

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.

水分和养分供应对凹凸棒石复配苔藓结皮生长的影响

陶玲^{1,2},任汉儒^{1,2},周怡蕾¹,任珺^{1,2}

(1.兰州交通大学 甘肃省黄河水环境重点实验室/环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃瀚兴环保科技有限公司,甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了评价生物固沙材料在不同水分和养分供应条件下的应用效果,对沙漠苔藓结皮和含凹凸棒石固沙材料的叶绿素和生长进行了研究。结果表明:人工培养苔藓结皮与固沙材料的最佳配比为1:1,由接种在沙面上的生物固沙材料的叶绿素a含量、强度和厚度决定。凹凸棒石显著提高了接种生物固沙材料的强度、叶绿素a含量和厚度。3种养分供应方式和3种模拟干旱区的间歇供水方式均能显著提高人工生物型结皮的厚度和强度。50%的养分处理是最佳的养分供应方式。接种生物固沙材料在隔天供水条件下具有较高的厚度和强度。较短的供水和养分供应间歇有利于沙漠生物结皮的生存和繁殖。

关键词: 生物结皮;高吸水性树脂;凹凸棒石;固沙材料;叶绿素a

文章编号: 1000-694X(2022)06-288-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00047

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

0 引言

沙漠生物结皮具有特殊的抗旱机制,对有限的供水会产生快速反应。它们通常在沙漠生态系统演替中发挥重要作用^[1-4]。沙漠生物结皮对沙漠中的关键生态系统功能起重要作用,并在沙漠生态系统中起到了开拓和定植作用,可增强沙丘的抗蚀性^[5],影响地表入渗,增加保水性^[6-7],促进营养供应,减少肥力损失^[8-9],改善土壤结构^[10-11],影响维管植物的出苗和存活^[12]。沙漠生物结皮自然恢复到稳定演替状态可能需要几十年甚至几千年,尽管荒漠化土地中沙漠生物结皮的自我恢复一直在发生^[13],但维管植物的定植通常发生在生物结皮改善表土环境之后,这可能需要很长时间,沙漠生物结皮从扰动中的自然恢复因地而异^[14]。因此,沙漠生物结皮的快速人工繁殖对沙漠生态系统的恢复具有重要的现实意义^[15-16]。

在沙漠生物结皮的人工培育和繁殖过程中,有利于生长的环境条件通常有助于快速形成生物结

皮^[17-22]。因此,这些条件可用于环境因素多变且有时苛刻的区域^[23-24]。已经有一些沙漠生物结皮的人工繁殖方法出现并证实了其适用性^[25]。因此,将人工繁殖方法发展到更广泛和更大规模的现场应用具有现实意义。

新型固沙材料是一种由高分子化合物制成的高吸水性材料,具有较强的亲水性基团和适度的交联功能,是一种吸水率高的新型功能材料,广泛应用于农业、园艺以及环境保护和荒漠化防治等方面^[26]。近年来,用有机和无机材料合成的高吸水性树脂受到了广泛关注^[3]。凹凸棒石是一种具有链状结构的镁铝硅酸盐黏土矿物。该黏土表面存在大量亲水性Si-OH,可与亲水性乙烯基单体发生接枝共聚反应,与丙烯酰胺双单体和吸水性强的2-丙烯酰胺基-2-甲基丙烷磺酸进行接枝共聚,不仅可以提高吸水性和保水性,而且是一种低成本材料^[27-28]。

中国沙漠化土地面积263万km²。在过去的几十年里,为应对沙漠化作出了巨大的努力;然而,只有一小部分沙漠化土地得到了改善。荒漠化仍然

收稿日期:2022-01-04; 改回日期:2022-03-23

资助项目:国家自然科学基金项目(31560234)

作者简介:陶玲(1970—),女,甘肃白银人,教授,从事土壤污染环境修复工作。E-mail: taoling@mail.lzjtu.cn

通信作者:任珺(E-mail: renjun@mail.lzjtu.cn)

是阻碍中国北方和西北地区发展的最关键问题。研究者已开发了几种苔藓生物结皮的人工培养方法,证实了快速人工接种生物结皮的技术是可行的^[29-30]。在不同的环境条件下,生物结皮的繁殖往往表现出一些特殊的生长反应。本研究将沙漠生物结皮与添加凹凸棒石土的固沙材料在不同配比下应用于沙土表面,为了评价生物固沙材料应用于促进荒漠生物结皮建立的可行性,研究了不同水分供应和营养条件对生物固沙材料的叶绿素a和生长特性的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

2019年4月,在中国北方腾格里沙漠东南缘的中国科学院沙坡头沙漠研究试验站(37°32'N, 105°02'E)收集了沙漠苔藓结皮。该地区的土壤疏松、贫瘠,由含水量为2%—3%的沙粒组成。苔藓结皮主要由银苔藓(*Bryum argenteum*)和尖叶对齿藓(*Didymodon constrictus*)组成^[31]。将新鲜苔藓结皮放入密封的塑料袋中带回实验室,立即在25℃温度和120 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强和保持湿润的条件下在光培养箱中培养7 d。用稀盐酸和氢氧化钠溶液调节培养基的pH值至7.5。光暗循环为12 h:12 h。将0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 6-苄基氨基嘌呤(2,4-D)和40 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 蔗糖加入培养基中,在30℃的培养箱中生长60 d。培养的苔藓结皮经过风干粉碎后用于制备生物固沙材料。

将一定量的氢氧化钠溶解在烧杯中的10 mL蒸馏水中。在氢氧化钠溶液中缓慢加入15 mL丙烯酸,在冰水浴中中和,中和度为80%,然后加入一定量的丙烯酰胺,以丙烯酸和丙烯酰胺的质量比15:4制备单体溶液。取10 g凹凸棒石粉末,溶解于30 mL蒸馏水中,制备凹凸棒石胶体。此外,交联剂N,N'-亚甲基双丙烯酰胺的用量为0.05%,引发剂过硫酸钾和亚硫酸氢钠(过硫酸钾与亚硫酸氢钠的摩尔比为1:1)的用量为0.6%,溶解于10 mL蒸馏水中,以制备引发剂交联剂溶液。将水浴温度设置为80℃,直到温度达到规定值,向单体溶液中加入凹凸棒石胶体和交联剂溶液,然后进行水浴反应。反应8 h,将复合材料置于烘箱中,并在90℃下干燥直至完全干燥。将干燥材料粉碎至100目,并以1:3、1:2、1:1、0:1、2:1、3:1的比例与苔藓结皮粉末混合

均匀,得到6种生物固沙材料,编号为BSM13、BSM12、BSM11、BSM10、BSM21和BSM31。

1.2 实验

将6种生物固沙材料分别以400 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的比例均匀地铺在直径为15 cm、沙子厚度为1 cm的培养皿中,放置在光照强度为120 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、明暗周期为12 h:12 h的人工气候培养箱中。在30℃温度下培养20 d。在试验过程中,每12 h喷水1次,以补充生物固沙材料和沙子的水分。

选择BSM11材料在不同水分和养分供应条件下进行试验。水分梯度为每1、3、6 d供水1次(模拟湿润、半湿润、半干旱环境)。每个水分梯度设置3个营养梯度,营养液与蒸馏水的体积比为1:0、1:1、0:1。溶液每7 d喷洒1次。叶绿素a每20 d测定1次。培养80 d后,测定生物固沙材料的厚度、pH值和抗压强度。

1.3 叶绿素a与生长性状的测定

用乙醇和碳酸钙在加冰的研钵中研磨2 g新鲜样品,然后在黑暗中用95%(v/v)冷却的乙醇提取,并在4℃下保持过夜。离心样品(4 000 $\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$, 10 min),然后在665、649、470 nm处测量过滤提取物的叶绿素a含量。使用游标卡尺测量厚度。使用推拉力计进行抗压强度试验。将待测外壳的裂纹判定为失效,并根据应力峰值计算抗压强度。

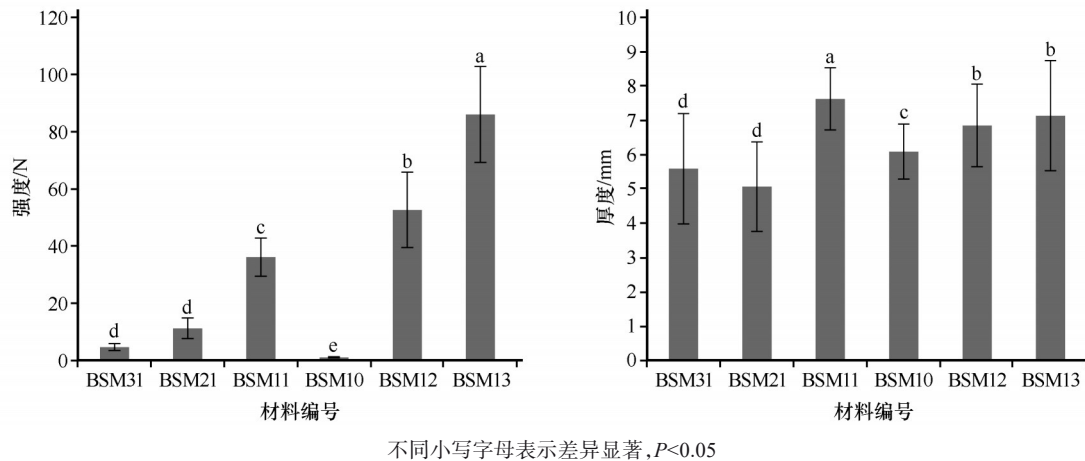
2 结果与分析

2.1 生长特性

单因素方差分析表明,6种生物型固沙材料的生长厚度和抗压强度表现出显著差异。BSM11的厚度显著高于其他5种材料,BSM31和BSM21之间没有显著差异,BSM10的厚度显著高于BSM31和BSM21,低于BSM12和BSM13(图1)。凹凸棒石可以提高BSMs的抗压强度。

2.2 不同培养时间条件下的叶绿素a含量

不同的生物固沙材料、培养时间及其交互作用显著影响叶绿素a含量(表1)。6种生物固沙材料在4个培养时期叶绿素a含量差异显著。20 d时,BSM31、BSM21、BSM10、BSM12和BSM13的叶绿素a含量无显著差异,均显著低于BSM11。40 d时,



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$

图 1 生物固沙材料的强度和厚度

Fig.1 The strength and thickness of biological sand-fixing materials

表 1 6 种生物固沙材料和 4 种培养时间条件下叶绿素 a 的双因素方差分析

Table 1 Two-factor analysis of variance for chlorophyll-a of six biological sand-fixing materials and four culture times

变异来源	df	F	P
生物型固沙材料	2	129.8	<0.001
接种时间	2	69.40	<0.001
交互作用	4	167.7	<0.001

BSM11、BSM12 和 BSM13 之间以及 BSM31、BSM21 和 BSM10 之间的叶绿素 a 存在不显著差异,

前 3 种材料显著高于后 3 种材料。60 d 时, BSM12 和 BSM13 的叶绿素 a 含量显著高于 BSM31、BSM21 和 BSM10, 低于 BSM11, 且 BSM10、BSM31 和 BSM21 之间不存在显著差异。接种 80 d 后, BSM10、BSM12、BSM13 和 BSM21 之间没有显著差异, 且显著高于 BSM31, 低于 BSM11。与其他生物固沙材料相比, BSM11 的叶绿素 a 含量始终最大。未添加固沙材料的 BSM10 在所有培养时间的叶绿素 a 含量均最低 (表 2)。人工培养生物结皮与固沙材料按 1:1 的比例混合使用时, 在沙面上表现出更强的存活能力和更有效的光合作用。

表 2 生物固沙材料应用后叶绿素 a 含量

Table 2 The chlorophyll-a content of biological sand-fixing materials mixed with cultural moss crust and sand-fixing material in six ratios for application after 80 days inoculating period

材料编号	培养天数/d				F 值
	20	40	60	80	
BSM31	0.180±0.003 ^{Ab}	0.184±0.004 ^{Ab}	0.196±0.004 ^{Ac}	0.127±0.068 ^{Bc}	8.24*
BSM21	0.188±0.001 ^b	0.194±0.001 ^b	0.202±0.001 ^c	0.213±0.001 ^b	3.45
BSM11	0.203±0.002 ^{Ba}	0.218±0.001 ^{ABa}	0.247±0.006 ^{Ba}	0.280±0.008 ^{Aa}	8.69*
BSM10	0.164±0.005 ^{Bb}	0.193±0.008 ^{Ab}	0.202±0.001 ^{Ac}	0.204±0.001 ^{Ab}	8.56*
BSM12	0.195±0.003 ^{Cb}	0.214±0.001 ^{Ba}	0.218±0.005 ^{ABb}	0.228±0.001 ^{Ab}	9.78**
BSM13	0.191±0.002 ^{Cb}	0.208±0.001 ^{Ba}	0.215±0.001 ^{Bb}	0.225±0.001 ^{Ab}	9.32*
F 值	6.98*	10.24**	9.34**	8.56*	

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; 不同大写字母表示不同培养天数间差异极显著, $P < 0.05$; 不同小写字母表示不同固沙材料间差异显著, $P < 0.05$ 。

BSM31、BSM11、BSM10、BSM12 和 BSM13 处理的叶绿素 a 含量在所有 4 个培养时间中均表现出显著差异。BSM21 的叶绿素 a 含量在 80 d 内没有出现显著变化。对于 BSM31, 在 60 d 内没有变化, 80 d 的叶绿素 a 含量显著低于前 3 个培养时间,

BSM11 出现相反的情况, BSM11 的叶绿素 a 含量在 80 d 的培养时间达到最大值。对于 BSM10, 40、60 d 和 80 d 的叶绿素 a 含量没有表现出显著差异, 并且它们显著高于 20 d。对于 BSM12 和 BSM13, 40 d 和 60 d 的叶绿素 a 含量显著高于 20 d, 低于 80 d, 并且

两者都存在显著差异(表2)。叶绿素 a 含量可以反映人工生物固沙材料的存活和生长能力,在 80 d 的接种期内,添加更多凹凸棒石可以明显提高生物固沙材料的生存能力。

2.3 不同水分和养分供应条件下的叶绿素 a 含量

在所有 4 个培养期,通过 BSM11 的双因素方差分析,间歇式供水、营养供应及其交互作用显著影响叶绿素 a 含量(表3)。在 20 d 的培养期,100% 营养条件下,间歇供水对 BSM11 的叶绿素 a 含量没有显著影响。50% 营养条件下,3 d 和 1 d 的叶绿素 a 含量没有表现出差异,并且显著高于 6 d 间歇供水;在 3 d 间歇供水条件下,50% 营养处理显著提高了叶绿素 a 含量。在 40 d 培养期,在 50% 营养条件下,间歇供水对叶绿素 a 含量没有显著影响,1 d 间歇供水条件下的叶绿素 a 含量始终最高;在 3 d 间歇供水条件下,营养供应处理对叶绿素 a 含量没有显著影响。在 60 d 培养期,3 d 间歇供水条件下,3 个营养处理的叶绿素 a 含量显著高于 6 d 间歇供水,而低于 1 d 间歇供水处理;50% 和 100% 营养条件下的 BSM11 叶绿素 a 含量没有表现出差异,均显著高于蒸馏水处理。在 80 d 培养期,1 d 间歇供水条件下的叶绿素 a 含量显著高于 6 d 间歇供水处理,蒸馏水处

表 3 不同间歇供水和营养条件下 BSM11 叶绿素 a 含量方差的双因素分析

Table 3 Two-factor analysis of variance of chlorophyll-a content of BSM11 for inoculation after 80 days under interval water supply and nutrient conditions

培养天数/d	变异来源	df	F 值	P
20	水分	2	12.85	<0.001
	营养	2	29.47	<0.001
	水分×营养	4	16.79	<0.001
40	水分	2	19.86	<0.001
	营养	2	45.62	<0.001
	水分×营养	4	17.97	<0.001
60	水分	2	36.25	<0.001
	营养	2	17.89	<0.001
	水分×营养	4	123.45	<0.001
80	水分	2	42.35	<0.001
	营养	2	51.26	<0.001
	水分×营养	4	15.68	<0.001

理 3 d 和 6 d 之间不存在显著差异;在 50% 和 100% 营养条件下,3 d 和 1 d 间歇供水对 BSM11 的叶绿素 a 含量没有显著影响。在持续 80 d 的接种期内,50% 的营养处理和 1 d 的间歇供水始终促进了生物固沙材料叶绿素 a 含量的增加(表4)。

表 4 不同间歇供水和营养供应条件下 BSM11 的叶绿素 a 含量

Table 4 The chlorophyll-a content of BSM11 under interval water supply and nutrient conditions

培养天数/d	营养处理	间歇供水天数/d			F 值
		6	3	1	
20	蒸馏水	0.177±0.002 ^{Aa}	0.192±0.001 ^{Ba}	0.204±0.001 ^{Ba}	12.67 ^{**}
	50% 营养	0.191±0.001 ^{Ab}	0.208±0.001 ^{Ba}	0.224±0.001 ^{Bb}	16.28 ^{**}
	100% 营养	0.172±0.005 ^a	0.187±0.001 ^b	0.193±0.001 ^a	2.45
	F 值	8.35 ^{**}	9.82 ^{***}	12.56 ^{***}	
40	蒸馏水	0.166±0.001 ^A	0.174±0.001 ^B	0.181±0.001 ^{Bc}	7.35 [*]
	50% 营养	0.171±0.001	0.178±0.001	0.186±0.001	3.14
	100% 营养	0.169±0.001 ^A	0.174±0.001 ^A	0.183±0.001 ^B	6.31 [*]
	F 值	2.98	2.78	3.19	
60	蒸馏水	0.158±0.007 ^{Aa}	0.165±0.001 ^{Ba}	0.182±0.001 ^{Ca}	8.25 ^{**}
	50% 营养	0.175±0.001 ^{Ab}	0.187±0.001 ^{Bb}	0.196±0.001 ^{Cb}	7.96 [*]
	100% 营养	0.174±0.001 ^{Ab}	0.185±0.002 ^{Bb}	0.190±0.001 ^{Cb}	9.16 ^{**}
	F 值	9.24 ^{**}	7.36 [*]	8.25 ^{**}	
80	蒸馏水	0.162±0.007 ^{Aa}	0.169±0.001 ^{Aa}	0.183±0.001 ^{Ba}	8.25 ^{**}
	50% 营养	0.179±0.001 ^{Ab}	0.196±0.001 ^{Bb}	0.206±0.001 ^{Bb}	7.96 [*]
	100% 营养	0.180±0.001 ^{Ab}	0.195±0.002 ^{Bb}	0.198±0.001 ^{Bb}	9.16 ^{**}
	F 值	9.24 ^{**}	7.36 [*]	8.25 ^{**}	

*,*P*<0.05;**,*P*<0.01;不同大写字母表示不同间歇供水天数间差异极显著,*P*<0.05;不同小写字母表示不同营养处理间差异显著,*P*<0.05。

2.4 不同水分和养分供应条件下的生长性状

根据双因素方差分析结果,间歇供水、营养供应及其交互作用对BSM11的厚度和抗压强度有显著影响(表5)。

表5 水分和营养条件对BSM11发育影响的双因素方差分析
Table 5 Two-factor analysis of variance in the effects of moisture and nutrient conditions on the development of BSM11

指标	变异来源	df	F值	P
厚度	水分	2	30.23	<0.001
	营养	2	68.15	<0.001
	水分×营养	4	49.94	<0.001
抗压强度	水分	2	17.24	<0.001
	营养	2	2.32	>0.05
	水分×营养	4	11.13	<0.01

单因素方差分析结果表明,蒸馏水处理的6 d和3 d间歇供水处理的厚度没有显著差异,但它们都显著低于1 d间歇供水处理。在50%和100%营养处理下,1 d和3 d间歇供水处理的厚度没有表现出显著差异,并且它们都显著高于6 d间歇供水处理。营养供应显著促进了厚度的增加,50%和100%营养处理之间没有显著差异。1 d间歇式供水和营养处理均能促进BSM11的厚度生长。在蒸馏水和100%营养条件下,间歇供水对BSM11的抗压强度有显著影响。在50%营养处理下,BSM11在1 d和3 d间歇供水条件下的抗压强度差异不显著,均显著高于6 d间歇供水。在6 d间歇供水处理时,各营养供应处理之间不存在显著差异。在3 d和1 d间歇供水的情况下,抗压强度显著差异,50%营养处理最好(表6)。1 d间歇供水处理和50%营养液处理能明显提高BSM11的抗压强度。

表6 不同营养处理和间歇供水条件下BSM11的生长特性
Table 6 The growth traits of BSM11 under different nutrient treatments and interval water supply

指标	营养处理	供水间歇天数/d			F值
		6	3	1	
厚度/mm	蒸馏水	7.21±1.35 ^A	7.26±2.05 ^{Aa}	8.12±1.26 ^B	8.25 ^{**}
	50% 营养	7.75±0.93 ^A	8.36±1.03 ^{Bb}	8.64±1.33 ^B	7.96 [*]
	100% 营养	7.41±1.22 ^A	8.18±0.95 ^{Bb}	8.23±2.14 ^B	9.16 ^{**}
	F值	2.24	7.36 [*]	2.25	
抗压强度/N	蒸馏水	37.31±6.36 ^A	37.25±2.05 ^{Aa}	38.65±3.25 ^{Bab}	1.89
	50% 营养	37.45±5.36 ^A	40.23±6.13 ^{Bb}	41.26±8.65 ^{Ba}	7.96 [*]
	100% 营养	36.46±1.22 ^A	36.56±2.15 ^{Ba}	35.26±12.14 ^{Bb}	2.16
	F值	2.24	7.36 [*]	6.32 [*]	

*,P<0.05;** ,P<0.01;不同大写字母表示不同间歇供水天数间差异极显著,P<0.05;不同小写字母表示不同营养处理间差异显著,P<0.05。

3 结论与讨论

人工生物结皮的质量通常通过叶绿素a含量、厚度和抗压强度进行评估^[32]。本研究以叶绿素a为指标,探索生物固沙材料的最佳配比。不同配比的生物型固沙材料在沙表面接种后叶绿素a含量差异显著,人工培养苔藓结皮与固沙材料配比为1:1时的存活和生长效果最好。根据叶绿素a的含量,凹凸棒石添加显著提高了生物型固沙材料的存活能力和有效的光合作用。

营养处理和间歇供水均能显著影响接种的生物型固沙材料的厚度和强度,营养供应对生物结皮

的存活和发育具有积极影响^[33]。人工培养或人工固沙实验中,适当增加养分供应能显著改善接种的生物型固沙材料的存活和生长状况。本研究中50%的营养供应处理方式可以明显促进人工沙漠接种的生物型沙漠结皮的厚度和强度,是较为理想的养分供应方式。沙漠地区降水一般为间歇性的,一定的降水强度和频度是影响结皮存活和生长的决定性因素^[34-35],本项研究中实施的1 d间歇供水明显改善生物型固沙材料的生长状况,显著提高了接种的生物型固沙材料的厚度和强度,充足和频繁的供水可能是人工接种生物结皮的最关键因素。在生产实践中可以采取适度的人工降水培育措施,以

增强人工沙漠结皮的适应能力和存活度,为结皮的自然生长和繁殖创造条件。

参考文献:

- [1] Antoninka A, Bowker M A, Reed S C, et al. Production of greenhouse-grown biocrust mosses and associated cyanobacteria to rehabilitate dryland soil function[J]. *Restoration Ecology*, 2016, 24(3): 324–335.
- [2] Chiquoine L P, Abella S R, Bowker M A. Rapidly restoring biological soil crusts and ecosystem functions in a severely disturbed desert ecosystem[J]. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2016, 26(4): 1260–1272.
- [3] Kidron G J. The role of crust thickness in runoff generation from microbiotic crusts[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(7): 1783–1792.
- [4] Zheng Y P, Xu M, Zhao J C, et al. Effects of inoculated *Microcoleus vaginatus* on the structure and function of biological soil crusts of desert[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(4): 473–480.
- [5] Zhang B C, Zhou X B, Zhang Y M. Responses of microbial activities and soil physical-chemical properties to the successional process of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(1): 101–109.
- [6] Zhang J, Zhang Y M. Diurnal variations of chlorophyll fluorescence and CO₂ exchange of biological soil crusts in different successional stages in the Gurbantunggut Desert of northwestern China[J]. *Ecological Research*, 2014, 29(2): 289–298.
- [7] Zaady E, Katra I, Yizhaq H, et al. Inferring the impact of rainfall gradient on biocrusts' developmental stage and thus on soil physical structures in sand dunes[J]. *Aeolian Research*, 2014, 13: 81–89.
- [8] Zhou X B, Zhang Y M, Yin B F. Divergence in physiological responses between cyanobacterial and lichen crusts to a gradient of simulated nitrogen deposition[J]. *Plant and Soil*, 2016, 399(1): 121–134.
- [9] Sinsabaugh R L, Ebelnap J, Erudgers J, et al. Soil microbial responses to nitrogen addition in arid ecosystems[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 819.
- [10] Zheng J L, Peng C R, Li H, et al. The role of non-rainfall water on physiological activation in desert biological soil crusts[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 790–799.
- [11] Strong C L, Bullard J E, Burford M A, et al. Response of cyanobacterial soil crusts to moisture and nutrient availability[J]. *Catena*, 2013, 109: 195–202.
- [12] Chen L, Xie Z, Hu Z, et al. Chenet al. Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67: 521–527.
- [13] Chock T, Antoninka A J, Faist A M, et al. Responses of biological soil crusts to rehabilitation strategies[J]. *Journal of Arid Environments*, 2019, 163: 77–85.
- [14] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Effects of drought and salt stresses on man-made cyanobacterial crusts[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(6): 381–386.
- [15] 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.
- [16] Felde V J M N L, Chamizo S, Felix-Henningsen P, et al. What stabilizes biological soil crusts in the Negev Desert? [J]. *Plant and Soil*, 2018, 429(1/2): 9–18.
- [17] Hui R, Zhao R M, Liu L V, et al. Changes in winter snow depth affects photosynthesis and physiological characteristics of biological soil crusts in the Tengger Desert [J]. *Photosynthetica*, 2018, 56(4): 1304–1312.
- [18] 陶玲, 杜昊霖, 张文杰, 等. 苔藓结皮复配凹凸棒基高吸水性固沙材料的生理特性[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 823–828.
- [19] Park C H, Li X R, Jia R L, et al. Combined application of cyanobacteria with soil fixing chemicals for rapid induction of biological soil crust formation[J]. *Arid Land Research and Management*, 2017, 31(1): 81–93.
- [20] Zhao R M, Hui R, Wang Z R, et al. Winter snowfall can have a positive effect on photosynthetic carbon fixation and biomass accumulation of biological soil crusts from the Gurbantunggut Desert, China[J]. *Ecological Research*, 2016, 31(2): 251–262.
- [21] Hui R, Li X R, Chen C Y, et al. Responses of photosynthetic properties and chloroplast ultrastructure of *Bryum argenteum* from a desert biological soil crust to elevated ultraviolet-bradiation[J]. *Physiologia Plantarum*, 2013, 147(4): 489–501.
- [22] Wang W B, Wang Y C, Shu X, et al. Physiological responses of soil crust-forming cyanobacteria to diurnal temperature variation[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2013, 53(1): 72–80.
- [23] Tao L, Ren H R, Ren J. Assessment of cultured media for desert moss crust by physiological responses[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2021, 61(2): 157–164.
- [24] Bu C F, Wang C, Yang Y L, et al. Physiological responses of artificial moss biocrusts to dehydration-rehydration process and heat stress on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(3): 419–431.
- [25] Szyja M, Büdel B, Colesie C. Ecophysiological characterization of early successional biological soil crusts in heavily human-impacted areas[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(7): 1919–1931.
- [26] Rao B Q, Liu Y D, Lan S B, et al. Effects of sand burial stress on the early developments of cyanobacterial crusts in the field [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 48: 48–55.
- [27] Ma G F, Ran F T, Feng E K, et al. Preparation and properties of an organic-inorganic composite superabsorbent based on attapulgite [J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(14): 1865–1874.
- [28] Shi S L, Zhang H R, Huang C, et al. Purification of lignocellulose hydrolysate by Org-Attapulgite (Divinyl Benzene-Styrene-Methyl acrylate) composite adsorbent[J]. *Bioresources*, 2016,

- 11(4):8664–8675.
- [29] 陶玲,曹田,吕莹,等.生物型凹凸棒基高分子固沙材料的复配效果[J].中国沙漠,2017,37(2):276–280.
- [30] Wu Y W, Rao B Q, Wu P P, et al. Development of artificially induced biological soil crusts in fields and their effects on top soil [J]. Plant and Soil, 2013, 370(1/2): 115–124.
- [31] 张甜,贾荣亮,高艳红,等.沙坡头人工固沙植被演替过程中主要结皮生物生态位和种间关联变化特征[J].中国沙漠, 2021, 41(4): 100–108.
- [32] 吴丽,陈晓国,张高科,等.人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究[J].环境科学,2014,35(3):1138–1143.
- [33] Wang J, Bao J T, Su J Q, et al. Impact of inorganic nitrogen additions on microbes in biological soil crusts [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 88: 303–313.
- [34] 黄文福,刘左军,单夕文,等.土壤基质、湿度及接种量对荒漠藻结皮形成的影响[J].中国沙漠,2014,34(6):1503–1508.
- [35] Zhao Y, Li X R, Zhang Z S, et al. Biological soil crusts influence carbon release responses following rainfall in a temperate desert, northern China [J]. Ecological Research, 2014, 29(5): 889–896.

Effects of water and nutrient supply on growth of moss crust mixed with attapulgite

Tao Ling^{1,2}, Ren Hanru^{1,2}, Zhou Yilei¹, Ren Jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province / School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Hanxing Environmental Protection Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: The chlorophyll-a and growth of biological sand-fixing materials prepared with desert moss crust and sand-fixing materials added by attapulgite were investigated in order to assess the application effects of biological sand-fixing materials under different water and nutrient supply. The results suggested that the optimal mixture ratio of 1:1 for cultural moss crust and sand-fixing material was determinate by chlorophyll-a, strength and thickness of biological sand-fixing materials inoculated on the sand surface. Attapulgite clay significantly improved the stronger strength, more chlorophyll-a and thickness of inoculated biological sand-fixing materials. Three methods of nutrient supply and interval water supply based on precipitation in arid region both could significantly promoted the thickness and enhanced the strength, 50% nutrient treatment was considered as the optimal nutrient supply method. The inoculating biological sand-fixing materials performed higher thickness and stronger strength under 1 day interval water supply. More shorter interval water supply and nutrient providing were beneficial to the survival and propagation of desert biological crusts.

Key words: biocrust; superabsorbent; attapulgite; sand-fixing material; chlorophyll-a