

快速培育黄土高原苔藓结皮的关键影响因子

杨永胜², 冯伟³, 袁方¹, 张朋¹, 叶菁², 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; 3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100055)

摘要: 为探索快速培育黄土高原苔藓结皮的关键影响因子, 利用正交试验设计方法, 研究了表层土壤含水量、光照强度和接种量 3 种因素对黄土高原苔藓结皮生长发育的影响, 初步探讨了在黄土高原地区快速培育苔藓结皮的可行性。结果表明: (1) 表层土壤含水量、光照强度及接种量均对黄土高原苔藓结皮(土生对齿藓为优势种)盖度、株密度和生物量的变化有极显著影响($P < 0.01$)。 (2) 对苔藓结皮盖度和株密度而言, 3 种因素的影响顺序依次为表层土壤含水量 > 光照强度 > 接种量; 对生物量而言, 其影响顺序依次为表层土壤含水量 > 接种量 > 光照强度。 (3) 快速培育黄土高原苔藓结皮的最佳因子组合为表层土壤含水量 25%~30% + 光照强度 1 000 lx + 接种量 700 g/m², 在人工气候室条件下培育 40 d, 苔藓结皮盖度可以迅速达到 95%。

关键词: 苔藓结皮; 土壤含水量; 光照强度; 盖度; 株密度; 生物量

中图分类号: S154 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2015)04-0289-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2015.04.052

Key Influential Factors of Rapid Cultivation of Moss Crusts on Loess Plateau

YANG Yongsheng², FENG Wei³, YUAN Fang¹, ZHANG Peng¹, YE Jing², 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 Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing, 100055)

Abstract: In order to explore the key influential factors of rapid cultivation of moss crusts on the Loess Plateau, the orthogonal experimental design method was used in the test to analyze the influences of surface soil moisture, light intensity and inoculation amount on the growth and development of moss dominated crusts, and to explore the feasibility of rapid cultivation of moss dominated crusts on the Loess Plateau. The results showed that (1) surface soil moisture, light intensity and inoculation amount had extremely significant effect on the change of coverage, density and biomass of moss crusts which was dominated by *Didymodon vinealis* (Brid.) Zand ($P < 0.01$). (2) As for the coverage and density of moss dominated crusts, the influence order of the three factors was surface soil moisture, light intensity, and inoculation amount; as for biomass, the influence order of three factors was surface soil moisture, inoculation amount, and light intensity. (3) The best combination of factors for rapid cultivation of moss dominated crusts on the Loess Plateau was surface soil moisture (25% to 30%), light intensity (1 000 lx), and inoculation amount (700 g/m²). Under environmental chamber condition, the coverage of moss dominated crusts could rapidly reach 95% in 40 days.

Key words: moss dominated crusts; top soil moisture; light intensity; coverage; density; biomass

生物土壤结皮(Biological Soil Crusts, BSCs, 简称“生物结皮”)是由土壤微生物、藻类、地衣以及苔藓等植物类群与土壤形成的有机复合体, 广泛存在于干旱、半干旱地区^[1]。苔藓结皮是黄土高原生物结皮发育演替的高级阶段^[2], 它在提高土壤稳定性、增强土壤抗侵蚀能力以及促进种子库的建立^[3]等方面起着至关重要的作用。

自然条件下, 由于生物结皮的发育受到各种环境条件、资源条件^[4]以及植被等多方面的限制, 其发育演替十分缓慢, 需要几年甚至几十年时间才能形成稳定的苔藓结皮^[5]。同时, 苔藓结皮对各种干扰(火烧、踩踏、机械碾压等)十分敏感, 其受到干扰破坏后, 又需要很漫长的时间才能恢复^[6]。因此, 研究影响苔藓结皮发育的关键因子, 实现苔藓结皮的快速培育及恢

收稿日期: 2014-11-30

基金项目: 中国科学院西部之光(2014-91); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(K318009902-1405); 中央高校优秀青年科研业务专项基金(2014YQ006)

第一作者: 杨永胜(1987—), 男, 汉族, 甘肃兰州人, 博士研究生, 主要从事苔藓结皮的快速培育及抗性研究。E-mail: yyssolider@126.com

通信作者: 卜崇峰(1977—), 男, 汉族, 陕西榆林人, 博士, 副研究员, 主要从事生物土壤结皮的生态功能研究。E-mail: buchongfeng@163.com

复,将有助于迅速发挥其水土保持等积极生态功能。

苔藓植物是苔藓结皮的优势生物组分,对结皮层的形成和维持^[7]具有极其重要的作用。相关研究表明,尽管苔藓植物具有强大的无性繁殖^[8]及抗旱能力,但其生长发育仍然受到水分、光照以及温度等各方面因素的影响。部分学者也在这方面进行了研究,并取得了一些认识^[7,9]。然而,以往的研究多集中在荒漠地区的苔藓植物和一些经济或药用价值较高^[2]的苔藓植物,而对黄土高原地区具有显著水土保持效应的苔藓植物的研究还鲜有报道。为此,本研究以黄土高原自然发育的苔藓结皮为种源,考虑不同表层土壤含水量、光照强度和接种量(单位面积苔藓结皮茎叶碎片重量),利用正交试验设计方法,在人工控制条件下进行苔藓结皮的快速培育,通过定期测定苔藓结皮盖度、株密度以及生物量的变化,寻找影响快速培育黄土高原苔藓结皮的关键因子,探讨在黄土高原地区快速培育苔藓结皮的可行性,以期黄土高原苔藓结皮快速恢复实践提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 苔藓结皮样 苔藓结皮样品采自陕西省安塞县马家沟的自然坡面(36°47'58"N,109°15'32"E)。采样点主要植被为柠条和杨树,苔藓结皮盖度为 80%,平均厚度为(11.45±0.51) mm(n=9)。

利用小铲铲取苔藓结皮层,厚度为 1 cm,装入洁净塑料袋中,带回实验室自然阴干。人工挑出肉眼可辨的植物残渣、土块、石子等。经鉴定供试苔藓结皮主要由较丛藓科和真藓科植物构成,包括土生对齿藓(*Didymodon vinealis* (Brid.) Zand.)、小扭口藓(*Barbula indica* (Hook.) Spreng.)皱叶毛口藓

(*Trichostomum crispulum* Bruch.)、长尖对齿藓(*Didymodon ditrichoides* (Broth.) X. J. Li)、丛生真藓(*Bryum ceaspiticium* Hedw.)等,以土生对齿藓(*Didymodon vinealis* (Brid.) Zand.)为优势种。

1.1.2 培养基土壤 培养基土壤采集地点与苔藓结皮采集地点相同。为消除结皮层中散落繁殖体的影响,首先除去地上苔藓结皮及 0—5 cm 厚的土层,然后掘取 5—20 cm 的下伏土层。采集土壤后运到实验室自然晒干,过 2 mm 筛后,放置在阴凉处备用。

1.2 接种材料的制备

首先,将阴干的原状苔藓结皮层用植物粉碎机粉碎,制成种子土。准确称取 10 g 种子土,将其浸入水中,用 0.1 mm 土壤筛过滤,收集苔藓茎叶碎片,阴干。经测定,单位质量种子土中苔藓植株茎叶碎片质量为 120 g/kg。其次,将种子土与培养基黄土按照质量比分别为 4:0.3:1.2:2.1:3 比例均匀混合,得到单位质量混合种子土中茎叶碎片含量分别为 120,100,80,60 g/kg 的接种材料,之后分别以容重为 1.15 g/cm³ 平铺 5 mm。经前述方法测定,接种量(单位面积苔藓结皮茎叶碎片质量)分别为 700,550,400,250 g/cm²。

1.3 试验设计方法

采用正交试验设计方法,考虑光照强度、表层(0—1 cm)土壤含水量、接种量 3 个因素,每个因素设置 4 个水平(表 1),利用五因素四水平正交表,共得到 16 个处理(表 2),每个处理 4 个重复。

表 1 因素及水平

| 因素 | 水平 | | | |
|---------------------------|------|------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 表层土壤含水量/% | 1~5 | 8~13 | 15~20 | 25~30 |
| 接种量/(g·cm ⁻²) | 250 | 400 | 550 | 700 |
| 光照强度/lx | 1000 | 5500 | 12500 | 23500 |

表 2 L₁₆(4⁵)正交表

| 试验号 | 因素 1 | 因素 2 | 因素 3 | 空列 1 | 空列 2 | 试验结果 |
|-----|----------|--------|----------|------|------|------------------------|
| 1 | 1(1~5) | 1(250) | 1(1000) | 1 | 1 | 表层土壤含水量 1+接种量 1+光照强度 1 |
| 2 | 1 | 2(400) | 2(5500) | 2 | 2 | 表层土壤含水量 1+接种量 2+光照强度 2 |
| 3 | 1 | 3(550) | 3(12500) | 3 | 3 | 表层土壤含水量 1+接种量 3+光照强度 3 |
| 4 | 1 | 4(700) | 4(23500) | 4 | 4 | 表层土壤含水量 1+接种量 4+光照强度 4 |
| 5 | 2(8~13) | 1 | 2 | 3 | 4 | 表层土壤含水量 2+接种量 1+光照强度 2 |
| 6 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 表层土壤含水量 2+接种量 2+光照强度 1 |
| 7 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 表层土壤含水量 2+接种量 3+光照强度 4 |
| 8 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 表层土壤含水量 2+接种量 4+光照强度 3 |
| 9 | 3(15~20) | 1 | 3 | 4 | 2 | 表层土壤含水量 3+接种量 1+光照强度 3 |
| 10 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1 | 表层土壤含水量 3+接种量 2+光照强度 4 |
| 11 | 3 | 3 | 1 | 2 | 4 | 表层土壤含水量 3+接种量 3+光照强度 1 |
| 12 | 3 | 4 | 2 | 1 | 3 | 表层土壤含水量 3+接种量 4+光照强度 2 |
| 13 | 4(25~30) | 1 | 4 | 2 | 3 | 表层土壤含水量 4+接种量 1+光照强度 4 |
| 14 | 4 | 2 | 3 | 1 | 4 | 表层土壤含水量 4+接种量 2+光照强度 3 |
| 15 | 4 | 3 | 2 | 4 | 1 | 表层土壤含水量 4+接种量 3+光照强度 2 |
| 16 | 4 | 4 | 1 | 3 | 2 | 表层土壤含水量 4+接种量 4+光照强度 1 |

注:因素 1 表示表层土壤含水量(%);因素 2 表示接种量(g/cm²);因素 3 表示光照强度(lx)。

1.4 培育过程与方法

1.4.1 培养材料的制备 首先在培育盒(长、宽、高分别为 242,168,50 mm。底部均匀分布 9 个直径为 6 mm 的小孔)底部铺上一层纱网。其次,将晾干并过 2 mm 筛后的基质土装入培育盒,厚度为 40 mm。最后,将不同接种量的接种材料按照试验设计平铺至基质土壤上,厚度为 5 mm。经测定表层 1 cm 土壤田间持水量为 $(27.3 \pm 0.7)\%$ ($n=8$)。

1.4.2 苔藓结皮培育过程 试验在中国科学院水利部水土保持研究所人工气候室内完成。据已有文献报道^[9-10],将人工气候室内温度、相对空气湿度、二氧化碳浓度、光周期分别设定为 20/10 °C(昼/夜),60%,400 $\mu\text{mol/mol}$,12 h,将培养材料放置在人工气候室培养台上,通过控制试验样品正上方遮阳网的层数实现不同光照强度,通过控制电动微喷设备(流量为 50 ml/min)洒水时间,实现不同处理表层土壤含水量。每个处理的表层土壤含水量用 4 个重复样品中的 1 个样品来专门测定,为了快速测定,土壤含水量用酒精燃烧法完成。试验初期,每隔 1 d 测定表层土壤含水量,试验后期,每隔 4 d 测定 1 次。依据每个处理所测定的含水量,适当调整预定喷水时间,使表层土壤含水量维持在设定范围。整个试验过程中,苔藓结皮生长指标(盖度和密度)每 10 d 测定 1 次,试验开始及结束时测定叶绿素 a,当结皮盖度趋于稳定时试验结束。

1.5 观测指标及方法

株密度:每个培养盒中均匀选取 9 个 2 cm×2 cm 小框,数出小框内的苔藓株数,求平均值;

盖度:采用李新荣的点针样框法^[11],网格规格为 0.8 cm×0.8 cm;

叶绿素 a:用叶绿素 a 指示生物量。具体测定方法为利用直径为 1.6 cm 的圆形内空管采样器采集苔藓结皮,每个培育盒内采 4 个面积为 2.01 cm²、厚度为 5 mm 的样品。将样品放入 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,加入少量石英砂、碳酸钙及 3 ml 95%乙醇,研磨成匀浆,再加 95%乙醇 5 ml,继续研磨直至组织变白。静置 5 min,过滤到 25 ml 棕色容量瓶中,并用少量 95%乙醇冲洗数次,直至滤纸和残渣中无绿色为止,最后用 95%乙醇定容。比色测定色素,以 95%乙醇为空白,整个试验过程在暗光及低温条件下进行。在 665 nm 和 649 nm 下测定吸光度。叶绿素 a 浓度计算公式为:

$$\rho = 13.95 \times A_{655 \text{ nm}} - 6.88 \times A_{649 \text{ nm}}$$

$$W = \rho \times V \times N / S$$

式中: ρ 为叶绿素 a 浓度(mg/L); W 为叶绿素 a 含量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$); V 为提取液体积(ml); N 为稀释倍数; S 为样品的取样面积(cm^2)。

1.6 数据分析

试验数据运用 Excel 2003 软件进行处理与分析,数据表达为平均值±标准误(Means±SE)。利用统计分析软件 SPSS 12.0 对不同处理的各个指标进行方差分析和多重比较。通过直观分析方法分析不同因素对各个指标的影响次序,具体方法参考文献^[12]。

2 结果与分析

2.1 快速培育下苔藓结皮盖度的动态特征

图 1 为处理 16 分别在第 0(A),20(B),40(C),60 天(D)苔藓结皮表观变化情况。从图 1 可以看出苔藓结皮的生长非常明显。苔藓结皮盖度随时间的变化表明(图 2),不同处理间苔藓结皮盖度差异较大,以第 40 天为例,处理 11,12,15,16 苔藓结皮盖度均高于 95%,而处理 1,2,3,4 最高仅为 2.6%。整个培育期间,处理 16 苔藓结皮盖度均高于其他组合。

多重比较(图 3)表明,试验末期处理 11,12,15,16 苔藓结皮盖度显著高于其他处理($P < 0.05$)。处理 8,10 苔藓结皮盖度显著高于处理 1,2,3,4,7,9,13,处理 1,2,3,4 均显著低于其他处理。

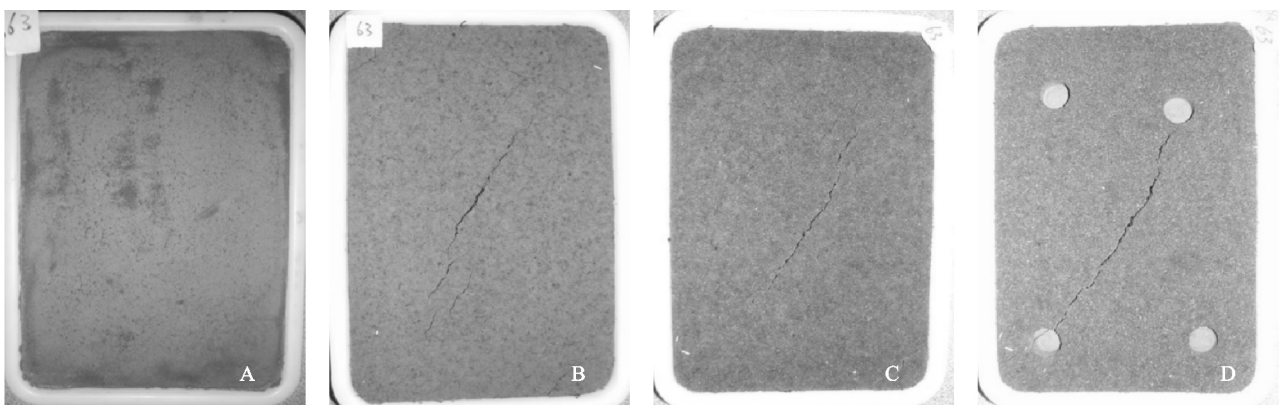


图 1 处理 16 苔藓结皮分别在第 0(A),20(B),40(C),60 天(D)的表观变化情况

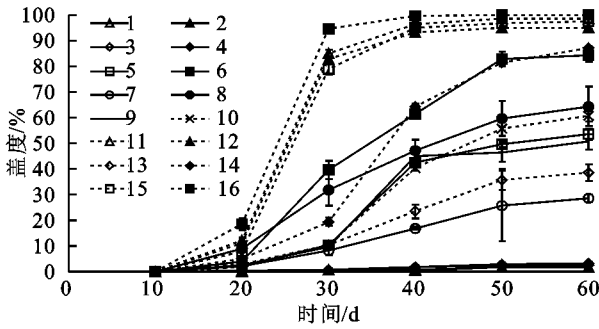


图 2 各处理苔藓结皮盖度随时间的变化

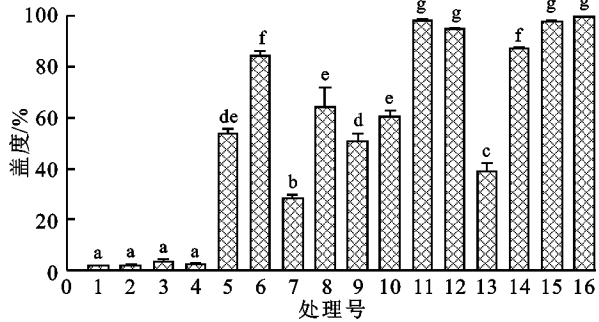


图 3 试验末期(第 60 天)各处理苔藓结皮盖度

为进一步明确影响黄土高原苔藓结皮生长的关键因素,进行了苔藓结皮盖度的直观分析和方差分析(表 3)。从表 3 可以看出,对于表层土壤含水量, T_4 平均 $> T_3$ 平均 $> T_2$ 平均 $> T_1$ 平均,即表层土壤含水量为 25%~30% 时苔藓结皮盖度最大;对于接种量, T_4 平均 $> T_3$ 平均 $> T_2$ 平均 $> T_1$ 平均,即接种量为 700 g/m² 时苔藓结皮盖度最大;对于光照强度, T_1 平均 $> T_2$ 平均 $> T_3$ 平均 $> T_4$ 平均,即光照强度为 1 000 lx 时苔藓结皮盖度最大。分析比较 3 个因素的极差得到 $R_1 > R_3 > R_2$,说明表层土壤含水量对苔藓结皮盖度的影响最大,其次是光照强度,接种量影响最小。方差分析表明,表层土壤含水量、接种量及光照强度对苔藓结皮盖度的影响均达到极显著水平($P < 0.01$)。因此,就盖度而言,培育黄土高原苔藓结皮的最佳组合为表层土壤含水量 25%~30% + 接种量 700 g/cm² + 光照强度 1 000 lx。

表 3 试验末期苔藓结皮盖度直观分析

| 所在列 | 含水量 | 接种量 | 光照强度 | 空列 1 | 空列 2 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T ₁ | 3.01 | 31.11 | 220.08 | 111.22 | 122.09 |
| T ₂ | 90.20 | 69.98 | 172.99 | 127.89 | 112.88 |
| T ₃ | 187.97 | 172.85 | 61.60 | 116.19 | 133.38 |
| T ₄ | 203.01 | 210.25 | 29.52 | 128.88 | 115.84 |
| T ₁ 平均 | 0.75 | 7.78 | 55.02 | 27.81 | 30.52 |
| T ₂ 平均 | 22.55 | 17.50 | 43.25 | 31.97 | 28.22 |
| T ₃ 平均 | 46.99 | 43.21 | 15.40 | 29.05 | 33.35 |
| T ₄ 平均 | 50.75 | 52.56 | 7.38 | 32.22 | 28.96 |
| 极差 R | 50.00 | 44.79 | 47.64 | 4.42 | 5.13 |

2.2 快速培育下苔藓植株密度的动态特征

整个试验期间苔藓植株密度随时间的变化见图 4。处理 1,2,3,4 苔藓植株密度在整个试验过程中均处于极低水平(0.40~0.56 株/cm²)。处理 5~16 苔

藓植株密度均随时间逐步增加。其中,处理 16 增长最快,至试验结束时(第 60 天),其苔藓植株密度达到 149.3 株/cm²。多重比较(图 5)显示,试验末期处理 15,16 苔藓植株密度显著高于其他处理($P < 0.05$),处理 1,2,3,4,7 苔藓植株密度显著低于其余处理。

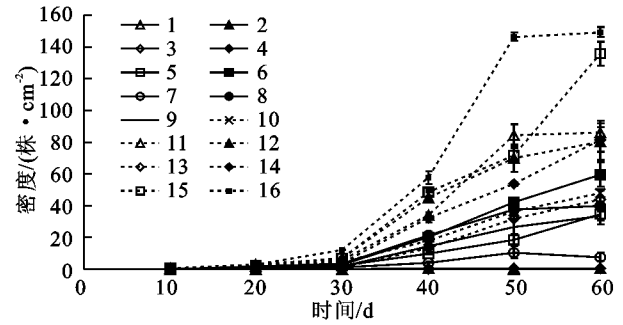


图 4 各处理苔藓植株密度随时间的变化

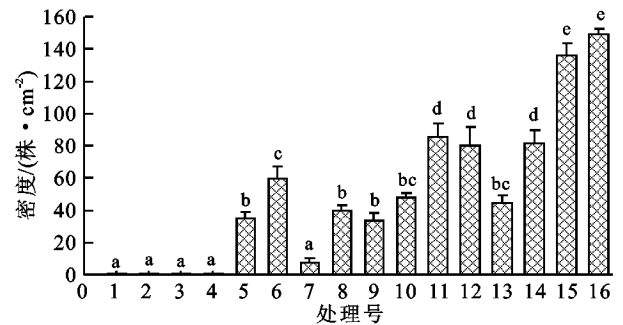


图 5 试验末期(第 60 天)各处理苔藓植株密度

试验末期苔藓植株密度直观分析(表 4)的结果与盖度的分析结果一致,3 种因素对苔藓植株密度的影响顺序依次为表层土壤含水量 > 光照强度 > 接种量。对于表层土壤含水量, T_4 平均 $> T_3$ 平均 $> T_2$ 平均 $> T_1$ 平均;对于接种量, T_4 平均 $> T_3$ 平均 $> T_2$ 平均 $> T_1$ 平均;对于光照强度, T_1 平均 $> T_2$ 平均 $> T_3$ 平均 $> T_4$ 平均(表 5)。方差分析显示,表层土壤含水量、接种量及光照强度对苔藓结皮盖度的影响均达到极显著水平($P < 0.01$)。就苔藓植株密度而言,培育黄土高原苔藓结皮的最佳组合为表层土壤含水量 25%~30% + 接种量 700 g/m² + 光照强度 1 000 lx。

表 4 试验末期苔藓植株密度直观分析

| 所在列 | 含水量 | 接种量 | 光照强度 | 空列 1 | 空列 2 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T ₁ | 1.93 | 112.81 | 295.19 | 170.03 | 223.69 |
| T ₂ | 141.81 | 189.48 | 251.22 | 170.06 | 190.87 |
| T ₃ | 247.14 | 229.89 | 155.11 | 232.47 | 184.54 |
| T ₄ | 410.81 | 269.49 | 100.16 | 229.11 | 202.58 |
| T ₁ 平均 | 0.48 | 28.20 | 73.80 | 42.51 | 55.92 |
| T ₂ 平均 | 35.45 | 47.37 | 62.81 | 42.52 | 47.72 |
| T ₃ 平均 | 61.78 | 57.47 | 38.78 | 58.12 | 46.13 |
| T ₄ 平均 | 102.70 | 67.37 | 25.04 | 57.28 | 50.65 |
| 极差 R | 102.22 | 39.17 | 48.76 | 15.61 | 9.79 |

2.3 快速培育下苔藓结皮生物量的动态特征

为消除不同接种量对苔藓结皮生物量(叶绿素 a)的影响,计算了叶绿素 a 日变化速率(图 6)。从图 6 可以看出,不同处理间苔藓结皮叶绿素 a 含量日变

化速率差异十分明显。处理 1,2,3,4,7,8,10 叶绿素 a 日变化速率均为负值,其余处理叶绿素 a 日变化速率均为正值。其中,处理 16 的日变化速率最高,达到每天 0.10 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$),处理 4 的日变化速率最低,为每天 -0.11 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)。比较发现,处理 1,2,3,4,7,8,10 是在低表层土壤含水量(1%~5%)及高光照强度(12 500 lx 和 22 500 lx)环境下进行的,说明高光照强度及低表层土壤含水量不利于苔藓结皮的快速生长。由多重比较(图 7)可知,处理 16 叶绿素 a 含量显著高于其他处理,处理 11,12,15 显著高于处理 1~10,13,14($P<0.01$)。

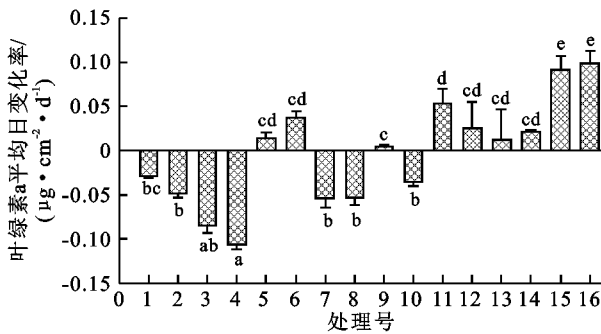


图 6 各处理叶绿素 a 日变化速率

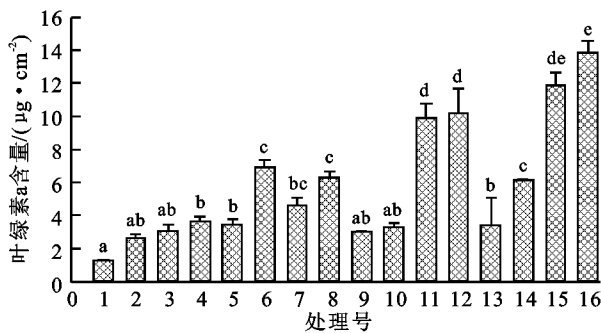


图 7 各处理试验末期(第 60 天)叶绿素 a 含量

分析 3 个因素的极差(表 5)可知, $R_1 > R_2 > R_3$, 说明表层土壤含水量对生物量影响最大,其次是接种量,而光照强度的影响最小。

表 5 试验末期苔藓结皮叶绿素 a 直观分析

| 所在列 | 含水量 | 接种量 | 光照强度 | 空列 1 | 空列 2 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T1 | 10.58 | 11.11 | 32.00 | 22.22 | 22.73 |
| T2 | 21.24 | 19.03 | 28.15 | 22.19 | 24.07 |
| T3 | 26.42 | 29.42 | 18.47 | 23.67 | 23.54 |
| T4 | 35.27 | 33.95 | 14.90 | 25.44 | 23.18 |
| T1 平均 | 2.65 | 2.78 | 8.00 | 5.55 | 5.68 |
| T2 平均 | 5.31 | 4.76 | 7.04 | 5.55 | 6.02 |
| T3 平均 | 6.61 | 7.36 | 4.62 | 5.92 | 5.88 |
| T4 平均 | 8.82 | 8.49 | 3.72 | 6.36 | 5.79 |
| 极差 R | 6.17 | 5.71 | 4.28 | 0.81 | 0.34 |

对于表层土壤含水量, T_4 平均 $> T_3$ 平均 $> T_2$ 平均 $> T_1$ 平均;对于接种量, T_4 平均 $> T_3$ 平均 $> T_2$ 平均 $> T_1$ 平均;对于光照强度, T_1 平均 $> T_2$ 平均 $> T_3$ 平均 $> T_4$ 平均。方差分析表明,表层土壤含水

量、接种量和光照强度对苔藓结皮生物量的影响均达到极显著水平($P<0.01$)。因此,就生物量而言,培育黄土高原苔藓结皮的最佳组合为表层土壤含水量 25%~30%+接种量 700 g/m^2 +光照强度 1 000 lx。

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决定生态系统结构与功能的关键因子,土壤水分对于植物生长发育具有重要影响。本研究结果显示,表层土壤含水量是影响黄土高原苔藓结皮发育的最主要因素,对苔藓结皮盖度、株密度和生物量均有显著影响。随着表层土壤含水量的增加,苔藓结皮盖度、密度以及生物量均呈现增加趋势,这与前人的结论是相似的^[2]。可以从以下几方面解释:首先,较高的浅层土壤含水量为苔藓茎叶碎片分化出原丝体提供了适宜的水分环境,从而形成大量的新植株体^[13];其次,苔藓植物缺乏输导和蒸发系统,没有真正的根等形态学特征,极易失去水分^[14],较高的浅层土壤含水量能够为苔藓植株的生长提供充足的水分;第三,在干旱地区,较好的水分条件有利于土壤有机碎屑的分解,增加土壤养分含量,提高土壤养分的有效性^[15],有利于苔藓植物的生长。Tian 等^[7]的研究表明苔藓植物体碎片能够在水分条件较好的沙丘间低湿地带繁殖生长并形成结皮层,这也间接的支持了本研究的观点。因此,无论在野外还是在室内培育苔藓结皮,都必须要注意提高表层土壤含水量。

3.2 光照强度对苔藓结皮快速发育的作用

藻类、地衣及苔藓类植物均为弱光照植物。赵小艳等^[16]的研究结果显示土生对齿藓的光饱和点和光补偿点仅分别为 436 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{S})$]和 27 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{S})$]。本研究结果表明,光照强度对黄土高原苔藓结皮(以土生对齿藓为优势种)的盖度、密度以及生物量的影响均达到极显著水平,光照强度越低,苔藓结皮发育越快,说明光照强度与苔藓植株生长关系密切,光照过强,会抑制苔藓植物的生长。这与前人的研究结果类似^[17],主要是因为苔藓植物的光合作用及其它代谢活动一般仅仅在弱光或中等光照强度范围内进行,其光合喜阴特性是对环境的长期适应和演化的结果。与本研究的结果不同,Xu 等^[9]的研究表明光照强度对刺叶墙藓(*Tortula desertorum* (Broth.))的生长无显著影响;吴玉环等^[17]发现光照增加使苔藓植物的生物量和相对生长速率增加,这是由于不同苔藓种之间生物学、生态学特性的差异以及其对周围生存环境的长期适应^[18],造成不同类型的苔藓植物对光照强度的要求差别很大。

3.3 接种量对苔藓结皮快速发育的作用

接种量的大小直接影响了撒播在基质土壤表面苔藓繁殖体的数量,因此,其对苔藓结皮的盖度、株密度及生物量均起到了显著影响。苔藓植株被粉碎的过程中必然会对其内部结构(例如,叶绿体)的完整性造成破坏;而且,在长期干旱及强光照条件下,苔藓植株叶绿体基质趋于解体导致苔藓茎叶碎片失去活性,造成培育 60 d 后苔藓结皮叶绿素 a 含量低于其初始值(图 6)。高土壤水分条件下,因掩埋过深而腐烂的茎叶碎片可以为新生的苔藓植株提供养分^[2],所以接种量越大,为新生苔藓植株提供的养分越充足,进而苔藓结皮发育越快。

3.4 黄土高原苔藓结皮快速培育的可行性

本研究结果显示,处理 16(表层土壤含水量为 25%~30%,接种量为 700 g/m²,光照强度为 1 000 lx)条件下,黄土基质上接种苔藓结皮茎叶碎片可在 45 d 内使苔藓结皮盖度达到 95%,说明在人工控制条件下快速培育黄土高原苔藓结皮是可行的。值得注意的是,在自然条件下很难找到符合处理 16 中所需要的土壤水分及光照条件的区域。相比之下,处理 10(表层土壤含水量为 15%~20%,接种量为 400 g/m²,光照强度为 22 500 lx)中所需的土壤水分及光照条件更容易实现。尽管黄土高原地区降雨较少,但其全年降雨量的 60%~80% 主要集中于雨季(7—9 月),能够提供较高的表层土壤含水量,且此时植被茂盛,草灌下光照强度低于 20 000 lx,相对空气湿度高于 60%^[10]。在处理 10 条件下,将苔藓茎叶碎片撒播于黄土基质,可在 60 d 内形成盖度为 61%的苔藓结皮(图 2)。因此,从快速培育黄土高原苔藓结皮,防治水土流失的角度出发,我们建议在表层土壤水分较好的季节(7—9 月),可以在黄土高原地区选择光照较弱的地块(植被下、阴坡)进行苔藓结皮的人工培育。来自 Tian 等^[7]的研究显示人工苔藓结皮在生长 3~4 个月 after 出现逐渐衰退并死亡的现象。可见,如何使人工苔藓结皮在复杂多变的自然环境中长期可持续的生长是一个复杂的科学问题,在以后的研究中要注意改进苔藓结皮的培养方法,提高人工苔藓结皮对干旱及极端气温的抵抗能力,使其能够在自然环境中持续健康的生长。

4 结论

采用正交试验设计方法,在人工气候室恒温环境条件下,研究了不同表层土壤含水量、光照强度及接种量对苔藓结皮生长发育的影响。结果表明:

(1)表层土壤含水量、光照强度及接种量对黄土高原苔藓结皮盖度、株密度以及生物量的变化均有极显著影响($P < 0.01$)。直观分析显示,表层土壤含水

量和接种量越高,苔藓结皮盖度、密度及生物量越大;光照强度越低,则苔藓结皮的发育越快。3 种因素对不同指标的影响顺序因指标而异。其中,对苔藓结皮盖度和株密度而言,3 种因素的影响顺序依次为表层土壤含水量 > 光照强度 > 接种量;对生物量而言,影响顺序依次为 表层土壤含水量 > 接种量 > 光照强度。总体上,表层土壤含水量是影响苔藓结皮快速培育的最重要因素。

(2)培育黄土高原苔藓结皮的最佳条件组合为表层土壤含水量 25%~30%+光照强度 1 000 lx+接种量 700 g/m²,可在 40 d 内使苔藓结皮盖度达到 95%。

致谢:本试验中苔藓植物种的鉴定工作由内蒙古大学生命科学学院白学良教授帮助完成。室内试验及数据分析得到李会亚、王椿、张莉、赵洋、苑森朋、李茹雪硕士的大力支持,在此全体作者表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [2] 陈彦芹,赵允格,冉茂勇.黄土丘陵区苔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.
- [3] 李新荣,张元明,赵允格.生物土壤结皮研究:进展、前沿与展[J].地球科学进展,2009,24(1):11-23.
- [4] 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 Sciences, 2012, 65(1): 77-88.
- [5] Belnap J. The world at your feet: Desert biological soil crusts[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2003, 1(5): 181-189.
- [6] Bu C F, Wu S F, Xie Y S, et al. The study of biological soil crusts: Hotspots and prospects [J]. Clean-Soil Air Water, 2013, 41(9): 899-906.
- [7] Tian G Q, Bai X L, Xu J, et al. Experimental studies on the natural restoration and the artificial culture of the moss crusts on fixed dunes in the Tengger Desert, China [J]. Frontiers of Biology in China, 2006, 1(1): 13-17.
- [8] 陈圆圆,郭水良,曹同.藓类植物的无性繁殖及其应用[J].生态学杂志,2008,27(6):993-998.
- [9] 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.
- [10] 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(1):163-173.
- [11] Li X R, He M Z, Stefan Z, et al. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scale [J]. Earth Surface Process and Landform, 2010, 35(8): 932-940.

(下转第 299 页)

性均表现为先升高再降低的趋势,产生这种现象的原因是随着环境中温度肥料的适应及大豆根系的生长促进了土壤中酶活性的增加,这与本文研究结果一致,表明土层置换处理改变了土壤土体结构并对土壤中酶活性产生影响,土层置换处理在不同层次上的土壤酶活性与对照处理差异显著。

(3)通过对土壤养分含量的测定结果可以看出,CK处理的土壤碱解氮和速效磷含量随土层深度增加呈逐渐下降趋势,其原因是由于长期施肥导致表层土壤养分富集。耕翻处理与CK处理相比,能够减慢土壤养分含量的下降趋势。这主要是因为耕翻能够疏松土块,有效改善土壤的通透性,使作物能有效利用和转化有机养分^[15]。耕翻能增加土壤中营养物质的储藏量,大大提高土壤养分的利用率。前人针对土层置换对土壤养分的影响做了一些研究,高中超等^[16]研究表明,速效养分含量随土层深度的增加而逐渐减少,土层置换将下层的土壤置换到表层,从而造成表层土壤养分含量降低。孟庆英等^[14]研究指出,土层置换处理随土层深度增加土壤养分含量呈不同的变化趋势,这种置换有利于不同土层土壤养分含量的均匀分布,这些研究均与本研究的结论基本一致。本试验研究结果表明,土层置换处理能够使土壤养分含量发生改变,对土壤养分含量在不同土层中均匀分布有重要的作用,土层置换可以活化土壤养分,提高土壤的出水能力,对于我国土壤的抗旱能力和作物产量的提高起着重要的作用。

参考文献:

- [1] 刘玉涛,王宇先,张树权,等.深松垄作对土壤物理性状及玉米产量的影响[J].黑龙江农业科学,2014(3):37-40.
- [2] 高中超,刘峰,张春峰,等.土层置换犁消除豆田残留除草剂药害的效果[J].农业工程学报,2012,28(20):202-209.
- [3] 高中超,刘婷婷,张喜林,等.土层置换犁改土大面积示

范效果[J].黑龙江农业科学,2013(1):33-35.

- [4] 官亮,孙文涛,包红静,等.不同耕作方式对土壤水分及玉米生长发育的影响[J].玉米科学,2011,19(3):118-120,125.
- [5] 王平.长期施肥对小麦玉米间作体系土壤酶活性与养分的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2009.
- [6] Soh S, Makoto S, Antonie D, et al. Effects of vegetation on soil microbial C, N, and P dynamics in a tropical forest and savanna of Central Africa[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 87(3): 91-98.
- [7] Xavier D, Kelly H, Akio E, et al. Short-term mesofauna responses to soil additions of corn stover biochar and the role of microbial biomass [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 89(5): 10-17.
- [8] 陈晨.土壤质量对土地利用方式变化的响应——以重庆市北碚区歇马镇为例[D].重庆:西南大学,2010.
- [9] 戴建军,宋鹏慧,闫暮春,等.不同种植方式对苗期大豆、玉米根际土壤酶活性及微生物量碳、氮的影响[J].东北农业大学学报,2013,44(2):17-22.
- [10] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等.不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特征和养分状况的影响[J].生态学报,2013,33(2):565-575.
- [11] 张丽莉,武志杰,陈利军,等.不同种植制度土壤氧化还原酶活性和动力学特征[J].生态环境学报,2009,18(1):343-347.
- [12] 李春喜,姜丽娜,林琳,等.地温对小麦幼苗根际土壤酶活性的影响[J].华北农学报,2012,27(6):92-96.
- [13] Sara M, Roberto M, Paola B, et al. Soil quality, microbial functions and tomato yield under cover crop mulching in the Mediterranean environment [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 145(1): 20-28.
- [14] 孟庆英,张春峰,朱宝国,等.土层置换对土壤酶及土壤养分含量的影响[J].中国农学通报,2014,30(3):157-161.
- [15] 董莉,张月,崔宏,等.谈农田深耕对作物的增产作用[J].现代农业科技,2009(19):72.
- [16] 高中超.土层置换消除残留除草剂药害及大豆连作效果的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2010.
- [17] 成发育的影响及其作用机制[J].中国沙漠,2011,31(5):1105-1111.
- [16] 赵小艳.沙地与黄土丘陵区生物结皮层3种优势藓类植物繁殖生长与生理特性比较研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2011.
- [17] 吴玉环,黄国宏,高谦,等.苔藓植物对环境变化的响应及适应性研究进展[J].应用生态学报,2001,12(6):943-946.
- [18] 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.

(上接第294页)

- [12] Zhao P T, Ge S F, Yoshikawa K. An orthogonal experimental study on solid fuel production from sewage sludge by employing steam explosion [J]. Applied Energy, 2013, 112(12): 1213-1221.
- [13] Zhao Y G, Qin N Q, Weber B, et al. Response of biological soil crusts to raindrop erosivity and underlying influences in the hilly Loess Plateau region, China [J]. Biodiversity and Conservation, 2014, 23(7): 1669-1686.
- [14] 刘俊华,包维楷.冷杉天然林下地表主要苔藓斑块生物量及其影响因素[J].植物学通报,2006,23(6):684-690.
- [15] 赵哈林,郭轶瑞,周瑞莲.灌丛对沙质草地土壤结皮形