

毛乌素沙地苔藓结皮的野外人工培育技术

杨延哲¹, 张侃侃², 杨永胜¹, 卜崇峰^{1,2}

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

摘要: [目的] 探索影响毛乌素沙地人工培育苔藓结皮的关键因子及其最优组合, 为该区土地荒漠化的治理提供理论支持。[方法] 利用正交试验设计方法, 考虑遮阳、覆膜、营养液、浇水频率 4 个因子, 分析不同因子对苔藓结皮株密度和生物量的影响。[结果] (1) 除 Knop 营养液外, 遮阳、覆膜、浇水频率对苔藓结皮株密度、生物量有显著影响。(2) 遮阳、覆膜、营养液、浇水频率 4 个因素对不同指标的影响顺序不同。(3) 就株密度而言, 野外培养最优条件为遮阳、不覆膜、Knop 营养液和高频率浇水。就生物量而言, 苔藓结皮野外培育最优因素组合为遮阳、覆膜、Knop 营养液和高频率浇水。[结论] (1) 在野外苔藓结皮培育过程中遮阳、覆膜、浇水频率对结皮生长都有显著影响。(2) 在提供适宜的生长条件的前提下, 在干旱半干旱地区进行苔藓结皮人工培育是可行的。

关键词: 苔藓结皮; 野外人工培育; 遮阳; 覆膜; 株密度; 生物量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0165-06

中图分类号: S154.1

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.032

Field Artificial Cultivation Technology of Moss Dominated Crust in Mu Us Sandland

YANG Yanzhe¹, ZHANG Kankan², YANG Yongsheng¹, BU Chongfeng^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The key factors affecting field artificial cultivation of moss dominated crust and their optimal combination were experimented to provide theoretical support for the desertification control in the Mu Us Sandland. [Methods] Based on an orthogonal experimental design with sunshade, film mulching, nutrient solution and watering frequency as controlling factors, plant density and moss biomass of dominated crusts were measured. [Results] (1) except of the Knop nutrient solution, sunshade, film mulching and watering frequency had significant effects on plant density and biomass. (2) Sunshade, watering frequency, film mulching, Knop nutrient solution had varied affecting order on different indicators. In terms of plant density, the best culturing conditions was: sunshade + without film mulching + nutrient solution + high frequency watering. In terms of biomass, the best culturing conditions was sunshade + film mulching + nutrient solution + high frequency watering. [Conclusion] (1) Sunshade, film mulching, watering frequency had significant impacts on the process of artificial cultivation of moss dominated crust. (2) Field artificial cultivation of moss dominated crust in arid and semi-arid regions is feasible on the premise of providing suitable growing conditions.

Keywords: moss dominated crusts; field artificial cultivation; sunshade; film mulching; plant density; biomass

全球陆地面积的 33%~52%处在干旱和半干旱
环境下^[1], 这类地区由于水分条件的限制, 许多植物
不能生存, 地表裸露从而导致土地荒漠化的频繁发
生。因此, 寻求绿色可持续的土地荒漠化治理途径迫

收稿日期: 2015-05-19

修回日期: 2015-06-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“毛乌素沙地生物结皮的风蚀和水分效应及其干扰响应”(41071192); 中国科学院“西部之光”项目(2014-91); 西北农林科技大学科研专项优秀青年基金项目(2014YQ006); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(K318009902-1405)

第一作者: 杨延哲(1991—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 硕士研究生, 研究方向为生物结皮人工培育及风蚀防治。E-mail: 1029404746@qq.com。

通信作者: 卜崇峰(1977—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 副研究员, 主要从事生物土壤结皮的生态功能及其人工培育研究。E-mail: bu-chongfeng@163.com。

在眉睫,而广泛分布于全球干旱和半干旱地区的生物土壤结皮(biological soil crust)引起了科学家们的广泛关注。生物结皮是由隐花植物如蓝藻、绿藻、地衣、苔藓和土壤中的微生物,以及相关的其他生物体通过菌丝体、假根、分泌物等与土层表层颗粒胶结形成的复杂的复合体^[2]。苔藓结皮是生物结皮发育演替的高级阶段,能够很好地适应高温、高盐碱、强辐射等恶劣环境,并且能够固定沙丘,减少风沙侵蚀^[3],因此,苔藓结皮的存在对遏制荒漠化进程和恢复荒漠化地区的生态系统有着重要的作用。已有研究^[4-5]表明,在适宜的环境条件下,苔藓结皮在遭到干扰破坏后是可以快速恢复的,从而为人工培育苔藓结皮提供了现实依据。因此,本研究在毛乌素沙地对苔藓结皮进行野外人工培育,通过控制培育过程中遮阳、覆膜、营养液、浇水频率 4 个因素,分析各个环境因素在苔藓结皮野外人工培育过程中的作用,探索适合野外苔藓结皮人工培育的最佳因素组合,进而应用于土地荒漠化的治理、改良荒漠化土地和水土流失的防治,具有很强的实践应用前景。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在陕西省神木县圪丑沟小流域(北纬 38°53'57", 东经 109°52'44")进行。该区位于毛乌素沙地东南

缘,具有中温带大陆性季风气候的特点,年平均降雨量为 440.8 mm,年平均蒸发量为 2 092 mm,年平均气温 7.8 ℃,最高月(7 月)平均气温 23.9 ℃,最低月(1 月)平均气温 -9.8 ℃。该区是固定-半固定沙丘向黄土丘陵过渡的区域,土壤类型为沙土,养分含量低(表 1),水土流失严重,兼具风蚀、风积的特点,属于农、林、牧交错出现的生态脆弱带。试验区水分条件较好,苔藓结皮占主导地位,主要分布于草本植物沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)下,位于丘间低地的沙柳(*Salix psammophila*)下也有苔藓结皮的分布。苔藓结皮以较耐旱的真藓属为主,包括黄色真藓(*Bryum pallescens*),弯形真藓(*Bryum recurvulum*),银叶真藓(*Bryum argenteum*),还有少量的扭口藓(*Barbula unguiculata*)。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集方法 在干旱环境中苔藓结皮的繁殖更依赖于无性生殖^[6]。基于该思路,本试验以人工粉碎后的苔藓结皮茎叶作为野外人工培育材料,从研究区周边选择苔藓结皮采集发育良好的区域,利用小铲铲取苔藓结皮层,厚度为 1 cm 左右,装入洁净塑料袋中,运回室内自然阴干,人工挑出肉眼可辨的植物残渣、土块、石子等,经微型植物试样粉碎机(FLB-100)粉碎后备用。经鉴定,银叶真藓为优势种。

表 1 研究区域土壤养分含量

有机质/ (g · kg ⁻¹)	全 N/ (g · kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	全 P/ (g · kg ⁻¹)	速效 P/ (mg · kg ⁻¹)	全 K/ (g · kg ⁻¹)	速效 K/ (mg · kg ⁻¹)	pH 值
6.49	0.16	4.02	3.33	0.35	4.04	25.24	109.02	8.04

1.2.2 野外培育试验设计 野外培育在 2012 年 7—10 月进行,考虑遮阳、覆膜、营养液、浇水频率 4 因素、各因素设计为 2 水平,其中遮阳因素采用在小区上覆盖一层遮阳网进行控制,覆膜因素使用普通塑料地膜覆盖在结皮小区之上,营养液选用 Knop 营养液^[7],营养液配方详见表 2。浇水频率分为高频率浇

水(1 次/2 d)和低频率浇水(1 次/6 d),浇水量为每小区每次 3 L。采用正交试验法[L₈(2⁷)正交表],共 8 组处理(表 3),每组 3 次重复。布设 30 个 1 m × 1 m 的小区,随机确定各个小区的处理组合。将采集来的结皮过筛、均匀的撒在 24 个小区中,以裸沙和原状结皮作为对照。

表 2 Konp 营养液成分含量

成分	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O/mg	KNO ₃ /mg	MgSO ₄ · 7H ₂ O/mg	KH ₂ PO ₄ /mg	ZnSO ₄ · 7H ₂ O/mg	蒸馏水/L
含量	1 000	250	250	250	3	1

1.3 观测指标及方法

1.3.1 株密度 分别在小区的对角线上等距离选取 5 个面积为 5 m × 5 cm 的正方形,共 9 个。测量正方形内苔藓株的总数量,除以面积为苔藓株密度。

1.3.2 叶绿素 a 用叶绿素 a 的含量来指示苔藓结

皮的生物量。具体测定方法:在每个小区内用直径为 1.43 cm 的圆形取样器均匀取 3 个样品,厚度 5 mm,将样品带回实验室放入 0.1 mm 筛,用自来水冲洗,使苔藓结皮植株与土壤分离,将苔藓植株晾干后放入研钵用 95% 的乙醇为提取剂,在暗处研磨样品。静

止与黑暗条件下提取。过滤定容到 25 ml 容量瓶内,用分光光度计在 665 和 649 nm 两个波长下测吸光度。根据公式: $C_a = 13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649}$ 计算叶绿素 a 的含量^[8],除以采样面积得出单位面积叶绿素 a 的含量。

表 3 正交试验实施方案

处理编号	遮阳	覆膜	营养液	浇水频率
1	遮阳	覆膜	Knop 营养液	高频率
2	遮阳	覆膜	水	低频率
3	遮阳	无膜	Knop 营养液	低频率
4	遮阳	无膜	水	高频率
5	无遮阳	覆膜	Knop 营养液	低频率
6	无遮阳	覆膜	水	高频率
7	无遮阳	无膜	Knop 营养液	高频率
8	无遮阳	无膜	水	低频率

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 对数据进行处理,利用 SPSS 21.0 软件进行方差分析,显著性差异采用 LSD 法比较($\alpha=0.05$)。通过极差分析方法分析不同因素对各个指标的影响次序。

2 结果与分析

2.1 不同处理下株密度的动态特征

为明确影响苔藓结皮野外培育的关键因素,对各月份苔藓结皮株密度进行极差分析(表 4)和方差分

析。各处理条件下苔藓株密度增长趋势如图 1 所示,从图 1 可以看出,各种处理下苔藓株密度总体趋势都是增加的,株密度最高可达 69 株/cm²,处理 1 在 7—10 月的株密度始终高于其它处理。处理 2,7 苔藓的株密度初期增长速度较快,8—9 月增长速度减慢。处理 4 前 3 个月的苔藓株密度小于处理 2,但 10 月的苔藓株密度出现反超。方差分析结果表明,遮阳对苔藓株密度影响极显著($F=120.428, p<0.01$),浇水频率对苔藓株密度影响显著($F=5.494, p<0.05$),覆膜和营养液对苔藓株密度影响不显著。由极差分析结果可知,各处理极差 T 大小顺序为: $T_1 > T_4 > T_2 > T_3$,说明遮阳因素对苔藓株密度的影响最大,其次为浇水频率、覆膜和 Knop 营养液。就株密度而言,野外培养最优条件为遮阳、不覆膜、Knop 营养液和高频率浇水。

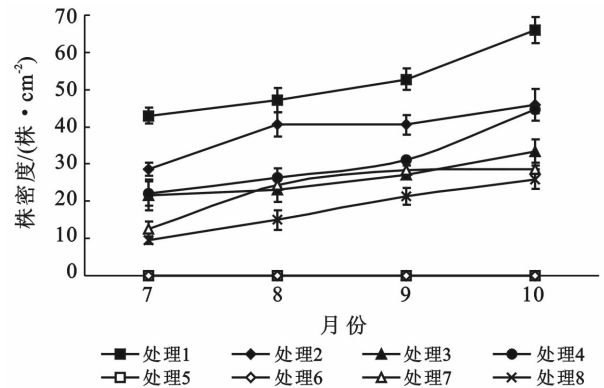


图 1 培育末期各处理的苔藓株密度

表 4 不同因素对苔藓株密度极差分析结果

所在列	因素						
	A(遮阳)	B(覆膜)	C(营养液)	D(浇水频率)	空列 1	空列 2	空列 3
K_1	194.830	115.680	130.280	143.260	168.210	140.360	127.520
K_2	53.240	132.470	117.490	104.470	79.260	107.130	120.970
\bar{K}_1	97.415	57.840	65.140	71.630	84.105	70.180	63.760
\bar{K}_2	26.620	66.370	58.745	52.235	39.630	53.565	60.485
极差 T	63.795	8.530	6.395	19.395	44.475	16.615	3.275

2.2 不同处理下苔藓结皮生物量(叶绿素 a 含量)月动态

苔藓结皮的叶绿素 a 含量受水分变化影响较大。通过观察,环境水分条件好的处理苔藓结皮呈现嫩绿色,水分条件较差时为暗绿色或黑色。遮阳+覆膜处理的水分条件好,苔藓结皮叶绿素 a 的含量高。由图 2 可以看出,各处理下 7—10 月苔藓结皮的叶绿素 a 含量都呈递增趋势,且处理 1 增速最快,叶绿素 a 含量明显高于其他处理。处理 4 的叶绿素 a 含量在 9 月时超过处理 2。

由方差分析可知遮阳、Knop 营养液和浇水频率对叶绿素 a 含量影响极显著(遮阳: $F=51.267, p<0.01$; 浇水频率: $F=22.194, p<0.01$; Knop 营养液: $F=7.471, p<0.01$)。由表 5 可得各处理极差 T 大小顺序为: $T_1 > T_4 > T_3 > T_2$,说明遮阳因素对苔藓结皮叶绿素 a 含量的影响最大,其次为浇水频率、Knop 营养液和覆膜。对于遮阳、覆膜、营养液和浇水频率 4 个因素都表现为: $\bar{K}_1 > \bar{K}_2$,因此就生物量而言,苔藓结皮野外培育最优因素组合为遮阳、覆膜、Knop 营养液和高频率浇水。

表 5 试验末期苔藓结皮叶绿素 a 极差分析表

所在列	因素						
	1(遮阳)	2(覆膜)	3(营养液)	4(浇水频率)	空列 1	空列 2	空列 3
K_1	51.670	33.280	36.490	45.560	41.800	42.780	33.710
K_2	8.520	26.910	23.700	14.630	18.390	17.410	26.480
\bar{K}_1	25.835	16.640	18.245	22.780	20.900	21.390	16.855
\bar{K}_2	4.260	13.455	11.850	7.315	9.195	8.705	13.240
极差 T	21.575	3.185	6.395	15.465	11.705	12.685	3.615

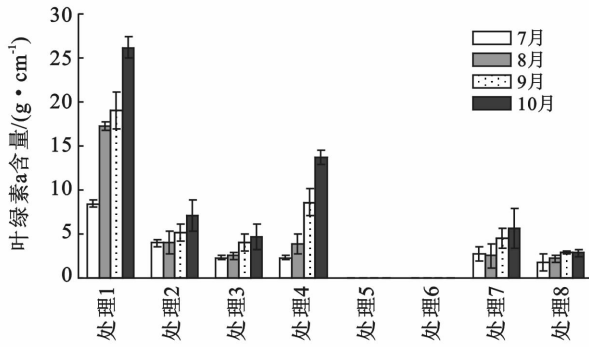


图 2 各处理 7—10 月的叶绿素 a 含量

3 讨论

3.1 水分对苔藓结皮快速发育的作用

水分是干旱半干旱地区苔藓结皮生长的主要限制因子。苔藓植物由于缺乏维管束组织以及真正的根系系统,导致直接控水能力有限,其生长发育所需的水分主要来自大气,只有少部分来自其生长基质^[9]。在人工培育过程中保持较高的空气湿度,对苔藓结皮的生长来说是必需的。野外苔藓繁殖主要由茎叶碎片产生原丝体,原丝体分枝从而产生大量的新植物体。原丝体发育阶段对干旱的耐受性很差,短期干燥就会严重抑制原丝体生长^[10],进而影响苔藓结皮的发育,从而导致高频率浇水处理下苔藓结皮株密度要高于低频率浇水。本试验结果表明浇水频率对苔藓结皮株密度、生物量均有显著影响,这与前人的结论是相似的^[11]。沙地表层水分蒸发很快,遮阳和覆膜处理会间接地影响土壤表层的含水量,这也说明了遮阳+覆膜处理下苔藓结皮生长状况较好的原因。覆膜降低了水分蒸发速度,Zhou 等^[12]的研究表明,覆膜相比于露地处理,土壤水分相对增加 10.5%~22.6%。同时,覆膜使膜和土壤之间形成一个较高的空气湿度层,使膜内空气湿度一直保持在较高水平,覆膜处理下的空气湿度是无膜的 2 倍,不覆膜处理的苔藓结皮生长会因表层土壤水分不足而受到抑制。因此,苔藓结皮人工培育保证成活率的关键在于保持适宜的空气湿度。为进一步提高苔藓结皮人工培育

条件下的存活率,探究其原丝体正常生长的最低湿度和最适湿度是有待进一步研究的课题。

3.2 温度对苔藓结皮快速发育的作用

在增加表层土壤水分的同时,覆膜会使得膜内温度升高。在正午时分,覆膜处理下苔藓结皮 0—20 cm 土层温度明显高于不覆膜处理,其最高温度可达 45 ℃。遮阳网可以吸收部分太阳辐射,防止膜内温度过高,一定程度上缓解了覆膜带来的负面效应,因此处理 1,2 和处理 5,6 虽然同样覆膜,但处理 1,2 苔藓结皮生长状况要明显优于其他处理,而处理 5,6 却没有苔藓结皮生长。所以在进行苔藓结皮野外人工培育时,覆膜的同时必须要进行遮阳,以免膜内温度过高而导致人工培育苔藓结皮的死亡。本试验中,在覆膜+无遮阳处理的小区由于受高温的抑制始终无苔藓生长,玄雪梅等^[13]在室内培育苔藓时也发现温度为 25~30 ℃,湿度为 80% 苔藓发生植株变黄或皱缩甚至死亡。其原因可能是由于在高温使原丝体的生长受到抑制,苔藓的正常生长温度范围在 5~25 ℃ 之间^[4],许书军^[14]研究表明,低温有利于原丝体的产生,陈军等也发现尖叶拟船叶藓在 20 ℃ 的原丝体生长速度最快,分枝最多^[15]。此外,苔藓结皮在高温、高湿条件下生长状况不好也可能是由于在高湿下苔藓植株的新陈代谢及酶的活性都非常活跃,对环境非常敏感,因而高温会对其产生伤害;而在低湿度的环境中由于酶活性受到抑制,反而不容易受到高温的伤害。这与报道过的苔藓植物在干燥状态下较湿润状态具有更强的适应极端温度的能力^[7]是一致的。据野外观察,在毛乌素沙地苔藓结皮生长的主要时期是 5—10 月,这一时期的月均温为 17.6 ℃,这也是苔藓长期适应环境的结果。

3.3 光照强度对人工培育苔藓结皮的作用

本试验结果表明,遮阳对苔藓结皮株密度、生物量有显著影响,并且直观分析表明遮阳因素对结皮生长的影响要大于其他因素。苔藓属于阴生植物,较其他高等植物其生长所需要的光照度低。强烈的光照会破坏苔藓植物叶绿素的合成过程。Vashistha

等^[16]研究表明当光照度达到 3 500 lx 时原丝体开始生长,光照度达到 4 500 Lx 时就发生显著的抑制作用。经测定,在遮阳网下最高光照度的为 7 827 Lx,遮阳网和覆膜处理下最高光照度为 5 425 Lx,与裸地相比遮阳强度减少了 73.73%,这也是遮阳和覆膜下苔藓结皮生长状况较好的原因之一。

在吸收部分太阳辐射的同时,遮阳网还可以起到降温 and 保湿的作用,从而避免了高温、高湿的同时出现,这可能是遮阳因素作用显著的原因之一。因此在进行苔藓结皮野外人工培育时,覆膜的同时必须要进行遮阳,以免膜内高温高湿而导致人工培育苔藓结皮的死亡。在毛乌素沙地进行实地考察时也发现生物结皮大多生长在在沙柳、沙蒿等植被的冠层下以及低洼地等光照强度较弱的区域,可以确定遮阳有利于野外自然条件下结皮的生长。

3.4 营养元素对苔藓结皮快速发育的作用

本试验中 Knop 营养液的有无对苔藓结皮的生长无显著影响。而前人^[17]研究结果多表明苔藓结皮的生长发育与土壤中的 Mn,Zn,K 和 Mg 等元素的含量有密切的正相关关系。产生这种结果的可能原因之一是由于本试验采用的结皮撒播方式带入了一部分结皮层的土壤,这部分土壤养分含量较高,所含有的营养物质已经足以满足苔藓结皮生长发育的需求。所以施用这 Knop 营养液与空白(CK)相比苔藓结皮生长发育没有显著差异。但也有研究表明养分并不是苔藓生长的限制因子^[7]。对藓类而言,其获得营养元素的方式主要是通过叶片表面吸收大气中的营养元素,或通过降雨获得。聂华丽等^[18]采用撒茎法对刺叶墙藓(*Tortula desertorum*)进行室内培育时发现在不添加任何营养元素的原沙基质培养条件下,刺叶墙藓的植株碎片仍然能够发育成完整的植物体。另一可能原因是由于本研究是在沙地进行,土壤的扩散作用较为强烈,加之 Knop 营养液施加量较少,导致了营养液作用不显著。目前,由于苔藓结皮的人工培育处于早期探索阶段,有关藓类植物的营养需求、喜好及吸收的方面研究相对较少,而苔藓植物种类繁多,各种生理特性亦有所不同,因此,有关藓结皮培养中营养物质的选择与添加仍有大量工作亟需展开。后续试验可以考虑增加营养液的施加量或者进一步研究其它营养液(如 MS 培养液、蔗糖等)对苔藓结皮野外人工培育的影响。

3.5 人工培育苔藓结皮的可行性

Belnap 等^[19]研究表明放牧破坏后生物结皮的自然恢复时间至少需要 14~18 a,完全恢复其生态功能可能需要更长的时间。与苔藓结皮在自然条件下的

恢复速度相比,人工培育苔藓结皮层的生长速度很快,经过 4 个月的培育后苔藓结皮的盖度最高可以达到 60%。究其原因,首先是由于人工培育为苔藓结皮的快速生长提供了最适宜的水肥条件,在此基础上,银叶真藓极强的无性繁殖能力得以体现^[12]。其次,试验区内没有人为了干扰,从而避免了苔藓结皮无性繁殖时产生的原丝体的死亡。本试验研究结果表明,在提供适宜的生长条件的前提下,在干旱半干旱地区进行苔藓结皮人工培育是可行的。

4 结论

(1) 在野外苔藓结皮培育过程中遮阳、覆膜、浇水频率对结皮生长都有显著影响。遮阳起到了降温作用,覆膜具有防止水分蒸发的作用,且必须与遮阳同时出现。水分因素的对苔藓结皮生长限制作用最明显。高浇水频率处理苔藓结皮的生长优于低频率浇水处理。Knop 营养液的有无对苔藓结皮的生长无显著影响。

(2) 遮阳、覆膜、营养液、浇水频率 4 因素对不同指标的影响顺序不同。其中,对苔藓结皮株密度而言,4 因素的影响顺序依次为:遮阳>浇水频率>覆膜>Knop 营养液;对生物量而言,影响顺序依次为:遮阳>浇水频率>Knop 营养液>覆膜。就株密度而言,野外培养最优条件为遮阳、不覆膜、Knop 营养液和高频率浇水;就生物量而言,苔藓结皮野外培育最优因素组合为遮阳、覆膜、Knop 营养液和高频率浇水。

(3) 本试验得到的最佳因素组合只适用于小范围苔藓结皮的人工培育,距离苔藓结皮的工程化培育还有一定距离。后续试验需从以下方面进行深入研究:① 由于试验后期遮阳+不覆膜+高频率浇水+无 Knop 营养液处理的苔藓结皮生长状况超过遮阳+覆膜+低频率浇水+无 Knop 营养液处理,且该处理的苔藓抗旱能力强于覆膜处理,因此可以考虑延长培育时间观察其苔藓结皮生长状况是否会优于本试验的最佳因素组合;② 由于本试验中 Knop 营养液的作用表现不明显,可以考虑提高 Knop 营养液的施加量或者在后续试验中选用其它类型营养液;③ 野外苔藓结皮人工培育存在的问题是最佳因素组合下培育的苔藓结皮对干旱和强辐射的抵抗能力弱,不利于其在野外自然条件下生长,可以考虑在适当的生长期对其进行干旱和强辐射处理,提高植株的抗逆性。通过模拟真实野外环境,得到适合野外生长的苔藓结皮最佳形态。

[参 考 文 献]

- [1] Elbert W, Weber B, Büdel B, et al. Microbiotic crusts on soil, rock and plants: Neglected major players in the global cycles of carbon and nitrogen [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6(4):6983-7015.
- [2] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts: A review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. *Soil Research*, 1994, 32(3):389-415.
- [3] 杨晓晖, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮: 荒漠化地区研究的热点问题 [J]. *生态学报*, 2001, 21(3):474-480.
- [4] Duckett J G, J. Burch P W Fletcher, Matcham H W, et al. In vitro cultivation of bryophytes: A review of practicalities, problems, progress and promise [J]. *Journal of Bryology*, 2004, 26(1):3-20.
- [5] 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.
- [6] 王中生, 安树青, 方炎明. 苔藓植物生殖生态学研究 [J]. *生态学报*, 2003, 23(11):2444-2452.
- [7] 吴鹏程. 苔藓植物生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 133-137.
- [8] 乔富廉. 植物生理学试验分析测定技术 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 61-68.
- [9] 刘俊华, 包维楷, 李芳兰. 青藏高原东部原始林下地表主要苔藓斑块特征及其影响因素 [J]. *生态环境*, 2005, 14(5):735-741.
- [10] 魏华, 李菁, 陈军, 等. 尖叶拟船叶藓原丝体发育特征研究 [J]. *武汉植物学研究*, 2007, 25(2):169-172.
- [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.
- [12] 王罕博, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22):88-94.
- [13] 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.
- [14] 许书军. 典型荒漠苔藓人工繁殖特征与抗御干热环境胁迫的生理生化机制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [15] 刘世彪, 陈军, 李菁, 等. 光照和温度对尖叶拟船叶藓孢子萌发及原丝体发育的影响 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(1):101-106.
- [16] Vashistha B, Chopra R. In vitro studies on spore germination, protonemal differentiation and bud formation in three Himalayan mosses [J]. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 1987, 6(62):121-136.
- [17] Bowker M A. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: An underexploited opportunity [J]. *Restoration Ecology*, 2007, 15(1):13-23.
- [18] 聂华丽, 吴楠, 梁少民, 等. 不同沙埋深度对刺叶墙藓植株碎片生长的影响 [J]. *干旱区研究*, 2006, 23(1):66-70.
- [19] Belnap J. Recovery rates of cryptobiotic crusts; inoculant use and assessment methods [J]. *Western North American Naturalist*, 1993, 53(1):89-95.

(上接第 164 页)

3 结 论

(1) 封存的二氧化碳发生泄露对地表水中的 pH 值和 DO 的影响最大, pH 值最终达到 5.5 左右, DO 降低到 0.2 mg/L 左右, 变化显著, 这两个指标可以作为监测地质封存 CO₂ 泄露的主要参考指标。重碳酸根可以作为次要参考指标。

(2) 泄露速率将加快 pH 值、DO、重碳酸根的反应速率, 而对 COD 变化的影响不大。而泄露时的温度发生变化时, 对 COD 值的变化最大, 对其他三者的变化影响较小。

[参 考 文 献]

- [1] Katharine S. Impact of global warming on geological hazards "poorly understood", experts warn [J]. *Nature*, 2009. Doi:10.1038/News. 2009, 926.
- [2] 董思言, 高学杰. 长期气候变化: IPCC 第五次评估报告解读 [J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1):56-59.
- [3] 于德龙, 吴明, 赵玲, 等. 碳捕捉与封存技术研究 [J]. *当代化工*, 2014, 43(4):543-547.
- [4] 孙枢. CO₂ 地下封存的地质学问题及其对减缓气候变化的意义 [J]. *中国基础科学*, 2006(3):17-22.
- [5] 段海燕, 王雷. 我国石油工业二氧化碳地质封存研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(1):121-124.
- [6] 许志刚, 陈代钊, 曾荣树. CO₂ 的地质埋存与资源化利用进展 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7):698-707.
- [7] 左玉辉. 环境学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010:464.
- [8] 李洛丹, 刘妮, 刘道平. 二氧化碳海洋封存的研究进展 [J]. *能源与环境*, 2008(6):11-12.
- [9] 刘红霞, 廖传华, 朱跃钊. 二氧化碳矿物封存的研究进展 [J]. *中国陶瓷*, 2010(7):9-14.
- [10] 张丽华, 潘保芝. 工业废气二氧化碳的地下储藏研究 [J]. *世界地质*, 2005, 24(1):72-76.
- [11] 吴江丽, 马俊杰. 浅议 CO₂ 地质封存的潜在风险 [J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(6):89-94.