

糖蜜对人工培养银叶真藓生长发育的影响

李晨辉^{1,2}, 赵允格^{2*}

(1. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:为促进藓结皮人工扩繁,以世界广布种银叶真藓(*Bryum argenteum*)为对象,通过室内试验研究了不同浓度(3、6、10、20 g·L⁻¹和 30 g·L⁻¹)糖蜜溶液对银叶真藓生长发育的影响。结果表明,添加糖蜜溶液会降低银叶真藓萌发数量,其中添加 10 g·L⁻¹和 20 g·L⁻¹糖蜜溶液时银叶真藓萌发数量与对照组差异显著,分别为对照组的 38%和 29%。添加糖蜜溶液会影响银叶真藓生长速率,其中添加 3 g·L⁻¹糖蜜溶液可显著增加银叶真藓生长速率,盖度每周可增加 11.56%,密度每周可增加 6.67 株·cm⁻²,而添加 30 g·L⁻¹糖蜜溶液时银叶真藓生长速率显著低于对照组。添加 10、20 g·L⁻¹和 30 g·L⁻¹糖蜜溶液能在培养末期维持银叶真藓的盖度和密度,而添加 3 g·L⁻¹和 6 g·L⁻¹糖蜜溶液在培养末期时密度会下降,降幅分别为最大密度的 19%和 15%。培养初期使用 3 g·L⁻¹糖蜜溶液而培养末期增大浓度到 10 g·L⁻¹,可显著增加银叶真藓的盖度、密度,在培养末期可维持 72.83%的盖度和 41.25 株·cm⁻²的密度。糖蜜溶液作为葡萄糖的替代物能促进银叶真藓的生长发育,在大面积培养人工藓结皮时可推广使用。

关键词:糖蜜;生物结皮;人工培养;银叶真藓;营养物质

中图分类号:S154.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)01-0130-07

Influence of Molasses on the Growth of Artificial Cultured *Bryum argenteum*

LI Chen-hui^{1,2}, ZHAO Yun-ge^{2*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: This study explored the effect of molasses with different concentrations (3, 6, 10, 20 and 30 g·L⁻¹) on the growth and development of *Bryum argenteum* which was a cosmopolitan moss species by the laboratory cultivation method. The results showed that adding molasses solution could reduce the germination of *B. argenteum*. The germination numbers of adding 10 and 20 g·L⁻¹ molasses solution were significantly different from the control, approximately 38% and 29% of the control, respectively. The growth rate of *B. argenteum* was also affected by molasses solution. The concentration of 3 g·L⁻¹ molasses solution significantly increased the growth rate of *B. argenteum*, by which average growth rate of coverage reached 11.56% per week, the density of the average growth rate reached 6.67 plants/cm² per week. However the 30 g·L⁻¹ molasses solution significantly reduce the growth rate compared to the control. Adding 10, 20 and 30 g·L⁻¹ molasses solution could maintain the coverage and the density of *B. argenteum* at the end of the culture. The density of *B. argenteum* was reduced at the end of the cultivation period by 19% and 15% of maximum density under the treatment of 3 and 6 g·L⁻¹ molasses solution. The coverage and density of

收稿日期:2018-03-21 修回日期:2018-09-26

基金项目:国家自然科学基金(41571268)。

作者简介:李晨辉,男,硕士研究生,研究方向:人工生物结皮快速培育。E-mail:chenhuileer@163.com

* 通信作者:赵允格,女,研究员,博士生导师,研究方向:生物结皮和土壤生态。E-mail:zyunge@ms.iswc.ac.cn

B. argenteum significantly increased when the concentration of molasses solution enhanced from 3 in the early stage of culture to $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ at the end of cultivation, which also could maintain a coverage of 72.83% and a density of $41.25 \text{ plants/cm}^2$ at the end of culture. It was concluded that the molasses solution could be used as a substitute for glucose to promote the growth and development of *B. argenteum* in large-scale artificial cultivation.

Key words: molasses; biological soil crust; artificial culture; *Bryum argenteum*; nutrient

藓结皮是生物结皮发育的高级阶段^[1]。结皮形成对土壤有机质含量、水稳性团聚体含量、黏结力、容重均能产生影响^[2],可以减少土壤侵蚀^[3],对物种多样性的保持也具有重要意义^[4],在干旱半干旱生态系统中发挥着重要作用。自然条件下,生物结皮从无到藻结皮再演替至藓结皮需要几十年甚至上百年的时间,这种发育速度很难满足人类对其生态功能应用的需要。藓结皮的人工培养是实现荒漠地区结皮大面积繁殖的重要途径^[4-5]。研究表明,通过人工接种并给予一定的培养措施,能够加速藓结皮的生长^[6]。已有研究指出接种方式、接种量、培养条件,以及营养物质等均能对藓结皮生长发育产生影响^[7-12]。前人尝试添加各种营养液来促进藓类生长^[11,13-15],有研究表明,一定浓度的葡萄糖对人工培养藓结皮的生长发育具有明显的促进作用,能够提高藓结皮的盖度和密度,促进藓结皮中藓类植物的原丝体萌发和配子体生长^[7,16-17]。但葡萄糖价格昂贵,很难大面积推广应用。

糖蜜是制糖过程中的主要副产物,含糖量很高,不仅有蔗糖、葡萄糖和果糖等糖分,还包括水、蛋白质、维生素、氨基酸、有机酸和钾钠盐等成分,由于价格低廉,用途非常广泛^[18-20],不仅可充当饲料添加剂^[21]、提取液体糖^[22]、制备焦糖色素^[23],还能作为土壤调节剂,调节土壤理化性质^[24-25],在藓结皮人工培养中也可能起到重要作用。

银叶真藓(*Bryum argenteum*)属于世界广布藓种^[26],该藓种生态适应性强^[27],易繁殖^[28],具有良好的人工培养价值。徐杰^[29]等对沙坡头固定沙丘生物结皮的物种调查、鉴定后发现:以银叶真藓为优势种的藓类结皮层具有很强的吸水 and 保水能力,对于干燥少雨的沙漠地区具有十分重要的生态学意义。田桂泉^[12]等研究了腾格里沙漠固定沙丘生物结皮层的繁殖生物学特性表明,通过分株法、撒茎叶法培养的银叶真藓在1个月后可长满整个样地。杨雪伟^[27]等研究黄土丘陵区藓结皮优势种形态结构差异,发现银叶真藓叶片和茎皮部细胞特殊结构能够适应干旱、强光环境,生态适应能力强。

因此,本试验以银叶真藓为对象,选用成本低

廉,富含有机质、氮、磷、钾及其他植物生长发育所需营养元素的糖蜜溶液,研究了不同浓度糖蜜溶液对银叶真藓生长发育的影响,为促进藓结皮的生长发育提供经济有效的营养物质,进而为藓结皮人工扩繁提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

银叶真藓系真藓科(Bryaceae)真藓属(*Bryum*)常见藓种,属世界广布种,多生于阳光充足的岩面、土坡、沟谷及火烧后的地面,植株体呈灰绿色,高约0.5~1.5 cm,其显著特点是有银白色光泽,疏松丛生或成团簇生,缺乏水分时叶均覆瓦状排列于茎上成灰白色,湿润后恢复绿色^[30]。在陕西省神木县六道沟小流域的自然撂荒地采集发育良好的、约带1 cm土层的银叶真藓,置于阴凉处自然风干,用植物样式粉碎机粉碎制成接种材料。培养基质为银叶真藓采集区域的黄绵土,为消除地面植被及枯落物的影响,去除表层土壤后采集5~20 cm的土层。将黄绵土置于阴凉处自然风干,研磨过2 mm筛后备用,土壤基本理化属性见表1。试验所用糖蜜是由安琪酵母(崇左)有限公司提供的商品糖蜜粉配制成的糖蜜溶液(含有机质46%,腐殖酸2.7%,氮4.0%,磷1.5%,钾9.9%)。

1.2 培养方法

银叶真藓在人工气候室培养,条件设定为:光12 h和18℃/暗12 h和10℃,光照强度15 000 lx,相对空气湿度90%。在底部钻有6个9 mm小孔的塑料培养盘(26.5 cm×19 cm×5 cm)中装入1 500 g采样区的黄绵土,将500 g接种材料均匀洒在土层表面,每天添加40 mL蒸馏水,保证培养基质土壤含水量维持在田间持水量的80%以上^[19]。处理设0、3、6、10、20、30 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 等6个糖蜜溶液浓度,将0 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理作为对照组,每组4个重复。分别在培养期的第1天、第21天和第41天向培养盘中添加40 mL糖蜜溶液,对照组添加等量蒸馏水。每7 d测定1次银叶真藓盖度与密度,测定8次后于第56天结束培养。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic soil physical and chemical properties of culture medium

有机质 /(g·kg ⁻¹)	酸碱度 pH	全氮 /(g·kg ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	有效磷 /(mg·kg ⁻¹)	有效氮 /(mg·kg ⁻¹)	机械组成/%		
						<0.01 mm	0.01~0.05 mm	>0.05 mm
12.37	7.74	0.65	0.55	1.11	24.10	19.43	45.66	34.91

1.3 测定指标与方法

1.3.1 盖度 采用 25 点样方法。将自制边长为 5 cm 的正方形样方分为 25 个边长为 1 cm 的小正方形,统计 25 个小正方形中固定一点中苔藓的个数,每个培养盘测 6 个样方,以藓类植物占调查总点数的百分数计算其盖度。

1.3.2 密度 采用固定样方法。自制 1 cm 的小正方形样方在培养盘放置 10 次,记录投放位置以保证每次观察记录时小正方形样方都在同一位置,计量每个小正方形样方上的藓植株数目,取其平均值作为密度值。

1.4 数据处理

试验数据运用 Excel 2013 进行处理与分析,使用 OriginPro 8 作图,利用统计分析软件 SPSS 19.0

对银叶真藓的盖度与密度进行单因素方差分析和多重比较(LSD),显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 藓结皮生长动态

不同浓度糖蜜溶液对银叶真藓盖度和密度的影响见图 1。银叶真藓的盖度在培育前 7 天均低于对照组;在第 7~42 天,银叶真藓盖度和密度都处于上升的趋势。42 d 后对照组银叶真藓的盖度和密度开始下降,添加<6 g·L⁻¹糖蜜溶液浓度藓结皮的密度也有下降的趋势,而其他处理直至培养末期仍保持较高的盖度和密度。在整个培养周期,添加 30 g·L⁻¹糖蜜溶液银叶真藓的盖度和密度始终<其他处理,表现出抑制现象。

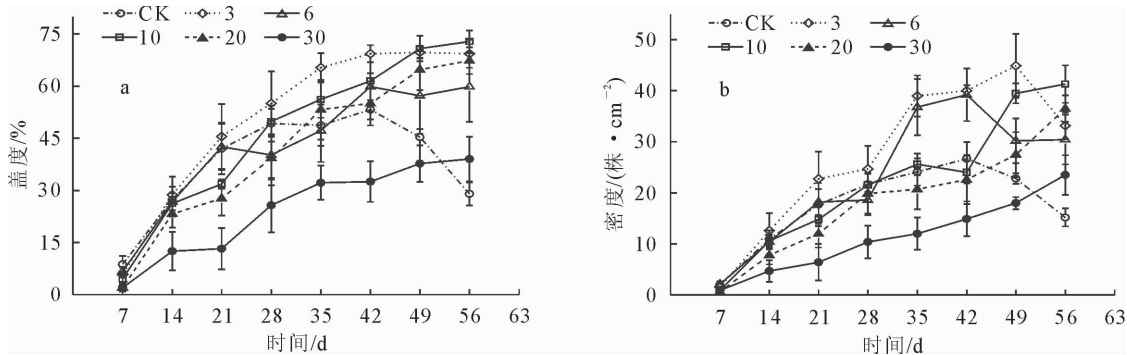


图 1 各处理下银叶真藓盖度和密度变化

Fig. 1 Changes of coverage and density of *B. argenteum* under all treatment

2.2 糖蜜浓度对银叶真藓萌发状况的影响

本研究以萌发时间和萌发数量作为判断银叶真藓萌发状况的参数。所有处理均在接种 4~5 d 后可以看到新萌发的配子体,在萌发时间上未见差异。试验以第 1 次观察数据(第 7 天)中银叶真藓密度作为衡量银叶真藓萌发数量的指标(图 2),对照组银叶真藓密度为 2.17 株·cm⁻²。3、6 g·L⁻¹和 30 g·L⁻¹糖蜜溶液处理下银叶真藓密度与对照组差异不显著,而 10 g·L⁻¹和 20 g·L⁻¹糖蜜溶液处理下银叶真藓密度与对照组差异显著($P<0.05$),分别是对照组的 38%和 29%。各浓度糖蜜溶液处理间差异不显著。

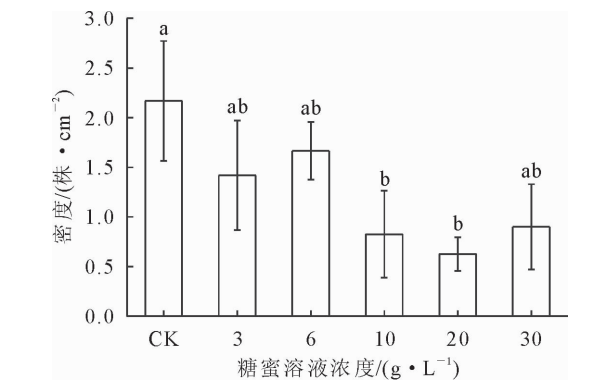
2.3 糖蜜溶液对银叶真藓生长速率的影响

由表 2 可见,3 g·L⁻¹和 6 g·L⁻¹糖蜜溶液处理与对照组的银叶真藓都在培养第 42~49 天达到

最大盖度和最大密度,而添加 10、20 g·L⁻¹和 30 g·L⁻¹糖蜜溶液处理均在培养末期(第 56 天)达到最大盖度和密度,比添加 3 g·L⁻¹和 6 g·L⁻¹糖蜜溶液的处理和对照组晚了 7~14 d。

所有处理在培养 42 d(第 6 周)后逐渐达到最大盖度和最大密度,培养 42 d 的银叶真藓生长速率见图 3。随着糖蜜溶液浓度的增加,银叶真藓盖度和密度的生长速率有下降的趋势。其中添加 3 g·L⁻¹糖蜜溶液的银叶真藓盖度每周增加 11.56%,显著>对照组(每周增加 8.86%)30.47%,密度每周增加 6.67 株·cm⁻²,显著>对照组(每周增加 4.45 株·cm⁻²)49.89%;添加 30 g·L⁻¹糖蜜溶液的银叶真藓盖度每周增加 5.42%,较对照组显著降低 38.83%,密度每周增加 2.48 株·cm⁻²,较对照组显著降低 44.27%;添加 6 g·L⁻¹糖蜜溶液的银叶

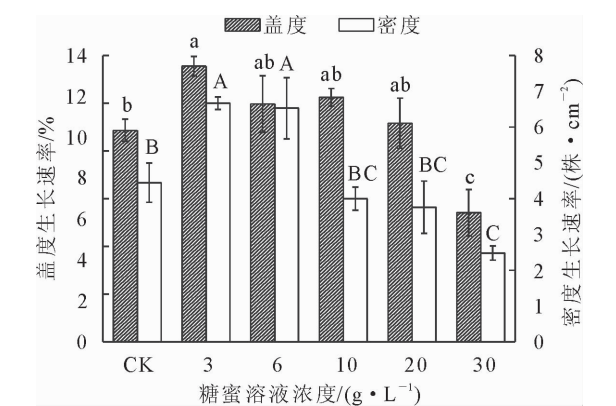
真藓盖度生长速率虽与对照组差异不显著,但其密度每周增加 $6.53 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$,与对照组呈显著差异,较对照组显著增加 46.74% ;添加 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓盖度和密度生长速率与对照组之间差异不显著。综上分析,添加 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓生长速率最大。



注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
图 2 不同浓度糖蜜溶液处理下银叶真藓的萌发数量
Fig. 2 The germination number of *B. argenteum* under different concentrations of molasses solution

表 2 不同浓度糖蜜溶液处理下银叶真藓达到最大盖度、最大密度的时间
Table 2 The time of the maximum coverage and maximum density of *B. argenteum* under different concentrations of molasses solution (g·L⁻¹)

处理	CK	3	6	10	20	30
最大盖度时间/d	42	47	42	56	56	56
最大密度时间/d	42	47	42	56	56	56



注:小写字母代表不同处理之间的盖度生长速率差异,大写字母代表不同处理之间的密度生长速率差异。下同。
图 3 不同浓度糖蜜溶液处理下银叶真藓生长速率
Fig. 3 The growth rate of *B. argenteum* under different concentrations of molasses solution

2.4 糖蜜溶液对银叶真藓盖度和密度维持能力的影响

以最大盖度和最大密度、培养末期盖度和末期

密度以及它们之间的变化来衡量糖蜜溶液对银叶真藓盖度和密度维持能力(图 4)。

添加 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 10 、 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓培养 56 d 内最大盖度分别为 69.67% 、 72.83% 和 67.33% ,均显著高于对照组最大盖度 (53.17%) 差异显著,3 个处理分别高出对照组 31.03% 、 36.98% 和 26.63% ;添加 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓最大盖度为 39% ,比对照组显著减少 26.65% ;添加 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓最大盖度为 59.83% ,与对照组差异不显著。添加 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 6 、 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓的最大密度分别为 44.85 、 $39.18 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $41.25 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$,均与对照组最大密度 ($26.68 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$) 差异显著,分别高于对照组 68.10% 、 46.85% 和 54.61% ;添加 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓的最大密度分别为 $36.50 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $23.48 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$,与对照组无显著差异。

添加 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓培养末期(第 56 天)盖度为 39% ,末期密度为 $23.48 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$,与对照组的末期盖度 (29%) 和末期密度 ($16.45 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$) 差异均不显著;添加 3 、 6 、 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓末期盖度分别为 69.33% 、 59.83% 、 72.83% 和 67.33% ,与对照组末期盖度形成显著差异,分别高于对照组 139.07% 、 106.31% 、 151.14% 和 132.17% ;末期密度分别为 36.23 、 33.25 、 $41.25 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $36.50 \text{ 株} \cdot \text{cm}^{-2}$,与对照组的末期密度形成显著差异,分别高于对照组 120.24% 、 102.13% 、 150.76% 和 121.88% 。

添加 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓末期盖度比其最大盖度下降了 0.34% ,其余处理下银叶真藓最大盖度和末期盖度相同;而对照组的末期盖度比其最大盖度下降了 24.17% ;添加 10 、 20 和 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓最大密度和末期密度相同,而对照组以及添加 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 糖蜜溶液的银叶真藓末期密度都 $<$ 最大密度,分别低于最大盖度的 38.32% 、 19.23% 和 15.12% 。

3 结论与讨论

添加糖蜜溶液降低了银叶真藓的萌发数量,各处理间无显著差异。与对照组相比,浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的糖蜜溶液显著抑制了银叶真藓萌发。杨永胜^[31]研究表明, 10 、 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖溶液在试验初期均降低了苔藓结皮盖度、株密度及高度,降低程度与糖溶液浓度成正比,这与本研究试验结果相似。可能是添加糖蜜溶液增

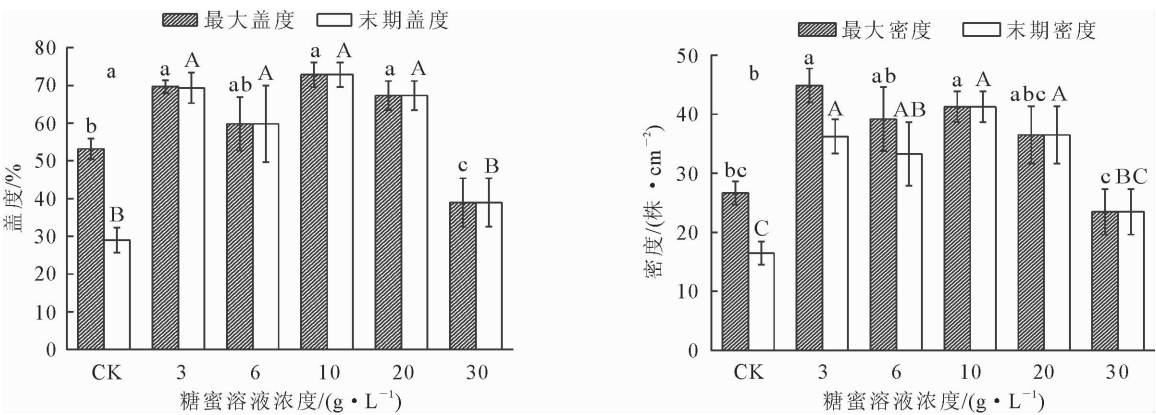


图 4 不同浓度糖蜜溶液处理下银叶真藓的最大盖度和末期盖度

Fig. 4 The maximum and end coverage of *B. argenteum* under different concentrations of molasses solution

大了银叶真藓细胞渗透压,而渗透作用在苔藓植物的养分需求方面发挥着重要作用,大多数苔藓植物对渗透压胁迫敏感,苔藓植物通过将大量养分转移到与土层接触的部位来应对渗透压胁迫^[32]。苔藓所需养分种类虽然与维管植物相同,但需求量更低,G. R. Hoffman^[33]使用维管植物培养常用的 Hoagland 营养液培养苔藓植物,发现稀释至 25% 时培养效果更好。本试验中的糖蜜溶液可能对于刚培养 7 d 的配子体植株来说浓度太高,进而影响银叶真藓的萌发数量。

添加糖蜜溶液显著影响了银叶真藓的生长速率,其中添加 3 g · L⁻¹ 糖蜜溶液最适合促进银叶真藓生长,而添加 30 g · L⁻¹ 糖蜜溶液显著抑制了银叶真藓生长,添加 10 g · L⁻¹ 和 20 g · L⁻¹ 糖蜜溶液的银叶真藓盖度和密度生长速率与对照组之间差异不显著,此结果可能与糖蜜溶液浓度有关。姜山^[17]认为糖类是影响银叶真藓生长的主要因子,葡萄糖或蔗糖在接近 5 g · L⁻¹ 时最有利于苔藓植物生长。梁书丰^[34]发现在自然培养基上 5~20 g · L⁻¹ 葡萄糖能够明显促进多枝青藓 (*B. fasciculirameum*) 配子体的生长,这与本研究试验结果是相似的。也有研究表明,在培育前 45 d,添加 10、30 g · L⁻¹ 和 50 g · L⁻¹ 葡萄糖溶液时藓结皮的盖度、密度以及株高均低于对照组^[31]。而陈彦芹^[7]等研究了葡萄糖对短叶对齿藓 (*Didymodon tectorum*) 结皮的形成发育的影响,结果表明,随着葡萄糖质量浓度的增加,藓结皮盖度和藓株密度逐渐增大,且均在葡萄糖为 50 g · L⁻¹ 时达到最大,可能不同藓种对葡萄糖适应性存在差异,对葡萄糖的需求量也不同。用糖蜜代替葡萄糖培育时,42 d 内添加 3 g · L⁻¹ 糖蜜溶液银叶真藓生长速率最快。

除了溶液浓度外,影响银叶真藓生长速率的因素还可能与糖蜜中的成分有关。土壤有机质具有保

水保肥^[35-36]、调节土壤碱性^[37]、提高养分有效性^[38]等作用。研究认为苔藓植物的生物量、藓类结皮斑块面积与土壤有机质呈显著正相关关系^[39-40]。本试验选用的糖蜜中有机质含量高达 46%,是占比最高的成分。因此,糖蜜中的有机质可能促进了银叶真藓的生长。

各处理下的银叶真藓盖度和密度达到峰值后,10、20 g · L⁻¹ 和 30 g · L⁻¹ 糖蜜溶液处理的银叶真藓一直维持着峰值时的盖度和密度,其中添加 10 g · L⁻¹ 糖蜜溶液的银叶真藓在盖度和密度达到峰值后一直持续到培养末期,维持能力最强,而对照组与添加 3 g · L⁻¹ 和 6 g · L⁻¹ 糖蜜溶液的银叶真藓的密度已开始下降。有研究表明^[34],一次性加入营养物质,培育 60 d 后,配子体分枝数出现了下降趋势,其原因可能是培养基没有更新,营养物质缺乏,代谢物积累,造成了部分配子体的死亡,这与本研究的结果相似。可能是因为培养基一直保持着较高湿度,每天不断浇水,养分浓度被稀释;另外银叶真藓从原丝体发展到配子体,其结构和功能愈加复杂^[32],随着盖度和密度不断增加,可能导致培养末期的银叶真藓对养分需求的增加,而此时添加 10~30 g · L⁻¹ 糖蜜溶液更有利于维持银叶真藓生长。

综合考虑银叶真藓的萌发状况、生长速率以及维持能力,添加 3 g · L⁻¹ 糖蜜溶液更符合快速培养高盖度和高密度的银叶真藓的要求,只需在 40 d 后将糖蜜浓度加大到 10 g · L⁻¹,20 d 添加 1 次,每次 40 mL,便可维持 72.83% 的盖度和 41.25 株 · cm⁻² 的密度。

致谢:感谢神木侵蚀与环境试验站对本研究的支持!

参考文献:

[1] 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.

ZHANG Y M,WANG X Q. Summary on formation and developmental characteristics of biological soil crusts in desert areas[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(16):4484-4492. (in Chinese)

[2] 冉茂勇,赵允格,陈彦芹. 黄土丘陵区水蚀区生物结皮土壤抗冲性试验研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(3):37-40.

RAN M Y,ZHAO Y G,CHEN Y Q. Experimental study on the soil anti-scourability of biological crust in the water erosion region in Loess Hilly areas[J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(3):37-40. (in Chinese)

[3] 肖波,赵允格,邵明安. 黄土高原侵蚀区生物结皮的人工培育及其水土保持效应[J]. 草地学报,2008,16(1):28-33.

XIAO B,ZHAO Y G,SHAO M A. Artificial cultivation of biological soil crust and its effects on soil and water conservation in water-wind erosion crisscross region of Loess Plateau,China[J]. Acta Agrestia Sinica,2008,16(1):28-33. (in Chinese)

[4] 李新荣,张元明,赵允格. 生物土壤结皮研究:进展、前沿与展望[J]. 地球科学进展,2009,24(1):11-24.

LI X R,ZHANG Y M,ZHAO Y G. A study of biological soil crusts; recent development, trend and prospect[J]. Advances in Earth Science,2009,24(1):11-24. (in Chinese)

[5] 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.

WANG X R,ZHAO Y G,WANG Y. A review on the studies of moss crust artificial cultivation in arid and semi-arid region[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(6):66-71. (in Chinese)

[6] 白学良,王瑶,徐杰,等. 沙坡头地区固定沙丘结皮层藓类植物的繁殖和生长特性研究[J]. 中国沙漠,2003,23(2):73-75.

BAI X L,WANG Y,XU J, *et al.* Characteristics of reproduction and growth of mosses in the soil crust of fixed dunes in Shapotou area[J]. Journal of Desert Research,2003,23(2):73-75. (in Chinese)

[7] 陈彦芹,赵允格,冉茂勇. 4 种营养物质对藓结皮形成发育的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(5):44-50.

CHEN Y Q,ZHAO Y G,SHEN M Y. Influence of 4 nutrients on the development of moss crust[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.,2011,39(5):44-50. (in Chinese)

[8] 王蕊. 陕北黄土区生物土壤结皮形成发育的影响因子研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.

[9] 杨永胜,冯伟,袁方,等. 快速培育黄土高原苔藓结皮的关键影响因素[J]. 水土保持学报,2015,29(4):289-294.

YANG Y S,FENG W,YUAN F, *et al.* Key influential factors of rapid cultivation of moss crusts on Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(4):289-294. (in Chinese)

[10] 杨延哲,张侃侃,杨永胜,等. 毛乌素沙地苔藓结皮的野外人工培育技术[J]. 水土保持通报,2016,36(2):165-170.

YANG Y Z,ZHANG K K,YANG Y S, *et al.* Field artificial cultivation technology of moss dominated crust in Mu Us sandland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(2):165-170. (in Chinese)

[11] 陈彦芹,赵允格,冉茂勇. 黄土丘陵区藓结皮人工培养方法试验研究[J]. 西北植物学报,2009,29(3):586-592.

CHEN Y Q,ZHAO Y G,RAN M Y. Experimental research on artificial culture method of moss crust in Hilly Loess Plateau region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2009,29(3):586-592. (in Chinese)

[12] 田桂泉,白学良,徐杰,等. 腾格里沙漠固定沙丘藓类植物结皮层的自然恢复及人工培养试验研究[J]. 植物生态学报,2005,29(1):164-169.

TIAN G Q,BAI X L,XU J, *et al.* Experimental studies on natural regeneration and artificial cultures of moss crusts on fixed dunes in the tengger desert[J]. Acta Phytocologica Sinica,2005,29(1):164-169. (in Chinese)

[13] 赵建成,李秀芹,张慧中. 十种藓类植物孢子萌发与原丝体发育的初步研究[J]. 干旱区研究,2002,19(1):32-38.

ZHAO J C,LI X Q,ZHANG H Z. A preliminary study on spore germination and protonema development of ten species of mosses[J]. Arid Zone Research,2002,19(1):32-38. (in Chinese)

[14] 李琴琴,白学良,任向宇. 沙漠区生物结皮层中藓类植物繁殖体发育实验研究[J]. 中国沙漠,2008,28(2):289-293.

[15] 石磊,刘伟才,何红燕,等. 不同培养液中 3 种藓类光合色素含量比较[J]. 山地农业生物学报,2009,28(2):175-179.

[16] SABOVLJEVIC A,SABOVLJEVIC M,GRUBISIC D, *et al.* The effect of sugars on development of two moss species (*Bryum argenteum* and *Atrichum undulatum*) during in vitro culture[J]. Belgian Journal of Botany,2005,138(1):79-84.

[17] 姜山,田学武. 药用苔藓植物根叶真藓和泥炭藓组织培养基配方研究[J]. 西南大学学报:自然科学版,2012,34(12):61-67.

JANG S,TIAN X W. A study on tissue culture media of the medicinal mosses *Bryum argenteum* and *Sphagnum palustre* L. [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition,2012,34(12):61-67. (in Chinese)

[18] 王湘茹,于淑娟. 甘蔗糖蜜澄清处理及处理前后组分分析[J]. 中国调味品,2010,35(2):64-68.

[19] 齐晓庆. 甘蔗糖蜜蔗香味物质的制备及性质研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[20] 陈英,陈东,陆琦,等. 基因重组构建甘蔗糖蜜酒精高产酿酒酵母菌株[J]. 生物技术,2017,27(2):117-122.

CHEN Y,CHEN D,LU QI, *et al.* Building a high ethanol yield *Saccharomyces cerevisiae* strain of sugarcane molasses by gene recombination[J]. Biotechnology,2017,27(2):117-122. (in Chinese)

[21] 胡咏梅,艾慎,丁一敏,等. 蔗渣饲料生料发酵工艺的研究[J]. 饲料工业,2006,27(17):27-29.

[22] 秦祖赠,刘自力. 甘蔗糖蜜制取液体糖工艺的研究[J]. 食品研究与开发,2006,27(2):69-71.

[23] 农立忠,谭文兴,邓广华,等. 用精炼糖糖蜜制备高色率和高红色素指数焦糖色素的工艺研究[J]. 甘蔗糖业,2013(5):13-19.

[24] 敖俊化,邓海华,李奇伟,等. 施用糖蜜酒精废液对土壤理化性质的影响研究[J]. 广东农业科学,2009(7):178-181.

[25] 韦绍龙,黄素梅,韦莉萍,等. 糖蜜酒精发酵液对香蕉产量、品质及土壤理化性质的影响[J]. 南方农业学报,2016,47(6):895-900.

[26] 黎兴江. 中国苔藓志. 第四卷[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[27] 杨雪伟, 赵允格, 许明祥. 黄土丘陵区藓结皮优势种形态结构差异[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 370-377.
YANG X W, ZHAO Y G, XU M X. Variation of morphological structure of dominant species in moss crusts in Hilly Loess Plateau region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(2): 370-377. (in Chinese)

[28] GLIME J M. Economic and ethnic uses of bryophytes [M]// ZANDER R E A. Flora of north American; Vol. 27. New York: Oxford Univeristy Press, 2007: 14-41.

[29] 徐杰, 白学良, 杨持, 等. 固定沙丘结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 545-551.
XU J, BAI X L, YANG C, *et al.* Study on diversity and binding-sand effect of moss on biotic crusts of fixed dunes[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(4): 545-551. (in Chinese)

[30] 傅立国. 中国高等植物. 第一卷[M]. 青岛: 青岛出版社, 2012.

[31] 杨永胜. 黄土高原苔藓结皮的快速培育及其对逆境的生理响应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

[32] 娄红祥. 苔藓植物化学与生物学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 2006.

[33] HOFFMAN G R. Ecological studies of *Funaria hygrometrica* hedw. in eastern washington and northern idaho[J]. Ecological Monographs, 1966, 36(2): 157-180.

[34] 梁书丰. 三种藓类的快速繁殖研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.

[35] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209-1218.

LIU X D, QIAO Y N, ZHOU G Y. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(12): 1209-1218. (in Chinese)

[36] 马瑞萍, 韦泽秀, 卓玛. 西藏农田土壤有机质研究进展和展望[J]. 中国农学通报, 2015, 31(11): 243-247.
MA R P, WEI Z X, ZHOU M. Research progress and prospects of soil organic matter of tibet farmland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(11): 243-247. (in Chinese)

[37] 李文芳, 杨世俊, 文赤夫, 等. 土壤有机质的环境效应[J]. 环境与可持续发展, 2004(4): 31-33.

[38] 周利军, 叶会财, 李大明, 等. 配施有机肥对潜育化水稻土的培肥效果[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 89-93.
ZHOU L J, YE H C, LI D M. Effect combined application of organic fertilizer on fertility of gleying paddy soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences, 2016(1): 89-93. (in Chinese)

[39] 吉雪花, 张元明, 陶冶, 等. 藓类结皮斑块面积与环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1803-1809.
JI X H, ZHANG Y M, TAO Y, *et al.* Size characteristics of the moss crust patches and its relationship to the environmental factors in the gurbantunggut desert[J]. Journal of desert research, 2013, 33(6): 1803-1809. (in Chinese)

[40] 徐杰, 白学良, 田桂泉, 等. 腾格里沙漠固定沙丘结皮层藓类植物的生态功能及与土壤环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 92-100.

[41] 陈玉玲. 腐植酸对植物生理活动的影响[J]. 植物学通报, 2000, 17(1): 11-16.

(上接第 104 页)

[20] 周火明, 毛燕, 鲁丛平, 等. 白花泡桐树干解析研究[J]. 安徽林业科技, 2016, 42(3): 16-19.

[21] HUNT E R, LAVINGNE M B. Factorscontrolling the decline of net primary production vrith stand age for balsam fir in new-foundland assessed using an ecosystem simulation model [J]. Ecological Modeling, 1999, 122: 161-164.

[22] 向志民, 何敏. 几种杨树生长进程动态分析[J]. 西北林学院学报, 1994, 9(2): 82-86.
XIANG Z M, HE M. Dynamic analysis on the growth processes of populus[J]. Journal of Northwest Forestry University, 1994, 9(2): 82-86. (in Chinese)

[23] 徐宏远, 陈章水. 不同密度 I-69 杨树生长规律的研究[J]. 林业科学研究, 1994, 7(1): 61-66.

[24] 金之庆, 高亮之, 译. 农业中的数学模型[M]. 北京: 农业出版社, 1991.

[25] MENDES B R, CALEGARIO N, VOLPATO C E S, *et al.* Development of individual tree growth model based on defferential equations[J]. Cerne, 2006, 12(3): 254-255.

[26] 苑延华. 关于 Logistic 模型参数估计的比较[J]. 黑龙江科技学院学报, 2008(6): 474-477.

[27] 陈占仙, 张明铁, 张秋良. 额济纳胡杨生长规律的研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2009, 30(4): 65-69.

[28] 王立明, 张秋良, 殷继燕. 额济纳胡杨林生长规律及生物生产力的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 94-99.

[29] 金骅, 苏永红, 马小红, 等. 额济纳胡杨林土壤呼吸日间变化研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(Supp. 1): 375-380.

[30] 高润宏, 董智, 张昊, 等. 额济纳绿洲胡杨林更新及群落生物多样性动态[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1019-1025.

[31] 周洪华, 李卫红, 李玉朋, 等. 基于树木年轮技术的塔里木河下游河岸胡杨林生态需水量研究[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7576-7584.
ZHOU H H, LI W H, LI Y P, *et al.* Estimation of ecological water demand of a desert riparian forest using tree rings of *Populus euphratica* in the lower Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7576-7584. (in Chinese)

[32] CHEN Y, CHEN Y, XU C, *et al.* Effects of ecological water conveyance on groundwater dynamics and riparian vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 170-177.

[33] 玉米提·哈力克, 柴政, 罗淑政, 等. 新疆塔里木河下游胡杨树高生长量及其空间分布研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 187-191.
HALIK U, CHAI Z, LUO S Z, *et al.* Study on the height volume growth of *Populus euphratica* and spatial distribution in lower reaches of Tarim River, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2008, 22(5): 187-191. (in Chinese)