

4种苔藓植物在喀斯特石漠化地区的生态修复意义

刘润^{1,2}, 申家琛^{1,2}, 张朝晖^{1,2}

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001;

2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001)

摘要: 为探求苔藓植物在石漠化地区的生态修复意义, 筛选出4种石漠化地区常见的苔藓, 即美灰藓(*Eurohypnum leptothallum*)、小青藓(*Brachythecium perminusculum*)、双色真藓(*Bryum dichotomum*)和多疣细羽藓(*Cyrt-hypnum pygmaeum*), 测定其生物量、饱和吸水率、根系密度、蒸腾速率和抗冲刷能力, 并初次将该4种苔藓应用于石漠化修复的实践中, 对其土壤酶活性进行了1年的跟踪监测。结果表明: (1) 4种苔藓持水保水能力差异显著, 其生物量由大到小依次为美灰藓>双色真藓>小青藓>多疣细羽藓; 饱和吸水率最低的是多疣细羽藓(660.78 ± 3.46)%, 最高的是美灰藓($1\,627.82 \pm 4.68$)%。(2) 双色真藓的蒸发速率最高可达 $6.63 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 其水分更容易丧失; 美灰藓蒸发速率为 $0.93 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 水分较其他苔藓不易丧失。(3) 4种苔藓的抗冲刷能力与其假根的根长密度、根重密度、生物量存在显著正相关关系, 美灰藓在各组冲刷试验中表现出较强的抗冲刷性, 可以有效减少土壤流失。(4) 4种苔藓均可有效提高被培养土壤的酶活性。苔藓层生物量、抗冲刷强化值、假根根系密度与土壤脱氢酶、脲酶呈正相关关系。4种苔藓均具有较高的水土保持效益, 其中美灰藓的表现更为显著, 建议利用物种演替规律将苔藓应用于石漠化修复的实践中。

关键词: 石漠化; 苔藓; 水土保持; 生态修复

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0141-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.022

Study on the Significance of Ecological Restoration of Four Bryophytes in Karst Rocky Desertification Area

LIU Run^{1,2}, SHEN Jiachen^{1,2}, ZHANG Zhaohui^{1,2}

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of

Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001;

2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001)

Abstract: In order to explore the ecological restoration significance of bryophytes in rocky desertification areas, four common bryophytes (*Eurohypnum leptothallum*, *Brachythecium perminusculum*, *Bryum dichotomum* and *Cyrt-hypnum pygmaeum*) in rocky desertification areas were selected. The biomass, saturated water absorption, root density, transpiration rate, and anti-scour ability were measured. For the first time, these four bryophytes were applied to the practice of rocky desertification restoration, and their soil enzyme activities were tracked and monitored for one year. The results showed that the water holding capacity of the four bryophytes was significantly different. (1) The biomass of the four bryophytes was ranked as follows: *E. leptothallum* > *B. dichotomum* > *B. perminusculum* > *C. pygmaeum*. The lowest saturated water absorption was *C. pygmaeum* (660.78 ± 3.46)%, and the highest was *E. leptothallum* ($1\,627.82 \pm 4.68$)%. (2) *Bryum dichotomum* showed that highest transpiration rate ($6.63 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$) and was more easily to lose moisture, while *E. leptothallum*'s moisture was less likely to lose than other bryophytes as it showed the lowest transpiration rate ($0.93 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$). (3) There was a significant positive correlation between anti-erosion ability and root length density, root weight density and biomass. *Eurohypnum leptothallum* showed strong erosion resistance in each set of scouring experiments and could effectively reduce soil loss. (4) All four bryophytes could effectively increase the enzyme activity of the cultured soil. The bryophyte biomass, anti-erosion enhancement, and pseudo root density were positively correlated with

收稿日期: 2018-06-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(31360043, 31760050)

第一作者: 刘润(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事苔藓生态修复及监测研究。E-mail: 18084161024@163.com

通信作者: 张朝晖(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事植物学、生态学和生物地理学研究。E-mail: academiclife@126.com

soil dehydrogenase and urease activity. All four kinds of bryophytes had high water and soil conservation benefits, and the benefit of *E. leptothallum* was more pronounced. It is recommended to use bryophyte in rocky desertification repair practices by using species succession rules.

Keywords: rocky desertification; bryophytes; soil and water conservation; ecological restoration

石漠化是土地退化的一种极端形式,是阻碍岩溶地区经济发展的重大生态问题^[1]。土地石漠化的加剧阻碍了生态系统的稳定,如:土壤受侵蚀后严重退化、水土流失加剧、物种多样性锐减、植被覆盖率下降、增加旱涝灾害爆发风险等^[2]。因此,建立一套行之有效的石漠化生态修复体系对岩溶地区的生态经济建设具有重要的意义。目前,国内石漠化生态修复措施主要有封山育林、建设乔灌木防护林、退耕还林、还草和种植经济作物等^[3]。但这些以种植维管植物为主的治理模式因缺乏科学理论依据支撑,依然存在许多不足,如:物种多样性配置不足,导致生态系统结构简单、稳定性差、抵抗力弱,易形成季节性石漠,修复成果难以维系、易受恶劣天气和病虫害的影响等^[4-5]。

苔藓是一类对环境变化非常敏感的高等植物,因其自身独特的生理机制而对石漠化环境具有良好的适应性。苔藓生命活动所需水源完全依赖于雨水或空中水分,在降雨过程中能快速补充所需水分来面对石漠化地区的临时干旱^[6-7]。此外,苔藓还可以通过叶表面芒刺、透明细胞和乳突反射光照,在调节自身温度的同时也可改变土壤温度。这不仅为植物体自身的生存提供保障,也对基质微环境的保护具有重要意义^[8-9]。

石漠化地区苔藓研究多集中于物种分布特征及生理适应性特征的研究,苔藓对石漠化修复功能仅停留在理论阶段。本文选取 4 种石漠地区常见的苔藓,系统地测定了它们的生态修复效益,并初次将苔藓应用于石漠化修复实践,以期为后期石漠化生态修复提供科学有效的数据支撑,为石漠化的修复工作提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵阳市观山湖区(26°37′08.76″—26°37′16.14″N,106°37′54.49″—106.36′91.06″E)的贵阳喀斯特公园,占地面积约 30 hm²,海拔 1 285 m,属于亚热带湿润温和型气候,年平均气温 14.9 ℃,年降水量 1 100~1 200 mm。区域内为碳酸盐岩,石芽

广布,水土流失严重,植被退化,呈现类似荒漠的现象,是典型的城市石漠化景观^[7]。研究区域内乔灌木稀少,多为草本植物,常见植物有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、藨草(*Phalaris arundinacea*)、紫毛千里光(*Senecio villiferus*)、云南莎草(*Cyperus duclouxii*)、地梗鼠尾草(*Salvia scapiformis*)、黄鹌菜(*Youngia japonica*)、小飞蓬(*Conyzaca nadensis*)和乱子草(*Muhlenbergia huegelii*)等。

1.2 野外工作

1.2.1 样品采集 2015 年 9 月至 2016 年 10 月先后 5 次对研究区域进行观测和样品采集,在研究区域共设 5 个样地,每个样地设 5 个样点,每个样点设 6 个 10 cm×10 cm 样方,共采集苔藓群落样本 150 份。现场测量各样点海拔和经纬度(GPS eTrex20)、环境温湿度(群落上方 3 cm 处使用温湿度仪 AR847+测量)、光照度(照度计 AR823)、坡度(SYNTEK);测量各样方植物群落的密度、平均冠幅、盖度平均胸径和平均高度,并详细记录每份标本的采集编号、生境等信息。结皮土壤和苔藓标本置于封口袋中运回试验室。土壤过 2 mm 筛去除大颗粒石子和植物体后放在 4 ℃的冰箱中保存。

1.2.2 野外培养 经实地考察和物种多样性统计,选取该石漠化区域广泛分布的 4 种苔藓(美灰藓 *Eurohypnum leptothallum*、小青藓 *Brachythecium perminusculum*、双色真藓 *Bryum dichotomum* 和多疣细羽藓 *Cyrtohypnum pygmaeum*)作为研究对象。首先,将这 4 种苔藓层结皮(厚度 1 cm,生物量大致为 25.69 g/m²)洗净根部泥沙;其次,将同种苔藓拼凑成 20 cm×20 cm 的方形,并在培养箱(温度 23 ℃,湿度 80%RH)中石质基质上进行 1 个月的培养;最后,将培养后的苔藓层置于研究区内石漠化区域进行野外试验,将 20 个方形苔藓层分为 5 组(每组苔藓层分别对应以上 4 种苔藓)置于裸露岩石上进行覆盖,取已标定过的贫瘠土壤 120 g 充填于苔藓层下,每 3 个月取土 1 次,周期为 1 年。各组生境信息见表 1。

表 1 各试验组生境信息

分组	经度	纬度	温度/℃	湿度/%	光照/Lux	坡向/(°)
1	106°36′53.11″E	26°37′8.43″N	20.2	50.6	4150	N15°E
2	106°36′54.35″E	26°37′9.01″N	23.0	54.0	5280	N9°W
3	106°36′57.23″E	26°37′8.24″N	23.6	50.9	5300	S69°W
4	106°36′53.01″E	26°37′7.57″N	22.5	52.1	5100	N23°W
5	106°36′54.33″E	26°37′12.50″N	24.8	45.7	6200	N20°W

1.3 室内工作

1.3.1 植物标本鉴定 将采回的标本分类整理,并根据经典形态学分类方法进行标本的鉴定工作。使用 HWG-1 型双筒解剖镜以及 SMARTe·320 型光学显微镜结合《中国苔藓志》第4卷、第6~8卷等^[10-13]现代苔藓植物分类资料进行苔藓植物鉴定。

1.3.2 生物量、饱和吸水量和蒸腾速率的测定 先将藓类植物与其结皮层分离,分别过0.3,0.2 mm分样筛清洗,直至冲洗干净;再将冲洗干净的藓类置于网中放在室温条件下晾干,每份样品设置3个平行样品,24 h后称量鲜重。将称重后的藓藓置于烘箱中,在60℃的条件下烘48 h后测量干重。吸水过后置于过滤网中,待不滴水后称其饱和吸水重。再将称量完饱和水重的藓藓放置于恒定温度为14.4℃,相对湿度(RH)为63.8%的条件下,使用枝叶插瓶称重的方法^[14]分别在20,40,60,90 min,2,3,4,8,12,24,28,32,36,40 h后使用 METTLER TOLEDO 1/10 000 天平测量蒸腾水量,并计算蒸腾速率。

苔藓层的抗冲刷能力采用抗冲刷能力强化值来表示。利用冲刷槽装置进行试验,该装置在蒋定生^[15]设计基础上结合石漠化裸岩环境稍作改动。冲刷槽试验主要包括3部分:(1)使用1 cm苔藓厚度,冲刷流量为1.000 L/min分别在坡度为20°,30°,40°,50°,70°的条件下测定;(2)冲刷流量固定为1.000 L/min,坡度为30°,使用厚度分别为0.5,1.0,1.5,2.0 cm的藓藓层进行冲刷试验;(3)在藓藓层厚度为1.5 cm,坡度为40°的条件下,分别控制冲刷流量为0.08,0.12,0.16,0.55,1.00,1.70 L/min进行冲刷试验。每组试验重复5次。将冲出的泥沙过滤后置于105℃烘箱内12 h后称重。

1.3.3 土壤酶活性测定 土壤脱氢酶:取5 g过1.25 mm筛的新鲜土壤于100 mL锥形瓶中,分别加入2 mL TTC溶液,2 mL蒸馏水并混匀。在37℃恒温培养箱中避光培养6 h。加5 mL甲醇于培养后的锥形瓶中,并振荡5 min,然后静置5 min,将锥形瓶中所有物质过滤到比色管中,并用甲醇清洗锥形瓶2~3次并过滤,并定容至50 mL,于485 nm下测定吸光度,以每克干土生成的 TPF 为脱氢酶的1个活性单位。

土壤过氧化氢酶:取2 g过1.25 mm筛的新鲜土壤于100 mL锥形瓶中,分别加入40 mL蒸馏水和5 mL 0.3% H₂O₂,塞上瓶盖于振荡器振荡20 min后,迅速加入5 mL 3 mol/L硫酸稳定剂。将悬液过滤后并吸取25 mL滤液于锥形瓶中。用0.1 mol/L的高锰酸钾滴定至粉红色。

土壤多酚氧化酶:取1 g过1.25 mm筛的新鲜土壤于100 mL锥形瓶中,加4 mL柠檬酸—磷酸缓

冲液,再加10 mL 1%的邻苯三酚溶液并振荡,然后在30℃的培养箱中培养2 h。培养完成后加入35 mL后于振荡器上振荡15 min,静止5 min后在430 nm处进行比色。

土壤脲酶:取5 g过1.25 mm筛的新鲜土壤于100 mL锥形瓶中,加1 mL甲苯,15 min后加10 mL 10%的尿素液和pH 6.7的柠檬酸缓冲液,摇匀后封口并于37℃恒温培养箱中培养24 h,培养后过滤并取滤液3 mL于50 mL比色管中定容,在578 nm处比色。

1.4 数据分析与处理

苔藓层抗冲刷性强化值 $R\%$ ^[16]:

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

式中: sw_1 为去掉苔藓层后的土壤流失量(g/h); sw_2 为有苔藓层覆盖时的土壤流失量(g/h);

苔藓生物量 $B(g/m^2)$:

$$B = D \times C \times 10^2 \quad (2)$$

式中: D 为藓藓植物干重(g/m²); C 为藓藓盖度(%)。

苔藓饱和吸水率 $W(\%)$:

$$W = \frac{ww - dw}{dw} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ww 为饱和吸水重(g/m²); dw 为藓藓干重(g/m²);

藓藓饱和吸水量 S :

$$S = B \times W \quad (4)$$

式中: B 为生物量(g/m²); W 为饱和吸水率(%)。

蒸腾速率 T 为:

$$T = \frac{tw}{pw \times t} \quad (5)$$

式中: tw 为蒸腾水量(g); pw 为植物鲜重(g/m²); t 为蒸发时间(h)。

所有数据的差异性检验采用 SPSS 21.0 软件完成;图表的绘制采用 Excel 2016 和 Origin 9.0 软件完成;PCA 分析过程在 CANOCO 5.0 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 4种苔藓的基本生理指标

对4种藓藓的基本生理指标进行了测试。从表2可以看出,4种藓藓的生物量、根系密度、饱和吸水量、饱和吸水率都存在显著性差异($P < 0.05$)。除鲜重外美灰藓在各项指标中均占明显优势。4种藓藓的饱和吸水量是干重的131.58%~199.69%,体现了藓藓植物吸水量大的特点。

2.2 4种藓藓的蒸发速率

通过对该4种藓藓植物的蒸腾速率研究(图1)发现,4种藓藓的蒸腾速率随时间推移基本呈下降趋势。由于各种藓类的保水机制不同,所以出现了不同

的蒸腾速率;其中双色真藓的蒸腾速率最高可达6.63 g/(kg·h),且下降较快,说明双色真藓的水分更容易丧失。

小青藓和美灰藓的蒸腾速率的最高值分别为

0.81,0.93 g/(kg·h),在0~40 h内呈波动下降,且下降缓慢,说明其保水机制较好,水分不易丧失。多疣细羽藓的蒸腾速率最高值为2.10 g/(kg·h),达到最高点后保持总体下降趋势。

表 2 4 种苔藓植物的基本生理指标

苔藓植物	生物量/ (g·m ⁻²)	假根根重密度/ (g·cm ⁻³)	假根根长密度/ (cm·cm ⁻³)	干重/ (g·m ⁻²)	鲜重/ (g·m ⁻²)	饱和 吸水率/%	饱和吸水量/ (g·m ⁻²)
多疣细羽藓	22.71±0.57d	1.52±0.42d	80.00±17.84d	114.32±3.52d	568.56±4.76b	660.78±3.46d	150.01±2.43d
小青藓	24.05±0.61c	2.44±0.26c	120.01±23.67c	198.31±7.68c	215.00±3.49d	1041.83±5.37b	396.42±0.48b
美灰藓	34.83±2.41a	4.96±0.32a	380.03±25.78a	474.21±3.47a	554.46±4.62c	1627.82±4.68a	563.86±2.59a
双色真藓	30.98±1.25b	3.77±0.75b	284.03±30.24b	324.46±2.23b	1172.57±10.24a	983.71±2.24c	216.22±2.41c

注:表中同列不同小写字母表示各苔藓植物各生理指标间差异显著(P<0.05)。下同。

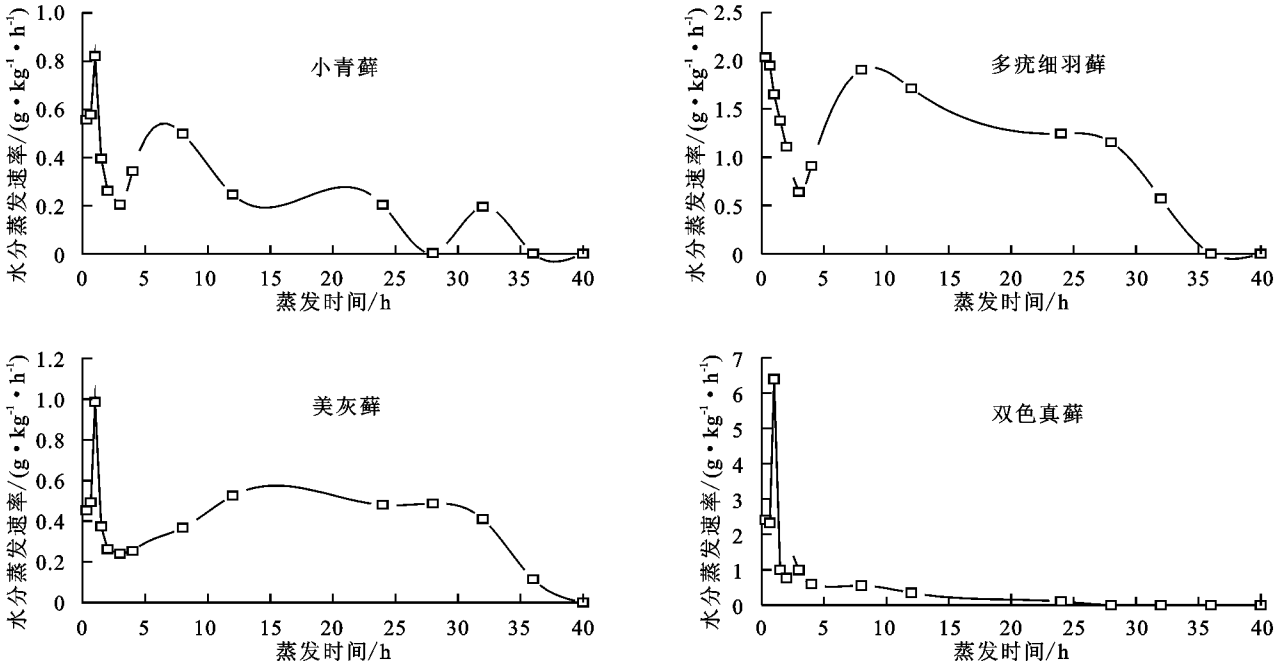


图 1 4 种苔藓植物的蒸腾速率

2.3 4 种苔藓的抗冲刷能力

对 4 种苔藓在不同条件下的抗冲刷能力进行试验后发现。在不同径流条件下,4 种苔藓对土壤的强化作用存在显著差异(P<0.05)(表 3)。表现为随冲刷水流量的增加 4 种苔藓抗冲刷强化值都呈递减趋势。在面对小冲刷量时,4 种苔藓都具有较好的抗冲刷性,强化值都在 98% 以上,差异并不显著(P>0.05)。随冲刷水流量增大,4 种苔藓差异逐渐显著(P<0.05)。在其他条件相同的情况下,面对不同冲刷水流量 4 种苔藓抗冲刷能力表现为美灰藓>双色真藓>小青藓>多疣细羽藓。

在不同坡度条件下,4 种苔藓的抗冲刷性也存在显著差异(P<0.05)(表 4)。在坡度为 20°时 4 种苔藓的抗刷能力较强,随坡度增加苔藓抗冲刷能力减弱。美灰藓在不同坡度的抗冲刷能力显著大于其他 3 种苔藓。在其他条件相同的情况下,坡度发生变化时,苔藓抗冲刷能力表现为美灰藓>双色真藓>小青藓>多疣细羽藓。

表 3 不同径流量下 4 种苔藓植物抗冲刷能力

冲刷水流量/ (L·h ⁻¹)	双色 真藓/%	美灰藓/ %	小青藓/ %	多疣细 羽藓/%
4.8	98.63±2.1a	99.52±1.2a	98.30±1.5a	98.33±1.0a
7.2	97.91±1.1a	98.55±1.5a	96.54±0.5b	95.72±1.0b
9.6	94.18±1.2b	97.96±2.2a	94.13±0.5b	91.82±1.3c
33	89.72±0.7b	93.81±1.4a	88.32±0.6c	87.90±1.0c
60	84.97±0.5b	92.68±2.4a	83.47±1.3c	79.66±2.7c
102	80.21±0.1c	85.79±2.7a	81.55±0.5b	77.59±2.0d

表 4 不同坡度下 4 种苔藓抗冲刷能力

坡度/(°)	双色真藓/%	美灰藓/%	小青藓/%	多疣细羽藓/%
20	96.88±0.8b	98.78±1.0a	96.84±0.4b	96.04±1.2b
30	95.41±1.0b	98.17±1.6a	94.39±0.7b	92.39±2.1b
40	92.51±2.1a	92.54±2.3a	87.88±1.3b	86.98±0.5b
50	87.75±1.7b	90.94±1.3a	84.64±0.8c	84.41±1.0c
70	84.89±0.4b	87.14±1.0a	81.10±2.2c	79.98±2.1c

最后,通过对不同厚度苔藓结皮抗冲刷能力测定发现(表 5),苔藓层可以有效地提高土壤的抗冲刷能力。随苔藓层厚度的增加,苔藓结皮抗冲刷能力增强。苔藓层厚度为 0~1 cm 时,双色真藓结皮的抗冲刷能力显著大于其他苔藓。随苔藓层厚度增加,美灰

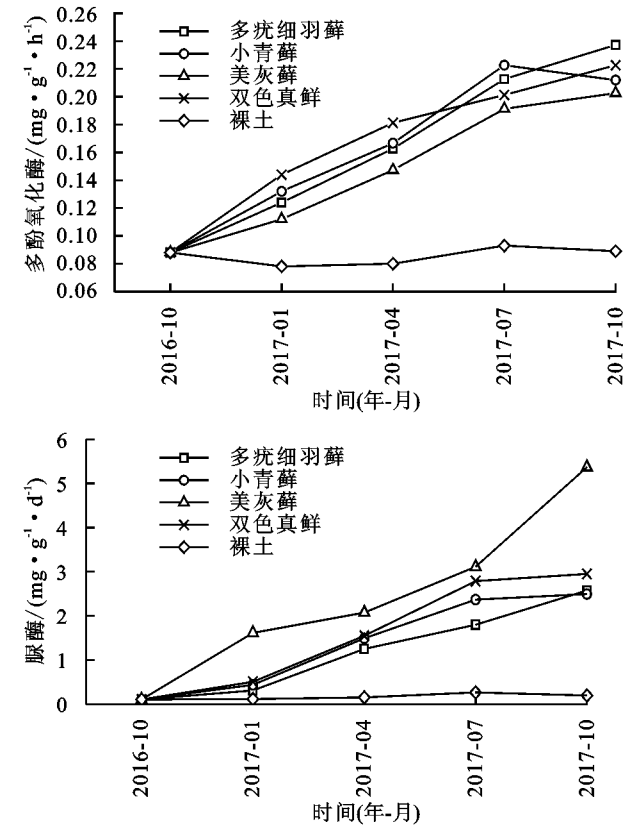
藓抗冲刷能力逐渐突出,且显著高于其他 3 种苔藓。

表 5 不同厚度苔藓的抗冲刷能力

苔藓 厚度/cm	双色 真藓/%	美灰藓/ %	小青藓/ %	多疣 细羽藓/%
0.5	93.54±0.3a	92.18±0.5b	89.20±0.8c	80.01±1.1d
1.0	94.67±1.1a	93.74±0.7a	91.96±1.5b	87.03±2.3c
1.5	97.40±1.8a	98.98±1.4a	92.34±0.7b	89.21±1.0c
2.0	98.34±0.5b	99.22±0.2a	94.96±2.1c	91.45±1.1d

2.4 4 种苔藓对土壤酶活性的影响

通过对土壤的填埋试验发现(图 2,图 3),4 种苔藓可以显著提高土壤的酶活性($P<0.05$),从填埋土壤的秋季(2016 年)到冬季(2017)土壤脱氢酶和脲酶成倍增长,多酚氧化酶和过氧化氢酶也出现了大幅增长,其中有美灰藓覆盖后的土壤中脱氢酶、脲酶较填埋前分别提高了 31.8,13.9 倍。从 2016 年 10 月至 2017 年 10 月 4 种苔藓土壤酶活性基本上呈递增趋



势,在冬季、春季、夏季增幅明显。过氧化氢酶增长最快的是美灰藓覆盖下的土壤,达 1.591 (0.1 mol/L KMnO_4)。4 种苔藓对土壤过氧化氢酶活性增长速率由大到小依次为美灰藓>小青藓>多疣细羽藓>双色真藓。多疣细羽藓可有效提高土壤多酚氧化酶活性,到 2017 年 10 月多疣细羽藓覆盖下土壤较培养前提高 1.697 倍,达 0.237 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。按土壤多酚氧化酶增长速率由大到小依次为多疣细羽藓>双色真藓>小青藓>美灰藓。美灰藓对土壤脱氢酶活性有较强增强作用,较培养前增强了 123.222 倍,达 3.614 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$,按土壤脱氢酶活性增长速率由大到小依次为美灰藓>双色真藓>小青藓>多疣细羽藓。美灰藓对土壤脲酶活性具有显著增强的作用,较培养前增长 48.71 倍,按土壤脲酶活性增长速率由大到小依次为美灰藓>双色真藓>小青藓>多疣细羽藓。

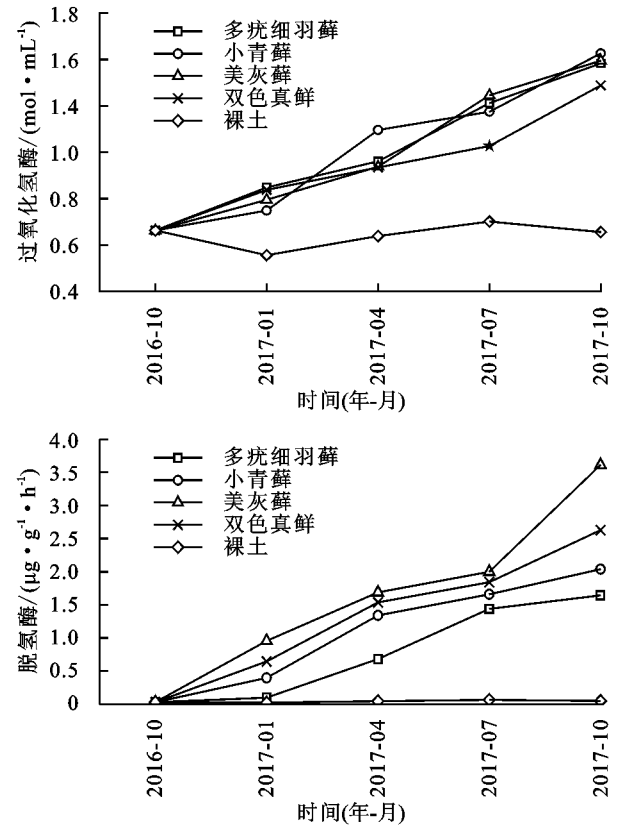


图 2 4 种苔藓下不同土壤酶活性季节变化趋势

2.5 相关性与 PCA 分析

对 4 种苔藓各项指标进行相关性研究(表 6)发现:(1)苔藓的抗冲刷强化值与苔藓生物量、假根根重密度、假根根长密度呈极显著正相关($r<0.01$),与干重、脱氢酶活性、脲酶活性呈显著正相关($r<0.05$);(2)苔藓生物量与假根根长密度极显著正相关,与假根根重密度、干重、脱氢酶活性、脲酶活性呈显著正相关;假根根重密度与干重、土壤脲酶活性呈极显著正相关,与假根根长密度、土壤脱氢酶活性呈显著正相关;(3)假根根长密度与干重、脱氢酶、脲酶呈显著正

相关;(4)干重同土壤脱氢酶活性、脲酶活性呈极显著正相关。饱和吸水量同土壤多酚氧化酶呈显著负相关;(5)土壤脱氢酶与脲酶呈显著正相关。表明苔藓层抗冲刷能力和苔藓层下土壤酶活性与苔藓的生物量和苔藓假根系密度存在密切关系。
为综合比较 4 种苔藓的生态修复差异,采用主成分分析(PCA)的方法对测定的评价指标和 4 种苔藓进行二维排序。在排序图中,箭头代表各生态修复效益评价指标,三角形代表 4 种苔藓。箭头间夹角的余弦值是各指标间的相关性系数,夹角接近 90° 代表相

关性不大,物种垂直投影于箭头延长线上,投影点的相对位置代表物种在各指标上的最适值。物种间的距离越短表示其水土保持能力越接近。在图 4 中第一轴的解释量达 69.48%,第二轴解释量达29.20%,共解释了 98.68%,可以反映大部分信息。

4 种苔藓的生态修复能力存在明显差异。美灰藓的饱和吸水量、饱和吸水率、干重、根重密度、根长

密度、生物量、抗冲刷能力等各项指标均强于其他 3 种苔藓,同时美灰藓可显著提高土壤中脱氢酶和脲酶活性;双色真藓的鲜重最高;多疣细羽藓的对土壤中多酚氧化酶的提高强于其他 3 种苔藓,小青藓对土壤中过氧化氢酶的提高强于美灰藓、双色真藓、多疣细羽藓。按其生态修复效益由高到低依次为:美灰藓>双色真藓>小青藓>多疣细羽藓。

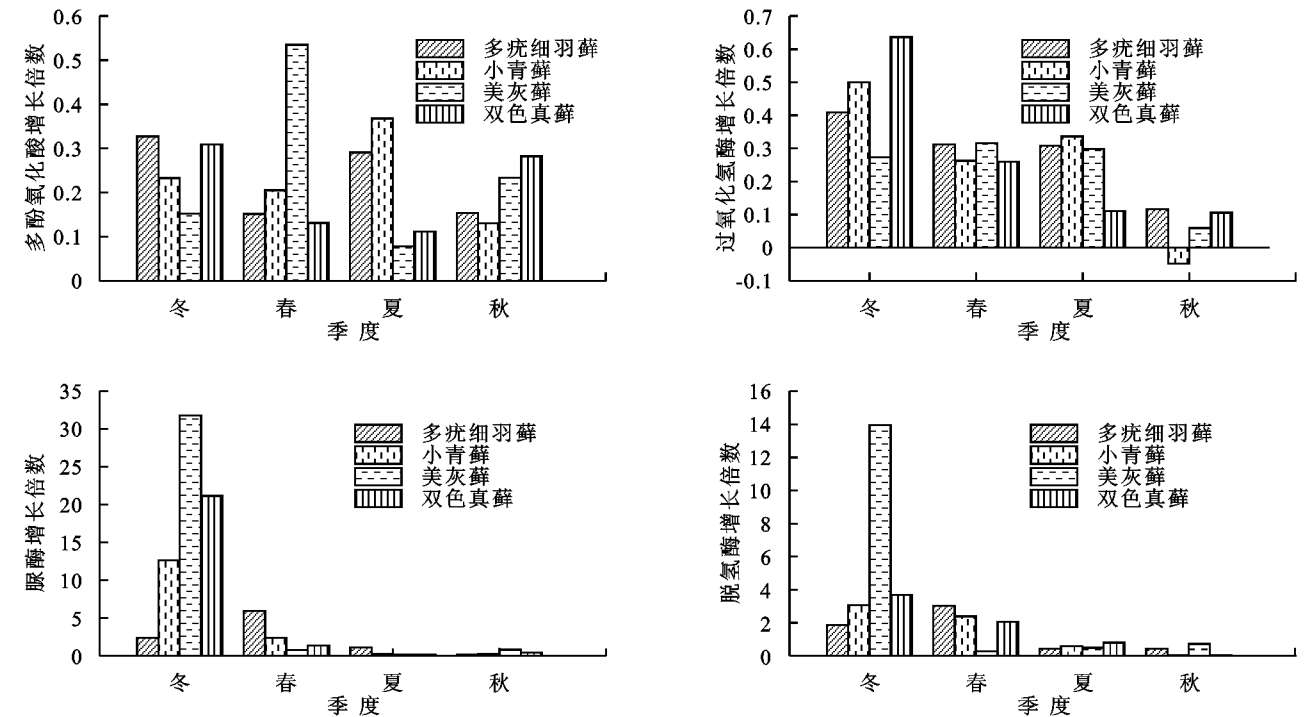


图 3 在 4 种苔藓下培养的土壤酶活性增长率变化

表 6 4 种苔藓各指标相关性研究

项目	抗冲刷能力	生物量	假根根重密度	假根长密度	干重	鲜重	饱和吸水率	饱和吸水量	过氧化氢酶	多酚氧化酶	脱氢酶	脲酶
抗冲刷能力	1											
生物量	0.999**	1										
假根根重密度	0.992**	0.986*	1									
假根长密度	1.000**	1.000**	0.989*	1								
干重	0.989*	0.984*	0.997**	0.987*	1							
鲜重	0.425	0.447	0.330	0.433	0.285	1						
饱和吸水率	0.853	0.839	0.902	0.848	0.922	-0.108	1					
饱和吸水量	0.628	0.605	0.710	0.619	0.738	-0.430	0.941	1				
过氧化氢酶	-0.019	-0.027	0.045	-0.019	0.112	-0.840	0.448	0.653	1			
多酚氧化酶	-0.690	-0.662	-0.775	-0.677	-0.782	0.281	-0.931	-0.960*	-0.433	1		
脱氢酶	0.976*	0.972*	0.986*	0.975*	0.996**	0.225	0.941	0.770	0.195	-0.789	1	
脲酶	0.984*	0.976*	0.998**	0.980*	0.993**	0.312	0.906	0.724	0.037	-0.800	0.979*	1

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

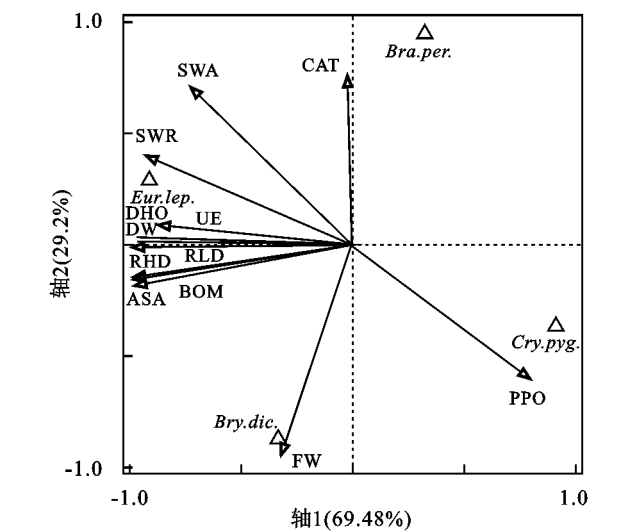
3.1 4 种苔藓的生物量及持水保水能力的探讨

生长在石漠化地区的植物具有耐干旱贫瘠、喜钙的特征。研究中发现 4 种苔藓的生物量存在显著差异,其中美灰藓生物量最大,说明其更容易适应石漠化地区的干旱环境而大规模生长。在极端干旱的环境中,水分是引起环境变异的主要因子^[17]。苔藓植

物作为一种变水植物,对水分的贮存量相当可观,在研究中美灰藓的饱和吸水率达 1 627.82%。苔藓植物的生物量越大,饱和吸水量越高,越有利于其在短时间内快速贮存大量的水分,供机体所需^[18]。

植物根系密度的大小直接关系到苔藓在基质上的附着能力和固定土壤提高抗冲刷性的能力。苔藓植物附着于基质上,其根系的分泌物质可以改善土壤理化性

质,促进物质能量交换,对微环境具有明显的改良作用。在研究中美灰藓的的根重密度和根长密度显著高于其他 3 种苔藓,分别是多疣细羽藓的3.26,4.75 倍。



注:ASA 为抗冲刷能力;BOM 为生物量;RHD 为假根根重密度;RLD 为假根长密度;DW 为干重;FW 为鲜重;SWR 为饱和吸水率;SWA 为饱和吸水量;CAT 为过氧化氢酶;PPO 为多酚氧化酶;DHO 为脱氢酶;UE 为脲酶;Cyr.pyg. 为多疣细羽藓;Bra. per. 为小青藓;Eur. lep. 为美灰藓;Bry. dic. 为双色真藓。

图 4 4 种苔藓生态修复效益 PCA 二维排序

植物的保水效益是其在石漠化地区生长的关键要素。在研究中 4 种苔藓的蒸腾速率呈现出显著差异,其原因可能是多种因素造成的,包括生理构造如苔藓植物通过卷曲叶片、叶细胞上的疣状突起或叶尖白毛来反射太阳辐射,以减小自身水分的丧失^[19]等。苔藓植物水分的保水效果与生活型及生长密度有关,双色真藓为矮丛集藓类,植株直立生长,多生长于岩石缝隙中^[20],该类苔藓不能大片生长,水分不易保存;而多疣细羽藓、小青藓、美灰藓匍匐茎纵横交错成片生长^[21],形成厚厚的结皮层,有上层枝叶覆盖可以减少下层苔藓水分丧失。吸水保水效率高的藓类更容易改善周围水湿条件,改良贫瘠的生存环境,促进其他物种的殖居,丰富生物多样性。小青藓和美灰藓等具有较高的吸水保水效率,这对于植物恢复、蓄水作用及喀斯特石漠化治理等方面具有十分重要的意义。较高生物量的苔藓并配合高效的吸水保水机制将更有利于石漠化的修复。

3.2 4 种苔藓的抗冲刷能力研究

通过对 4 种苔藓在不同条件下的抗冲刷试验发现:地表径流的增大、坡度的增加和苔藓层厚度的降低都使苔藓的抗冲刷能力下降。但在不同的条件下 4 种苔藓的抗冲刷能力差异显著($P<0.05$),其中小青藓和美灰藓在不同条件下都保持着较高的抗冲刷能力,其原因可能是:(1)这 2 种苔藓的根长和根重密

度显著高于其他 2 种苔藓,且根系密度与抗冲刷强化值呈显著正相关关系($r<0.05$),说明其根系对土壤的穿插、缠绕有良好的固结作用,提高了土壤的抗冲刷性;(2)小青藓与美灰藓均有较高的生物量,抗冲刷强化值与生物量存在显著正相关关系($r<0.05$)。高生物量苔藓在贮存大量土壤的同时,通过其高效的吸水效率也可以调蓄岩面径流。在喀斯特石漠化地区植物的生存环境恶劣,土壤是植物生存的必备条件,苔藓在岩面的殖居为直立陡峭的岩石上土壤的贮存和贫瘠环境的改良提供了可能。

3.3 4 种苔藓土壤酶活性的探讨

在研究中发现有苔藓层的覆盖可以显著提高土壤中的脱氢酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶和脲酶活性。土壤过氧化氢酶促进过氧化氢的分解有利于防止它对生物体的毒害作用,与土壤有机质含量和微生物数量存在显著相关关系^[22]。研究中被培养土壤的过氧化氢酶显著上升说明在苔藓的覆盖下促进了微生物的生长和迁居,增加了有机质的含量;土壤脱氢酶活性属于氧化还原酶系,可反映土壤中微生物新陈代谢的整体活性^[23],在试验中土壤脱氢酶活性的增加可能与微生物量的增加有关,微生物的新陈代谢强烈,与前面过氧化氢酶活性的研究关系耦合;土壤多酚氧化酶主要源于土壤微生物,根系分泌物及动植物残体分解释放的酶,人们多把它用于土壤环境修复^[24],试验中多酚氧化酶活性的显著增加说明在苔藓的覆盖下动植物的残体加快分解,为原有贫瘠的土壤提供大量有机质,促进微环境改善。脲酶的酶促反应产物氨是植物氮源之一,其活性直接反映土壤有机态氮向有效态氮转化能力和土壤无机氮的供应能力,在苔藓的覆盖下苔藓根系固氮能力增强,其根系分泌物可促进有效态氮的转化。有研究^[25]表明,土壤酶活性可表征土壤水湿状况,脱氢酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶和脲酶活性的增加可能也是在苔藓层的覆盖下土壤水湿状况改善的结果。

经相关性分析发现,影响苔藓抗冲刷能力的主要是苔藓植物假根的密度和生物量的大小,同时抗冲刷能力强的物种同时有助于提高土壤中脱氢酶、脲酶活性。其原因可能是由于:(1)抗冲刷能力强的物种能有效保存土壤中有有机质不被流失,有助于土壤养分积累,促进酶活性。(2)部分苔藓假根密度较大,根系微生物活动,促进有机质的的分解,增强了土壤酶活性。综合 4 种苔藓的水土保持作用,发现美灰藓的的饱和吸水量、饱和吸水率最高,在遭遇降雨时可最大限度地减小地表径流的发生,而达到保护苔藓层下土壤的作用,同时美灰藓的假根根系发达,可形成交织密集的网状防止土壤的流失。美灰藓可以有效地提高土壤酶活性。综合以上几点优势,美灰藓较其他 3 种苔

藓更适合应用于石漠化修复。

4 结论

综合对美灰藓、多疣细羽藓、小青藓和双色真藓 4 种苔藓的持水特性研究发现,4 种苔藓植物拥有较好的贮存水和抑制水分散失的能力,可以作为石漠化修复的先锋植物。苔藓可以有效地提高土壤抗冲刷能力,苔藓层的抗冲刷能力随坡度升高而降低,随苔藓层厚度增加而升高。苔藓假根根长密度、根系密度、生物量是影响苔藓抗冲刷性的主要因素。美灰藓在不同冲刷水流量、坡度和厚度的抗冲刷试验中表现较强的抗冲刷性,可以有效减少土壤流失。

4 种苔藓均可有效地提高土壤酶活性,被培养土壤在冬季、春季和夏季酶活性增长速率较快。苔藓层的厚度、抗冲刷性有利于减少土壤有机质的流失,促进土壤脱氢酶、脲酶的增加。同时发达的苔藓假根根系也会增加土壤脱氢酶、脲酶活性。美灰藓较其他 3 种苔藓对土壤中过氧化氢酶、脱氢酶、脲酶具有显著的增强作用,可较迅速改善土壤质量。

综上,认为石漠化的治理应利用物种的演替规律,通过选取先锋种逐渐向顶级种的替代过度,形成稳定的生态环境,逐步实现石漠化修复的目的。通过前人对苔藓植物在石漠化区域应用价值的探索及研究,认为石漠化恢复重建工作中物种选择不应该只局限于维管植物,基于以上苔藓的生态修复效益研究,可以考虑将苔藓植物这种特殊的类群应用于石漠化的恢复重建。在石漠化修复阶段初期由于岩石裸露率高,土壤层薄且贫瘠建议使用苔藓和维管植物相结合的方式修复,苔藓植物主要用于裸露岩石的修复。

参考文献:

- [1] 朱书法,刘丛强,陶发祥,等. 贵州喀斯特地区棕色石灰土与黄壤有机质剖面分布及稳定碳同位素组成差异[J]. 土壤学报,2007,44(1):169-173.
- [2] 吴照柏,但新球,吴协保,等. 岩溶地区石漠化危害与防治效果分析[J]. 中南林业调查规划,2013,32(3):63-66.
- [3] 王小利,郭胜利,马玉红,等. 黄土丘陵区小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(6):1281-1285.
- [4] Du Y, Pan G, Li L, et al. Leaf N/P ratio and nutrient reuse between dominant species and stands: Predicting phosphorus deficiencies in Karst ecosystems, south-western China[J]. Environmental Earth Sciences,2011,64(2):299-309.
- [5] 梁亮,刘志霄,张代贵,等. 喀斯特地区石漠化治理的理论模式探讨[J]. 应用生态学报,2007,18(3):595-600.
- [6] Moss N G, Kopple T E, Arendshorst W J. Modulation of the myogenic mechanism: Concordant effects of NO synthesis inhibition and O_2^- dismutation on renal autoregulation in the time and frequency domains[J]. American Journal of Physiology Renal Physiology,2016,310(9):832-845.
- [7] 申家琛,张朝晖,王慧慧,等. 贵阳喀斯特公园南石林秋季藓类植物的持水特性[J]. 生态与农村环境学报,2017,33(10):907-912.
- [8] Longton R E. Inter-population variation in morphology and physiology in the cosmopolitan moss *Bryum argenteum* Hedw[J]. Transactions of the British Bryological Society,1981,11(3):501-520.
- [9] Zotz G, Kahler H. A moss "canopy" - Small-scale differences in microclimate and physiological traits in *Tortuldrurialis*[J]. Flora,2007,202(8):661-666.
- [10] 黎兴江. 中国苔藓志. 真藓目[M]. 4 卷. 北京:科学出版社,2006:61-167.
- [11] 吴鹏程. 中国苔藓志. 油藓目,灰藓目[M]. 6 卷. 北京:科学出版社,2002:191-268.
- [12] 胡人亮,王幼芳. 中国苔藓志. 灰藓目[M]. 7 卷. 北京:科学出版社,2005:82-180.
- [13] 吴鹏程,贾渝. 中国苔藓志. 藻苔目[M]. 8 卷. 北京:科学出版社,2004:88-314.
- [14] 刘奉觉. 用快速称重法测定杨树蒸腾速率的技术研究[J]. 林业科学研究,1990(2):162-165.
- [15] 蒋定生,范兴科. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. 水土保持学报,1995,9(2):1-8.
- [16] 曾信波. 苔藓层的蓄水保土功能研究[J]. 水土保持学报,1995,9(4):118-121.
- [17] 周向阳. 干旱半干旱地区包气带水分分布规律与影响因素研究[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [18] Southgate R I, Masters P, Seely M K. Precipitation and biomass changes in the Namib Desert dune ecosystem[J]. Journal of Arid Environments,1963,33(3):267-280.
- [19] 龙朝波,张朝晖. 喀斯特石漠化山区苔藓植物水分吸收特征[J]. 水土保持通报,2015,35(2):350-354.
- [20] Santarius K A. Apoplasmic water fractions and osmotic potentials at full turgidity of some Bryidae[J]. Planta,1994,193(1):32-37.
- [21] 吴玉环,程国栋,高谦. 苔藓植物的生态功能及在植被恢复与重建中的作用[J]. 中国沙漠,2003,23(3):215-220.
- [22] 白明生,姚云鹤,王佳. 中药废渣对干旱区弃耕盐碱地土壤理化性质及微生物数量和酶活性的影响[J]. 水土保持通报,2014,34(6):13-17.
- [23] 姚超英. 痕量有机污染物 DDT 和 PCBs 复合共存时对农田土壤氧化还原酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报,2008,27(3):909-913.
- [24] Graaff M A D, Classen A T, Castro H F, et al. Labile soil carbon inputs mediate the soil microbial community composition and plant residue decomposition rates[J]. New Phytologist,2010,188(4):1055-1064.
- [25] 李丹,何腾兵,刘丛强,等. 喀斯特山区土壤酶活性研究回顾与展望[J]. 贵州农业科学,2008,36(2):87-90.