

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.041.

陈秋帆, 卢琦, 王妍. 基于熵权法 TOPSIS 模型综合评价石漠化区 4 种苔藓植物的生态修复效益[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 195-202, 210.
CHEN Qiufan, LU Qi, WANG Yan. Evaluation on the Ecological Restoration Benefits of Four Bryophytes in Rocky Desertification Area were Based on Entropy Weight TOPSIS Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 195-202, 210.

基于熵权法 TOPSIS 模型综合评价石漠化区 4 种苔藓植物的生态修复效益

陈秋帆¹, 卢琦², 王妍^{1,3}

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 2.中国林业科学研究院荒漠化研究所,
北京 100091; 3.云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 昆明 650224)

摘 要:[目的]探讨典型苔藓植物在石漠化区的生态修复效益,为进一步把苔藓植物运用于石漠化治理中提供数据支撑。
[方法]选取石漠化区 4 类生境中大灰藓(*Hypnum plumaeforme*)、牛舌藓(*Anomodon viticulosus*)、小石藓(*Weisia controversa*)、蕊型真藓(*Bryum coronatum*)优势苔藓物种,基于熵权法 TOPSIS 模型从苔藓植物饱和吸水率、蒸腾速率、抗冲刷能力、改善土壤养分这 4 个方面综合评价 4 种苔藓植物的生态修复效益。[结果](1) 4 种苔藓植物的饱和吸水率和蒸腾速率具有显著差异性;饱和吸水率最高的是蕊型真藓($1384.93\% \pm 80.77\%$),最低的是小石藓($602.74\% \pm 34.78\%$)。蕊型真藓平均蒸腾速率最高值为 $402.43 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,大灰藓平均蒸腾速率最弱为 $146.86 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;饱和吸水率与蒸腾速率、干重、假根密度、假根根长呈正相关;蒸腾速率与假根密度、干重、饱和吸水率呈正相关,与假根根长呈负相关。(2) 通过人工为期 6 个月种植苔藓植物后研究发现,与纯土组对比,苔藓植物对土壤中全氮、全磷、全钾、总有机碳含量的影响总体趋势并不显著($p < 0.005$),但均能显著提高土壤中碱性磷酸酶、脱氢酶、蔗糖酶、脲酶的活性($p < 0.005$);由主成分分析 PCA 得到牛舌藓对土壤养分改良较其他 3 种苔藓植物更具有优势。(3) 当冲刷流量较小时,4 种苔藓抗冲刷能力差异性不显著,抗冲刷能力随着冲刷流量增加具有显著性差异;大灰藓和蕊型真藓抗冲刷能力较其他两种苔藓植物强。抗冲刷能力与假根密度、冲刷苔藓植物生物量、假根根长、饱和吸水率、糙率呈显著正相关,与蔗糖酶呈负相关,与脲酶、碱性磷酸酶、脱氢酶相关性不大。(4) 选取饱和吸水率、蒸腾速率、抗冲刷能力和土壤养分改良 4 个指标,利用熵权法 TOPSIS 模型综合评价 4 种苔藓植物在石漠化区的生态修复效益,4 个指标权重分别为 21.68%, 24.55%, 16.84%, 36.93%, 评价结果为牛舌藓和蕊型真藓在石漠化区生态修复效益较优。[结论]石漠化生态恢复重建中引入牛舌藓和蕊型真藓等苔藓植物可以增加种源,达到更好的修复效益。

关键词:苔藓植物;生态修复效益;熵权法 TOPSIS 模型;石漠化

中图分类号:X37

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)03-0195-08

Evaluation on the Ecological Restoration Benefits of Four Bryophytes in Rocky Desertification Area Based on Entropy Weight TOPSIS Model

CHEN Qiufan¹, LU Qi², WANG Yan^{1,3}

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2.Institute of Desertification Research, China Academy of Forestry Science, Beijing 100091, China; 3.Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Management in Mountainous Rural Areas of Yunnan Province, Kunming 650224, China)

Abstract:[Objective] The ecological restoration benefits of typical bryophytes in rock desertification areas were explored to provide data support for further application of bryophytes in rocky desertification management. [Methods] The dominant bryophytes in four types of habitats, such as *Hypnum plumaeforme*, *Ano-*

收稿日期:2022-02-10

修回日期:2022-03-10

资助项目:国家自然科学基金(31760245;31660139)

第一作者:陈秋帆(1991—),女,云南曲靖人,博士研究生,主要研究方向苔藓植物在水土保持中的作用。E-mail:260961355@qq.com

通信作者:王妍(1980—),女,河北承德人,副教授,从事脆弱生态系统关键过程与修复。E-mail:wycyf@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Anomodon viticulosus, *Weisia controversa*, *Bryum coronatum* were selected from four habitats in typical rocky desertification area. The ecological restoration benefits of four bryophytes were comprehensively evaluated based on the entropy power TOPSIS model in terms of saturated water absorption rate, evaporation rate, anti-scouring ability and improvement of soil nutrients. [Results] (1) The saturated water rate and evaporation rate of the four bryophytes were significantly different, the highest saturated water rate was the *Bryum coronatum* ($1384.93\% \pm 80.77\%$) and the smallest was the *Weisia controversa* ($602.74\% \pm 34.78\%$). The maximum average evaporation rate of *Bryum coronatum* was $402.43 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and the average evaporation rate of *Bryum plumaeforme* was the weakest with the value of $146.86 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. The saturated water rate (SWR) was positively correlated with pseudoroot density (RD), dry weight (DW), root length of pseudoroot (RLD), the evaporation rate (EV). EV was positively correlated with the RD, DW and SWR, and negatively correlated with the RLD. (2) The overall trend of the effect of the bryophytes on the total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK) and total organic carbon (TOC) contents of the soil was not significant ($p < 0.005$) when compared with the pure soil group after artificially growing bryophytes for a period of 6 months. All of them could significantly improve the activities of alkaline phosphatase (ALP), dehydrogenase (DHO), invertase (IN) and urease (UR) in soil ($p < 0.005$). Principal component analysis (PCA) showed that *Anomodon viticulosus* had more advantages on soil nutrient improvement than other three bryophytes. (3) Then the scour flow was small, the difference of the anti-scour ability (ASA) of the four bryophytes was not significant, but the ASA was significantly different with the increase of the scour flow; the ASA of *Hypnum plumaeforme* and *Bryum coronatum* is stronger than the other. The ASA was positively correlated with RD, scour bryophyte biomass (ASA-BOM), RLD, SWR and RC, negatively correlated with IN, and not significantly correlated. (4) Four indicators of SWR, EV, ASA and soil nutrient improvement (ISN) were selected to evaluate the ecological restoration benefits of four bryophytes in rocky desertification area using the entropy weighting method TOPSIS model, and the weights of the four indicators were 21.68%, 24.55%, 16.84% and 36.93%, respectively. The evaluation results showed that the ecological restoration benefits of *Anomodon viticulosus* and *Bryum coronatum* were better in rocky desertification area. [Conclusion] It is suggested that bryophytes of *Anomodon viticulosus* and *Bryum coronatum* can be introduced in the ecological restoration and reconstruction to increase the seed source to achieve better restoration benefits.

Keywords: bryophytes; entropy weight TOPSIS model; restoration benefit; rocky desertification

喀斯特石漠化由于空间异质性强、植被覆盖度低,保水固土能力下降,岩石裸露,水土流失呈恶性循环趋势,环境十分脆弱,是一种典型的土地退化过程并成为我国第三大生态灾害之一^[1-2]。云南是石漠化大省,2016年石漠化面积为235.2万 hm^2 ,水土流失仍然是云南省重大的环境问题^[3],2015年云南省土壤侵蚀面积为10.47万 km^2 ,占全省土地面积的27.33%^[4]。20世纪80年代以来,很多学者研究喀斯特石漠化生态系统恢复与重建的措施,经过多年的探索,对治理石漠化区的核心问题缺水,少土,植被覆盖低总结了溶岩水资源特征与开发利用技术、土壤资源维持与质量提升技术、植被恢复与功能提升技术三大类。植被恢复对生态系统的能量流动、物质循环和信息传递起着先导作用;石漠化区植被恢复的主要方式是封山育林和人工造林两种,物种选择、种间优化和群落空间配置

具有稳定生态功能和较高生产力的植被群落是植被恢复成功的关键。截止2021年云南石漠化区统计得到435种物种可用于石漠化区生态恢复,其中乔灌木有376种,草本有59种,但这些以木本和草本植物为主的恢复模式的生态系统稳定性需要进一步验证^[5]。林分结构不合理,如花红李经济型生态林模式存在林分结构单一、养分供需不平衡、产量低、林地地力衰退等问题;中度石漠化山地封山育林恢复模式存在重视乔木层,植被恢复物种单一,层次结构简单,生物多样性低,林分稳定性差,可能不能形成稳定的生态结构与功能而发生退化,上述这些问题不同程度上制约着石漠化治理措施的有效实施^[6-7]。

苔藓植物是植被恢复群落的先锋种,适应生存环境的同时还在不断的改造环境^[8]。苔藓植物强大的吸水和保水功能可蓄积空气和降水中水分来抵御石

漠化地区的干旱;苔藓植物累积粉尘、自身分泌酸性代谢物等较容易形成生物结皮层在生物防沙、固沙、保持水土、涵养水源以及基质微环境的改善中都发挥着重要作用。目前,石漠化区苔藓植物的研究主要集中于群落学调查阶段并附带较为单一的保水能力方面的研究,而将苔藓植物作为一个特殊结构单元系统测定苔藓植物对石漠化区生态修复的研究鲜有报道,大多数停留在理论阶段^[9]。因此本文在云南典型石漠化区前期调查研究基础上,以苔藓介质层生态修复效益评价及机理探讨为问题导向,选取耕地、裸岩地、云南松林地、灌丛地 4 类生境中优势苔藓物种蕊型真藓(*Bryum coronatum*)、牛舌藓(*Anomodon viticulosus*)、大灰藓(*Hypnum plumaeforme*)和小石藓(*Weisia controversa*) 4 种苔藓进行试验研究,系统测定 4 种苔藓植物饱和吸水率、蒸腾速率、抗冲刷性能和苔藓植物对土壤养分和酶活性的影响这些指标体系,基于熵权法 TOPSIS 模型综合评价 4 种苔藓植物对云南石漠化区生态修复效益。为石漠化区植被恢复治理过程中进一步改善传统单一植物种植局面,优化调整植物组成和配置,形成结构合理、功能完善、生态系统稳定、自我调节能力强的石漠化植被恢复生态链提供科学有效的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2019 年 12 月将云南石林县典型石漠化区云南松林地、灌丛地、耕地、裸岩地 4 种生境中分别采集的优势苔藓物种大灰藓、小石藓、蕊型真藓、牛舌藓 4 种苔藓植物祛除杂质后洗去苔藓植物假根部分的土壤,晾干苔藓植物,用剪刀剪除苔藓枯叶后,用毛刷轻刷基质土壤表层,把苔藓植物平铺在土壤基质上,并用毛刷轻轻按压苔藓植物,在西南林业大学石漠化研究院实验室内培养,每类苔藓植物培养 40 盒,对照组纯土 40 盒。其中,培养盒规格为直径 7 cm,高 4 cm,底部均匀分布细小孔;土壤基质为同时期采集于石林县石漠化区后祛除杂质过 3 mm 筛子充分混合均匀;培养中浇水方式为每三天使用喷壶浇水至其湿润,包括纯土对照组;培养时间为 2019 年 12 月至 2020 年 6 月共计 6 个月整。培养至 2020 年 6 月底,从各类培养的 40 盒苔藓中挑选生长旺盛的植物各 15 盒,其中 3 盒用小铲子取表层苔藓植物用于测量其基本生理指标,除糙率指标重复测量 6 次外,其他每个指标重复测量 3 次;并取同类苔藓植物下部 0—1 cm 土样装

入自封袋混合后,风干一周测量土壤养分及酶活性,每个指标重复测量 3 次。另外 3 盆和剩下的 9 盆植物于 2020 年 7 月分别用于蒸腾速率测量和抗冲刷试验,每组试验重复 3 次。

1.2 指标测量

1.2.1 苔藓植物蒸腾速率、饱和吸水率和糙率 蒸腾速率(EV):表示为每小时每 m^2 苔藓植物蒸腾水量的克数 $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 。取一定面积的苔藓植物过 0.2 mm 分样筛清洗干净,吸水 24 h 后,置于过滤网中,待不滴水后称其饱和吸水重,再将称量完饱和水重的苔藓放置于恒定温度为 14°C ,相对湿度为 40% 的培养箱,采用称重的方法,分别在 20, 40, 60, 90 min, 2, 3, 4, 8, 12, 24, 28, 32, 36, 40 h 后使用 1/10 000 天平测量蒸腾水量,并计算蒸腾速率,每种苔藓植物设置 3 个平行样。

饱和吸水率(SWR, %):表示为单位面积干重苔藓植物的饱和吸水重。取一定面积苔藓植物过 0.2 mm 分样筛清洗干净后吸水 24 h,置于过滤网中,待不滴水后称其饱和吸水重,将称重后的苔藓置于烘箱中,在 60°C 的条件下烘 48 h 后测量干重,每种苔藓植物设置 3 个平行样。

糙率(RC, %):采用长 10 cm,宽 0.5 mm 的链条贴近苔藓植物表面放置,链条长度随苔藓植物表层起伏增大而减小,计算出链条长度的减小值 $L_1 - L_2$,即得粗糙度指标。 $C_r = (L_1 - L_2) / L_2$ 。

苔藓生物量(BOM, g/m^2):苔藓植物干重(DW, g/m^2)与苔藓盖度(%)的乘积。

1.2.2 土壤养分及酶活性相关指标测量 土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测量,全磷(TP)采用硫酸—高氯酸钼锑抗比色法测量,总有机碳(TOC)采用重铬酸钾氧化法测量,全钾(TK)采用王水—高氯酸消解样品,使用等离子发射光谱仪测量其含量。

土壤酶活性测量:将土壤风干约 1 周,过 2 mm 筛,装入自封袋待测。脲酶(DHO)活性用苯酚钠次氯酸比色法测量,表示为 $\text{mg NH}_3\text{-N}/\text{g}(37^\circ\text{C } 24 \text{ h})$;碱性磷酸酶(ALP)活性用苯磷酸二钠比色法测量,表示为 $\text{mg 酚}/\text{g 土}(37^\circ\text{C } 24 \text{ h})$;蔗糖酶(IN)活性用 3,5—二硝基水杨酸比色法测量,表示为 $\text{mg 葡萄糖}/\text{g 土}(37^\circ\text{C } 24 \text{ h})$;脱氢酶(UR)采用 TTC 还原法测量,表示为 $(\text{mg TPF})/(\text{g 干土}/\text{h})$ 。

1.2.3 苔藓植物抗冲刷能力测量 抗冲刷能力(ASA):选取生长较好的苔藓植物,利用冲刷槽装置进行试验,冲刷苔藓土样尺寸为圆形($\phi = 7 \text{ cm}$, $h = 4 \text{ cm}$)。冲刷坡度 30° 下分别控制冲刷流量为 0.6, 2, 4 L/min 进行冲刷试验,冲刷时间为 30 min。每组试验重复 3 次。

冲出的泥沙过滤后放置在 105℃ 烘箱烘干 12 h 后称重。
苔藓植物抗冲刷强化值 $R(\%)$ 计算公式为:

$$R = \frac{sw_1 - sw_2}{sw_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: sw_1 为纯土对照组冲刷下土壤流失量 (g/h);
 sw_2 为苔藓土壤流失量 (g/h)。

1.3 熵权法 TOPSIS 模型及数据统计分析

1.3.1 熵权法 TOPSIS 模型 本文首先用熵权法构建加权矩阵,再用 TOPSIS 模型对 4 种苔藓植物修复效益进行综合评价。

(1) 确定目标序列,由于苔藓植物评价体系中各个指标初始量纲不一致,需要对指标单位初始量纲归一化处理,本文采用熵权法对原始数据处理,经标准化后得到矩阵 B 。

$$x_{ij} = \frac{k_{ij} - \min(k_{ij})}{\max(k_{ij}) - \min(k_{ij})} \quad (\text{适用于正向指标}) \quad (2)$$

$$x_{ij} = \frac{\max(k_{ij}) - k_{ij}}{\max(k_{ij}) - \min(k_{ij})} \quad (\text{适用于负向指标}) \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

式中: i 为评价指标 ($i=1,2,3,\dots,m$); j 为不同苔藓植物 ($j=1,2,3,\dots,n$); K_{ij} 为评价指标体系初始值; $\max(K_{ij})$ 为指标 K_{ij} 的最大值; $\min(K_{ij})$ 为指标 K_{ij} 的最小值; x_{ij} 为标准化后的值。

(2) 熵权法计算权重。对矩阵 B 进行规范化,得到矩阵 f_{ij} ,计算公式为:

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (4)$$

其次计算信息熵 e_i :

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \times \ln f_{ij} \quad (5)$$

若 $f_{ij}=0$, 则 $\lim_{f_{ij} \rightarrow 0} f_{ij} \times \ln f_{ij} = 0$

最后计算指标权重 w_i :

$$w_i = \frac{1 - e_i}{m - \sum_{i=0}^m e_i} \quad (6)$$

(3) TOPSIS 模型构建。为评价结果的客观性,根据指标权重 w_i 创建规范化分析矩阵 C 。

$$C = |y_{ij}|_{m \times n} = |w_i \times x_{ij}|_{m \times n} \quad (7)$$

(4) 确定正负理想值。正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- 是第 i 个指标在第 j 种苔藓中的最大值和最小值,具体公式为:

$$Z^+ = \max\{y_{ij}\}$$

$$Z^- = \min\{y_{ij}\} \quad (8)$$

(5) 计算距离。选用欧式距离计算苔藓植物生态修复效益评价指标到正负理想的距离, D^+ 为 i 个评价对象和 Z^+ 的距离, D^- 为 i 个评价对象和 Z^- 的距离,具体公式为:

$$D^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (Z_i^+ - y_{ij})^2}$$

$$D^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (Z_i^- - y_{ij})^2} \quad (9)$$

(6) 计算相对接近度。 C_j 为苔藓植物生态修复效益综合评价指数,值越大表示生态修复效益越高,计算公式为:

$$C_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (10)$$

1.3.2 数据分析 数据统计采用 Excel 2018 软件,差异性检验及熵权 TOPSIS 模型建立采用 SPSS 25.0 软件完成;使用 Origin 9.5 进行主成分分析;其他图形绘制使用 R 语言 iterators 和 corrgram 包完成。

2 结果与分析

2.1 苔藓植物的基本生理指标

4 种苔藓植物基本生理指标之间差异显著(表 1)。它们的饱和吸水率都较大,说明苔藓植物具有较强的吸水能力,蕊型真藓饱和吸水率最大且假根密度(RD)最大,大灰藓饱和吸水率次之且假根根长(RLD)最长。苔藓植物干重最重为牛舌藓,最轻的为小石藓。4 种苔藓植物中大灰藓的糙率最大,其次是小石藓,蕊型真藓和牛舌藓糙率差异不显著。冲刷苔藓生物量(ASA-BOM)最高的为蕊型真藓,其次是牛舌藓,生物量最低的为小石藓。

2.2 苔藓植株体蒸腾速率

通过测量苔藓植株体的蒸腾速率(图 1)得到 4 种苔藓的蒸腾速率整体随时间推移呈现下降趋势;在前 20 min 蒸腾速率都达到至高点,然后在 20 min—15 h 内呈波动下降,之后蒸腾速率升高又呈现稳定下降趋势。蕊型真藓的蒸腾速率最高为 924.35 g/(m² · h),下降较其他苔藓快,说明蕊型真藓的水分更容易丧失。牛舌藓和小石藓蒸腾速率的最高值分别为 860.59 g/(m² · h) 和 681.68 g/(m² · h),但小石藓在 8 h 时蒸腾速率降低为 175.29 g/(m² · h),牛舌藓在 8 h 时蒸腾速率降低为 404.68 g/(m² · h),说明小石藓水分蒸腾速率较牛舌藓变化更大。大灰藓的蒸腾速率最高为 296.78 g/(m² · h),并保持总体下降趋势,该苔藓植株体总体蒸腾速率最低。

表 1 4 种苔藓植物基本生理指标

采样生境	苔藓种类	假根密度/ (植株·cm ⁻²)	假根根长/ (cm·cm ⁻³)	干重/(g·m ⁻²)	饱和 吸水率/%	糙率/%	冲刷苔藓生物量/ (g·m ²)
云南松纯林地	大灰藓	29.33±4.51c	264.78±4.64a	511.01±16.90c	1112.78±40.56b	31.37±4.20a	503.34±16.91c
灌丛地	小石藓	53.44±3.00b	30.46±3.05d	443.76±14.75d	602.74±34.78d	17.25±2.49b	434.88±14.76d
耕地	蕊型真藓	169.83±8.44a	133.60±14.85b	740.28±25.53b	1384.93±80.77a	10.81±2.01c	703.27±25.54a
裸岩地	牛舌藓	66.61±8.15b	63.19±8.23c	1075.84±31.97a	782.25±2.43c	12.74±2.48c	688.54±31.98b

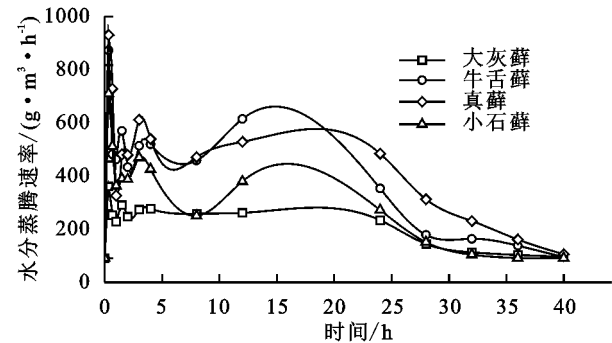


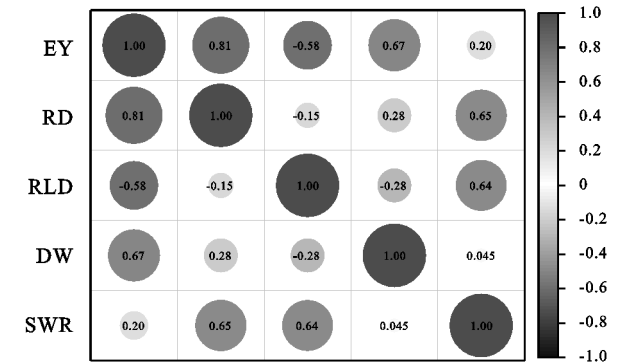
图 1 苔藓植物不同时段蒸腾速率

4 种苔藓植物的蒸腾速率反应苔藓植株体的保水机制,苔藓植株的保水机制与苔藓的生理指标存在一定相关性(图 2),蒸腾速率与 RD,DW,SWR 呈显著正相关;与 RLD 呈负相关。苔藓植物饱和吸水率与 RD,DW,EV,RLD 都呈正相关。苔藓植物干重与 RD,SWR 呈正相关,与 RLD 呈负相关,说明假根根长的苔藓植物不一定干重更重,还与苔藓植株体的茎叶组织生物结构密不可分。

2.3 苔藓植物抗冲刷能力分析

4 种苔藓植物抗冲刷强化值都呈现一个共同趋

势:随着冲刷流量的增加抗冲刷强化值呈递减趋势(表 2)。当冲刷流量较小为 0.6 L/min 时,4 种苔藓植物抗冲刷强化值差异性不显著($p<0.05$),都表现为较好的抗冲刷性;随冲刷水流量增大,4 种苔藓抗冲刷强化值差异性逐渐显著,较大的冲刷流量下 4 种苔藓植物的抗冲刷能力排序为:大灰藓≈蕊型真藓>牛舌藓>小石藓。



注:DW 表示干重;EV 表示平均蒸腾速率;RD 表示假根密度;SWR 表示饱和吸水率;RLD 表示假根根长。

图 2 苔藓植物蒸腾速率与生理指标的相关性

表 2 苔藓植物抗冲刷强化值

冲刷流量	蕊型真藓%	大灰藓%	牛舌藓%	小石藓%
0.6 L/min	89.09±0.46a	88.10±0.54a	88.72±0.20a	87.52±0.17a
2 L/min	84.80±1.10a	83.08±2.23a	81.10±1.58b	80.02±2.30b
4 L/min	76.20±0.56b	79.48±1.40a	73.31±0.38d	69.25±0.31c

苔藓植物抗冲刷强化值反映苔藓植物在石漠化区的保土效益,与苔藓植物各个生理指标息息相关(图 3),进一步分析得到:(1)抗冲刷强化值与 RD,ASA-BOM,RLD,SWR 呈正相关,且相关系数较大,与 RC 呈正相关,但相关系数较前四者小;与 IN 呈负相关,且相关系数较大;与 UR,ALP,DHO 相关性不大。(2)苔藓植物的糙率和 RLD,ASA,SWR 呈正相关;与其他指标呈负相关。(3)苔藓土壤的 UR,ALP,DHO,IN4 种酶之间呈正相关,且与生物量都呈正相关。

2.4 苔藓植物对土壤的影响分析

短期种植苔藓植物后研究发现,与纯土对比,苔藓植物对土壤中 TN,TP,TK,TOC 含量的影响总体趋势并不显著(表 3),说明石漠化区通过苔藓植物短期内改良土壤养分难度较大。牛舌藓和蕊型真藓可

以增加土壤 TN 含量;4 种苔藓植物土壤和纯土对照组 TOC 含量差异性显著,牛舌藓能增加土壤 TOC 含量,增加值较纯土对照组为 38%,具有一定固碳能力,但蕊型真藓、小石藓、大灰藓生长对土壤 TOC 含量具有一定消耗功能,消耗土壤 TOC 值较纯土对照组为 24.79%,18.25%,18.95%。

4 种苔藓植物短期生长均能不同程度提高土壤中 ALP,UR,IN,DHO 的活性(表 3),且与纯土对照组酶活性差异显著。蕊型真藓、大灰藓、牛舌藓、小石藓分别较纯土对照组 ALP 活性提高了 1.89,1.35,3.12,1.44 倍,其中大灰藓和小石藓对 ALP 活性的影响差异性不显著。4 种苔藓植物较纯土对照组 DHO 活性增加了 26.55%,37.82%,144.72%,27.34%;但蕊型真藓、大灰藓、小石藓对 DHO 活性的影响差异

不显著。与纯土对照组比较,蕊型真藓、大灰藓、牛舌藓、小石藓对 IN 活性具有显著影响,分别是纯土对照的 1.15,1.19,1.59,1.37 倍,倍数值最大的为牛舌藓,最小的为蕊型真藓,其中蕊型真藓和大灰藓对 IN 活性的影响差异不显著。4 种苔藓植物均能提高 UR 活性且较纯土对照组差异性显著,但小石藓、蕊型真藓、牛舌藓三者之间差异不显著。

通过主成分分析 PAC 对测定的土壤指标和 4 种苔藓植物进行二维排序(图 4),综合评价 4 种苔藓植物对土壤养分改良(Improved soil nutrient,缩写为 ISN)的影响,PC1 解释量达 64.2%,PC2 解释量达 30.1%,共解释了 94.3%,可以反映土壤养分的大部分信息。分析得到 4 种苔藓植物中牛舌藓对土壤养分改良具有一定优势;苔藓对土壤养分改良效益排序为:牛舌藓>蕊型真藓>大灰藓≈小石藓。

表 3 4 种苔藓植物下土壤中养分元素及酶含量

苔藓种类	全氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)	全钾/ (mg·kg ⁻¹)	总有机碳/ (mg·kg ⁻¹)	脲酶/ (mg·g ⁻¹)	蔗糖酶/ (mg·g ⁻¹)	碱性磷酸酶/ (mg·g ⁻¹)	脱氢酶/ (μg·g ⁻¹)
大灰藓	1.049±0.0042c	1.780±0.1119a	1.601±0.1459b	43.122±2.3299c	34.368±0.0827b	29.782±0.2852c	0.0355±0.0007c	1.895±0.0919b
小石藓	0.975±0.0044c	1.790±0.0462a	1.461±0.1582b	43.495±1.7315c	36.131±0.3730a	34.226±1.6470b	0.0380±0.0013c	1.751±0.110b
蕊型真藓	1.166±0.0015b	1.777±0.0022a	2.106±0.0721a	40.015±1.3690c	38.345±0.3798a	28.753±0.7304c	0.050±0.0046b	1.740±0.0283b
牛舌藓	1.217±0.0077a	1.806±0.0035a	1.660±0.1128b	73.420±5.9758a	37.199±0.1148a	39.671±0.6603a	0.082±0.0033a	3.365±0.0919a
纯土对照	1.0091±0.0202c	1.864±0.0397a	2.349±0.1954a	53.204±3.3475b	31.743±0.1207c	25.009±0.9047d	0.026±0.0007d	1.375±0.0071c

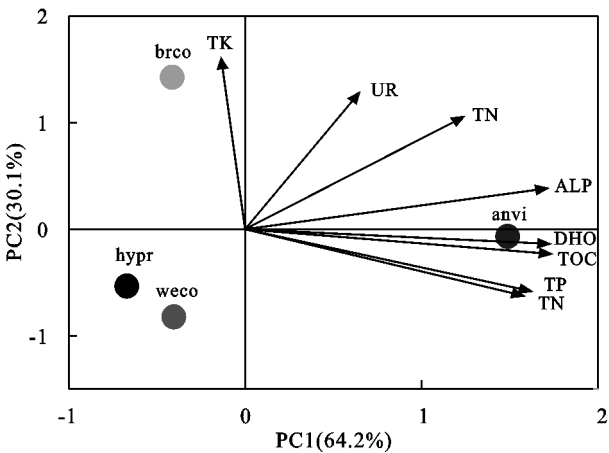


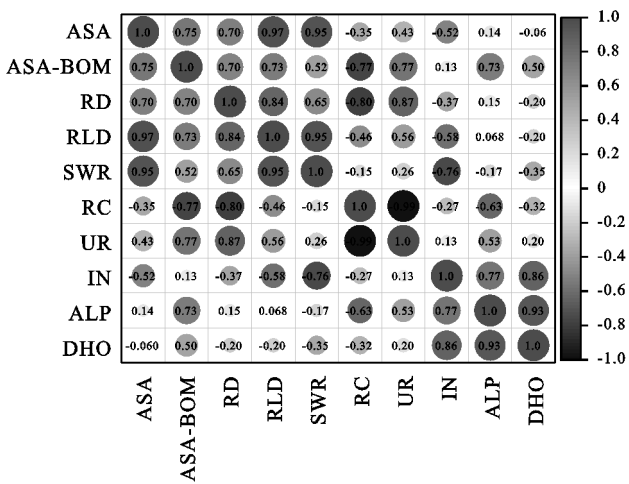
图 4 苔藓植物土壤养分改良 PCA 二维排序

2.5 苔藓植物生态修复效益综合评价

选取 SWR, EV, ASA 和 ISN4 个指标综合评价 4 种苔藓植物在石漠化区生态修复效益,结合 PCA 主成分分析,4 个指标能反映苔藓植物生态修复效益的 92.0%

表 4 苔藓植物生态修复效益评价指标体系样本数据

序号	指标	指标性质	苔藓植物生态修复效益综合评价原始数据
1	ASA	定性	正指标
2	SWR	定量	正指标
3	EV	定量	负指标
4	ISN	定性	正指标



注:ASA 表示抗冲刷能力;ASA-BOM 表示冲刷苔藓植物生物量;RD 表示假根密度;RLD 表示假根根长;SWR 表示饱和吸水率;RC 表示糙率;UR 表示脲酶;IN 表示蔗糖酶;ALP 表示碱性磷酸酶;DHO 表示脱氢酶。

图 3 苔藓植物抗冲刷强化值与生理指标的相关性

信息。其中 2 个定量指标,2 个定性指标的量化利用 Bi-polar 区间尺度 3 点标度法进行赋值。ASA 和 ISN 指标区间标度的方法为 1 点(低),2 点(中),3 点(高)(表 4)。

根据熵权法计算指标权重,结果见表 5。ISN, EV, SWR 和 ASA 在生态修复效益评价中权重分别为 36.93%,24.55%,21.68%,16.84%。

运用熵权法及 TOPSIS 模型对 4 种苔藓植物的生态修复效益进行综合评价(表 6)。相对接近度 C 值越大,表示生态修复效益越好,相对接近度 C 值最大的是牛舌藓,其次是蕊型真藓,二者的接近度值较为接近;最小的为小石藓。综合评定生态修复效益排序:牛舌藓>蕊型真藓>大灰藓>小石藓。根据苔藓植物的实际采样生境,牛舌藓是裸岩地的优势物种,蕊型真藓是耕地的优势物种,此两种苔藓植物的生活环境较大灰藓和小石藓更恶劣,该两种苔藓植物运用于石漠化区生态修复更具有优势。

表 5 苔藓植物生态修复效益评价指标体系权重 %				
指标	ASA	SWR	EV	ISN
权重	16.84	21.68	24.55	36.93

表 6 4 种苔藓植物生态修复效益评价得分				
苔藓 种类	正理想解	负理想解	相对	排序
	距离 D^+	距离 D^-	接近度 C	结果
大灰藓	0.373	0.326	0.466	3
小石藓	0.469	0.133	0.221	4
蕊型真藓	0.305	0.327	0.517	2
牛舌藓	0.278	0.380	0.578	1

3 讨论

3.1 苔藓植物保水能力探讨

石漠化区土层较薄,岩石裂隙发育,降水下渗,地表严重干旱,植物饱和吸水率和蒸腾速率生理过程是研究植物保水机制的重点,对改善石漠化区缺水环境具有重要意义。研究表明 4 种苔藓植物饱和吸水率都较大,与苔藓植物具有大量毛细孔隙和苔藓植物匍匐生长,提高了植物对水分的吸收面积有关^[10]。吸收水分缓慢释放可充当石漠化干旱环境中其他植物种子、幼苗生长的保湿通气基质,促进生态环境恢复。4 种苔藓植物前 20 min 的蒸腾速率最大,前人研究多数苔藓植物是典型的变水植物,蒸腾作用强弱主要取决于可利用的水分^[11]。蒸腾速率大小与饱和吸水率关系较大,蒸腾前期饱和吸水率下可提供充足水分供蒸腾,饱和吸水率越大蒸腾速率越大。随后,4 种苔藓植物蒸腾速率呈现不同程度波动下的整体下降趋势,与苔藓植株体假根密度、假根根长、叶片气孔频度和叶表面细胞等“拟茎叶体”结构有关。大灰藓的蒸腾速率是最低的,该植物饱和吸水率高、假根根长但假根密度较其他苔藓植物稀疏,前人研究表明该植株体形大,茎匍匐,长达 10 cm,皮层细胞厚壁,4~5 层,中部细胞较大,薄壁^[12];虽然该植物饱和吸水率高但该植株体型大且假根根长,水分在体内移动需要较长时间且细胞壁厚有利于存储水分而不易被蒸腾^[13]。大灰藓虽然具有较强的存储水分能力,但大灰藓生长环境可能会有一定限制,本次采集的大灰藓是云南松纯林下的优势种,遮光条件好,且前人研究大灰藓生长最理想的遮光条件是为 60% 遮光率^[14]。蒸腾速率最高的是蕊型真藓,一方面蕊型真藓的饱和吸水率较大,另一方面该苔藓植物密集且根短小,导致比表面积大,使大量存储于植株体之间的水分更容易受到外界气候的影响而发生蒸腾,说明石漠化区假根短小密集的苔藓植物表层会促进水分的蒸发。

3.2 苔藓植物抗冲刷性探讨

石漠化薄层土壤流失是保土治理的重点,上述研

究表明 4 种苔藓都具有保护土壤不被水流冲刷的作用,与前人在具有良好的森林生态系统结构和苔藓层覆盖较为丰富的针叶林区进行研究得到虽然该区年降雨 1 900 mm,坡度较陡,但坡面几乎不发生侵蚀作用的结果保持一致^[15]。苔藓植物作为一种疏松多孔类似于海绵性状具有弹性力学特性的物质,且假根系能分泌粘胶物质和多糖类物质将土颗粒缠绕连接提高土体的黏聚力使其具有明显的截持降雨、消减动能、调节径流及维持土壤结构的作用^[16]。本次研究表明当冲刷流量较小时,苔藓植物都表现为较强的抗冲刷性能,随着冲刷流量增大,抗冲刷性呈现差异性。大灰藓和蕊型真藓表现出较强的抗冲刷能力,分析原因大灰藓的假根根长,糙率、饱和吸水率 3 个指标较小石藓和牛舌藓大,且抗冲刷能力与这些指标是正相关,说明较长的假根根系纵横交错的根网将土颗粒紧紧束缚住,形成假根土复合体,增加土体的迁移阻力,提高土层对滑移的抵抗力,有效增加了土层的抗剪强度;较高的糙率对冲刷水流具有消耗能量的作用,从而有效的降低了水流对土壤的侵蚀;苔藓植物层较大的饱和吸水率在一定程度上可降低土壤含水量、减小土壤孔隙水压力,提高土体的抗剪强度从而抵抗水流冲刷^[17]。蕊型真藓生物量、假根密度和饱和吸水率较小石藓和牛舌藓大,同一培养条件下,蕊型真藓较强的繁殖能力形成较大生物量抵抗水流冲刷;前人研究表明耐干藓类多采用茎叶碎片产生原丝体或芽孢的营养繁殖方式,缩短繁殖周期且摆脱水分限制,获得短暂的降雨后进行快速繁殖以增加种群的密度,实现种群延续。同时,数量众多的假根系统形成纵横交错的根网,提高根土界面的摩擦作用,提高土体的黏聚力,能有效保护土粒免于被冲蚀。有学者对植物根系研究指出土壤的抗冲性与根系(根径<1 mm)的分布密度呈指数关系^[18]。另外,本次研究苔藓植物抗冲刷强化值与脲酶、碱性磷酸酶和脱氢酶关系不大,但与蔗糖酶呈负相关;原因可能是蔗糖酶的主要作用是增加土壤中易溶性营养物质,冲刷下土壤中易溶性营养物质流失而导致抵抗冲刷能力下降^[19]。

3.3 苔藓植物对土壤养分改良探讨

4 种苔藓植物短期生长内对表层土壤全氮、全磷、全钾、总有机碳含量的影响不显著,主要受到土壤类型本身性质的影响;与前人研究苔藓结皮可以显著的改善结皮层土壤理化性质相反,主要原因是苔藓植物体型小,在短时间内对垂直空间表层土壤的影响受到植被类型的限制且影响的范围有限,前人研究的苔藓结皮土壤生长周期长,时间效应上累计养分以呈现显著差异性。但苔藓植物在较短生长周期内可以显著提高土壤酶活性,与前人研究结果保持一致,沙地生物结皮能明显提高土壤的酶活性,结皮层的各类土

壤酶活性是相同地带流动沙丘表层酶活性的数倍甚至数百倍^[20]。前人研究土壤活系统中,土壤酶是土壤生态系统变化的敏感指标,更易对土壤环境做出反应,苔藓植物表层土壤成为生物学性质最活跃的微域,所以在短期内土壤酶活性变化较显著^[21]。脲酶活性可以表征土壤氮素情况,水解生成 NH_3 是植物氮素营养的直接来源,4 种苔藓植物土壤的脲酶活性增强,有利于氮元素固定。碱性磷酸酶能促进土壤有机磷化合物水解,生成能为植物利用的无机态磷,4 种苔藓植物生长都有利于促进土壤—植被中磷元素的循环利用。脱氢酶可以反映土壤体系中微生物的量及其对有机物的降解能力,牛舌藓土壤中脱氢酶活性较其他 3 种苔藓植物显著,表明牛舌藓生长体系中微生物新陈代谢整体活性较其他 3 种苔藓植物强;另外,蔗糖酶是一种水解酶,它可以不可逆的催化蔗糖水解为 D—葡萄糖和 D—果糖,为微生物的生长提供能源,牛舌藓生长体系中蔗糖酶活性较其他苔藓植物强,水解较多的蔗糖为微生物生长提供更多养分,对提高微生物的整体活性有一定贡献。牛舌藓对土壤养分的影响较其他 3 种苔藓明显,前人研究牛舌藓主要为石生,较少土生,说明该苔藓植物利用自身生长特性改善石漠化石质环境能力更强^[22]。苔藓植物土壤各种酶之间的相互正相关(图 4)对土壤养分的有效化产生影响,更有利于改善石漠化区土壤碳、氮、磷等养分状况。

3.4 苔藓植物综合生态修复效益探讨

熵权法指标权重计算结果表明改良土壤养分权重最高,其次分别是蒸腾速率、饱和吸水率和抗冲刷性。与前人研究表明生物结皮的生态功能作用对结皮层土壤性质的影响是具有主导地位保持一致^[23]。石漠化脆弱的生态环境必须以蓄水、治土、造林为核心,其实质就是要解决水土保持与植被恢复问题。较丰裕的土壤养分和充足的水分有利于物种繁衍促进生态系统自然恢复以达到保土的效益。石漠化治理原则以顺应自然规律为基础,恢复重建工作中可以适当增加种植植被种源,营造更适宜乔木和灌木生长的小生境,是促进岩溶山区森林植被迅速恢复的有效办法,不应局限于乔、灌、草植物,基于以上对苔藓植物的生态修复效益研究,可以考虑将先锋植物苔藓作为修复种源之一,形成复合的植被群落,以更好实现群落自我更新演替,进而恢复生态系统的稳定性、生物多样性、生态功能等。上述对 4 种苔藓植物生态修复效益评价得到,裸岩地和耕地中优势苔藓植物牛舌藓和蕊型真藓优选为石漠化区生态恢复种源,它们不仅是石漠化区原生的优势植物,而且它们适生能力强、繁殖容易、管理方便。本次研究石漠化区 4 种苔藓植物的生态修复效益试验时间较短,苔藓植物对土壤中全氮、全磷、

全钾、总有机碳的影响并不显著,还需进一步研究长期生长的苔藓植物对土壤养分含量的影响进而更深入了解苔藓植物在石漠化区的生态修复效益。

4 结论

(1) 4 种苔藓植物饱和吸水率和蒸腾速率具有显著差异性。其中,饱和吸水率与蒸腾速率、干重、假根密度、假根根长都呈正相关;蒸腾速率与假根密度、干重、饱和吸水率呈正相关,与假根根长呈负相关。

(2) 与纯土组对比,苔藓植物对土壤中全氮、全磷、全钾、总有机碳含量的影响不显著($p < 0.005$),但均能提高土壤中碱性磷酸酶、脱氢酶、蔗糖酶、脲酶的活性($p < 0.005$)。4 种苔藓植物中牛舌藓对土壤养分改良效益最优。

(3) 4 种苔藓植物都具有抗冲刷的能力,大灰藓和蕊型真藓抗冲刷能力较牛舌藓和小石藓强。抗冲刷能力与假根密度、冲刷苔藓植物生物量、假根根长、饱和吸水率、糙率呈显著正相关,与蔗糖酶呈负相关,与脲酶、碱性磷酸酶、脱氢酶相关性不大。

(4) 牛舌藓和蕊型真藓在石漠化区发挥的生态修复效益优于大灰藓和小石藓。

参考文献:

- [1] 袁道先.岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J].草业科学,2008,25(9):19-25.
- [2] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
- [3] 国家林业和草原局.岩溶地区石漠化状况公报[Z].北京:国家林业和草原局,2018.
- [4] 方斌,黄俊文,杨学,等.云南土壤侵蚀因子特点分析[J].水利技术监督,2020(5):255-259.
- [5] 段华超,郑鑫华,李世民,等.云南石漠化地区植被恢复模式及优化建议[J].中国岩溶,2022,9(24):1-13.
- [6] 刘子琦,肖杰,李开萍,等.石漠化治理区经果林地土壤养分对种植模式的响应[J].西南农业学报,2020,33(4):821-827.
- [7] 肖林颖,吴秀芹.云南省建水县石漠化修复模式评价[J].北京大学学报:自然科学版,2020,56(6):1073-1080.
- [8] 罗征鹏,熊康宁,许留兴.生物土壤结皮生态修复功能研究及对石漠化治理的启示[J].水土保持研究,2020,27(1):394-404.
- [9] 刘俊华,段代祥,许卉,等.苔藓植物水文生态功能研究[J].滨州学院学报,2006,22(6):57-61.
- [10] 李倩.几种观赏苔藓植物对水体环境的适应和组织培养研究[D].上海:上海师范大学,2013.
- [11] Huang L, Zhang Z, Li X. The extrapolation of the leaf area-based transpiration of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area in the Tengger Desert, China [J]. Hydrology Research, 2015,46(3):389-399.

(下转第 210 页)

- 件分析[J].中国沙漠,2007,27(2):320-325.
- [20] 齐庆华,蔡榕硕,张启龙.华南夏季极端降水时空变异及其与西北部太平洋海气异常关联性初探[J].高原气象,2013,32(1):110-121.
- [21] 龙妍妍,范广洲,段炼,等.中国近54年来夏季极端降水事件特征研究[J].气候与环境研究,2016,21(4):429-438.
- [22] Wang B, Zhang M, Wei J, et al. Changes in extreme precipitation over Northeast China, 1960—2011 [J]. Quaternary International, 2013,298:177-186.
- [23] Li B, Chen Y, Chen Z, et al. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010? [J]. Atmospheric Research, 2016,167:275-284.
- [24] Zhao G, Mu X, Hörmann G, et al. Spatial patterns and temporal variability of dryness/wetness in the Yangtze River Basin, China[J]. Quaternary International, 2012,282:5-13.
- [25] 苏志重,石顺吉,张伟,等.1960—2010年福建省极端降水事件变化趋势分析[J].暴雨灾害,2016,35(2):166-172.
- [26] 陈丽娟,王壬,陈友飞.1960—2014年福建省极端气候事件时空特征及变化趋势[J].中国水土保持科学,2016,14(6):107-113.
- [27] Guo X, Wu Z, He H, et al. Variations in the start, end, and length of extreme precipitation period across China[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(5):2423-2434.
- [28] 陈星任,杨岳,何佳男,等.近60年中国持续极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):2068-2081.
- [29] 曾颖婷,陆尔.1961—2010年我国夏季总降水和极端降水的变化[J].气候变化研究进展,2015,11(2):79-85.
- [30] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,2003,58(9):1-10.
- [31] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [32] Sun W, Mu X, Song X, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960—2013 under global warming [J]. Atmospheric Research, 2016,168:33-48.
- [33] 卢珊,胡泽勇,王百朋,等.近56年中国极端降水事件的时空变化格局[J].高原气象,2020,39(4):683-693.
- [34] 戴声佩,罗红霞,李茂芬,等.1959—2016年华南地区极端降水事件变化特征[J].中国农业资源与区划,2022, 43(3):128-142.
- [35] 郭湘宇,吴正方,杜海波,等.福建省极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J].资源科学,2017,39(6):1084-1098.
- [36] 张超.夏季西太平洋副热带高压近60a特征变化及对中国夏季降水影响[C]//创新驱动发展提高气象灾害防御能力:S8副热带气象发展及生态环境影响,2013.
- [37] 钱代丽,管兆勇,王黎娟.近57a夏季西太平洋副高面积的年代际振荡及其与中国降水的联系[J].大气科学学报,2009,32(5):677-685.
- [38] 黄嘉佑,刘舸,赵昕奕,副高,极涡因子对我国夏季降水的影响[J].大气科学,2004,28(4):517-526.

(上接第202页)

- [12] 徐燕云,吴晓梅,沈秋仙,等.铅胁迫对大灰藓几种生理指标的影响[J].武汉植物学研究,2010,28(5):606-611.
- [13] 李春蕊.大气颗粒物对细叶小羽藓(*Haplcladium microphyllum*)和大灰藓(*Hypnum plumaeforme*)生理及叶表面微生物群落结构的影响[D].山东青岛:青岛理工大学,2018.
- [14] 毛可红,朱姝蕊.不同基质容器栽培对大灰藓生长的影响[J].中国农业信息,2016,2(3):129-130.
- [15] 张永昌,何林,郭水良.植物功能多样性及其在苔藓植物中应用的研究[J].上海师范大学学报:自然科学版,2020,49(1):9-17.
- [16] 陈勤,孙冲,方发明.苔藓植物的生态环境指示作用[J].世界林业研究,2013,26(2):19-23.
- [17] 杨贵森,黄磊,杨利贞,等.植物根系水力再分配量及影响因素分析[J].干旱区研究,2021,38(5):1411-1419.
- [18] 覃森.黄土区典型草被生长过程中根系对土壤抗冲性影响的试验研究[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [19] 刘瑞丰,李新平,李素俭,等.商洛地区土壤蔗糖酶及过氧化氢酶与土壤养分的关系研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):182-185.
- [20] 孟杰,卜崇峰,赵玉娇,等.陕北水蚀风蚀交错区生物结皮对土壤酶活性及养分含量的影响[J].自然资源学报,2010,25(11):1864-1874.
- [21] Newton A E, Cox C J, Duckett J G, et al. Evolution of the Major Moss Lineages: Phylogenetic analyses based on multiple gene sequences and morphology[J]. Bryologist, 2000,103(2):187-211.
- [22] Šinžar-sekulić Jasmina B, Sabovljević M S, Stevanović B M. Comparison of desiccation tolerance among mosses from different habitats[J]. Archives of Biological Sciences, 2005,57(3):189-192.
- [23] 单飞彪.自然和人工藓类结皮层对土壤及植物营养元素含量的影响初探[D].呼和浩特:内蒙古大学,2009.