

DOI: 10.20103/j.stxb.202302080215

赵燕翘, 连煜超, 许文文, 韩高玲, 赵洋. 人工培育生物结皮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.

Zhao Y Q, Lian Y C, Xu W W, Han G L, Zhao Y. Response of formation and development of artificial biocrusts to changes in single rainfall. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 723-732.

人工培育生物结皮形成和发育对单次降雨量变化的响应

赵燕翘^{1,2}, 连煜超^{1,2}, 许文文^{1,2}, 韩高玲^{1,2}, 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, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:人工生物土壤结皮(BSCs)是目前沙化土地治理的新方法和新模式,播撒天然 BSCs 碎片是培养人工 BSCs 的有效方法之一。降雨显著影响人工 BSCs 的拓殖和发育,已有的研究多集中于探讨降雨总量和频次对单一类别的人工 BSCs 的影响。而单次降雨量如何影响不同类别的人工 BSCs 生长发育,仍鲜见报道。以腾格里沙漠东南缘的天然藓类(N-M)、天然蓝藻-地衣(N-CL)、天然蓝藻(N-C)和人工蓝藻(A-C)结皮碎片作为培养人工 BSCs 的材料,探讨了 1 mm、2 mm 和 5 mm 的单次降雨量与不同类别 BSCs 碎片对人工 BSCs 的影响。结果表明,在 3 种单次降雨量处理下使用 3 种天然 BSCs 碎片和 A-C 结皮碎片均可成功培养人工 BSCs,2 mm 单次降雨量处理下人工 BSCs 的发育效果最好,而 N-C 和 A-C 较其他类别在培养早期具有较高的盖度(32.5%)和叶绿素 a 含量(11.39 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)。回归分析发现,人工 BSCs 的盖度与单次降雨量呈二项式相关;N-M 和 N-CL 的厚度与单次降雨量呈二项式相关,N-C 和 A-C 与单次降雨量呈对数相关;N-C 的叶绿素 a 含量和单次降雨量呈线性正相关;N-M 的松散结合胞外多糖含量和单次降雨量呈线性负相关;N-M 和 A-C 的紧密结合胞外多糖含量和单次降雨量分别呈线性负相关和指数相关($P<0.05$)。研究证明了单次降雨量和 BSCs 类别显著影响人工 BSCs 的拓殖和发育。同时发现 A-C 较 N-C 发育更稳定。因此,建议在使用人工 BSCs 进行大规模生态恢复时,应选择适宜的 BSCs 类别并优先选择人工 BSCs 碎片作为培养材料。

关键词:沙漠化;人工生物土壤结皮;单次降雨量;蓝藻结皮;生态恢复

Response of formation and development of artificial biocrusts to changes in single rainfall

ZHAO Yanqiao^{1,2}, LIAN Yuchao^{1,2}, XU Wenwen^{1,2}, HAN Gaoling^{1,2}, ZHAO Yang^{1,*}

1 Shapotou Desert Research and Experimental Station, Northwest Institute Ecology and Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

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

Abstract: Desertification remains a major environmental problem in our country. Biocrusts(BSCs) can effectively fix sand, but the natural crusts have a long formation cycle. Therefore, artificial biocrusts technology came into being. The artificial biocrust is a new method and model of desertification land treatment. Spreading natural BSCs fragments is one of the effective methods to cultivate artificial BSCs, and this method has a short incubation cycle, is simple to operate, and has low economic costs. Rainfall significantly affects the colonization and development of artificial BSCs. Most of the existing studies have focused on the influence of total and frequency of rainfall on the water exposure of the single type of artificial BSCs. How the single rainfall affects the growth and development of different types of artificial BSCs is still rarely reported.

基金项目:国家自然科学基金项目(32171630,32061123006);中国科学院“西部之光”重点项目

收稿日期:2023-02-08; **网络出版日期:**2023-10-18

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

In this study, natural moss crust (N-M), natural cyanobacteria-lichen crust (N-CL), natural cyanobacteria crust (N-C) and artificial cyanobacteria crust (A-C) fragments from the southeast margin of the Tengger Desert were used as materials for cultivating artificial BSCs. The effects of single rainfall treatments of 1 mm, 2 mm and 5 mm and different types of BSCs fragments on artificial BSCs were investigated. The results showed that artificial BSCs could be successfully cultured using 3 natural BSCs fragments and A-C crust fragments under three single rainfall treatment, and the development effect of artificial BSCs was the best under the 2mm single rainfall treatment, while N-C and A-C had higher coverage (32.5%) and chlorophyll a content ($11.39 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) in the early stage of culture than other types. Regression analysis showed that the coverage of artificial BSCs was related to the single rainfall treatments. The thicknesses of N-M and N-CL were binomial related to the single rainfall treatments, and N-C and A-C were logarithmic related to the single rainfall treatments. The chlorophyll a content of N-C was linearly positively correlated with the single rainfall treatments. The loosely bound extracellular polysaccharide content of N-M was linearly negatively correlated with single rainfall treatments. The tightly bound exopolysaccharide content and the single rainfall treatments of N-M and A-C showed linearly negative correlation and exponential correlation, respectively ($P < 0.05$). In this study, it was proved that the single rainfall treatments and BSCs types significantly affected the colonization and development of artificial BSCs, and A-C were more stable than N-C. So it is suggested that when using artificial BSCs for large-scale ecological restoration, appropriate BSCs should be selected and artificial BSCs fragments should be preferred as culture materials.

Key Words: desertification; artificial biocrusts; single rainfall; cyanobacteria crust; ecological restoration

生物土壤结皮(BSCs)是生态系统健康的主要标志,然而,自然条件下 BSCs 形成往往需要 10—20 年^[1]。人工 BSCs 是将天然 BSCs 中的优势物种(藻类、地衣和藓类)进行人工培育后接种到需要治理的沙子表面,养护成活后起到固定沙面的作用。不仅大大缩短了 BSCs 的形成年限,而且可以迅速固定沙面,增加土壤养分,提高了土地质量。近年来,人工 BSCs 等绿色环保治沙技术已经发展成为沙化土地治理的新方法和新模式^[2-3]。

播撒天然 BSCs 碎片是培养人工 BSCs 的有效方法之一,此方法培养周期短,操作简单且经济成本低^[4]。在我国腾格里沙漠和黄土高原、以及美国西部大盆地和科罗拉多高原生态区等区域均通过播撒 BSCs 碎片成功培养了藻类、藓类和地衣的人工 BSCs^[5-8]。其中在腾格里沙漠的研究中还探讨了不同遮盖物对人工蓝藻结皮的影响^[6],以及通过分别播撒干燥、新鲜蓝藻和 BSCs 等方法探讨人工蓝藻结皮的发育状况^[5]。然而,大量采集天然 BSCs 将导致新的地表破坏,甚至导致新的生态脆弱区形成^[9],还可能增加沙尘暴的增加^[10-11]。因此,亟待探索满足大规模生态恢复同时不会造成二次破坏的人工 BSCs 接种体^[4]。但在同样环境条件下,不同类别 BSCs 碎片培养人工 BSCs 的效果如何? 人工 BSCs 碎片与天然 BSCs 碎片作为撒播材料培养的人工 BSCs 是否存在差异? 这些亟待开展深入研究。

水分显著影响人工 BSCs 的拓殖和发育。张丙昌等^[12]在连续施水的处理下研究了人工 BCSs 生长时的最适水分含量,徐婷婷^[13]、吴丽等^[14]发现减水处理也有利于人工 BCSs 生长,张宝琦^[15]研究了人工 BCSs 生长的最适降雨频次;此外,杨利云^[16]发现在晚上浇水更有利于人工蓝藻结皮的管护,Rao 等^[17]还发现露水能够迅速激活人工蓝藻结皮的光合作用。然而,不同类别的人工 BSCs 对水分的适应性不同,藓类和地衣结皮多生长在潮湿遮荫的环境下^[18-19],藻类结皮在降雨量较低的环境中也可以生长^[20]。单次降雨量的变化究竟如何影响人工 BSCs 的培养? 人工 BSCs 碎片与天然 BSCs 碎片对不同单次降雨量的响应是否存在差异? 这些研究仍鲜见报道。

本研究以天然藓类、天然藻地衣、天然蓝藻和人工蓝藻结皮碎片作为培养人工 BSCs 的材料,比较了不同模拟单次降雨量处理下不同类别人工 BSCs 的生长状况,探讨了单次降雨量对不同类别人工 BSCs 的盖度、厚度、叶绿素 a 含量(Chl-a)和松散结合胞外多糖(LB-EPS)、紧密结合胞外多糖(TB-EPS)、糖被胞外多糖

(G-EPS)含量的影响。研究结果将为人工 BSCs 培养提供理论依据,促进了人工 BSCs 的推广和应用。

1 材料和方法

1.1 研究区概括

研究区位于腾格里沙漠东南缘(37°46′10″N, 105°00′00″E, 海拔 1206 m)的沙坡头沙漠试验站,属荒漠草原气候带,气候干旱,多风少雨,日照充足。年平均温度 9.6℃,年均风速 2.8 m/s,年降雨量 186 mm,降雨集中于 6—8 月,年蒸发量 3000 mm。藓类、地衣和藻类结皮为该区域主要的 BSCs。藓类以真藓科的真藓(*Bryum argenteum*)以及从藓科的黑对齿藓(*Didymodon nigrescens*)和硬叶对齿藓长尖变种(*D. rigidulus var. ditrichoides*)等为优势种^[21–22];地衣以球胶衣(*Collema cocophorum*)、坚韧胶衣(*C. tenax*)、石果衣(*Endocarpon pusillum*)等为主^[20];藻类以蓝藻门、绿藻门和硅藻门等为主,蓝藻门占 42.5%,具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)为优势种^[23]。

1.2 实验设计

本研究于 2021 年 7—10 月开展。实验开始前,在试验区随机采取发育良好的藓类结皮、藻地衣结皮以及蓝藻结皮备用,在人工蓝藻试验区(人工蓝藻结皮培养方法详见 Zhao 等^[5])随机采取人工蓝藻结皮备用。采样使用约等于聚氯乙烯(PVC)管面积 1/10 (7.5 cm²)的器具,为了防止样品破碎以保证其完整,采样前将 BSCs 表面喷湿后再用器具进行取样,按 BSCs 类别分别采集 9 份样品后,在不破坏 BSCs 生理结构的条件下碾碎,然后将碾碎后的样品进行混合。

将无盖无底的 PVC 管(内径 10 cm,管长约 12 cm)均匀安插在流沙中(露出地上的部分约 3 cm),并在 PVC 管外铺设草帘子用于防风挡沙。然后将采集的天然藓类(N-M)、天然蓝藻-地衣(N-CL)、天然蓝藻(N-C)和人工蓝藻(A-C)结皮碎片的混合样均分成 9 份,分别均匀播撒在 PVC 管中,接种盖度为 10%。降雨模拟实验在遮雨棚下进行,实验小区顶部安装有耐力板(透光率 88%)避免自然降雨对实验的影响。降雨频率 5 d 一次,共模拟降雨 16 次,模拟单次降雨量梯度为 1 mm、2 mm 和 5 mm,每个处理设置 9 次重复。为保证降雨均匀,采用喷壶将水雾化后分多次喷洒在人工 BSCs 表面。

1.3 样品采集与指标测定

培养 23 d 和 81 d 后,测量每个 PVC 管内的人工 BSCs 盖度、厚度、叶绿素 a 含量以及 LB-EPS、TB-EPS、G-EPS 三种多糖含量。

人工 BSCs 盖度用“数码照相机”测量,分析方法详见许文文等^[24]。用游标卡尺测量培养的人工 BSCs 厚度。

人工 BSCs 的叶绿素 a 含量和多糖用一个不锈钢圆形(内径 7.08 mm)的器具进行采样。叶绿素 a 含量用乙醇法进行测定,计算公式如下^[1,5,25]:

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

LB-EPS、TB-EPS、G-EPS 三种多糖含量的提取方法详见 Rossi 等^[26],每种多糖含量均使用苯酚-浓硫酸法进行检测^[25–27],计算公式为:

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

1.4 数据处理及分析

采用 Excel 2021 和 Origin 2022 对数据进行整理和绘图,采用 SPSS 27.0 统计软件进行单因素、双因素方差分析和回归分析,分别使用线性、二项式、幂函数、指数和对数函数建立人工 BSCs 属性与单次降雨量梯度之间的回归模型,根据拟合 R^2 最大原则确定最优拟合度选取最优模型。文中只将具有统计学意义的部分进行了绘图。

2 结果与分析

2.1 不同单次降雨量处理对不同类别人工 BSCs 盖度和厚度的影响

培养 23 d 后, N-M 和 N-C 在 5 mm 单次降雨量处理下的盖度显著高于 1 mm 处理, 而 A-C 在 2 mm 处理下盖度显著高于 5 mm 处理 ($P < 0.05$; 图 1); 培养 81 d 后, 除 A-C 外其他类别均在 2 mm 处理下盖度达到最大, 而 A-C 在 1 mm 和 2 mm 处理下盖度相近, 其中 N-C 和 A-C 在 2 mm 处理下的盖度显著高于 5 mm ($P < 0.05$; 图 1)。对四种类别培育的人工 BSCs 进行比较分析, 在 1 mm 和 2 mm 单次降雨量处理下, N-M 的平均盖度约为 20%, 显著低于其他类别 ($P < 0.05$), 其中在 1 mm 处理下极显著低于 N-CL 和 A-C ($P < 0.001$), 在 2 mm 处理下极显著低于 N-CL 和 N-C ($P < 0.001$; 图 1)。

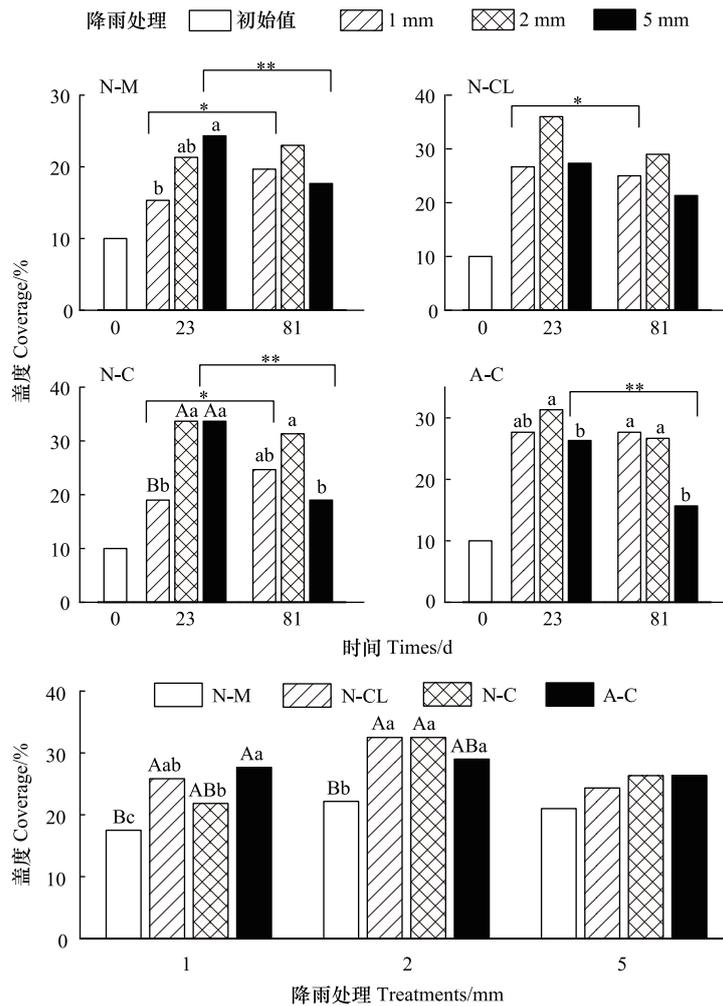


图 1 不同单次降雨量处理对不同类别人工生物土壤结皮盖度的影响

Fig.1 Effects of different single rainfall treatments on the coverage of different types of artificial BSCs

N-M: 天然藓类; N-CL: 天然蓝藻-地衣; N-C: 天然蓝藻; A-C: 人工蓝藻; 图中不同小写和大写字母分别代表 0.05 和 0.001 差异显著; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$

培养 23 d 后, 四种类别人工 BSCs 均在 2 mm 单次降雨量处理下厚度最大, 且 N-M、N-CL 和 N-C 在 2 mm 处理下显著高于 1 mm 处理 ($P < 0.05$; 图 2); 培养 81 d 后 N-M 和 N-C 在 2 mm 处理下厚度最高, 显著高于 1 mm 处理 ($P < 0.05$; 图 2), N-CL 和 A-C 在 5 mm 处理最高, 显著高于 1 mm 处理 ($P < 0.05$; 图 2)。对四种类别培育的人工 BSCs 进行比较分析, 在 1 mm 和 2 mm 单次降雨量处理处理下, N-M 的厚度最高, 显著高于其他类

别($P<0.05$; 图 2)。

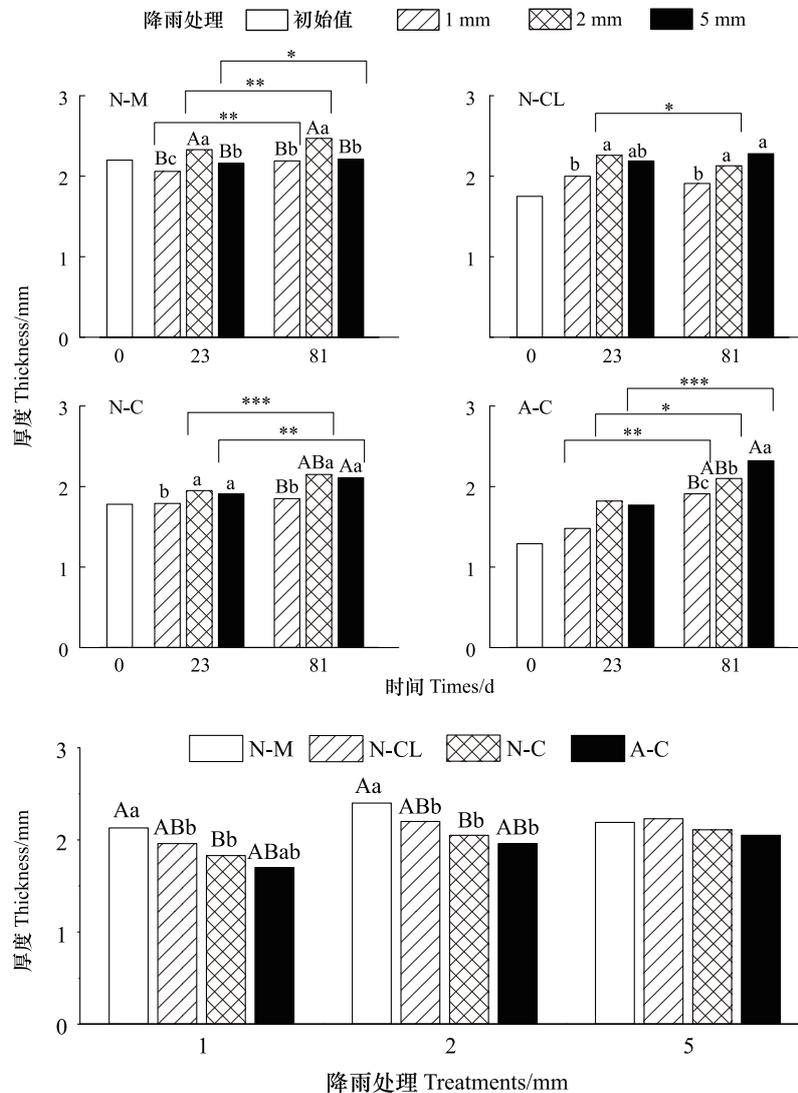


图 2 不同单次降雨量处理对不同类别人工生物土壤结皮厚度的影响

Fig.2 Effects of different single rainfall treatments on the thickness of different types of artificial BSCs

2.2 不同单次降雨量处理对不同类别人工 BSCs 叶绿素 a 含量和多糖含量的影响

在培养 23 d 和 81 d 后,相同类别的人工 BSCs 在单次降雨量处理梯度间叶绿素 a 含量差异均不显著(图 3)。在 2 mm 处理下,N-C 和 A-C 的叶绿素 a 含量显著高于其他类别的人工 BSCs,在 5 mm 处理下,N-M 的叶绿素 a 含量显著低于其他类别的人工 BSCs($P<0.05$; 图 3)。

培养 23 d 后,N-C 和 A-C 在 2 mm 单次降雨量处理下 LB-EPS 含量最高,其中 N-C 在 2 mm 处理下 LB-EPS 含量显著高于 5 mm($P<0.05$; 图 4),A-C 的 TB-EPS 和 G-EPS 含量在 1 mm 处理下高于其他单次降雨量处理(图 4)。培养 81 d 后,各人工 BSCs 的多糖含量均出现了不同程度的下降或不再增加,而 A-C 的 TB-EPS 和 G-EPS 含量下降程度较低(图 4)。

对四种类别培育的人工 BSCs 进行比较分析,在 1 mm 和 2 mm 单次降雨量处理下 N-M 的 TB-EPS 含量最高,在 1 mm 处理下显著高于 N-CL 和 A-C,2 mm 处理下显著高于其他类别的人工 BSCs($P<0.05$; 图 4);在 5 mm 处理下,N-C 的 G-EPS 含量最高,显著高于 N-M 和 A-C 处理($P<0.05$; 图 4)。

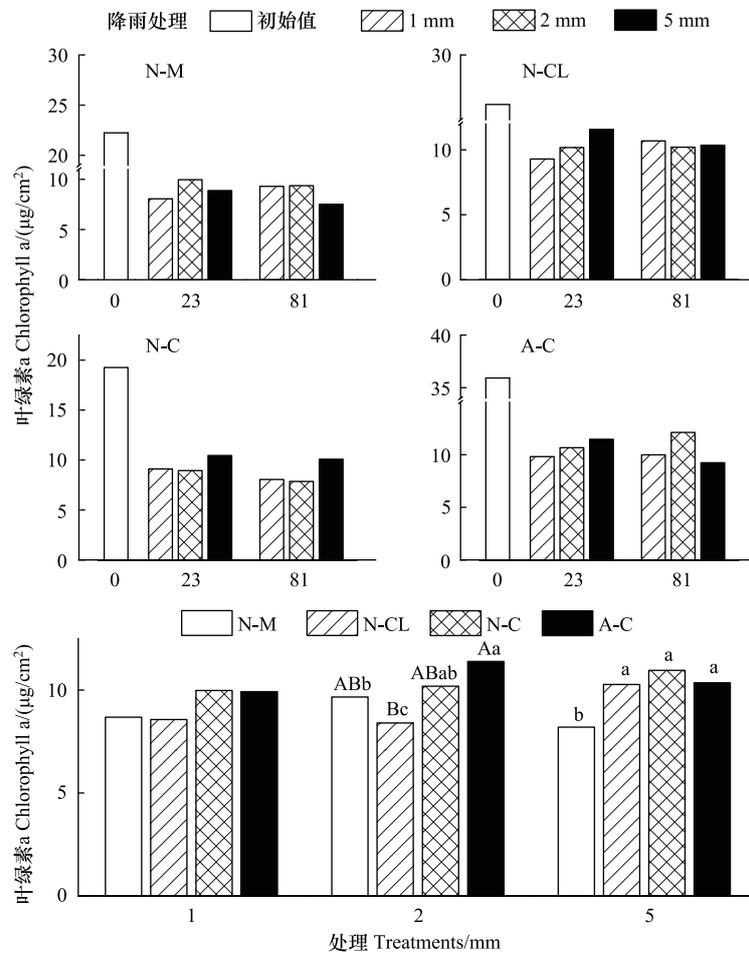


图3 不同单次降雨量处理对不同类别人工生物土壤结皮叶绿素 a 含量的影响

Fig.3 Effects of different single rainfall treatments on chlorophyll a content in different types of artificial BSCs

2.3 单次降雨量处理与不同类别人工 BSCs 属性间的关系

表 1 显示,人工 BSCs 类别对其盖度、厚度、叶绿素 a 含量和 TB-EPS 含量的影响显著 ($P < 0.05$),对 G-EPS 的影响边缘显著 ($P = 0.1$);单次降雨量处理对人工 BSCs 的盖度、厚度和 TB-EPS 含量的影响显著 ($P < 0.05$),对 LB-EPS 的影响边缘显著 ($P < 0.1$);人工 BSCs 类别和单次降雨量处理的交互作用对人工 BSCs 的盖度影响边缘显著 ($P < 0.1$),对 TB-EPS 含量的影响边缘显著 ($P < 0.1$)。

不同类别人工 BSCs 的盖度与单次降雨量处理均呈二项式相关,表达式分别为 $y = 9.9 + 7.75x - 1.1x^2$ ($R^2 = 0.28$, $P = 0.008$); $y = 13 + 14.28x - 2.5x^2$ ($R^2 = 0.31$, $P = 0.004$); $y = 13 + 14.28x - 2.5x^2$ ($R^2 = 0.31$, $P = 0.004$); $y = 18.8 + 8.6x - 1.65x^2$ ($R^2 = 0.43$, $P < 0.001$); 图 5)。

N-M 和 N-CL 的厚度与单次降雨量处理均呈二项式相关,表达式分别为 $y = 1.60 + 0.41x - 0.06x^2$ ($R^2 = 0.62$, $P < 0.001$), $y = 1.69 + 0.53x - 0.09x^2$ ($R^2 = 0.77$, $P < 0.001$); N-C 和 A-C 的厚度与单次降雨量处理均呈对数相关,表达式分别为 $y = 1.87 + 0.17\log(x)$ ($R^2 = 0.34$, $P = 0.007$), $y = 1.74 + 0.21\log(x)$ ($R^2 = 0.13$, $P = 0.036$); 图 5)。

N-C 的叶绿素含量和单次降雨量处理呈线性正相关,表达式为 $y = 0.47x + 7.83$ ($R^2 = 0.22$, $P = 0.028$)。N-M 的 LB-EPS 含量和单次降雨量处理呈线性负相关,表达式为 $y = -16.97x + 131.45$ ($R^2 = 0.15$, $P = 0.061$)。N-M 和 A-C 的 TB-EPS 含量和单次降雨量处理分别呈线性负相关和指数相关,表达式分别为 $y = -23.30x + 287.44$ ($R^2 = 0.0234$, $P = 0.042$); $y = 169.82\exp(0.08x)$ ($R^2 = 0.502$, $P < 0.001$); 图 5)。

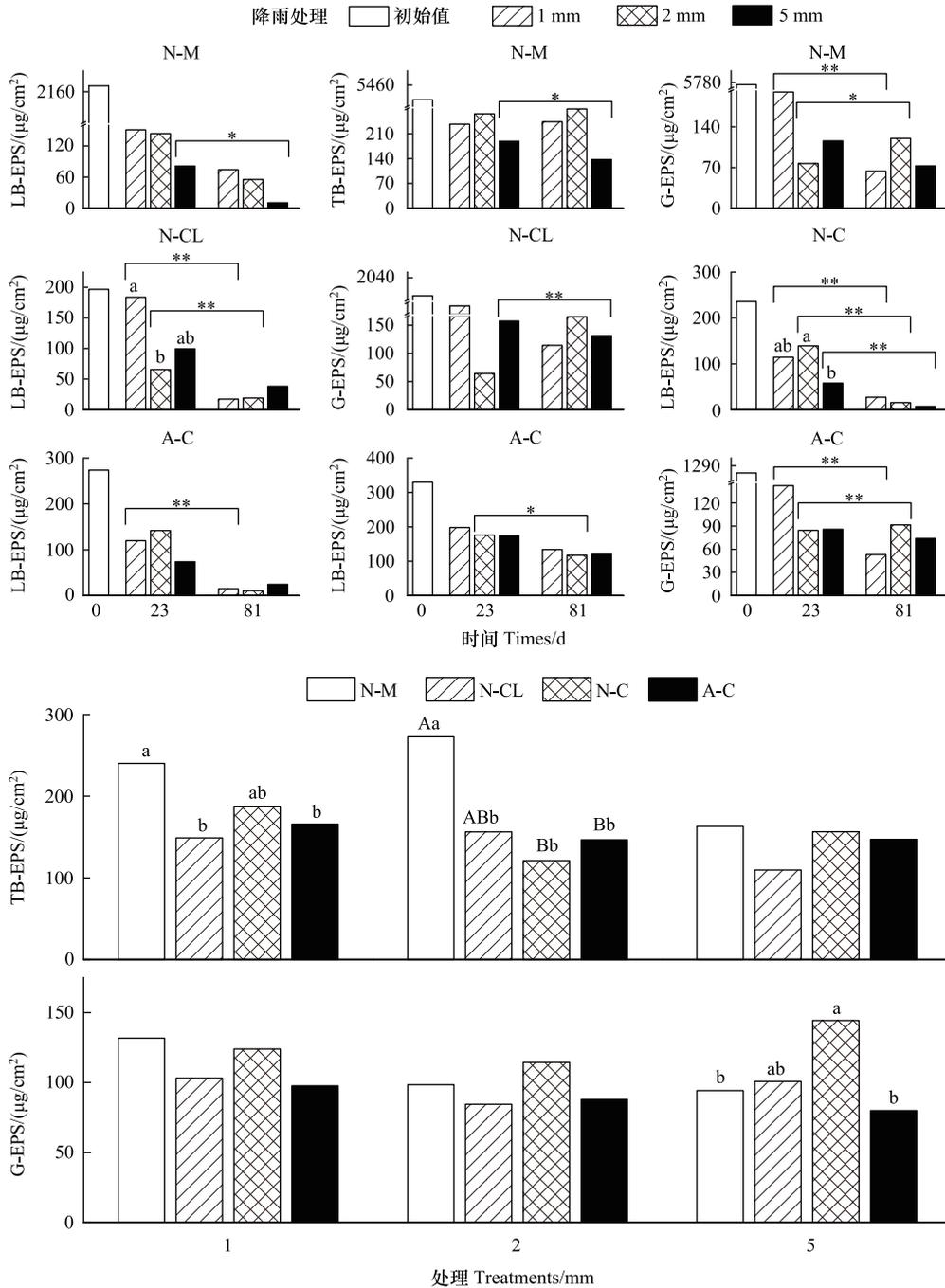


图 4 不同单次降雨量处理对不同类别人工生物土壤结皮三种多糖含量的影响

Fig.4 Effects of different single rainfall treatments on the content of three exopolysaccharide of different types 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

3 讨论

单次小降雨量(≤5 mm)的降雨事件在沙漠地区是最显著的特征之一。本研究发现单次降雨量人工 BSCs 属性的回归分析结果显示,盖度和厚度随着单次降雨量的增加先增加后减少,每 5 d 模拟单次降雨量为 2 mm 的处理下人工 BSCs 发育的最好。徐婷婷^[13]、吴丽等^[14]认为减水处理有利于人工 BCSs 生长,这与本研究的结果类似,即水分增加到一定程度时,人工 BCSs 的发育趋于平缓,甚至对其发育产生抑制。这是因为

表 1 人工 BSCs 类别和单次降雨量处理及二者交互作用对人工 BSCs 属性的影响

Table 1 Effects of artificial BSCs types and single rainfall treatments and their interaction on artificial BSCs properties

属性 Attributes	因子 Factors	F	P
盖度 Coverage/%	人工 BSCs 类别	8.111	<0.001
	单次降雨量处理	11.019	<0.001
	人工 BSCs 类别×单次降雨量处理	2.101	0.066
厚度 Thickness/mm	人工 BSCs 类别	15.633	<0.001
	单次降雨量处理	18.846	<0.001
	人工 BSCs 类别×降雨处理	1.417	—
叶绿素 a 含量 Chlorophyll a/($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	人工 BSCs 类别	4.852	0.004
	单次降雨量处理	1.131	—
	人工 BSCs 类别×单次降雨量处理	1.371	—
LB-EPS/($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	人工 BSCs 类别	0.616	—
	单次降雨量处理	2.412	0.098
	人工 BSCs 类别×单次降雨量处理	0.759	—
TB-EPS/($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	人工 BSCs 类别	9.532	<0.001
	单次降雨量处理	3.896	0.026
	人工 BSCs 类别×单次降雨量处理	2.227	0.053
G-EPS/($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	人工 BSCs 类别	2.173	0.1
	单次降雨量处理	0.792	—
	人工 BSCs 类别×单次降雨量处理	0.433	—

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; 显著性水平为 $P < 0.05$, “—”代表不显著

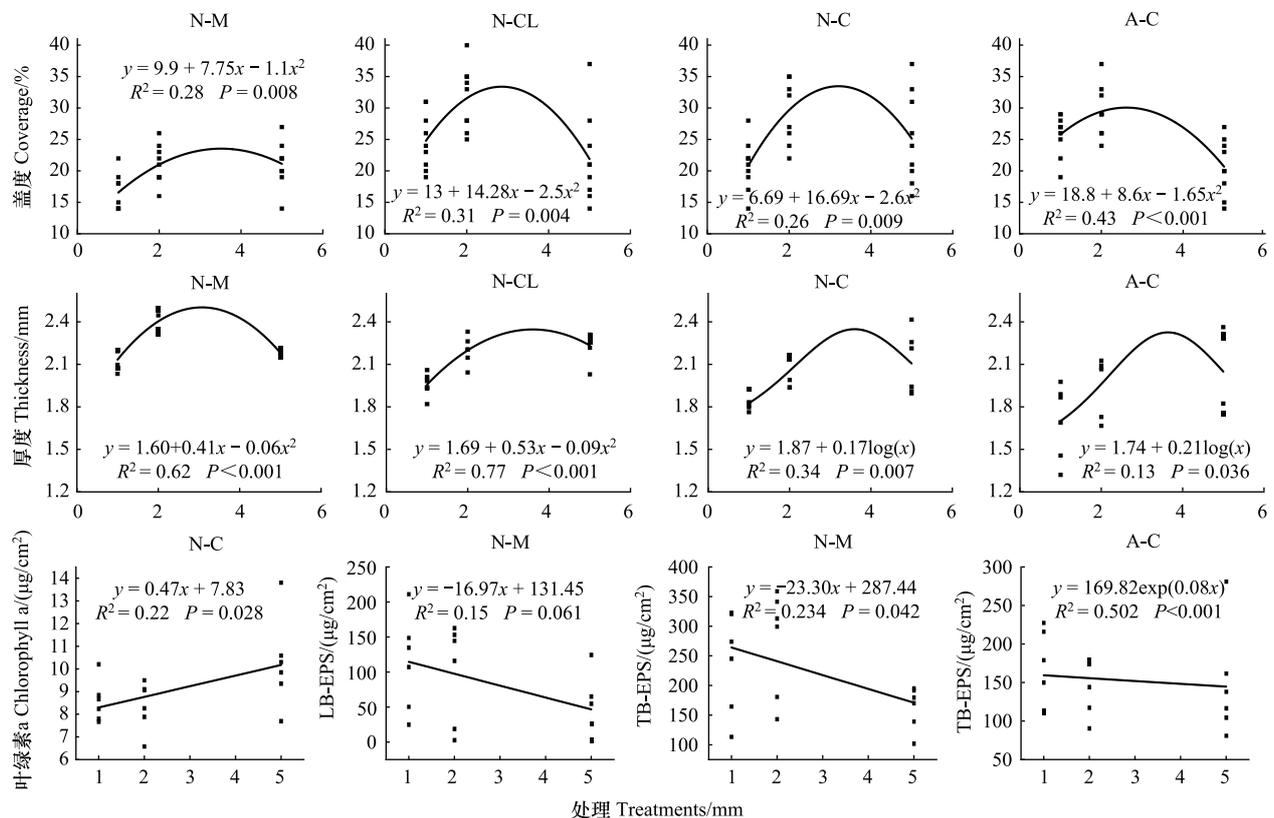


图 5 不同人工 BSCs 的盖度、厚度和三种多糖含量与不同单次降雨量处理的回归分析

Fig.5 Regression analysis of cover, thickness and three exopolysaccharide contents of different artificial BSCs and different single rainfall treatments

显著性水平为 $P < 0.05$

水是人工 BSCs 发育的限制因子,极度缺水时水分的补充有利于其发育,但在发育过程中人工 BSCs 已经适应了少水的环境,过量的水分补充反而会抑制自身生长^[13]。而单次降雨量处理对叶绿素 a 含量和多糖的回归分析结果显示,N-C 的叶绿素 a 含量与降水量显著正相关,这与张丙昌等^[12]的研究结果一致,但与徐婷婷^[13]的结果不同,徐婷婷的研究中生物量先增加后降低,而张丙昌等^[12]的研究和本研究可能是因为实验时间较短,人工 BSCs 发育程度较低,人工 BSCs 生物量仍然在积累阶段,因此单次降雨量的补充有利于生物量的增加;N-M 的 LB-EPS 和 TB-EPS 含量,以及 A-C 的 TB-EPS 含量与单次降雨量处理呈负相关。任欣欣等^[28]认为,多糖是细胞面临干旱时维持正常状态的稳定剂,而本研究持续添加水分抑制了人工 BSCs 多糖的分泌,因此单次降雨量的增加导致了多糖的减少。本研究期间虽然在 PVC 管外铺设草垫以防风固沙,但实验区外的少许沙子吹入导致了轻微的沙埋;并且本研究还受到了季节因素的影响,刘哲等^[29]的研究表明,自然条件下 BSCs 在冬、夏两季合成多糖更多,而在春秋两季则更多的进行自身生物量的积累,本研究多数时间在秋季进行,这也可能是本研究中随着培养时间增加多糖含量减少的原因。

本研究中所有类别均成功培养了人工 BSCs,但不同 BSCs 类别下培养的人工 BSCs 发育状况存在一定的差别。所有类别的人工 BSCs 盖度均高于初始盖度,除 N-M 处理外其他类别的人工 BSCs 厚度高于初始值。N-M 的盖度显著低于其他类别,这是因为藓类结皮是 BSCs 演替的后期,多发育在潮湿遮荫的环境中,需水量较高^[19]。本研究虽然持续添加了水分,但对于藓类结皮的需水量还远远不够,因此 N-M 发育程度较低。但 N-M 的厚度显著高于其他处理,从藓类植物的生物学特性可以解释这一现象,藓类植物结构包含了茎和叶两部分,且丝状假根深入泥土^[30],而蓝藻和地衣植物则是通过粘性菌体和其分泌物如多糖等胶结在一起^[31],因此 N-M 的厚度显著高于其他处理。N-CL 的盖度、厚度在 81 d 后明显呈下降趋势,且两次检测期间多糖含量不稳定,这是因为地衣结皮适合生长在阴暗水分蒸发量小的地区^[18]。蓝藻结皮作为 BSCs 发育的先锋,比其他类别的 BSCs 更能适应强干旱和光照的环境,本研究中 N-C 和 A-C 发育状况稳定,发育效果最理想。其中 A-C 在 1 mm 单次降雨量处理下盖度高于其他类别的人工 BSCs,且厚度在实验期间持续增加,其叶绿素 a 含量也保持在较高水平。而 N-C 采用的天然 BSCs 优势物种种类多,厚度、生物量和多糖含量异质性较大,在播撒时难以保证处理间无差异,因此 A-C 处理最适合人工 BSCs 的培养。

此外,人工 BSCs 类别和单次降雨量处理的交互作用会在一定程度上影响人工 BSCs 的盖度和 TB-EPS 含量。在人工 BSCs 类别和单次降雨量处理交互作用下,发现 N-CL 和 N-C 的盖度在 2 mm 的单次降雨量处理下最高,N-M 的 TB-EPS 含量在 2 mm 的单次降雨量处理下最高。而对于人工 BSCs 的其他属性,交互作用并不显著,可能是培养时间较短,而季节的转变也会影响人工 BSCs 的发育。

盖度、厚度、叶绿素和多糖含量等指标能够直观的判断 BSCs 发育状况^[32-33],因此,这些指标也常被用于评估人工 BSCs 的拓殖和发育情况,如肖波等^[34]以及饶本强等^[35]使用这四个指标评估了人工 BSCs 发育情况,这是因为盖度对生态系统功能如抗风蚀等起着关键作用^[36],盖度越大抗风蚀能力越强;厚度是地表稳定程度的直观指标^[37-38],厚度越厚地表稳定程度越高;叶绿素 a 含量客观表征了生物数量的多少,生物量的高低也直观反映其抗风蚀和固碳的功能^[39];多糖能够黏结土壤颗粒和沙砾,提高土壤抗侵蚀性能^[40],是 BSCs 形成的重要物质。在人工 BSCs 短期培养期间,尽管以上的四个指标能够基本反映其发育状况,但人工 BSCs 抗蚀性、微生物丰度和多样性以及养分含量等是判断其发育情况更深层次的指标,因此在人工 BSCs 的长期实验过程中,增加这些指标来判断人工 BSCs 发育情况是必要的。

4 结论

本研究结果显示,模拟单次降雨量 2 mm 处理下人工 BSCs 发育最好,因此在人工 BSCs 野外应用过程当中,若进行人工补充水分,应合理控制单次补水量。相较藓类和地衣结皮,蓝藻结皮培养早期拓殖速度更快且发育程度更好,更适合在降雨量少的区域进行人工 BSCs 培养。此外,与使用天然蓝藻结皮碎片相比,使用人工蓝藻结皮碎片培养的人工 BSCs 效果相近甚至更优,并且取样时对当地环境的破坏小,因此更适合作为大

规模生态恢复人工 BSCs 培养的材料。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [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] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 苏洁琼, 高艳红. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Bowker M A, Antoninka A J. Rapid ex situ culture of N-fixing soil lichens and biocrusts is enhanced by complementarity. *Plant and Soil*, 2016, 408(1): 415-428.
- [8] Bu C F, Li R X, Wang C, Bowker M A. Successful field cultivation of moss biocrusts on disturbed soil surfaces in the short term. *Plant and Soil*, 2018, 429(1): 227-240.
- [9] 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. *土壤学报*, 2021, 58(5): 1123-1131.
- [10] Rodriguez-Caballero E, Belnap J, Büdel B, Crutzen P J, Andreae M O, Pöschl U, Weber B. Dryland photoautotrophic soil surface communities endangered by global change. *Nature Geoscience*, 2018, 11(3): 185-189.
- [11] 黄萌田, 周佰铨, 翟盘茂. 极端天气气候事件变化对荒漠化、土地退化和粮食安全的影响. *气候变化研究进展*, 2020, 16(1): 17-27.
- [12] 张丙昌, 王敬竹, 张元明, 邵华. 水分对具鞘微鞘藻构建人工藻结皮的作用. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 535-540.
- [13] 徐婷婷. 松嫩草原藻结皮拓殖演替研究. [D]. 长春: 东北师范大学, 2016.
- [14] 吴丽, 杨红, 兰书斌, 张德禄, 胡春香. 干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1173-1179.
- [15] 张宝琦. 生物结皮覆盖对坡面产流产沙过程的影响. [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [16] 杨利云. 甘肃民勤半荒漠地区人工藻结皮的固沙效果研究. [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [17] Rao B Q, Liu Y D, Wang W B, Hu C X, Li D H, Lan S B. Influence of dew on biomass and photosystem II activity of cyanobacterial crusts in the Hopq Desert, northwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(12): 2387-2393.
- [18] Lalley J S, Viles H A. Terricolous lichens in the northern Namib Desert of Namibia: distribution and community composition. *The Lichenologist*, 2005, 37(1): 77-91.
- [19] Zhang B C, Kong W D, Wu N, Zhang Y M. Bacterial diversity and community along the succession of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern China. *Journal of Basic Microbiology*, 2016, 56(6): 670-679.
- [20] 李新荣. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [21] 王世冬, 白学良, 雍世鹏. 沙坡头地区苔藓植物区系初步研究. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 244-249.
- [22] 徐杰, 白学良, 杨持, 张萍. 固定沙丘结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 545-551.
- [23] 胡春香, 刘永定, 宋立荣. 宁夏沙坡头地区藻类及其分布. *水生生物学报*, 1999, 23(5): 443-448.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Park C-H, Li X R, Zhao Y, Jia R L, Hur J S. Rapid development of cyanobacterial crust in the field for combating desertification. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0179903.
- [28] 任欣欣, 姜昊, 冷欣, 安树青. 蓝藻胞外多糖的生态学意义及其工业应用. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 762-771.
- [29] 刘哲, 叶兴旺, 王吉平, 程永韬, 钱隆, 肖敬尚, 吴丽. 生物结皮胞外多糖理化特性及菌群结构的季节动态. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1801-1809.
- [30] 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. *西北林学院学报*, 2014, 29(6): 66-71.
- [31] 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. *科学通报*, 2005, 50(1): 42-47.
- [32] 赵允格, 徐冯楠, 许明祥. 黄土丘陵藓结皮生物量测定方法及其随发育年限的变化. *西北植物学报*, 2008, 28(6): 1228-1232.
- [33] Bowker M A, Johnson N C, Belnap J, Koch G W. Short-term monitoring of aridland lichen cover and biomass using photography and fatty acids. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6): 869-878.
- [34] 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. *草地学报*, 2008, 16(1): 28-33.
- [35] 饶本强, 吴沛沛, Alain DAUTA, 李敦海, 刘永定. 温室条件下 UV-B 辐射对蓝藻结皮生长和超微结构的影响. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 649-657.
- [36] Bowker M A, Maestre F T, Mau R L. Diversity and patch-size distributions of biological soil crusts regulate dryland ecosystem multifunctionality. *Ecosystems*, 2013, 16(6): 923-933.
- [37] 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.
- [38] Zhang Y M. The microstructure and formation of biological soil crusts in their early developmental stage. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(2): 117-121.
- [39] 苏延桂, 李新荣, 张志山, 陈应武, 鲁艳. 干旱人工植被区藻结皮光合固碳的时间效应研究. *土壤学报*, 2011, 48(3): 570-577.
- [40] 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.