藓结皮,低接种量组为 $600\text{ g/m}^2$ ,操作方法同上,藓结皮为 $37.8\text{ g}$ ,包括真藓和毛口藓2种生物结皮,空白对照组为不添加生物炭且无苔藓覆盖组。接种后放置于 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中,由于藓碎皮组织较为脆弱,前期( $0\sim 30\text{ d}$ )每日 $10:00$ 和 $20:00$ 进行人工雾喷灌溉 $500\text{ mL}$ ,雨天不浇水并进行避雨处理。后期( $30\sim 60\text{ d}$ )使用定时灌溉装置,每天补水3次,每次间隔 $8\text{ h}$ ,每次时长 $3\text{ min}$ ,并设置雨天不浇水,使用雾化喷头浇水,确保各培养皿浇水量基本一致。藓接种后分别在第 $15$ 、 $30$ 、 $45$ 、 $60\text{ d}$ 进行株密度的测量。株密度测量采用半径为 $1\text{ cm}$ 圆环,每盆随机取10次计算均值。利用单位面积株密度衡量植物生长指数。在藓培育完全成熟后,将其制成环刀试样块进行抗剪强度测试。

### 1.4 直剪强度与酸碱度测定

各指标的测量均按照规范进行。用电位法测定土壤的pH。直剪试验仪器采用的是南京土壤仪器厂生产的ZJ型应变控制式四联直剪仪,取培养皿中的原状土,每组需4个环刀试样,分别施加 $100$ 、 $200$ 、 $300$ 、 $400\text{ kPa}$ 垂直压力,测定每组红黏土的 $c$ 、 $\varphi$ 值,对比二者对红黏土黏聚力的影响,分析强度指标变化原因。根据《土工试验方法标准》<sup>[27]</sup>,取应变位移为 $6\text{ mm}$ 作为试验结束指标,剪切速率均采用 $0.8\text{ mm/min}$ 。环刀试块的直径为 $61.8\text{ mm}$ 、高度为 $20\text{ mm}$ 。试验数据需符合摩尔库伦准则:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: $c$ 为有效土壤内聚力, $\text{kPa}$ ; $\sigma$ 为垂直于斜面的有效应力, $\text{kPa}$ ; $\varphi$ 为剪切阻力内摩擦角, $(^{\circ})$ 。

### 1.5 数据分析

数据分析均在Matlab软件中运行,在Origin 2024软件中完成作图。针对黏聚力计算2种苔藓的接种量及生物炭掺入量的斯皮尔曼相关性系数(Spearman),定量分析生物炭掺量、苔藓接种量和红黏土黏聚力之间的关系,并且计算其耦合协调度。斯皮尔曼等级相关系数用来估计2个变量之间的相关性,为 $[-1, +1]$ ,计算公式为:

$$\gamma_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

式中: $d_i$ 为2个变量之间的等级差。

耦合协调度作为衡量系统间相互依存和协调发展水平的综合指标,其分析结果对于理解系统间地至关重要。不同系统间耦合度、协调指数及耦合协调度的显著差异,反映各自所处的协调等级与协调程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 藓类植物生长指数情况

植株体的生长指数可作为表征生物炭改良土壤理化性能的重要生物指示器,多维度解析生物炭介入的“土壤结构-养分循环-植物生长”协同调控机制。由图 1 可知,通过藓类植物生长的 15、30、45、60 d 的株密度的测量观察发现,毛口藓的生长指数不及真藓,毛口藓 15~30 d 快速生长,30~45 d 稳步生长,45~60 d 缓慢生长;真藓 15~30 d 快速生长,30~45 d 缓慢生长,45~60 d 中速生长。高接种

量毛口藓发育成熟后株密度可达到 124 株/cm<sup>2</sup>,比低接种量高出 19.23%。真藓由于其分支较为发达,可以较好地锚固土壤颗粒,充分吸收土壤中的养分及水分,又因为生物炭的施入使得土壤蓄水能力加强,较大的表面粗糙度,提高苔藓根状体在土颗粒间的锚固性能,因此,其株密度优于毛口藓,5% 生物炭施入量叠加高接种量,成熟后株密度可达 137 株/cm<sup>2</sup>,高于最优生长配置的毛口藓 10.48%。以真藓为例,5% 的生物炭施入量生长指数为最佳,10% 的施入量次之,过量生物炭会与藓类植物竞争土壤中的养分。毛口藓跟 10% 的生物炭掺入量耦合度较高,其形状较为短小,分支结构不及真藓发达,生长时匍匐在土壤表层,较多的生物炭可以提高土壤蓄水能力,即使在喷淋系统关闭时,也可以汲取土壤中大量的水分。2 种藓类株密度均随接种量的提高而增大。

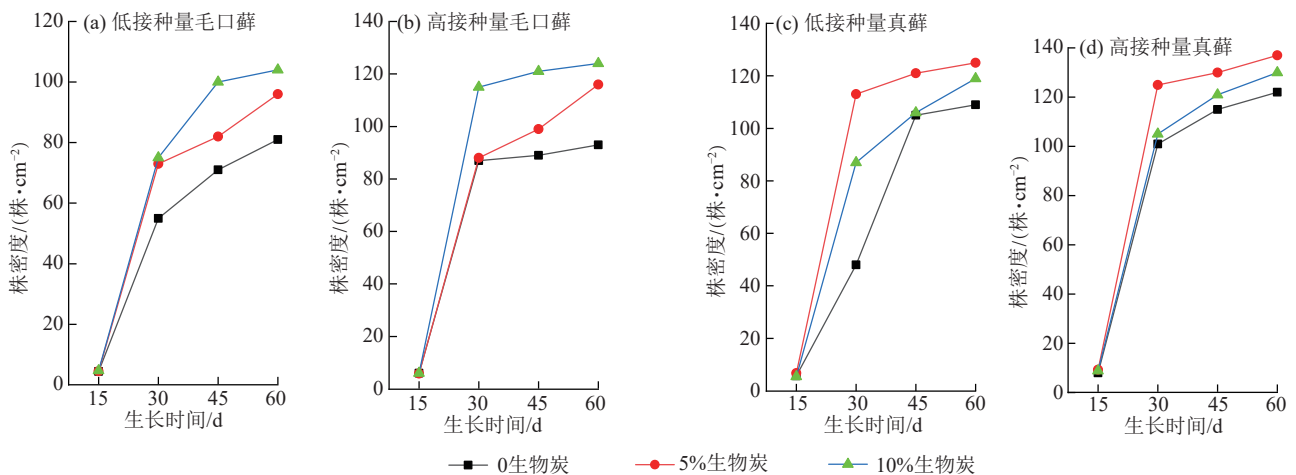


图 1 藓类植物株密度生长指标

Fig. 1 Growth indicators of moss plant density

### 2.2 藓类植物及生物炭对土壤 pH 影响

藓类植物的生长过程能够增加土壤中的有机质含量,有机质可以改善土壤的 pH,同时生物炭可以调节土壤的 pH。同时施入生物炭与藓类植物,土壤酸碱度的变化较为微妙。由表 1 可知,空白对照组红黏土 pH 为 5.3,根据测得数据发现,无生物炭施入时,高接种量毛口藓下土壤 pH 显著提高,最大为 5.88,5% 生物炭施入时,高接种量真藓对提高土壤酸碱度有明显作用。当施入量提高到 10% 时,pH 可提高至 7.0。可以发现,适合植物生长理想基质的 pH 在 6.0~7.5。初始为酸性的红黏土,通过藓类植物和生物炭的不同组合,展现出显著的酸碱度变化,揭示二者在土壤改良中的互补效应。

表 1 生物炭施入量及藓接种量对土壤 pH 的影响

Table 1 Effects of biochar application rate and moss inoculation amount on soil pH

生物炭施入量/%	无藓类植物	低接种量毛口藓	高接种量毛口藓	低接种量真藓	高接种量真藓
0	5.26	5.45	5.88	5.58	5.78
5	5.86	6.05	6.23	6.28	6.53
10	6.48	6.63	6.78	6.80	6.98

### 2.3 生物炭及藓类植物对红黏土抗剪强度的影响

由图 2 可知,毛口藓与真藓下土壤的抗剪强度趋势及受生物炭影响的敏感性完全不同。生长毛口藓的红黏土黏聚力随着藓接种量的增大呈上升趋势,随着生物炭施入量的增加呈先增大后减小趋势。生物炭施入量为 10% 的土壤黏聚力反而低于 5% 的施入量,尤其是叠加高接种量组,黏聚力高达 82.78 kPa,较之无生物炭且无藓覆盖的空白对照组的黏聚力为

46.20 kPa,提高 44.2%。造成该现象的原因是适量的生物炭可填充土壤间的孔隙,改善土壤的通气性和排水性,减少土壤团聚体的水稳性,因此施入生物炭可以提高黏聚力。施入过多时,生物炭的高度多孔性可能导致土颗粒之间的相互作用减弱,从而降低土壤的黏聚力,因此,过量的生物炭会改变土壤的水分保持能力,降低预期的黏聚力值,但是较之空白对照组土壤黏聚力提高 34.4%。真藓下土壤的黏聚力随着生物炭的施入量及藓接种量逐渐增大,最高为 81.81 kPa。可见,不同的藓种类也影响改良效果。

由图 3 可知,内摩擦角的变化相对黏聚力较为复杂。就毛口藓而言,当生物炭施入量为 5% 时,叠加低接种量藓可以提高土壤内摩擦角,但高接种量藓组的内摩擦角反而大大降低,因为高接种量藓的蓄水能力较强,在土体内部达到近饱和状态,在等量喷洒过程中,该组的土样含水率较大,减少土颗粒间的摩擦,土体结构趋于松散,因此,少炭多苔组内摩擦角呈减少趋势。但当生物炭施入量为 10% 时,土壤

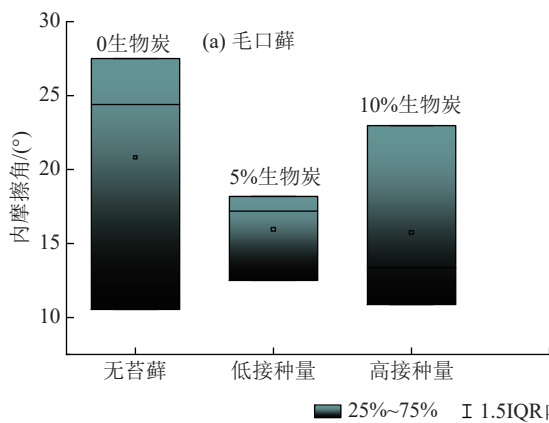


图 3 生物炭施入量及藓接种量对土壤内摩擦角的影响

Fig. 3 Effects of biochar application rate and moss inoculation amount on soil internal friction angle

针对不同生物炭施入量下不同接种量的差异进行独立样本 *T* 检验(表 2)。毛口藓在 0 生物炭掺量下,低接种量的土壤内摩擦角显著高于高接种量 ( $p < 0.001$ ),在 10% 生物炭施入量下,高接种量的土壤内摩擦角高于低接种量 ( $p = 0.010$ ),反映高生物炭施入量对高接种的促进作用。真藓与之不同,在 5% 生物炭施入量下,低接种量的内摩擦角略高于高接种量 ( $p = 0.027$ )。

2.4 藓接种量与生物炭施入量的黏聚力相关性

关于藓接种量与生物炭施入量的黏聚力数值,进行斯皮尔曼相关性分析。由图 4 可知,毛口藓与生物炭的施入量更加紧密相关,真藓由于自身具有更加良好的蓄水性及生长优势,即分支结构较为发达,导致生物炭施入量与真藓接种量对土壤黏聚力的相关性不大。而毛口藓植株体较小,需要生物炭多孔

内摩擦角随着藓接种量增大而提高。真藓与生物炭施入量对土体内摩擦角的改变较为复杂。经过分析对比,5% 生物炭掺入量叠加高接种量的毛口藓及 10% 生物炭掺入量叠加高接种量的真藓土壤抗剪强度较大。

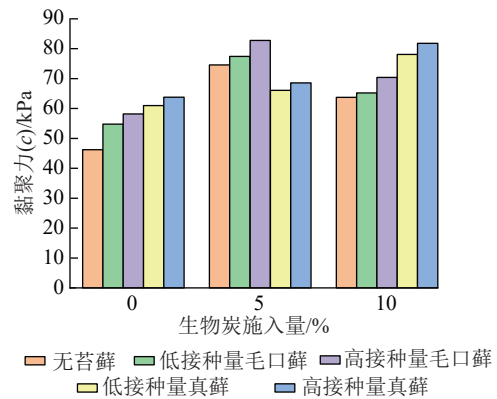
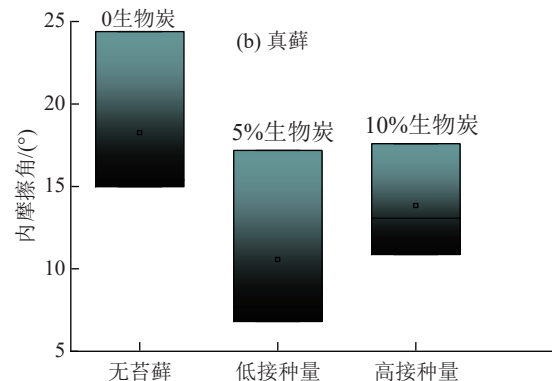


图 2 生物炭施入量及藓接种量对土壤黏聚力的影响

Fig. 2 Effects of biochar application rate and moss inoculation amount on soil cohesion



的特性贮藏水分,在外界不提供水分时,也能从土壤中汲取。

表 2 不同藓类植物下层土壤内摩擦角统计检验

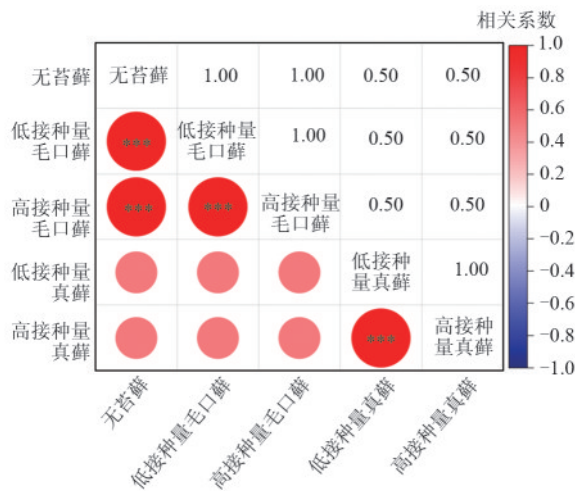
Table 2 Statistical test of internal friction angle in underlying soil with different moss species

藓类植物	生物炭施入量/%	低接种	高接种	<i>p</i>
毛口藓	0	28.25±1.04	10.16±0.56	<0.001
	5	17.75±0.61	13.29±1.11	0.038
	10	14.05±0.95	22.47±0.72	0.010
真藓	0	15.88±0.70	14.90±1.01	0.370
	5	7.81±0.14	6.64±0.23	0.027
	10	16.68±1.28	12.31±1.08	0.065

注:表中数据为平均值±标准差。

为进一步得出生物炭施入量与 2 种藓及各接种量关系,本文运用耦合协调度作为衡量二者相互依

存和协调发展水平的指标,其分析结果对于理解改良土壤黏聚力至关重要。由表3可知,高接种量毛口藓与生物炭施入量相互作用紧密,协调等级可达到8级,耦合协调度 $D$ 为0.794,相比无藓覆盖的耦合协调度 $D$ 提高0.601,能够较好地实现协调发展,是较为理想的发展模式,高接种量真藓次之,耦合协调度 $D$ 为0.731,也是较为理想的协调发展状况。低接种量毛口藓勉强协调,低接种量真藓濒临失调。高协调度说明生物炭的加入显著提升土壤持水性,促进藓生长,协同增强土壤黏聚力,表明此配比下各系统达到最优协同状态。低协调度可能因生物炭过量抑制藓生长,或藓接种密度不足,生物炭与黏土结合不充分,未能有效提升黏聚力,需要调整之间比例。



注: \*表示 $p \leq 0.05$ ; \*\*表示 $p \leq 0.01$ ; \*\*\*表示 $p \leq 0.001$ 。

图4 藓接种量与生物炭施入量的相关性

Fig. 4 Correlation between moss inoculation amount and biochar application rate

表3 生物炭施入量与不同藓种类及接种量的耦合协调度

Table 3 Coupling coordination degree between biochar application rate, different moss species, and inoculation amount

组别	耦合度	协调指数	耦合协调度	协调等级	协调程度
无藓类植物	0.210	0.177	0.193	2	严重失调
低接种量毛口藓	0.740	0.418	0.556	6	勉强协调
高接种量毛口藓	0.926	0.681	0.794	8	中级协调
低接种量真藓	0.344	0.544	0.433	5	濒临失调
高接种量真藓	0.751	0.712	0.731	8	中级协调

### 3 讨论

#### 3.1 藓类植物富集有机质与植物生长指数的相关性

通过加入生物炭可以提高土壤表层中的有机质,藓接种量越大,养分吸收越完全,富集的有机质含量显著增加,因此,生物炭的加入使得土壤的蓄水持水能力得到提高的同时,促进藓类植物的进一步生长,与其他研究<sup>[28]</sup>指出土壤有机质是影响土壤持

水能力的主要参数结果一致。藓生长指数最优的一组,即高接种量真藓与5%生物炭用量的组合使得株密度达到137株/cm<sup>2</sup>,有机质丰富度最高,土壤蓄水能力优于藓接种量低的组。因此,有机质与土壤含水量的相关系数显著,含有丰富有机质的土壤含水率较大,具有重要的水文意义<sup>[29]</sup>,对藓类植物的生长具有重要促进作用,对石漠化水土流失的治理具有重要价值。

#### 3.2 藓类植物及生物炭对土壤酸碱性的影响

本研究中,藓类植物与生物炭的协同作用对红黏土的pH调整发挥重要作用,表明该组合在改善土壤理化性质方面具有显著潜力。生物炭多为碱性或中性,可以缓和红黏土的弱酸性,添加适量的生物炭有利于植物的生长,其生长可以促进土壤微生物活动,已有研究<sup>[30]</sup>表明,生物炭可改善土壤酸碱度,促进菊芋生长,与本文中的藓类植物结果一致,丰富的微生物群落能够增加土壤产生的化合物种类。生物炭表面含有的Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>等阳离子,可与红黏土中的H<sup>+</sup>、Al<sup>3+</sup>进行离子交换,因此红黏土的pH随生物炭掺量的增加而增大。生物炭在与土壤微生物的相互作用下,产生有机酸(如醋酸、柠檬酸等),这些有机酸能够中和土壤中的酸性物质,提高土壤的pH,化学反应为:



R-COOH为有机酸,有机酸与氢氧根离子(OH<sup>-</sup>)反应,生成烃类有机物和水,继而提高土壤的碱性。除此以外,已有研究<sup>[31]</sup>表明,在锰矿废渣区域苔藓可以累积环境中的金属离子,苔藓通过富集重金属离子、促进微生物活动及释放钙镁等碱性阳离子影响土壤环境,其中阳离子的水解作用可显著提高土壤pH,主要反应为:



钙离子(Ca<sup>2+</sup>)与水反应,生成氢氧化钙[Ca(OH)<sub>2</sub>]并释放氢离子(H<sup>+</sup>),有助于提升土壤的碱性,这些改善使得苔藓和生物炭的组合在土壤改良中表现突出。

#### 3.3 生物炭及藓类植物对石漠化红黏土的力学性质影响

毛口藓与真藓在改良土体抗剪强度方面表现出不同的趋势和对生物炭影响的敏感性。对于毛口藓而言,土体黏聚力随着苔藓接种量的增加而增强,但生物炭的加入使得土壤黏聚力变化趋势较为复杂,适

量的生物炭(5%)提高土壤黏聚力,因为生物炭是一种富含有机碳的材料,能够提高土壤的有机质含量,增强土壤的黏聚力,它的孔隙结构能够增强土壤的粒径分布,形成更为稳定的土壤聚集体<sup>[32]</sup>。随着生物炭含量的增加,土壤颗粒排列变得更加均匀紧凑,孔隙数量减少,相邻的团聚体相互连接,形成更加完整的颗粒体系。然而过量(10%)生物炭反而降低,因为降雨时土壤含水率得到提高,水膜变厚,水削弱颗粒间的电学作用和直接接触,导致黏聚力减小。相反,真藓的黏聚力稳定地随着生物炭用量的增加而提高。在内摩擦角方面,毛口藓和真藓同样表现出不同,对于毛口藓,低接种量在5%生物炭掺量下提高了内摩擦角,而高接种量在10%生物炭掺量下表现更优。已有研究<sup>[33-34]</sup>表明,苔藓覆盖能通过改善土壤特性来提高土壤团聚体颗粒,团聚体颗粒越大内摩擦角越大,与毛口藓结果一致。真藓接种下土壤内摩擦角则随着生物炭掺量的增加呈减小趋势。

### 3.4 藓类植物及生物炭的耦合协调相关性

为进一步分析生物炭施入量与藓类植物之间的关系,研究采用耦合协调度作为衡量二者相互依存和协调发展水平的指标。这一分析方法为理解如何有效改善土壤理化性质提供重要的信息。根据耦合协调度( $D$ )为0.79可以得出,施入量为5%的生物炭叠加接种量为1 200 g/m<sup>2</sup>的毛口藓为改善效果最佳组合。高接种量毛口藓与生物炭掺量之间的相互作用较为紧密,能够实现良好的协调发展,是优化土壤条件的理想模式。已有开展在水稻田的相关研究<sup>[35]</sup>表明,秸秆炭可以有效改善土壤结构和养分状况,提高土壤酶活性并改善微生物群落结构,水稻与秸秆炭相互作用,促进水稻产量提高,与本研究结果一致。生物炭及藓类植物相互促进,生物炭提高土壤有机质含量,增加土壤蓄水能力,促进藓类植物生长,同时藓类植物提供物理屏障,减少生物炭流失,这种双向互利机制构建可持续的正反馈循环系统,揭示生物炭-苔藓复合体系在生态修复中独特的协同增效机制。尽管高接种量真藓表现出次优的协调发展状况,仍然是一种可行的改良土壤方法。这些结果为规划藓类植物与生物炭在土壤修复中的应用策略提供了科学依据。

## 4 结论

1) 培育成熟后,生长情况最佳组合为5%生物炭施入量下的真藓(株密度达137株/cm<sup>2</sup>),高于同条件下毛口藓10.48%,过量生物炭抑制其生长,接种量可

以提升株密度。

2) 藓类植物在一定程度上改善土壤的结构,提高土壤酸碱度,10%生物炭掺量叠加高接种量真藓效果最佳,土壤pH为6.98,较之无苔藓无生物炭组增加33%,使得石漠化区酸性红黏土得到改善,趋向于弱酸性或中性,以便于石漠化治理中其他维管植物的生长。

3) 生物炭的多孔性能够吸附和保持水分,增加土颗粒的黏结力,其相对粗糙的表面增加土壤颗粒间的摩擦力,有助于增强土壤颗粒的连接性,此变化有助于提高土壤的稳定性,从而增强土壤的剪切强度,尤其是5%生物炭掺量播种高接种量毛口藓黏聚力高达82.78 kPa。

4) 当生物炭与藓类植物结合时,生物炭辅助提高藓类植物的生长作用,5%的生物炭叠加接种量为1 200 g/m<sup>2</sup>的毛口藓效果及10%的生物炭叠加接种量为1 200 g/m<sup>2</sup>的真藓效果最佳,为后续藓类植物定殖创造稳定生态环境。

### 参考文献:

- [1] YUAN D X. Rock desertification in the subtropical karst of south China [Z]. *Geomorphology*, 1997, 108:81-90.
- [2] ZHANG M Y, WANG K L, LIU H Y, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of vegetation carbon sequestration in the karst area of northwest Guangxi, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6):5307-5317.
- [3] 田卓,张帅普,徐勤学.石漠化坡地不同整地措施下表层土壤水分空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4):335-345.  
TIAN Z, ZHANG S P, XU Q X. Spatial distribution characteristics of surface soil moisture content in the rocky desertification slope under different land preparation measures [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4):335-345.
- [4] GUTIÉRREZ F, PARISE M, DE WAELE J, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138:61-88.
- [5] XU E Q, ZHANG H Q, LI M X. Object-based mapping of karst rocky desertification using a support vector machine [J]. *Land Degradation and Development*, 2015, 26(2):158-167.
- [6] 胡芳,杜虎,曾馥平,等.典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(6):2170-2179.

- HU F, DU H, ZENG F P, et al. Dynamics of soil nutrient content and microbial diversity following vegetation restoration in a typical karst peak-cluster depression landscape[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 2170-2179.
- [7] 邹瑞晗, 吕德生, 王振华, 等. 非灌溉季节施加生物炭对滴灌棉田土壤结构及水热特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 220-227.
- ZOU R H, LÜ D S, WANG Z H, et al. Effects of biochar application during the non-irrigation season on soil structure and hydrothermal characteristics in drip irrigated cotton field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 220-227.
- [8] 赵迪, 黄爽, 黄介生. 生物炭对粉黏壤土水力参数及胀缩性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 136-143.
- ZHAO D, HUANG S, HUANG J S. Effects of biochar on hydraulic parameters and shrinkage-swelling rate of silty clay[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(17): 136-143.
- [9] 刘月芹, 马泉, 陈凤, 等. 生物炭基菌剂的制备及应用效果研究[J]. *西安工程大学学报*, 2025, 39(1): 26-32.
- LIU Y Q, MA Q, CHEN F, et al. Research on the preparation and application effect of biochar-based bacterial agent [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2025, 39(1): 26-32.
- [10] 唐行灿, 陈金林. 生物炭对土壤理化和微生物性质影响研究进展[J]. *生态科学*, 2018, 37(1): 192-199.
- TANG X C, CHEN J L. Review of effect of biochar on soil physico-chemical and microbial properties[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(1): 192-199.
- [11] 杨威, 屈忠义, 张如鑫, 等. 膜下滴灌制度与生物炭用量对玉米生长及水氮利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 313-322.
- YANG W, QU Z Y, ZHANG R X, et al. Effects of drip-irrigation schedule under film-mulching and biochar amount on corn growth and water-nitrogen use efficiency [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 313-322.
- [12] GŁĄB T, PALMOWSKA J, ZALESKI T, et al. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil [J]. *Geoderma*, 2016, 281: 11-20.
- [13] 杨晓智, 郭建华, 于凯川, 等.  $Pb^{2+}$  胁迫下生物炭对玉米种子萌发和幼苗早期生长的影响[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(33): 237-243.
- YANG X Z, GUO J H, YU K C, et al. Effect of biochar on seed germination and seedling growth of maize under  $Pb^{2+}$  stress [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(33): 237-243.
- [14] 武占省, 韩佳怡, 王建稳, 等. 溶磷菌 Rs-5 介导生物炭缓释磷肥磷素溶解与缓释效能调控机理[J]. *西安工程大学学报*, 2025, 39(5): 48-58.
- WU Z S, HAN J Y, WANG J W, et al. Mechanisms of phosphorus solubilization and slow-release efficacy of biochar slow-release phosphorus fertilizers mediated by phosphorus solubilizing bacterium Rs-5 [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2025, 39(5): 48-58.
- [15] 程才. 喀斯特石漠化地区苔藓结皮覆被土壤呼吸特征研究: 以贵州花江为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- CHENG C. Study on soil respiration characteristics of moss crust cover in karst rocky desertification area: A case study of Huajiang, Guizhou Province [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [16] DOAN T T, HENRY-DES-TUREAUX T, RUMPEL C, et al. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in northern Vietnam: A three year mesocosm experiment [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 147-154.
- [17] LIU Z L, DUGAN B, MASIELLO C A, et al. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties [J]. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0179079.
- [18] NG C W W, LIAO J X, BORDOLOI S. Relationship between matric suction and leaf indices of *Schefflera arboricola* in biochar amended soil [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, 59(2): 191-202.
- [19] NI J J, CHEN X W, NG C W W, et al. Effects of biochar on water retention and matric suction of vegetated soil [J]. *Géotechnique Letters*, 2018, 8(2): 124-129.
- [20] 李小娟, 张莉, 张紫萍, 等. 高寒草甸生物结皮发育特征及其对土壤水文过程的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 139-144.
- LI X J, ZHANG L, ZHANG Z P, et al. Characteristic of biological soil crust and its effects on hydrological processes in alpine meadow [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 139-144.
- [21] WEI C X, GUO B, FAN Y W, et al. The change pattern and its dominant driving factors of wetlands in the Yellow River Delta based on sentinel-2 images [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): e4388.
- [22] COWDEN P, HANNER R, COLLIS B, et al. Early successional changes in biological soil crust community assembly and nutrient capture in mining impacted landscapes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 175: e108841.
- [23] 童生春, 李国荣, 李进芳, 等. 土壤结皮对高寒草甸鼠丘土壤基本特征及水力侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 76-84.

- TONG S C, LI G R, LI J F, et al. Effects of soil crust on basic characteristics and water erosion of zokor mound soil in alpine meadow [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 76-84.
- [24] KAKEH J, GORJI M, SOHRABI M, et al. Effects of biological soil crusts on some physicochemical characteristics of rangeland soils of Alagol, Turkmen Sahra, NE Iran [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 181: 152-159.
- [25] 刘兴明, 刘贤德, 车宗玺, 等. 祁连山青海云杉林区苔藓层对流域水文的影响 [J]. *干旱区地理*, 2010, 33(6): 962-967.
- LIU X M, LIU X D, CHE Z X, et al. Eco-hydrological functions of the moss layer in *Picea crassifolia* forest of Qilian Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(6): 962-967.
- [26] 涂纯, 罗为群, 蒋忠诚, 等. 可持续发展实验区石漠化时空演变及其驱动机制研究: 以广西恭城县为例 [J]. *中国岩溶*, 2024, 43(1): 114-125.
- TU C, LUO W Q, JIANG Z C, et al. Study on spatio-temporal evolution of rocky desertification in the pilot zone for sustainable development: A case study of Gongcheng County [J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(1): 114-125.
- [27] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for geotechnical test methods: GB/T 50123[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [28] 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.
- [29] 陈伯洲, 胡建华, 吴威, 等. 白龙江流域不同植被类型修复模式下土壤理化性质与边坡稳定性 [J]. *山地学报*, 2024, 42(2): 260-277
- CHEN B Z, HU J H, WU W, et al. Physicochemical properties of soil under restoration of different vegetation types and resulting slope stability in the Bailong River basin, China [J]. *Mountain Research*, 2024, 42(2): 260-277.
- [30] 马凯, 饶良懿. 盐胁迫下菊芋生长和生理指标对生物炭的响应 [J]. *草业科学*, 2023, 40(11): 2879-2888.
- MA K, RAO L Y. Response of growth and physiological indexes of *Helianthus tuberosus* to biochar under salt stress [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(11): 2879-2888.
- [31] 任军. 锰矿废渣-苔藓植物-水系统中重金属生物地球化学特性及影响机制 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- REN J. Biogeochemical characteristics and influencing mechanism of heavy metals in manganese ore residue-bryophytes-water system [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [32] EBEL B A. Wildfire impacts on soil-water retention in the Colorado front range, United States [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(12): e W12515.
- [33] YANG F, ZHANG G L, YANG J L, et al. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3086-3093.
- [34] 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 H N, WANG B, ZHANG B Q, 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.
- [35] 党洪阳, 庄海峰, 赵宇飞, 等. 秸秆炭基肥料对水稻土壤质量与养分利用及微生物群落的作用 [J]. *中国稻米*, 2025, 31(3): 37-45.
- DANG H Y, ZHUANG H F, ZHAO Y F, et al. Effects of straw biochar-based fertilizers on soil quality, nutrient utilization and microbial community in paddy soils [J]. *China Rice*, 2025, 31(3): 37-45.
- (上接第246页)
- [22] PU L, HU K H, WANG J D. Pore pressure evolution and entrainment mechanism of convex unsaturated colluvial beds with divergent compositions under debris flow overriding [J/OL]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.03.040>
- [23] SONG P, YANG J, CHOI C E, et al. Experimental investigation on scouring vs mass failure of unsaturated soil bed: Implications for debris flow initiation and erosion [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2024, 129(4): e2023JF007275.
- [24] LIM H S. Open gully flow friction factor: Logarithmic law [J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 34(1): 229-237.
- [25] 王兴奎. 河流动力学基础 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- WANG X K. Fundamentals of river dynamics [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2002.