



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405604

引用格式:黄能胜,谢永雄,刘之葵,等.苔藓植物在桂北石漠化地区生态修复中的培育[J].科学技术与工程,2025,25(15):6561-6569.

Huang Nengsheng, Xie Yongxiong, Liu Zhikui, et al. Cultivation of bryophytes in ecological restoration of rocky desertification areas in northern Guangxi[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6561-6569.

环境科学、安全科学

苔藓植物在桂北石漠化地区生态修复中的培育

黄能胜¹, 谢永雄^{1,2*}, 刘之葵^{1,2}, 韦海霞¹, 陶国钰¹, 陆钰¹

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

摘要 桂北地区是中国最典型的岩溶地区之一,同时也是石漠化最严重的区域之一,开展石漠化地区生态修复研究具有重要的意义。以桂北地区的桂林市七星区屏风山苔藓实验研究区为研究对象,基于五点取样法筛选桂林屏风山 4 种典型生境的优势苔藓植物并开展了优势苔藓植物野外培育方法研究,揭示不同坡度处理对苔藓植物的生长变化规律,探索以苔藓植物应用于石漠化地区的生态修复创新方法,为桂北石漠化地区的生态修复提供科学理念和实验依据。遴选了湿地藓、扭口藓和近高山真藓为优势苔藓物种,为石漠化生态修复植物物种作参考。在野外培育试验中,考虑了坡度对苔藓的生长指标的影响,通过分析苔藓植物的覆盖度、株密度、株高度、苔藓结皮层厚度及结皮层干重的试验指标,综合考虑以扭口藓和近高山真藓作为石漠化地区岩面生态恢复的优势苔藓物种,能有效解决桂北石漠化地区大面积基岩裸露问题,提高喀斯特地区的生态效益。

关键词 石漠化;生态修复;苔藓植物;野外培育;优势物种

中图分类号 X171.4;

文献标志码 A

Cultivation of Bryophytes in Ecological Restoration of Rocky Desertification Areas in Northern Guangxi

HUANG Neng-sheng¹, XIE Yong-xiong^{1,2*}, LIU Zhi-kui^{1,2}, WEI Hai-xia¹, TAO Guo-zheng¹, LU Yu¹

(1. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541008, China)

[Abstract] The karst region in Northern Guangxi is one of the most typical and severely rocky desertification areas in China. Research on ecological restoration in this region is of significant importance. The study focused on the moss experimental research area in Pingfeng Mountain, Qixing District, Guilin City. The dominant moss species in four typical habitats were selected using the five-point sampling method. Field cultivation methods for these species were studied. Different slope treatments' effects on moss growth patterns were revealed. Mosses were explored as innovative methods for ecological restoration in rocky desertification areas. *Hyophila involuta*, *Barbula unguiculata*, and *Bryum paradoxum* were identified as dominant species, serving as references for ecological restoration in rocky desertification areas. In the field cultivation experiment, the effects of slope on moss growth indices were considered. The indices analyzed included moss coverage, plant density, plant height, moss crust thickness, and dry weight. *Barbula unguiculata* and *Bryum paradoxum* are considered as dominant moss species for ecological restoration of rocky surfaces in desertification areas. They effectively solve the problem of large bare rock surfaces in Northern Guangxi and improve the ecological benefits of karst areas.

[Keywords] stone desertification; ecological restoration; moss plants; field cultivation; rock slope

全球有 33% ~ 52% 的陆地位于干旱或半干旱地区,由于水资源缺乏,这些区域的地表植被覆盖率较低,裸露的地表易遭受外部侵蚀,导致荒漠化的频繁发生^[1]。石漠化是指在人类社会经济活动

及自然因素影响下,喀斯特地区的生态环境遭到破坏,导致水土流失、植被退化、岩石裸露、土地生产力下降,地表呈现荒漠化的演变过程^[2-6]。全球对喀斯特石漠化区域的研究和治理都十分重视^[7]。

收稿日期:2024-07-25 修订日期:2024-10-29

基金项目:国家自然科学基金(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:黄能胜(2000—),男,汉族,四川泸州人,硕士研究生。研究方向:环境岩土工程。E-mail:2120220743@glut.edu.cn。

* 通信作者:谢永雄(1978—),男,汉族,广东清远人,硕士,高级工程师。研究方向:环境岩土工程。E-mail:2001022@glut.edu.cn。

石漠化地区环境恶劣,生态修复植物应选择生物量大、抗逆性强、生长迅速和抗旱耐寒等适生植物^[8]。目前生态重建的修复物种,主要以草本、藤本、木本植物等为主,在桂北石漠化地区的生态修复效果并不理想,植物成活率低,面对极端天气极易返贫^[9]。桂林作为典型的喀斯特岩溶区,具有亚热带季风气候,苔藓植物在此环境下发育良好,具有很大的修复潜力,但尚未得到充分重视。利用苔藓植物进行植被恢复在桂北石漠化地区具有很高的研究价值。因此在石漠化地区开展优势苔藓植物野外勘察试验,筛选出更具环境耐受性的苔藓植物,对桂北地区石漠化生态修复理论研究有重要意义。

苔藓植物在生态系统中具有重要的调节功能。它们能在高寒、高温、干旱、弱光等极端条件下生长繁衍^[10-13]。苔藓植物在土壤结皮形成、防风固沙、水土保持、涵养水源及营养循环等方面具有独特的作用^[14-17]。苔藓植物强大的适应性使其能够减缓草本和木本植物初期生长时表层土壤的侵蚀,促进草本植物发芽和木本植物的生长,因此适合作为生态修复的先锋植物^[18]。此外,苔藓植物还具有较强的抗冲刷性和抗雨蚀性,增加边坡稳定性^[19-21]。这对于利用苔藓植物进行喀斯特石漠化生态修复研究至关重要。

目前对于苔藓植物的研究多集中在黄土高原和贵州喀斯特地区,而关于桂北地区苔藓植物的环境适应性及其在石漠化生态修复中的功能研究较少。以桂林七星区屏风山苔藓实验基地为例,通过筛选试验区的优势种苔藓植物,进行野外培育试验,分析苔藓植物在桂北石漠化地区生态修复中的可能性,为桂北石漠化地区的生态防护提供新的途径。

1 材料与试验方法

1.1 研究区概况

本研究区位于广西壮族自治区桂林市七星区屏风山实验区。桂林属亚热带季风气候区,四季分明,年平均气温 20 ℃ 左右,年平均降雨量 2 000 mm 以上,相对湿度 75% 以上,绝对湿度 18.0%。基岩主要以石灰岩为主,岩溶石山成土速度较慢,土质呈黏性,土壤类型主要是由第四世纪石灰岩发育而成的红色或红褐色红黏土。研究区内典型生境类型主要有裸岩、草地、灌丛、乔木林。

1.2 样品采集及优势苔藓物种的筛选

试验采用五点取样法,于 2023 年 5 月对桂林屏风山进行样地考察和样品采集,在考察区内选取裸岩、草地、灌丛、乔木林 4 种典型生境类型,每个生境类型下设置 1 个 4 m × 4 m 的样地,在每个样地内采用五点取样法取样并调查,布设 5 个 0.5 m × 0.5 m

的样方取样点。对样方内苔藓植物进行取样,装入标本袋中带回实验室,对苔藓植物样本,使用显微镜观察植株形态,对照《中国常见植物野外识别手册——苔藓册》和《中国苔藓志》进行苔藓种类进行初步鉴别,再把苔藓样品送到广西植物研究所进行专业鉴别。统计样方内每种苔藓出现的次数,标注采集时间、地点、坡度、坡向等数据,分别记录生物结皮的种类、生活型、基质、面积及株密度等指标,并进行苔藓植物重要值(bryophyte important value, BIV)评估。

1.3 优势种苔藓野外培育试验

野外培育试验点位于桂林屏风山山脚,使用小型电焊机焊接角铁(L 30 mm × 30 mm × 3 mm)成 9 个方框(尺寸为 300 mm × 300 mm)。随后建立野外培育网格,首先用水泥砂浆将网格框固定在石灰岩岩板上,设置三个不同坡度:0°(平面)、30°和 60°。因石质创面的最大坡度为 60°,达到了陡坡的标准。因此,为了使苔藓能够成功完成在石灰岩岩板上的接种,需加入一种辅助黏结剂,琼脂作为实验室组织培养常用的培育基质,其对植物生长的干扰很小,本试验加入琼脂作为黏结剂,辅助苔藓的附着生长。将琼脂和红黏土按 1:4 的比例搅拌均匀铺撒在石灰岩岩板,基质土厚度约为 2 mm。选取三种优势种苔藓进行野外培育试验,将野外采集到的苔藓结皮置于 70 ℃ 烘箱烘干 24 h 后取出,使用粉碎机粉碎成苔藓碎皮粉末组织。为保证苔藓粉均匀分布,分两次进行撒播。首先按苔藓碎皮粉 800 g/m² 的播撒量均匀撒播在培育网格内;待浇水固结后,进行二次撒播。按照 100 g/m² 撒播量撒在培育网格空缺处,以保证整体均匀。两次撒播后,苔藓碎皮粉末的厚度约为 2 mm。

浇水处理:试验前期(0 ~ 20 d),考虑到苔藓结皮黏结度低且易受雨水干扰,每日 8 点和 18 点进行人工雾喷灌溉 400 mL,雨天不浇水并进行避雨处理。试验后期(20 ~ 80 d),使用定时灌溉装置,每天补水 4 次,每次间隔 6 h,每次时长 3 min,并设置雨天不浇水。经测验,雾化喷头浇水量各网格基本一致,避免了因浇水量不同导致苔藓植物发育差异。

本试验主要实测指标为苔藓植物覆盖度、株密度、株高度、结皮层厚度及结皮层干重,对苔藓植物进行生长发育评价。生长数据采集每 20 d 进行一次。具体数据统计方法如下所示。

(1) 苔藓植物覆盖度。苔藓植物覆盖度是描述苔藓生长变化的重要参数,同时也是评价石漠化地区生态修复中植物修复效果的重要衡量指标。利用数码相机垂直拍摄苔藓照片,并借助 Python 语言

对数字照片进行 RGB-Lab 颜色空间转换处理。根据设定阈值,将图像分为苔藓区域和背景区域,生成二值图像。如图 1 所示,其中白色代表苔藓,黑色代表背景。最后对照采集图像对二值化结果进行人工对照复核,并计算苔藓与背景之间的像素值数量比值,完成所有采集图像覆盖率的统计。

(2) 苔藓植物株密度。用直径 2 cm 白色圆环在每个培育网格内随机框选 10 次,9 个培育网格共计 90 组数据,使用微距镜头记录图像数据。在计算机上统计图像数据,将各培育网格的 10 组数据取平均值,作为该组苔藓植物株密度。

(3) 苔藓植物株高度。苔藓植物株高度,使用圆锥尺测量苔藓植株高度,在培育网格内任意选取 10 株苔藓植株,重复测量 3 次,取其平均数作为苔藓植物株高度。

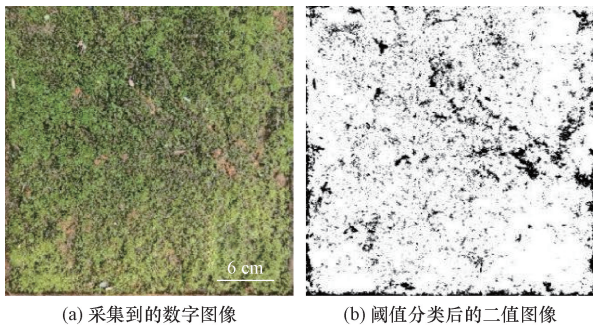


图 1 Lab 阈值分类示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Lab threshold classification

(4) 结皮层厚度。培育第 80 天,对培育网格进行五点取样选取 5 个点,取样前不浇水,保持土壤干燥,使用直径 1.5 cm 环形取样器取结皮层样品,使用电子游标卡尺随机测量结皮层厚度 3 次,每个培育网格总计 15 个数据,并取其平均值作为苔藓结皮成厚度。

(5) 结皮层干重。结皮层厚度测定结束后,将样品收集到纸质取样袋,用烘箱以 70 °C 高温烘干至恒重后称量,所测质量除以取样结皮层的面积即为结皮层干重。

2 结果与分析

2.1 优势种苔藓筛选

对各样方内采集的苔藓植物进行鉴种。该地区自然发育条件下,样方内苔藓植物共有 7 科,分别是丛藓科、珠藓科、绢藓科、真藓科、灰藓科、羽藓科、青藓科;共有 9 属,分别是湿地藓属、泽藓属、绢藓属、真藓属、灰藓属、扭口藓属、小羽藓属、青藓属、羽藓属;共有苔藓植物 9 种,分别为卷叶湿地藓 (*Hyophila involuta*)、直叶泽藓 (*Philonotis marchica*)、柱蒴绢藓 (*Entodon challengerii*)、近高山真藓 (*Bryum paradoxum*)、大灰藓 (*Hypnum plumaeforme*)、扭口藓 (*Barbula unguiculata*)、细叶小羽藓 (*Haplocladium microphyllum*)、密叶美喙藓 (*Eurhynchium savatieri*)、纤枝羽藓 (*Cyrto-hypnum bonianum*),各项指标如表 1 所示。

表 1 苔藓植物野外观测指标

Table 1 Field observation indicators of bryophytes

生境	坡向	坡度/(°)	苔藓种类	生活型	基质	频数	面积/cm ²	株密度/(株·cm ⁻²)
裸岩	21°东南	57.35	卷叶湿地藓	丛集型	岩生	3	1 327	82
			柱蒴绢藓	交织型	岩生	1	832	31
			近高山真藓	丛集型	岩面薄土生	2	645	98
			扭口藓	丛集型	岩面薄土生	3	1 831	67
			密叶美喙藓	交织型	岩生	1	1 128	35
草地	平台	11.35	卷叶湿地藓	丛集型	土生	2	2 139	94
			大灰藓	交织型	土生	3	1 932	24
			近高山真藓	丛集型	土生	2	933	110
			扭口藓	丛集型	土生	3	1 839	56
			细叶小羽藓	交织型	土生	2	932	32
			直叶泽藓	丛集型	土坡流水处	1	437	55
灌丛	42°西南	25.60	卷叶湿地藓	丛集型	岩生	3	2 731	89
			大灰藓	交织型	土生	2	1 247	27
			近高山真藓	丛集型	岩缝生	2	848	87
			扭口藓	丛集型	岩面薄土生	4	1 232	79
			细叶小羽藓	交织型	土生	2	1 349	28
乔木林	11°南	35.45	卷叶湿地藓	丛集型	岩生	4	2 213	76
			近高山真藓	丛集型	土生	3	982	91
			扭口藓	丛集型	土生	3	1 749	88
			密叶美喙藓	交织型	树基生	2	579	33
			纤枝羽藓	交织型	树基生	1	682	29

苔藓植物相对株密度 (relative density, RD)、相对盖度 (relative coverage, RC)、相对频度 (relative frequency, RF) 计算公式为

$$RD_i = \frac{PD_i}{\sum_{i=1}^n PD_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$RC_i = \frac{CA_i}{\sum_{i=1}^n CA_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$RF_i = \frac{FR_i}{\sum_{i=1}^n FR_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: PD_i 为样方内第 i 种苔藓植物的株密度; CA_i 为样方内第 i 种苔藓植物的覆盖面积; FR_i 为样方内第 i 种苔藓植物的出现频度; n 为所有样方中苔藓植物种类的数量。

综上所述,对样方内的苔藓植物,进行植物重要值计算,公式为

$$BIV = (\text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3 \quad (4)$$

依据上述公式,得出苔藓植物重要值相关计算结果,具体见表 2。

表 2 苔藓植物重要值计算数据

Table 2 Calculation data of important values of bryophytes

苔藓种类	相对密度/%	相对盖度/%	相对频度/%	重要值/%
卷叶湿地藓	26.01	30.49	25	27.17
直叶泽藓	4.20	1.58	2	2.59
柱蒴绢藓	2.36	3.02	2	2.46
近高山真藓	29.44	12.35	18	19.93
大灰藓	3.89	11.25	10	8.47
扭口藓	22.12	24.11	27	24.41
细叶小羽藓	4.58	8.27	8	6.95
密叶美喙藓	5.19	6.19	6	5.79
纤枝羽藓	2.21	2.47	2	2.23

如表 1 所示,桂林市七星区屏风山自然发育条件下,研究区内 4 种不同的典型生境类型中,苔藓植物有 7 科 9 属 9 种,苔藓植物重要值有明显的种间差异,其中,卷叶湿地藓和扭口藓相对盖度最大(分别为 30.49% 和 24.11%),并且生长状态良好,可见这两种苔藓植物在桂北石漠化地区不同生境中具有更强的适应性。

同时,近高山真藓、卷叶湿地藓和扭口藓相对密度最大(分别为 29.44%、26.01% 和 22.12%),且这三种苔藓植物都具有较高的相对盖度。从相对频度来看,扭口藓和卷叶湿地藓相对频度最大(分别为 27.00% 和 25.00%)。这两种苔藓植物具有较高的相对频度,表明对环境因子要求低,对石漠化地区的各类生境具有强适应性,而直叶泽藓、柱蒴绢

藓和纤枝羽藓相对频度最小(均为 2%),在四个不同生境的共计 25 个样方中仅出现 1 次,出现频率很低,其中柱蒴绢藓和纤枝羽藓这 2 种苔藓植物都生长在其他苔藓群落中,而直叶泽藓仅出现在靠近水源出口处,表明这三种苔藓植物对生境比较敏感,只有在特定的条件下才能够在此生长,不适宜作为该地区复绿种源。

如图 2 所示,苔藓植物重要值大小排列如下:卷叶湿地藓 > 扭口藓 > 近高山真藓 > 大灰藓 > 细叶小羽藓 > 密叶美喙藓 > 直叶泽藓 > 柱蒴绢藓 > 纤枝羽藓。其中,卷叶湿地藓、扭口藓和近高山真藓为桂林市七星区屏风山优势苔藓物种。

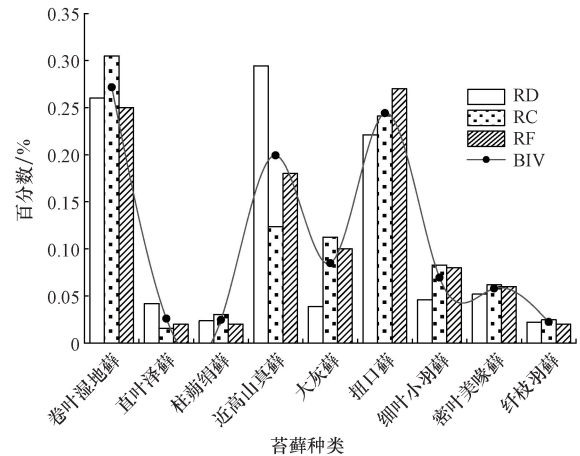


图 2 苔藓植物重要值数据图

Fig. 2 Important value data of bryophytes

2.2 苔藓覆盖度动态特征

在桂北石灰岩质边坡开展的苔藓植物生态修复试验中,坡度能够显著影响苔藓植物的覆盖度指标。三种苔藓在不同坡度培育下生长覆盖度的变化情况,如图 3 ~ 图 5 所示。

可以看出,三种苔藓在不同坡度下前 20 d 内均无明显覆盖,扭口藓和湿地藓在培育中期(40 ~ 60 d)覆盖度增速最高,分别为 60° 坡度下的扭口藓(增幅为 45.22%) 和卷叶湿地藓(增幅为 32.99%)。近高山真藓在培育前中期(20 ~ 40 d)覆盖度增速最高,为 60° 坡度时(增幅为 48.05%),这表明近高山真藓能在野外培育中达到快速扩繁的目的。

扭口藓和近高山真藓在各坡度下培育末期(培育时间第 80 天)其覆盖度基本能达到 90% 以上,仅平面近高山真藓覆盖度未能达到 90% (其覆盖度为 88.02%),而卷叶湿地藓在培育前期覆盖度增长较慢,且在培育末期覆盖度均未超过 80%,这表明卷叶湿地藓在野外样方取样时尽管拥有最高的植物重要值,但在野外人工培育试验中相较于其他两种高植物重要值的优势种苔藓其培育和扩繁效果相对

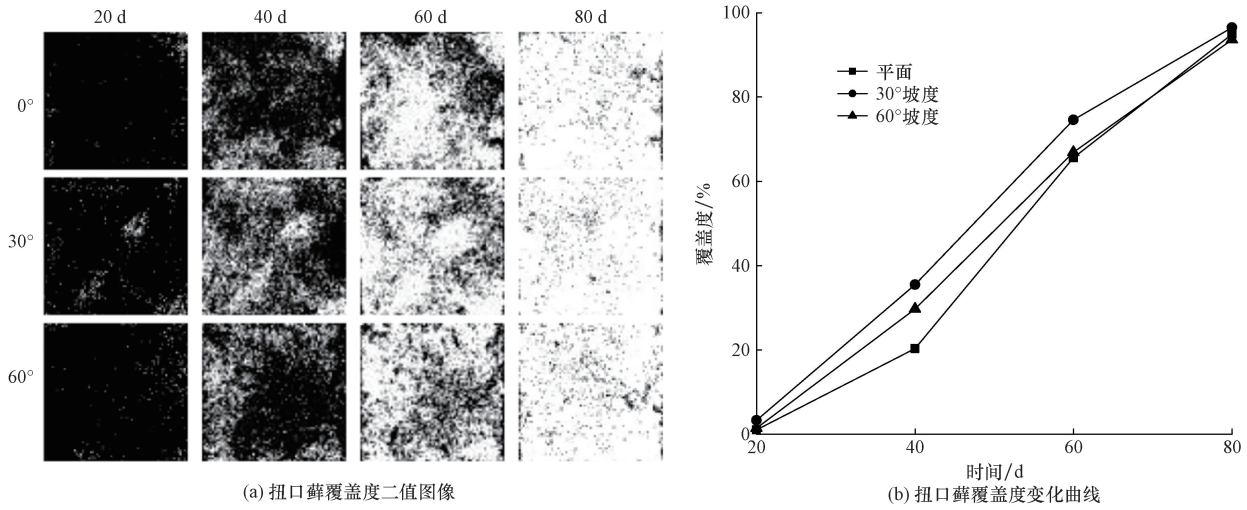


图3 扭口藓覆盖度随时间变化图

Fig. 3 Time dependent graph of moss coverage in *Barbula unguiculata*

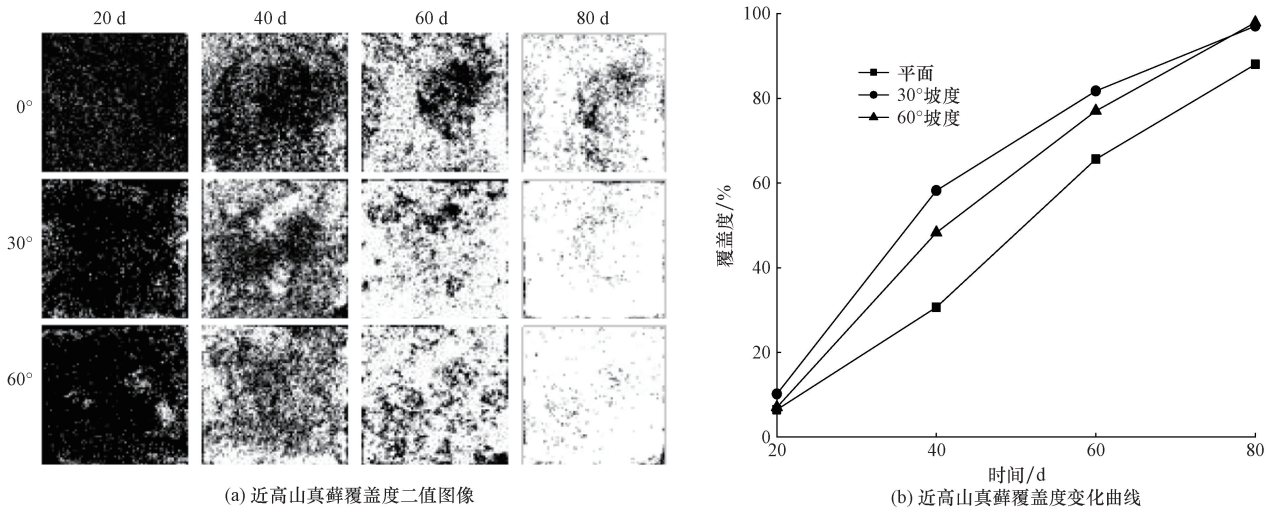


图4 近高山真藓覆盖度随时间变化图

Fig. 4 Time dependent graph of moss coverage in *Bryum paradoxum*

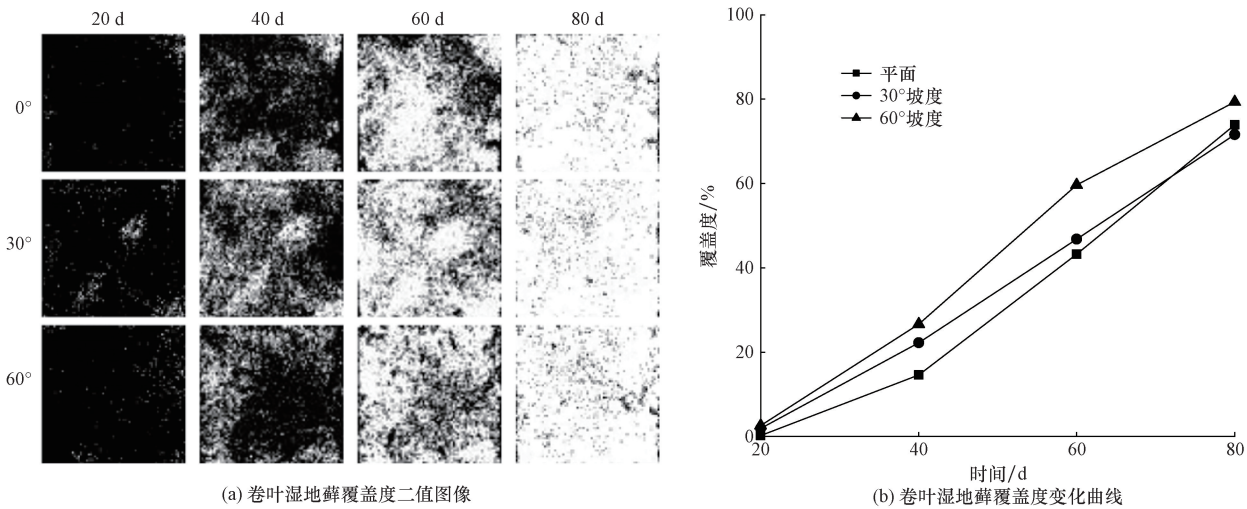


图5 卷叶湿地藓覆盖度随时间变化图

Fig. 5 Time dependent graph of moss coverage in *Hyophila involuta*

较低。对于人工培育环境较为敏感,对于生存环境要求相对较高,苔藓植物群落不稳定。

坡度对苔藓植物覆盖度指标的影响有显著影响,三种优势种苔藓在 30°坡度下的覆盖度动态指标均大于其他两种坡度处理,在培育前中期苔藓覆盖度差异度较为显著,在培育末期趋于接近。其苔藓覆盖度在坡度影响下的总体发育趋势为 30°坡 > 60°坡 > 平面。

2.3 苔藓株密度及株高度动态特征

苔藓植物株密度、株高度是衡量苔藓结皮发育的重要指标,一段时间内株密度增长越大,说明苔藓萌发速度越快,在区域环境下更具有优势性。苔藓结皮植株密度反映了苔藓茎叶的密度,过大可能会导致通风条件变差,使苔藓丛中间生长菌斑,以致苔藓死亡;而密度过小不利于结皮层的形成。如图 6~图 8 所示,3 种优势种苔藓在不同坡度处理下人工培育期间株密度随着时间变化的情况,可以清晰地看出所有的处理号中的生物结皮的株高度随着

时间的推移,呈现出线性上升的趋势,但不同试验组存在一定差异。试验发现三种优势种苔藓在培育初期(0~20 d)株密度增长缓慢,在第 20 d,近高山真藓在各坡度处理下株密度均达到了 13 株/cm²,其中株密度最大为 30°坡度处理(16 株/cm²),而扭口藓和卷叶湿地藓在各坡度处理下均未达到 10 株/cm²,其中扭口藓最大株密度(7 株/cm²)为 30°坡度处理;卷叶湿地藓最大株密度(3 株/cm²)也为 30°坡度处理,但远低于同培育时间内的近高山真藓。在培育前中期(20~40 d),三种苔藓在各坡度处理下株密度的增长较为缓慢。在培育中后期(40~60 d)三种苔藓开始快速发育,各处理下株密度快速增加。增幅最大为 30°坡度处理下的卷叶湿地藓(株密度为 55 株/cm²),虽然其增幅速率最快,但株密度仍不及相同坡度下的近高山真藓(87 株/cm²)和扭口藓(82 株/cm²)。在培育后期(60~80 d),除平面处理下,各苔藓在 30°坡度和 60°坡度处理下的株密度增长趋于平缓,培育第 80 天,30°坡度处理和 60°坡

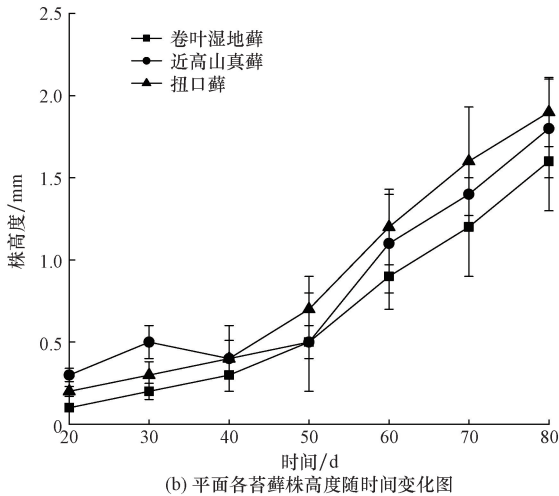
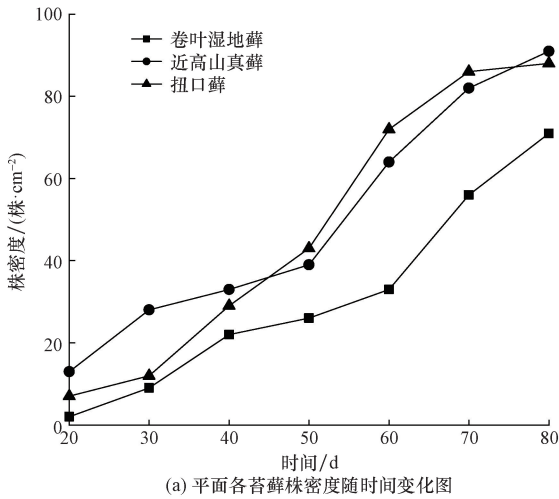


图 6 平面处理下苔藓植物性状变化
Fig. 6 Changes in bryophyte characteristics under planar treatment

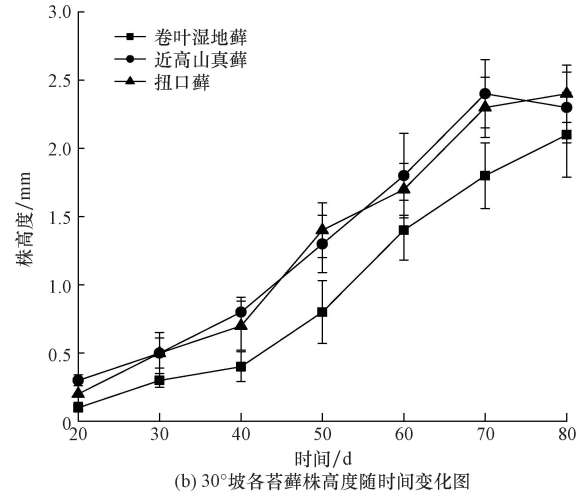
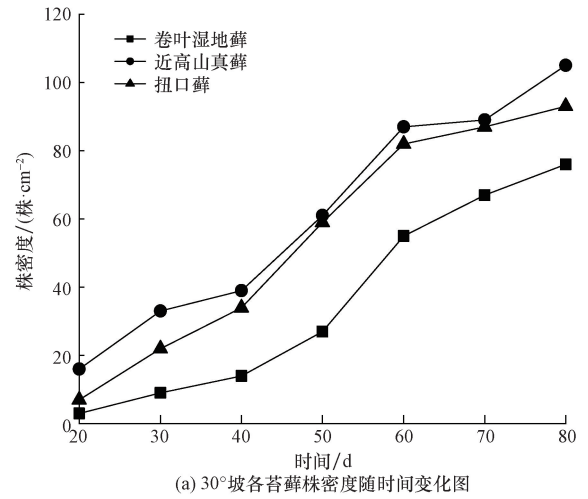


图 7 30°坡处理下苔藓植物性状变化
Fig. 7 Changes in bryophyte characteristics under 30° slope treatment

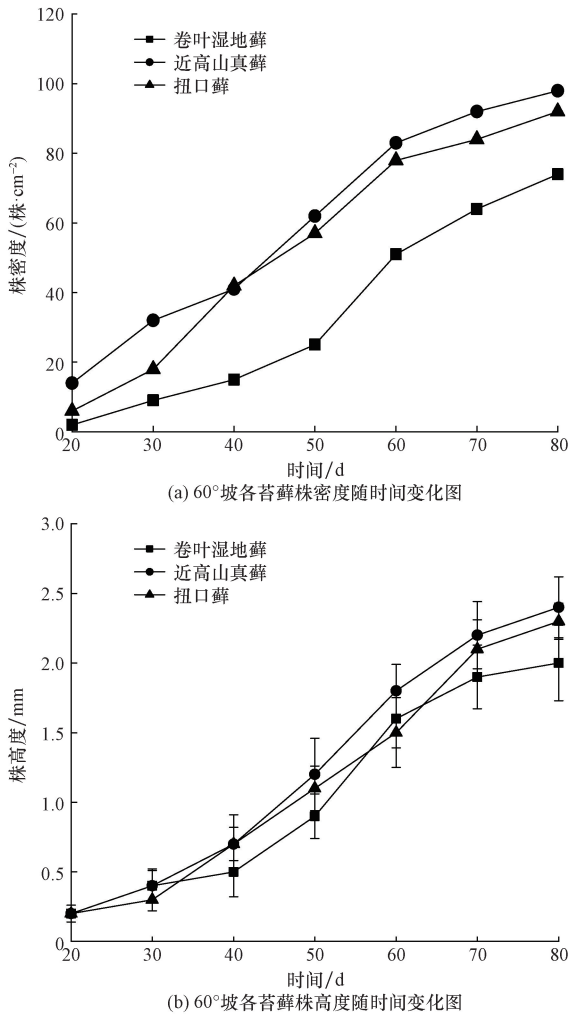


图 8 60°坡处理下苔藓植物性状变化
Fig. 8 Changes in bryophyte characteristics under 60° slope treatment

度处理下苔藓的株密度指标无显著差异, 最大为 60°坡度处理下的近高山真藓 (118 株/cm²), 远大于相同坡度下的扭口藓 (92 株/cm²) 和卷叶湿地藓 (74 株/cm²)。最终, 各坡度处理下株密度呈现: 30° > 60° > 平面。

苔藓结皮植株高度指苔藓植物茎叶从地表到茎叶顶端的垂直距离, 可反映孢子体发育的潜力。如图所示, 各坡度处理下三种苔藓的株高度随培育时间的推移呈整体上升趋势, 而各组之间存在一定差异。在试验前期 (20 d 前), 各坡度处理下三种苔藓的株高度变化缓慢, 其株高度均不超过 0.3 mm, 在培育前中期 (20 ~ 40 d), 各坡度处理下三种苔藓的株高度增幅平缓, 这一时期最大株高度为 30° 坡度处理下的近高山真藓株高度能达到 0.8 mm, 在培育中后期 (40 ~ 60 d) 三种苔藓迅速发育, 各组内的苔藓株高度增长速率达到最快, 增幅明显, 第 60 天时, 各坡度处理下的卷叶湿地藓的株高度

较第 40 天时增长了 200% 以上, 扭口藓和近高山真藓的株高度增幅也在 100% 以上, 表面这一时期的苔藓细胞活性较强, 细胞分裂加快, 使株高度呈显著上升趋势。在培育后期 (60 ~ 80 d) 除平面处理的苔藓外, 其他两种坡度处理的苔藓株高度增长趋于平缓, 平面处理的苔藓在整个培育周期内, 其株高度均远小于同一培育时期内的其他坡度处理的同种苔藓, 因此在培育后期株高度仍处于增长趋势。总的来说各坡度处理下株高度呈现: 30° > 60° > 平面。

2.4 苔藓结皮层厚度及结皮层干重特征

苔藓结皮层厚度指土壤较为干燥时施加外力能够使生物结皮层完整自然剥离层的厚度, 是生物结皮层及所黏附土壤层的总厚度, 是结皮发育特征的重要指标。如图 9 所示, 在培育末期 (第 80 天) 各坡度处理下苔藓结皮层厚度。因为苔藓发育了 80 d, 各组苔藓结皮均有发育。由图 9 可知, 各坡度处理下苔藓结皮层厚度均在 1.5 mm 以上, 其中 30° 坡度处理下的苔藓结皮层厚度高于其他两种坡度处理, 最大为近高山真藓 (结皮层厚度 2.5 mm)。卷叶湿地藓的结皮厚度远小于同组内的其他两种苔藓, 说明卷叶湿地藓干燥时失水较多, 植物体收缩体积变化大, 对所黏附土壤层的黏聚力不及其他两种苔藓, 从而导致苔藓结皮层厚度小于同种处理条件下的其他苔藓。

苔藓结皮层干重指土壤较为干燥时施加外力能够使生物结皮层完整自然剥离层的质量除以对应面积, 是结皮发育特征的重要指标。图 9 反映在培育末期 (第 80 天) 各坡度处理下苔藓结皮层干重, 各组苔藓的结皮层干重的差异与同时期苔藓结皮层厚度的差异大致相同, 最大为 30° 处理下的近高山真藓, 结皮层干重达到了 0.31 g/cm², 远高于同

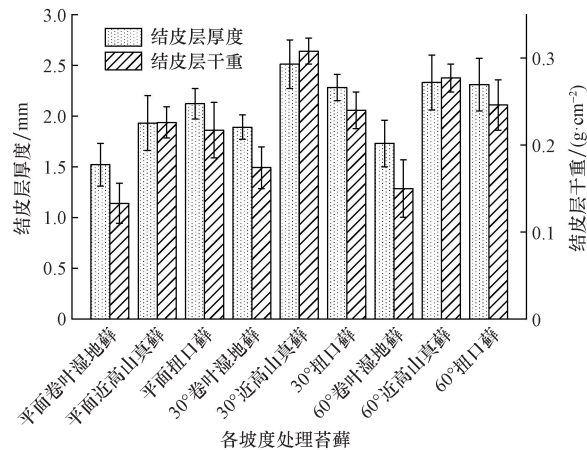


图 9 培育第 80 天苔藓植物结皮层厚度及干重
Fig. 9 Thickness and dry weight of moss crust layer on the 80th day of cultivation

组处理下的其他两种苔藓;同时,其他两组坡度处理下,近高山真藓的结皮层干重均为最高。这说明近高山真藓的苔藓生物量大,其假根分泌的黏性物质对土壤颗粒的黏附力较强,在石漠化地区对土壤的固定作用也就越强。

3 讨论

重要值指标(BIV)来筛选。卷叶湿地藓、扭口藓和近高山真藓在桂林屏风山苔藓植物群落中处于优势性地位。主要环境变量的空间结构会影响苔藓植物分布,并产生与环境变量类似的空间结构^[22],在这种情况下,卷叶湿地藓、扭口藓和近高山真藓均在桂林屏风山的4种典型生境中出现,且相对频度达到25%、27%、18%。丛集型苔藓植物体之间密集,空隙较小,能有效减少植物体内水分的蒸腾^[23],因此丛集型苔藓更适应环境较恶劣的石漠化生境,此外,苔藓植物物种间的相互竞争加剧了物种的空间分离,使苔藓植物群落以单一优势物种为主,而三种优势种苔藓均为丛集型,这表明桂林屏风山独特的环境条件下,为这3种苔藓的生长发育提供有利的影响。因此,我们可以将卷叶湿地藓、扭口藓和近高山真藓作为植物种源进行桂北石漠化地区生态修复,可以提高野外培育成功率,节约后期维护成本。

此试验开展的苔藓植物培育位于桂北石漠化地区,且以石灰岩岩板为基质。野外培育研究结果表明,在石漠化生态修复中,生态修复效果与苔藓种类和坡度有着密切关系,平面处理中,各苔藓发育生长指标不及同时期的其他试验组,我们推测,由于基质为石灰岩岩板,仅表面只有一层薄土层覆盖,苔藓植株只有在环境湿润情况下才会发育,而刚发育的幼小植株难以控制自身水分,自动喷淋系统喷水量大于苔藓植物前期生长发育的需水量,其他坡度组多余的水分可随着坡度从预留孔排除,而平面组多余的水分不能透过石灰岩岩板下渗,使水面长期贴合基质,使土壤基质透气性下降,苔藓结皮无氧呼吸作用加剧,产生更多酸性物质抑制苔藓结皮发育,导致平面处理的各苔藓生长缓慢^[24]。

4 结论

对桂林屏风山苔藓试验区进行优势种苔藓筛选及野外培育试验分析可得出以下结论。

(1)基于5点取样法统计研究区内4种不同的典型生境苔藓植物多样性构成,统计出苔藓物种共有7科9属9种,分别为卷叶湿地藓、直叶泽藓、柱蒴绢藓、近高山真藓、大灰藓、扭口藓、细叶小羽藓、

密叶美喙藓、纤枝羽藓,展现了桂北石漠化地区苔藓物种的多样性。

(2)在自然发育条件下,不同生境中的苔藓植物种类和重要值存在显著差异。卷叶湿地藓、扭口藓和近高山真藓在相对盖度、相对密度和相对频度方面更加突出,相较之下,直叶泽藓、柱蒴绢藓和纤枝羽藓在四种生境中频度较低,适应性较差,不适合作为生态修复的优先种源。卷叶湿地藓、扭口藓和近高山真藓的重要值分别为27.17%、24.41%、19.93%,为优势苔藓物种,表明这些物种对桂北石漠化地区的不同生境具有更强的环境适应性,可以为生态修复植物物种作参考。

(3)在野外培育试验中,坡度对苔藓的生长指标有显著影响。总体趋势显示,30°坡度处理的苔藓植物覆盖度、株密度及株高度均优于60°坡度和平面处理,表明适度的坡度有利于苔藓植物的生长发育。尤其是近高山真藓在30°坡度下的覆盖度、株密度和结皮层厚度均达到最佳状态,其在较陡峭的边坡环境中具有优异的适应性和扩繁能力。扭口藓和近高山真藓能够在不同坡度的边坡上达到极好的修复效果,为苔藓植物在桂北石漠化地区修复工程提供实践经验和理论依据。

参 考 文 献

- [1] Feng Y, Wang S, Zhao M, et al. Monitoring of land desertification changes in urat front banner from 2010 to 2020 based on remote sensing data[J]. *Water*, 2022, 14(11): 1777.
- [2] 彭旭东,戴全厚.西南石漠化区地表侵蚀/地下漏失的侵蚀环境特征[J].*中国水土保持科学*, 2023(4): 150-158.
Peng Xudong, Dai Quanhou. Environmental characteristics of surface erosion/underground leakage in the southwestern rocky desertification area[J]. *Chinese Journal of Soil and Water Conservation Science*, 2023(4): 150-158.
- [3] 龙明康,白晓永.中国西南喀斯特石漠化治理对生物多样性的影响[J].*地理学报*, 2024(1): 97-113.
Long Mingkang, Bai Xiaoyong. The impact of karst rocky desertification control on biodiversity in southwestern China[J]. *Journal of Geography*, 2024(1): 97-113.
- [4] 高山,付涛,周成,等.广西贺巴高速来都段石漠化边坡植被恢复和生态防护技术的应用分析[J].*科学技术与工程*, 2023, 23(21): 9251-9259.
Gao Shan, Fu Tao, Zhou Cheng, et al. Application analysis of vegetation restoration and ecological protection technology in rocky desertification slope at Laidu Section on Heba Expressway in Guangxi [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(21): 9251-9259.
- [5] 张国,郑春燕,李钰飞,等.喀斯特地区石漠化生态修复对土壤生物多样性的影响[J].*生态学报*, 2023, 43(1): 432-440.
Zhang Guo, Zheng Chunyan, Li Yufei, et al. Impact of ecological restoration of rocky desertification in karst areas on soil biodiversity [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 43(1): 432-440.

- [6] 王硕, 吴云杰, 张明意, 等. 贵州喀斯特地区植被修复对土壤氮素的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15397-15407.
Wang Shuo, Wu Yunjie, Zhang Mingyi, et al. Effect of vegetation restoration on soil nitrogen distribution in karst area of Guizhou Province[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(34): 15397-15407.
- [7] Chang J, Li Q, Zhai L, et al. Comprehensive assessment of rocky desertification treatment in Southwest China karst[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35(10): 3461-3476.
- [8] 梁丹昉. 桂林喀斯特废弃采石场边坡适生植物筛选与生态修复设计[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
Liang Danyang. Selection of suitable plants and ecological restoration design for slope of Abandoned Karst Quarry in Guilin [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2022.
- [9] 李好飞. 矿山高陡边坡生态修复问题探究[J]. 资源节约与环保, 2023(9): 29-32.
Li Haofei. Exploration of ecological restoration of high and steep slope in mines[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2023(9): 29-32.
- [10] 孙莉玮, 高雪笛, 许丹尔, 等. 超低温保存下藓类植物孢子萌发率的变化: 以6种藓类植物为例[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2019(3): 138-143, 154.
Sun Liwei, Gao Xuedi, Xu Daner, et al. Changes in spore germination rate of moss plants under ultra-low temperature preservation: a case study of six moss species[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science Edition), 2019(3): 138-143, 154.
- [11] 张恒彬, 吴娇娇, 余春娅, 等. 不同等级石漠化生境下石生苔藓叶绿素含量和叶绿素荧光参数研究[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 3882-3893.
Zhang Hengbin, Wu Jiaojiao, Yu Chunya, et al. Study on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of lithophytic moss in different levels of rocky desertification habitats [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 43(10): 3882-3893.
- [12] 周虹, 刘雲祥. 高寒沙区土壤结皮对浅层土壤理化性质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022(8): 154-160.
Zhou Hong, Liu Yunxiang. The influence of soil crust on shallow soil physicochemical properties in high-altitude desert areas [J]. Resources and Environment in Arid Regions, 2022(8): 154-160.
- [13] 莫惠芝, 骆华容, 刘建华, 等. 不同光照条件对三种苔藓植物光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2018(15): 85-91.
Mo Huizhi, Luo Huarong, Liu Jianhua, et al. Effects of different light conditions on the photosynthetic characteristics of three bryophytes [J]. Northern Horticulture, 2018(15): 85-91.
- [14] 赵鑫, 陈栋, 郭冠廷, 等. 贵州石漠化地区生物结皮对土壤氮矿化的影响[J]. 河南农业科学, 2024(2): 75-84.
Zhao Xin, Chen Dong, Guo Guanting, et al. The impact of biological crusts on soil nitrogen mineralization in rocky desertification areas of Guizhou Province [J]. Henan Agricultural Science, 2024(2): 75-84.
- [15] 徐恒康, 刘晓丽, 史雅楠, 等. 生物结皮对高寒退化草地植物群落的影响[J]. 草地学报, 2018(3): 539-544.
Xu Hengkang, Liu Xiaoli, Shi Yanan, et al. Effects of biological crusts on plant communities in alpine degraded grasslands [J]. Grassland Journal, 2018(3): 539-544.
- [16] 涂娜, 严友进, 戴全厚, 等. 喀斯特石漠化区典型生境下石生苔藓的固土持水作用[J]. 生态学报, 2021(15): 6203-6214.
Tu Na, Yan Youjin, Dai Quanhou, et al. Soil fixation and water holding capacity of lithophytic moss in typical habitats of karst rocky desertification areas[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021(15): 6203-6214.
- [17] 杨瑞瑞, 李小双, 梁玉青, 等. 植物激素在苔藓生长发育与逆境响应过程中的作用机制研究进展[J]. 西北植物学报, 2022(3): 527-540.
Yang Ruirui, Li Xiaoshuang, Liang Yuqing, et al. Research progress on the mechanism of plant hormones in the growth, development, and stress response of mosses [J]. Northwest Botanical Journal, 2022(3): 527-540.
- [18] 杨涛, 国辉, 周金星, 等. 苔藓结皮对碳酸盐岩的风化作用研究进展[J]. 中国岩溶, 2023(3): 448-455.
Yang Tao, Guo Hui, Zhou Jinxing, et al. Research progress on weathering of carbonate rocks by moss crust [J]. Chinese Karst, 2023(3): 448-455.
- [19] 赵海燕, 郭荣慧, 段宇涛, 等. 苔藓植物护坡及固土作用试验研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018(3): 364-368.
Zhao Haiyan, Guo Ronghui, Duan Yutao, et al. Experimental study on bryophyte slope protection and soil consolidation [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2018(3): 364-368.
- [20] 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(2): 16-21.
Zhang Huini, Wang Bing, Zhang Baoqi, et al. Effects of biological crusts on the hydrodynamic characteristics of slope water in loess hilly areas [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2022(2): 16-21.
- [21] 胡浩云, 刘萌萌, 吴永胜, 等. 毛乌素沙地南缘沙区不同类型地表水分特征曲线测定与分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 23-28.
Hu Haoyun, Liu Mengmeng, Wu Yongsheng, et al. Determination and analysis of different types of surface water characteristic curves in the southern edge of the Maowusu Desert [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(8): 23-28.
- [22] 王辰雨. 内蒙古西部地区山地苔藓植物空间分布[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2021.
Wang Chenyu. Spatial distribution of mosses in mountainous areas of western Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2021.
- [23] 程才. 喀斯特石漠化地区苔藓结皮覆被土壤呼吸特征研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
Cheng Cai. Study on soil respiration characteristics of moss crust cover in karst rocky desertification areas [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [24] 黎修东, 骆华容, 莫惠芝, 等. 不同水分条件下3种苔藓植物的生理响应[J]. 江西农业学报, 2018, 30(4): 39-43.
Li Xiudong, Luo Huarong, Mo Huizhi, et al. Physiological responses of three moss plants under different water conditions [J]. Jiangxi Agricultural Journal, 2018, 30(4): 39-43.