

藻类与微生物添加对高陡边坡生物结皮人工恢复的影响

鞠孟辰¹, 卜崇峰^{1,2}, 王清玄², 白雪强¹, 李亚红¹, 郭琦¹, 韦应欣¹

(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)

摘要: [目的] 研究微生物与藻类对生物结皮野外恢复的影响, 优化黄土高陡边坡生物结皮防护技术, 为区域生态修复提供新的思路和方法。[方法] 利用完全试验, 研究藻类(小球藻+硅藻复合藻液)、功能性微生物(胶质芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌)两因素对人工恢复生物结皮发育状况的影响。[结果] ①不同处理间发育差异明显, 藻+巨大芽孢杆菌处理的生物结皮盖度中位数最大, 均值为 61.41%; 仅胶质芽孢杆菌处理的生物结皮厚度中位数最大, 均值为 2.58 mm; 仅添加 3 g 藻处理的苔藓株高度中位数最大, 均值为 2.67 mm; ②藻处理能够在不同添加水平下(1 和 3 g/m²)显著解释($p < 0.05$)样方间生物结皮的盖度、厚度与株密度发育差异, 其添加量以 2~3 g/m² 为宜; ③功能性微生物对生物结皮盖度、厚度及苔藓株高度影响不明显($p = 0.91/0.93/0.49$), 且与藻类无明显交互作用。[结论] 45°黄土边坡人工恢复生物结皮是可行的。在环境适宜的坡面喷洒藻液、接种苔藓茎段碎片, 开展生物结皮恢复, 能够有效构建具有一定覆盖度与厚度、发育良好的生物结皮防护层。

关键词: 生物结皮; 功能性微生物; 绿藻; 黄土高陡坡面; 人工恢复

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)06-0124-05

中图分类号: S157.2

文献参数: 鞠孟辰, 卜崇峰, 王清玄, 等. 藻类与微生物添加对高陡边坡生物结皮人工恢复的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 124-128. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.018; Ju Mengchen, Bu Chongfeng, Wang Qingxuan, et al. Effects of algae and microorganism addition on restoration of biocrusts on steep slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 124-128.

Effects of Algae and Microorganism Addition on Restoration of Biocrusts on Steep Slope

Ju Mengchen¹, Bu Chongfeng^{1,2}, Wang Qingxuan², Bai Xueqiang¹, Li Yahong¹, Guo Qi¹, Wei Yingxin¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese

Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of microorganisms and algae on the recovery of biocrusts in the field were studied and the biocrusts protection technology of high and steep loess slopes was optimized in order to provide new ideas and methods for regional ecological restoration. [Methods] The effects of algae(chlorella+diatom mixed algae) and functional microorganisms(Bacillus licheniformis, Bacillus megaterium) on the development of artificially restored biocrusts were studied by complete experiments. [Results] ① There were significant difference in development among different treatments, the median biocrust coverage of algae+Bacillus megaterium was the largest, with a mean value of 61.41%; the median biocrust thickness of Bacillus licheniformis was the largest, with a mean value of 2.58 mm; the median height of moss plant treated with only 3 g algae was the highest, with a mean value of 2.67 mm. ② Algae treatment could explained the difference of biocrusts

收稿日期: 2019-04-30

修回日期: 2019-05-18

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703; 2016YFE0203400); 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017CX-08); 中央高校优秀青年科研业务专项基金(2014YQ006)

第一作者: 鞠孟辰(1993—), 男(汉族), 吉林省长春市人, 硕士研究生, 研究方向为黄土高原生物结皮接种恢复。E-mail: jumengchen@fox-mail.com。

通讯作者: 卜崇峰(1977—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事生物土壤结皮的生态功能研究工作。E-mail: buchongfeng@163.com。

coverage, thickness and plant height among different sample squares significantly ($p < 0.05$) under different addition levels (0, 1 or 3 g/m²), and the suitable addition amount was 2~3 g/m². ③ The functional microorganisms showed little effects on the biocrusts coverage, thickness and plant height of moss ($p = 0.91/0.93/0.49$) and it showed no significant interaction with algae. [Conclusion] Artificial restoration of biocrusts on 45° slope is feasible. Spraying the algae solution on the slope with suitable environment, inoculating the gametophytic fragments of moss and carrying out the restoration of the biocrusts, can effectively construct a well-developed biocrusts protective layer with a certain coverage and thickness.

Keywords: biocrusts; functional microorganism; green algae; loess steep slope; inoculate and restoration

作为旱区生态系统中重要的活性地被物,生物结皮(biocrusts, BSCs)能够显著提高土壤中碳、氮积累,提高地表的粘结力,调节土壤水文过程,提高启动风速,减轻风蚀,发挥着重要的水土保持作用^[1-4]。另外,苔藓结皮作为生物结皮的高级演替阶段,具有极强的抗逆性^[5-7],且能够生长在陡峭的土质坡面上,并可通过撒播茎叶碎片实现人工培育,作为一种生物防护新手段,近年来受到越来越多的关注^[8-11]。陆生藻类是生物结皮的重要组成部分,其分泌的胞外聚合物与丝状结构能够稳定地表,促进生物结皮形成^[12-13],陆生藻类对于干旱等极端条件有较强适应性,其能够忍受较大温度变化范围及强光环境^[14-15]。土壤中的微生物群落同样是生物结皮的重要组分,调节着旱区生态系统中物质循环与能量流动^[16-17]。自然环境中生物结皮的发育改善了土壤颗粒组成与水分再分配过程,影响土壤养分含量及土壤 pH 值^[18],生物结皮的发育往往伴随着微生物群落的发展,二者相互作用,共同发挥生态效益^[19-21]。现有野外培育研究多以苔藓或藻类为培育对象,在平缓土质或砂质坡面,直接撒播苔藓碎片或藻液,控制光照、温度、水分等环境条件,或施用营养液、生长调节剂等化学物质,促进生物结皮恢复^[22-25]。如何在广泛存在的、工程开挖形成的高陡边坡上接种恢复生物结皮,目前关注有限。本研究将苔藓茎叶碎片与藻液及功能性微生物接种在布设于 45°黄土坡面的自制培育基质上,了解藻类与微生物对生物结皮恢复效果的影响,以期更为有效的在高陡边坡上开展生物结皮接种恢复,为生态修复提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

培育试验在位于陕西省杨陵区五泉镇岭后水土保持试验站(34°—34°20'N, 108°—108°07'E)的 45°黄土坡面(方位角 224°)进行。区内北高南低,属暖温带大陆性季风型半湿润气候,四季分明。年日照时数 2 163.8 h;主导风向为东风和西风,最大风速 21.7 m/s;年平均气温 12.9℃,最热月在 7 月,平均 26.1℃,

最冷月在 1 月,平均 -1.2℃,极端最高气温 42℃,极端最低气温 -19.4℃;年平均降水量 635.1 mm,为全年农作物需水量的 63.9%,降水量年际变化较大;潜在蒸发量 1 505.3 mm,湿润指数 0.64,无霜期 211 d。区内主要植被为国槐(*Sophora japonica*)、柏树(*Cupressus funebris*)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、蒺藜(*Tribulus terrestris*)、阿尔泰紫菀(*Heteropappus altaicus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 苔藓种源采集与预处理 苔藓结皮采自陕西省延安市砖窑湾镇贾居沟(东经 109°08'46"—109°14'30", 北纬 36°42'21"—36°48'44"),海拔 1 003.1~1 203.4 m,主要植被包括:小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和长芒草(*Stipa bungeana*)等,采样时选择发育良好,株高度大于 5 mm,较为完整的苔藓结皮,利用小铲铲取苔藓结皮层(1 cm)。将采集好的结皮层,放在温度小于 30℃,相对湿度不大于 60%背阴处晾干备用。经鉴定,优势种为土生对齿藓(*Didymodon vinealis*),伴生有长尖对齿藓(*Didymodon ditrichoides*)及丛生真藓(*Bryum caespitium*)等。待晾晒干燥后,人工挑出结皮样品中杂质,使用高速植物粉碎机(艾泽拉-2 500 C)将结皮层粉碎为长度均匀分布在 0.01~2 mm 间的茎叶碎片,混匀后获得苔藓结皮种源。

1.2.2 坡面整备与接种 经预试验测试不同坡面承载结构的稳定性,基质对于苔藓茎叶碎片的接种适宜性,选择在 45°黄土坡面布设三维土工网(国标 EM3)并上覆 10~20 mm 厚,按照不同处理混合了功能性微生物(巨大芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌)的基质(过 4 mm 孔径筛黄土、育苗基质、水、有机肥,它们的体积比为 1:1:1:0.2)后,立即于坡面上手工撒播苔藓茎叶碎片(500 g/m²),并适量洒水促进附着。

1.2.3 培育养护 试验于 2018 年 7 月至 10 月进行,考虑小球藻+硅藻复合藻液与功能性微生物两个因素,每因素各 3 个水平,采用完全试验设计,共 9 个处理(表 1),每个处理 3 个重复,于坡面 27 个 2 m×1 m 小区中随机排布各处理。微生物按照重量比(10 g/kg)直接拌和于基质中,藻液于接种苔藓茎叶碎片后 15 d

根据处理要求均匀撒于坡面上。培育初期(0~30 d)使用遮阳网控制光强 $<20\ 000\ \text{lux}$,土壤水分 $>10\%$,并每隔 5 d 按照 $2.1\ \text{L}/\text{m}^2$ 施用 Hoagland 营养液,培育中期(31~60 d)仅控制土壤水分与光照,培育末期(61~90 d)撤下遮阳网,不再人为补充水分。

表 1 试验因子及其水平

水平	功能性微生物	复合藻液/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$
1	巨大芽孢杆菌	1
2	胶质芽孢杆菌	3
3	不添加功能微生物	无

1.3 观测指标与方法

1.3.1 生物结皮覆盖度 在处理小区两对角线上均匀选取 5 个点,放置由 4 线交叉等分为 9 个方格的 $10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}$ 塑料样框,从中随机选取三个方格测量其中生物结皮覆盖度。

1.3.2 生物结皮厚度 在处理小区的两条对角线上均匀选取 5 个点,使用直径 $1.43\ \text{cm}$ 环形取样器取 $>10\ \text{mm}$ 厚度样品,使用电子游标卡尺随机选点测量生物结皮厚度 3 次。

1.3.3 苔藓株高度 在处理小区的两条对角线上均

匀选取 5 个点,每个点使用电子游标卡尺随机选点测量苔藓植株体高度 3 次。

1.4 数据处理

采用 Excel 对数据进行处理,利用 R 语言首先进行巴特利特方差齐性检验(Bartlett's test),随后进行方差分析,并检查双因素间交互作用,分析不同因素对处理间差异的贡献程度与显著性($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生物结皮生长状况

生物结皮在小区内呈斑块状分布(图 1),在小区间格挡处往往盖度较高,而在各小区上部盖度明显较小。添加 $1\ \text{g}$ 藻类并施用巨大芽孢杆菌处理下,生物结皮盖度有最大中位数,各处理中盖度均值为 61.41% ,最小值为 32.72% ,变异系数 $C_v = 24.48$,各处理间存在一定差异。添加 $3\ \text{g}$ 藻,不施用功能性微生物处理下,苔藓株高度有最大中位数,各处理株高度均值为 $2.67\ \text{mm}$,最小值为 $1.31\ \text{mm}$,变异系数 $C_v = 33.34$ 。不添加藻,施用胶质芽孢杆菌处理下,生物结皮厚度有最大中位数,各处理生物结皮厚度均值为 $2.58\ \text{mm}$,最小值为 $1.25\ \text{mm}$,变异系数 $C_v = 32.63$ 。



坡面下部生物结皮发育良好



不同坡位均形成结皮覆盖

图 1 培育 90 d 后生物结皮发育情况

2.2 藻类的影响

为了有效分析处理对生物结皮各指标的影响,首先使用巴特莱特方差齐性检验检查处理方差齐性(表 2),结果显示在藻类与功能性微生物两因子作用下的生物结皮 3 个指标的方差齐性表现良好(average- $p = 0.45/0.88/0.45$),可以进一步进行方差分析。

在生物结皮盖度方面,藻类添加物解释了 95.81% 的处理间方差,影响显著($p = 8.01 \times 10^{-12}$),而 3 种不同施用剂量的影响同样具有显著性($p = 0.000\ 83/0.008\ 00/0.001\ 20$)。在不施用藻类时,生物结皮盖度预

测均值为 59.32% ,施用量为 $1\ \text{g}/\text{m}^2$ 时,预测均值为 66.8% ,施用量增加至 $2\ \text{g}/\text{m}^2$ 时,预测均值下降至 62.2% 。

在生物结皮厚度方面,藻类添加物解释了 92.44% 的处理间方差,影响显著($p = 4.33 \times 10^{-9}$),而 3 种不同施用剂量的影响同样具有显著性($p = 0.005\ 6/0.003\ 0/0.001\ 6$),当不施用藻类时,生物结皮厚度预测均值为 $2.54\ \text{mm}$,当施用量为 $1\ \text{g}/\text{m}^2$ 时,预测均值下降为 $2.26\ \text{mm}$,当施用量提升至 $2\ \text{g}/\text{m}^2$ 时,预测均值上升为 $3.10\ \text{mm}$,说明在添加剂量为 $2\ \text{g}$ 时,藻类能够最大限度的提高生物结皮厚度。

表 2 不同梯度藻添加对各生长指标影响显著性

结皮指标	因子与梯度	估计值	标准误	t 值	t 检验显著性
盖度/%	添加 1 g 藻类	44.75	10.75	4.160	0.000 83
	添加 3 g 藻类	39.16	12.81	3.057	0.008 00
	不添加藻类	40.87	10.22	4.00	0.001 20
厚度/mm	添加 1 g 藻类	2.30	0.71	3.23	0.005 60
	添加 3 g 藻类	2.98	0.85	3.53	0.003 00
	不添加藻类	2.60	0.67	3.86	0.001 60
苔藓株高度/mm	添加 1 g 藻类	2.95	0.79	3.73	0.002 00
	添加 3 g 藻类	2.94	0.94	3.12	0.007 00
	不添加藻类	3.16	0.75	4.21	0.000 76

在苔藓株高度方面,藻类添加物解释了 90.53% 的处理间方差,影响显著($p=1.40\times 10^{-8}$),而 3 种不

表 3 双因素方差分析结果

因素	结皮指标	自由度	总方差	平均方差	F 值	F 检验显著性
添加功能性微生物	盖度/%	2	34.11	17.057	0.066	0.91
	苔藓株高度/mm	2	0.13	0.067	0.063	0.49
	厚度/mm	2	1.16	0.580	0.760	0.93

2.4 藻类与微生物的交互作用

交互作用对表征试验样地生物结皮生长状况的 3 个指标影响微弱,分别解释了生物结皮盖度与厚

同施用剂量的影响同样具有显著性($p=0.002 00/0.007 00/0.000 76$).,当不施用藻类时,苔藓株高度预测均值为 2.81 mm,当施用量为 1 g/m² 时,预测均值开始下降,为 2.61 mm,当施用量提升至 2 g/m² 时,预测均值下降为 2.52 mm,说明随添加剂量的上升,藻类对苔藓株高度有明显负作用,当施用量为 1 g/m² 时,促进作用达到最大($coef=66.82$)。

2.3 功能性微生物的影响

功能性微生物对表征试验样地生物结皮生长状况的 3 个指标影响微弱,分别解释了生物结皮盖度与厚度、苔藓株高度样地间方差的 0.036%,0.66% 和 0.071%, p 值分别为 0.91,0.93 和 0.49,均不具有显著性(表 3)。

度、苔藓株高度样地间方差的 0.011%,0.005 0% 和 0.009 7%, p 值分别为 0.43,0.89 和 0.78,均不具有显著性(表 4)。

表 4 交互作用方差分析结果

因素	结皮指标	自由度	总方差	平均方差	F 值	F 检验显著性
藻类与功能性微生物交互作用	盖度/%	4	1 044.49	261.12	1.008 1	0.43
	苔藓株高度/mm	4	1.84	0.46	0.43	0.78
	厚度/mm	4	0.83	0.21	0.27	0.89

3 讨论

以往利用藻类进行生物结皮人工恢复的研究多开展于干旱或半干旱荒漠的,流动或半流动沙丘表面。通过接种具鞘微鞘藻等陆生藻类,构建具有一定厚度的藻结皮^[26-28],将水生藻类应用于人工生物结皮构建尚未见相关报道。水生藻类与陆生藻类在形态结构等方面具有相似性,其藻丝能够缠绕土粒,并通过分泌胞外聚合物增强土表稳定性,促进土壤团聚体形成,增加土壤水稳性,提高土壤肥力^[13,29-30]。另外,藻类还能够通过提高土壤表层孔隙度,增加土表持水量,降低击溅侵蚀的同时,降低土表蒸发作用,提高水分在土壤中的留存时间,改善近地表水分条件^[31-32],为生物结皮中其他组分的发育营造了适宜的土壤与水分条件。在生理活性方面,藻类能够与苔藓植株的叶片和假根紧密缠绕在一起,以低浓度胞外多糖促进藓类原丝体与配子体产生新的茎叶体,而苔藓植物提

取液对藻类生长同样具有促进作用^[33]。藻类与苔藓结皮的混生同样有利于细菌与真菌等微生物组份多样性的上升,从总体上提高群落多样性^[34],从而促进了本试验中生物结皮的发育。

虽然本次使用的两种芽孢杆菌在农业生产中已被广泛应用^[35],但未见将之应用于生物结皮人工培育恢复的研究报道。通过改善土壤结构,促进养分循环与能量流动,芽孢杆菌能够提高作物抗病能力,提升果蔬含糖量,改善口感、提高产量的同时降低化肥与农药的使用^[17,35-36]。就试验结果的分析来看,两种芽孢杆菌的作用并不显著,这可能是由于而培养初期环境温度较高(地表温度录得 47 °C)^[37],且菌种拌合于混合基质中,随水分散失基质内部有硬化现象,矿化作用弱,速效氮不足,不适宜功能性微生物的增殖并发挥作用^[38]。

于培育结束时(90 d)观察坡面生物结皮,相较于缓坡(坡度<10°),多为斑块离散分布,藻结皮为主要

覆盖,而苔藓组分较少且株高度较低。虽然在苔藓种源处理、接种方式、养护措施等方面,与李茹雪于 2016 年 9 月在同一地区 5°黄土缓坡上开展的生物结皮人工培育恢复研究基本相同,但培育期末,苔藓株密度、盖度明显偏低^[39]。这可能是坡度与坡向以及季节导致的立地条件差异造成的。方位角为 224°的 45°西南坡在 7 月时,使用 90%遮光率遮阳网遮阴,坡面温度依然可达 50℃,且坡面陡峭,即使配方基质也难以有效的蓄存水分,虽然接种于晚间进行,但因次日白天温度较高,导致种源着生前失水并最终失活。同时,7—8 月主导风向为东、东南,与坡面水平走向重合,可能将茎段碎片吹起,使种源附着失败,降低接种成功率。

4 结论

通过完全试验设计和系统观测分析,研究表明水生藻类能够显著提高野外坡面人工恢复生物结皮的盖度与厚度及苔藓株高度,而功能性微生物的作用则并不明显。同时发现,复合藻种的最适施用量应该在 2~3 g/m²,而环境条件的坡面分布差异可能影响生物结皮的人工恢复状况。综合认为,生物结皮坡面人工接种恢复具有可行性,添加藻类能够促进生物结皮形成覆盖,提升恢复效率,但需要充分考虑坡面立地条件及季节的适宜性。

[参 考 文 献]

- [1] 姚春竹,赵允格,王媛,等. 黄土丘陵区生物结皮条件下土壤有机质及氮素的累积特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(6):197-204.
- [2] 张军红. 生物结皮在石漠化地区水土流失治理中的应用前景分析[C]//北京:中国科协年会,2014.
- [3] 李聪会,朱首军,陈云明,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持研究,2013,20(3):6-10.
- [4] 孟杰,卜崇峰,李莉,等. 侵蚀条件下生物结皮对坡面土壤碳氮的影响[J]. 中国水土保持科学,2011,9(3):45-51.
- [5] 杨永胜. 黄土高原苔藓结皮的快速培育及其对逆境的生理响应研究[D]. 陕西 杨凌:教育部水土保持与生态环境研究中心,2015.
- [6] 田桂泉,白学良,徐杰,等. 固定沙丘生物结皮层藓类植物形态结构及其适应性研究[J]. 中国沙漠,2009,25(2):249-255.
- [7] 回嵘,李新荣,赵锐明,等. UV-B 辐射对生物结皮层藓类植物生理生化指标的影响[J]. 干旱区地理:汉文版,2014,37(6):1222-1230.
- [8] 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[J]. 草地学报,2008,16(1):28-33.
- [9] 卜崇峰,杨建振,张兴昌. 毛乌素沙地生物结皮层藓类植物培育试验研究[J]. 中国沙漠,2011,31(4):937-941.
- [10] 杨永胜,冯伟,袁方,等. 快速培育黄土高原苔藓结皮的关键影响因子[J]. 水土保持学报,2015,29(4):289-294.
- [11] 肖波,王庆海,赵允格. 一种利用生物结皮防治水土蚀荒漠化的方法:中国,CN102204434A[P]. 2011-10-05.
- [12] 陈兰周,刘永定,李敦海,等. 荒漠藻类及其结皮的研究[J]. 中国科学基金,2003,17(2):90-93.
- [13] 胡春香,张德禄,刘永定,等. 荒漠藻结皮的胶结机理[J]. 科学通报,2002,47(12):931-937.
- [14] 刘永定,黎尚豪. 土壤藻类及其生理生态[J]. 水生生物学报,1993,17(3):272-277.
- [15] Hunt M E, Floyd G L, Stout B B. Soil algae in field and forest environments[J]. Ecology, 1979, 60(2):362-375.
- [16] 蔡燕飞,廖宗文. 土壤微生物生态学研究方法进展[J]. 土壤与环境,2002,11(2):167-171.
- [17] 王佳,马玥. 微生物肥料的应用是增加农作物产量的有效途径[J]. 发展,2011(10):68-71.
- [18] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J]. 自然资源学报,2012,27(8):1316-1326.
- [19] Castillo-Monroy A P, Bowker M A, Maestre F T, et al. Relationships between biological soil crusts, bacterial diversity and abundance, and ecosystem functioning: Insights from a semi-arid Mediterranean environment[J]. Journal of Vegetation Science, 2011, 22(1):165-174.
- [20] 文都日乐,李刚,张静妮,等. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J]. 草业学报,2010,19(5):94-102.
- [21] 闫德仁,王素英,吕景辉,等. 生物结皮层土壤微生物含量的变化[J]. 内蒙古林业科技,2008,34(2):1-5.
- [22] 杨建振. 陕北毛乌素沙地生物结皮的土壤水分效应及其人工培育技术初探[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [23] 卜崇峰,张侃侃,杨永胜,等. 一种沙地苔藓结皮的快速培育方法:中国,CN104350932A[P]. 2015-02-18.
- [24] 刘浩,沈银武. 一种利用微藻人工生物结皮修复矿山基质和绿化的方法:中国,CN103004417A[P]. 2013-04-03.
- [25] 袁方,张振师,卜崇峰,等. 毛乌素沙地光伏电站项目区风速流场及风蚀防治措施[J]. 中国沙漠,2016, V36(2):287-294.
- [26] 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.

- 影响[J]. 东北农业科学, 2000, 25(2): 5-28.
- [9] Fernandez-Ugalde O, Virto I, Bescansa P, et al. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 106(1): 29-35.
- [10] 潘雅文, 樊军, 郝明德, 等. 黄土塬区长期不同耕作、覆盖措施对表层土壤理化性状和玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1558-1567.
- [11] Chan K Y, Hecnan D P. Effect of tillage and stubble management on soil water storage, crop growth and yield in a wheat1 upin rotation in southern NSW[J]. Crop and Pasture Science, 1996, 47(3): 479-488.
- [12] 杨世琦, 吴会军, 韩瑞芸, 等. 农田土壤紧实度研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 226-232.
- [13] 程诗念, 樊贵盛. 玉米生育期内不同覆膜对黄土表层容重变化特性的影响[J]. 节水灌溉, 2017(6): 26-29.
- [14] 吕军杰, 姚宇卿, 王育红, 等. 不同耕作方式对坡耕地土壤水分的影响[J]. 中国农业气象, 2002, 23(3): 40-42.
- [15] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 125-130.
- [16] Comino E, Marengo P, Rolli V. Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 110(1): 60-68.
- [17] 石彦琴, 陈源泉, 隋鹏, 等. 农田土壤紧实的发生、影响及其改良[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 2057-2064.
- [18] 王群, 张学林, 李全忠, 等. 紧实胁迫对不同土壤类型玉米养分吸收、分配及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21): 4356-4366.
- [19] 张军刚, 郭海斌, 王文文, 等. 深耕对土壤理化性质及生物性状的影响[J]. 农业科技通讯, 2017(11): 186-187.
- [20] 武际, 郭熙盛, 张祥明, 等. 麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 87-93.
- [21] 刘建忠, 师江澜, 雷金银, 等. 毛乌素沙地南缘不同免耕农田土壤理化性质及玉米产量差异分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 29-34.
- [22] 李娅芸. 宁南山区典型植物根系分解特征及其对土壤养分和微生物多样性的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [23] Mahboubi A A, Lal R, Faussey N R. Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(2): 506-512.
- [24] 刘世平, 陈后庆, 聂新涛, 等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田土壤肥力的综合评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 51-56.
- ~~~~~
- (上接第 128 页)
- [27] Doherty K D, Antoninka A J, Bowker M A, et al. A Novel approach to cultivate biocrusts for restoration and experimentation[J]. Ecological Restoration, 2015, 33(1): 13-16.
- [28] 王伟波. 接种蓝藻修复生物土壤结皮的研究[D]. 湖北武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009.
- [29] 毕永红, 胡子宣. 念珠藻的接种对半荒漠土壤结构稳定性的作用[C]//中国地理学会土地变化科学与生态建设学术研讨会, 2004.
- [30] 周志刚, 程子俊. 土壤藻类对土壤团聚体稳定性的影响[C]//北京: 中国环境科学学会全国青年学者学术交流会, 1996.
- [31] 康磊, 孙长忠, 殷丽, 等. 黄土高原沟壑区藻类结皮的水土保持效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 47-52.
- [32] 曲娜, 闫德仁, 郭成峰, 等. 库布齐沙漠藻类结皮层表面裂隙对水分蒸发的影响[J]. 内蒙古林业科技, 2018(1): 29-32.
- [33] 张丙昌, 王敬竹, 玛依努尔, 等. 生物结皮中几种优势藻和齿肋赤藓(*Syntrichia caninervis* Mitt.) 种间关系研究[C]//生态文明建设中的植物学: 现在与未来: 中国植物学会第十五届会员代表大会暨八十周年学术年会论文集(第2分会场): 植物生态与环境保护, 2013.
- [34] 赵艳敏. 陕北黄土生物结皮种群特征及对土壤生物活性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [35] 李青梅, 陆秀君, 马里, 等. 胶质芽孢杆菌菌剂对四种蔬菜种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2017(1): 10-13.
- [36] 吕爱英, 王永歧, 沈阿林, 等. 6种微生物肥料在不同作物上的应用效果[J]. 河南农业科学, 2004, 33(4): 49-51.
- [37] 张晓波, 赵艳, 樊俊华. 山西地区褐土胶质芽孢杆菌生物学特性研究[J]. 草原与草坪, 2010, 30(4): 89-92.
- [38] 赵艳, 张晓波, 郭伟. 不同土壤胶质芽孢杆菌生理生化特征及其解钾活性[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2283-2286.
- [39] 李茹雪. 撒播苔藓结皮培育恢复技术研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.