

科尔沁沙地藓类结皮人工培育技术

王鹤松¹, 吴慧光², 徐芸², 周立业^{1*}, 罗亚勇³

(1. 内蒙古民族大学草业学院, 内蒙古 通辽 028043; 2. 国能宝日希勒能源有限公司水电中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021025; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要:【目的】探究科尔沁沙地藓类结皮的关键影响因子及最优组合, 为该区域大范围结皮生态修复提供理论支撑。【方法】通过正交试验设计, 考虑接种量、凋落物种类、沙质土量、加水间隔时间、透光率、种植添加方式6个因素, 分析藓类结皮盖度、株高和结皮层干重对不同因素的响应。【结果】1) 接种量、凋落物种类、沙质土量、加水间隔时间、透光率、种植添加方式对藓类结皮盖度、株高和结皮层干重均有显著影响($P < 0.05$), 不同因素对各指标的影响程度不同; 2) 在接种量150 g、有机肥15 g、沙质土250 g、加水间隔时间5 d、透光率70%、种植添加方式(上层种子土中间凋落物下层沙质土)条件下盖度最大, 为96%, 在接种量90 g、有机肥15 g、沙质土0 g、加水间隔时间5 d、透光率70%、种植添加方式(上层种子土中间沙质土下层凋落物)条件下株高最大, 为3.38 mm, 在接种量150 g、生物炭15 g、沙质土100 g、加水间隔时间5 d、透光率40%、种植添加方式(混合添加)条件下结皮层干重最大, 为0.69 g/cm², 显著大于其他处理。【结论】因盖度可直接反应藓类结皮生长状况, 科尔沁沙地藓类结皮快速培育最优组合为接种量150 g、有机肥15 g、沙质土250 g、加水间隔时间5 d、透光率70%、上层种子土中间凋落物下层沙质土, 温室培育50 d, 藓类结皮盖度可达到85%。

关键词: 科尔沁沙地; 藓类结皮; 人工培育; 盖度; 株高; 结皮层干重

中图分类号: S154 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2025)01-0098-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2025.01.012



科尔沁沙地位于我国北方风沙源区, 属于典型生态脆弱区, 分布区面积约为6.63万km², 多年来, 由于气候变化及不合理的人为活动等影响, 风蚀、风积作用强烈, 致使该地区土壤沙化严重^[1]。生物土壤结皮(简称“生物结皮”)是沙地生态系统的重要组成部分, 它的存在对于维持土壤肥力、保护物种多样性、改善微环境等起着重要作用^[2]。科尔沁沙地环境恶劣, 推

广低矮、需水量小、抗逆性强的植被, 成为下一步生态修复的工作重点。生物土壤结皮是旱区地表景观的重要组成部分, 约占全球旱区地表面积覆盖率的70%左右, 在我国主要分布在西北干旱半干旱区^[3]。它是由土壤表面微生物、藻类、藓类等非维管植物与土壤颗粒相互胶结所形成的薄垫状有机表土层, 因其独特的生态功能被喻为全球旱区“环境工程师”^[4]。与藻类、地衣结皮相比, 藓类结皮是生物结皮的最高级演替阶段^[5], 它具有假根等形态学特征的分化, 光合作用与无性繁殖能力更强, 生态功能更加全面^[6]。已有研究表明^[7], 藓类结皮通过增强土壤颗粒间团聚作用, 不仅能强化沙面固定、减少土壤风蚀、改善土壤理化性质, 还会增加土壤有机质含量和微生物活性。藓类结皮以其独特抗逆性已成为沙地生态系统演变的关键环节, 但在自然条件下, 其生长发育受多种自然及人为因素制约, 扩繁速度非常缓慢、降低了生态作

收稿日期: 2024-01-02; **修回日期:** 2024-03-25

基金资助: 国家自然科学基金项目(42275132, 42142027); 内蒙古自治区重点研发和成果转化项目(2022YFDZ0028); 内蒙古自然科学基金项目(2022MS03060)

作者简介: 王鹤松(1998-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生。E-mail: 2284585190@qq.com

*通信作者, 研究方向为草地生态与环境修复。

E-mail: toni2002@126.com

用^[8]。因此探究科尔沁沙地藓类结皮快速培育技术,对于加快该区域生态修复进展具有重要现实意义。

目前旱区藓类结皮培育技术,我国不同领域学者研究多集中在西北地区。例如,杨延哲等^[9]对毛乌素沙地苔藓结皮的野外人工培育技术的研究表明,改善旱区培育环境条件,对于促进藓类结皮生长发育是可行的;李晨辉等^[10]通过水蚀风蚀交错区藓结皮野外快速培育试验,发现人为控制结皮种植时间、土壤类型、施用营养液等都会影响藓类结皮的形成和发育;杨永胜等^[11]为了解快速培育黄土高原苔藓结皮的关键影响因子,通过调查分析不同表层土壤含水量、光照强度和接种量组合,试验结果发现,表层土壤含水量是影响藓类结皮快速繁育的最主要因素。科尔沁沙地位于我国东北地区,由于不同气候区内生物结皮具有不同生物学特性,为促进该地区藓类结皮快速繁育,对生境针对性培育研究十分必要。

本研究以科尔沁沙地自然发育的藓类结皮为种源,通过室内培育试验探究接种量、凋落物种类、沙质土量、加水间隔时间、透光率、种植添加方式,优化科尔沁沙地藓类结皮快速培育方案,旨在为科尔沁沙地藓类结皮快速恢复提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古通辽市境内的中科院奈曼沙漠化研究站温室大棚内(120°41' E, 42°55' N;海拔357.9 m)。研究站位于科尔沁沙地南缘,属于北温带半干旱大陆性季风气候区,年平均气温3~7℃,多年降水量349~501 mm,其中80%降水集中于夏季,年潜在蒸发量1540~2540.4 mm,年日照时间2830~3121 h,大风日数20~60 d。地貌特征以参差不平沙丘地和较平缓草甸交错分布为主,土壤类型多为沙质土、草甸土、栗钙土等^[12];藓类结皮多分布于迎风坡或低洼处等水分条件较好的植被下,真藓科(*Bryum argenteum*)的银叶真藓(*Bryum argenteum*)为优势物种,土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)和厚肋流苏藓(*Crossidium crassinerve*)为伴生物种;天然植物群落以中旱生植物为主要植物,主要分布植物种类有白草(*Pennisetum centrasianicum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、三芒草(*Aristida adscensionis*)等;人工植被多为小叶

锦鸡儿(*Caraganam icrophylla*)、小叶杨(*Populus simonii carr*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)等^[13]。

1.2 试验材料

2022年5月上旬,在研究站附近封育区采集以银叶真藓为优势物种的结皮样品,以简化培养步骤,采集的平均厚度为 8.39 ± 0.52 mm($n=9$)。采集藓类结皮前用软细毛刷轻扫结皮表面肉眼可见的浮沙及其它杂质,用小平铲铲取9~16 mm厚的结皮层,结皮块阴干后磨成细土状,通过0.1 mm孔径土壤筛过滤、混匀制成种子土(粉碎后藓类植物的茎叶直径均远大于0.1 mm,过滤不会损失),经测定,每1 kg种子土中含藓类生物体碎片140 g;有机肥由牛粪、羊粪、玉米秸秆按照重量5:4:2充分混合、发酵制成;玉米秸秆通过高温缺氧分解法热裂解成粘粒状生物炭。

1.3 试验设计

采用室内盆栽法,考虑6个因素:接种量(5个水平)、凋落物种类(5个水平;每水平添加15 g)、沙质土量(5个水平)、加水间隔时间(5个水平)、透光率(4个水平)、种植添加方式(3个水平)(表1),采用正交试验方法设计(表2),设置25组不同处理,每处理16个重复,共400个育苗盘供试。采用可分离式育苗盘培育藓类结皮,育苗盘由上层密盘和下层储水托盘构成(长32.5 cm;宽24.5 cm;托盘高4.5 cm;密盘高2 cm);经前期预试验发现,向储水托盘加800 mL纯净水,可确保储水托盘内水位线与密盘紧密接触;密盘底部孔隙远大于沙粒直径,为防止密盘漏沙,密盘上铺垫200目的尼龙布,将25组不同基质配比按照不同种植添加方式平铺在尼龙布上沙层表面(沙层厚1 cm)。通过温室大棚培育,室内空气温度为25~36℃;空气湿度为26~84% RH;平均风速为0.7 m/s左右。以裸沙作为对照(处理1),试验自2022年6月1日第1次注水开始(试验时间:115 d)。

1.4 藓类结皮各项指标测定方法

结皮盖度:采用网格法测定,于育苗盆中以5点取样法,选取5个样点后,使用点针样框法测定^[10],网格焦点下有藓类植物则记为1,无则记为0,将计数结果相加并取平均值,正方形网格板尺寸为5 cm×5 cm,网格规格为0.5 cm×0.5 cm。

株高度:在育苗盆两对角线上均匀选取5个点,每个点使用电子游标卡尺随机无损测量藓类植株体高

表1 因素及水平
Table 1 Factors and levels

因素	水平				
	1	2	3	4	5
接种量/g	0	30	60	90	150
凋落物种类	无	玉米秸秆屑	木屑	生物炭	有机肥
沙质土量/g	0	50	100	150	250
加水间隔时间/d	3	5	7	10	15
透光率/%	40	55	70	100	
种植添加方式	种/凋/沙	种/沙/凋	混合添加		

注:表中种植添加方式:种/凋/沙为上层种子土、中层凋落物、下层沙质土;下表同。

表2 正交试验实施方案
Table 2 The orthogonal experiment and implementation plan

处理	接种量/g	凋落物种类	沙质土量/g	加水间隔时间/d	透光率/%	种植添加方式
1	0	无	150	3	40	种/凋/沙
2	0	玉米秸秆屑	100	10	70	种/沙/凋
3	0	木屑	250	5	100	混合添加
4	0	生物炭	50	15	70	混合添加
5	0	有机肥	150	7	55	种/沙/凋
6	30	无	250	10	70	种/凋/沙
7	30	玉米秸秆屑	50	5	55	种/凋/沙
8	30	木屑	150	15	40	种/沙/凋
9	30	生物炭	0	7	40	混合添加
10	30	有机肥	100	3	100	混合添加
11	60	无	150	5	70	种/沙/凋
12	60	玉米秸秆屑	0	15	100	种/凋/沙
13	60	木屑	100	7	70	种/凋/沙
14	60	生物炭	250	3	55	种/沙/凋
15	60	有机肥	50	10	40	混合添加
16	90	无	100	15	55	混合添加
17	90	玉米秸秆屑	250	7	40%	混合添加
18	90	木屑	50	3	40	种/沙/凋
19	90	生物炭	150	10	100	种/凋/沙
20	90	有机肥	0	5	70	种/沙/凋
21	150	无	50	7	100	种/沙/凋
22	150	玉米秸秆屑	150	3	70	混合添加
23	150	木屑	0	10	55	种/凋/沙
24	150	生物炭	100	5	40	混合添加
25	150	有机肥	250	5	70	种/凋/沙

度3次并取平均值^[9]。

结皮层干重:在育苗盆的两条对角线上均匀选取5个点,使用直径5 cm 环刀取大于10 mm厚度结皮样

品(取前润湿环刀内壁,以便从环刀取出完整结皮块),自然阴干后,施加外力去除结皮层下方黏附的干燥土壤,使结皮层完整、自然剥离,将计数结果相加并

取平均值。

有机质:采用重铬酸钾氧化—外加加热法^[14]测定在结皮层干重中去除的土壤。

全氮:采用凯氏定氮法^[14]测定在结皮层干重中去除的土壤。

1.5 数据分析与处理

数据使用 Microsoft Office Excel 2017 进行整理, 图表制作使用 Origin 2018 进行制作, 利用统计分析软件 SPSS 26.0 for Windows 对不同处理的各指标进行方差分析和多重比较, 显著性差异采用 LSD 法 ($\alpha=0.05$), 通过极差分析方法, 比较不同因素对藓类结皮生长特性影响程度及培育最优组合。

2 结果与分析

2.1 不同处理对藓类结皮盖度的影响

在试验期(115 d), 25 组不同配比的藓类结皮盖度均呈上升趋势, 但各组藓类结皮盖度增加幅度不同

(图 1)。不同处理的结皮层下土壤有机碳、全氮含量相异, 藓类结皮盖度大的处理, 其结皮层下土壤有机碳、全氮含量也高于其他处理(图 2、图 3)。试验末期处理 7、11、20、23、25 藓类结皮盖度均显著高于其他处理 ($P<0.05$), 处理 25 藓类结皮盖度为组间最大(约 96%) (图 1)。对照裸沙, 不同生长时期藓类结皮盖度增加显著(图 4、图 5)。多因素方差分析结果表明, 接种量对藓类结皮盖度影响极显著 ($F=211.62$, $P<0.01$), 其他因素对盖度影响不显著。根据极差 T 值(表 3), 影响藓类结皮盖度最大因素是种植添加方式, 其次是接种量、加水间隔时间、凋落物种类、沙质土量、透光率; 对促进藓类结皮盖度增加, 培育最优组合是接种量 150 g、有机肥 15 g、沙质土 150 g、加水间隔时间 5 d、透光率 100%、种植添加方式(上层种子土中间凋落物下层沙质土)。

表 3 试验末期藓类结皮盖度极差分析表

Table 3 Table of mossy crust coverage range analysis at the end of the experiment

所在列	因素					
	接种量/g	凋落物种类	沙质土量/g	加水间隔时间/d	透光率/%	种植添加方式
\bar{K}_1	5.20	67.20	68.40	70.60	66.57	76.13
\bar{K}_2	79.40	68.00	67.60	72.20	70.60	67.38
\bar{K}_3	83.60	68.40	64.20	66.20	65.25	61.00
\bar{K}_4	82.40	64.20	70.20	64.80	71.20	
\bar{K}_5	88.80	71.60	69.00	65.60		
极差 T	9.40	7.40	6.00	7.40	5.95	15.13

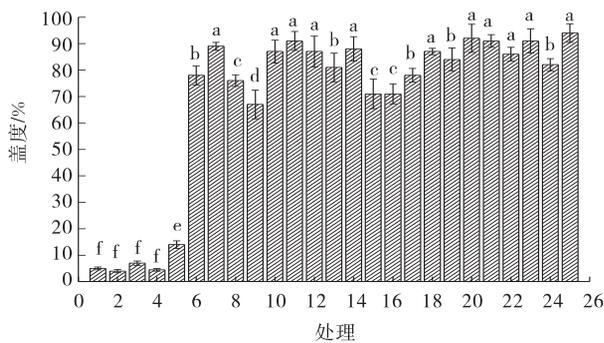


图 1 试验末期各处理盖度

Fig. 1 Coverage of each treatment at the end of the experiment

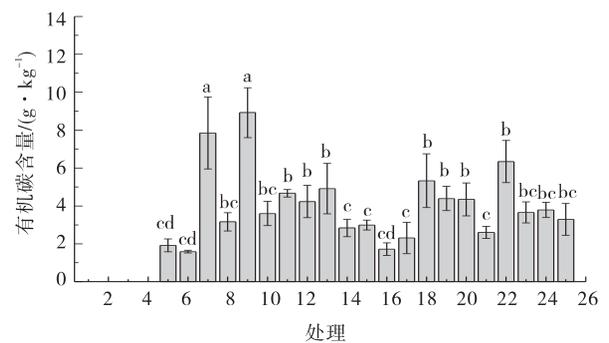


图 2 试验末期各处理有机碳含量

Fig. 2 Organic carbon content of each treatment at the end of the experiment

2.2 不同处理对藓类株高的影响

试验末期不同处理下的藓类株高差异显著(图

6)。处理 20 株高为组间最大(3.38 mm), 处理 9 株高为组间最小(0.88 mm)。处理 1~5 没有藓类结皮生

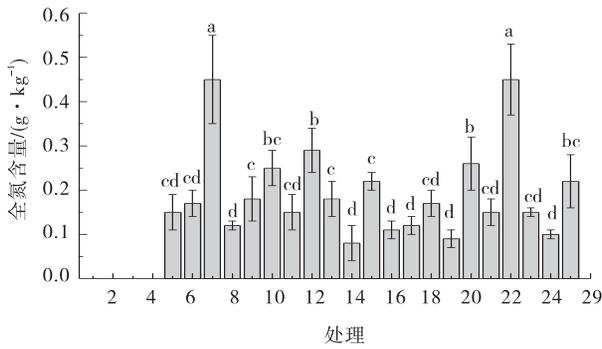


图3 试验末期各处理全氮含量

Fig. 3 Total nitrogen content of each treatment at the end of the experiment

成,只有微量菌斑存在。方差分析结果表明,接种量对株高影响显著($F=10.57, P<0.05$),其他因素对株高影响不显著。依据极差T值(表4),影响藓类株高最大因素是凋落物种类,其次是加水间隔时间、接种量、沙质土量、透光率、种植添加方式;对促进藓类株

高增加,培育最优组合是接种量90 g、有机肥15 g、沙质土0 g、加水间隔时间5 d、透光率70%、种植添加方式(上层种子土中间沙质土下层凋落物)。

2.3 不同处理对藓类结皮层干重的影响

试验末期不同处理下的藓类结皮层干重差异显著。处理24藓类结皮层干重为组间最大(0.69 g/cm²),处理7藓类结皮层干重为组间最小(0.13 g/cm²)。处理1~5没有藓类结皮生成,只有微量菌斑存在。方差分析结果表明,各因素对藓类结皮层干重影响均不显著。依据极差T值(表5),影响藓类结皮层干重最大因素是凋落物种类,其次是沙质土量、加水间隔时间、透光率、接种量、种植添加方式;对促进藓类结皮层干重增加,培育最优组合是接种量150 g、生物炭15 g、沙质土250 g、加水间隔时间5 d、透光率40%、种植添加方式(上层种子土中间沙质土下层凋落物)。

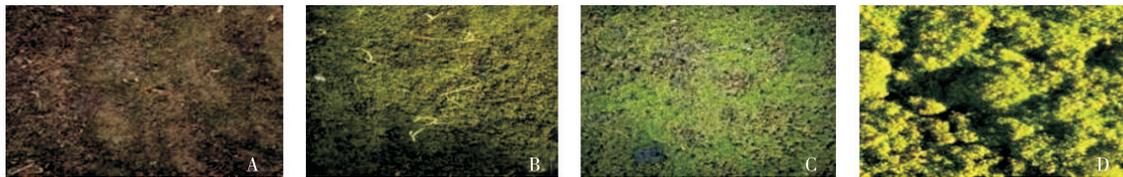


图4 处理25分别在试验期第15 d(A)、45 d(B)、75 d(C)、115 d(D)盖度情况

Fig. 4 The coverage of treatment 25 at 15 d (A), 45 d (B), 75 d (C), and 115 d (D) of the experimental period

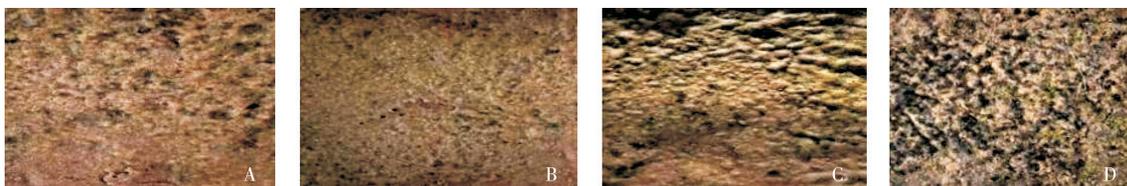


图5 裸沙处理1分别在试验期第15 d(A)、45 d(B)、75 d(C)、115 d(D)盖度情况

Fig. 5 The coverage of bare sand treatment 1 at 15 d (A), 45 d (B), 75 d (C) and 115 d (D) of the experimental period

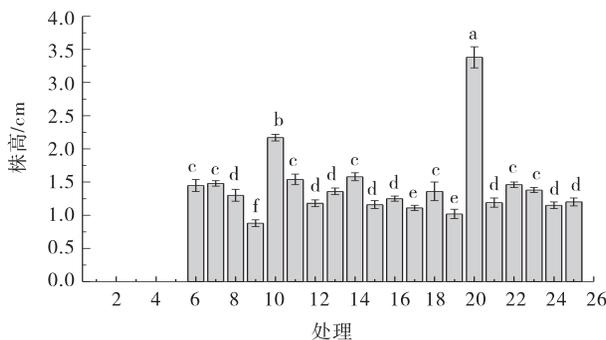


图6 试验末期各处理株高

Fig. 6 Plant height of each treatment at the end of the experiment

3 讨论

3.1 接种量对藓类结皮发育的影响

本研究结果表明,藓类结皮盖度、结皮层干重随种子土接种量增加均呈增长趋势,说明施用种子土会增加藓类结皮盖度、结皮层干重。陈彦芹等^[15]的研究表明,藓类结皮种子土中富含藓类等植物体碎片和矿物质元素,施用种子土会在一定程度上改善基质养分水平。李金峰等^[16]在试验中发现,种子土中富含土壤粉粒,随施用量增加会提高基质表面粉粒物质含量。

表4 试验末期藓类株高极差分析

Table 4 Analysis table of height range of moss plants at the end of the experiment

所在列 I	因素					
	接种量/g	凋落物种类	沙质土量/g	加水间隔时间/d	透光率/%	种植添加方式
\bar{K}_1	0.00	1.09	1.36	1.31	0.99	1.13
\bar{K}_2	1.46	1.05	1.04	1.51	1.14	1.29
\bar{K}_3	1.36	1.08	1.19	0.91	1.30	1.02
\bar{K}_4	1.62	0.92	1.06	1.00	1.11	
\bar{K}_5	1.28	1.58	1.07	0.99		
极差 T	0.34	0.66	0.32	0.60	0.31	0.27

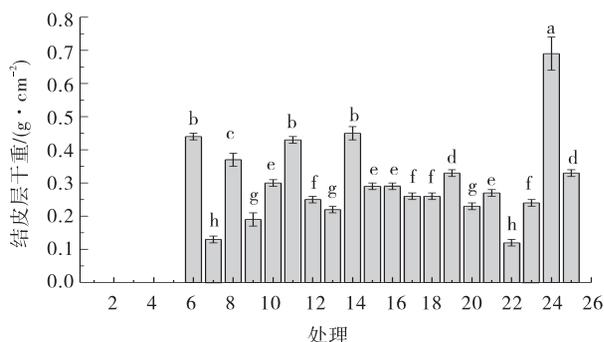


图7 试验末期各处理结皮层干重

Fig. 7 The dry weight of knot cortex in each treatment at the end of the experiment

赵哈林等^[17]也报道了类似的结果,指出粉粒是藓类结皮形成的物质基础和前提条件,基质表面土壤粉粒含量越高藓类结皮越容易形成。这些研究结果都间接证明了本研究结果。此外,接种量与附着在基质表面藓类植物的茎叶碎片量呈正相关关系^[18]。试验末期,藓类植株高度随接种量增多呈“低—高一低”变化趋势(接种量90 g为对应株高最大值)。造成这种结果可能原因是,由于接种量提高,使单位面积内藓类植物的茎叶碎片增多,尽管生长初期会加快藓类扩繁速度,但也会增加藓类个体间内对于养分的竞争,影响藓类生长发育。因此要综合考虑接种量对藓类结皮生长特性的影响,适时对藓类结皮进行追肥,才能促

进藓类结皮快速繁育。

3.2 凋落物种类对藓类结皮发育的影响

藓类结皮发育状况与土壤中Mn、Zn、K等元素含量有关^[19]。晁赢等^[20]在试验中发现,施用有机肥对于优化土壤养分结构有显著作用。本研究结果表明,凋落物种类选用有机肥的处理(处理10、15、20、25),藓类结皮盖度、株高和结皮层干重处于较高水平。试验末期,对不同处理藓类结皮层下土壤有机碳、全氮含量进行测定,结果发现藓类结皮层干重越大其下层土壤C、N含量就越低,说明藓类结皮发育状况受基质养分水平影响显著。经测定表明,有机肥中有机质含量为4.63 g/kg,显著高于其他凋落物种类。这与前人研究结果一致^[19-20]。因此可以确定施用有机肥有利于藓类结皮的繁育,但不同地区的土壤、气候类型相异,对有机肥的施用方案还需要进一步探究。

3.3 沙质土量对藓类结皮发育的影响

本研究结果表明,沙质土量对藓类结皮盖度、株高和结皮层干重均无显著影响,造成这种结果的可能原因有:1) 试验中施用粉末状种子土中存在一定量的土壤粉粒,这些土壤粉粒能满足藓类结皮最低生长发育需要;2) 部分处理凋落物种类选用有机肥和生物炭,有机肥和生物炭颗粒大小类似于粉粒,其施用也

表5 试验末期藓类结皮层干重极差分析

Table 5 Analysis table of dry weight range of moss nodules at the end of the test

所在列	因素					
	接种量/g	凋落物种类	沙质土量/g	加水间隔时间/d	透光率/%	种植添加方式
\bar{K}_1	0.00	0.28	0.18	0.23	0.29	0.24
\bar{K}_2	0.28	0.15	0.19	0.30	0.22	0.25
\bar{K}_3	0.32	0.22	0.23	0.19	0.21	0.22
\bar{K}_4	0.27	0.33	0.25	0.26	0.23	
\bar{K}_5	0.33	0.23	0.30	0.24		
极差 T	0.05	0.18	0.12	0.11	0.08	0.03

会充当一部分沙质土作用。王蕊等^[21]在研究中发现, 藓类结皮生长发育需要4%~5%的粉粒物质, 这也间接证明了本研究结果。因此藓类结皮培育中应全面考量其他因素添加对沙质土添加量的影响。

3.4 加水间隔时间对藓类结皮发育的影响

水分是藓类结皮生长发育的关键驱动力^[22]。本研究结果表明, 对藓类结皮盖度、株高和结皮层干重最优的加水间隔时间均为5 d(2/3饱和水量), 随着加水间隔时间加大(7、10和15 d)结皮生长速度逐渐降低, 原因可能如下, 首先, 藓类植物缺乏维管组织、没有真正根系统等形态学特征结构, 造成藓类结皮对生境水分调节能力差^[23]。藓类扩繁主要依靠生物体碎片产生原丝体, 原丝体分枝进而发育成完整藓类生物体, 由于处于发育阶段的原丝体抗旱性极差, 使得藓类结皮对生境水分变化敏感^[22]。其次, 在本试验中, 每次向储水盘加水800 mL, 水分基本在5 d左右会被消耗完全, 因此, 加水间隔时间大于5 d时会造成基质间断性短期干旱, 缺水时藓类结皮会因自我保护机制作用转为休眠状态, 减缓其生长发育进程。加水间隔3 d时基质保持饱和水量, 致使基质透气性下降, 影响藓类结皮有氧呼吸过程对物质转化及利用^[24], 阻碍藓类结皮繁育。培育过程中发现, 基质长期保持饱和水量, 会增加病虫害对藓类结皮生长侵扰, 因此, 适宜加水间隔时间是保证藓类结皮快速繁育关键一环。

3.5 透光率对藓类结皮发育的影响

生物结皮由藓类、藻类等阴生植物组成, 其生长所需光照强度远低于高等植物, 光照强度过强会影响藓类等植物体内叶绿素合成过程^[25]。卜崇峰等^[26]的研究结果显示, 光照强度对生物结皮盖度影响达到极显著水平, 光照强度越低结皮发育越快。本试验中, 光照强度对藓类结皮盖度、株高和结皮层干重均无显著影响。可能原因是供水方式不同导致研究结果的差异, 本试验中利用下层储水托盘向上反渗透水分供水, 与传统喷灌、漫灌等供水区别在于, 可持续为藓类结皮发育提供稳定水分, 不会造成结皮表面积水。加水间隔3 d、5 d时, 可保证结皮表面持续湿润, 水分通过蒸发等方式缓解环境积温可能造成的热损伤, 还可能通过光反射、折射等物理过程减弱光照强度。加水间隔7、10和15 d相较于3、5 d, 不同透光率遮荫网下结皮发育程度都显著降低。因此, 适宜的水分条件会

极大促进藓类结皮繁育, 水分对藓类结皮生长发育起到一定保护作用。同年8月在采集藓类结皮样品封育区进行结皮分布调查时发现, 相同地势不同植被冠层下表层土壤含水量高的藓类结皮生长特性更好, 这也间接支持了本研究结果。

3.6 种植添加方式对藓类结皮发育的影响

本研究中, 对藓类结皮盖度而言, 最优种植添加方式为水平1(上层种子土中间凋落物下层沙质土); 对藓类株高和结皮层干重而言, 最优种植添加方式为水平2(上层种子土中间沙质土下层凋落物)。这可能是藓类结皮盖度增加是藓类植物不断扩繁的结果, 水平1中凋落物置于基质表面, 会显著提高基质孔隙度, 使藓结皮获得更充足氧气, 促进其有氧呼吸效率, 有利于藓类生物体扩繁。对藓类株高和结皮层干重而言, 水平2中沙质土置于基质表面, 会提高基质表面粉粒含量, 增强藓类生物体茎叶碎片附着力, 增加藓类结皮层内部团聚力, 促进藓类结皮层快速形成致密、稳定结构。通过本研究结果, 发现控制其他培育条件一致, 改变种植添加方式对藓类结皮不同生长特性影响不同; 将种子土撒播基质表面相比于混合基质内, 更有利于藓类结皮萌发生长。

4 结论

不同因素对不同指标影响顺序不同。各因素对藓类结皮盖度影响大小的顺序为: 种植添加方式>接种量>加水间隔时间>凋落物种类>沙质土量>透光率; 对藓类株高影响大小的顺序为: 凋落物种类>加水间隔时间>接种量>沙质土量>透光率>种植添加方式; 对藓类结皮层干重影响大小的顺序为: 凋落物种类>沙质土量>加水间隔时间>透光率>接种量>种植添加方式。

科尔沁沙地藓类结皮快速培育方法以盖度作为主要判断指标, 最优培育组合为: 接种量150 g、有机肥15 g、沙质土250 g、加水间隔时间5 d、透光率70%、种植添加方式(上层种子土中间凋落物下层沙质土), 培育50 d, 盖度可达85%。

参考文献:

- [1] 张丙昌, 武志芳, 李彬. 黄土高原生物土壤结皮研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1123-131.
- [2] 程军回, 张元明. 影响生物土壤结皮分布的环境因子[J].

- 生态学杂志, 2010, 29(1): 133—141.
- [3] 熊文君, 徐琳, 张丙昌, 等. 生物土壤结皮结构、功能及人工恢复技术[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 191—193.
- [4] 李新荣, 谭会娟, 回嵘, 等. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J]. 科学通报, 2018, 63(23): 2320—2334.
- [5] 周晓兵, 张丙昌, 张元明. 生物土壤结皮固沙理论与实践[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 164—173.
- [6] 韩炳宏, 牛得草, 贺磊, 等. 生物土壤结皮发育及其影响因素研究进展[J]. 草业科学, 2017, 34(9): 1793—1801.
- [7] 赵芸, 贾荣, 滕嘉玲, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被演替生物土壤结皮盖度对沙埋的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6138—6148.
- [8] 洪光宇, 王晓江, 张雷, 等. 科尔沁沙地生物结皮与其他植被覆盖耗水率的研究[J]. 内蒙古林业科技, 2017, 43(4): 15—20.
- [9] 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): 166—170.
- [10] 李晨辉. 水蚀风蚀交错区藓结皮野外快速培育试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 40—48.
- [11] 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—299.
- [12] 连杰, 赵学勇, 王少昆, 等. 科尔沁沙地风蚀作用对土壤碳、氮分布的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 529—535.
- [13] 郭轶瑞, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地人工林下结皮发育对表土特性影响的研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1000—1006.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56—135.
- [15] 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.
- [16] 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—79.
- [17] 赵哈林, 郭轶瑞, 周瑞莲, 等. 降尘、凋落物和生物接种对沙地土壤结皮形成的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 693—700.
- [18] 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.
- [19] 张元明. 荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征[J]. 科学通报, 2005, 50(1): 42—47.
- [20] 晁赢, 付钢锋, 阎祥慧, 等. 有机肥对作物品质、土壤肥力及环境影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(29): 103—107.
- [21] 王蕊, 朱清科, 卜楠, 等. 黄土丘陵沟壑区生物土壤结皮理化性质[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 401—408.
- [22] 陶玲, 任汉儒, 周怡蕾, 等. 水分和养分供应对凹凸棒石复配苔藓结皮生长的影响[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 288—294.
- [23] 岳艳鹏. 生物土壤结皮对沙地生态水文过程以及水量平衡的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
- [24] 孙福海, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原不同发育阶段生物结皮的导水和持水特征[J]. 草业学报, 2021, 30(6): 54—63.
- [25] 许文文, 赵燕翘, 王楠, 等. 人工生物土壤结皮对草本植物群落组成与多样性的影响[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 205—209.
- [26] 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(7): 938—941.

Study on artificial cultivation of moss crust in Horqin sandy land

WANG He-song¹, WU Hui-guang², XU Yun², ZHOU Li-ye^{1*}, LUO Ya-yong³

(1. College of Grassland, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, 028043, China; 2. Hydropower center, Baorixile Energy Co. LTD, China Energy, Hulun Buir, Inner Mongolia 021025, China; 3. Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The purpose of the study is to explore the key influencing factors and optimal combina-

tions of moss crust in Horqin sandy land, and to provide theoretical support for ecological restoration of large-scale moss crust in this area. 【Method】 Through orthogonal experiment design, considering 6 factors, such as inoculation amount, litter species, sandy soil amount, water addition interval, light transmittance and planting addition method, the response of moss crust coverage, plant height and dry weight to different factors was analyzed. 【Result】 1) Inoculation amount, litter species, sandy soil amount, water addition interval, light transmittance and planting method had significant effects on the cover, plant height and dry weight of moss crust ($P < 0.05$), and different factors had different effects on each index. 2) In terms of coverage, the maximum was 96% under the conditions of inoculation amount of 150 g, organic fertilizer 15 g, sandy soil 250 g, water addition interval of 5 days, light transmittance of 70%, and planting addition method (upper seed soil in the middle of litter and lower sandy soil). Under the conditions of inoculation amount of 90 g, organic fertilizer 15 g, sandy soil 0 g, water addition interval of 5 days, light transmission of 70%, planting addition method (between the upper seed soil and the litter of the lower sandy soil), the maximum was 3.38 mm. In terms of dry weight of the layer, The maximum inoculation amount of 150 g, biochar 15 g, sandy soil 100 g, water addition interval of 5 days, light transmission of 40%, and planting addition method (mixed addition) condition was 0.69 g/cm², which was significantly higher than that of other treatments. 【Conclusion】 Because the coverage could directly reflect the growth status of moss crust, the optimal combination for rapid cultivation of moss crust in Horqin sandy land was 150 g inoculation amount, 15 g organic fertilizer, 250 g sandy soil, 5 d water addition interval, light transmittance of 70%, upper seed soil, middle litter and lower sandy soil, and 50 d greenhouse cultivation, the coverage of moss crust could reach 85%.

Key words: Horqin Sandy Land; moss crust; artificial cultivation; coverage; plant height; dry weight of nodular cortex

(责任编辑:康宇坤)