

增施有机肥对黄河三角洲盐碱地碳氮组分和微生物群落的影响

朱桃川, 明玉飞, 李传福, 项荣宇, 焦树英, 李永强

(山东农业大学资源与环境学院, 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018)

摘要: 为探究增施有机肥对盐碱土壤有机碳氮组分和微生物群落的影响,以 2018 年开始的黄河三角洲盐碱垦殖区小麦—玉米轮作样地为研究对象,通过分析 3 种处理(普通化肥 CN、化肥+猪粪有机肥 PCOF 和不施肥 CK)下土壤有机碳氮组分含量和微生物群落对增施有机肥措施响应,以期为黄河三角洲盐碱地改良和农业可持续发展提供理论依据。结果表明:(1)肥料的投入对盐碱土壤起着积极促进作用,增施有机肥与单施化肥相比,土壤氮磷钾等基础养分含量分别显著提高 15.6%,251.7%,65.2% ($p<0.05$),耕层结构得到改善。(2)增施有机肥有助于土壤有机碳、氮活性组分升高,颗粒有机碳(POC)、可溶性有机碳(DOC)和微生物量碳(MBC)较 CN 分别显著提高 40.8%,13.2%和 69.1%;酸解总氮(HTN)和酸解氨基酸态氮(AAN)分别显著提高 11.6%和 33.3%。单施化肥相比 CK,易氧化有机碳(EOC)和 MBC 分别显著提高 32.9%和 17.5%,有机氮组分未产生显著影响。(3)经 3 年有机肥增施,细菌群落多样性和真菌群落丰富度较 CK 和 CN 显著提高,酸杆菌门、绿弯菌门和子囊菌门等有益菌群的相对丰度增加。(4)冗余分析(RDA)显示,有机碳和有机氮组分与微生物群落中有益菌门的相对丰度呈显著正相关关系,与贫营养型菌门相对丰度呈显著负相关关系。综上表明,增施有机肥是提高盐碱土壤有机碳氮组分、细菌群落多样性和真菌群落丰富度的有效措施。

关键词: 黄河三角洲盐碱地; 猪粪有机肥; 碳组分; 氮组分; 微生物群落

中图分类号: S141; S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0387-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.047

Effects of Increasing Application of Organic Fertilizer on Carbon and Nitrogen Components and Microbial Community in Saline-alkali Land of the Yellow River Delta

ZHU Taochuan, MING Yufei, LI Chuanfu, XIANG Rongyu, JIAO Shuying, LI Yongqiang

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In order to explore the effects of increasing application of organic fertilizer on organic carbon and nitrogen components and microbial community in saline-alkali soil, the wheat-maize rotation sample plot in the saline-alkali reclamation area of the Yellow River Delta since 2018 was taken as the research object. The content of soil organic carbon and nitrogen components and the response of microbial community to the measures of increasing organic fertilizer under three treatments (common chemical fertilizer CN, chemical fertilizer plus pig manure organic fertilizer PCOF, and no fertilizer CK) were measured, aiming at providing a theoretical basis for the improvement of organic fertilizer and the sustainable development of agriculture in the saline-alkali land of the Yellow River Delta. The results showed that: (1) The input of fertilizer played a positive role in promoting saline-alkali soil. Compared with the application of chemical fertilizer alone, the content of basic nutrients such as nitrogen, phosphorus and potassium in soil increased significantly by 15.6%, 251.7% and 65.2% respectively ($p<0.05$). Moreover, the plough layer structure has been improved. (2) Combined application of inorganic and organic fertilizers was helpful to increase the active components of soil organic carbon and nitrogen. Compared with CN, POC, DOC and MBC were significantly increased

收稿日期: 2022-04-29
资助项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MC173); 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0800602, 2018YFD0800403)
第一作者: 朱桃川(1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农业面源污染防治和退化盐碱地改良研究。E-mail: z18854887685@163.com
通信作者: 焦树英(1978—), 女, 教授, 主要从事环境生态治理和退化土壤生态修复研究。E-mail: jiaoshuying@sdau.edu.cn
李永强(1976—), 男, 副教授, 主要从事土壤养分管理和盐碱地退化土壤生态修复研究。E-mail: lyqlinda@163.com

by 40.8%, 13.2% and 69.1% respectively. HTN and AAN increased significantly by 11.6% and 33.3% respectively. Compared with CK, EOC and MBC of single application of chemical fertilizer significantly increased by 32.9% and 17.5% respectively, and organic nitrogen components had no significant effect. (3) After three years of combined application of organic fertilizer, the diversity of bacterial community and the richness of fungal community were significantly higher than that of CK and CN, and the relative abundance of beneficial bacteria such as Acidobacteria, Curvularia and Ascomycetes increased. (4) RDA analysis showed that organic carbon and organic nitrogen components had a significant positive correlation with the relative abundance of beneficial bacteria in microbial community, and a significant negative correlation with the relative abundance of Oligotrophic Bacteria. In conclusion, increasing the application of organic fertilizer is an effective measure to improve the organic carbon and nitrogen components of saline-alkali soil, as well as the diversity of bacterial community and the richness of fungal community.

Keywords: saline-alkali land in the Yellow River Delta; pig manure organic fertilizer; carbon component; nitrogen component; microorganism

土壤盐碱化严重制约着土地的有效利用并对区域生态环境产生负面影响^[1],全球约 9 亿 hm^2 的土壤生产力受到盐渍化和碱化的严重遏制^[2]。盐碱化耕地作为我国主要的中低产田类型之一,土壤有机质含量不足 1% 的面积占 26%^[3];盐碱土壤的板结、低透气和透水性等特征严重影响土壤碳、氮的矿化过程和微生物代谢^[4]。黄河三角洲是海陆相互作用形成的海退区,海水入侵、高蒸发—降雨比导致土壤次生盐渍化严重^[5],肥力低、结构差、投入与产出失衡等特点使该地成为典型的低产盐碱地。加快黄河三角洲盐碱地改良与利用,对缓解盐碱地生产力衰退和盐碱地生态修复具有重要意义。

有机肥能够增加耕地的养分库容,提高土壤供肥容量^[6],满足作物全生育期的营养需求^[7]。施入有机肥,可以补充有机养分,改善微生物群落结构和丰富度并促进土壤团聚结构形成^[8],实现氮磷留存和有效利用的同时加快盐分淋洗。基于近年来化肥施用量频繁超过经济意义上的最佳施肥量,打破农田生态系统中的物质和能量循环平衡^[9],有机无机配施逐渐成为肥料施用的热点趋势。国内一些长期定位施肥试验表明,无机配施有机肥能在保证产量的同时,加大有机碳固定量^[10]和有机氮组分,有机肥的配合施用比单施无机肥显著增加不同团聚体中的有机碳含量,促进碳库和氮库的丰富。盐碱地作为生态系统的一部分,其理化和生物学性质造就独特的物质和能量循环系统,不合理的施肥措施会引起脆弱的生态环境,加剧土壤次生盐碱化和周边湿地环境负担。所以优化肥料是盐渍土壤培肥和快速脱盐的首要前提,将兼具速效和长效优势^[11]的增施有机肥应用于盐碱土壤改良是一种新的尝试。

本研究选择黄河三角洲新开垦盐碱土地为研究

对象,根据当地施肥习惯,进行 3 年不同施肥处理,分析土壤有机碳氮组分变化及其与微生物群落间的偶联关系,以期更好地揭示盐碱地对有机肥增施的环境响应,为黄河三角洲盐碱地土壤改良、减少环境污染和可持续农业绿色发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验用地位于山东省东营市垦利区苍洲村($37^{\circ}15'40''\text{N}$, $118^{\circ}36'02''\text{E}$)。该地属暖温带大陆性季风气候区,年平均气温 12.1°C ,年平均降水量 690 mm,年日照时间 2 571~2 865 h,年平均无霜期 210 天。施肥处理前耕层 0—20 cm 土壤性质为:pH 8.32, EC 值 $1\,074.13\,\mu\text{S}/\text{cm}$,容重 $1.41\,\text{g}/\text{cm}^3$,有机质含量 $3.22\,\text{g}/\text{kg}$,全氮含量 $0.21\,\text{g}/\text{kg}$,有效磷含量 $7.64\,\text{mg}/\text{kg}$,速效钾含量 $26.41\,\text{mg}/\text{kg}$ 。

1.2 试验设计

定位试验于 2018 年 6 月夏玉米季开始,采用随机区组设计,小区面积 $40\,\text{m}^2$ ($4\,\text{m}\times 10\,\text{m}$),设置 3 个处理,包括不施肥(CK)、施用氮磷钾(NPK)化肥(CN)、NPK 化肥配施猪粪有机肥(PCOF),每个处理设置 3 个小区重复。根据农民习惯施肥量计算 NPK 化肥(小麦季 $\text{N}:240\,\text{kg}/\text{hm}^2$; $\text{P}_2\text{O}_5:120\,\text{kg}/\text{hm}^2$; $\text{K}_2\text{O}:90\,\text{kg}/\text{hm}^2$;玉米季 $\text{N}:225\,\text{kg}/\text{hm}^2$; $\text{P}_2\text{O}_5:75\,\text{kg}/\text{hm}^2$; $\text{K}_2\text{O}:90\,\text{kg}/\text{hm}^2$)和有机肥施用量,具体施肥处理见表 1。试验所用 NPK 化肥分别为尿素($\text{N}\,46\%$)、重过磷酸钙($\text{P}_2\text{O}_5\,44\%$)和硫酸钾($\text{K}_2\text{O}\,50\%$);有机肥为力大王肥业提供的猪粪有机肥($\text{N}-1.20\%$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5-2.52\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}-8.82\%$)。试验采用黄河三角洲当地典型的小麦—玉米轮作模式,氮肥基施 50%,追施 50%,磷钾肥与有机肥一次性施入,其他管理同当地大田生产。

表 1 不同施肥处理的肥料用量

处理	单位: kg/hm ²			
	小麦季		玉米季	
	N: P: K(16: 8: 6)	有机肥	N: P: K(15: 5: 6)	有机肥
CK	0	0	0	0
CN	522: 273: 180	0	489: 170: 180	0
PCOF	522: 273: 180	4500	489: 170: 180	4500

1.3 土壤样品采集与项目测定方法

连续 3 年施肥处理,于 2021 年 6 月小麦季成熟期用五点法采集种植小区 0—20 cm 层土样,混匀后剔除杂物过筛,样品分为 2 份:一份保存于-80 ℃冰箱,测定微生物多样性;另一份风干以进行基础理化性质和碳氮组分指标的测定。

土壤 pH 和电导率(EC)以 1:5 土水比浸提后用 pH 计和电导率仪测定;全氮含量采用硫酸消煮后凯氏定氮仪测定;有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法;有效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提钼锑抗比色法;速效钾含量采用 NH₄OAc 浸提火焰光度法;硝铵态氮含量用 1 mol/L KCl 以 1:10 土水比浸提,连续流动分析仪测定。

土壤有机碳组分:按照 Bremner 分级法^[12],可溶性有机碳(DOC)按照 1:5 土水比振荡离心,经 0.45 μm 滤膜过滤后上 TOC 分析仪测定^[13];易氧化有机碳(EOC)采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法;颗粒有机碳(POC)采用 5 g/L 六偏磷酸钠分散,冲洗过 300 目筛,烘干研磨后测定方法同有机质;微生物碳(MBC)采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法^[14]。

土壤有机氮组分:采用 Bremner 分级法^[12],统一制备土壤酸解液,凯氏定氮法测定酸解总氮(HTN);加入 MgO 蒸馏测定酸解氨态氮(AMN);采用磷酸—硼酸盐缓冲液测定氨态氮和氨基糖态氮(ASN)含量之和;酸解氨基酸态氮(AAN)采用茚三酮、磷酸—硼酸盐缓冲液蒸馏测定^[15];酸解未知态氮(HUN)为全氮减去酸解氨态氮、氨基糖态氮、氨基酸态氮;非酸解态氮(AIN)为全氮减去酸解总氮。

表 2 不同施肥处理的土壤理化性质

处理	土壤质地			pH	EC/ (mS·cm ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)
	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%						
CK	72.6	25.8	1.7	7.83±0.02a	5.41±0.07a	0.48±0b	9.57±0.08c	82.43±1.26c	3.54±0.17b
CN	76.8	21.5	1.7	7.75±0b	4.21±0.03b	0.46±0.03b	16.43±0.22b	131.43±9.80b	4.43±0a
PCOF	77.6	20.6	1.8	7.82±0.02a	2.40±0.24c	0.54±0.02a	57.76±0.05a	217.09±10.75a	4.94±0.01a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 不同施肥处理对土壤氮组分的影响

2.2.1 不同施肥处理对无机氮含量的影响 有机肥增施对土壤无机氮组分产生显著影响,单施化肥对其未产生显著差异。从图 1 可以看出,铵态氮含量呈现出 CK<CN<PCOF,在 PCOF 处理下,铵态氮含量

土壤微生物高通量测序由美吉生物制药有限公司完成,具体步骤为:完成基因组 DNA 抽提后,利用 1%琼脂糖凝胶电泳检测抽提的基因组 DNA,按指定测序区域,合成带有 barcode 的特异引物进行扩增,构建 PE 文库,最后进行 Illumina 测序。由 Miseq 测序得到的 PE reads 首先根据 overlap 关系进行拼接,同时对序列质量进行质控和过滤,使用 Usearch(7.1 版本)去除没有重复的单序列,按照 97%相似性对非重复序列进行 OUT 聚类 and 物种分类学分析。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理,IBM SPSS 23.0 软件对有机碳氮组分和 α 多样性指数进行显著性差异分析,采用 Origin 2018 软件进行无机氮含量绘图。由美吉制药提供的数据平台进行微生物门级群落相对丰度条形图绘制,对细菌、真菌群落构成差异进行主成分(PCA)分析,采用 ANOSIM 相似性分析进行非参数检验,利用 Bray-Curtis 算法计算样品间距离,并计算 R 值和 p 值;并对土壤有机碳氮含量和微生物门水平上的优势菌群相对丰度做冗余(RDA)分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

根据国际制土壤质地分类标准,所有施肥处理下的土壤均为砂质土。由表 2 可知,经过 3 年培肥改地,PCOF 处理的土壤机械组成中砂粒和黏粒数量较 CK、CN 有所增加。与不施肥相比,单施无机肥显著降低土壤 pH 和 EC,增施有机肥显著降低 EC(55.6%)($p<0.05$),对土壤酸碱度没有产生显著影响。有机肥增施较 CK 相比,土壤全氮、有效磷、速效钾及有机质含量分别显著提高 12.6%,503.7%,163.4%和 39.4%;较 CN 相比,分别显著增高 15.6%,251.7%,65.2%和 11.5%($p<0.05$)。单施无机肥处理的有效磷和速效钾含量较 CK 处理分别显著提高 71.7%和 59.4%($p<0.05$),有机质含量提高 0.9 g/kg。

较 CK 和 CN 分别显著增加 25.1%和 19.2%;相反,硝态氮含量则分别降低 2.45,3.99 mg/kg。

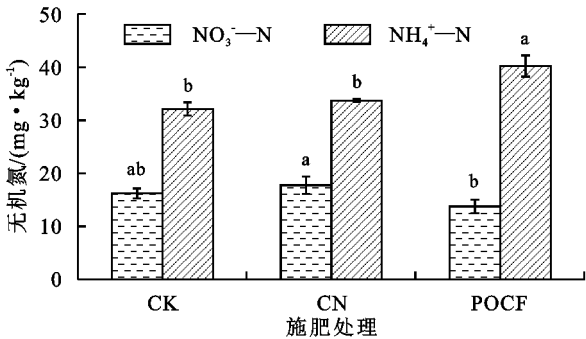
2.2.2 不同施肥处理对有机氮组分的影响 有机氮组分对施肥处理的响应不尽相同(表 3),有机肥增施处理下的 HTN、AIN 和 HUN 含量显著高于不施

肥和单施无机肥处理,较 CK 分别显著提高 9.1%,50.0%,60.0%;较 CN 分别显著提高 11.6%,100.0%,33.3%($p<0.05$)。与 CK 处理相比,单施无机肥并未对土壤有机氮组分造成正向影响;反之,CN 处理的 HTN、AIN、AMN 和 AAN 含量较 CK 分别下降 2.3%,25.0%,5.0%和 14.3%。

2.3 不同施肥处理对土壤有机碳组分的影响

3 种施肥模式对土壤有机碳组分的影响存在差异(表 4),土壤 EOC、POC、DOC 及 MBC 含量对施肥模式的响应呈现出相同趋势,均为 $CK<CN<PCOF$ 。与 CK 相比,土壤 EOC 含量在 PCOF 处理下显著提高 43.0%,在 CN 处理下则显著提高 32.9%($p<0.05$)。PCOF 处理的 POC 含量较 CK、CN 分别显著提高 60.8%,41.0%,DOC 含量分别显著增加

13.7%,13.2%($p<0.05$)。MBC 对不同施肥模式的响应最为强烈,PCOF 处理的 MBC 含量较 CK 处理显著增加 98.6%,较 CN 处理显著增加 69.1%;与 CK 相比,CN 处理的 MBC 含量显著提高 17.5%。



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同施肥处理硝态氮、铵态氮含量

表 3 不同施肥处理对土壤有机氮组分含量的影响 单位:g/kg

处理	酸解总氮 (HTN)	非酸解态氮 (AIN)	酸解未知 态氮(HUN)	酸解氨态氮 (AMN)	酸解氨基 糖态氮(ASN)	酸解氨基 酸态氮(AAN)
CK	0.44±0.02b	0.04±0.03b	0.05±0.01b	0.20±0.01a	0.12±0.01a	0.07±0.11ab
CN	0.43±0.02b	0.03±0.02b	0.06±0.02b	0.19±0.01a	0.12±0.01a	0.06±0.02b
PCOF	0.48±0a	0.06±0.02a	0.08±0.01a	0.19±0a	0.13±0.01a	0.08±0.12a

表 4 不同施肥处理土壤有机碳组分含量

处理	易氧化有机碳 (EOC)/ (mg·kg ⁻¹)	颗粒有机碳 (POC)/ (g·kg ⁻¹)	可溶性有机碳 (DOC)/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量碳 (MBC)/ (mg·kg ⁻¹)
CK	0.84±0.02b	1.07±0.34b	494.53±4.91b	95.41±4.14c
CN	1.12±0.09a	1.22±0.27b	496.67±1.44b	112.06±4.10b
PCOF	1.20±0.11a	1.72±0.37a	562.03±5.46a	189.51±3.89a

2.4 不同施肥处理土壤微生物群落特征变化

Shannon、Simpson 和 Chao、Ace 指数分别用于反映土壤中细菌和真菌群落的多样性和丰富度大小。长期增施有机肥和单施无机肥对盐碱土细菌群落并未造成显著影响,但施肥措施的不同使得真菌群落特征差异显著(表 5)。在细菌群落中,PCOF 和 CN 处理的 Shannon 指数相比 CK 分别升高 1.6%和 2.3%;

而 Simpson 指数较 CK 分别下降 43.2%和 47.7%。在真菌群落特征值中,PCOF 在 Shannon 和 Simpson 指数上与 CK 无显著差异,但 CN 处理下的 Shannon 指数较 CK 显著增加 12.9%($p<0.05$),Simpson 指数则显著降低 42.9%($p<0.05$)。

土壤细菌的 Chao 指数在 CN 处理下达到最大,较 CK 和 PCOF 分别增加 0.9%,1.2%;Ace 指数亦然,与 CK 和 PCOF 相比分别增加 1.4%,0.7%,这表明无机肥的施用可以提高细菌群落的丰富度。在真菌群落中,PCOF 的丰富度指数均显著高于 CK 和 CN,较 CK 处理 Chao 指数显著提高 23.5%,较 CN 处理显著提高 20.8%($p<0.05$);Ace 指数分别显著提高 25.4%,22.9%($p<0.05$)。综上表明,增施有机肥可提高真菌群落丰富度。

表 5 不同施肥处理的土壤菌群 α 多样性

处理	细菌				真菌			
	Shannon	Simpson	Chao	Ace	Shannon	Simpson	Chao	Ace
CK	6.94a	0.0044a	5128.92a	5158.03a	3.72b	0.07a	464.34b	456.01b
CN	7.10a	0.0023a	5175.88a	5231.55a	4.20a	0.04b	474.86b	465.09b
PCOF	7.05a	0.0025a	5115.07a	5193.27a	3.79b	0.08a	573.66a	571.89a

土壤微生物群落分布主成分分析见图 2。在培肥改土试验中,不同处理的菌群分布结果差异明显。从图 2 可以看出,前 2 个轴(PC1、PC2)共同解释 32.71%(细菌),32.59%(真菌)的变异,第 1 主成分轴贡献率为 18.75%(细菌),17.14%(真菌),处理间空间变异明显。CK 和 PCOF 处理在细菌和真菌群落中样品间差异性较小,CN

群落构成差异则较大。无论是细菌还是真菌群落,PCOF 与 CK 都沿着 PC1 维度分布于正负端,有较好的分离度,表明 PCOF 明显改变土壤微生物菌群群落结构。在细菌群落中,PC2 解释土壤样品 13.96%的模式变异系数,CN 与 CK 处于不同象限,相对距离较远,说明 CN 处理的土壤细菌群落组成与 CK 之间差异较大;在

真菌群落中,根据 CN 在 PC1 轴的分布位置可以看出,

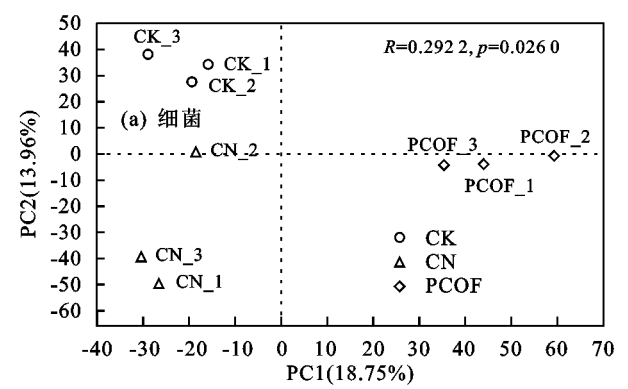


图 2 不同施肥处理细菌、真菌群落分布主成分分析(PCA)

在细菌物种门类分析中(图 3),3 种施肥处理下的土壤样品中相对丰度>20.0%的菌群有变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)和酸杆菌门(Acidobacteriota),为本研究土壤的前 4 种优势细菌门。与 CK 相比,CN 组中变形菌门丰度上升,但硬壁菌门(Firmicutes)相对丰度明显下降;PCOF 组中变形菌门相对丰度下

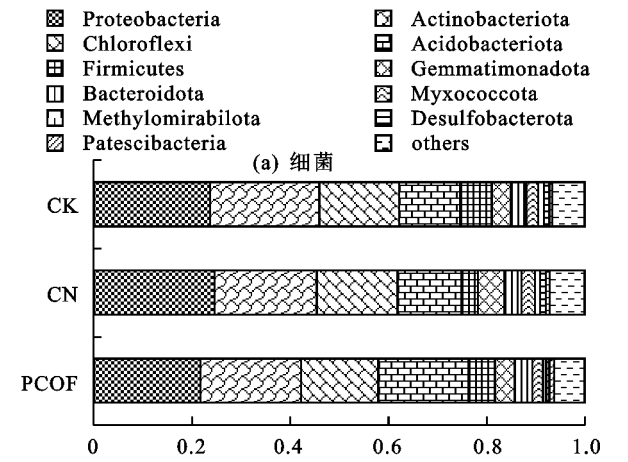
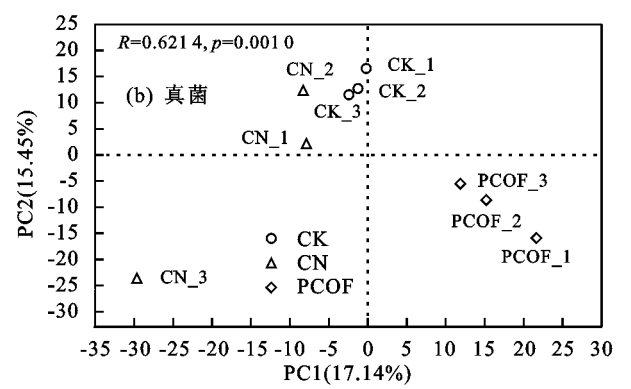


图 3 不同施肥处理土壤微生物门水平上的细菌、真菌群落组成及相对丰度

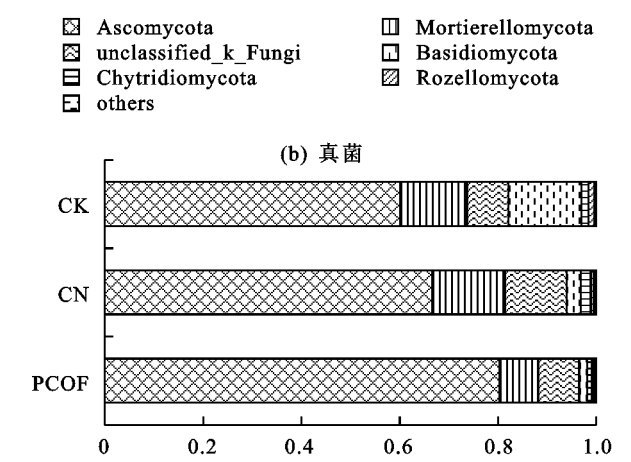
2.5 土壤微生物与有机碳氮组分的 RDA 分析

土壤有机碳氮组分分别与细菌、真菌门水平 4 种优势菌群进行冗余分析(图 4)。实线代表门水平前 4 种优势菌群的相对丰度,虚线代表土壤有机碳和有机氮组分含量。土壤有机碳氮组分与优势菌群夹角越接近 0°表示两者显著正相关,夹角接近 180°表示两者呈显著负相关。在有机碳氮组分和细菌优势门类分析中,第 1,2 排序轴分别解释细菌群落变化的 54.6%和 30.3%,2 个排序轴对物种变量的解释度达到 84.8%。通过有机碳和有机氮组分与优势菌门的夹角发现,有机碳氮和细菌优势门类相对丰度之间有显著的相关关系。除 EOC 外的有机碳组分以及除 AMN 外的有机氮组分与绿弯菌门和酸杆菌门均呈显著正相关关系,而 AMN 和 EOC 与 4 种优势细菌门类均呈显著负相关关系($p<0.05$)。

CN 对真菌群落结构的改变次于 PCOF。



降,酸杆菌门丰度明显增加。在真菌群落中,担任优势菌门的是子囊菌门(Ascomycota)、被孢霉门(Mortierellomycota)和担子菌门(Basidiomycota)等。3 种施肥模式下,子囊菌门的丰度大小顺序为 PCOF>CN>CK,被孢霉门的大小顺序为 CN>CK>PCOF,而担子菌门的相对丰度大小与子囊菌门互为相反,为 CK>CN>PCOF。



在与真菌优势菌门的相对丰度冗余分析中,2 个排序轴对物种变量的解释度达 90.7%。有机碳氮各组均与被孢霉门相对丰度呈显著负相关关系,而除 AMN 外的各有机碳氮组分与子囊菌门相对丰度呈显著正相关关系,并与担子菌门呈显著负相关关系($p<0.05$)。

3 讨论

有机肥中含有大量对植物生长有益的营养元素,包括氮磷钾、有机质还有部分微量元素,所以有机肥的施用会增加土壤养分的累积,再配施无机肥后,进一步促进有机质的提高,以此改善土壤耕层结构,增加砂粒和黏粒占比,并促进 EC 下降,加快盐分淋洗。通过连续 3 年定位试验结果表明,猪粪有机肥和无机肥配合施用能显著提高盐碱土基础养分含量,同前人^[16]研究结果一致。

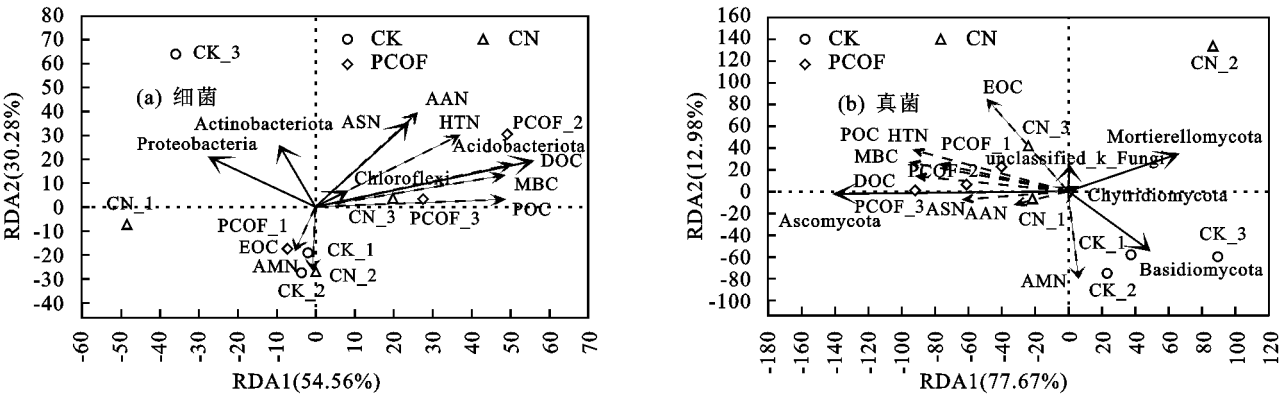


图 4 不同施肥处理土壤有机碳氮与微生物门水平优势细菌、真菌相对丰度的冗余分析 (RDA)

有机碳组分能够敏感反映养分在土壤中的动态变化,是衡量土壤肥力的重要指标。有机氮以占土壤全氮 90% 的优势,成为氮素的主要存在形式^[17],能准确反映土壤氮素库源情况,决定土壤供氮潜力^[18-19]。土壤有机氮和有机碳组分在氮素和碳素矿化、固定和迁移过程中发挥着至关重要的作用,其活性组分表征土壤供氮和供碳能力的高低,是监测土壤质量和养分循环的靶性指标^[20]。大量研究^[21-22]表明,增施猪粪有机肥能显著提高土壤有机碳氮含量。本研究显示,有机氮组分以酸解总氮占主导,活性氮与全氮的累积呈正向关系,均随着有机肥的施入而含量升高。土壤有机碳组分 EOC、POC、DOC、和 MBC 在有机肥增施后含量较 CK 和 CN 均显著升高。陈洁等^[23]的研究指出,有机肥中含有许多碳化含有机物,施入土壤后提高土壤养分积累速率,促进植物生长,改善土壤物理结构,营造丰富微环境,有利于微生物繁衍活动,最终带动碳氮循环^[24]。与不施肥和单施无机化肥相比,增施有机肥更有利于有机碳组分和氮组分的累积。

施肥处理的改变,使得微生物活跃程度各不相同。根据 α 指数分析规律,Shannon 指数越高,多样性越高,Simpson 指数越低,多样性越高^[25]。本研究通过对土壤菌群多样性指数分析发现,增施有机肥使得土壤细菌 Shannon 指数升高,Simpson 指数降低;同时显著提高真菌群落的 Chao 和 Ace 指数,表明长期增施有机肥能够提高盐碱地的细菌群落多样性和真菌群落丰富度。结合 PCA 分析,各处理间空间变异明显。PCOF 在与细菌和真菌的主成分分析中,均与 CK、CN 有较好的分离度,说明长期增施有机肥对微生物菌群群落结构的改变有重要贡献。与刘益仁等^[26]研究发现无机肥增施有机肥对土壤细菌和真菌群落结构造成显著影响的结论一致。通过对微生物群落中细菌和真菌的优势菌门分析发现,在 PCOF 处理下,能够降解枯枝落叶、参与单碳化合物代谢等生态功能的酸杆菌门和具有抑制病原真菌作用的子

囊菌门相对丰度增加^[27],而含有会引起植物病害真菌的担子菌门相对丰度则下降^[28]。由这些优势菌门的丰度变化可以看出,长期增施有机肥能够在一定程度上优化微生物类群,构建适宜的土壤微环境。

经过对有机碳氮组分和微生物门水平上的优势菌门相对丰度之间的冗余分析发现,除个别碳组分和氮组分,有机碳和有机氮组分均和富营养型菌门—绿弯菌门、酸杆菌门、子囊菌门的相对丰度呈显著正相关关系,并与贫营养型菌门—担子菌门相对丰度呈显著负相关关系。结果表明,长期增施有机肥为土壤微生物繁衍代谢等活动提供丰富的有机碳和有机氮组分,创造良好的土壤微域环境。

4 结论

(1)增施有机肥显著提高黄河三角洲土壤基础养分含量,显著降低土壤 EC,降幅达 55.6%,促进洗盐排盐,有效改善土壤耕层结构,提升土壤肥力。

(2)有机肥的增施显著增加 98.6% 的土壤微生物量碳和有机氮组分,土壤碳库储量和氮库储量得到充盈。

(3)有机肥增施提高土壤微生物群落结构多样性和丰富度,增加微生物有益菌门相对丰度,创造适宜微环境,为碳氮循环提供动力。

综合分析表明,盐碱地土壤基础养分、有机碳氮组分和微生物群落活性对增施有机肥措施产生积极响应,故无机肥增施有机肥可以作为黄河三角洲盐碱地改良培肥的有效措施。

参考文献:

[1] 罗慧,冯程程,岳中辉,等.植被修复对重度盐碱地土壤酶活性和酶反应热力学特征的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4243-4250.

[2] Xu J S, Gao W, Zhao B Z, et al. Aacterial community composition and assembly along a natural sodicity/salinity gradient in surface and subsurface soils[J].Applied

- Soil Ecology, 2021, 157: e103731.
- [3] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
- [4] 魏守才,谢文军,夏江宝,等.盐渍化条件下土壤团聚体及其有机碳研究进展[J].应用生态学报, 2021, 32(1): 369-376.
- [5] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. Geoderma, 2019, 349: 25-35.
- [6] 张雅贞,李跃进,景宇鹏,等.施用有机肥对土默川平原盐碱土土壤盐分及养分特征的影响[J].北方农业学报, 2019, 47(6): 34-41.
- [7] 霍琳,王成宝,逢焕成,等.有机无机肥配施对新垦盐碱荒地土壤理化性状和作物产量的影响[J].干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 105-111.
- [8] 周慧,史海滨,张文聪,等.有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响[J].环境科学, 2021, 42(10): 5010-5020.
- [9] 李玉,田宪艺,王振林,等.有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J].土壤, 2019, 51(6): 1173-1182.
- [10] 张鑫,郑成岩,李升明,等.长期有机无机肥配施降低黄淮海区域小麦—大豆复种系统净温室效应[J].植物营养与肥科学报, 2020, 26(12): 2204-2215.
- [11] 胡荷,吴宪,赵建宁,等.有机—无机肥配施对麦玉轮作土壤中细菌氮循环功能基因的影响[J].农业环境科学学报, 2021, 40(1): 144-154.
- [12] 王一诺.泥炭沼泽水位调控对土壤活性有机碳组分的影响[D].吉林:东北师范大学, 2021.
- [13] 张贾宇,余婷,鄂晓伟,等.杨树人工林幼林阶段林下植被管理对土壤微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J].生态学报, 2021, 41(24): 9898-9909.
- [14] 唐艳梅,马维伟,李广,等.尕斯库勒湖退化演替过程中土壤有机氮组分的变化特征[J].应用生态学报, 2021, 32(11): 4077-4084.
- [15] 贾倩,廖世鹏,卜容燕,等.不同轮作模式下氮肥用量对土壤有机氮组分的影响[J].土壤学报, 2017, 54(6): 1547-1558.
- [16] 石玉龙,刘杏认,高佩玲,等.生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响[J].环境科学, 2017, 38(12): 5333-5343.
- [17] 王永栋,武均,郭万里,等.秸秆和生物质炭添加对陇中黄土高原旱作农田土壤氮素矿化的影响[J].水土保持学报, 2021, 35(4): 186-192, 199.
- [18] 石思博,王旭东,叶正钱,等.菌渣化肥配施对稻田土壤微生物量碳氮和可溶性碳氮的影响[J].生态学报, 2018, 38(23): 8612-8620.
- [19] 徐香茹,骆坤,周宝库,等.长期施肥条件下黑土有机碳、氮组分的分配与富集特征[J].应用生态学报, 2015, 26(7): 1961-1968.
- [20] 石丽红,李超,唐海明,等.长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J].应用生态学报, 2021, 32(3): 921-930.
- [21] 魏夏新,熊俊芬,李涛,等.有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J].应用生态学报, 2020, 31(7): 2373-2380.
- [22] 陈源泉,隋鹏,严玲玲,等.有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J].农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 94-102.
- [23] 陈洁,梁国庆,周卫,等.长期施用有机肥对稻麦轮作体系土壤有机碳氮组分的影响[J].植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 36-44.
- [24] 赵玉皓,张艳杰,李贵春,等.长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分[J].生态学杂志, 2016, 35(7): 1826-1833.
- [25] 胡坤,张红雪,郭力铭,等.烟秆炭基肥对薏苡土壤有机碳组分及微生物群落结构和丰度的影响[J].中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1592-1603.
- [26] 刘益仁,郁洁,李想,等.有机无机肥配施对麦—稻轮作系统土壤微生物学特性的影响[J].农业环境科学学报, 2012, 31(5): 989-994.
- [27] 王良梅,陈捷,范之馨,等.外源有机物料添加对滨海盐碱土细菌群落结构的影响[J].生态与农村环境学报, 2022, 38(1): 85-95.
- [28] 费裕翀,黄樱,张筱,等.不同有机肥处理对紫色土油茶林土壤微生物群落结构的影响[J].应用与环境生物学报, 2020, 26(4): 919-927.