

DOI: 10.20103/j.stxb.202404080748

连煜超^{1,2}, 白剑³, 刘荣霞⁴, 王健鸿⁴, 张国君⁴, 虎瑞¹, 赵洋^{1,*}

Lian Y C, Bai J, Liu R X, Wang J H, Zhang G J, Hu R, Zhao Y. Effects of inoculum condition and different material mulches on the colonization of artificial cyanobacterial crusts. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(2): 950-961.

接种体状态和不同材料覆盖对人工蓝藻结皮拓殖的影响

连煜超^{1,2}, 白剑³, 刘荣霞⁴, 王健鸿⁴, 张国君⁴, 虎瑞¹, 赵洋^{1,*}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 沙坡头沙漠研究试验站/干旱区生态安全与可持续发展重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 宁夏环保集团有限责任公司, 银川 750000

4 金昌居佳生态农业有限公司, 金昌 737100

摘要:人工蓝藻结皮沙化土地治理技术是新时代沙化土地治理的有效手段之一。然而,人工蓝藻结皮接种体的规模化量产以及接种后最佳辅助拓殖措施的选择始终是制约其治沙效率的瓶颈。研究以短期培养的干藻和湿藻作为接种体,结合玉米秸秆和无纺布两种覆盖方式,探讨了接种体状态和不同材料覆盖对人工蓝藻结皮拓殖的影响。结果表明:干湿两种状态接种体辅以玉米秸秆、无纺布两种覆盖方式的处理在自然条件下均成功拓殖,玉米秸秆覆盖相较于无纺布覆盖的环境调控作用更好,在控制风蚀、削弱光强以及延长累积有效湿润时间上发挥了重要作用,可以更好的促进人工蓝藻结皮拓殖。培养 63 d 后,玉米秸秆覆盖+干藻接种处理下人工蓝藻结皮盖度最高(27.9%);玉米秸秆覆盖+湿藻接种处理下人工蓝藻结皮厚度(6.5 mm)、叶绿素 a 含量(23.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、松散结合胞外多糖含量(309.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)、紧密结合胞外多糖含量(176.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)和糖被胞外多糖含量(181.1 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)最高。回归分析结果表明,人工蓝藻结皮的盖度、叶绿素 a 和 3 种多糖含量与风蚀强度呈显著负相关($P < 0.05$)。人工蓝藻结皮的盖度、厚度、叶绿素 a 和 3 种多糖含量与累积有效湿润时间呈显著正相关($P < 0.05$)。叶绿素 a 含量与累积有效湿润时间呈线性正相关,盖度、厚度和三种多糖含量则呈对数正相关;人工蓝藻结皮的各指标与光照强度呈显著负相关($P < 0.05$)。盖度和糖被胞外多糖含量与光照强度呈二项式相关,其余指标则呈线性相关。以上结果表明,短期培养接种体在野外环境下的成功拓殖,为人工蓝藻结皮的规模化量产提供了新途径。同时,人工蓝藻结皮拓殖过程中,玉米秸秆覆盖措施良好的环境调控作用,丰富了人工蓝藻结皮接种初期辅助拓殖措施的选择。

关键词:沙漠化;人工生物土壤结皮;接种体;秸秆覆盖;累积有效湿润时间

Effects of inoculum condition and different material mulches on the colonization of artificial cyanobacterial crusts

LIAN Yuchao^{1,2}, BAI Jian³, LIU Rongxia⁴, WANG Jianhong⁴, ZHANG Guojun⁴, HU Rui¹, ZHAO Yang^{1,*}

1 Shapotou Desert Research and Experimental Station/Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Ningxia Environmental Protection Group, Yinchuan 750000, China

4 Jujia ecological agriculture limited company, Jinchang 737100, China

Abstract: The technology of artificial cyanobacterial crusts for desert land management is one of the effective methods for combating desertification in the new times. However, the large-scale production of artificial cyanobacterial crusts inocula

基金项目:国家自然科学基金(32471708,32171630);金川集团股份有限公司重大科技攻关项目(JKQGGJ23Z202302)

收稿日期:2024-04-08; **网络出版日期:**2024-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoyang66@126.com

and the determination of optimal auxiliary colonization measures post-inoculation remain significant bottlenecks impeding the efficiency of this desertification control strategy. In this study, we investigated the effects of different conditions of inoculum (dry algae and wet algae) and two types of mulching (maize straw and non-woven fabric) on the colonization of artificial cyanobacterial crusts. The results showed that both the wet and dry inocula were successfully colonized under natural conditions with two mulching methods of maize straw and non-woven fabric. Maize straw mulching offers superior environmental regulation compared to non-woven fabric mulching, playing a significant role in controlling wind erosion, reducing light intensity, and extending the duration of sum of effective wetting time, thereby more effectively promoting the colonization of artificial cyanobacterial crusts. After 63 days of cultivation, the highest coverage of artificial cyanobacterial crusts (27.9%) was achieved under the treatment of maize straw mulching combined with dry algae inoculation. Under the treatment of maize straw mulching combined with wet algae inoculation, the thickness (6.5 mm), chlorophyll a content ($23.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), loosely bound exopolysaccharide content ($309.9 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), tightly bound exopolysaccharide content ($176.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), and glycocalyx exopolysaccharide content ($181.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) is the highest. Regression analysis results showed that coverage, chlorophyll a content, and the content of the three types exopolysaccharides in artificial cyanobacterial crusts were significantly negatively correlated with wind erosion intensity ($P < 0.05$). Coverage, thickness, chlorophyll a content, and the content of the three types exopolysaccharides were significantly positively correlated with sum of effective wetting time ($P < 0.05$). Among them, the content of chlorophyll a is linearly positively correlated with sum of effective wetting time, while coverage, thickness, and the content of three types of exopolysaccharides are logarithmically positively correlated. The indicators of artificial cyanobacterial crusts are significantly negatively correlated with light intensity. Among them, coverage and glycocalyx exopolysaccharide content show a binomial correlation with light intensity, while the remaining indicators exhibit a linear correlation. These results indicate that the successful colonization of short-term inocula in field environments provides a new approach for the large-scale production of artificial cyanobacterial crusts. Additionally, the use of maize straw mulching in the colonization process of artificial cyanobacterial crusts provides effective environmental regulation, enriching the options for auxiliary measures during the early stages of cyanobacterial inoculation.

Key Words: desertification; artificial biological soil crusts; inoculum; straw mulching; sum of effective wetting time

生物土壤结皮(Biological Soil Crusts, BSCs)是由藻类、地衣、苔藓和微生物通过菌丝、假根以及多糖与地表土壤颗粒胶结而形成的复合体,它的演替可分为藻类、地衣和藓类结皮 3 个阶段,物种组成也由演替初期的细菌、真菌以及蓝藻等先锋物种向更高等的地衣和苔藓植物转变^[1]。在荒漠生态系统中,BSCs 的存在具有重要的生态意义,不仅对地表土壤稳定以及水分调节有促进作用,而且在土壤养分循环、碳氮固定等方面发挥着重要的生态功能。同时,基于 BSCs 对高温、干燥和多风环境的适应性,它可以用于沙漠化防治和生态修复中,特别是当前通过人工培育生产的 BSCs,凭借高效、绿色、环保的治沙特点,成为了沙漠化防治研究的前沿和热点^[2-4]。人工 BSCs 主要通过沙面胶结土壤颗粒以快速形成覆被体的方式来达到固沙目的和促进生态恢复^[5]。当前,人工 BSCs 的分离、纯化、培养以及野外规模化应用以蓝藻结皮为主,蓝藻作为藻类结皮中的优势种,在后续演替过程中将发挥重要作用^[6]。

人工 BSCs 接种方式是影响其拓殖和发育的重要因素,也是人工 BSCs 能够大规模应用的前提^[7]。现阶段,通过蓝藻藻液喷洒沙面进行接种是最常见的方法,但这种表层喷洒的方式极易使蓝藻迅速失水而造成大量死亡,因此在接种初期必须依靠多次喷洒藻液或通过定期补水来维持蓝藻成活率,这在水分短缺的沙漠区域会受到一定的应用限制^[3]。除藻液喷洒外,也有研究者用干燥状态下天然蓝藻结皮碎片在流动沙面上成功接种,然而 BSCs 在天然环境中形成往往需要几年甚至几十年时间,大量采挖将产生新的沙化土地,完全不能满足大规模治沙的需要^[8]。由此可见,在人工 BSCs 大规模应用过程中,如何在保证蓝藻成活率的同时,实现人工 BSCs 接种体的规模化量产,是当前急需突破的技术瓶颈。针对这些问题,Zhao 等^[9]在藻液喷洒方法

的基础上,配合无纺布覆盖并依靠自然降水用 9 个月时间培养出了人工 BSCs 接种体,并将干燥状态下的接种体碎片用于野外,成功培养了人工蓝藻结皮。尽管这一方法提高了蓝藻的成活率,但接种体培养周期依旧很长,且培养过程占地广,后期采集和运输成本也很高。在此基础上,赵燕翘等^[10]尝试将混合蓝藻与细物质相结合,在 2 个月时间里培育出了接种体,但培养过程是在实验室完成的,面对复杂多变的野外环境其实际效果如何仍需进一步验证。因此,短期培养的接种体在野外环境下是否可以成功拓殖?此外,鉴于之前的研究都以干藻接种,那么湿润状态下培养的接种体对人工蓝藻结皮拓殖的影响如何?与干藻有何差异?这些问题的深入研究对人工 BSCs 接种体规模化量产的实现至关重要。

人工 BSCs 的拓殖会受到多种环境条件制约。已有研究表明风蚀和高光强会对人工 BSCs 的生长发育造成不利影响^[11–12]。而关于水分的影响,多数研究以控制实验的方式集中在降雨量和土壤含水量方面^[13–14],实际上土壤累积有效湿润时间的长短更能反应 BSCs 对水分的利用过程,然而累计有效湿润时间对人工 BSCs 生长发育的影响却鲜有报道。因此,有效改善包括累积有效湿润时间在内的各种环境条件,将有助于人工 BSCs 的成功拓殖和发育。目前常见改善环境条件的措施包括两类,一是工程措施,以草方格沙障为代表^[15];二是化学措施,以各种固沙剂为代表^[16]。但这些措施的重点几乎都集中在对风蚀的控制,而在有效湿润时间和光照条件的改善方面却十分有限。因此当前急需探索有效调控多种环境因子,促进人工 BSCs 定殖和发育的新措施、新方法。大量研究表明玉米秸秆对地表风蚀、水分、光照等微环境有较好的调控作用^[17–18]。此外,无纺布则是一种经济、可自然降解的材料,广泛应用于地表防尘和植物种植等方面。那么,将这两种材料以覆盖的方式与接种体结合,是否可以起到有效改善环境条件以促进拓殖的作用?这一问题的研究可能为人工蓝藻结皮辅助拓殖措施提供更多选择。

基于此,本研究以干藻和湿藻两种状态的接种体,结合玉米秸秆和无纺布两种覆盖方式作为辅助拓殖措施。比较不同处理下风蚀强度、累计有效湿润时间和光照强度 3 个微环境指标的变化特征,探究不同处理之间人工 BSCs 生长发育各指标的差异,以期对人工 BSCs 接种体培养和辅助拓殖措施选择提供可靠的科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处腾格里沙漠东南缘沙坡头沙漠试验站(37°27'N、105°57'E),属温带大陆性气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。全年降水量不超过 200 mm,集中于夏季,年蒸发量和年均温分别为 3000 mm 和 9.6 °C,同时常年多风,年平均风速 2.8 m/s。该区域包括藻类、地衣、藓类在内各个演替阶段的 BSCs 均有分布,其中藻类以蓝藻居多,优势蓝藻种包括具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)和念珠藻(*Nostoc carneum*)等^[19]。

1.2 试验设计

本研究于 2023 年 8 月—10 月在野外条件下开展。实验开始前,在沙坡头沙漠试验站实验区将沙丘推平后建立约 40 m²的试验样地,保证用于实验的样地基本平整且表面无植被生长。接种样地的土壤类型为风沙土,颗粒组成为砂粒 98.9%、粉粒 0.99%、黏粒 0.1%;表层裸沙的硝态氮含量为 0.48 mg/kg、铵态氮含量为 0.15 mg/kg、有机碳含量为 0.41 g/kg、速效磷含量为 5.03 mg/kg。实验共设置 6 组处理,每组处理 3 次重复。具体为无覆盖+干藻接种(CK-G);无覆盖+湿藻接种(CK-S);无纺布覆盖+干藻接种(WG);无纺布覆盖+湿藻接种(WS);秸秆覆盖+干藻接种(JG);秸秆覆盖+湿藻接种(JS)。

人工蓝藻结皮接种体的制作原料包括蓝藻、流沙、农田土和水。其中,蓝藻藻种由鱼腥藻(*Anabaena cylindrica*)、念珠藻(*Nostoc carneum*)、席藻(*Phormidium* sp. NIES2121)、具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)、伪枝藻(*Scytonema* sp. NIES-4073)、爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum*)和单歧藻(*Tolypothrix tenuis*)在内的 7 个单一优势蓝藻种混合而成;流沙采集于试验站自然形成的沙丘;农田土取自试验站的小麦田(收割完成后的裸田),土壤类型为灌淤土,颗粒组成为砂粒 56.8%,粉粒 30.3%,黏粒 12.9%。具体制作过程为:流沙和农田土

风干后过筛去除杂质,按 1:4 质量比将流沙和农田土混合在一起,随后加入蓝藻和水,充分搅拌混合后形成半流体状的湿藻接种体;将半流体混合物均匀的涂抹在 1 m×1 m 的铁盘内,并置于室外自然风干至恒重(约 2 天),最终形成约 2—3 mm 厚的碎片,即为干藻接种体^[10]。现已制作 1 m²接种体为例,所需流沙 0.6 kg、农田土 2.4 kg、蓝藻 30 g(干重)以及 580 g 水,充分混合完成后的湿藻接种体含水率约为 16%。接种时,干藻按 10%的接种盖度均匀的撒在样地上,湿藻在与干藻等量的情况下以半流体状均匀撒在样地上。在本研究中,所有处理下的蓝藻接种量均为 30 g/m²(干重),总蓝藻接种量为 1.08 kg(干重)。覆盖材料的准备包括 12 个 50%盖度的玉米秸秆帘(长宽各 1 m),秸秆为 2022 年 10 月收获后采集,平均直径为 3 cm,秸秆帘以打孔穿绳的方法制作而成;6 块无纺布(长 2 m、宽 1.6 m、重 30 g/m²),采购于中国河北省华洛密封材料有限公司。

接种完成后,将秸秆和无纺布覆盖于样地上方,秸秆用铁丝自制的 U 型签固定,秸秆覆盖方向与主风向垂直。无纺布用竹筷固定,为确保实验可靠性,无纺布每隔 21 d 更换一次。

1.3 指标测定与方法

微环境指标包括风蚀强度、光照强度和累计有效湿润时间。风蚀强度通过风蚀签高度变化的差值体现,当风蚀签布置完成后立即记录签高作为初始值,在布置 21 d、42 d、63 d 后分别记录签高,若后一次减前一次的签高差值为正,则代表此阶段发生风蚀,反之为风积;光照强度通过 HOBO 光照强度仪自动记录,时间间隔为 1 h;本实验将 0.73%土壤重量含水量作为人工 BSCs 生长所需的有效湿润阈值^[20],整个实验期间共记录 7 场降雨,总降雨量为 41.2 mm,3 个周期内的降雨频次分别为 1、3、3,降雨量分别为 5.8 mm、10.9 mm、23.9 mm。通过记录每次降雨后土壤重量含水量不低于 0.73%的时间,将其累加后得到累积有效湿润时间。

人工 BSCs 生长发育指标包括盖度、厚度、叶绿素 a 含量以及松散结合胞外多糖(LB-EPS)、紧密结合胞外多糖(TB-EPS)和糖被胞外多糖(G-EPS)三种多糖含量。人工 BSCs 盖度用数码相机测定^[21];厚度通过游标卡尺测量;叶绿素 a 和多糖含量用一个不锈钢圆形(内径 7.08 mm)器具进行采样后,叶绿素 a 通过乙醇法提取,并将提取液体置于波长为 A665 的分光光度计下进行吸光值测定,最后结合下方公式计算叶绿素 a 含量^[21—22]:

$$\text{叶绿素 a 含量}(\mu\text{g}/\text{cm}^2) = \frac{11.9035 \times \text{乙醇}(\text{mL}) \times A665}{\text{取样面积}(\text{cm}^2)}$$

三种多糖含量均采用苯酚-浓硫酸法进行提取,并将提取液体置于波长为 A485 的分光光度计下进行吸光值测定,最后结合下方公式计算多糖含量^[23—24]:

$$\text{多糖含量}(\mu\text{g}/\text{cm}^2) = \frac{5 \times \left[\frac{A485 - 0.1089}{0.0072} \right]}{\text{取样面积}(\text{cm}^2)}$$

整个实验的持续培养时间为 63 d,分 3 个周期,每个周期 21 d。所有指标中,累积有效湿润时间共测定了 7 次(每次降雨后),其余指标均在每个周期的最后一天进行采样和测定,共进行了 3 次。每个周期的指标测定均可反应该周期内微环境特征和人工 BSCs 发育的总体情况。

1.4 数据处理

实验所得数据在 Excel 2021 中进行归类整理后,通过 SPSS 27.0 进行统计分析,包括不同覆盖处理下微环境和人工 BSCs 发育各指标差异的单因素方差分析;覆盖方式和接种方式对人工 BSCs 发育影响的双因素方差分析;三种微环境指标分别对人工 BSCs 各指标的线性、指数、二项式、对数等不同模型的拟合回归,并根据 AIC 准则选取最优回归模型,其判定原则是:AIC 值越小,回归效果越好^[25]。统计分析完成后,所有结果均由 Origin 2022 完成绘图。

2 结果与分析

2.1 玉米秸秆和无纺布覆盖对微环境的影响

在接种 21d 时,各处理均表现为风蚀,其中对照处理风蚀强度显著高于覆盖处理($P < 0.05$; 图 1);接种

42 d时,CK-G 处理风蚀强度最高,除 WG 处理外,其余覆盖处理都出现了风积现象;接种 63 d 时,对照处理仍表现为风蚀,而覆盖处理均完成了由风蚀向风积的过渡,地表稳定性显著增强 ($P<0.05$; 图 1)。在同一时间节点,覆盖处理显著降低了自然状态下的光照强度。其中,JG 和 JS 处理的光照强度在各时间节点均显著低于其他处理 ($P<0.05$; 图 1);WG 处理的光照强度在接种 21 d 时显著低于 CK-G 处理,在接种 63 d 时显著低于对照处理 ($P<0.05$; 图 1);WS 处理在接种 42 d 和 63 d 时均显著低于对照处理 ($P<0.05$; 图 1)。整个实验期间,与对照处理相比,JG 和 JS 处理显著提高了土壤累积有效湿润时间,特别是在接种 42 d 和 63 d 时 ($P<0.05$; 图 1);WG 和 WS 处理土壤累积有效湿润时间在各时间节点均高于对照处理(图 1);所有处理中,JG 处理土壤累计有效湿润时间最高,达到了 14 d,显著高于对照处理的 10.5 d ($P<0.05$; 图 1)。

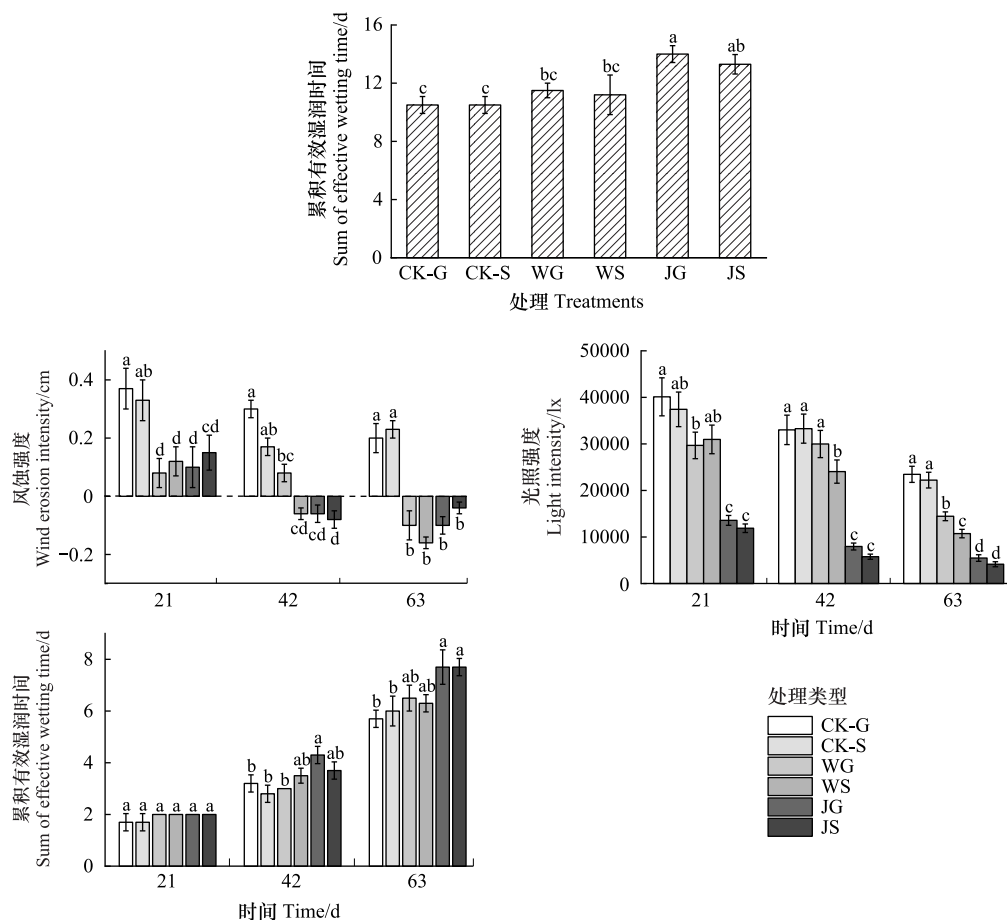


图 1 不同处理对微环境特征的影响

Fig.1 Effects of different treatments on microenvironment characteristics

JG: 秸秆覆盖+干藻; JS: 秸秆覆盖+湿藻; WG: 无纺布覆盖+干藻; WS: 无纺布覆盖+湿藻; CK-G: 无覆盖+干藻; CK-S: 无覆盖+湿藻; 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P<0.05$)

2.2 接种体状态和不同材料覆盖对人工 BSCs 盖度、厚度和叶绿素 a 含量的影响

在人工 BSCs 拓殖的各个时间节点,JG 处理下的盖度均达到最大,分别为 16.8%、21.6% 和 27.9%,并在接种 63 d 时显著高于其他处理 ($P<0.05$; 图 2);对照处理在各个时间节点均显著低于覆盖处理,且 CK-S 的盖度最低 ($P<0.05$; 图 2);不同时间节点之间,WG、WS、JG、JS 四种处理的盖度随着接种时间的延长不断增长,其中 WG 和 JG 处理增长显著 ($P<0.05$; 图 2)。

CK-S、WS 和 JS 湿藻处理与 CK-G、WG 和 JG 干藻处理的厚度在各个时间节点均差异显著,湿藻接种体厚度显著高于干藻,其中 JS 处理的厚度在三个时间节点均为最高 ($P<0.05$; 图 2);不同时间节点之间,CK-G、

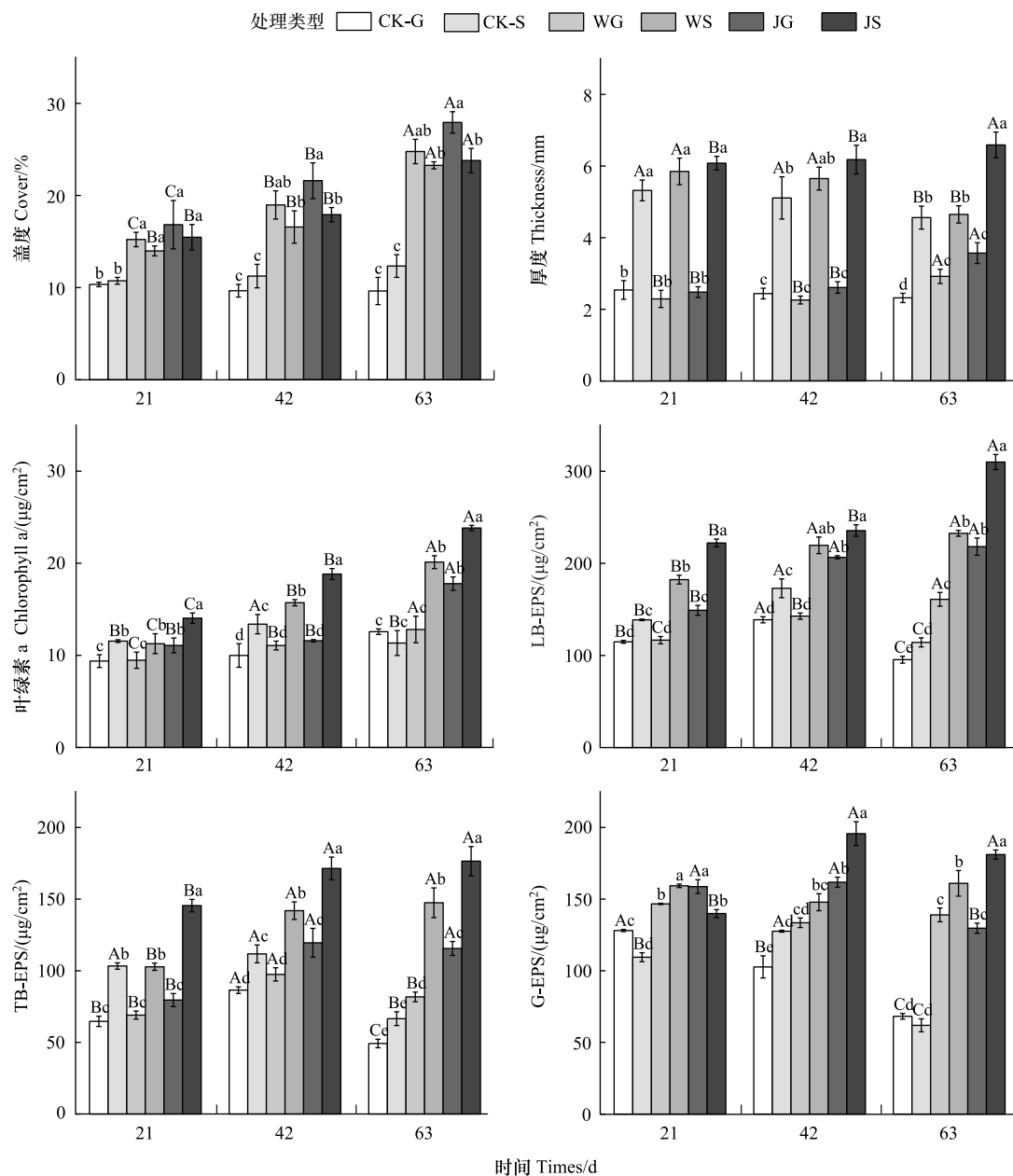


图2 不同处理对人工 BSCs 发育特征的影响

Fig.2 Effects of different treatments on developmental characteristics of artificial BSCs

LB-EPS: 松散结合胞外多糖; TB-EPS: 紧密结合胞外多糖; G-EPS: 糖被胞外多糖; BSCs: 生物土壤结皮; 不同小写字母表示不同处理之间差异显著, 不同大写字母表示同一处理在不同时间阶段差异显著 ($P < 0.05$)

CK-S 和 WS 处理的厚度随着接种时间的延长不断下降, 其中 CK-S 和 WS 处理下降显著 ($P < 0.05$; 图 2); WG、JG 和 JS 处理的厚度随着接种时间的延长不断增加, 且增加显著 ($P < 0.05$; 图 2)。

JS 处理下的叶绿素 a 含量在各个时间节点都达到了最高, 并在接种 42 d 和 63 d 时显著高于其他处理 ($P < 0.05$; 图 2); CK-G 处理下的叶绿素 a 含量在接种 21 d 和 42 d 时最低, CK-S 在接种 63 d 时最低 (图 2); 不同时间节点之间, 除对照处理外, 其余处理的叶绿素 a 含量随着接种时间的延长不断增加, 且在接种 63 d 时均达到显著 ($P < 0.05$; 图 2)。

2.3 接种体状态和不同材料覆盖对人工 BSCs 三种多糖含量的影响

由图 2 可知, WS 和 JS 处理的 LB-EPS 含量在各个时间节点均显著高于对照处理 ($P < 0.05$); JG 处理下的

LB-EPS 含量在接种 42 d 和 63 d 时显著高于对照组,而 WG 处理在接种 63 d 时显著高于对照组 ($P<0.05$; 图 2);CK-G 处理的 LB-EPS 含量在三个时间节点均为最低(图 2);不同时间节点之间,覆盖处理的 LB-EPS 含量随着接种时间的延长呈显著的增加趋势,对照处理的 LB-EPS 含量随着接种时间的延长呈显著的先增后减趋势 ($P<0.05$; 图 2)。

JS 处理的 TB-EPS 含量在各个时间节点均显著高于对照处理 ($P<0.05$; 图 2);不同时间节点之间,CK-G、CK-S 和 WG 处理的 TB-EPS 含量随着接种时间的延长呈显著的先增后减趋势 ($P<0.05$; 图 2);WS 和 JG 处理的 TB-EPS 含量随着接种时间的延长显著增加后,逐渐趋于平稳上升(图 2)。

WS、JG 和 JS 处理的 TB-EPS 含量在三个时间节点均显著高于对照处理 ($P<0.05$; 图 2);在接种 63 d 时,对照处理下的 TB-EPS 含量显著低于覆盖处理 ($P<0.05$; 图 2);不同时间节点之间,CK-G 处理的 G-EPS 含量随着接种时间的延长呈显著下降趋势,CK-S 处理呈显著先增后减的趋势 ($P<0.05$; 图 2);JG 的 G-EPS 含量随着接种时间的延长上升后,逐渐转变为不同程度的下降(图 2)。

2.4 影响人工 BSCs 拓殖的因子分析

由表 1 可知,覆盖方式对人工 BSCs 各属性影响显著,接种方式对厚度、叶绿素 a 和三种多糖含量影响显著,而二者的交互作用对叶绿素 a 和三种多糖含量的影响显著。

表 1 覆盖方式、接种方式及二者交互方式对人工生物土壤结皮属性的影响

Table 1 Effects of mulching mode, inoculation mode and interaction mode on artificial BSCs properties

属性 Property	因子 Factor	F	P	属性 Property	因子 Factor	F	P
盖度 Cover	覆盖方式	83.041	<0.001	LB-EPS	覆盖方式	296.593	<0.001
	接种方式	1.144	0.306		接种方式	128.506	<0.001
	覆盖方式×接种方式	3.479	0.064		覆盖方式×接种方式	16.539	<0.001
厚度 Thickness	覆盖方式	20.566	<0.001	TB-EPS	覆盖方式	85.860	<0.001
	接种方式	112.849	<0.001		接种方式	74.325	<0.001
	覆盖方式×接种方式	2.954	0.062		覆盖方式×接种方式	7.644	=0.001
叶绿素 a	覆盖方式	46.381	<0.001	G-EPS	覆盖方式	206.529	<0.001
	接种方式	29.092	<0.001		接种方式	30.181	<0.001
	覆盖方式×接种方式	12.590	<0.001		覆盖方式×接种方式	16.694	<0.001

LB-EPS: 松散结合胞外多糖; TB-EPS: 紧密结合胞外多糖; G-EPS: 糖被胞外多糖

回归分析表明,人工 BSCs 盖度、叶绿素 a 和三种多糖含量与风蚀强度之间呈显著线性负相关 ($P<0.05$, 图 3),表达式分别为 $y=26.24-18.32x$ ($P<0.001$; $R^2=0.84$; AIC=44.4)、 $y=19.38-8.10x$ ($P<0.013$; $R^2=0.33$; AIC=58.3)、 $y=240.82-160.90x$ ($P<0.001$; $R^2=0.56$; AIC=147.4)、 $y=134.83-88.19x$ ($P=0.002$; $R^2=0.48$; AIC=135.0)、 $y=159.02-106.91x$ ($P<0.001$; $R^2=0.68$; AIC=124.4)。

人工 BSCs 各属性均与光照强度呈显著负相关 ($P<0.05$; 图 4)。其中,厚度、叶绿素 a、LB-EPS 和 TB-EPS 含量与光照强度呈线性负相关(图 4),表达式分别为 $y=(-8.45\times 10^{-5})x+5.77$ ($P<0.001$; $R^2=0.37$; AIC=12.3)、 $y=23.49-0.0003x$ ($P=0.001$; $R^2=0.49$; AIC=53.2)、 $y=316.39-0.006x$ ($P=0.001$; $R^2=0.79$; AIC=134.7)、 $y=180.42-0.004x$ ($P=0.001$; $R^2=0.69$; AIC=124.6);盖度和 G-EPS 含量与光照强度呈二项式相关(图 4),表达式分别为 $y=(-3.74\times 10^{-8})x^2+0.001x+20.87$ ($P<0.001$; $R^2=0.76$; AIC=54.8)、 $y=(-1.97\times 10^{-7})x^2+0.004x+135.8$ ($P<0.001$; $R^2=0.70$; AIC=126.4)。

人工 BSCs 各属性均与累计有效湿润时间呈显著正相关 ($P<0.05$; 图 5)。其中,叶绿素 a 含量与累计有效湿润时间呈线性正相关(图 5),表达式为 $y=1.87x-5.71$ ($P=0.011$; $R^2=0.33$; AIC=58.0);盖度、厚度和三种多糖含量与累计有效湿润时间呈对数正相关(图 5),表达式分别为 $y=14.43\ln(x-7.63)$ ($P<0.001$; $R^2=0.63$; AIC=59.9)、 $y=2.18\ln(x-5.28)$ ($P<0.001$; $R^2=0.13$; AIC=18.0)、 $y=137.07\ln(x-7.69)$ ($P<0.001$; $R^2=0.54$; AIC=149.0)、 $y=75.5\ln(x-7.57)$ ($P<0.001$; $R^2=0.39$; AIC=136.7)、 $y=84.94\ln(x-7.36)$ ($P<0.001$;

$R^2 = 0.43$; $AIC = 134.8$)。

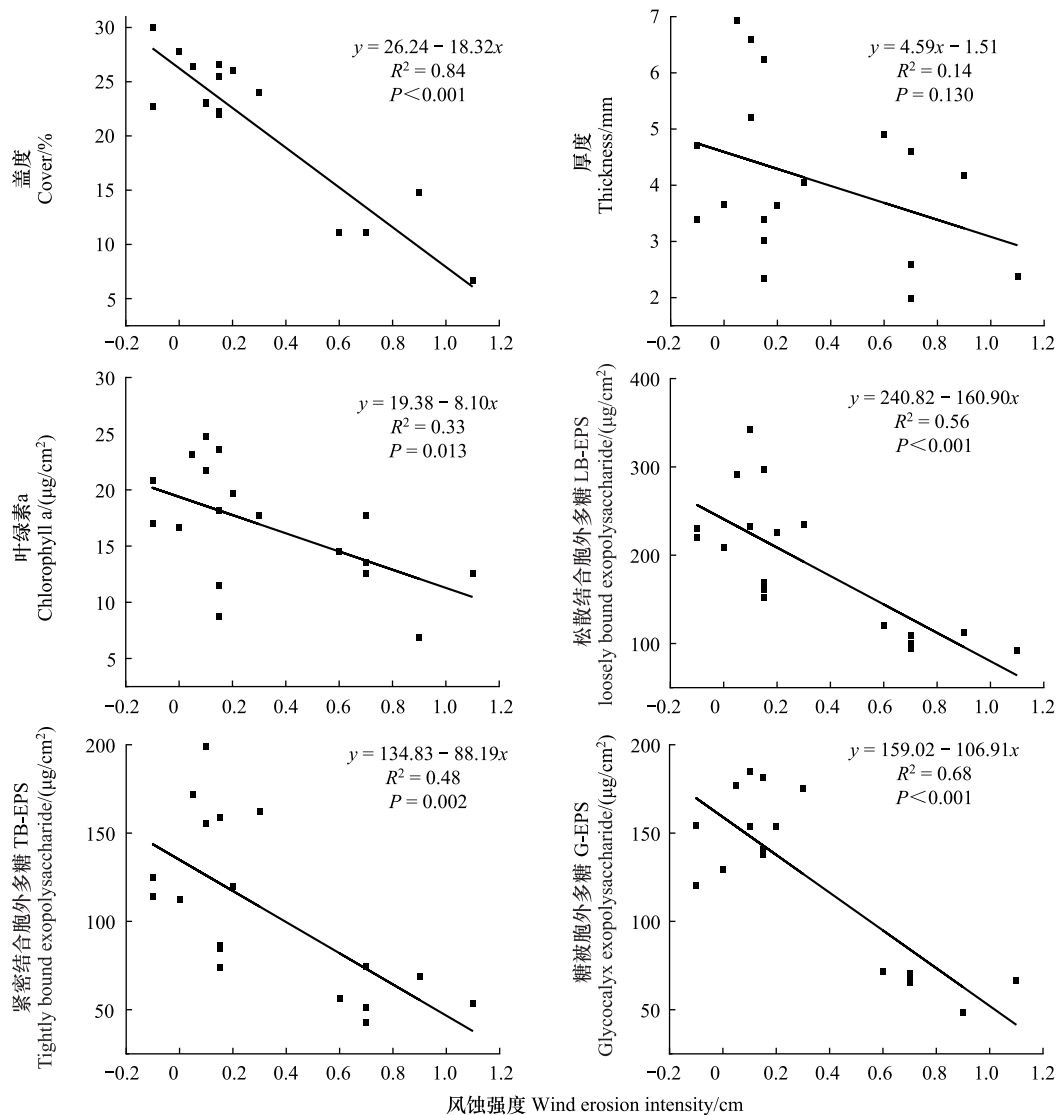


图3 人工 BSCs 各发育指标与风蚀强度的回归分析

Fig.3 Regression analysis of artificial BSCs development indexes and wind erosion intensity

3 讨论

微环境是影响人工 BSCs 拓殖的重要因素,不同材料覆盖通过改变微环境对人工 BSCs 的生长发育产生影响。从实验结果来看,秸秆覆盖处理下人工 BSCs 的拓殖效果优于无纺布覆盖。不同微环境因素中,风蚀强度与人工 BSCs 生长发育各指标呈负相关关系,风蚀的减弱有利于提高地表稳定性,这是人工 BSCs 拓殖的前提^[26]。与对照相比,秸秆和无纺布两种覆盖材料在大气与地表之间形成了天然的保护层,在减缓风蚀方面都发挥了重要作用,这为人工 BSCs 的拓殖构建了稳定的下垫面环境^[27]。光照强度与人工 BSCs 生长发育各指标之间也呈负相关关系,光照强度一旦超过蓝藻的光饱和点时,就会抑制自身的光合速率,因此高光强会对人工 BSCs 的光合作用产生不利影响^[28-29]。李新荣等^[27]的研究表明,野外接种人工 BSCs 的光照强度不应超过 15000 lx。在实验期间,随着时间的推移(气候和季节变动),自然状态下光照强度虽然呈下降的趋势(3 个时间节点的 CK 处理),但依然远超这一数值,即无覆盖措施下人工 BSCs 在各时间节点均受到高光强的限制。当覆盖措施实施后,在不同时间节点均显著削弱了高光强,促进了人工 BSCs 的生长。两种覆盖材料中,秸秆

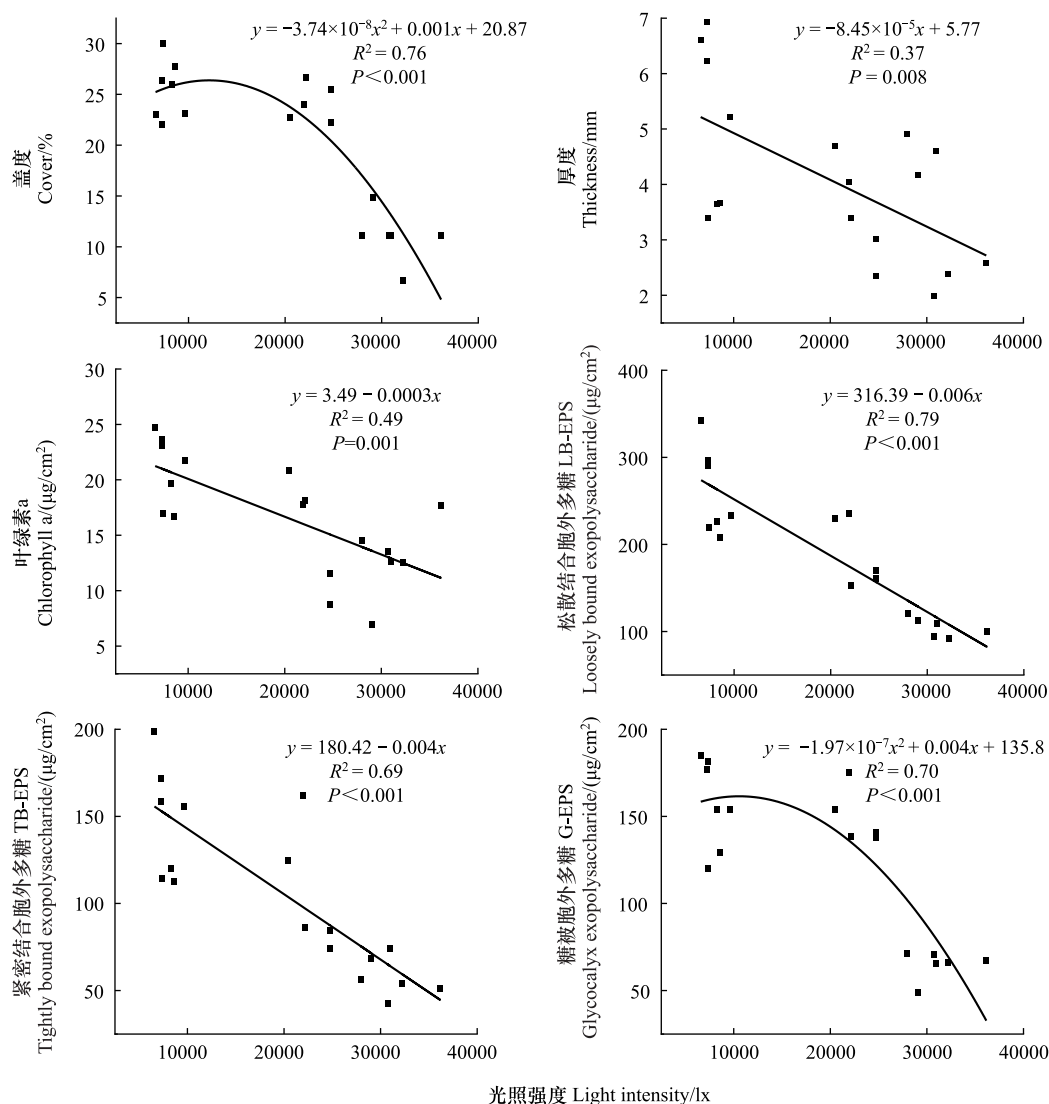


图4 人工 BSCs 各发育指标与光照强度的回归分析

Fig.4 Regression analysis of artificial BSCs development indexes and light intensity

削减光强的作用显著优于无纺布,这是因为无纺布材料本身的透光率较高,导致一定面积上的遮光效果不如秸秆覆盖。累积有效湿润时间与人工 BSCs 生长发育各指标呈正相关关系。人工 BSCs 只有在一定的水分条件下才会生长,而在水分不足时就会进入休眠,累积有效湿润时间通过计算满足人工 BSCs 生长的水分持续时间,充分表征了水分对人工 BSCs 发育的持续影响,其累积值越大,代表人工 BSCs 的有效发育时间就越长,发育也越快^[30]。这一点是土壤含水量只能反应土壤表层瞬时水分所不具备的。具体来说,当土壤湿润后,人工 BSCs 中的微生物会被激活,微生物生物量也会迅速增加,这一过程会促进团聚体的形成和提高土壤稳定性,进而保留更多水分,这种水分的保留会进一步激活微生物活性,从而形成一种正向反馈的循环过程,而土壤持续保持湿润可以使这种正向反馈不断进行,最终促进人工 BSCs 的发育^[31-32]。覆盖措施实施后,通过直接降低近地面风速和削弱光强的作用,使得日土壤温度保持在较低的范围内,进而改变地表蒸发强度,最终延长了土壤累积有效湿润时间^[33]。两种覆盖材料中,玉米秸秆增加地表累积有效湿润时间的作用显著优于无纺布,这与秸秆覆盖可以更好削减高光强以及降低地表水分蒸发有关。同时,秸秆覆盖对水汽的阻隔远远小于无纺布覆盖,在降雨过程中可以保留更多水分^[34]。因此,秸秆覆盖处理下阻风、遮光以及保湿的整体微环境调控效应更佳,人工 BSCs 拓殖效果也更好。

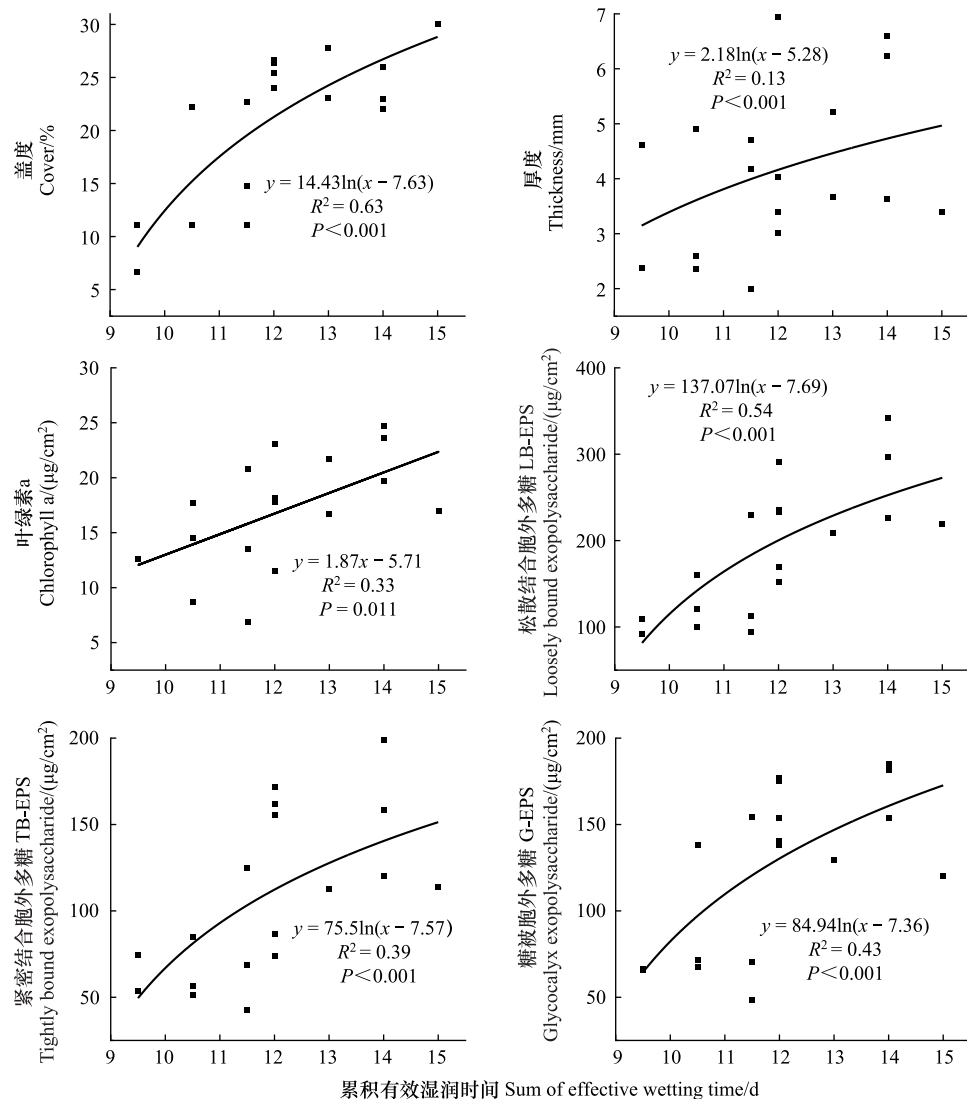


图5 人工BSCs各发育指标与累积有效湿润时间的回归分析

Fig.5 Regression analysis of artificial BSCs development indexes and sum of effective wetting time

本研究中干藻和湿藻两种状态的接种体在野外环境下均实现了成功拓殖。玉米秸秆覆盖下干藻接种体的盖度达到了27%、厚度达到了3.5 mm、叶绿素a含量为 $17 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、3种多糖的总糖含量为 $450 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。Zhao等^[9]将培养9个月的干燥蓝藻结皮碎片接种于目标恢复区域后,3个月时间人工BSCs的盖度达到30%,厚度在3 mm以上、叶绿素a含量达到了 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,这与本研究结果相近;总糖含量达到了 $1500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,显著高于 $450 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,可能是本实验培养时间较短的原因。干藻接种体的成功拓殖与制作时细物质的添加以及接种后环境条件的改善密不可分^[10]。本研究还表明,在不同状态的接种体中,干藻盖度在各个时间节点都高于湿藻,拓殖效果更突出,而湿藻因接种时以团块体形态附着于地表,在厚度上显著高于干藻。同时,厚度越大,采样时相同单位面积内样品体积更大,这也是同一覆盖处理下,湿藻的叶绿素和多糖含量相对于干藻更高的原因。此外,在无覆盖处理下,湿藻生长发育情况整体优于干藻,这表明在无保护措施时,湿藻团块可以更好的抵御恶劣环境条件的制约,维持自身生长。这其中可能的原因是,湿藻的团块结构比干藻片状结构更重、更厚、更利于储水,进而表现出更好的抗风蚀、抗沙埋和抗旱能力^[7]。在人工BSCs接种体拓殖过程中,蓝藻可以通过大量酶和转运蛋白的作用不断分泌胞外多糖来增强自身抗逆性。同时,作为蓝藻的代谢产物,多糖是人工BSCs早期阶段(藻结皮)粘结土壤颗粒和稳定地表结构的主要方式,因此其含量高低可以反应人工

BSCs 的发育程度^[35]。然而,胞外多糖的产生会受到环境条件的限制,覆盖措施实施后,一定程度上改善了恶劣的自然环境,进而促进了胞外多糖的分泌。上述分析表明,短期培养的干湿两种接种体都可实现治沙目的,在规模化接种过程中,湿藻接种体可以做到现做现用,显著提高了接种效率,但对水的依赖性较大,适合在距离水源近的区域展开接种。干藻的晾干过程虽然会花费一定的时间,但便于运输,可以弥补湿藻接种区域受限的不足。此外,可以尝试将湿藻接种体用于降水少或者风力大的特定防护区域,凭借其长时间维持高生物量的特性稳步拓殖。

4 结论

本研究结果表明,短期培养的干藻和湿藻接种体在野外环境下都成功培育出了人工 BSCs,其中盖度普遍达到 20%以上,其他指标也有相应增长。两种覆盖材料中,玉米秸秆对微环境的调控效果最佳,不仅可以很好的缓解风蚀和削弱高光强,而且延长了累积有效湿润时间。基于此,今后可以将累积有效湿润时间作为评价人工 BSCs 辅助定殖材料优劣的指标之一。此外,玉米秸秆覆盖+干藻/湿藻接种体培养人工蓝藻结皮的方法或可成为未来人工 BSCs 治沙新模式。综上所述,短期培养的干藻和湿藻接种体为人工 BSCs 的规模化量产和面积应用提供了可能;玉米秸秆覆盖措施对人工蓝藻结皮拓殖的显著促进作用,丰富了人工蓝藻结皮辅助拓殖措施的选择。

尽管如此,鉴于实验时间仅为 63 d,发育最好的人工 BSCs 盖度也不到 30%,后续稳定性如何仍需持续观测。同时,实验样地为平坦沙面且面积有限,在面对野外复杂地形(如沙丘)以及大面积接种时其实际效果如何也需进一步研究。本实验中 50%秸秆覆盖度的设置虽然发挥了良好作用,但从降本增效的角度出发,此覆盖度设置是否为最优设计仍有待验证。

参考文献(References):

- [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. 生态学报, 2010, 30(16): 4484-4492.
- [2] 李新荣,谭会娟,回嵘,赵洋,黄磊,贾荣亮,宋光. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究. 科学通报, 2018, 63(23): 2320-2334.
- [3] Rossi F, Li H, Liu Y D, De Philippis R. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. Earth-Science Reviews, 2017, 171: 28-43.
- [4] 赵洋,潘颜霞,苏洁琼,张志山. 中国干旱区沙化土地绿色环保治理技术综述. 中国沙漠, 2021, 41(1): 195-202.
- [5] 许文文,赵燕翘,王楠,赵洋. 人工蓝藻结皮对沙区表层土壤酶活性及其恢复速率的影响. 生态学报, 2023, 43(7): 2856-2864.
- [6] 周晓兵,张丙昌,张元明. 生物土壤结皮固沙理论与实践. 中国沙漠, 2021, 41(1): 164-173.
- [7] 赵燕翘,连煜超,许文文,赵逸雪,韩高玲,赵洋. 中国人工蓝藻结皮研究进展. 中国沙漠, 2023, 43(5): 214-222.
- [8] Zhao Y, Wang N, Zhang Z S, Pan Y X, Jia R L. Accelerating the development of artificial biocrusts using covers for restoration of degraded land in dryland ecosystems. Land Degradation & Development, 2021, 32(1): 285-295.
- [9] Zhao Y, Zhao Y Q, Xu W W, Wang N, Zhang Z S. Acquiring high-quality and sufficient propagules/fragments for cyanobacteria crust inoculation and restoration of degraded soils in a sandy desert. Land Degradation & Development, 2023, 34(5): 1593-1597.
- [10] 赵燕翘,连煜超,许文文,韩高玲,赵洋. 土壤基质中细物质含量对人工蓝藻结皮形成的影响. 应用生态学报, 2023, 34(9): 2398-2404.
- [11] 饶本强,王伟波,兰书斌,李敦海,胡春香,刘永定. 库布齐沙地三年生人工藻结皮发育特征及微生物分布. 水生生物学报, 2009, 33(5): 937-944.
- [12] Chen L Z, Deng S Q, De Philippis R, Tian W Q, Wu H, Wang J. UV-B resistance as a criterion for the selection of desert microalgae to be utilized for inoculating desert soils. Journal of Applied Phycology, 2013, 25(4): 1009-1015.
- [13] 龚萍,党晓宏,蒙仲举,迟文峰,常江. 生物结皮对沙质土壤含水量和水分入渗的影响. 干旱区资源与环境, 2022, 36(9): 120-125.
- [14] 肖波,郭成久,赵东阳,胡克林,贾玉华. 黄土和风沙土藓结皮土壤呼吸对模拟降雨的响应. 生态学报, 2017, 37(11): 3724-3732.
- [15] Wang W B, Liu Y D, Li D H, Hu C X, Rao B Q. Feasibility of cyanobacterial inoculation for biological soil crusts formation in desert area. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5): 926-929.
- [16] Park C H, Li X R, Jia R L, Hur J S. Combined application of cyanobacteria with soil fixing chemicals for rapid induction of biological soil crust formation. Arid Land Research and Management, 2017, 31(1): 81-93.
- [17] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,黄会娟,杨宝平,张睿,韩清芳,聂俊峰. 中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展 I. 不同量秸秆覆

- 盖的农田生态环境效应. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 63-68, 74.
- [18] 申小凡, 张刚. 中国秸秆露天焚烧碳排放量统计清单. 中国环境科学学会, 2023 年科学技术年会论文集(一). 2023, 13: 264-276
- [19] 鲍婧婷, 孙靖尧, 王进. 生物土壤结皮中微生物群落特征综述. 中国沙漠, 2022, 42(6): 33-43.
- [20] Li X R, Zhang P, Su Y G, Jia R L. Carbon fixation by biological soil crusts following revegetation of sand dunes in arid desert regions of China: a four-year field study. *Catena*, 2012, 97: 119-126.
- [21] 许文文, 赵燕翘, 王楠, 赵洋. 人工生物土壤结皮对草本植物群落组成与多样性的影响. 中国沙漠, 2022, 42(5): 204-211.
- [22] Zhao Y, Wang J. Mechanical sand fixing is more beneficial than chemical sand fixing for artificial cyanobacteria crust colonization and development in a sand desert. *Applied Soil Ecology*, 2019, 140: 115-120.
- [23] 赵燕翘, 连煜超, 许文文, 韩高玲, 赵洋. 人工培育生物结皮的形成和发育对单次降雨量变化的响应. 生态学报, 2024, 44(2): 723-732.
- [24] Rossi F, Mugnai G, De Philippis R. Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts. *Plant and Soil*, 2018, 429(1): 19-34.
- [25] Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6): 716-723.
- [26] Zhao Y, Xu W W, Wang N. Effects of covering sand with different soil substrates on the formation and development of artificial biocrusts in a natural desert environment. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105081.
- [27] 李新荣, 回嵘, 赵洋. 中国荒漠生物土壤结皮生态生理学研究. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [28] 尚帅. 温度、光照对长江口几种优势藻类生长的影响研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
- [29] 张雅涵. 具鞘微鞘藻室内培养及产胞外多糖条件的优化[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [30] 张鹏, 李新荣, 胡宜刚, 黄磊, 冯丽, 赵洋. 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响. 生态学报, 2011, 31(20): 6116-6124.
- [31] Belnap J, Welter J R, Grimm N B, Barger N, Ludwig J A. Linkages between microbial and hydrologic processes in arid and semiarid watersheds. *Ecology*, 2005, 86(2): 298-307.
- [32] 潘颜霞, 张亚峰, 虎瑞. 吸湿凝结水对荒漠地区生物土壤结皮生态功能的影响综述. 地球科学进展, 2022, 37(1): 99-109.
- [33] 王敏, 王海霞, 韩清芳, 李荣, 张睿, 贾志宽, 杨宝平. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响. 作物学报, 2011, 37(7): 1249-1258.
- [34] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展. 水土保持研究, 2021, 28(6): 429-436.
- [35] Mugnai G, Rossi F, Vincent John Martin Noah Linus Felde, Colesie C, Büdel B, Peth S, Kaplan A, De Philippis R. Development of the polysaccharidic matrix in biocrusts induced by a cyanobacterium inoculated in sand microcosms. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(1): 27-40.