

生物基复合改良剂对滨海盐渍土综合地力的提升作用

黄婷^{1,2}, 李媛^{1,2}, 甘泉峰^{1,2}, 杭慧娴^{1,2}, 苏愉程^{1,2}, 赵耕毛^{1,2}

(1.南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2.江苏省海洋生物学重点实验室, 江苏 南京 210095)

摘要: [目的] 研究生物基复合改良剂对黄河三角洲和苏北滩涂盐渍土壤理化性质及微生物区系的影响, 为该区盐碱地的改良利用和实现生态农牧建设提供科学参考。[方法] 采用由蚯蚓粪、活性酶调理剂和内生菌根菌剂组成的生物基复合改良剂为试验材料, 研究其在种植耐盐苜蓿条件下对黄河三角洲盐渍土、苏北滩涂盐渍土土壤理化性质和微生物区系的影响。共设置了4个处理: 黄河三角洲盐渍土不添加改良剂和添加改良剂, 苏北滩涂盐渍土不添加改良剂和添加改良剂。[结果] 在紫花苜蓿分枝期, 与不添加改良剂相比, 黄河三角洲和苏北滩涂两种盐渍土壤添加改良剂处理的土壤有机质含量分别增加了45.30%, 32.45%; 速效钾含量分别增加了41.00%, 39.92%。在紫花苜蓿现蕾期, 与不添加改良剂处理相比, 黄河三角洲和苏北滩涂两种盐渍土壤添加改良剂处理的土壤全盐量分别降低了14.10%和27.85%; 土壤有机质含量分别提高了51.99%, 73.59%。此外, 现蕾期的土壤微生物群落多样性指数明显增加, 优势菌门主要为变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、酸杆菌门(Acidobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和放线菌门(Actinobacteria)。土壤全盐量和速效钾含量是驱动细菌群落结构变化的主要环境因子。[结论] 生物基复合改良剂可以有效降低土壤全盐量, 增加土壤速效养分含量, 并改善土壤微生物区系, 从而显著提升土壤综合地力, 是改良滨海盐渍土的有效措施。

关键词: 改良剂; 滨海盐渍土; 土壤理化性质; 微生物区系; 黄河三角洲

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0099-08

中图分类号: S156.4⁺2

文献参数: 黄婷, 李媛, 甘泉峰, 等. 生物基复合改良剂对滨海盐渍土综合地力的提升作用[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 99-106. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.013; Huang Ting, Li Yuan, Gan Quanfeng, et al. Effects of bio-based compound amendments on overall soil fertility of coastal saline soils [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 99-106.

Effects of Bio-based Compound Amendments on Overall Soil Fertility of Coastal Saline Soils

Huang Ting^{1,2}, Li Yuan^{1,2}, Gan Quanfeng^{1,2}, Hang Huixian^{1,2}, Su Yucheng^{1,2}, Zhao Gengmao^{1,2}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China; 2.Jiangsu Provincial Key Laboratory of Marine Biology, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] The effects of bio-based composite amendments on the physicochemical properties and microbiota of saline soils in the Yellow River delta and the Northern Jiangsu mudflats were determined in order to provide a scientific reference for the improvement and utilization of saline soils in the region and for the ecological agro-pastoralism. [Methods] A pot experiment with alfalfa was conducted to study the influence of the application of compound biomaterials on the physico-chemical properties and microbial flora of coastal saline soils from the Yellow River delta (S) and the northern Jiangsu mudflats (J). The compound biomaterials consisted of vermicompost, active enzyme conditioners, and endophytic mycorrhizal inoculants. The experiment consisted of four treatments: the Yellow River delta soil with (SE) and without (SC)

收稿日期: 2021-12-13

修回日期: 2022-03-06

资助项目: 国家重点研发计划项目“滩涂增养殖技术与生态农牧化新模式”(2019YFD0900702; 2020YFD0900703); 国家自然科学基金中美联合项目(51961125103); 山东省重点研发项目(2019JZZY020614)

第一作者: 黄婷(1996—), 女(汉族), 福建省三明市人, 硕士研究生, 研究方向为盐渍土改良。Email: 2019103025@njau.edu.cn。

通讯作者: 赵耕毛(1975—), 男(汉族), 江苏省南通市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事沿海滩涂盐碱地治理、耐盐植物品种选育与栽培等方面的研究。Email: seawater@njau.edu.cn。

compound amendments, and the Northern Jiangsu tidal flat soil with (JE) and without (JC) compound amendments. [Results] Soil organic matter during the alfalfa branching stage increased by 45.30% and 32.45% in the SE and JE treatments, respectively, compared with the control treatment, and available potassium increased by 41.00% and 39.92%, respectively. Total dissolved salt in the soil during the alfalfa budding stage decreased by 14.10% and 27.85% in the SE and JE treatments, respectively, compared with the control treatment, and soil organic matter increased by 51.99% and 73.59%, respectively. Additionally, the diversity index of the soil microbial community during the budding stage was significantly increased compared with the control treatment, The dominant bacterial phyla were Proteobacteria, Bacteroidetes, Acidobacteria, Planctomycetes, and Actinobacteria. The total dissolved salt and available potassium in the soil were the main driving factors changing soil microbial community structure. [Conclusion] The bio-based compound amendments could effectively reduce the total dissolved salt in soil, increase soil available nutrients, and increase soil microbial flora, and thereby significantly improve overall soil fertility.

Keywords: coastal saline soil; amendment; soil physical and chemical properties; microflora; Yellow River delta

中国盐碱地总面积约 3.46×10^7 hm^2 , 约占全国可利用土地面积的 4.88%, 是宝贵的后备土地资源^[1]。黄河三角洲和苏北沿海地区是中国滨海盐碱地的两大主要区域, 黄河三角洲是黄河携带大量泥沙在入海地带沉积而成的扇形平原, 苏北滩涂是主要源自黄河、淮河带来的泥沙和长江向北流的潮流带来的泥质悬浮物共同堆积而成^[2]。两个地区的土壤均存在盐渍化严重、肥力水平低、生产力低下、微生物活性低、微生物区系单一等问题, 严重制约着该地区农业的可持续发展^[3-4]。为了坚守 1.20×10^6 hm^2 (18 亿亩) 耕地红线和实现耕地占补平衡, 加速盐碱地向耕地转变, 研发基于盐碱地改良基本原理的简单、实用、易推广的技术方法尤为重要^[5]。盐碱地改良主要有工程、化学、生物、农艺等技术措施, 进入 20 世纪, 化学改良技术得以重视并取得了明显进展。盐碱地调理剂是加速滨海盐碱地开发利用进程的重要工具和手段, 盐碱土调理剂能够明显改变团粒结构, 降低土壤容重, 提高水分入渗速率, 从而降低盐碱土盐分, 还可以提高土壤养分^[6-7]。目前常用的调理剂有高聚物^[8]、有机废弃物^[9]、含钙矿物等^[10], 调理剂主要是通过改变土壤胶体吸附性离子组成, 改善土壤结构来促进土壤脱盐和抑制返盐, 从而达到改良盐碱地的效果^[6]。蚯蚓粪是通过蚯蚓对有机废弃物进行生物降解的产物, 富含多种有益微生物以及植物生长调节物质, 具有通气性好、保水性强、有机质含量高、矿质养分丰富等特点^[11]。已有研究验证蚯蚓粪作为一种土壤改良剂和有机肥在滨海盐碱地的改良效果显著^[12], 以及在烤烟、水稻、紫花苜蓿、油菜、蔬菜、番茄等作物育苗及生长上也表现出良好效果^[13]。因为蚯蚓粪中大量的腐殖质可以改善土壤孔隙度, 大大提高其透气、透水 and 保水能力; 蚯蚓粪中还含有丰富的有机质和速效养分, 施入土壤后可以提高氮、磷、钾的供

给能力^[14]。另外, 微生物菌剂也常用来改良盐碱地, 微生物菌剂可以改善盐碱土的理化性质和生物性状, 同时为微生物的新陈代谢和生命活动提供丰富的能量、营养物质, 促进土壤微生物繁殖。逢焕成等^[15]研究表明施用菌剂有利于盐碱土壤钾细菌、枯草芽孢杆菌的生长繁殖, 还可以使盐碱土壤速效养分含量明显提高, 并有助于土层含盐量的降低。汪立梅等^[16]研究还表明在土壤中添加微生物菌剂和改良剂可以产生相互作用, 促进速效氮、磷、钾的释放。以往的研究主要集中在单一改良剂对盐碱地的改良, 而对多元化、复合型改良剂的改良效果较少, 且由于单一无机或有机改良剂的效果不全面或存在不同程度负面影响等问题^[17], 不同改良物料配合施用的改良效果及机理有待进一步研究。因此, 本研究将蚯蚓粪、活性酶调理剂和内生菌根菌剂 3 种物料混合成纯生物基复合改良剂, 在种植耐盐紫花苜蓿条件下, 研究生物基复合改良剂对黄河三角洲和苏北滩涂盐渍土壤理化性质及微生物区系的影响, 旨在为黄河三角洲和苏北滩涂盐碱地的改良利用和实现生态农牧建设提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤为滨海盐渍土, 采自江苏省盐城市大丰区南京农业大学海洋滩涂生态农牧化成果转化基地和山东省滨州市博兴县山东博毕农业有限公司试验基地, 分别代表苏北滩涂盐碱地和黄河三角洲滩涂盐碱地。供试作物为耐盐紫花苜蓿 (WL525HQ), 由北京正道种业有限公司提供, 该品种具有耐盐碱、生物量大、蛋白质含量高、适口性强等特点。商品有机肥 (有机质含量 $\geq 45\%$), 过磷酸钙 (硫 $\geq 8.0\%$, 有效锌 $\geq 2.0\%$, 水溶性磷 $\geq 7.0\%$, 有效磷 $\geq 12.0\%$), 硫酸钾

型复合肥(N-P₂O₅-K₂O=17-17-17)作为底肥施用,施用量分别为 6.00,0.60 和 0.45 t/hm²。复合改良剂由蚯蚓粪(有机质含量 23.3%,全氮 1.2%,全磷

0.8%,全钾 1.3%) 30.0 t/hm²,活性酶调理剂 0.6 t/hm²,内生菌根菌剂 0.03 t/hm²(有效繁殖个体 ≥70 个/ml)组成。土壤理化性质详见表 1。

表 1 供试滨海盐渍土基本理化性质

土壤类别	pH 值	全盐量/ (g · kg ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)	有机质/%	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)
苏北盐渍土	8.77	3.31	1.22	0.46	22.46	0.13	6.38
黄河三角洲盐渍土	8.82	3.47	1.66	0.73	35.12	0.14	8.83

1.2 试验设计

盆栽试验在南京农业大学资源与环境科学学院日光温室中进行。试验设 2 因素 2 水平,土壤类别(黄河三角洲盐渍土、苏北盐渍土)和生物基复合改良剂(不添加、添加),共计 4 个处理,分别为黄河三角洲盐渍土不添加生物基复合改良剂(SC)、黄河三角洲盐渍土添加生物基复合改良剂(SE)、苏北滩涂盐渍土不添加生物基复合改良剂(JC)、苏北滩涂盐渍土添加生物基复合改良剂(JE),各处理重复 6 次。将风干土过 1.00 mm 筛,与底肥和生物基复合改良剂混合均匀后装盆,盆钵上直径 18 cm,下直径 12 cm,高 15.5 cm,每盆装供试土壤 2.5 kg。播种前浇水浸湿土壤,总灌水量约 800 ml。于 2020 年 11 月 19 日进行播种,播种量每盆 100 粒,播种深度 1 cm,播种完成后,表面覆薄土。待幼苗长至三叶期时进行定苗,每盆留 30 株健壮植株。紫花苜蓿生长期间,每 2 d 补充 200 ml 去离子水,使田间持水量维持在 80% 左右。

1.3 测定项目与方法

分别于紫花苜蓿分枝期(2021 年 1 月 20 日)、现蕾期(2021 年 4 月 13 日)进行破坏性采样,各处理随机取 3 盆,土壤样品迅速放入已编号的自封袋,低温保存。带回实验室后将土样充分混匀后分成 2 份,一份保存于 -80 °C 冰箱中,用于土壤生物活性指标测定;另一份经风干分别过 1.00 mm 和 0.15 mm 筛,用于土壤基本理化性质指标的测定。

使用干燥法测定苜蓿干草产量;环刀法测定土壤容重;电导率仪测定土壤全盐量(水土比 5:1);重铬酸钾-外加加热法测定土壤有机质;碱解扩散法测定碱解氮;碳酸氢钠-钼锑比色法测定速效磷;乙酸铵制作浸提液,使用 ICP-OES 测定速效钾^[18]。用土壤 DNA 提取试剂盒(HiPure Soil DNA Kits, Magen, 中国)提取土壤样品的微生物 DNA,并用 NanoDrop 2000 分光光度计(Thermo Scientific, USA)检测核

酸纯度和 1 g/ml 琼脂凝胶电泳检测 DNA 的提取质量,使用引物 341 F(5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3')和 806 R(5'-GGACTACHVGGGTATCTAAT-3')对 V3 + V4 目标区域进行 PCR 扩增,之后使用 AMPure XP Beads(Beck-manCoulter, USA)进行 PCR 产物纯化,纯化后用 Qubit 3.0(ThermoFischer Scientific, USA)定量,进行第 2 轮扩增。使用 AMPure XP Beads 对第 2 轮扩增产物进行纯化,用 ABI StepOnePlus Real-Time PCR System(Life Technologies, USA)进行定量,根据 Novaseq 6 000(Illumina, USA)的样品要求规范化操作后,采用 PE250 模式上机测序。土壤样品微生物多样性具体测定过程由广州基迪奥生物科技有限公司完成。

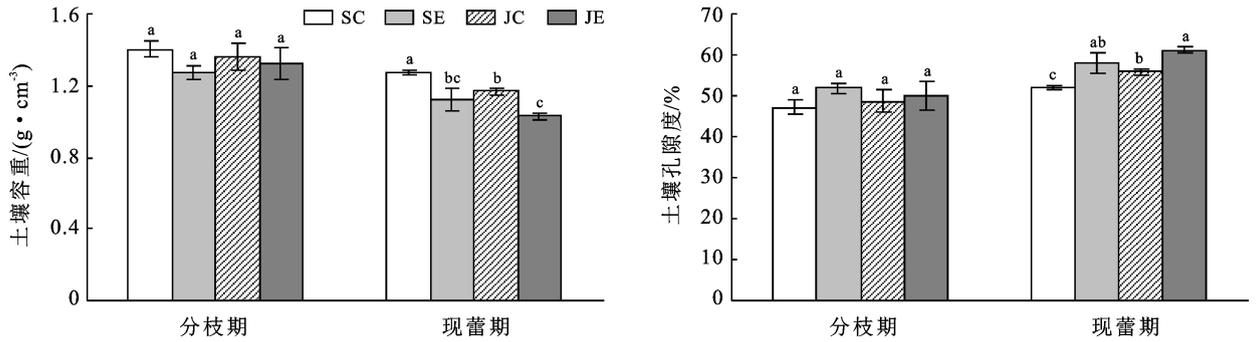
1.4 数据处理

采用 QIIME 软件计算物种数目(Sobs)、Shannon 指数、辛普森多样性指数(Simpson)、Chao 1 指数、覆盖度(goods coverage)、均匀度等。采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 进行土壤理化性质的数据处理,使用 SPSS 26.0 进行 ANOVA 单因素方差分析和 Pearson 相关性分析。使用 R 语言 version 2.2.1 生成物种相对丰度堆叠图,R 语言 version 1.0.12 生成相关性热图,Excel 2019 绘制柱形图。

2 结果与分析

2.1 生物基复合改良剂对土壤理化性质的影响

在紫花苜蓿分枝期,4 个处理的土壤容重在 1.28 ~1.40 g/cm³ 之间,孔隙度在 47.07%~51.89% 之间,处理间无明显差异($p > 0.05$)(图 1)。在现蕾期,各处理的土壤容重较分枝期有明显下降,SC,SE,JC,JE 处理分别下降了 9.63%,12.46%,13.96% 和 22.22%;SC,SE,JC,JE 处理的孔隙度较分枝期分别增加了 10.83%,11.54%,14.75% 和 22.07%,表明施用生物基复合改良剂对于降低盐碱地土壤容重、改善土壤结构具有重要作用。



注:①SC代表黄河三角洲盐渍土不添加生物基复合改良剂;SE代表黄河三角洲盐渍土添加生物基复合改良剂;JC代表苏北滩涂盐渍土不添加生物基复合改良剂;JE代表苏北滩涂盐渍土添加生物基复合改良剂;②不同字母表示同一生育期内不同处理间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 生物基复合改良剂对紫花苜蓿不同生育时期土壤容重和孔隙度的影响

在紫花苜蓿分枝期,土壤全盐量变化范围在 2.17~3.20 g/kg 之间(图 2),与 SC 处理相比,SE 处理的土壤全盐量下降了 8.48%,但 JE 和 JC 处理相比无明显差异($p > 0.05$),说明生物基复合改良剂对黄河三角洲盐渍土的土壤全盐量有明显影响,但对苏北滩涂盐渍土无明显影响。在现蕾期,土壤全盐量降低到 0.99~2.36 g/kg 之间,JE 处理的下降幅度最大,达到 47.97%;SE 处理较 SC 降低了 14.10%,JE 处理较 JC 处理降低了 27.85%。

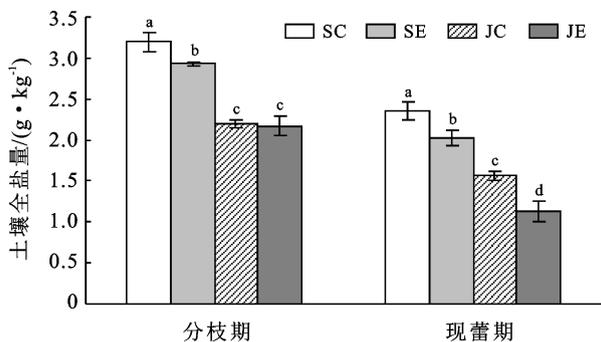


图 2 生物基复合改良剂对紫花苜蓿不同生育时期土壤全盐量的影响

在分枝期,土壤有机质含量在 0.82%~1.19% 之间变化,且处理间达到显著差异水平($p < 0.05$)。与 SC 处理相比,SE 的有机质含量提高 45.30%;JE 处理较 JC 提高 32.45%(图 3)。当紫花苜蓿生长到现蕾期,SE 处理较 SC 处理增加了 51.99%,JE 处理较 JC 处理增加了 73.59%。以上说明,生物基复合改良剂的添加可以增加土壤有机质含量,且同一处理在不同时期对有机质的影响程度和效果也有差异,与分枝期相比,SC,SE,JC,JE 处理在现蕾期的有机质含量增加,增长幅度分别为 2.85%,7.58%,1.04%,32.42%。

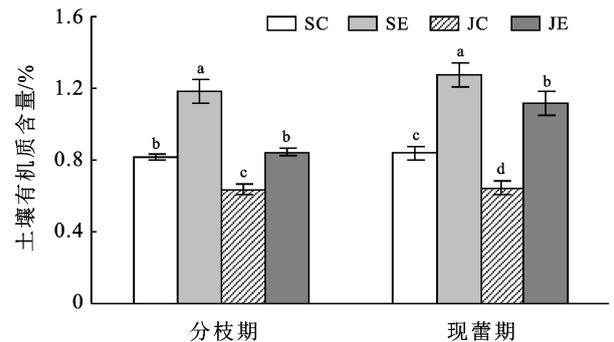


图 3 生物基复合改良剂对紫花苜蓿不同生育时期土壤有机质含量的影响

由图 4 可以看出,与不添加改良剂处理相比,生物基复合改良剂的添加能显著提高黄河三角洲和苏北滩涂盐渍土壤的速效磷和速效钾含量($p < 0.05$),但对碱解氮含量无明显作用($p > 0.05$)。在紫花苜蓿分枝期,土壤速效磷含量为 9.57~31.95 mg/kg ,与不添加改良剂处理相比,SE 处理增加了 1.92 倍;JE 处理增加了 1.93 倍(图 4a)。在现蕾期,土壤速效磷含量增加到 9.69~42.60 mg/kg 之间,SE,JE 处理较不添加处理分别增加了 2.93 和 2.36 倍(图 4b)。此外,在分枝期,JE 处理的速效钾含量达到 0.27 g/kg ,较 JC 处理增加 39.92%;SE 处理的速效钾含量为 0.24 g/kg ,较 SC 处理增加了 41.00%。在现蕾期,虽然整体速效钾含量降低,但添加生物基复合改良剂与不添加处理之间仍存在显著性差异($p < 0.05$),SE 处理较 SC 增加了 32.48%,JE 处理较 JC 增加 33.97%(图 4c)。施用生物基复合改良剂有利于黄河三角洲和苏北滩涂盐渍土壤速效养分的转化,提高速效磷和速效钾含量。

2.2 生物基复合改良剂对土壤微生物多样性及群落组成的影响

对两个时期的紫花苜蓿土壤进行高通量测序,测

定结果见表 2。各样品测序覆盖度在 98% 以上,表明此次测序结果可以比较真实地反映细菌群落情况。现蕾期紫花苜蓿土壤的细菌物种数量、Chao 1 指数明显高于分枝期,说明现蕾期紫花苜蓿土壤微生物丰富度增加。不同处理间的多样性指数无显著差异,但

在现蕾期,苏北滩涂 JE 处理的 Shannon 指数和 Simpson 指数显著低于其余处理,且与分枝期相比有所下降。这可能是由于在复合改良剂的作用下,盐分降低导致嗜盐细菌无法继续生存,致使物种丰富度降低。

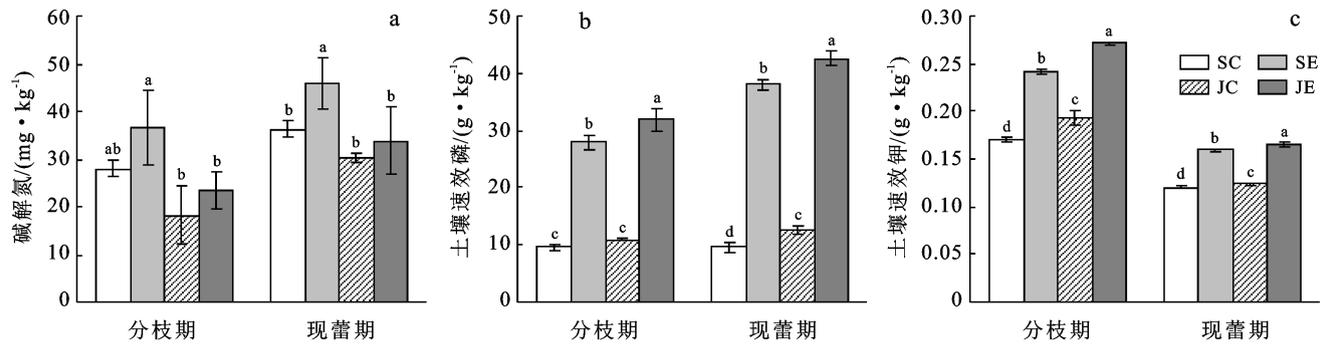


图 4 生物基复合改良剂对紫花苜蓿不同生育时期土壤碱解氮(a)、速效磷(b)和速效钾(c)含量的影响

表 2 不同处理下紫花苜蓿土壤的细菌群落多样性指数

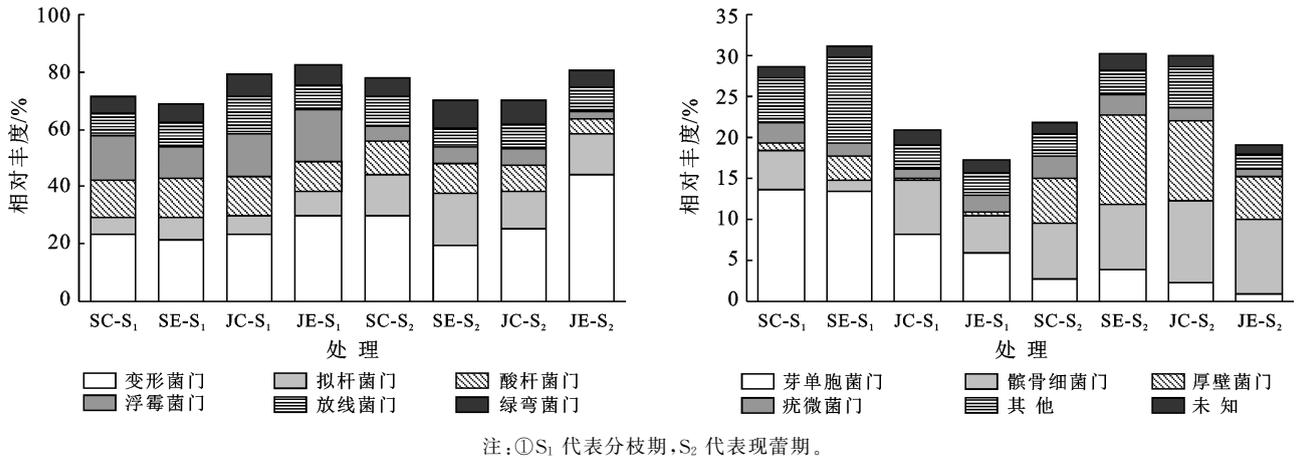
时期	处理	物种数目	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度	均匀度
分枝期	SC	3 383±177.5 ^a	3 760.43±203.3 ^a	9.59±0.10 ^a	0.994 5±0.00 ^a	0.99	357.67
	SE	3 173±235.2 ^a	3 495.26±229.7 ^a	9.19±0.68 ^a	0.979 9±0.03 ^a	0.99	345.50
	JC	3 233±112.0 ^a	3 596.96±76.58 ^a	9.56±0.08 ^a	0.995 2±0.00 ^a	0.99	337.31
	JE	3 199±67.56 ^a	3 540.82±86.26 ^a	9.75±0.09 ^a	0.995 3±0.00 ^a	0.99	330.27
现蕾期	SC	4 607±250.5 ^a	5 294.28±139.8 ^a	9.53±0.60 ^a	0.988 6±0.01 ^a	0.98	516.95
	SE	4 619±659.4 ^a	5 237.93±898.4 ^a	10.12±0.14 ^a	0.997 2±0.00 ^a	0.98	498.47
	JC	4 533±217.4 ^a	5 028.97±234.8 ^a	9.90±0.16 ^a	0.995 3±0.00 ^a	0.99	497.49
	JE	4 337±254.6 ^a	5 062.62±159.4 ^a	8.15±0.60 ^b	0.941 3±0.02 ^b	0.98	482.59

注:①Chao 1 指数反映物种丰富程度;Shannon,Simpson 指数体现物种的丰富度和均匀度,此处 Simpson 指数数值越大,多样性越高。②同列小写字母不同表示处理间差异达到显著水平($p < 0.05$)。下同。

由图 5 所示,变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、酸杆菌门(Acidobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和放线菌门(Actinobacteria)是所有处理的优势菌门,变形菌门(Proteobacteria)是相对丰度最大的优势菌门,分枝期占 21.58%~29.67%,现蕾期占 19.70%~44.24%。其中,现蕾期 JE 处理下变形菌门的相对丰度为 44.24%,较分枝期提高了 49.67%,较不添加改良剂处理提高了 76.01%。拟杆菌门(Bacteroidetes)的相对丰度在现蕾期也有明显提高,SC,SE,JC,JE 处理分别提高了 154.97%,130.14%,100.29%,62.67%。而酸杆菌门(Acidobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)的相对丰度在现蕾期下降。与不添加改良剂相比,添加改良剂可以增加变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)的相对丰度,降低酸杆菌门(Acidobacteria)和放线菌门(Actinobacteria)的相对丰度。

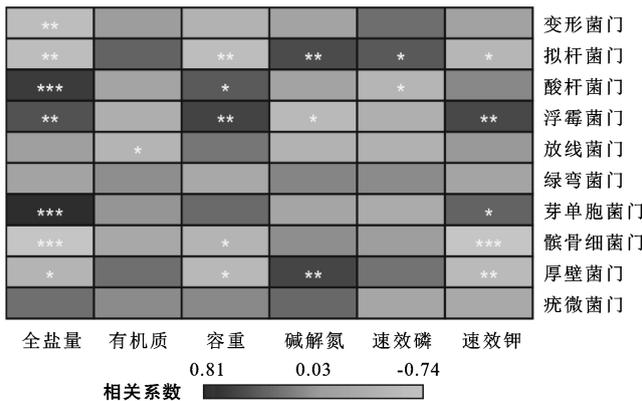
土壤微生物会随着土壤环境的改变而发生相应

改变,将土壤细菌群落与土壤肥力因子进行 Pearson 相关性分析(图 6),结果显示,土壤全盐量、容重和速效钾在门水平上影响的细菌种类较多,其中土壤全盐量对细菌菌门种类影响最大,与酸杆菌门(Acidobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)呈显著正相关,与变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、髌骨细菌门(Patescibacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)呈显著负相关。这说明土壤全盐量的降低能够促进变形菌门、拟杆菌门、髌骨细菌门、厚壁菌门等细菌种类提高丰度。其次是速效钾,与浮霉菌门(Planctomycetes)呈正相关,与髌骨细菌门(Patescibacteria)呈负相关。此外,拟杆菌门(Bacteroidetes)受土壤环境因子的影响最大,与土壤全盐量、容重和碱解氮、速效磷、速效钾呈显著相关。可见,土壤微生物受到多种土壤因子的影响,其中速效钾和土壤全盐量是驱动土壤细菌群落变化的主要环境因子,改变土壤细菌优势菌门的组成。



注:①S₁ 代表分枝期, S₂ 代表现蕾期。

图 5 门水平下的物种相对丰度堆叠图



注:①横轴表示环境因子,纵轴表示物种,颜色表示相关性强弱;

②*表示显著相关($p < 0.05$), **表示极显著相关($p < 0.01$), ***表示 $p < 0.001$ 水平极显著相关。

图 6 土壤肥力因子与细菌物种(仅列出门分类水平前 10 位)之间的相关性

2.3 生物基复合改良剂对紫花苜蓿生物量的影响

由表 3 可以看出,施用复合改良剂后,紫花苜蓿的生物量比未添加处理高,这表明改良剂能为紫花苜蓿的生长提供养分,保证苜蓿的生长和生物量的提高。其中,复合改良剂处理后的黄河三角洲盐渍土 SE 处理紫花苜蓿生物量最高,其次是添加复合改良剂的苏北滩涂盐渍土 JE 处理、未添加改良剂的 JC 处理和 SC 处理。添加复合改良剂与不添加复合改良剂处理之间紫花苜蓿生物量的差异达到显著水平($p < 0.05$)。

表 3 生物基复合改良剂对紫花苜蓿生物量的影响(g/株)

生育期	SC	SE	JC	JE
分枝期	0.28±0.01 ^b	0.60±0.14 ^a	0.34±0.04 ^b	0.53±0.07 ^a
现蕾期	1.49±0.20 ^c	3.64±0.56 ^{ab}	2.64±0.57 ^{bc}	2.96±0.88 ^a

为了明确生物基复合改良剂改良盐渍土壤的机制,对生物基复合改良剂处理的土壤理化性质、微生物多样性指数与紫花苜蓿生物量进行相关性分析(表 4)。土壤容重、土壤全盐量、速效磷和速效钾含量

与生物量均有显著相关性,其中,土壤容重和速效钾含量是极显著负相关($p < 0.01$,下同),这说明土壤容重的增大、过高的速效钾含量均不利于紫花苜蓿生长发育。此外,微生物的物种数目和 Chao 1 指数与紫花苜蓿生物量呈极显著正相关,可见微生物种类增多,丰富度增加有利于作物生长。土壤全盐量与土壤容重、速效磷和速效钾含量呈极显著相关,其中,速效磷含量是极显著负相关,土壤容重和速效钾含量是极显著正相关,即土壤容重越大,盐分就越高;盐分越高,土壤速效磷含量就越低,这说明土壤盐分降低有助于土壤磷素的释放。而碱解氮含量仅与有机质含量呈极显著正相关,因为有机质是土壤氮素的主要来源。因此,本研究认为生物基复合改良剂主要是通过降低土壤容重使土壤盐分随之降低,从而促进土壤养分的释放,土壤微生物种类增多,进一步促进紫花苜蓿的生长。

3 讨论

土壤容重对土壤的透气性、入渗性能和溶质迁移特性等有显著影响,适宜的土壤容重对作物生长发育和产量具有重要作用^[19]。本研究中,生物基复合改良剂可以降低黄河三角洲滩涂和苏北滩涂盐渍土壤容重,提高孔隙度。这与他人研究结果一致,究其原因,可能是由于蚯蚓粪含有大量腐殖质,因此施入土壤后可以调节土壤结构,大大提高其透气保水能力,改善土壤物理性质^[14]。而且,孔隙度的增加可以使入渗效率提高,加速土壤盐分的降低,加上紫花苜蓿能够吸收低浓度的钠离子,从而使得土壤全盐量会出现明显下降。此外,土壤有机质含量的提高能增加土壤透气性和土壤氮磷钾等有效养分含量,进而提升土壤地力^[19]。本研究中,施用生物基复合改良剂能提高滨海盐碱地的有机质、速效磷和速效钾含量,但对

土壤碱解氮含量的影响并不明显。这与已有的研究结果一致,汪立梅等^[16]研究表明,改良剂与微生物菌剂联合施用能增加耐盐植物土壤的有机质和有效磷

含量。王鼎^[20]在内蒙古河套平原进行试验研究表明不同类型复合调理剂对土壤盐分降低、有机质含量增加的作用显著。

表 4 土壤理化因子与紫花苜蓿生物量的相关性分析

指标	相关系数						
	生物量	土壤容重	土壤全盐量	有机质	碱解氮	速效磷	速效钾
生物量	1						
土壤容重	-0.839**	1					
土壤全盐量	-0.629*	0.832**	1				
有机质	0.556	-0.382	0.065	1			
碱解氮	0.564	-0.411	-0.003	0.862**	1		
速效磷	0.808*	-0.894**	-0.942**	0.199	0.269	1	
速效钾	-0.932**	0.887**	0.622*	-0.698*	-0.692*	-0.818**	1
物种数目	0.837**	-0.889**	-0.619*	0.562	0.552	0.751*	-0.877**
Chao 1	0.815**	-0.910**	-0.666*	0.532	0.548	0.788*	-0.878**
Shannon	-0.048	0.367	0.472	0.018	-0.100	-0.347	0.217
Simpson	-0.226	0.512	0.562	-0.078	-0.203	-0.461	0.366

注: **表示在 0.01 水平(双尾),相关性极显著; *表示在 0.05 水平(双尾),相关性显著。

除了土壤理化性质,土壤微生物也是构成土壤生态系统的重要成分,其在土壤养分循环转化、有机质分解过程中扮演着重要的角色,是衡量土壤质量、土壤肥力水平的重要指标之一^[21]。本研究中,现蕾期紫花苜蓿土壤的微生物多样性明显高于分枝期。除了苏北滩涂 JE 处理的 Shannon 指数和 Simpson 指数在现蕾期显著低于其余处理,其他处理间无显著差异,这可能是由于改良剂本身所含细菌的拮抗作用对土壤其他细菌的生存产生影响,或土壤盐分的降低导致嗜盐细菌的减少。而不同类型盐碱土在不同改良措施作用下,微生物变化特征也不尽相同^[22]。从细菌门水平上看,变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、酸杆菌门(Acidobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和放线菌门(Actinobacteria)为优势类群(图 5),这与牛世全等^[23]的研究结果类似。其中,现蕾期苏北滩涂 JE 处理的变形菌门相对丰度最高,变形菌门为富营养菌,相对丰度在高有机质水平下表现为增加,且变形菌门是盐渍土中最常见的菌门,包括许多耐盐细菌^[24]。另外,酸杆菌门的相对丰度在现蕾期出现明显下降,因为酸杆菌门是寡营养型细菌,改良物料施用后盐渍土性质得到改善,土壤中养分含量有所增加,导致酸杆菌门含量降低^[23]。微生物群落在土壤中处于一个动态平衡过程,土壤理化因子的变化会干扰土壤微生物群落的变化,从而影响土壤微生物的活性、生态功能以及土壤肥力^[25]。从微生物群落与土壤肥力因子的相关性可以看出,土壤氮磷钾养分含量与多个细菌种类呈显著正相关,土壤全盐量影响的细菌种类最多。在土壤全盐量、速效钾和容

重的共同影响下,土壤微生物群落发生变化。丁新景等^[26]在黄河三角洲 4 种人工林土壤细菌群落的研究中发现,速效磷和有机质含量等因子是影响土壤细菌群落结构及多样性的主要因素;也有研究者对不同植被类型土壤的细菌群落进行了研究,结果显示影响细菌群落丰度及多样性的因子主要是土壤有机质、速效氮、速效钾和全氮的含量^[27]。本研究认为在改良剂施用后,土壤容重、全盐量、速效钾等多种土壤因子会通过协同作用对土壤微生物群落产生影响^[28],使不同处理的群落结构及组成产生差异。

紫花苜蓿是一种耐旱耐盐碱的优质饲草兼绿肥作物。本研究发现,添加复合改良剂可以明显增加紫花苜蓿生物量,究其原因,是复合改良剂通过改善土壤理化性质和增加微生物多样性,为苜蓿生长创造了适宜的环境。在复合改良剂的作用下,土壤容重、全盐量、速效养分及微生物多样性等环境因子发生变化,相关性分析结果表明,土壤容重、全盐量的降低和速效磷、微生物种类的增加有利于紫花苜蓿的生长。盐碱土中盐分过多是影响植物生长的最主要因素,紫花苜蓿虽然具有耐盐能力,但过高盐分会阻止植物对营养元素的吸收,导致营养亏缺而影响生长^[29]。土壤全盐量与容重呈极显著正相关,与速效磷含量呈极显著负相关,这与李国辉、张雅贞等研究结果一致^[21-22]。可见,生物基复合改良剂使土壤容重和全盐量出现明显降低,改善了紫花苜蓿的生长环境,同时也提供了充足的速效养分。此外,微生物群落中有益细菌能够发挥激活养分和促生作用,这些微生物种类和多样性的增加也进一步促进了紫花苜蓿的生长发育。总之,

在生物基复合改良剂的作用下,土壤容重和全盐量降低,促进了土壤养分的释放,为紫花苜蓿创造了适宜的生长环境,而土壤微生物种类的增多也进一步促进了紫花苜蓿的生长发育。

4 结论

添加复合改良剂对黄河三角洲和苏北盐渍土均起到抑盐,改善土壤性质,提高微生物活性和增加紫花苜蓿生物量的作用。生物基复合改良剂不仅显著改善了土壤容重和孔隙度,还降低了土壤全盐量。添加复合改良剂后,土壤有机质、速效磷、速效钾含量以及微生物多样性均有提高,为紫花苜蓿提供了适宜的生长发育环境。因此,该生物基复合改良剂可以实现降低盐分和提升地力的生产目的,适宜在盐碱地改良中施用。但本研究仅进行了添加与未添加对两种类型盐渍土的对比试验,关于该改良剂的最佳配施比例还需进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.
- [2] 李芙蓉.滨海滩涂盐渍土覆盖阻盐控盐和土壤质量提升技术模式研究[D].安徽 马鞍山:安徽工业大学,2013.
- [3] 侯贺贺.黄河三角洲盐碱地生物措施改良效果研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2014.
- [4] 万欣,江浩,王磊,等.江苏沿海滩涂土壤改良技术研究进展[J].江苏林业科技,2017,44(5):43-47.
- [5] 朱家辉.滨海盐碱地控释掺混肥配施调理剂对玉米—小麦生长及土壤养分的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2017.
- [6] 姜增明,费云鹏,陈佳,等.土壤调理剂在盐碱地改良中的作用[J].北方园艺,2014(20):174-177.
- [7] 李国柱.盐碱土壤调理剂研究初探[J].新疆农垦科技,2020,43(12):29-32.
- [8] 龙明杰,张宏伟,谢芳,等.高聚物土壤结构改良剂的研究(II):高聚物对土壤肥料的作用[J].土壤肥料,2000,31(5):13-18.
- [9] 代立兰,张怀山,夏曾润,等.有机废弃物菌糠和醋糟对次生盐渍化土壤修复效果研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):218-222,251.
- [10] 吴洪生,陈小青,周晓冬,等.磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化性状及小麦生长的影响[J].土壤学报,2012,49(6):1262-1266.
- [11] 卢垟杰,杨晨曦.盐渍土施加蚯蚓粪对紫花苜蓿生长的影响[J].农业与技术,2020,40(9):24-26.
- [12] 王福友,王冲,刘全清,等.腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J].中国农业大学学报,2015,20(5):89-94.
- [13] 单颖,赵凤亮,林艳,等.蚯蚓粪对土壤环境质量和作物生长影响的研究现状与展望[J].热带农业科学,2017,7(6):11-17.
- [14] 刘一凡,杨丽娟,王红,等.蚯蚓粪肥在农业生产中的应用效果及研究进展[J].土壤通报,2021,52(2):474-484.
- [15] 逢焕成,李玉义,严慧峻,等.微生物菌剂对盐碱土理化和生物性状影响的研究[J].农业环境科学学报,2009,28(5):951-955.
- [16] 汪立梅,桂丕,李化山,等.改良剂与微生物菌剂联合施用对盐碱地土壤和耐盐植物的影响[J].江苏农业科学,2018,46(17):264-269.
- [17] 陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].生态环境,2008,17(3):1282-1289.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 王涵.不同有机物料对滨海盐碱土改良效果的研究[D].吉林 长春:吉林农业大学,2018.
- [20] 王鼎.复合土壤调理剂对内蒙古河套灌区盐碱土治理效果研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [21] 李国辉,宋付朋,骆洪义,等.不同有机肥用量对滨海盐渍土盐分表聚性及物理性状的影响[J].山东农业科学,2019,51(5):83-88.
- [22] 张雅贞,李跃进,景宇鹏,等.施用有机肥对土默川平原盐碱土壤盐分及养分特征的影响[J].北方农业学报,2019,47(6):34-41.
- [23] 牛世全,龙洋,李海云,等.应用 Illuminamiseq 高通量测序技术分析河西走廊地区盐碱土壤微生物多样性[J].微生物学通报,2017,44(9):2067-2078.
- [24] 孙慧,张建锋,许华森,等.余姚滨海不同盐碱度土壤微生物群落组成及土壤酶活性的变化[J].应用生态学报,2016,27(10):3361-3370.
- [25] 李娟,赵秉强,李秀英,等.长期不同施肥制度下几种土壤微生物学特征变化[J].植物生态学报,2008,32(4):891.
- [26] 丁新景,黄雅丽,敬如岩,等.基于高通量测序的黄河三角洲 4 种人工林土壤细菌结构及多样性研究[J].生态学报,2018,38(16):5857-5864.
- [27] 戴雅婷,闫志坚,解继红,等.基于高通量测序的两种植被恢复类型根际土壤细菌多样性研究[J].土壤学报,2017,54(3):735-748.
- [28] Chaparro J M, Sheflin A M, Manter D K, et al. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012,48(5):489-499.
- [29] 徐双,柳新伟,崔德杰,等.不同施肥处理对滨海盐碱地棉花生长和土壤微生物及酶活性的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):316-320.