



蚯蚓和细菌对秸秆混粪改良苏打盐碱土碳转化及微生物群落的影响

郎立娜, 孙正骁, 陈元晖, 张春燕, 张羽, 李明堂

引用本文:

郎立娜,孙正骁,陈元晖,张春燕,张羽,李明堂. 蚯蚓和细菌对秸秆混粪改良苏打盐碱土碳转化及微生物群落的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 412-422.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期施用不同肥料对橘园土壤生物群落结构的影响

胡岚, 梁波, 陈云峰, 李钰飞, 张玉峰, 郑春燕, 伍玉鹏

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 80-87 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0661>

不同施肥制度对南方旱地红壤微生物组结构和功能影响研究进展

荀卫兵, 王伯仁, 冉炜, 沈其荣, 徐明岗, 张瑞福

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 537-544 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0448>

威廉环毛蚓耕作时间对菜田土壤微生物群落多样性及碳代谢特征的影响

郑宪清, 范晓芬, 张翰林, 李双喜, 王金庆, 张娟琴, 王良军, 陶晓斌, 吕卫光

农业资源与环境学报. 2015(6): 596-602 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0139>

3种耐盐植物对滨海盐土化学性质及微生物群落结构的影响

刘雅辉, 孙建平, 马佳, 姚玉涛, 吕晶晶, 张宏伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 28-35 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0049>

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810-819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郎立娜, 孙正骁, 陈元晖, 等. 蚯蚓和细菌对秸秆混粪改良苏打盐碱土碳转化及微生物群落的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 412-422.

LANG L N, SUN Z X, CHEN Y H, et al. Effects of earthworms and bacteria on carbon transformation and microbial community of soda saline-alkali soil by improvements of straw and manure mixture[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 412-422.

蚯蚓和细菌对秸秆混粪改良苏打盐碱土碳转化及微生物群落的影响

郎立娜, 孙正骁, 陈元晖, 张春燕, 张羽, 李明堂*

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 为了促进苏打盐碱土中有机物料的转化, 优化微生物群落结构, 提高有机碳含量, 利用蚯蚓 (*Pheretima guillelmi*) 和外源微生物 (类芽孢杆菌 C1) 研究二者在单一或联合作用下对苏打盐碱土中水稻秸秆和牛粪混合物的降解、有机碳转化以及土壤微生物群落结构的影响。结果表明, 蚯蚓、菌株 C1 单一和联合作用下, 水稻秸秆和牛粪混合物的降解率分别提高了 66.0%、40.9% 和 72.1%, 土壤有机碳 (SOC) 含量分别增加了 65.8%、18.2% 和 25.5%, 水溶性有机碳 (WEOC) 含量分别提高了 63.5%、1.6% 和 26.3%。蚯蚓、菌株 C1 单一和联合作用均能使 WEOC 的前体物从植物源向微生物源转化, 从而增加类溶解性微生物代谢产物的比例; 蚯蚓还可以促进 WEOC 中类腐植酸物质的生成, 降低土壤的老化程度, 并且与菌株 C1 之间存在协同效应。蚯蚓、菌株 C1 单一和联合作用均能够增加真菌的丰富度、多样性以及具有纤维素降解能力的子囊菌群的相对丰度。在属水平上, 蚯蚓的作用与土壤中 SOC、WEOC 含量和 WEOC 紫外吸收特征值呈正相关。研究表明, 蚯蚓与菌株 C1 单一或联合作用能够使土壤微生物群落结构向更有利于有机物料转化的功能方向转变, 进而促进有机物料的降解, 提高 SOC 的含量和稳定性。因此, 蚯蚓和菌株 C1 在苏打盐碱土改良方面具有重要的应用潜力。

关键词: 蚯蚓; 类芽孢杆菌; 苏打盐碱土; 土壤有机碳; 水溶性有机碳; 三维荧光; 微生物群落结构

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)02-0412-11

doi: 10.13254/j.jare.2022.0021

Effects of earthworms and bacteria on carbon transformation and microbial community of soda saline-alkali soil by improvements of straw and manure mixture

LANG Lina, SUN Zhengxiao, CHEN Yuanhui, ZHANG Chunyan, ZHANG Yu, LI Mingtang*

(College of Resource and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: To promote the transformation of organic materials in soda saline-alkali soil, optimize microbial community structure, and increase organic carbon content, single and combined effects of earthworms (*Pheretima guillelmi*) and exogenous microorganisms (*Paenibacillus* sp. C1) on the degradation of a mixture of rice straw and manure, soil organic carbon (SOC) transformation, and soil microbial community structure were assessed in soda saline-alkali soil. Earthworms alone, strain C1 alone, and both in combination increased the degradation rates of the rice straw and manure mixture by 66.0%, 40.9% and 72.1%, respectively. SOC was increased by 65.8%, 18.2% and 25.5%, respectively. Water-soluble organic carbon (WEOC) content was increased by 63.5%, 1.6% and 26.3%, respectively. Earthworms and strain C1 could transform WEOC precursors from plant sources to microbial sources, which increased the proportion of soluble microbial metabolites. In addition, earthworms could also promote the production of humic acid-like substances in WEOC and reduce soil aging, with a synergistic effect evident with strain C1. Both the single and joint actions of earthworms and strain C1

收稿日期: 2022-01-13 录用日期: 2022-03-16

作者简介: 郎立娜 (1996—), 女, 吉林白城人, 硕士研究生, 从事盐碱土改良与利用研究。E-mail: 1278053710@qq.com

*通信作者: 李明堂 E-mail: limtdoc2008@163.com

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2018YFD0300208); 吉林省教育厅项目 (JJKH20220354KJ)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0300208); Jilin Provincial Department of Education (JJKH20220354KJ)

<http://www.aed.org.cn>

could increase the abundance and diversity of fungi and the relative abundance of cellulose-degrading ascomycetes. At the genus level, the effect of earthworms was positively correlated with SOC and WEOC contents in soil and the ultraviolet absorption characteristics of WEOC. The collective findings indicate that the single and joint action of earthworms and strain C1 could change the soil microbial community structure in a functional direction more conducive to the transformation of organic materials, further promoting the degradation of organic materials and the generation of SOC, and improving the formation of soil humic substances. Earthworms and strain C1 thus have important application potentials in the improvement of soda saline-alkali soil.

Keywords: earthworm; *Paenibacillus* sp.; soda saline-alkali soil; soil organic carbon; water-soluble organic carbon; three-dimensional fluorescence; microbial community structure

松嫩平原是我国苏打盐碱土集中分布的区域之一,由于土壤环境恶劣、有机质含量低、微生物数量少等原因,土壤资源利用率低,粮食产量低,因此开展苏打盐碱土的改良对于发展当地农业、提高粮食产量具有重要意义^[1]。目前向苏打盐碱土中添加有机物料是增加土壤有机质、改善土壤性质的一种重要土壤改良措施。孙赫阳等^[2]研究发现,向苏打盐碱土中添加有机肥和秸秆都增加了土壤有机质含量,改变了苏打盐碱土的理化特征。范之馨等^[3]研究发现,向苏打盐碱土中施入秸秆可提高土壤水溶性有机碳(WEOC)含量和芳香度,促进土壤腐殖化,而牛粪的施入则可以增加养分和土壤有机碳(SOC)含量,改善土壤微生物群落结构^[4]。但单施有机物料在盐碱土中也存在自然降解缓慢、碳转化率低、作用效果差的问题。研究发现,外源微生物可以促进土壤中有机物料的降解,增加土壤腐殖质含量和分解木质纤维素真菌的多样性和相对丰度^[5-6]。另外,蚯蚓也可用于土壤中有机物料的快速转化,对SOC的固存和腐植酸的生成起到促进作用。Timothy等^[7]研究发现,单独添加蚯蚓可以促进糖枫林SOC的稳定。伍玉鹏等^[8]研究发现,蚯蚓可以加快盐碱土中有机物的分解,增加土壤养分含量和生物丰富度。除了单一作用外,蚯蚓和外源微生物还可以通过联合作用促进有机物料中碳的转化。程雄等^[9]研究发现,蚯蚓和外源微生物联合施用可协同促进添加猪粪的土壤碳循环相关酶活性。Zhang等^[10]研究发现,综合施用粪便、泥浆、蚯蚓和溶磷细菌显著增加了SOC和WEOC的含量。Zhang等^[11]研究发现,蚯蚓和外源微生物可协同降低滨海盐碱土的pH、电导率,在盐碱土改良中具有较好的应用前景。但目前利用蚯蚓和外源微生物单一和联合改良苏打盐碱土的研究较少,且主要针对SOC的影响,鲜有对WEOC及其组分的研究。WEOC是土壤中活性高且可以直接被微生物吸收利用的一类碳,能反映土壤有机碳的变化情况,参与微生物的生长代谢和土壤有机质的分解与转化,是评价土壤肥力性状的敏感指

标^[12],在土壤碳循环过程中扮演重要角色,其含量与土壤质量和农业生产力密切相关,因此研究苏打盐碱土中WEOC的变化特征具有重要的实际意义^[13]。另外,蚯蚓和外源微生物对苏打盐碱土中微生物群落结构的影响研究也鲜有报道。微生物群落结构的变化与土壤中有机物料的降解和碳的转化密切相关,土壤微生物会影响有机质的分解,其多样性和丰度是可持续农业生态系统的标志和基础,土壤微生物结构和功能的变化很大程度上受土壤有机质差异的影响,因此解析苏打盐碱土微生物群落结构变化对于初步明确苏打盐碱土碳转化机制具有一定的理论意义^[14]。

本研究以松嫩平原典型的苏打盐碱土为研究对象,从SOC、WEOC和土壤微生物群落结构的角度研究了蚯蚓和类芽孢杆菌对水稻秸秆牛粪混合物改良苏打盐碱土的影响,以期为促进有机物料对苏打盐碱土的改良提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自吉林省松原市安字镇(44°52'49"N, 124°02'32"E)。土样采集后,去掉石块、草根和枯枝落叶,自然风干,过2 mm筛,用于土壤培养实验。土壤的基本理化性质:pH为8.45,电导率为0.460 mS·cm⁻¹,有机碳含量为7.09 g·kg⁻¹,含盐量为6.12 g·kg⁻¹。

供试水稻秸秆采自吉林农业大学植物生产基地,牛粪采购于江西省吉安市天然生物科技有限公司,电导率为3.3 mS·cm⁻¹。分别将水稻秸秆和牛粪自然风干,打碎过2 mm筛,1:1混合后装袋放置干燥地方备用,水稻秸秆与牛粪混合物的添加量为土壤质量的4%,确定蚯蚓的添加量后,通过预实验(设置不同比例的物料)发现,添加量为4%的处理中,蚯蚓能够很好地生存,并且对物料的降解和碳的转化效果最佳。

供试菌株为本实验室从苏打盐碱土中分离获得的一株类芽孢杆菌C1(*Paenibacillus* sp.),在中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心的保藏编号

为 CGMCC No:20154。菌株 C1 具有较高的抗盐碱能力,能通过产纤维素酶降解秸秆^[15]。将保存于 4℃ 冰箱中的斜面培养基上的 C1 菌体细胞接种到胰蛋白胨液体培养基中,在 30℃、180 r·min⁻¹ 下活化培养 24 h,按照 2% 的比例接种至新鲜的胰蛋白胨培养基中再培养 24 h,然后在 4℃、8 000 r·min⁻¹ 下离心 10 min,用无菌水清洗菌体细胞二三次后,重新悬浮于适量无菌水中,作为土壤中接种用的菌悬液,菌悬液的 OD₆₀₀ 为 0.898,菌体细胞数量约为 1×10⁸ CFU·mL⁻¹。

本研究所用蚯蚓品种为威廉环毛蚓 (*Pheretima guillelmi*),采购于江西省淮安市涟水小姜蚯蚓养殖场,选择大小一致、活性较高的蚯蚓置于供试土壤与供试水稻秸秆和牛粪的混合物中,在 25℃ 下驯化 2 周。实验开始前挑选活性较高的蚯蚓进行清肠,在烧杯底部铺上湿润的滤纸,将蚯蚓放入烧杯后盖上带孔的纱布防止逃逸,然后放置于培养箱进行 24 h 避光吐泥,以排除蚯蚓肠道内容物,清肠后用无菌水冲洗蚯蚓体表,用滤纸吸干水分并测定质量后进行土壤培养实验。根据王斌等^[16]的研究结果和预实验结果,每千克土中的蚯蚓添加量设为 6 条。

1.2 试验设计

将 2.5 kg 土壤与 50 g 水稻秸秆和 50 g 牛粪充分混匀,然后将混合好的土壤逐层撒入 5 L 透明塑料桶中,边撒边添加无菌水或菌悬液,轻轻混匀,使土壤水分保持在最大持水量的 60%,平衡 2 d 后进行处理。喷洒无菌水且只添加 15 条威廉环毛蚓的处理记作 JFQ,为蚯蚓处理;只喷洒 100 mL 菌悬液无蚯蚓添加的处理记作 JFC,作为菌株 C1 处理;喷洒 100 mL 菌悬液和添加 15 条威廉环毛蚓的处理记作 JFCQ,作为蚯蚓+菌株 C1 处理;只喷洒无菌水、无蚯蚓添加的处理记作 JF,为对照处理。每种处理均重复 3 次。每个塑料桶均盖上带孔的塑料盖,既可以防止蚯蚓逃逸,又能保证与外界有良好的气体交换,塑料桶放在 (25±2)℃ 的室温条件中进行培养。定期添加蒸馏水,保持土壤水分在最大持水量的 60%。每隔 10 d 翻一次土,并记录蚯蚓逃逸与死亡数量,若出现死亡或逃逸,则及时补充蚯蚓至 15 条(几乎很少出现)。实验共持续 60 d,结束时收集所有处理中的蚯蚓,浸泡 24 h,然后测量其体质量相对于初始体质量的变化。对土壤进行混匀采样,用静电吸附法收集未分解的水稻秸秆与牛粪混合物,通过秸秆与牛粪剩余量计算其降解率。再取一部分新鲜样品进行微生物群落结构的测定,剩余土壤自然风干,进行其他指标的测定。

1.3 苏打盐碱土中水稻秸秆与牛粪混合物降解率的测定

实验结束时,对土壤进行自然风干,用静电吸附法收集未分解的秸秆与牛粪混合物,通过秸秆牛粪混合物剩余量计算其降解率,计算公式如下:

$$\text{降解率} = \frac{\text{已降解物质的量}}{\text{物质总量}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:已降解物质的量为有机物料添加量减去有机物料剩余量, g; 物质总量为有机物料添加量, g。

1.4 有机碳的测定以及比紫外吸收值的计算

土壤有机碳(SOC)含量测定采用高温催化氧化法,所用仪器为总有机碳分析仪(SHIMADZU TOC-VCPH)。

水溶性有机碳(WEOC)含量参考李明堂等^[17]的方法进行提取,采用 TOC 仪(Elementer Vario TOC,德国)测定。

采用紫外-可见分光光度计(SHIMADZUUV-2401PC)测定提取液在 254 nm 处的吸光度,计算比紫外吸收值(SUV_{254}),公式如下:

$$SUV_{254} = UV_{254}/C \times 100 \quad (2)$$

式中: SUV_{254} 为比紫外吸收值,表示 WEOC 的芳香度, L·mg⁻¹·m⁻¹; UV_{254} 为提取液在 254 nm 处的吸光度, cm⁻¹; C 为提取液中 WEOC 的浓度, mg·L⁻¹。

1.5 水溶性有机碳三维荧光光谱的测定与分析

荧光光谱采用 HITACHI F22500 型荧光分光光度计测定。数据采用 Origin 8.0 软件绘制等高线图。采用 MATLAB 软件对荧光光谱的五个荧光区域进行区域积分。激发光波长为 370 nm 时,将发射光波长分别为 450、500 nm 时的荧光强度相比,获得荧光指数 f_{450}/f_{500} ,用以指示 WEOC 的来源。将类富里酸和类腐植酸物质荧光峰对应的荧光强度相比,获得荧光指数 FI/II ,用以表征土壤的老化程度^[17]。

1.6 土壤微生物 DNA 提取及高通量测序

将土壤样品送至北京奥维森基因科技有限公司,利用 PowerSoil DNA Isolation Kit 试剂盒进行 DNA 提取。提取得到的 DNA 用分光光度法检测 DNA 的质量和浓度。细菌对 16S rRNA 基因的 V3~V4 区用引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACNNGGATCTAAT-3') 扩增,真菌以 ITS1 (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2 (5'-TGCGTTCTTCATCGATGC-3') 为引物,扩增 ITS rDNA 的 ITS1 区。PCR 产物使用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测,纯化后用于构建微生物多样性测序文库,使用 Illumina Miseq PE300 高通量测序平台进行 Paired-end 测序。

1.7 高通量测序数据分析

数据使用 Vsearch (v2.7.1) 软件对优质序列进行 OTU 聚类,与 Silva 128 数据库进行比对,得到每个 OTU 对应的物种分类信息,再利用 QIIME1 (v1.8.0) 软件进行 α 多样性指数分析(包括 Shannon、Simpson 和 Chao1 等指数)。基于物种注释及相对丰度结果,使用 R (v3.6.0) 软件进行物种组成柱状图分析。

1.8 数据分析与统计

采用 Excel 对试验数据进行整理,采用 Origin 对试验数据进行绘图,使用 CANOCO 4.0 中的冗余分析 (RDA) 研究土壤微生物群落结构与土壤有机碳的相关性。文中数据结果以均值表示,用 SPSS 26.0 统计软件进行统计分析、差异检验 ($P < 0.05$) 等。

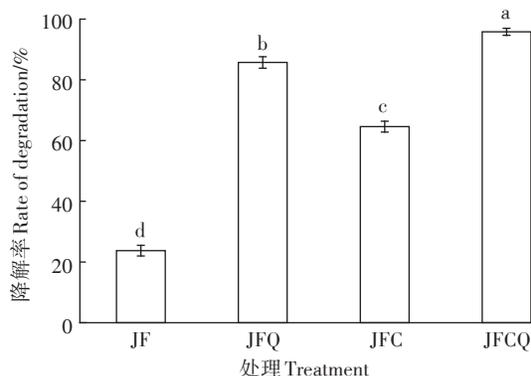
2 结果与分析

2.1 苏打盐碱土中水稻秸秆与牛粪混合物降解率

不同处理下土壤中水稻秸秆和牛粪混合有机物的降解率如图 1 所示。从图 1 中可以看出蚯蚓、菌株 C1 单一和联合作用均能显著提高秸秆、牛粪混合物的降解率。与对照相比,蚯蚓单一作用使降解率提高了 66.0 个百分点,菌株 C1 单一作用使降解率提高了 40.9 个百分点,而二者联合作用则使降解率提高了 72.1 个百分点,说明蚯蚓、菌株 C1 对水稻秸秆和牛粪混合物的降解均有促进作用,并且二者之间存在协同效应。

2.2 SOC 含量和 WEOC 紫外吸收特征

从表 1 可以看出,各处理均可显著提高 SOC 含量和 WEOC 的紫外吸收特征值,各处理 SUV_{254} 值均增



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), JF、JFQ、JFC、JFCQ 分别代表对照、蚯蚓、菌株 C1、蚯蚓+菌株 C1。下同。

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), JF, JFQ, JFC, JFCQ represent the control, earthworms, strain C1, earthworms + strain C1. The same below.

图 1 苏打盐碱土中水稻秸秆和牛粪混合物的降解率

Figure 1 Degradation rate of the mixture of rice straw and manure in the soda saline-alkali soil

加,即提高了 WEOC 的芳香度。蚯蚓单一和联合作用还可以显著提高 WEOC 的含量,作用效果大小顺序为蚯蚓>蚯蚓+菌株 C1>菌株 C1。

表 1 苏打盐碱土中有机碳含量和紫外吸收特征

Table 1 Content of organic carbon and ultraviolet absorption characteristics in soda saline-alkali soil

处理 Treatment	SOC/ ($g \cdot kg^{-1}$)	WEOC/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	$UV_{254}/$ cm^{-1}	$SUV_{254}/$ ($L \cdot mg^{-1} \cdot m^{-1}$)
对照	16.17±0.02d	20.52±1.13c	0.33±0.01d	1.59±0.05d
蚯蚓	26.81±0.08a	33.56±1.64a	0.80±0.03a	2.37±0.08a
菌株 C1	19.11±0.06c	20.84±1.09c	0.37±0.01c	1.79±0.01c
蚯蚓+菌株 C1	20.29±0.03b	25.91±0.87b	0.48±0.01b	1.86±0.01b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate statistical significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.3 土壤 WEOC 三维荧光强度

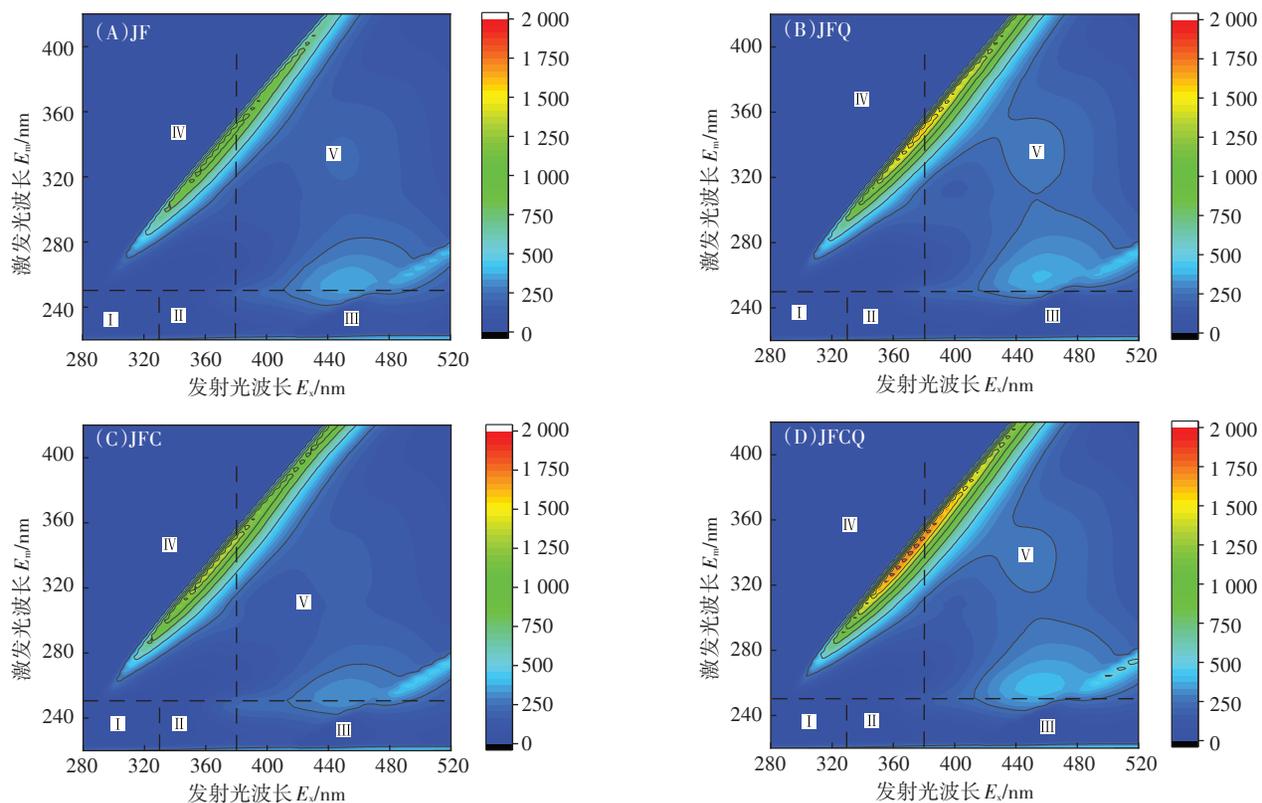
从图 2 可以看出,蚯蚓单一及其与菌株 C1 的联合作用均可使 WEOC 中类溶解性微生物代谢产物和类腐植酸物质的荧光强度显著增加,并且联合作用的效果大于单一作用,但菌株 C1 只能使类溶解性微生物代谢产物荧光强度略有增加,不能促进类腐植酸物质的增加。蚯蚓、菌株 C1 的单一和联合作用对类酪氨酸蛋白质、类色氨酸蛋白质、类富里酸则均没有明显的影响。

2.4 土壤 WEOC 三维荧光区域积分特征

不同处理土壤 WEOC 各荧光区域积分特征如图 3 所示,可以看出所有土壤样品中 WEOC 区域积分值的大小顺序为类腐植酸物质>类溶解性微生物代谢产物>类富里酸>类色氨酸蛋白质>类酪氨酸蛋白质,蚯蚓、蚯蚓与菌株 C1 的联合作用都明显增加了类溶解性微生物代谢产物(区域 IV)、类腐植酸物质(区域 V)的积分值,并且联合作用效果大于单一作用。菌株 C1 单独作用只能增加类溶解性微生物代谢产物(区域 IV)的积分值,而对类腐植酸物质(区域 V)的积分值没有明显影响。

2.5 土壤 WEOC 的来源和老化特征

由图 4 可知,蚯蚓、菌株 C1 单一和联合作用均使 f_{450}/f_{500} 显著增加,即 WEOC 的前体物由植物源向微生物源转化。 IF/IIH 能够在一定程度上反映土壤的老化程度,其值越大,代表土壤老化程度越大。蚯蚓、蚯蚓与菌株 C1 联合作用使 IF/IIH 的值显著降低,表明其使土壤老化程度降低,而菌株 C1 单一作用对土壤老化程度无显著的影响。这说明蚯蚓、菌株 C1 的单一和



I : 酪氨酸蛋白质; II : 类色氨酸蛋白质; III : 类富里酸; IV : 类溶解性微生物代谢产物; V : 类腐植酸物质。下同。
Regions I, II, III, IV, V, correspond to tyrosine-like aromatic protein, tryptophan-like aromatic protein, fulvic acid-like organic carbon, soluble microbial byproduct-like organic carbon, and humic acid-like organic carbon, respectively. The same below.

图2 苏打盐碱土中WEOC的三维荧光光谱

Figure 2 Three-dimensional excitation-emission fluorescence spectra of WEOC in the soda saline-alkali soil

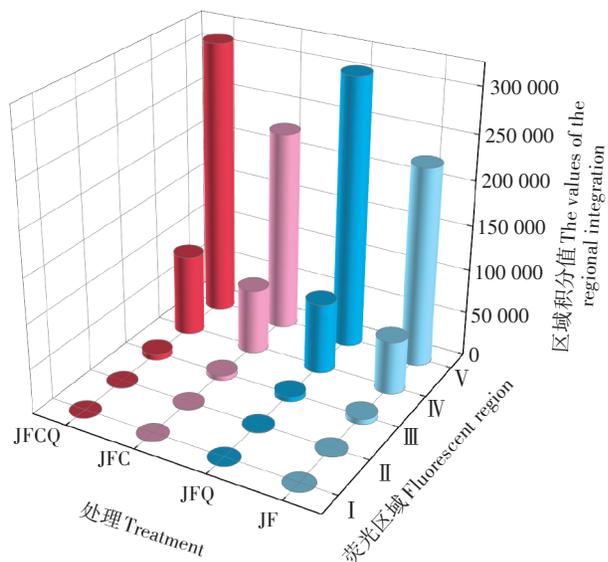
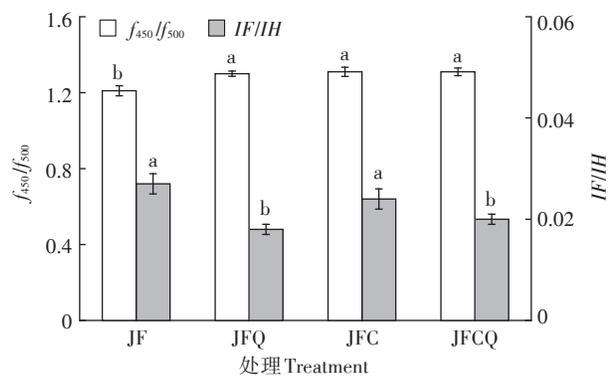


图3 苏打盐碱土 WEOC 荧光区域的积分特征

Figure 3 Fluorescence regional integration of WEOC in the soda saline-alkali soil



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

图4 苏打盐碱土 WEOC 的来源和老化特征

Figure 4 Sources and aging characteristics of WEOC in the soda saline-alkali soil

联合作用都能提高微生物活性,促进微生物对水稻秸秆和牛粪混合物的降解,从而增加微生物源有机物的

含量,并且蚯蚓的单一和联合均会促进新的有机质生成,而菌株C1单一作用则不能促进有机质的生成。

2.6 苏打盐碱土微生物 Alpha 多样性指数

如表2所示,从真菌和细菌的Chao1、Observed_

表2 苏打盐碱土中微生物 Alpha 多样性指数
Table 2 Microbial Alpha diversity index of soda saline-alkali soil

微生物 Microorganism	处理 Treatment	Chao1	Observed_species	PD_whole_tree	Shannon
真菌	对照	698.96±1.61d	510.4±1.9d	89.68±0.78d	4.982±0.001d
	蚯蚓	791.44±6.53a	564.7±1.1a	99.62±0.25a	5.124±0.005a
	菌株 C1	705.30±1.17c	553.6±1.6c	97.64±0.67b	5.004±0.004b
	蚯蚓+菌株 C1	775.37±4.28b	559.0±2.1b	95.29±0.39c	4.991±0.001c
细菌	对照	2 930.82±10.13b	2 363.0±22.8b	176.31±0.43b	9.569±0.005b
	蚯蚓	2 203.80±21.38d	1 598.1±14.7d	126.16±0.15d	7.881±0.002c
	菌株 C1	2 957.73±8.61a	2 443.4±18.6a	189.26±0.19a	9.663±0.009a
	蚯蚓+菌株 C1	2 289.46±35.06c	1 643.9±17.1c	127.00±0.38c	7.712±0.008d

species 丰富度和 Shannon 多样性指数可以看出,各处理均显著增加了土壤真菌的丰富度和多样性($P < 0.05$)。其中,蚯蚓处理真菌的丰富度和多样性增加最明显,且土壤真菌的丰富度增幅的大小顺序为蚯蚓>蚯蚓+菌株 C1>菌株 C1,与 SOC 变化趋势一致,土壤真菌多样性增加的大小顺序为蚯蚓>菌株 C1>蚯蚓+菌株 C1。菌株 C1 单一作用可显著增加细菌的丰富度和多样性,而蚯蚓单一和联合作用则显著降低了细菌的丰富度和多样性($P < 0.05$)。

2.7 苏打盐碱土中微生物物种组成

在门水平上,各处理对土壤中真菌物种组成的影响如图 5A 所示,蚯蚓、菌株 C1 单一和联合作用均增加了子囊菌门(Ascomycota)的相对丰度,而蚯蚓单一作用还同时增加了被孢霉门(Mortierellomycota)的相对丰度。从土壤细菌物种组成的变化(图 5B)可以看出蚯蚓、菌株 C1 单一和联合作用增加了变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度,而蚯蚓单一作用还同时增加了拟杆菌门(Bacteroidetes)的相对丰度。相比之

下,放线菌门(Actinobacteria)和酸杆菌门(Acidobacteria)的相对丰度则出现下降的现象。

2.8 土壤微生物群落结构与土壤有机碳的相关性

如图 6 所示,图中箭头代表不同的环境因子,射线越长表示该环境因子影响越大。不同颜色的点代表不同分组中的样本,环境因子之间的夹角为锐角时表示两个环境因子之间呈正相关关系,夹角为钝角时呈负相关关系。在属水平上,SOC、WEOC 含量和 SUV_{254} 值均是影响菌群丰度的主要因素。其中,蚯蚓的作用与 SOC、WEOC 含量和 SUV_{254} 值之间均呈显著正相关。对于真菌而言,土壤中腐质霉属(*Humicola*)、锥细胞(*Conocybe*)、粉红螺旋聚孢霉(*Clonostachys*)、四枝孢属(*Tetracladium*)、被孢霉属(*Mortierella*)、足孢虫属(*Podospora*)与土壤 SOC、WEOC 含量和 SUV_{254} 值的射线夹角为锐角,表明土壤真菌与土壤 SOC、WEOC 含量和 SUV_{254} 值呈显著正相关。对于细菌而言,土壤中溶杆菌属(*Lysobacter*)、气单孢菌属(*Aeromonas*)、*Chryseolinea* 菌属、黄杆菌属(*Flavobacte-*

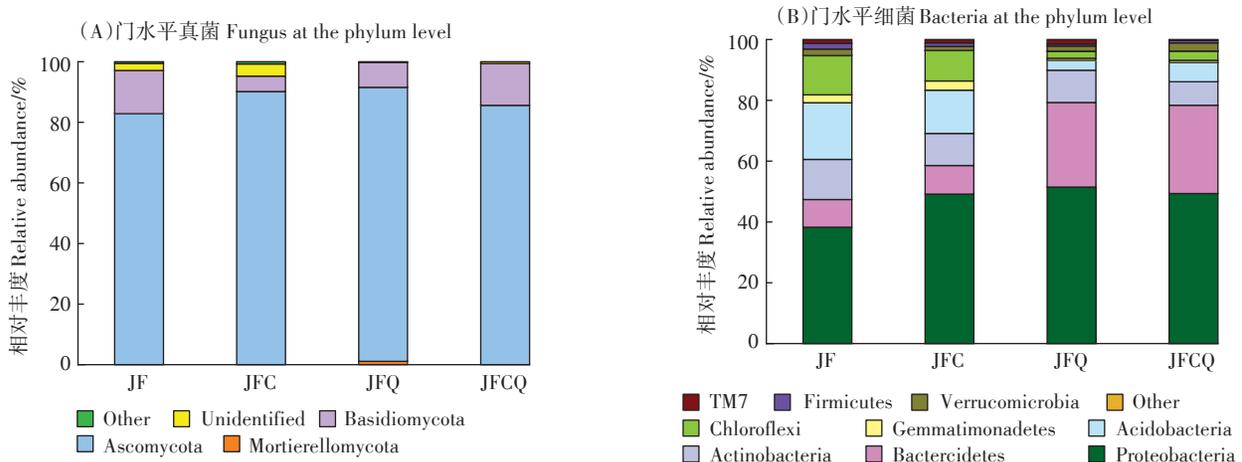


图5 苏打盐碱土中微生物物种组成

Figure 5 Microbial species composition in the soda saline-alkali soil

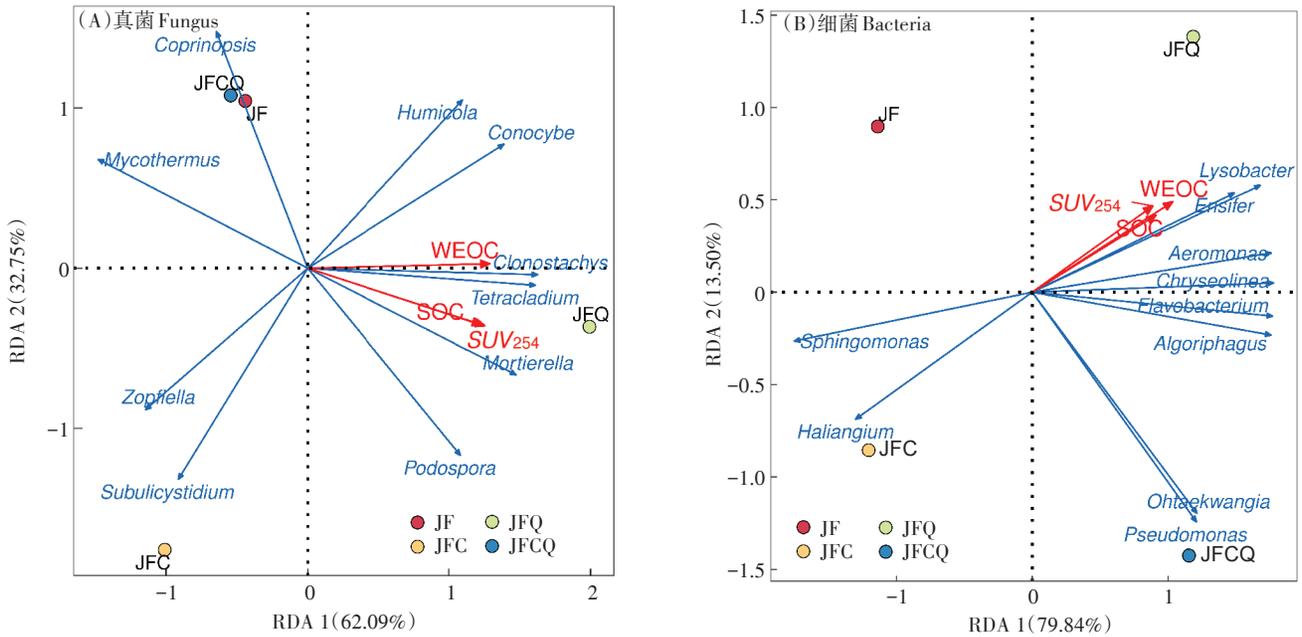


图6 属水平土壤微生物群落结构与土壤有机碳之间的RDA分析

Figure 6 Redundancy analysis(RDA) based on the soil microbial community structure at genus level and organic carbon in the soil

rium)、剑菌属(*Ensifer*)、嗜冷菌属(*Algoriphagus*)、*Oh-taekwangia* 菌属、假单胞菌属(*Pseudomonas*)与土壤SOC、WEOC含量和SUV₂₅₄值呈正相关。

3 讨论

苏打盐碱土具有pH值、盐分含量高,有机质含量低,土壤质地黏重,微生物数量少、活性低等特点,使得有机物料的自然降解缓慢,导致碳固定率低。研究发现,蚯蚓能够对土壤中有有机物料进行转化,促进土壤中有有机物料的降解,提高降解率,如威廉环毛蚓可以显著提高秸秆的降解率^[18]。本研究通过比较苏打盐碱土中水稻秸秆和牛粪混合物的降解率发现,威廉环毛蚓不但对苏打盐碱土有较高的耐性,同样还能提高苏打盐碱土中水稻秸秆和牛粪混合物的降解率,使有机物料降解率达到89.7%。另外,叶伟伟等^[19]研究发现芽孢杆菌可以促进土壤中有有机物料的降解和腐熟,本研究结果也表明,类芽孢杆菌C1单独作用能有效促进苏打盐碱土中有有机物料的降解,且蚯蚓与菌株C1联合作用效果显著大于单一作用,降解率达到最大值,说明二者在有机物料的降解方面具有协同作用。这可能是由于微生物的生物量和活性在苏打盐碱土中受到影响,而蚯蚓通过自身的一系列生命活动使盐碱土的理化性质有所改善,为微生物的呼吸和代谢作用提供有利条件,从而提高了菌株C1在盐碱土中的作用效果,起到了协同促进降解的作用^[20]。

土壤中有有机物料被降解后,一部分以有机碳的形式固定在土壤中。研究发现,威廉环毛蚓不但可以促进有机物料的降解,还能促进碳的固存,提高SOC含量^[21]。芽孢杆菌可以显著提高SOC和WEOC含量^[22]。本研究结果表明,蚯蚓和菌株C1单一或联合作用均能显著提高SOC含量,其中蚯蚓的作用效果最显著,其次是蚯蚓与菌株C1联合作用,最后是菌株C1单独作用,说明微生物单一作用对碳的固定效果不显著,而蚯蚓的加入增加了碳的固存能力,提高了SOC含量。这可能是由于蚯蚓通过形成新的团聚体来稳定有机碳,使其受到物理保护而不易被微生物矿化^[23]。

WEOC是土壤有机碳的重要活性组分,容易被微生物利用,可为土壤微生物群落提供主要的碳和能量来源^[15]。本研究结果表明,蚯蚓和菌株C1单一或联合作用均能显著提高土壤中WEOC含量,其中蚯蚓的作用效果最显著,其次是蚯蚓与菌株C1联合作用,最后是菌株C1单独作用。这可能是由于蚯蚓选择性吞食老化脱落的微生物,使微生物保持较高的活性,从而提高微生物对有机物的降解转化速率;也有可能是蚯蚓通过取食消化、黏液分泌和蚓粪排泄等活动显著改善土壤中有有机碳的性质,使能够直接被微生物利用的WEOC成分增加,从而调控了土壤中的微生物群落结构,增加一些具有纤维素降解能力的功能微生物,使得土壤中微生物的群落结构和功能更加适合盐碱土中有有机物的降解,进而促进了WEOC的转化^[24]。

WEOC在254 nm处的吸光度(UV_{254})能够在一定程度上表征腐殖质类物质以及含有不饱和双键的芳香族化合物,而比紫外吸收值(SUV_{254})则可以反映这类物质的相对含量,一般情况下 SUV_{254} 越大说明芳香性结构越多,芳香度越大^[17]。本研究发现,蚯蚓单一以及与菌株C1联合作用均能提高土壤WEOC含量和 SUV_{254} 值,并且单一作用效果大于联合作用,而菌株C1单一作用只显著增加土壤 SUV_{254} 值,对WEOC含量无显著影响。这说明菌株C1能够增加土壤WEOC的芳香度,但对其产生量没有明显的促进作用,其具体机理还有待进一步研究。Chen等^[25]根据荧光光谱中不同的激发/发射光波长区域,将WEOC分为5种组成,分别为类酪氨酸蛋白质、类色氨酸蛋白质、类富里酸、类溶解性微生物代谢产物和类腐植酸物质。本研究发现,蚯蚓的单一作用使类溶解性微生物代谢产物和类腐植酸物质的荧光强度显著增加,菌株C1的单一作用增加不显著;而蚯蚓与菌株C1联合作用则可使类溶解性微生物代谢产物和类腐植酸物质的荧光强度达到最大值,可能是由于菌株C1的活性在盐碱土中受到了抑制,而蚯蚓可以改变苏打盐碱土的环境,使菌株C1以及土壤中的其他微生物活性增强,并且优化了土壤中的微生物群落结构,促进了类溶解性微生物代谢产物的生成,从而加大了腐殖质的转化^[26]。土壤中累积大量结构复杂且芳香度较高的腐植酸,而结构相对简单的蛋白质类物质累积较少,可能是由于其结构相对简单,更容易被微生物分解利用。从土壤的老化程度来看,蚯蚓以及蚯蚓与菌株C1联合作用降低了土壤老化程度,菌株C1作用不显著,可能是由于蚯蚓能够增加新的腐殖质,但微生物单独作用时增加不明显。同时,蚯蚓与菌株C1单一或联合作用均使 f_{450}/f_{500} 显著增加,即蚯蚓和菌株C1都可使WEOC的来源向微生物转化。

通过对土壤中微生物群落结构分析发现,各处理均增加了真菌的丰富度和多样性,其中,蚯蚓的作用最显著,且真菌的丰富度增幅的大小顺序与有机碳的变化趋势一致;菌株C1的作用使细菌的丰富度和多样性增加,而蚯蚓与蚯蚓+菌株C1则降低了细菌的丰富度和多样性。这可能是由于蚯蚓分泌的黏液降低了某些细菌的活性,使得细菌的丰富度减少^[27]。研究表明,蚯蚓的作用可以使真菌数量增加^[28],这与本研究结果一致,这可能是由于蚓穴内部及蚓粪的真菌数量均高于对照土壤^[29],且土壤及有机物料经过蚯蚓过腹后更利于真菌侵染和繁殖^[30],同时蚯蚓能够加速土

壤有机碳转化,为微生物提供更好的生存环境。这证明真菌是将有机物料转化为有机碳的主要贡献者,在分解过程中,真菌比细菌更活跃^[31]。蚯蚓与菌株C1对盐碱土中真菌和细菌在门、属水平上的影响是不同的,对于真菌而言,菌株C1的作用以及蚯蚓与菌株C1联合作用增加了子囊菌门(Ascomycota)的相对丰度,蚯蚓的作用除了增加子囊菌门(Ascomycota)的相对丰度外还增加了被孢霉门(Mortierellomycota)的相对丰度。有研究表明,子囊菌门(Ascomycota)是所有土壤中的优势菌门。子囊菌群在大多数陆地生态系统中具有核心作用,是包括盐碱土在内的不同类型土壤中的主要分解者^[32],能够降解有机物、分解纤维素或木质素等大分子,在土壤养分循环中起着重要作用。Ma等^[33]研究发现,在土壤中有有机物料分解过程中真菌演替的不同阶段,子囊霉素均占主导地位,表明它们是降解的关键驱动因素。而被孢霉门(Mortierellomycota)喜好生存在营养物含量高的土壤环境中^[34],是蚯蚓处理中独有的菌门,间接说明了蚯蚓的作用使土壤碳等营养物质在一定程度得到了提高。由于培养试验严格控制了不同处理之间的环境条件,且蚯蚓在接种前经过了无菌水的冲洗,这些独有的真菌菌门极有可能来源于蚯蚓肠道微生物。已有的研究表明,微生物在通过蚯蚓肠道后其数量明显增加,群落结构也发生了变化^[35],而这些肠道源微生物也会随着蚓粪的排泄进入土壤,蚯蚓的穿插移动则为这些移动性较弱的微生物提供了便利的传播方式。上述结果说明,蚯蚓与菌株C1单一或联合作用使得土壤微生物群落结构向更有利于有机物料转化的功能群落转变,增加了降解有机物的真菌丰度,进而促进有机物料的降解,改善土壤的营养结构。变形菌门(Proteobacteria)是降低土壤盐分的关键微生物,来自该菌门的假单胞菌(*Pseudomonas*)能够参与土壤关键酶的合成^[36]。拟杆菌门(Bacteroidetes)和 α 变形菌门(Alphaproteobacteria)通常与大尺寸的土壤颗粒/团聚体含量呈正相关^[37]。最近有研究发现在营养丰富的根际土壤中,酸杆菌门(Acidobacteria)的比例明显低于非根际土^[38]。与此同时,放线菌门(Actinobacteria)在可交换态钙、镁、钠、磷或硫含量较高的土壤中更为丰富,并且与土壤肥力、盐胁迫密切相关^[39]。酸杆菌门(Acidobacteria)的丰度下降也印证了土壤营养物质在一定程度上得到了提高;而放线菌门(Actinobacteria)含量的减少则从侧面说明了盐碱土盐度的降低。综合以上分析,在添加秸秆与牛粪的混合物后,

蚯蚓和菌株 C1 无论单一还是联合作用均可能通过改变微生物的群落结构来改善盐碱土的理化性质。在属水平上, SOC、WEOC、 SUV_{254} 均是影响菌群丰度的主要因素。其中, 蚯蚓的作用与 SOC、WEOC、 SUV_{254} 之间均呈显著正相关, 说明在蚯蚓的作用下微生物群落更有利于土壤有机碳含量、水溶性有机碳含量及芳香度的提高。前文提到, 在蚯蚓处理中来源于蚯蚓肠道的被孢霉门(Mortierellomycota)是土壤微生物群落中的主要类群。Drake 等^[40]发现, 当有机物料通过蚯蚓过腹后, 蚯蚓肠道内独特的微环境会极大地促进有机物料中某些微生物的生长繁殖, 而这些微生物大多能对土壤碳、氮循环起到促进作用。Bernard 等^[41]则发现, 稻草等有机物料的加入能够普遍促进微生物的活性, 但对微生物群落结构无显著影响, 而蚯蚓的存在可以通过促进一部分的功能微生物成为优势种来加快有机碳的转化。因此, 可以推断, 来源于蚯蚓肠道的功能真菌可能是导致土壤 SOC、WEOC 含量和 SUV_{254} 值增加的主要因素之一。除此之外, 土壤中腐质霉属(*Humicola*)也是影响土壤 SOC、WEOC 含量和芳香度的主要真菌菌群。有研究发现, 腐质霉属在有机物料上生长时, 会分泌水解酶、纤维素酶以及木聚糖酶^[42], 这表明蚯蚓和菌株 C1 联合作用可以通过增加土壤中腐质霉属的相对丰度促进有机物料的降解。对于细菌而言, 土壤中 8 种优势菌属与土壤 SOC、WEOC 含量和 SUV_{254} 值呈正相关。其中, 气单胞菌属(*Aeromonas*)可以广泛利用碳基质进行自身生长, 并参与有机物的降解^[43]。黄杆菌属(*Flavobacterium*)在土壤碳和氮循环中具有重要作用^[44]。可见, 在土壤中添加秸秆与牛粪的混合物后, 蚯蚓、菌株 C1 以及二者联合作用均能导致土壤中 SOC 和 WEOC 等有机物含量发生变化, 进而改变苏打盐碱土的微生物群落结构和组成, 提升土壤的生态功能。

4 结论

(1) 蚯蚓与类芽孢杆菌 C1 能够协同提高苏打盐碱土中水稻秸秆和牛粪混合物的降解率, 促进类溶解性微生物代谢产物和类腐植酸物质的生成。

(2) 蚯蚓、菌株 C1 单一以及联合作用均能提高土壤有机碳和水溶性有机碳含量、水溶性有机碳的芳香度和微生物源前体物的生成, 作用效果的总体表现为蚯蚓>蚯蚓+菌株 C1>菌株 C1。

(3) 蚯蚓和菌株 C1 单一或联合作用均能提高真菌丰富度和多样性, 使得土壤微生物群落结构向更

有利于有机物料转化的功能群落转变, 并使能够降解有机物的真菌丰度增加。菌株 C1 单一作用可提高细菌的丰富度和多样性, 而蚯蚓单一和联合作用则降低了细菌的丰富度和多样性。在属水平上, 蚯蚓的作用与土壤中 SOC、WEOC 含量和 WEOC 紫外吸收特征值呈正相关。

参考文献:

- [1] LI Y F, LI Q Y, GUO D Y, et al. Ecological stoichiometry homeostasis of *Leymus chinensis* in degraded grassland in western Jilin Province, NE China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90:387-391.
- [2] 孙赫阳, 王鸿斌, 杨明, 等. 有机物料改良苏打盐碱土增产玉米长期试验研究[J]. 玉米科学, 2017, 25(5):122-127. SUN H Y, WANG H B, YANG M, et al. Long-term experimental study on improvement of soda saline-alkali soil for maize yield increase with organic materials [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(5):122-127.
- [3] 范之馨, 张焕朝, 陈捷, 等. 有机物料添加后滨海盐渍土壤溶解性有机碳变化及其紫外-可见光谱特征[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(3):444-451. FAN Z X, ZHANG H C, CHEN J, et al. Ultraviolet-visible spectral characteristics of soil dissolved organic carbon (DOC) in coastal saline soil after adding organic materials[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2021, 48(3):444-451.
- [4] 李文兵, 毕江涛, 刘鹏, 等. 牛粪好氧堆肥发酵微生物群落结构演替与环境因子和腐熟度的相关性[J]. 环境工程, 2022, 40(1):69-77. LI W B, BI J T, LIU P, et al. Correlation between the succession of microbial community structure and environmental factors and maturity of cattle manure aerobic composting[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(1):69-77.
- [5] ZHU N, ZHU Y Y, KAN Z X, et al. Effects of two-stage microbial inoculation on organic carbon turnover and fungal community succession during co-composting of cattle manure and rice straw[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 341:125842.
- [6] 张超, 井雨铂, 张秀芳, 等. 利用白囊胞齿菌生产高质玉米秸秆饲料[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(5):622-627. ZHANG C, JING Y B, ZHANG X F, et al. High-quality feed production through degradation of corn straw by *Lrpex lacteus*[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(5):622-627.
- [7] TIMOTHY J F, JOSEPH B Y, RUTH E S, et al. Earthworm effects on the incorporation of litter C and N into soil organic matter in a sugar maple forest[J]. *Ecological Applications*, 2013, 23(5):1185-1201.
- [8] 伍玉鹏, 吕丽媛, 毕艳孟, 等. 接种蚯蚓对盐碱土养分、土壤生物及植被的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(4):45-51. WU Y P, LÜ L Y, BI Y M, et al. Effects of earthworm inoculation on saline-alkali soil nutrient, soil organisms and plant cultivation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(4):45-51.
- [9] 程雄, 王利英, 李文彦, 等. 猪场废弃物和解磷菌、蚯蚓联合施用对旱坡地土壤碳循环相关酶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2479-2485. CHENG X, WANG L Y, LI W Y, et al. Effects of pig farm waste, phosphate-solubilizing bacteria, and earthworms on en-

- zymes related to soil C cycling in arid hillside land[J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2017, 36(12):2479-2485.
- [10] ZHANG Y L, WANG L Y, LI W Y, et al. Earthworms and phosphate-solubilizing bacteria enhance carbon accumulation in manure-amended soils[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2017, 17(5):220-228.
- [11] ZHANG W W, CAO J, ZHANG S D, et al. Effect of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on the microbial community and maize growth under salt stress[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107:214-223.
- [12] 杨满元, 杨宁, 欧阳美娟, 等. 紫色土丘陵坡地土壤水溶性有机碳对植被恢复的响应及其与土壤因子的关系[J]. 草地学报, 2019, 27(3):784-788. YANG M Y, YANG N, OUYANG M J, et al. Response of soil dissolved organic carbon to re-vegetation and the relationships between it and soil factors in hillslope land with purple soils[J]. *Journal of Grassland*, 2019, 27(3):784-788.
- [13] FEUDIS M D, CARDELLI V, MASSACCESI L, et al. Altitude affects the quality of the water-extractable organic matter (WEOM) from rhizosphere and bulk soil in European beech forests[J]. *Geoderma*, 2017, 302:6-13.
- [14] 李倩, 马琨, 冶秀香, 等. 不同培肥方式对土壤有机碳与微生物群落结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12):1866-1875. LI Q, MA K, YE X X, et al. Effect of fertilization managements on soil organic carbon and microbial community structure[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2018, 26(12):1866-1875.
- [15] 陈潼越, 李明堂, 郎立娜, 等. 耐盐碱类芽孢杆菌 C1 对苏打盐碱土团聚体的影响特征[J/OL]. (2021-06-04)[2022-01-13]. 吉林农业大学学报, <http://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.1185>. CHEN T Y, LI M T, LANG L N, et al. Effect of saline-alkali tolerant *Paenibacillus* sp. C1 on aggregates of soda saline-alkaline soil[J/OL]. (2021-06-04)[2022-01-13]. *Journal of Jilin Agricultural University*, <http://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.1185>.
- [16] 王斌, 李根, 陈欢, 等. 蚯蚓作用下土壤化学组成和性状的动态变化[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):273-277. WANG B, LI G, CHEN H, et al. Dynamic variation of soil chemical compositions and properties under the action of earthworms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):273-277.
- [17] 李明堂, 王继红, 赵兰坡, 等. 大豆与玉米根部土壤水溶性有机物的荧光特性比较研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2):140-144. LI M T, WANG J H, ZHAO L P, et al. Comparative study on fluorescent characteristics of water extractable organic matter from root soils of soybean and maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2):140-144.
- [18] 王丹丹, 李辉信, 胡锋, 等. 蚯蚓-秸秆及其交互作用对黑麦草修复 Cu 污染土壤的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(4):1292-1298. WANG D D, LI H X, HU F, et al. Role of earthworm-straw interactions on phytoremediation of Cu contaminated soil by ryegrass[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4):1292-1298.
- [19] 叶伟伟, 杨晓燕, 张龙, 等. 一种有机物料腐熟剂对鸡粪腐熟效果的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(18):86-88, 100. YE W W, YANG X Y, ZHANG L, et al. Effect of a microbial inoculant on composting of chicken manure[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2020, 48(18):86-88, 100.
- [20] BINET F, FAYOLLE L, PUSSARD M, et al. Significance of earthworms in stimulating soil microbial activity[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(1):79-84.
- [21] MENG L, SRIVASTAVA A K, KUČA K, et al. Earthworm (*Pheretima guillelmi*)-mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae*) association mediates rhizosphere responses in white clover[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 172:104371.
- [22] AZEEM M, HASSAN T U, TAHIR M I, et al. Tea leaves biochar as a carrier of *Bacillus cereus* improves the soil function and crop productivity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 157:103732.
- [23] BOSSUYT H, SIX J, HENDRIX P F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(2):251-258.
- [24] 杨格格, 邢美燕, 马小杰, 等. 蚯蚓-微生物协同作用过程中的微生物特性[J]. 环境工程, 2017, 35(1):124-128. YANG G G, XING M Y, MA X J, et al. The microbial characteristics in earthworm-microorganism symbiotic system[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(1):124-128.
- [25] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24):5701-5710.
- [26] BARTHOD J, DIGNAC M F, RUMPEL C. Effect of decomposition products produced in the presence or absence of epigeic earthworms and minerals on soil carbon stabilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 160(3):108308.
- [27] BALDRIAN P, VOIKOVA J, DOBIAOVA P, et al. Production of extracellular enzymes and degradation of biopolymers by saprotrophic microfungi from the upper layers of forest soil[J]. *Plant & Soil*, 2011, 338(S1/2):111-125.
- [28] 徐瑾. 蚯蚓对杨树人工林土壤酶活性及微生物群落结构的影响[D]. 南京:南京林业大学, 2020:74. XU J. Effects of earthworm on soil enzyme activity and microbial community structure of poplar plantation[D]. Nanjing:Nanjing Forestry University, 2020:74.
- [29] JOSEF H, GORRES M C, SAVIN J A. Soil micropore structure and carbon mineralization in burrows and casts of an anecic earthworm (*Lumbricus terrestris*) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(14):1881-1887.
- [30] BROWN G G, BAROIS I, LAVELLE P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2000, 36(3/4):177-198.
- [31] OSONO T. Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition[J]. *Ecological Research*, 2007, 22(6):955-974.
- [32] YANG C, WANG X Z, MIAO F H, et al. Assessing the effect of soil salinization on soil microbial respiration and diversities under incubation conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155:103671.
- [33] MA A, ZHUANG X, WU J, et al. Ascomycota members dominate fungi communities during straw residue decomposition in arable soil[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(6):e66146.
- [34] YU H, ZHANG Y, TAN W B. The "neighbor avoidance effect" of mi-

- croplastics on bacterial and fungal diversity and communities in different soil horizons[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2021, 8: 100121.
- [35] FURLONG M A, SINGLETON D R, COLEMAN D C, et al. Molecular and culture based analyses of prokaryotic communities from an agricultural soil and the burrows and casts of the earthworm *Lumbricus rubellus*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68 (3) : 1265–1279.
- [36] ZHANG C, ZHOU X H, WANG X Y, et al. *Elaeagnus angustifolia* can improve salt-alkali soil and the health level of soil; Emphasizing the driving role of core microbial communities[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114401.
- [37] HEMKEMEYER M, DOHRMANN A B, CHRISTENSEN B, et al. Bacterial preferences for specific soil particle size fractions revealed by community analyses[J]. *Front Microbiol*, 2018, 23(9) : 149.
- [38] KIELAK A, PIJL A S, VAN VEEN J A, et al. Phylogenetic diversity of *Acidobacteria* in a former agricultural soil[J]. *The ISME Journal*, 2009, 3: 378–382.
- [39] RAMADOSS D, LAKKINENI V K, BOSE P, et al. Mitigation of salt stress in wheat seedlings by halotolerant bacteria isolated from saline habitats[J]. *Springer Plus*, 2013, 2(1) : 1–7.
- [40] DRAKE H L, HORN M A. As the worm turns: The earthworm gut as a transient habitat for soil microbial biomes[J]. *Annual Review of Microbiology*, 2007, 61(1) : 169–189.
- [41] BERNARD L, CHAPUIS-LARDY L, RAZAFIMBELO T, et al. Endogeic earthworms shape bacterial functional communities and affect organic matter mineralization in a tropical soil[J]. *The ISME Journal*, 2011, 6(1) : 213–222.
- [42] FARIA S, MELO G R D, CINTRA L, et al. Production of cellulases and xylanases by *Humicola grisea* var. *thermoidea* and application in sugarcane bagasse arabinoxylan hydrolysis[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 158: 112968.
- [43] MIN D, WU J, CHENG L, et al. Dependence of arsenic resistance and reduction capacity of *Aeromonas hydrophila* on carbon substrate[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123611.
- [44] ZHANG X P, GAI X, YANG C B, et al. Effects of chicken farming on soil properties and root-associated bacterial communities in a bamboo (*Phyllostachys praecox*) ecosystem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 157: 103725.