

李云龙, 许益伟, 郁洁, 等. 蚯蚓粪施用对滨海盐碱地土壤质量及玉米产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(11): 2053-2061.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.11.009

蚯蚓粪施用对滨海盐碱地土壤质量及玉米产量的影响

李云龙¹, 许益伟¹, 郁洁², 仇美华², 王绪奎², 左文刚¹, 单玉华¹, 柏彦超^{1,3}
(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏省耕地质量与农业环境保护站, 江苏 南京 210029; 3.江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 江苏 南京 210018)

摘要: 为探究外源有机物料施用对滨海盐碱地土壤质量及玉米产量的影响,以蚯蚓粪作为外源有机物料,本研究设置对照(CK)、蚯蚓粪低施用量(V50)、蚯蚓粪中施用量(V100)和蚯蚓粪高施用量(V200)共4个处理,探讨施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤理化性质、酶活性、微生物碳源利用情况、微生物群落组成以及对玉米生长和产量的影响。研究表明,与对照相比,施用蚯蚓粪的滨海盐碱地玉米株高、生物量及产量显著提升;蚯蚓粪改良后滨海盐碱地土壤pH、盐分含量显著降低,有机碳、全氮、碱解氮和有效磷含量显著增加;施用蚯蚓粪后土壤二乙酸荧光素水解酶、蔗糖酶、脲酶及碱性磷酸酶活性显著提高,土壤微生物碳源代谢活性、香农多样性指数以及丰富度指数显著提升,对氨基酸、酚酸、碳水化合物类能源的代谢能力显著增强。此外,高通量测序结果显示,蚯蚓粪重塑了滨海盐碱地土壤微生物群落,脱硫单胞菌属、芽孢杆菌属、被孢霉属等功能微生物类群的优势地位明显提升;普鲁克分析结果显示,蚯蚓粪施用后滨海盐碱地玉米生长及产量的提升与土壤理化性状、酶活性、微生物群落组成及功能多样性的改善显著相关。综上,蚯蚓粪可以通过消减土壤盐害、碱害,增加土壤有机碳固持、提升养分供应,重塑微生物群落并提升其功能多样性,从而改善滨海盐碱地土壤质量,促进玉米增产。其中,高施用量处理对滨海盐碱地土壤改良及玉米产量的提升效果最佳,但单位有机物增产量有所降低。本研究结果对保障滨海盐碱地农业可持续发展具有重要意义。

关键词: 滨海盐碱地; 蚯蚓粪; 土壤质量; 玉米产量

中图分类号: S156.4; S156.91 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)11-2053-09

Effects of vermicompost application on soil quality and maize yield in coastal saline-alkali land

LI Yunlong¹, XU Yiwei¹, YU Jie², QIU Meihua², WANG Xukui², ZUO Wengang¹, SHAN Yuhua¹, BAI Yanchao^{1,3}

(1.College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2.Jiangsu Farmland Quality and Agricultural Environmental Protection Station, Nanjing 210029, China; 3.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210018, China)

Abstract: In order to explore the effects of exogenous organic ameliorant application on soil quality and maize yield in coastal saline-alkali land, vermicompost was chosen as exogenous organic ameliorant. Four treatments were set up, including non-vermicompost application control (CK), vermicompost application rate of 50 t/hm² (V50), vermicompost application

rate of 100 t/hm² (V100), and vermicompost application rate of 200 t/hm² (V200). The effects of vermicompost application on soil physicochemical properties, enzyme activity, microbial carbon source utilization pattern, microbial community composition, and maize growth and yield in coastal saline-alkali land were investigated. The results

收稿日期: 2024-09-07

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(23)1019]

作者简介: 李云龙(1989-), 男, 山西晋中人, 博士, 讲师, 主要从事土壤修复和土壤微生物生态研究。(E-mail) liyunlong@yzu.edu.cn

通讯作者: 柏彦超, (E-mail) ycbai@yzu.edu.cn

showed that compared with the control, the plant height, biomass and yield of maize in coastal saline-alkali land with vermicompost were significantly increased. After the application of vermicompost, the soil pH and salt content decreased significantly, and the contents of organic carbon, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus increased significantly. After the application of vermicompost, the activities of soil fluorescein diacetate hydrolase, sucrase, urease and alkaline phosphatase were significantly increased, the metabolic activity of soil microbial carbon source, Shannon diversity index and richness index were significantly increased, and the metabolic ability to amino acids, phenolic acids and carbohydrates was significantly enhanced. In addition, the results of high-throughput sequencing showed that vermicompost reshaped the soil microbial community in coastal saline-alkali land, and the dominant position of functional microbial groups such as *Desulfo-**monas*, *Bacillus* and *Mortierella* was significantly improved. Procrustes analysis indicated that the improvement of maize growth and yield in coastal saline-alkali land after vermicompost application was significantly correlated with the improvement of soil physical and chemical properties, enzyme activity, microbial community composition and functional diversity. In summary, vermicompost could improve soil quality and promote maize yield by reducing soil salt and alkali damage, increasing soil organic carbon, improving nutrient supply, reshaping microbial communities and enhancing their functional diversity. The treatment of vermicompost at application rate of 200 t/hm² exhibited the best effect on the improvement of soil quality and maize yield, but the increment of maize yield resulted by organics per unit mass decreased. The results of this study are of great significance to ensure the sustainable development of agriculture in coastal saline-alkali land.

Key words: coastal saline-alkali land; vermicompost; soil quality; maize yield

在中国耕地资源日趋紧缺,粮食安全面临严峻挑战的背景下,滨海盐碱地作为重要的后备耕地资源,其合理利用对缓解人地供需失衡、端牢中国人饭碗具有重要战略意义^[1]。然而,受土壤母质、海潮冲积及地下水位高等因素影响,滨海盐碱地具有高pH、高盐含量、有机碳含量低、氮磷养分亏缺、微生物活性弱及群落组成单一等特殊性状,严重制约滨海盐碱地作物生产^[2-3]。因此,开展盐碱地高效改良,消减土壤障碍因子,实现作物稳产丰产,是滨海盐碱地农业可持续发展的重要课题。

降低土壤盐分含量是滨海盐碱地土壤改良的先决条件。现阶段,消减滨海盐碱地障碍因子的农业措施主要涵盖了水利、物理、生物和化学改良^[4-5]。水利改良遵循“盐随水来,盐随水去”的水盐移动规律,通过明沟排水、暗管排盐等途径促进土壤盐分淋洗,土壤脱盐效果明显^[6-7];物理改良多采用原位土层整改、秸秆覆盖等措施降低地表水分蒸发,有效阻断土壤返盐^[8-9];生物改良主要涉及耐盐作物的培育及种植,通过其独特的渗透调节机制,增加地表覆盖,减缓地表盐分积累^[10-11]。化学改良则主要通过施用钙质改良剂(如脱硫石膏)、酸性改良剂(如腐殖酸等)及有机改良剂(如生物炭)等,置换滨海盐碱地土壤胶体吸附的Na⁺和Cl⁻,从而实现滨海盐土的快速降盐^[12-13]。然而,受限于水资源耗费大且易返盐、投资成本高、见效周期长等因素制约,相关改

良措施在生产上的推广面临严峻挑战。

近年来,以增加土壤有机碳为主导的有机培肥措施成为滨海盐碱地土壤改良的重要农业实践,增加土壤有机碳固持不仅可以提升滨海盐土的养分供给能力,还能改善土壤团粒结构,阻断土壤毛细作用,抑制返盐。相关研究结果表明,通过施用外源有机物料(如农家肥、畜禽粪便、污水污泥等)可以改善滨海盐碱地土壤质量,从而提升作物产量,是一种实现农业废弃资源循环利用,保障滨海盐土农业绿色发展的重要措施^[14]。现有研究结果表明,施用外源有机物料可有效消减滨海盐碱地土壤中的障碍因子,促进土壤微生物群落优化重组,提升微生物群落功能活性及多样性,从而实现作物增产^[15-17]。然而,受土壤类型、物料种类及施用量、改良模式等诸多因素影响,目前关于有机改良对滨海盐碱地土壤品质及作物生长等的影响存在较大的不确定性,尚未形成较为成熟的结论,仍需进一步探究^[18-20]。例如,Zhang等^[21]研究发现有机(畜禽粪便)改良显著提升了盐渍土壤中微生物的数量及群落多样性;而Lu等^[22]的研究结果却表明施用外源有机物料(腐熟秸秆、有机肥)对盐渍土壤中微生物群落结构沃土化具有负面影响;Li等^[16]和Kang等^[23]研究发现,盐渍土壤微生物群落多样性及功能活性与有机物料(污泥、蚯蚓粪)施用量间不成线性关系。有鉴于此,本研究依托南通滨海试验基地,选取蚯蚓粪作为外源有机物料,研究蚯蚓粪的施用对

滨海盐碱地土壤品质及作物产量的影响,以期对滨海盐碱地合理培肥、提升作物产量提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

大田试验位于江苏省南通市如东县栟茶镇方凌垦区(121°23'23"E, 32°20'03"N),距离黄海海岸线约1.0 km。该地区海拔约4 m,属亚热带海洋性季风气候,年平均温度为15.1℃,年平均降雨量为1 000 mm。试验区于2010年围垦,为淤涨型的淤泥质海滩,滨海相地貌,地形平缓,土壤属于典型的盐碱土,试验前供试土壤主要理化性质为:pH 9.02,盐分含量0.851%,有机质含量1.97 g/kg,全氮含量0.28 g/kg,全磷含量0.51 g/kg;地下水pH为8.25,盐分含量为0.072%。

1.2 试验设计及样品采集

选取蚯蚓粪(主要理化性质:pH 6.33,盐分含量0.843%,有机质含量464 g/kg,全氮含量19.27 g/kg,全磷含量24.12 g/kg)作为外源有机物料,共设置4个处理,分别是不施蚯蚓粪的空白对照(CK)、施50 t/hm²蚯蚓粪的低施用量处理(V50)、施100 t/hm²蚯蚓粪的中施用量处理(V100)和施200 t/hm²蚯蚓粪的高施用量处理(V200)。随机区组设计,各处理分别设置3个平行小区,各小区面积均为16 m²(长×宽=4.0 m×4.0 m)。2019年10月将蚯蚓粪按照设计用量一次性施入,采用旋耕机将其与0~20 cm土层充分混匀。蚯蚓粪改良近1年后于2020年7月进行玉米播种(玉米品种为江玉877,播种量30.0 kg/hm²,株行距均为40~50 cm),施肥及田间管理措施与当地农场玉米生产保持一致。

1.3 样品采集与测定

2020年10月底,各小区分别采集9株代表性玉米植株测定株高及生物量,各小区实收测产,并根据小区面积和小区产量折算每1 hm²产量及单位有机物料增产量(与空白对照相比,单位有机物料处理对应的作物增产量);采用“五点取样法”采集各处理小区0~20 cm土层土壤,采集的土壤样品过2 mm筛后混匀、分装保存,用于后续土壤理化性质及微生物胞外酶活性及碳源代谢活性测定。

1.3.1 土壤理化性质测定 参照《土壤农化分析》^[24]对土壤pH(电极法)、盐分含量(电导法)、有

机碳含量(H₂SO₄-K₂Cr₂O₇湿烧法)、全氮含量(凯氏定氮法)、全磷含量(硫酸-高氯酸消解法)、碱解氮含量(碱解扩散法)、有效磷含量(碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法)进行测定。

1.3.2 土壤微生物胞外酶活性及碳源代谢活性测定 分别采用二乙酸荧光素水解法、3,5-二硝基水杨酸比色法、苯酚钠-次氯酸钠比色法和磷酸苯二钠比色法^[25-26]对土壤微生物总酶活性(二乙酸荧光素水解酶活性)、蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性进行测定。本研究中,二乙酸荧光素水解酶、蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性分别以每1 g干土培养24 h后荧光素、葡萄糖、NH₃-N和酚类物质的含量表示。采用Biolog-ECO生态平板法^[27-28]对土壤微生物碳源代谢活性进行测定,利用平均颜色变化率(Average well color development, AWCD)反映土壤微生物的碳源代谢活性。

1.3.3 土壤DNA提取及Illumina高通量测序 采用FastDNA[®] Spin Kit for Soil试剂盒提取土壤总DNA,采用超微量分光光度计检测DNA纯度和质量浓度。利用引物515-F(5'-GTGCCAGCMGCCGCGG-3')和907-R(5'-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3')对土壤细菌16S rDNA的V4~V5区进行扩增。利用引物ITS1(5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3')和ITS2(5'-GCTGCGTTCCTTCATCGATGC-3')对土壤真菌的ITS1区进行扩增。PCR扩增产物经纯化后利用Illumina MiSeq测序平台完成高通量测序^[29]。

1.4 数据分析

利用QIIME软件对高通量测序平台下机序列进行拼接和引物去除等质量控制操作,去除低质量序列,提高后续序列融合比率,对经过质量控制后的序列进行聚类。将细菌(置信度阈值80%)和真菌(置信度阈值70%)的代表序列分别同细菌数据库(Greengenes 13_8)和真菌数据库(UNITE)进行比对,并进行抽平处理(细菌抽平深度60 000;真菌抽平深度44 000),解析细菌和真菌群落组成多样性。采用Excel 2016和SPSS 19.0进行数据整理统计分析,本研究为单因素试验,采用单因素方差(ANOVA)结合邓肯氏(Duncan's)多重比较后检验对不同处理组间玉米株高、生物量、产量、土壤理化性质、酶活性、碳源利用活性及多样性、微生物群落组成多样性等进行差异显著性分析($P<0.05$);采用普鲁克分析方法对土壤理化、酶活性、微生物碳源利用、微

生物群落组成、玉米生长及产量的关联程度进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地玉米生长及产量的影响

由表 1 可知,相较于 CK,施用蚯蚓粪显著增加了玉米株高及生物量($P<0.05$),其中 V200 处理玉米株高和生物量分别达到 205.0 cm 和 6.78 t/hm²。产量方面,与 CK 相比,V50、V100、V200 处理玉米产量分别达到 0.68 t/hm²、0.75 t/hm²和 0.85 t/hm²,均显著高于对照($P<0.05$)。此外,V50、V100、V200 处理玉米单位有机物增产量分别为 2.60 kg、2.00 kg 和 1.50 kg,随着蚯蚓粪施用量的增加,单位有机物对玉米的增产量呈降低趋势。

2.2 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤理化性质的影响

施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤中盐、碱等障碍因子消减、有机质含量提升以及氮磷等土壤养分改善具有显著促进作用($P<0.05$)(表 2)。盐碱障碍因子方面,土壤 pH 及盐分含量随蚯蚓粪施用量的

增加呈下降趋势。与 CK 相比,V50、V100、V200 处理土壤 pH 及盐分含量均显著降低,其中 V200 处理土壤 pH 和盐分含量降低最显著;相较于 CK,V50、V100、V200 处理土壤有机碳含量均显著提升,分别达到 13.40 g/kg、18.23 g/kg 和 24.96 g/kg;与 CK 相比,施用蚯蚓粪的滨海盐碱地土壤中全氮、碱解氮和有效磷含量显著增加,并且随蚯蚓粪施用量的增加而增加,其中 V200 处理相关养分含量分别达到 1.50 g/kg、202.0 mg/kg 和 194.6 mg/kg。

表 1 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地玉米生长及产量的影响

Table 1 Effects of vermicompost application on maize growth and yield in coastal saline-alkali land

处理	株高 (cm)	生物量 (t/hm ²)	产量 (t/hm ²)	单位有机物 增产量(kg)
CK	150.0±6.1c	2.51±0.33d	0.55±0.08d	
V50	175.0±3.9b	4.12±0.26c	0.68±0.11c	2.60±0.13a
V100	198.0±10.3a	5.03±0.51b	0.75±0.09b	2.00±0.13b
V200	205.0±12.3a	6.78±0.23a	0.85±0.13a	1.50±0.16c

CK、V50、V100、V200 分别表示对照、蚯蚓粪低施用量、蚯蚓粪中施用量和蚯蚓粪高施用量。表中数据为平均值±标准差,同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 2 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of vermicompost application on soil physicochemical properties in coastal saline-alkali land

处理	pH	盐分含量 (%)	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)
CK	9.54±0.01a	0.521±0.011a	5.46±0.36d	0.40±0.02d	0.33±0.01b	48.98±2.61d	20.22±2.39d
V50	9.27±0.12b	0.473±0.019b	13.40±0.82c	0.63±0.07c	0.56±0.07b	82.24±4.94c	81.62±4.97c
V100	9.05±0.04c	0.360±0.008c	18.23±0.96b	0.99±0.07b	1.04±0.16a	132.40±6.59b	130.52±6.30b
V200	8.99±0.03c	0.333±0.009d	24.96±0.97a	1.50±0.05a	1.19±0.03a	202.00±4.63a	194.60±1.28a

CK、V50、V100、V200 见表 1 注。表中数据为平均值±标准差,同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.3 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤酶活性的影响

由图 1 可知,施用蚯蚓粪后滨海盐碱地土壤中酶的活性与对照相比显著提升($P<0.05$)。V50、V100、V200 处理土壤中二乙酸荧光素水解酶活性均显著高于对照,分别达到 2.152 μg/(g·h)、2.443 μg/(g·h) 和 2.707 μg/(g·h)(图 1A);V50、V100、V200 处理蔗糖酶活性显著高于对照,其中 V200 处理比对照提升了 188.2%(图 1B);V50、V100、V200 处理土壤中脲酶及碱性磷酸酶活性与对照相比差异均达显著水平,且随着蚯蚓粪施用量增加脲酶和碱性磷酸酶活性显著提升,其中 V200 处理脲酶和碱性磷酸酶活性最高,分别达到 0.046

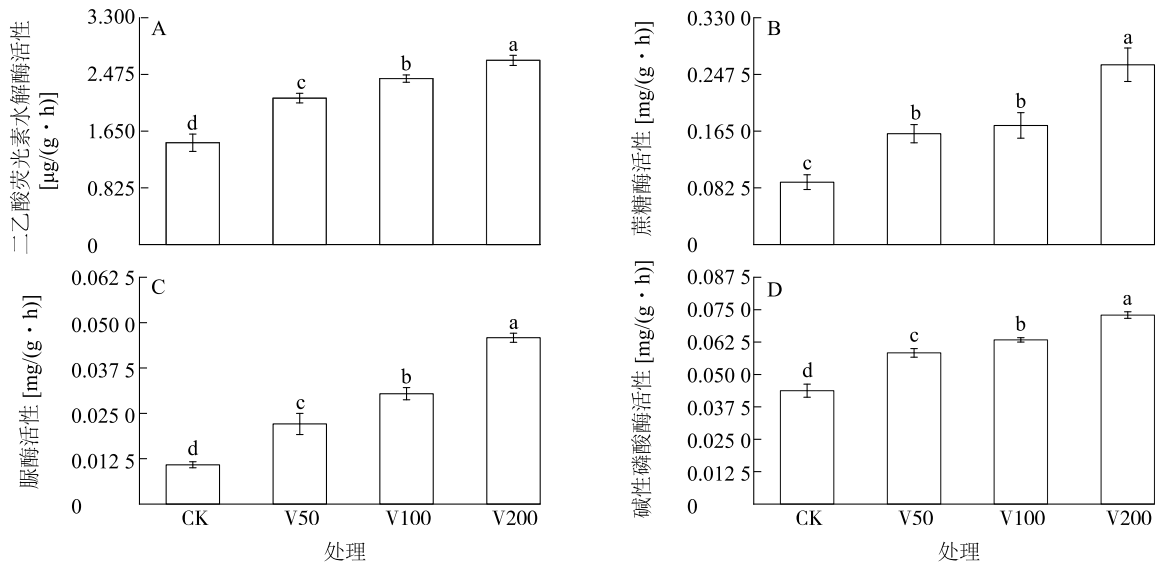
mg/(g·h)、0.073 μg/(g·h)(图 1C、图 1D)。

2.4 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤微生物碳源利用的影响

由图 2 可知,施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤微生物碳源利用产生了不同程度的影响。V50、V100、V200 处理土壤微生物碳源代谢活性与 CK 相比显著提升,且随着蚯蚓粪施用量的增加而显著提升,其中 V200 处理土壤微生物碳源代谢活性达到 0.70,显著高于其他处理组(图 2A)。微生物碳源代谢多样性方面,与 CK 相比,V50、V100、V200 处理香农多样性指数均显著提升(图 2B)。土壤微生物可利用碳源的丰富度指数方面,V50、V100、V200 处理丰富

度指数均显著高于 CK, 分别达到 11.3、15.3 和 21.0, 且随着蚯蚓粪施用量增加土壤微生物丰富度指数显著提升(图 2C)。由图 2D 可知, 土壤微生物对氨基酸类碳源、酚酸类碳源及碳水化合物类碳源

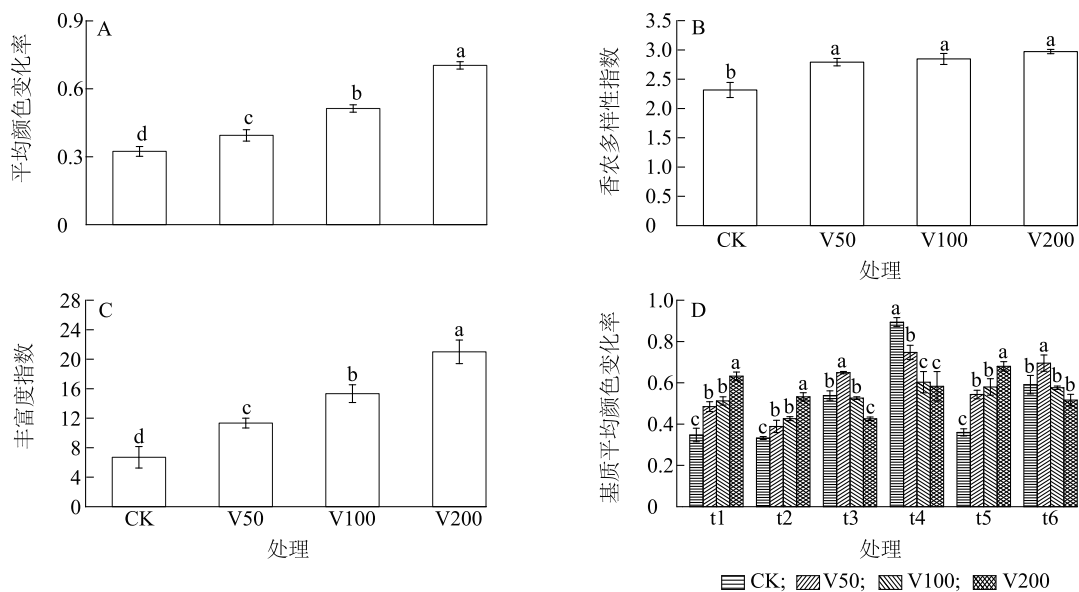
的代谢活性随蚯蚓粪施用量的增加而增加, 且均显著高于 CK; 而对胺类碳源及羧酸类碳源的代谢活性则呈先升高后降低的趋势; 对多聚物类碳源的代谢活性与 CK 相比显著降低。



A、B、C 和 D 分别为不同处理土壤中二乙酸荧光素水解酶、蔗糖酶、脲酶及碱性磷酸酶的活性;图柱上不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$); CK: 对照不施蚯蚓粪, V50: 50 t/hm² 蚯蚓粪低施用量处理, V100: 100 t/hm² 蚯蚓粪中施用量处理, V200: 200 t/hm² 蚯蚓粪的高施用量处理。

图 1 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤酶活性的影响

Fig.1 Effects of vermicompost application on soil enzyme activity in coastal saline-alkali land



A、B、C 和 D 分别为不同处理土壤微生物碳源代谢活性、香农多样性指数和丰富度指数以及对不同种类碳源的代谢能力。CK、V50、V100、V200 见图 1 注。t1: 氨基酸, t2: 酚酸, t3: 胺, t4: 多聚物, t5: 碳水化合物, t6: 羧酸; 图柱上不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

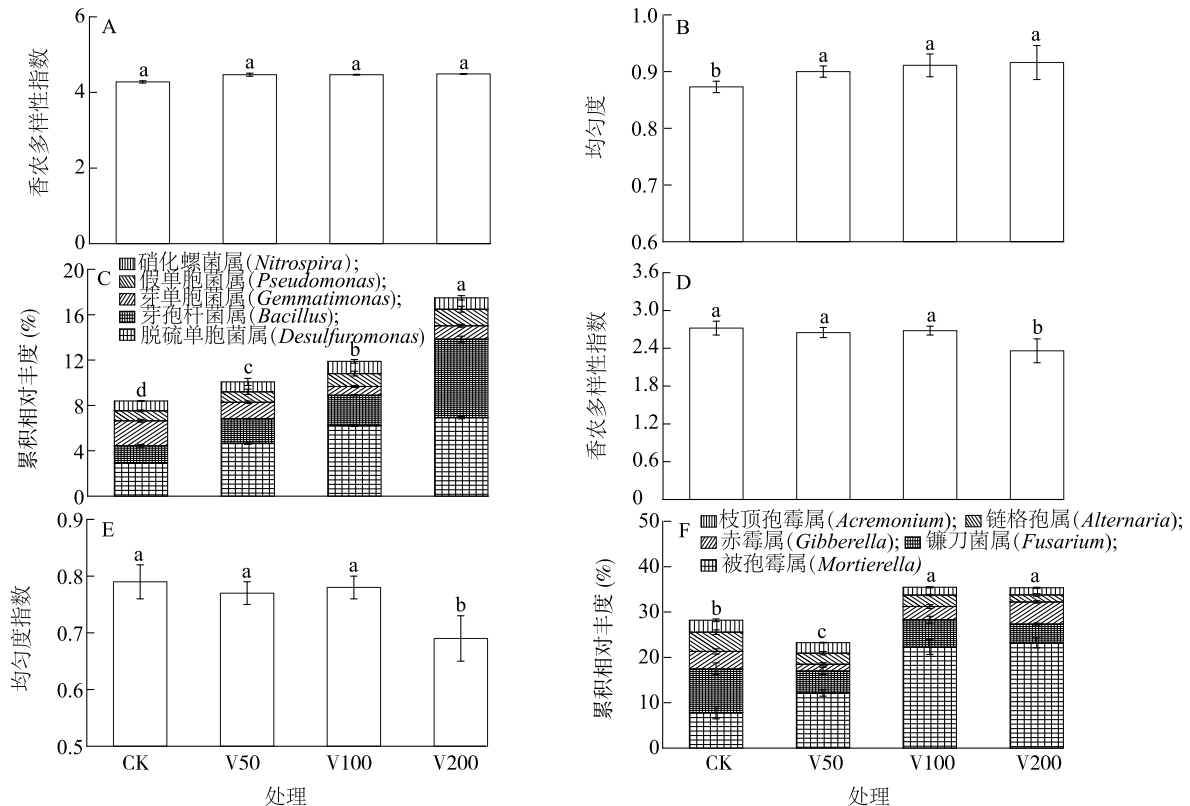
图 2 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤微生物碳源利用的影响

Fig.2 Effects of vermicompost application on soil microbial carbon source utilization in coastal saline-alkali land

2.5 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤微生物群落的影响

图3为施用蚯蚓粪后滨海盐碱地土壤微生物群落的变化情况。细菌群落方面,施用蚯蚓粪对土壤细菌群落香农多样性指数的影响不显著(图3A),但显著提升了土壤细菌群落的均匀度指数(图3B)。脱硫单胞菌属(*Desulfuromonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、芽单胞菌属(*Gemmatimonas*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、硝化螺菌属(*Nitrospira*)细菌为不同处理组间的优势细菌类群,其累积相对丰度随蚯蚓粪施用量的增加而显著提升,分别为8.4%(CK)、10.1%(V50处理)、11.9%(V100处理)和17.5%(V200处理)。随着蚯蚓粪施用量的增加,土壤中占据主导地位地位的细菌类群发生了转变,由脱硫单胞

菌属细菌占比最高(CK及V50、V100处理)转变为芽孢杆菌属细菌占比最高(V200处理)(图3c)。真菌群落方面,V200处理土壤真菌群落香农多样性指数和均匀度指数显著低于其他处理(图3D、图3E)。被孢霉属(*Mortierella*)、镰刀菌属(*Fusarium*)、赤霉属(*Gibberella*)、链格孢属(*Alternaria*)、枝顶孢霉属(*Acremonium*)真菌为不同处理组间的优势真菌类群,其累积相对丰度随蚯蚓粪施用量的增加先降低后增加再趋于平稳,分别为28.2%(CK)、23.3%(V50处理)、35.5%(V100处理)和35.4%(V200处理)。随着蚯蚓粪施用量的增加,土壤中占据主导地位的真菌类群也发生了转变,由镰刀菌属真菌占比最高(CK)转变为被孢霉属真菌占比最高(V50、V100、V200处理)(图3F)。



A、B和C分别为施用蚯蚓粪对土壤细菌群落香农多样性指数、均匀度指数及优势细菌属的影响;D、E和F分别为施用蚯蚓粪对土壤真菌群落香农多样性指数、均匀度指数及优势真菌属的影响;CK、V50、V100、V200见图1注;图柱上不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。

图3 施用蚯蚓粪对滨海盐碱地土壤微生物群落的影响

Fig.3 Effects of vermicompost application on soil microbial community in coastal saline-alkali land

2.6 滨海盐碱地玉米生长及产量与土壤质量的关系

普鲁克分析结果表明,土壤理化性质、酶活性、微生物碳源利用模式、微生物群落组成与玉米生长

及产量的主坐标排序均呈现高度关联且均达到显著水平(表3)。其中,土壤酶活性、微生物群落组成、土壤理化性质及微生物碳源利用模式同玉米生长及

产量主坐标排序间的偏差平方和分别为0.550 9、0.245 2、0.155 7和0.122 3,表明其与玉米生长及产量的关联程度依次增强。

表3 滨海盐碱地土壤质量与玉米生长及产量的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between soil quality and maize growth and yield in coastal saline-alkali land

因子	主坐标 1 (%)	主坐标 2 (%)	偏差 平方和	显著性 水平
土壤理化性质 a	80.5	11.7	0.155 7	<0.001
土壤酶活性 b	77.4	10.3	0.550 9	0.016
土壤微生物碳源利用 c	78.2	9.9	0.122 3	<0.001
土壤微生物群落 d	75.3	11.3	0.245 2	<0.001

a、b、c 和 d 分别代表基于滨海盐碱地土壤理化性质、酶活性、微生物碳源利用、微生物群落与玉米生长及产量 BC 距离矩阵的主坐标排序间的普鲁克分析。

3 讨论

外源有机物料的施用可以消减盐碱障碍因子、增加土壤有机碳固持、缓解氮磷等养分亏缺、重塑土壤微生物群落并提升其功能多样性进而改善滨海盐碱地土壤质量^[15,30]。本研究中,施用蚯蚓粪后土壤 pH 与 CK 相比显著降低,因为蚯蚓粪偏酸性(pH=6.33),施用后引起的稀释作用及其酸碱中和作用可能是土壤 pH 下降的重要原因^[2,31]。土壤中有有机碳、全氮、全磷等含量的提升与内含丰富有机质及氮磷养分的蚯蚓粪的施用直接相关^[32]。此外,与 CK 相比蚯蚓粪施用后滨海盐碱地土壤盐分含量显著下降,这是由于蚯蚓粪改善了土壤结构,促进了矿物的絮凝,增加了土壤孔隙度和水稳性团聚体的比例,有效阻断了盐分通过土壤中毛细作用返盐,从而实现了滨海盐碱地盐分的消减^[33]。

土壤微生物群落组成及其功能发挥与其栖息地环境密切相关^[34]。群落组成方面,高通量测序结果显示,区别于细菌群落多样性的积极响应,蚯蚓粪施用后滨海盐碱地土壤中真菌群落多样性呈降低趋势,这与细菌及真菌类群迥异的碳源利用偏好和/或碳源利用能力密切相关。功能方面,本研究中蚯蚓粪施用后土壤微生物胞外酶活性、碳源利用能力及多样性与 CK 相比显著提升,这表明外源有机物料的施用有助于提高滨海盐碱地土壤微生物群落对基质(碳源)的利用能力和效率^[35-36]。造成上述现象的主要原因是有机改良后滨海盐碱地土壤 pH、盐分降低,碳氮磷含量提升等为土壤微生物的生长和繁

殖营造了良好的环境,微生物大量富集,土壤微生物的活性及功能多样性得以大幅度提升^[29]。值得注意的是,本研究发现有有机改良后土壤微生物群落对氨基酸、酚酸、碳水化合物类碳源的利用能力与 CK 相比显著提升,而 V50、V100 处理土壤微生物群落对多聚物类碳源的利用能力与 CK 相比却显著降低,这主要是由于滨海盐碱地土壤中不同微生物类群对外源有机物料(蚯蚓粪)中相对专一碳源的利用策略(如碳源利用偏好、碳源利用效率等)有差异。例如,有机改良土壤中脱硫单胞菌属、芽孢杆菌属及被孢霉属类群相对丰度随有机物料施用量增加而增加,而芽单胞菌属、枝顶孢霉属的相对丰度则随有机物料施用量增加而降低,表明单一碳源(蚯蚓粪)的施用对滨海盐碱地土壤中不同的微生物类群具有选择性的促进或抑制作用^[37-38]。

通过施用外源有机物料可以实现滨海盐碱地高效改土,对作物生长及产量提升具有促进作用。本研究发现,与 CK 相比施用蚯蚓粪显著促进了玉米在滨海盐碱地的生长发育,并显著提高了其产量,这与 Bai 等^[39]和 Li 等^[15]的研究结果一致。本研究中,相关性分析结果表明,有机改良后滨海盐碱地玉米生长及产量与土壤理化性状、酶活性、微生物碳源利用及微生物群落等显著相关,佐证了土壤质量是影响作物生长及产量的重要因素。蚯蚓粪促进滨海盐碱地作物增产的原因可能在于:其一,蚯蚓粪的施用提升了土壤中有机碳的含量及养分供应,有效消减“盐害”与“碱害”,从而改善了土壤的理化性状,为促进微生物的生长繁殖及作物生长发育营造了良好的环境条件;其二,伴随着微生物栖息地环境中障碍因子的消减,土壤中具备生防促生、有机碳固持及氮磷养分循环功能的微生物,如芽孢杆菌属菌^[40]、被孢霉属菌^[15]、脱硫单胞菌属菌^[41]等大量富集,微生物群落组成及其功能沃土化,并最终促进了有机改良后滨海盐碱地作物的生长及增产。值得注意的是,本研究发现蚯蚓粪施用后虽然显著提升了滨海盐碱地的玉米产量,但与常规农田相比,蚯蚓粪处理后的盐碱地玉米产量依然较低,且增大蚯蚓粪施用量后,单位有机物玉米增产量反而呈降低趋势。分析其原因,一方面与较短的滨海盐碱地改良年限有关,意味着短期(1年)有机改良下滨海盐碱地土壤的环境条件尚无法达到玉米丰产所需的土壤质量;另一方面,过量的有机物料施用对作物的不利影响

可能与土壤中引入的大量有机物的矿化分解速率有关^[42]。因此,继续开展不同种类、不同施用量有机物料改良下滨海盐碱地土壤质量的演变及其对作物生长发育影响的研究,对实现滨海盐碱地高效改良尤为重要。综上所述,本研究结果表明施用蚯蚓粪改善了滨海盐碱地土壤理化性质、微生物群落组成及功能多样性,与CK相比显著促进了作物增产,是一种可以有效提升滨海盐碱地土壤质量的农业措施。

4 结 论

施用蚯蚓粪是一种快速有效消减滨海盐碱地土壤障碍因子的方法,可以显著降低滨海盐碱地土壤pH及盐分含量,显著增加土壤有机碳固持及氮磷等养分供应,还能够重塑土壤微生物群落并提升其功能多样性,并最终促进玉米生长及增产。不同施用量处理间,高施用量处理对滨海盐碱地玉米的增产效果最好,相较于未改良土壤其玉米增产达到54.5%。因此,施用外源有机物料对滨海盐碱地高效改良,实现农业可持续发展具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 赵英,王丽,赵惠丽,等. 滨海盐碱地改良研究现状及展望[J]. 中国农学通报,2022,38(3):67-74.
- [2] BAI Y C, XUE W J, YAN Y Y, et al. The challenge of improving coastal mudflat soil:formation and stability of organo-mineral complexes[J]. Land Degradation & Development,2018,29(4):1074-1080.
- [3] YAO R J, YANG J S, WANG X P, et al. Response of soil characteristics and bacterial communities to nitrogen fertilization gradients in a coastal salt-affected agroecosystem[J]. Land Degradation & Development,2021,32(1):338-353.
- [4] SHAO H B, CHU L Y, LU H Y, et al. Towards sustainable agriculture for the salt-affected soil[J]. Land Degradation & Development,2019,30(5):574-579.
- [5] JIANG S Q, YU Y N, GAO R W, et al. High-throughput absolute quantification sequencing reveals the effect of different fertilizer applications on bacterial community in a tomato cultivated coastal saline soil[J]. Science of the Total Environment,2019,687:601-609.
- [6] LONG X H, LIU L P, SHAO T Y, et al. Developing and sustainably utilize the coastal mudflat areas in China[J]. Science of The Total Environment,2016,569:1077-1086.
- [7] WANG S T, FENG Q, ZHOU Y P, et al. Dynamic changes in water and salinity in saline-alkali soils after simulated irrigation and leaching[J]. PLoS One,2017,12(11):e0187536.
- [8] 邓玲,魏文杰,胡建,等. 秸秆覆盖对滨海盐碱地水盐运移的影响[J]. 农学报,2017,7(11):23-26.
- [9] 关胜超. 松嫩平原盐碱地改良利用研究[D]. 北京:中国科学院大学,中国科学院东北地理与农业生态研究所,2017.
- [10] 王世林,曹文侠,王小军,等. 河西走廊荒漠盐碱地人工柽柳林土壤水盐分布[J]. 应用生态学报,2019,30(8):2531-2540.
- [11] 张建锋,宋玉民,邢尚军,等. 盐碱地改良利用与造林技术[J]. 东北林业大学学报,2002,30(6):124-129.
- [12] WANG S J, CHEN Q, LI Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. Resources, Conservation and Recycling,2017,121:82-92.
- [13] 邢秀芹,张为华,于静娟. 脱硫石膏的施用量对盐碱地葵花生长的影响[J]. 鞍山师范学院学报,2013,15(2):58-61.
- [14] 左文刚. 生活污水对新垦滩涂盐碱地快速有机培肥的效应与机制[D]. 扬州:扬州大学,2020.
- [15] LI Y L, SHEN C, WANG Y M, et al. Alleviated environmental constraints and restructured fungal microbiome facilitate aggregate formation and stabilization in coastal mudflat saline soil amended by sewage sludge[J]. Land Degradation & Development,2023,34(10):3064-3075.
- [16] LI Y L, WANG Y M, GU C H, et al. Differential effects of organic ameliorants on the reassembly of bacterial communities in newly amended coastal mudflat salt-affected soil[J]. Agronomy,2022,12(10):2525.
- [17] LI Y L, WANG Y M, SHEN C, et al. Structural and predicted functional diversities of bacterial microbiome in response to sewage sludge amendment in coastal mudflat soil[J]. Biology,2021,10(12):1302.
- [18] ZHANG X Y, QI L L, LI W M, et al. Bacterial community variations with salinity in the saltwater-intruded estuarine aquifer[J]. Science of the Total Environment,2021,755(Part1):142423.
- [19] LOPES B C, FIGUEIREDO R S, ARAUJO J C, et al. Bacterial community dynamics in tropical soil after sewage sludge amendment[J]. Water Science & Technology,2020,82(12):2937-2947.
- [20] MATTANA S, PETROVICOVÁ B, LANDI L, et al. Sewage sludge processing determines its impact on soil microbial community structure and function[J]. Applied Soil Ecology,2014,75:150-161.
- [21] ZHANG Z K, LIU H, LIU X X, et al. Organic fertilizer enhances rice growth in severe saline-alkali soil by increasing soil bacterial diversity[J]. Soil Use and Management,2022,38(1):964-977.
- [22] LU P N, BAINARD L D, MA B, et al. Bio-fertilizer and rotten straw amendments alter the rhizosphere bacterial community and increase oat productivity in a saline-alkaline environment[J]. Scientific Reports,2020,10(1):19896.
- [23] KANG Y J, XU W J, ZHANG Y, et al. Bloom of tetracycline resistance genes in mudflats following fertilization is attributed to the increases in the shared potential hosts between soil and organic fertilizers[J]. Environmental Science and Pollution Research,2022,

- 29(9):13292-13304.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2013.
- [25] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [26] ADAM G, DUNCAN H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001,33(7/8):943-951.
- [27] GARLAND J L, MILLS A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991,57(8):2351-2359.
- [28] CHOI K H, DOBBS F C. Comparison of two kinds of Biolog microplates (GN and ECO) in their ability to distinguish among aquatic microbial communities[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1999,36(3):203-213.
- [29] GU B X, QIN T Y, QIU M H, et al. Addition of exogenous organic ameliorants mediates soil bacteriome and microbial community carbon source utilization pattern in coastal saline-alkaline soil[J]. *Agriculture*, 2024,14(1):44.
- [30] ZUO W G, GU C H, ZHANG W J, et al. Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,654:541-549.
- [31] TRIVEDI P, SINGH K, PANKAJ U, et al. Effect of organic amendments and microbial application on sodic soil properties and growth of an aromatic crop[J]. *Ecological Engineering*, 2017,102:127-136.
- [32] ZUO W A, XU L, QIU M H, et al. Effects of different exogenous organic materials on improving soil fertility in coastal saline-alkali soil[J]. *Agronomy-Basel*, 2023,13(1):61.
- [33] GAO G F, LI P F, ZHONG J X, et al. *Spartina alterniflora* invasion alters soil bacterial communities and enhances soil N₂O emissions by stimulating soil denitrification in mangrove wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,653:231-240.
- [34] NANNIPIERI P, ASCHER-JENULL J, CECCHERINI M T, et al. Microbial diversity and soil functions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017,68(1):12-26.
- [35] XIE X F, PU L J, ZHU M, et al. Differential effects of various reclamation treatments on soil characteristics: an experimental study of newly reclaimed tidal mudflats on the east China coast[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,768:144996.
- [36] GOMEZ E, FERRERAS L, TORESANI S. Soil bacterial functional diversity as influenced by organic amendment application[J]. *Bioresource Technology*, 2006,97(13):1484-1489.
- [37] LIU X, GUO K L, HUANG L, et al. Responses of absolute and specific enzyme activity to consecutive application of composted sewage sludge in a Fluventic Ustochrept[J]. *PLoS One*, 2017,12(5):e0177796.
- [38] CALLEJA-CERVANTES M E, APARICIO-TEJO P M, VILLADAS P J, et al. Rational application of treated sewage sludge with urea increases GHG mitigation opportunities in Mediterranean soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 238: 114-127.
- [39] BAI Y C, ZUO W G, YAN Y Y, et al. Sewage sludge amendment combined with green manuring to a coastal mudflat salt-soil in eastern China: effects on soil physicochemical properties and maize yield[J]. *International Journal of Agronomy*, 2017(4):1-10.
- [40] SAXENA A, KUMAR M, CHAKDAR H, et al. *Bacillus* species in soil as a natural resource for plant health and nutrition[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2019,128(6):1583-1594.
- [41] SCHEID D, STUBNE S. Structure and diversity of *Gram-negative sulfate-reducing bacteria* on rice roots[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2001,36(2/3):175-183.
- [42] 余倩倩,李文涛,邓烈,等. 柑橘皮渣有机肥对特洛维塔甜橙树体营养、果实品质和经济效益的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017,39(10):20-26.

(责任编辑:黄克玲)