

人工藻结皮对旱区农田土壤风蚀的防控效应

黄明辉¹, 赵允格², 高丽倩²

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 分析人工藻结皮对土壤起沙风速和风蚀速率的影响及其风蚀防控效果, 探索人工藻结皮在农田土壤风蚀防控中的可行性, 为农田土壤风蚀防控提供新思路。[方法] 研究了 400, 600, 800, 1 000, 1 200 ml/m² 共 5 个藻液接种量对农田土壤藻结皮形成的影响, 进而采用风洞试验, 研究人工藻结皮对土壤风蚀的防控效应, 探讨了该技术应用于农田土壤风蚀防控的可行性。[结果] 在室外自然环境条件下, 通过接种藻液可形成不同盖度的藻结皮。藻接种量为 1 200 ml/m² 时, 培养 14 d 盖度可达 30%, 50 d 后, 其盖度可达 60% 以上, 藻生物量、结皮厚度是对照的 52 和 9 倍, 均有显著差异 ($p < 0.05$)。人工藻结皮可显著提高农田土壤的起沙风速, 降低风蚀速率。当藻结皮盖度为 30% 左右, 起沙风速 (9 m/s) 较裸土增加 44%, 风蚀速率较裸土降低 80% 以上。[结论] 通过在农田土壤接种藻液形成藻结皮, 可显著改变土壤物理属性, 增强土壤抗风蚀性。农田土壤接种藻液形成藻结皮可以作为一种快速、有效的方法应用于农田土壤风蚀防控。

关键词: 农田风蚀; 人工培育; 藻结皮; 起沙风速; 风蚀速率; 干旱地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0001-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 黄明辉, 赵允格, 高丽倩. 人工藻结皮对旱区农田土壤风蚀的防控效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5):1-6. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.001; Huang Minghui, Zhao Yunge, Gao Liqian. Effects of artificial cyanobacterial crust on soil wind erosion control in arid regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5):1-6.

Effects of Artificial Cyanobacterial Crust on Soil Wind Erosion Control in Arid Regions

Huang Minghui¹, Zhao Yunge², Gao Liqian²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The influence factors of artificial cyanobacterial crust on soil threshold wind velocity and wind erosion rate, and the effects of wind erosion prevention and control were analyzed, and the feasibility of using artificial cyanobacterial crust to prevent and control wind erosion on farmland soil was explored, in order to provide a new idea for farmland soil wind erosion prevention and control. [Methods] The effects of five inoculum amounts of cyanobacterial liquid, which were 400, 600, 800, 1 000, 1 200 ml/m², on the formation of cyanobacterial crust on farmland soil were investigated. The effects and feasibility of using artificial cyanobacterial crust to reduce soil wind erosion were tested and estimated using wind tunnel tests. [Results] Cyanobacterial crusts of different coverages could be formed under outdoor conditions by inoculating the soil with cyanobacteria liquid having different inoculum amounts. When the cyanobacteria inoculum amount was 1 200 ml/m², the coverage could reach 30% after 14 days of cultivation, and the coverage was greater than

收稿日期: 2022-11-28

修回日期: 2023-02-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原生物结皮对坡面水土流失过程的影响及模拟”(41830758), “土壤颗粒组成对生物结皮稳定性的影响及机制”(41907056); 中国科学院“西部之光”交叉团队项目—重点实验室合作研究专项(2019); 中央高校基本科研业务费专项资金(2452020237)

第一作者: 黄明辉(1997—), 男(汉族), 宁夏回族自治区吴忠市人, 硕士研究生, 研究方向为生物结皮抗侵蚀。Email: huangminghui_edu@163.com.

通信作者: 高丽倩(1986—), 女(汉族), 河北省石家庄市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与土壤生态研究。Email: glq@nwafu.edu.cn.

60% after 50 days of cultivation. The biomass and thickness of the artificial cyanobacteria crust were 52 and 9 times of that of the control, respectively ($p < 0.05$). Artificial cyanobacterial crust significantly increased the threshold wind velocity for soil erosion and decreased the wind erosion rate. When the coverage of cyanobacterial crust was 30%, the threshold wind velocity (9 m/s) increased by 44% and the wind erosion rate decreased by more than 80%. [Conclusion] Inoculating farmland soil with cyanobacterial liquid can form a crust that can significantly change soil physical properties and enhance soil resistance to wind erosion. The formation of cyanobacterial crust on farmland soil by inoculation with cyanobacterial solution can be used as a rapid and effective method for prevention and control of soil erosion by wind.

Keywords: farmland wind erosion; artificial cultivation; cyanobacterial crust; threshold wind velocity; wind erosion rate; arid region

风蚀是干旱半干旱区土壤沙化和沙尘暴灾害发生的关键环节,也是许多国家和区域面临的重要环境问题^[1]。风蚀产生的地表沙尘释放和输移,导致沙尘源区及途经地区大气环境中可吸入颗粒物浓度显著增加,严重影响人类身体健康^[2]。研究发现,强烈的风蚀导致农田表层土壤颗粒粗化^[3-4],养分流失严重,土地生产力下降,影响区域经济、社会和环境发展^[5]。因此,加强农田土壤风蚀防治,对改善农田土壤质量及大气环境质量具有重要意义。

农田风蚀主要发生在秋收后至春耕时约半年时间内^[6]。在此期间,农田地表缺少有效作物覆盖,又逢冬春季风盛行,易出现风蚀扬尘现象。随着农田风蚀问题日趋严重,不少学者就农田土壤防风固沙的技术和方法开展了大量研究^[7]。例如营造农田防护林、秸秆覆盖及留茬等,在减少土壤风蚀和改善土壤质量方面取得众多进展。但受环境温度、水分、病虫害等多种因素影响,以上措施在防风蚀效果和推广面积方面仍然十分有限^[8],农田风蚀防治依然是一个值得关注的问题。

生物土壤结皮(简称生物结皮)是旱区生态系统的重要组成,具有增强土壤抗蚀性、改善土壤养分等重要生态功能^[9]。近年来,人工培育生物结皮已成为旱区防治土壤侵蚀和退化、恢复土壤功能的潜在措施之一。人工培育生物结皮一方面通过增加土壤有机质、碱解氮、有效磷等养分含量提高土壤肥力,增加作物产量^[10];另一方面,生物结皮中菌丝以及藻类分泌的多糖等高分子有机物可通过吸附、黏结和捆绑土壤颗粒,显著增加土壤抗蚀性^[11-12]。目前,人工培育生物结皮,特别是人工藻结皮在沙漠化防治已有应用^[13-15],或可作为农田土壤风蚀防控的新方法。然而,与荒漠化防治不同,农田土壤风蚀防治有相对严格的时间限制,需要在冬春季休耕期的特定时期内,接种藻类使其快速形成一定盖度的藻结皮,以达到农田风蚀防治的目的。而且,理论上不同藻类接种量下,藻结皮形成速度不同。因此,明确不同接种量对

藻结皮形成的影响及其防风蚀效果,是将人工藻结皮应用于农田风蚀防控必须面对的科学问题。为此,本文以黄土高原自然发育的藻结皮为藻类种源,经分离并扩大培育后,接种于农田土壤表面,研究接种量对藻结皮形成的影响。在此基础上,结合风洞试验,研究藻接种量对土壤起沙风速和风蚀速率的影响,分析人工藻结皮对土壤起沙风速和风蚀速率的影响因素及其风蚀防控效果,探索人工藻结皮在农田土壤风蚀防控中的可行性,以为农田土壤风蚀防控提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年 3—5 月在西北农林科技大学水土保持研究所进行。所用土槽为自制式风蚀钢槽,长×宽×高=1.1 m×1 m×0.08 m。土槽底部由直径 5 mm 间隔 5 cm 小孔,从而使土壤水分可向底部入渗。填装土壤采自陕西省安塞县耕地表层(0—20 cm),土壤类型为黄绵土,基本理化属性见表 1。将土样平铺地面晾干后测定土壤含水量,土壤质量含水量控制在 3% 左右,根据土壤容重计算每层土层所需的土壤质量,过 5 mm 筛后均匀填入土槽中。填土时采用分层填土的方式进行,即按 4 cm 土层装填后将表层刮毛再装填另外 4 cm 土层,边装边将土壤均匀压实,以保证填土的均匀性和整体性。装土深度与土槽高度保持一致,土壤容重为 1.3 g/cm³。

接种藻液材料准备。于 2020 年 12 月在陕西省安塞县退耕坡地采集藻结皮。风干研磨过 0.25 mm 筛后,称取 10 g 藻结皮土样放入灭菌的 250 ml 三角瓶中,加入 150 ml BG11 营养液(常用的淡水蓝藻和绿藻培养液),震荡 24 h 后取上清液。将制得的上清液加入 10 L 装有 BG11 营养液的透明塑料桶中,置于 25 °C 温室中进行扩大培养。培养 14 d 后,藻类达到指数生长期^[12],藻液颜色呈深绿色,主要藻种为小球藻(*Chlorella vulgaris*),此时测定藻液的叶绿素含量,作为接种前藻液中藻类生物量。

表 1 供试土壤本理化性质
Table 1 Physicochemical properties of tested soil

有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	土壤颗粒组成				
				黏粒/%	细粉粒/%	粗粉粒/%	细砂粒/%	粗砂粒/%
8.87±0.85	0.65±0.62	0.58±0.40	93.61±1.52	10.4±0.14	3.9±0.21	16.1±0.39	38.7±1.03	30.9±0.58

注:表中土壤颗粒组成分类采用国际制分类标准。

1.2 试验设计

人工藻结皮培育。藻结皮培育于 2021 年 3 月在西北农林科技大学水土保持研究所进行。以培养的藻液,按照 400, 600, 800, 1 000, 1 200 ml/m² 接种藻液,同时以不接种为对照(CK),共 6 个处理,每个处理 3 个重复,共 18 个土槽。将扩繁培养后的藻液(藻液生物量为 10 mg/L)用喷壶均匀喷洒在填装土槽土壤表面,确保藻液在土壤表面分布均匀。为保证各处理土壤含水量相近,在喷洒藻液的同时,补充一定体积的蒸馏水,保证各处理藻液和蒸馏水的总体积一致。前 14 d 每天浇水一次,每次浇水 3 L/m²,施加 BG11 营养液一次,每土槽 1 L。14 d 后,每周浇水一次,浇水量同上,期间每 7 d 测定藻结皮盖度,于室外自然条件下持续培养 56 d,培养结束后采集藻结皮样用以藻生物量的测定,培养期间遇雨天用塑料膜覆盖土槽。

风洞试验。风洞试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室风洞试验大厅进行。风洞采用风速自动控制的直流吹气式设备。风洞设备全长 24 m,高 1.2 m,宽 1 m,由风机段、调节段、整流段、试验段、集沙段和导流段六部分组成。风速在 0~15 m/s 范围内连续可调。试验分别在藻结皮培养的第 14 d 和第 56 d 进行风洞试验,风洞试验前控制土壤含水量保持在 3% 左右,并测定各处理藻结皮盖度。风洞试验首先进行各处理起沙风速的测定,起沙风速采用直接测定的方法,在土槽表面均匀布设 9 个测量点,记录肉眼观察到沙粒发生移动时的风速,试验结果为 9 次的平均值。起沙风速测定结束后,测定各处理在 13 m/s 下的风蚀速率,观测高度距土壤表面 2 cm,试验时间为 10 min。风洞试验前后使用精度 1.0 g 的地秤称量土槽质量,用以计算风蚀量,试验结束后测定各处理土壤硬度、黏结力。

1.3 测定指标与方法

(1) 生物结皮盖度。风洞试验前用 25 点样方法(样方 25 cm×25 cm)调查供试土槽生物结皮盖度,均匀测定土槽上、中、下 3 部分的生物结皮盖度,取均值作为该土槽藻结皮盖度;

(2) 土壤含水量。土壤水分测量仪(ML3, Delta-T 公司,英国),将测量仪的探针小心地插入藻结皮土壤表面进行读数,读数完毕后小心取出探针,尽量避免

破坏藻结皮的完整性,每个土槽测定 5 次取平均值;

(3) 藻液生物量。取一定体积的培养物(4 个重复),5 000 r/min 离心 10 min,去除上清,加入 95% 乙醇提取叶绿素,中间摇匀两次或 3 次以便充分提取,用紫外分光光度计(UV-245003 040 246, 岛津,中国)分别于 665 nm 和 649 nm 波长下测定吸光值,叶绿素含量($\mu\text{g/ml}$)计算公式为:

$$C = 13.7 \times A_{665} - 5.76 \times A_{649} \quad (1)$$

(4) 藻结皮生物量。采用乙醇萃取法测定^[16];

(5) 土壤风蚀量。生物结皮的风蚀量采用称重法测量,以风蚀速率进行界定,其公式为:

$$F = (m_1 - m_2) / (st) \quad (2)$$

式中: F 为风蚀速率($\text{g/m}^2/\text{s}$); m_1, m_2 分别为风蚀前后结皮土槽的质量(g); s 为风蚀面积(m^2); t 为风蚀时间(s)。

(6) 土壤硬度。土壤硬度计(TYD-1, 中特精密仪器科技有限公司,中国),测定藻结皮层土壤硬度,各重复测定 10 次,去除极大值和极小值后取平均值(kg/cm^2);

(7) 土壤黏结力。土壤剪切力仪(H-4 212 MH, 北京剑灵科技有限公司,中国),每处理测定 10 次,去除极大值和极小值后取平均值(kg/cm^2)。

1.4 数据分析方法

试验数据基于 SPSS 26.0 中的描述性统计进行分析,藻结皮培养 56 d 后,分别对各处理藻结皮生物量、结皮厚度、土壤硬度和土壤黏结力进行单因素 ANOVA 检验($\alpha=0.05$)。藻结皮盖度在每次风洞试验前以及培育结束后进行测定,每个处理的试验结果均来自 3 个重复的平均值并进行拟合,表示为平均值±标准误差。影响土壤起沙风速及风蚀速率的相关指标采用 SPSS 相关性分析(Pearson 相关分析),利用 R 语言中的 Random Forest 程序建立影响土壤起沙风速和风蚀速率各指标间的随机森林模型,最后通过回归分析,研究了藻结皮盖度对起沙风速和风蚀速率之间的关系。利用 Origin 2018 进行图形制作。

2 结果与分析

2.1 接种量对藻结皮形成发育的影响

由图 1 可见,各处理藻结皮盖度均随培养时间

的延长逐渐增加,且随着接种量的增加,藻结皮盖度的增加速率逐渐增大。培养前 28 d,400 ml/m² 及 600 ml/m² 处理藻盖度增加最为缓慢,28 d 后藻盖度变化趋势较为明显,平均增加速度为 0.65,0.69%/d; 800,1 000,1 200 ml/m² 处理平均增加速率分别为 0.91,1.05,1.30%/d。可见,本试验条件下藻接种量越高,藻结皮盖度增长越快,培养时间越短。

表 2 为在培养 56 d 后,藻结皮生物和物理属性的变化。随着藻接种量的增加,藻生物量逐渐增加,当藻接种量高于 800 ml/m²,藻生物量变化不显著。各处理藻结皮厚度均显著高于裸土对照,接种量为 1 200 ml/m² 时,藻结皮厚度显著高于其他接种量 ($p < 0.05$)。人工藻结皮土壤硬度及黏结力均显著高于裸土,当藻接种量高于 400 ml/m² 时,各接种量处理间差异不显著。可见,藻接种量越高,藻生物量越

大,且显著增加土壤硬度及黏结力,有利于抵抗土壤风蚀。

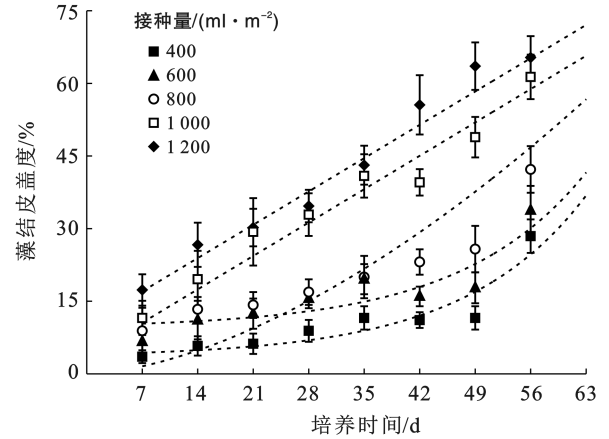


图 1 不同接种量下藻结皮盖度随培养时间变化

Fig.1 Coverage of cyanobacterial crust changed with culture time under different inoculation amounts

表 2 不同藻接种量下藻结皮生物和物理属性变化

Table 2 Changes of biological and physical properties of cyanobacterial crust under different cyanobacteria inoculation

处理	藻接种量/ (ml · m ⁻²)	藻生物量/ (μg · g ⁻¹)	藻结皮厚度/ mm	土壤硬度/ (kg · cm ⁻²)	土壤黏结力/ (kg · cm ⁻²)
CK	0	0.16 ± 0.02 ^d	0.17 ± 0.04 ^c	0.07 ± 0.01 ^c	0.17 ± 0.06 ^c
1	400	2.34 ± 0.08 ^c	1.48 ± 0.07 ^b	0.94 ± 0.15 ^b	0.46 ± 0.17 ^b
2	600	3.61 ± 0.21 ^b	1.52 ± 0.03 ^b	1.74 ± 0.04 ^a	0.78 ± 0.04 ^a
3	800	4.23 ± 0.20 ^b	1.51 ± 0.09 ^b	1.79 ± 0.03 ^a	0.72 ± 0.02 ^a
4	1 000	7.39 ± 1.20 ^a	1.59 ± 0.10 ^b	1.75 ± 0.02 ^a	0.78 ± 0.03 ^a
5	1 200	8.56 ± 0.56 ^a	1.79 ± 0.08 ^a	1.84 ± 0.09 ^a	0.77 ± 0.02 ^a

注:不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2 藻接种量对起沙风速和风蚀速率的影响

图 2 为不同藻接种量处理培育 56 d 后,土壤起沙风速和风蚀速率的变化,随着藻接种量的增加,起沙风速较裸土逐渐上升,风蚀速率较裸土显著下降 ($p < 0.05$)。当藻接种量高于 400 ml/m² 时,处理间土壤风蚀速率没有显著差异。可见,人工藻结皮能显著增大土壤起沙风速,降低风蚀速率。

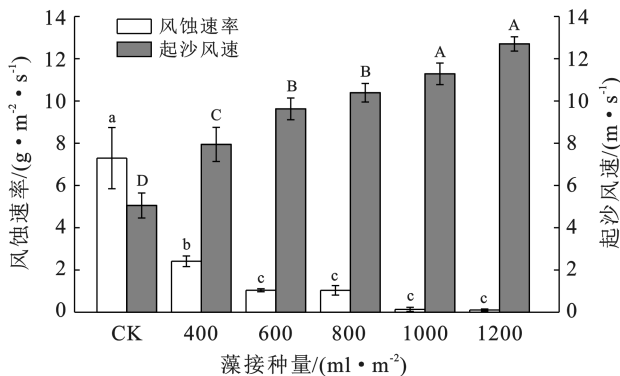


图 2 不同藻接种量处理起沙风速和风蚀速率的变化

Fig.2 Changes of threshold wind velocity and wind erosion rate in different cyanobacterial inoculation treatments

2.3 人工藻结皮土壤起沙风速和风蚀速率的影响因素

由表 3 可知,藻结皮生物和物理属性与土壤起沙风速和风蚀速率存在不同程度的相关性。起沙风速与藻盖度、生物量、结皮厚度和土壤黏结力呈极显著正相关,风蚀速率则呈极显著负相关关系,为了解释各指标对起沙风速和风蚀速率的影响程度,进一步用 R 语言中的 Random Forest 程序建立了影响土壤起沙风速和风蚀速率各指标间的随机森林模型。

表 3 藻结皮生物和物理属性变化与土壤起沙风速和风蚀量的相关性

Table 3 Correlation of changes in biological and physical properties of cyanobacterial crust with soil threshold wind velocity and soil wind erosion rate

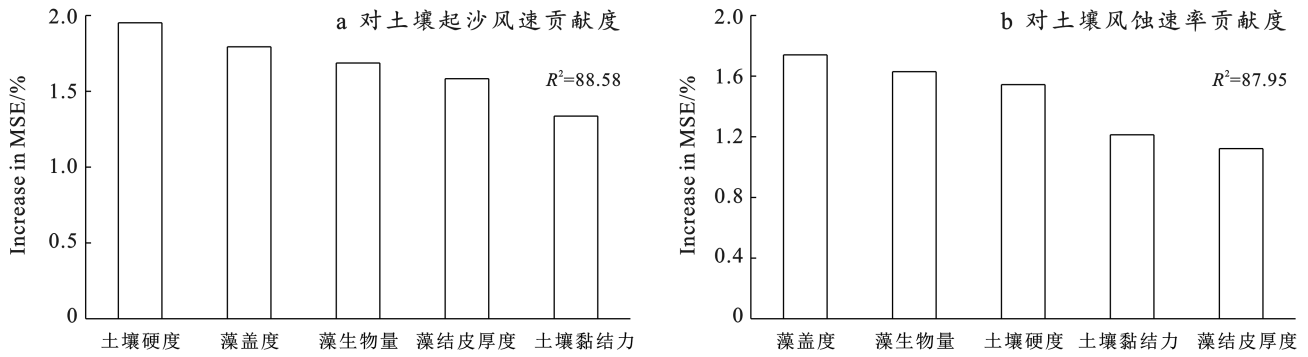
项目	藻结皮盖度	藻结皮生物量	结皮厚度	土壤硬度	土壤黏结力
起沙风速	0.930**	0.939**	0.867**	0.920**	0.858**
风蚀速率	-0.870**	-0.779**	-0.972**	-0.920**	-0.878**

注:**表示在 $p < 0.01$ 水平差异显著。

随机森林模拟结果显示(图 3),藻结皮生物和物理属性变化对土壤起沙风速和风蚀量的总解释率

(R^2) 为 88.58% 和 87.95%, 表明模型拟合良好。其中, 土壤硬度对起沙风速的影响最大, 藻结皮盖度次之, 而对风蚀量影响最大的为藻结皮盖度, 同时, 藻结

皮盖度相较藻生物量、厚度、土壤硬度和黏结力更能直观地描述其防风效果。因此, 进一步将藻盖度与起沙风速和风蚀速率进行相关拟合。



注: Increase in MSE 表示指标对预测目标变量的贡献度。Increase in MSE 值越大, 说明该指标的重要性越高。

图 3 藻结皮生物和物理属性对土壤起沙风速和土壤风蚀速率影响程度

Fig.3 Effects of biological and physical properties of cyanobacterial crust on soil threshold wind velocity and soil wind erosion rate

2.4 农田人工藻结皮土壤风蚀防控效果

人工藻结皮盖度与起沙风速存在极显著线性相关关系(图 4a), 随着人工藻结皮盖度的增加, 起沙风速逐渐增加。裸土处理下, 起沙风速为 5 m/s, 藻结皮盖度达到 30% 左右时, 起沙风速达到 9 m/s

左右, 是裸土的 1.7 倍。人工接种藻结皮后, 风蚀速率随藻结皮盖度增加呈指数下降(图 4b)。裸土处理下, 风蚀速率为 $7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右, 当藻结皮盖度达到 30% 左右, 与裸土相比风蚀速率显著下降, 下降约 80%。

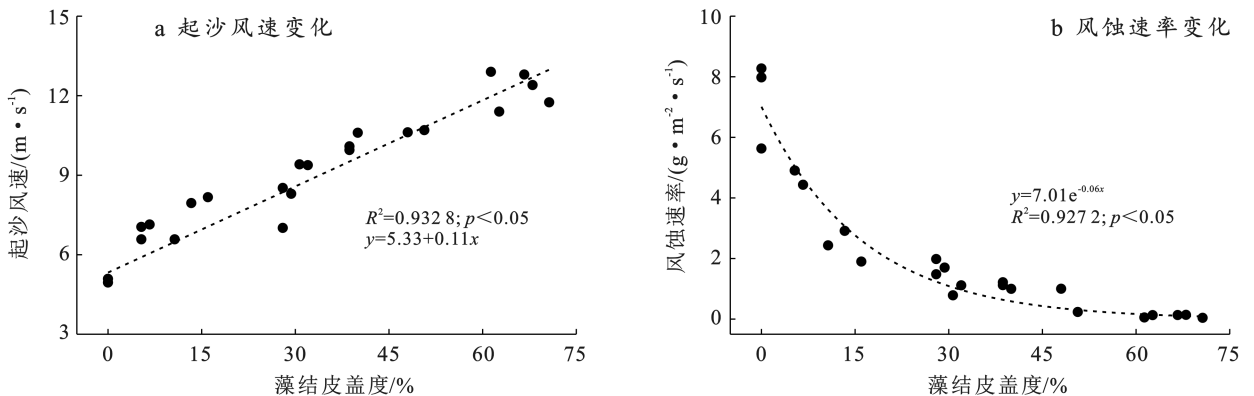


图 4 起沙风速及风蚀速率与藻结皮盖度的关系

Fig.4 Relationship between soil threshold wind velocity and soil wind erosion rate with cyanobacterial coverage

为了进一步明确藻结皮用于农田风蚀防控的可能性、可行性及有效盖度范围, 将不同藻盖度以 5% 为梯度进行划分(见表 4), 不同盖度范围下, 藻结皮对土壤风蚀的减蚀程度不同。随着藻盖度增加, 风蚀减蚀程度增大, 当藻盖度范围在 30%~35%, 对土壤风蚀的减蚀效果较裸土达到 80% 以上。结合人工藻结皮的发育动态可知, 通过增大藻液接种量, 可以在短时间达到控制风蚀的理想盖度, 反之在低接种量下, 通过延长培养时间达到目标盖度。

3 讨论

风蚀是影响干旱半干旱地区农田生产力的因素,

秋收后至春耕时是农田风蚀发生的主要时期, 生物结皮作为一种地表覆被物, 能够有效切断裸露地表与空气直接接触, 从而减小风蚀。目前, 已有不少研究证实, 通过人工接种并辅以一定培养措施, 可加速荒漠化地区生物结皮的形成, 增强土壤抗侵蚀性^[17-18]。

本文研究结果表明, 藻液接种量是藻盖度变化的主要影响因素, 藻接种量越大, 藻结皮的培育周期越短, 两周左右藻盖度可达 30% 左右, 减少风蚀产沙量达 80%, 起到了显著的抗风蚀作用。尽管研究区域、土壤基质、培养环境等有所不同, 但多数研究认为接种量的增加, 一定程度上能促进藻结皮的快速发育, 其原因可能主要有以下 3 个方面。①随着初始接种

量的增加,在藻结皮形成的初期阶段,藻体的生物量会出现一定下降,当藻体适应新环境后,会进入快速增长阶段^[18];②初始接种量的增加,藻类生长过程中,沙粒与丝状体相互缠绕形成集合体,从而提高土壤表面颗粒稳定性^[19];③接种量的增加促进了藻体的繁殖速度,并且不同类型的藻种之间可能存在某种共生关系^[20],能够在一定程度上提高藻结皮的生长速度。

表 4 不同藻结皮盖度范围下对土壤的减蚀程度

Table 4 Degree of soil erosion reduction under different cyanobacteria crust coverage

藻结皮盖度范围/%	风蚀速率/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	风蚀减蚀程度/ %
裸土	7.29	0
0~5	4.90	32.76
5~10	3.43	52.93
10~15	2.91	60.08
15~20	2.90	60.29
25~30	1.61	77.90
30~35	0.95	86.98
35~40	1.11	84.77
45~50	0.62	91.54
60~65	0.09	98.16
65~70	0.10	96.97

其次,藻盖度对风蚀速率影响显著。随着藻结皮的培养时间延长,藻生物量、结皮厚度均较裸土有显著提升,从而影响土壤硬度和黏结力。通过将以上指标与起沙风速和风蚀速率的相关性分析结果说明,通过接种藻液,改变了土壤表面的物理属性,藻盖度的变化进一步影响了藻结皮生物量和结皮厚度,是影响土壤起沙风速和风蚀速率的主要原因之一。

最后,农田在秋收后和春耕前,休耕期长达半年以上。本试验研究结果表明,藻液的初始接种量不同,藻结皮的发育不同。在相同培养条件下,接种量为 $1\ 200\ \text{ml}/\text{m}^2$ 在 14 d 后藻盖度即可达到 30% 左右,风蚀速率较裸土处理下降 80% 以上。可见,人工藻结皮在农田土壤风蚀防控的形成时间及防风蚀效果上是可行的,想要达到此盖度可以通过两种方式,一方面可通过增大接种藻液的生物量,可以减少藻结皮形成的培养期,短时间内达到防治风蚀的目的;另一方面可通过低接种量,延长藻结皮的培养期,从而达到防治风蚀的目的。此外,藻结皮可作为一种有效的土壤改良方法,通过胞外聚合物(EPS)结合、细胞表面吸收、细胞内吸收和生物矿化等方式,一方面能够改良土壤,另一方面通过增加土壤中有机质含量和

碱解氮含量来提高土壤肥力,改善农田土壤环境,对保证农业食品的安全性和提高作物产量具有重要的意义^[10]。所以在农作物生长期,藻结皮的存在能够为作物提供养分,农田休耕期,藻结皮的接种和形成有可为农田土壤提供保护,减少侵蚀^[21]。然而,本文的研究结果均是在室内模拟条件下获得,虽然与野外条件尽量保持一致,但仍然有所差别。因此,有关野外实际状况的研究以及对农田产量的影响需要进一步研究和验证。

4 结论

藻液接种量显著影响藻结皮盖度。随着藻接种量的增加,藻结皮盖度增长速率越快,当接种量为 $1\ 200\ \text{ml}/\text{m}^2$ 时,藻结皮盖度增长速率最快,为 $1.30\%/d$,14 d 后盖度可达 30% 左右,均高于其他接种量处理。当藻盖度为 30% 左右,起沙风速达到 $9\ \text{m}/\text{s}$,风蚀速率较裸土处理下降 80% 以上。将人工藻结皮技术应用到农田风蚀防控,在藻结皮形成时间和防风蚀效果上是可行的,或许可为农田土壤质量和大气环境质量的改善起到重要作用。

[参 考 文 献]

- [1] 周炎广,武子丰,胡日娜,等.毛乌素沙地新垦地土壤风蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(1):138-147.
- [2] Liu Chongming, Young Cheayuan, Lee Yenchih. Influence of Asian dust storms on air quality in Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2006, 368 (2/3): 884-897.
- [3] Lyu Xin, Li Xiaobing, Wang Hong, et al. Soil wind erosion evaluation and sustainable management of typical steppe in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021,277:111488.
- [4] 李永平,冯永忠,杨改河.北方旱区农田防护林防风效应研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(6):92-98.
- [5] 王涛,李孝泽,哈斯,等.河北坝上高原现代土地沙漠化的初步研究[J].中国沙漠,1991,11(2):39-45.
- [6] 李春越,苗雨,薛英龙,等.长期施肥黄土旱塬农田土壤—微生物—植物系统碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2022,42(1):370-378.
- [7] 王学芳,孙万仓,李孝泽,等.我国北方风蚀区冬油菜抗风蚀效果[J].生态学报,2009,29(12):6572-6577.
- [8] 郭孟洁,李建业,李健宇,等.实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J].农业工程学报,2021,37(22):108-118.
- [9] Belnap J. Biological soil crusts and wind erosion [M]// Ecological Studies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001:339-347.

- 3045-3052.
- [15] 梁钰镁,高永,党晓宏,等.不同年限沙柳沙障沙埋部腐化特性及真菌群落特征[J].应用与环境生物学报,2022,28(2):339-345.
- [16] 孙悦.NADH 脱氢酶调控丝状真菌 *Podospora anserina* 降解木质纤维素及子实体发育研究[D].广东 深圳:深圳大学,2020.
- [17] Purahong W, Wubet T, Lentendu G, et al. Life in leaf litter: novel insights into community dynamics of bacteria and fungi during litter decomposition [J]. *Molecular Ecology*, 2016,25(16):4059-4074.
- [18] 赵军旗.瓶霉属 *Phialophora* spp.来源的纤维素酶和半纤维素酶的基因克隆与表达[D].北京:中国农业科学院,2012.
- [19] Rytioja J, Hildén K, Yuzon J, et al. Plant-polysaccharide-degrading enzymes from basidiomycetes [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2014,78(4):614-649.
- [20] Mehrabi M, Asgari B, Hemmati R. *Knufia perfecta*, a new black yeast from Iran, and a key to *Knufia* species [J]. *Nova Hedwigia*, 2018,106(3/4):519-534.
- [21] Rajala T, Peltoniemi M, Pennanen T, et al. Fungal community dynamics in relation to substrate quality of decaying Norway spruce (*Picea abies* [L.]Karst.) logs in boreal forests [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012,81(2):494-505.
- [22] Bani A, Pioli S, Ventura M, et al. The role of microbial community in the decomposition of leaf litter and deadwood [J]. *Applied Soil Ecology*,2018,126:75-84.
- [23] Gianfreda L, Ruggiero P. Enzyme activities in soil [M] //Nannipieri P, Smalla K (eds). *Soil Biology*. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006:257-311.
- [24] Sinsabaugh R L, Hill B H, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment [J]. *Nature*, 2009, 462 (7274):795-798.
- [25] Sawada K, Inagaki Y, Sugihara S, et al. Impacts of conversion from natural forest to cedar plantation on the structure and diversity of root-associated and soil microbial communities [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021,167:104027.
- [26] Fioretto A, Di Nardo C, Papa S, et al. Lignin and cellulose degradation and nitrogen dynamics during decomposition of three leaf litter species in a Mediterranean ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005,37(6):1083-1091.
- [27] Frey S D, Elliott E T, Paustian K, et al. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (5):689-698.

(上接第 6 页)

- [10] 李鑑爽,谢作明,裴福文,等.土壤藻结皮对高镉农田表层土壤的改良作用研究[J].安全与环境工程,2022,29(3):155-160.
- [11] Tisdall J M, Nelson S E, Wilkinson K G, et al. Stabilisation of soil against wind erosion by six saprotrophic fungi [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 50:134-141.
- [12] 李新荣,谭会娟,回嵘,等.中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J].科学通报,2018,63(23):2320-2334.
- [13] 饶本强,刘永定,胡春香,等.人工藻结皮技术及其在沙漠治理中的应用[J].水生生物学报,2009,33(4):756-761.
- [14] Xie Zuoming, Liu Yongding, Hu Chunxiang, et al. Relationships between the biomass of algal crusts in fields and their compressive strength [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007,39(2):567-572.
- [15] Rossi F, Li Hua, Liu Yongding, et al. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017,171:28-43.
- [16] 李雯,马昕昕,马宁,等.放牧强度对黄土丘陵区生物结皮土壤化学计量学特征的影响[J].草地学报,2021,29(11):2547-2555.
- [17] 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.
- [18] 张丙昌,张元明,赵建成,等.古尔班通古特沙漠生物结皮不同发育阶段中藻类的变化[J].生态学报,2009,29(1):9-17.
- [19] Eldridge D J, Leys J F. Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003,53(4):457-466.
- [20] Hu Chunxiang, Liu Yongding, Paulsen B S, et al. Extracellular carbohydrate polymers from five desert soil algae with different cohesion in the stabilization of fine sand grain [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 54 (1):33-42.
- [21] 王闪闪,赵允格,石亚芳,等.短期放牧干扰对黄土丘陵区生物结皮土壤氮素累积的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):3848-3854.