

外源添加物对沙地苔藓结皮扩繁发育的促进作用

白雪强¹, 田畅¹, 李亚红¹, 鞠孟辰¹, 王春¹, 韦应欣¹, 卜崇峰^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 人工苔藓结皮作为一种新型的防风固沙潜在途径而备受关注, 为进一步优化现有的培育扩繁技术, 采用4因素2水平正交试验设计, 探讨了菌类(放线菌和巨大芽孢杆菌)、藻类(小球藻和具鞘微鞘藻)、沙蒿胶(有和无)和基质类型(沙土基质和配方基质)对沙地苔藓结皮室内发育扩繁的影响。结果表明: (1) 4因素中仅基质类型显著影响了苔藓结皮的盖度和株密度($P < 0.05$), 沙土基质处理的苔藓结皮盖度和株密度均值比配方基质处理分别提高61.04%和17.48株/cm²; (2) 藻类、菌类和基质类型显著影响了苔藓的生理特性($P < 0.05$), 而沙蒿胶影响不显著。沙土基质、放线菌和小球藻的添加显著提高了苔藓的过氧化物酶(POD)活性和可溶性蛋白含量, 降低了丙二醛(MDA)含量; (3) 最适扩繁组合为“沙土基质+放线菌(1 g/kg 基质)+小球藻(2 g/m²)”, 在30天内, 上述组合在培养箱条件下(光照设定为6 000 lx, 光周期12 h/d, 温度20 ℃, 空气湿度75%), 可将1 m²野外苔藓种源培育为4 m²盖度达97.14%的苔藓结皮, 实现4倍扩繁。研究结果将为今后大规模工厂化高效扩繁苔藓种源提供技术支撑。

关键词: 苔藓结皮; 基质类型; 沙蒿胶; 菌类; 藻类

中图分类号: S154.4; S157.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0172-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.06.025

Promoting Effect of Exogenous Additives on Propagation of Moss Biocrusts in Sand-land

BAI Xueqiang¹, TIAN Chang¹, LI Yahong¹, JU Mengchen¹,

WANG Chun¹, WEI Yingxin¹, BU Chongfeng^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Artificial moss biocrusts (moss-dominating biological soil crusts) have attracted attention as a new type of windproof and sand fixation method in recent years. In order to further optimize the existing breeding and propagation technology, this study used a 4 factor and 2 level orthogonal test design to discuss the effects of microorganism (*Actinomyces bovis*, *Bacillus megaterium*), algae (*Chlorella*, *Microcylusvaginatus*), artemisia gum (yes, no), and substrate type (sand soil matrix, formulation matrix) on the indoor propagation of sand-land moss biocrusts. The results showed that: (1) Among the four factors, only the substrate type significantly affected the coverage and plant density of moss biocrusts ($P < 0.01$), which increased to 61.04% and 17.48 strains/cm², were higher than that of the formulation substrate treatment. (2) Algae, microorganism, and substrate types significantly influenced the physiological characteristics of moss biocrusts ($P < 0.01$), while the effect of artemisiagum was not significant. The sandy substrates and the addition of actinomycetes and chlorella significantly increased the peroxidase (POD) activity and soluble protein content and reduced the content of malondialdehyde (MDA) of moss biocrusts. (3) The optimal treatment for propagation was sandy substrate + actinomycete (1 g/kg substrate) + chlorella (2 g/m²). Under the conditions of the incubator (set illumination, photoperiod, temperature, air humidity as 6 000 lx, 12 h/d, 20 ℃, 75%), we propagated 1 m² moss biocrusts (collected from the field and fragmented into provenance) to 4 m² moss biocrusts with a coverage of 97.14%, which achieved 4 times multiplication. This research would provide

收稿日期: 2020-05-05

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703, 2016YFE0203400); 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017CXY-08); 国家自然科学基金面上项目(41971131)

第一作者: 白雪强(1994—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事沙地苔藓结皮的培育恢复研究。E-mail: 243253697@qq.com

通信作者: 卜崇峰(1977—), 男, 陕西榆林人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事生物土壤结皮与水土保持工程研究。E-mail: buchongfeng@163.com

technical support for large-scale industrialization and efficient propagation of moss biocrusts in the future.

Keywords: moss biocrusts; substratum type; artemisia gum; microorganism; algae

干旱和半干旱地区占据了全球陆地面积的 30% 以上^[1],近年来受气候变化和人类活动的影响,该类地区土地荒漠化问题日益严峻,固定沙丘活化和流沙危害给当地居民的生产和生活造成了灾难性的后果,严重影响该区域的可持续发展,因此治理土地荒漠化问题刻不容缓。由于水分条件的严重制约,自然环境恶劣、养分缺乏,这类地区的维管植物难以生存^[2],因此生物结皮成为主要活性地表覆被物^[3]。

生物结皮是由微生物、藻类、地衣、苔藓等共同组成,可在干旱半干旱地区长期生存繁衍,不仅具有较强的保水增肥能力^[4],而且在提高地表糙度及增强土壤抗剪强度等方面发挥着重要作用^[5-7]。苔藓结皮作为生物结皮演替的高级阶段,在水土保持与防风固沙等方面发挥着不可忽视的生态作用^[8],因此实现人工苔藓结皮的快速培育恢复对土地荒漠化治理具有重要的意义。然而以往人工培育恢复研究所使用的苔藓结皮种源均采自野外,在采集种源的过程中对当地生态环境造成的破坏不可小觑。目前,已有诸多学者在室内开展了大量苔藓结皮人工培育方法的研究,主要集中于物理因子(通过控制光、温、水、接种量等)或化学因子(添加营养液和生长调节剂等)来促进苔藓结皮的生长发育,并取得诸多研究成果^[9-11],但生物因子能否进一步优化苔藓结皮的人工培育技术,提高苔藓种源的扩繁速率还鲜见报道,因此亟待开展有关生物添加对苔藓种源室内扩繁的研究。

有研究^[12]表明,沙蒿胶是一种从沙蒿种子表皮提取的天然黏结剂,具有较好的胶结作用,能为生物结皮定植发育提供一个相对稳定的微环境;藻类及菌类是生物结皮的重要组分,其中藻类不仅可以分泌丝状体固结土粒,而且还可以通过固碳、固氮作用促进生物结皮的生长发育^[13]。菌类可通过自身的呼吸及代谢过程,显著改善土壤养分状况,为生物结皮的生长提供能量^[14]。可见菌类、藻类及沙蒿胶等生物添加对生物结皮的生长发育均有一定影响。

本研究以毛乌素沙地自然发育的苔藓结皮为种源,考虑菌类、藻类、沙蒿胶、基质类型 4 因素,利用正交试验设计方法,在培养箱内进行苔藓结皮的高效培育,通过定期测定苔藓结皮生长指标(株密度、株高度、盖度)与生理指标(POD、可溶性蛋白、MDA)的变化,探索不同外源添加物对沙地苔藓结皮发育的影响,寻求沙地苔藓结皮高效扩繁的最优组合,为实现苔藓种源工厂化高效扩繁提供理论依据,进一步为野外自然条件下苔藓结皮工程化恢复提供充足种源及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 苔藓结皮样品 苔藓结皮样品于 2019 年 4 月 25—27 日采自陕西省榆林市榆阳区孟家湾乡(109°36′14″—109°36′24″E,38°32′50″—38°32′54″N),该地区降雨主要集中在 6—9 月,年平均气温 8.3 ℃,年均降水量 405 mm。样地主要为固定和半固定沙丘,地处毛乌素沙地东南缘。主导的灌木植被多以簇状分布,有柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)和沙柳(*Salix psammophila*);而草本植物分布较散,主要有沙竹(*Psammochloa villosa*)和狗娃花(*Heteropappus hispidus*)等^[15]。

采样时选择发育较为完整的苔藓结皮,利用小铲取苔藓结皮层 1 cm。将采集好的结皮层装入透气性好的麻袋中运回实验室,置于背阴处晾干备用。经鉴定供试苔藓结皮的优势种为银叶真藓(*Bryum argenteum*),伴生种为橙色真藓(*Bryum rutilans* Brid)、净口藓(*Gymnostomum calcareum* Nees et Hornsch)等。待阴干后,人工挑出显眼的杂质,如牲畜粪便、石块、植物枯落物及根系等,使用高速植物粉碎机(艾泽拉—2500C)将结皮层粉碎为长度均匀分布在 1~3 mm 间的茎叶碎片,混匀后获得苔藓结皮种源备用。

1.1.2 土壤基质 培育所用的沙土基质采集地与苔藓结皮采集地点、时间相同。挖取地表下伏 5—20 cm 的土层。采集土壤后运到实验室自然阴干,过 2 mm 筛后置于阴凉处备用。将过筛沙土、育苗基质(主要组分有蛭石、砾石、珍珠岩和泥炭等)和有机肥放入温度为 108 ℃ 的烘干箱内烘干消毒,其中过筛沙土和育苗基质烘干 80 min,有机肥烘干 40 min,中途取出翻动 1 次,消毒后放置在阴凉处备用。试验所用基质包括配方基质和沙土基质,其中配方基质是将有机肥、育苗基质、消毒沙土按体积比为 0.2 : 1 : 1 混合搅拌而成,沙土基质则为上述消毒沙土。

1.2 试验设计

考虑菌类、藻类、沙蒿胶、基质类型 4 个因素,每个因素设置 2 个水平,设计正交试验($L_8(2^7)$),共得到 8 组处理(表 1),另设置沙土基质+种源(处理 9)、配方基质+种源(处理 10)作为对照组,每组处理 4 个重复。

1.3 扩繁过程与方法

1.3.1 扩繁材料的制备 首先在消毒后的培育盒(长、宽、高分别为 17,17,12 cm,底部具有若干小孔)

底部放置 1 块(长、宽均为 14 cm)用高锰酸钾稀释液消毒后的正方形毛毡布;其次按照试验设计装入 5 cm 厚添加了放线菌(1 g/kg 基质)或巨大芽孢杆菌(1 g/kg 基质)的基质(沙土基质/配方基质)。将基质表面抹平,每样方均匀播撒种源 20 g(接种面积为 14 cm×14 cm,即 1 020 g/m²),需添加沙蒿胶的处理,将沙蒿胶(6 g/m²)与种源搅拌均匀。接种后喷洒 50 mL 水,使沙蒿胶浓度达到 0.2%,未添加沙蒿胶的处理喷洒等量清水。需添加藻类的处理,按 2 g/m²用量,将藻液(浓度为 0.6 g/L)在接种 2 天后均匀喷撒于样方上。

表 1 试验处理组合				
处理	基质	沙蒿胶	菌类	藻类
1	沙土	有	巨大芽孢杆菌	小球藻
2	沙土	有	放线菌	具鞘微鞘藻
3	沙土	无	巨大芽孢杆菌	具鞘微鞘藻
4	沙土	无	放线菌	小球藻
5	配方	有	巨大芽孢杆菌	小球藻
6	配方	有	放线菌	具鞘微鞘藻
7	配方	无	巨大芽孢杆菌	具鞘微鞘藻
8	配方	无	放线菌	小球藻

1.3.2 苔藓结皮扩繁过程 试验于 2019 年 7 月 4 日至 8 月 4 日在西北农林科技大学水土保持研究所进行。据已有研究^[16-17]报道,将培养箱设定为光照 6 000 lx,光周期 12 h/d,温度 20 ℃,空气湿度 75%。培育期间,每 6 天喷洒 1 次霍格兰营养液,用量为 2.1 L/m²。长出新植株体后每周(7 天)测定 1 次苔藓结皮生长指标(株高度、盖度和株密度),分别在培育 15,30 天时测定 2 次苔藓的生理指标(过氧化物酶、丙二醛、可溶性蛋白)。当结皮出现泛黄现象时试验结束,共持续 30 天。

1.4 观测指标与方法

1.4.1 生长指标 采用电子游标卡尺随机测量培养盒内 20 株苔藓的高度,取均值得出株高度;在每个培养盒中均匀选取 5 个 2.5 cm×2.5 cm 小框,数出小框内的苔藓株数,求出其平均值后再除以 1 个小框的面积作为 1 个培养盒内的株密度;盖度采用点针样框法^[18],网格焦点下有苔藓则记为 1,无则记为 0,网格规格为 0.5 cm×0.5 cm。

1.4.2 生理指标 过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定;丙二醛(MDA)含量采用留待巴比妥酸(TBA)法测定;可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法测定。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 对试验数据进行处理,利用统计分析软件 SPSS 23.0(SPSS for Windows, Version 23.0, Inc., Chicago, IL, USA)对不同处理的各个指标进行方差分析、多重比较和 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 外源添加物对苔藓结皮生长发育的影响

本试验周期为 30 天,通过观察可以看出,在培养箱内培育 30 天后(即至培育末期),所有处理均可形成稳定的苔藓结皮。

图 1 为 10 种处理下苔藓结皮盖度、株密度与株高度在培育的第 7,15,22,30 天的变化情况。

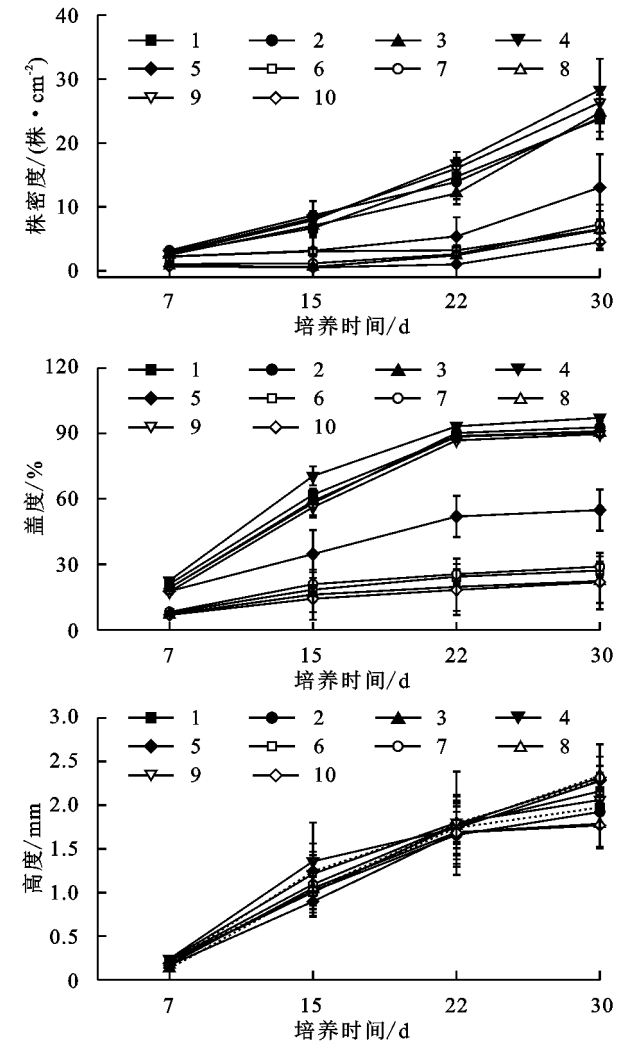


图 1 不同处理苔藓结皮生长状况随时间的变化

从图 1 可以看出,在培育第 7 天已有苔藓植株长出。盖度及株高度在 7~15 天内快速增加,15 天后增长逐渐减缓,所有处理的高度差异未达到显著水平,高度差为 1.77~2.32 mm;株密度的变化趋势与此相反,即在前期增长较缓,后期逐渐增加。培育末期,配方基质所有处理下的结皮盖度、株密度均值分别在 22.38%及 4.49 株/cm²以上,其中处理 5(配方基质+沙蒿胶+巨大芽孢杆菌+小球藻)的培育效果较优,其盖度、株密度及株高度均值分别为 54.90%、13.03 株/cm²及 2.28 mm;沙土基质所有处理下的结皮盖度、株密度均值分别在 89.73%及 23.73 株/cm²以上,其中处理 4(沙土基质+放线菌+小球藻)的培育效果较优,其盖度、株密度及株高度均值分别为

97.14%、28.31 株/cm² 及 2.28 mm。

方差分析(表 2)表明,基质类型对苔藓盖度、株密度影响极显著($P<0.01$),沙土基质能显著提高苔藓的盖度和株密度,而沙蒿胶、菌类及藻类等活性添加物对苔藓结皮发育状况的影响均不显著。

综合考虑,所有处理均可促进苔藓结皮的生长,以处理 4(沙土基质+放线菌+小球藻)的培育扩繁效果最优,仅需 1 m^2 野外苔藓种源,即可在短时间(30 天)内培育形成 4 m^2 稳定的苔藓结皮,实现 4 倍扩繁。

表 2 不同因素对苔藓结皮 3 个生长指标的方差分析

生长指标		因素			
		基质	沙蒿胶	菌类	藻类
株密度	SS	1171.126	0.067	5.014	30.488
	df	1	1	1	1
	MS	1711.126	0.067	5.014	30.488
	<i>F</i>	178.865	0.007	0.524	3.187
	<i>P</i>	<0.010	0.934	0.478	0.090
盖度	SS	21136.91	261.492	258.595	258.464
	df	1	1	1	1
	MS	21136.91	261.492	258.595	258.464
	<i>F</i>	293.415	3.630	3.590	3.588
	<i>P</i>	<0.010	0.072	0.073	0.074
株高度	SS	0.007	0.029	0.165	0.038
	df	1	1	1	1
	MS	0.007	0.029	0.165	0.038
	<i>F</i>	0.050	0.206	1.183	0.270
	<i>P</i>	0.825	0.655	0.290	0.610

2.2 外源添加物对苔藓生理特性的影响

为进一步明确不同活性添加物对苔藓结皮生长产生差异的原因,对培育过程中(15,30 天)苔藓的过氧化物酶(POD)活性、可溶性蛋白和丙二醛(MDA)含量 3 个生理指标与各试验因素间的关系进行分析。

由图 2 可知,在整个培育期间苔藓的 POD 活性、MDA 含量和可溶性蛋白含量呈明显上升趋势。沙土基质苔藓结皮的 POD 活性和可溶性蛋白含量最大,而配方基质苔藓结皮的 MDA 含量最大,且沙土基质苔藓结皮的 POD 活性和可溶性蛋白含量在整个培育期均明显高于配方基质;而对于 MDA 含量而言,生长在配方基质上的苔藓结皮明显高于沙土基质。试验中期,对于可溶性蛋白含量而言,处理 3 与处理 4 之间的差异不显著,却显著高于其他处理,其他处理之间无明显差异;就 POD 活性来说,不同基质类型组内处理之间无显著差异;不同处理之间 MDA 含量无显著差异。试验末期,处理 1,2,3,4,5,7,9 的 POD 活性和可溶性蛋白含量显著高于处理 8 和处理 10,其中处理 4 苔藓的 POD 活性和可溶性蛋白含量分别达到 108.69 U/g FW 和 244.36 mg/g

FW, 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 而 MDA 含量相比与其他处理较低, 仅为 $34.61 \mu\text{mol/g}$ 。

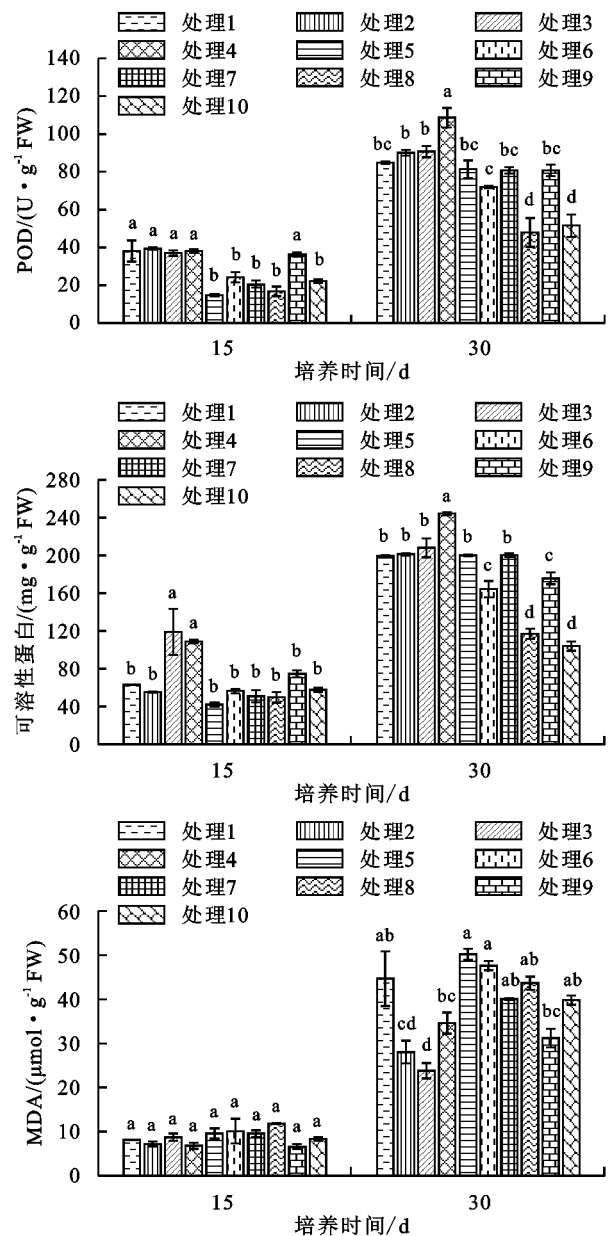


图 2 不同处理苔藓结皮 15,30 天时生理特性比较

通过相关性分析(表 3)可知,苔藓的 POD 和可溶性蛋白与盖度和株密度存在极显著正相关关系($P < 0.01$),MDA 与盖度和株密度存在极显著负相关关系($P < 0.01$)。方差分析结果(表 4)显示,基质类型对苔藓的可溶性蛋白和 MDA 影响极显著($P < 0.01$);藻类添加物对苔藓的 POD、可溶性蛋白和 MDA 的影响极显著($P < 0.01$);菌类添加物对可溶性蛋白的影响极显著($P < 0.01$)。表明菌类、藻类添加物和基质类型均能明显影响苔藓的生理特性。

所有处理均可改善苔藓的生理特性,其中以处理4(沙土基质+放线菌+小球藻)的效果最优,相比其他处理可显著提高苔藓的 POD 活性和可溶性蛋白含量,降低 MDA 含量,使其细胞的保水能力增强,细胞的生命物质得到保护^[19]。

表 3 不同处理下各指标相关性分析

变量	盖度	密度	高度	POD	MDA	可溶性蛋白质
盖度	1					
密度	0.967 *	1				
高度	0.051	0.118	1			
POD	0.782 **	0.793 *	0.332	1		
MDA	-0.559 **	-0.592 **	-0.047	-0.445 *	1	
可溶性蛋白	0.756 **	0.736 **	0.339	0.897 **	-0.459 *	1

注：* 表示相关性达显著水平($P<0.05$)；** 表示相关性达极显著水平($P<0.01$)。

表 4 不同因素对苔藓 3 个生理指标的方差分析

指标		因素			
		基质	沙蒿胶	菌类	藻类
MDA	SS	953.666	302.649	8.680	424.405
	df	1	1	1	1
	MS	953.666	302.649	8.680	424.405
	F	33.494	10.629	0.305	14.906
	P	<0.01	<0.01	0.587	<0.01
可溶性蛋白	SS	8630.079	235.088	3891.130	11781.360
	df	1	1	1	1
	MS	8630.079	235.088	3891.130	11781.360
	F	20.591	0.561	9.284	28.109
	P	<0.01	0.463	<0.01	<0.01
POD	SS	0.366	856.627	0.759	3196.607
	df	1	1	1	1
	MS	0.366	856.627	0.759	3196.607
	F	0.002	5.332	0.005	19.898
	P	0.962	0.032	0.946	< 0.01

3 讨论

关于基质类型对苔藓植物生长发育是否产生影响,在学术界一直存在着较大的争议。其中一部分学者^[20]认为,由于苔藓植物不存在真正的根和维管束组织等形态学特征,不能从基质和底物中吸收利用其生长所需的水分和营养元素,而是从近地表面的大气中获取;同时也有研究^[21]表明,土生和石生苔藓生长所需养分的来源之一是土壤及岩石表面的风化沉积物。本研究结果显示,基质类型是影响沙地苔藓结皮生长发育的最主要因素,对苔藓结皮生长指标和生理指标均产生了明显的影响。玄雪梅等^[22]研究表明,不同基质类型导致苔藓生长状况有所差异,与本研究结果类似。沙土基质相对于配方基质显著增加了苔藓结皮的盖度和株密度,其原因可能是:一方面由于苔藓种类和生活习性等方面有所差异,以及不同基质的孔隙度、透水透气能力有所不同,进而对苔藓植物的呼吸作用及其代谢活动产生影响^[23]。本研究中的沙土基质孔隙度大、透水透气性好,为苔藓结皮培育提供了适宜环境,更符合沙地苔藓的生活习性;另一方面是本研究所使用的配方基质主要由有机肥、育苗

基质和沙土组成,有机肥中含有矿物质成分(如蛭石、珍珠岩等),育苗基质中含有菌棒(蘑菇棒)、菌剂(枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌)等,这些矿物质成分及菌类的存在导致配方基质在培育苔藓结皮的过程中易出现“盐析”现象,使部分苔藓植物失去生理活性,进而抑制了苔藓的生长。因此,对于沙地苔藓结皮而言,其生长发育的最适基质为沙土基质。

自然环境中,苔藓结皮在培育初期,种源在流沙表面易随风迁移,定植困难^[24]。而沙蒿胶具有较好的胶结作用,可迅速使种源与土体固结起来,从而能为结皮定植发育提供有利环境。此外,葡萄糖和半乳糖等是沙蒿胶的主要成分^[25],可为生物结皮的生长发育提供充足碳源^[26]。刘军等^[27]研究表明,低剂量的沙蒿胶可促进生物结皮的生长发育。本研究结果表明,添加沙蒿胶对苔藓结皮生长发育的影响不显著,原因可能是本试验在培养箱中进行,环境较为稳定,并通过设定适宜的空气湿度及定期喷洒霍格兰营养液使沙蒿胶的作用弱化。尽管沙蒿胶在室内苔藓结皮培育过程中作用不明显,但由于沙蒿胶具有较好的黏结作用、成本较低以及不会对环境造成污染等特征,因此仍有必要对其作为一种天然的黏结剂进行研究,以期在沙地苔藓结皮野外自然条件下工程化恢复的过程中发挥作用。

尽管本次使用的 2 种菌类均已在农业领域被广泛使用^[28],但对其应用于生物结皮人工培育恢复方面还鲜见报道。放线菌与芽孢杆菌都可通过分解土壤中各种有机物质来参与自然界的物质循环,使土壤养分状况得以改善,从而促进植被的生长发育;同时添加这 2 种菌类可减少化学肥料及农药的使用,起到间接保护环境的作用^[29-30]。然而从本研究结果来看,2 种菌类对苔藓生长发育的作用均不明显。一方面可能是因为培养初期将菌种与基质混匀搅拌,随后喷洒水使得菌种随水分流失于基质中下部,不利于菌类进行繁殖并发挥功效^[31];另一方面可能是因为基质本身含有其他菌类,与添加的菌类产生拮抗作用。

本研究使用的 2 种藻类,一种为陆生藻类具鞘微鞘藻,是荒漠藻中的优势种,已有人工藻结皮技术能使其在短期内形成稳定的藻结皮,从而起到防风固沙的作用^[32-34];另一种为水生藻类小球藻,但将其应用于人工生物结皮培育恢复中的研究目前尚不充分。水生藻类与陆生藻类在形态结构等方面具有相似性,均能产生丝状体,黏结土壤颗粒,提高地表抗蚀能力,进而为其他高等植被的发育和演替提供稳定的环境^[35]。同时也有研究^[36]发现,不同种类藻的分泌物,如胞外多糖对不同种类的苔藓生长有不同的影响。从本研究结果分析来看,添加小球藻明显提高了

银叶真藓、橙色真藓和净口藓的 POD 活性和可溶性蛋白,降低 MDA 含量,从而提高了细胞的渗透调节能力,使细胞膜的稳定性得以维护,延缓苔藓植株衰老,使其保持较好的生长状态,其原因可能为小球藻能够与苔藓植株的叶片和假根紧密缠绕在一起,释放低浓度胞外多糖促进藓类原丝体与配子体产生新的茎叶体,进而促进苔藓植株的生长^[36]。

4 结论

基于正交试验设计方法发现,在培养箱环境下,沙土基质能显著提高苔藓的盖度和株密度,沙蒿胶、菌类和藻类对苔藓生长指标影响不大;沙土基质、放线菌和小球藻的组合处理明显提高了苔藓的过氧化物酶活性和可溶性蛋白含量,降低丙二醛含量,进而增强细胞的保水能力,保护细胞膜等生命物质,促进了苔藓的扩繁效果。从发育状况和扩繁效率的综合表现看,推荐“沙土基质+放线菌+小球藻”为苔藓结皮种源扩繁的最优组合,以此可使 1 m² 盖度为 92.00% 的野外苔藓结皮经过 30 天培育形成 4 m² 盖度为 97.14% 的苔藓结皮,实现 4 倍扩繁,这可为今后大规模工厂化苔藓种源高效扩繁提供借鉴。

参考文献:

[1] Elbert W, Weber B, Burdel B, et al. Microbiotic crusts on soil, rock and plants: Neglected major players in the global cycles of carbon and nitrogen? [J]. Biogeoscience Discussion, 2009, 6: 6983-7015.

[2] 魏江春. 沙漠生物地毯工程: 干旱沙漠治理的新途径[J]. 干旱区研究, 2005, 22(3): 287-288.

[3] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China) [J]. Environmental Earth Science, 2012, 65: 77-88.

[4] 李金峰, 孟杰, 叶菁, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 67-78.

[5] 徐杰, 白学良, 田桂泉, 等. 干旱半干旱地区生物结皮层藓类植物氨基酸和营养物质组成特征及适应性分析[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1247-1255.

[6] 牛玉璐, 曹永胜. 生物结皮及其在荒漠治理中的作用[J]. 生物学教学, 2005, 30(10): 5-6.

[7] Grettarsdottir J, Aradottir A L, Vandvik V, et al. Long term effects of reclamation treatments on plant succession in Iceland [J]. Restoration Ecology, 2004, 12: 268-278.

[8] 张元明, 王雪芹. 荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4484-4492.

[9] 陈彦芹. 黄土丘陵区苔藓结皮人工培养方法试验研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.

[10] 卜崇峰, 杨建振, 张兴昌. 毛乌素沙地生物结皮层藓类植物培育试验研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 937-941.

[11] 卜崇峰, 张侃侃, 杨永胜. 一种沙地苔藓结皮的快速培育方法: 中国, CN104350932A [P]. 2015-02-18.

[12] 刘敦华, 谷文英, 丁霄霖. 沙蒿胶对面团流变性质的影响及在面包加工中的应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (增刊 1): 233-236.

[13] 陈兰周, 刘永定, 李敦海, 等. 荒漠藻类及其结皮的研究 [J]. 中国科学基金, 2003, 17(2): 90-93.

[14] 蔡燕飞, 廖宗文. 土壤微生物生态学研究方法进展[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 167-171.

[15] 莫宏伟, 任志远. 近 30 年陕北榆阳区植被土壤保持效益动态[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 626-631.

[16] Xu S J, Yin C S, He M, et al. A technology for rapid reconstruction of moss-dominated soil crusts [J]. Environmental Engineering Science, 2008, 25(8): 1129-1137.

[17] 徐丽萍, 杨改河, 姜艳, 等. 黄土高原人工植被小气候生态效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(16): 163-173.

[18] Li X R, He M Z, Stefan Z, et al. Microgeomorphology determines community structure of BSCs at small scale [J]. Earth Surface Process and Landform, 2010, 35: 932-940.

[19] 夏钦, 何丙辉, 刘玉民. 高温胁迫对粉带扦插苗形态和生理特征的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5217-5224.

[20] 孙守琴, 王根绪, 罗辑, 等. 苔藓植物对环境变化的响应和适应性[J]. 西北植物学报, 2009, 29(11): 2360-2365.

[21] 吴虹玥, 包维楷, 王安. 苔藓植物的化学元素含量及其特点[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 58-64.

[22] 玄雪梅, 王艳, 曹同, 等. 上海地区藓类环境生理学特性的初步研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2117-2121.

[23] 王显蓉, 赵允格, 王媛. 干旱半干旱地区藓结皮人工培养研究进展[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(6): 66-71.

[24] 谢作明, 刘永定, 陈兰洲, 等. 不同培养条件对具鞘微鞘藻生物量和多糖产量的影响[J]. 水生生物学报, 2008, 32(2): 272-275.

[25] Chen J, Li J, Sun A D, et al. Supercritical CO₂ extraction and pre-column derivatization of polysaccharides from *Artemisia sphaerocephala* Krasch. Seeds via gas chromatography [J]. Industrial Crops and Products, 2014, 60: 138-143.

[26] Yang X J, Baskin C C, Baskin J M, et al. Degradation of seed mucilage by soil microflora promotes early seedling growth of a desert sand dune plant [J]. Plant Cell and Environment, 2012, 35(5): 872-883.

[27] 刘军, 张宇清, 冯薇, 等. 几种外源添加物对生物土壤结皮培育的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 100-107.

[28] 李青梅, 陆秀君, 马里, 等. 胶质芽孢杆菌菌剂对四种蔬菜种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2017(1): 10-13.

[29] 吕爱英, 王永歧, 沈阿林, 等. 6 种微生物肥料在不同作物上的应用效果[J]. 河南农业科学, 2004, 33(4): 49-51.

- [10] 郭彪,王尚义,牛俊杰,等.晋西北不同植被类型土壤水分时空变化特征[J].水土保持通报,2015,35(1):267-273.
- [11] 樊艺峰.土壤饱和导水率研究现状分析[J].山西水利,2011,27(5):43-44,60.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2007.
- [13] 郑一力,赵燕东,董玮,等.竹叶片氮含量高光谱估测方法对比研究[J].农业机械学报,2018,49(增刊1):393-400.
- [14] Liu L X, Wang Y J, Teng J Y, et al. Hyperspectral analysis of soil organic matter in coal mining regions using wavelets, correlations, and partial least squares regression[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5107-8>.
- [15] Tomoko T, Blair T, Takumi S, et al. Partial least squares regression calculation for quantitative analysis of metals submerged in water measured using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Applied Optics, 2018, 57(20):5872-5883.
- [16] Cozzolino D, Kwiatkowski M J, Damberg R G, et al. Analysis of elements in wine using near infrared spectroscopy and partial least squares regression[J]. Talanta, 2008, 74(4):711-716.
- [17] 白一茹,王幼奇,王建宇.黄土高原雨养区坡面土壤水动力学性质空间特征及影响因素[J].水土保持研究,2015,22(4):168-172,177.
- [18] 蔡路路,刘子琦,李渊,等.喀斯特地区不同土地利用方式对土壤饱和导水率的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):119-125.
- [19] 于冬雪,贾小旭,黄来明,等.黄土区不同土层饱和导水率空间变异与影响因素[J].土壤通报,2018,49(5):1073-1079.
- [20] 张君玉,程金花,吕湘海,等.晋西不同土地利用方式下土壤饱和导水率的影响因素[J].水土保持通报,2013,33(6):57-61.
- [21] 任婷婷,王瑄,孙雪彤,等.不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J].水土保持学报,2014,28(2):123-126.
- [22] Hao M Z, Zhang J C, Meng M J, et al. Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests[J]. Scientific Reports, 2019, 9 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44921-w>.
- [23] 李永宁,王忠禹,王兵,等.黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响[J].水土保持学报,2019,33(6):176-181,189.
- [24] 易扬,信忠保,覃云斌,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分物理性质研究[J].水土保持研究,2013,20(5):45-49,56.
- [25] Gathala M K, Jat M L, Saharawat Y S, et al. Physical and chemical properties of a sandy loam soil under irrigated rice-wheat sequence in the indo-gangetic plains of South Asia[J]. Journal of Ecosystem and Ecography, 2017, 7(3):1-12.
- [26] Yang B, Tao C, Jie P, et al. Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land[J]. Catena, 2019, 160(1):339-344.
- [27] 杨亚辉,赵文慧,木热提江·阿不拉,等.不同植被对土壤理化性质影响:以王东沟小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):249-252.
- (上转第 177 页)
- [30] 陈念,高向阳,林壁润.万隆霉菌抑制细菌的作用机理初探[J].西北农林科技大学(自然科学版),2005,33(51):143-148.
- [31] 赵艳,张晓波,郭伟.不同土壤胶质芽孢杆菌生理生化特征及其解钾活性[J].生态环境学报,2009,18(6):2283-2286.
- [32] 饶本强,刘永定,胡春香,等.人工藻结皮技术及其在沙漠治理中的应用[J].水生生物学报,2009,33(4):756-761.
- [33] Doherty K D, Antoninka A J, Bowker M A, et al. A novel approach to cultivate biocrusts for restoration and experimentation[J]. Ecological Restoration, 2015, 33(1):13-16.
- [34] 王伟波.接种蓝藻修复生物土壤结皮的研究[D].武汉:中国科学院水生生物研究所,2009.
- [35] 毕永红.念珠藻的接种对半荒漠土壤结构稳定性的作用[C].中国地理学会自然地理专业委员会.“土地变化科学与生态建设”学术研讨会论文集.中国地理学会自然地理专业委员会:中国地理学会,2004:569-575.
- [36] 张丙昌,王敬竹,玛依努尔,等.生物结皮中几种优势藻和齿肋赤藓(*Syntrichia caninervis* Mitt.)种间关系研究[C].生态文明建设中的植物学:现在与未来——中国植物学会第十五届会员代表大会暨八十周年学术年会论文集:植物生态与环境保护,2013.