

外源有机物料添加对盐渍化农田土壤性质和微生物群落的影响^①

宿翠翠¹, 周彦芳^{1,2}, 丁照耘¹, 邓超超^{1,2}, 高正睿^{1,2}, 王振龙^{1,2}, 毋玲玲¹, 刘 强^{1,2*}

(1 甘肃省农业工程技术研究院, 兰州 730000; 2 武威市农田土壤改良与耕地保育技术创新中心, 甘肃武威 733006)

摘 要: 为了探究外源有机物料添加对石羊河灌区盐渍化农田的改良效果, 以木本泥炭和腐熟秸秆为试验材料, 通过田间试验, 结合高通量测序, 分析了不同用量有机物料添加下土壤化学性状及微生物群落的变化。结果显示: 与对照相比, 有机物料添加均能降低盐渍化农田土壤电导率、水溶性盐含量, 提高土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量及 CEC, 调节盐基离子浓度, 以木本泥炭 9 000 kg/hm²+腐熟秸秆 3 000 kg/hm² 和木本泥炭 13 500 kg/hm²+腐熟秸秆 4 500 kg/hm² 处理效果较好; 添加有机物料能够改变盐渍化农田土壤细菌群落结构, 显著增加变形菌门、放线菌门的相对丰度, 降低酸杆菌门相对丰度。相关性分析表明, 变形菌门相对丰度与全氮含量显著正相关; 放线菌门相对丰度与有机质含量显著正相关, 与水溶性盐含量显著负相关; 酸杆菌门相对丰度与土壤 pH 显著正相关, 与土壤有机质含量、CEC 显著负相关。综合土壤化学性状、盐分及微生物变化情况, 外源添加木本泥炭(9 000 ~ 13 500 kg/hm²)+腐熟秸秆(3 000 ~ 4 500 kg/hm²)对石羊河灌区盐渍化农田改良效果较佳。

关键词: 木本泥炭; 阳离子交换量; 盐基离子; 细菌多样性

中图分类号: S15 **文献标志码:** A

Effects of Exogenous Organic Materials on Soil Properties and Microbial Community in Salinized Farmland

SU Cuicui¹, ZHOU Yanfang^{1,2}, DING Zhaoyun¹, DENG Chaochao^{1,2}, GAO Zhengrui^{1,2}, WANG Zhenlong^{1,2}, WU Lingling¹, LIU Qiang^{1,2*}

(1 Gansu Academy of Agri-engineering Technology, Lanzhou 730000, China; 2 Wuwei City Farmland Soil Improvement and Farmland Conservation Technology Innovation Center, Wuwei, Gansu 733006, China)

Abstract: In order to explore the effects of exogenous organic materials on the improvement of salinized farmland in Shiyang River irrigation area, in this study, woody peat and decomposed straw were used as experimental materials, the changes of chemical properties and microbial communities of salinized farmland soil under different amounts of organic materials were analyzed through field experiment and high-throughput sequencing. The results showed that compared with the control, the addition of organic materials reduced the electrical conductivity and total amount of water-soluble salts, increased the contents of organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium and CEC, and adjusted the concentrations of base ions. The treatments of 9 000 kg/hm² woody peat + 3 000 kg/hm² decomposed straw and 13 500 kg/hm² woody peat + 4 500 kg/hm² decomposed straw had better effects. And the addition of organic materials changed the structure of bacterial community, significantly increased the relative abundances of Proteobacteria and Actinobacteriota, and decreased the relative abundance of Acidobacteriota. Correlation analysis showed that Proteobacteria relative abundance was significantly positively correlated with total nitrogen content, Actinobacteriota relative abundance was significantly positively correlated with organic matter content and negatively correlated with water-soluble salt content, and Acidobacteriota relative abundance was significantly positively correlated with pH and negatively correlated with organic matter content and CEC. Based on the changes of soil chemical properties, salinity and microorganisms, the addition of woody peat (9 000–13 500 kg/hm²) + decomposed straw (3 000–4 500 kg/hm²) is recommended for the improvement of salinized farmland in Shiyang River irrigation area.

Key words: Woody peat; Cation exchange capacity; Salt-based ions; Bacterial diversity

①基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(23JRRH0003)、甘肃省 2024 年省级人才项目(甘组通字[2024]4 号)和甘肃省科技特派员专项(23CXNH0019)资助。

* 通信作者(944614087@qq.com)

作者简介: 宿翠翠(1990—), 女, 甘肃定西人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤地力提升研究。E-mail: 291409435@qq.com

石羊河灌区地处西北内陆干旱区河西走廊一带,是国家河西制种玉米繁育基地的重要区域。该区域常年降水稀少,蒸发强烈,生态环境恶劣,对人为因素极为敏感,特殊的地质地形地貌加上高强度的集约利用以及农业生产“非灌不植”的特点,形成了耕地次生盐渍化的孕育环境,成为制约该区域农业发展的主要因素。盐渍化农田作为我国重要的后备战略耕地资源,多年来,甘肃省高度重视盐碱地耕地治理,综合利用工程、农艺、生物、化学、物理等措施探索盐碱耕地治理,开展了大量的工作,在降低耕地土壤盐分、提高土壤肥力的同时增加了作物产量,为稳步推进盐碱地治理工作积累了诸多经验。其中,有机物料作为环境友好型材料,备受学者们关注。不同的外源有机物料以不同的方式改善土壤性状,如提升土壤有机质含量,增强土壤透气性,提高土壤保水保肥性能,减少地表水分蒸发,减缓盐分向地表集聚,促进微生物活性等^[1]。

土壤阳离子交换量(CEC)是评价土壤保肥性能的重要指标之一,对维持土壤养分和缓冲性能有着关键的作用。由于有机物料含有大量碱金属离子和丰富的阴阳离子交换位点,添加至土壤中会明显改变土壤盐基离子含量;另外,有机物料疏松多孔,施用后能进一步强化土壤盐基离子的交换量。研究表明,秸秆还田可以显著降低农田土壤 pH^[2];生物菌肥和有机肥配施可以缓解滨海盐碱地土壤盐分,降低钠吸附比^[3-4];化肥减量配施有机肥可以显著提高阳离子交换量^[5]。土壤微生物是衡量土壤肥力水平的关键指标,在土壤腐殖质降解、养分转化循环、土壤结构改善等方面有显著的促进作用。研究发现,滨海盐碱土中添加有机物料后,细菌丰度和群落多样性显著增加^[6],生物质炭和秸秆配施可以增加土壤微生物活性。通常,有机物料在农田中的分解和转化主要依赖于农田中不同的微生物群落,但参与分解转化的微生物受农田土壤 pH、电导率和有机质含量等因素的影响^[7]。

目前,石羊河灌区盐渍化农田主要采用秸秆还田、增施有机肥、无机有机配施等措施进行盐渍化土壤改良,虽涉及不同的有机物料添加,但研究材料单一、腐殖质含量不高,土壤盐碱障碍缓解和地力提升较为缓慢。因此,本研究以高腐殖质材料木本泥炭和腐熟秸秆为供试有机物料,研究了不同用量有机物料添加下,石羊河灌区盐渍化农田土壤养分、盐分以及微生物群落结构组成和多样性的变化,探究了木本泥炭和腐熟秸秆对石羊河灌区农田盐渍化的缓解效果,以为石羊河灌区农田盐渍化防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省武威市石羊河灌区黄羊河农场基地(103°24'87"E, 37°68'87"N),海拔 1 700 m,属温带大陆性干旱气候,年均气温 8.0 °C,昼夜温差 15 °C,无霜期 164 d,年日照时数 2 532.7 h,日照率 57%,年均降水量 160 mm 左右,土壤类型为灌淤土。试验区土壤基础理化性质如下: pH 8.71,有机质含量 2.46 g/kg,全氮含量 0.23 g/kg,碱解氮含量 77.8 mg/kg,有效磷含量 14.8 mg/kg,速效钾含量 204.3 mg/kg。

1.2 试验材料

供试有机物料木本泥炭和腐熟秸秆购自北京中向利丰公司。木本泥炭全氮含量为 0.06 g/kg,有机碳含量为 6.87 g/kg, pH 为 5.48;腐熟秸秆全氮含量为 0.05 g/kg,有机碳含量为 4.48 g/kg, pH 为 7.89;二者全磷、全钾含量均小于 0.01 g/kg。

1.3 试验设计

试验于 2022—2023 年在甘肃省农业工程技術研究院试验基地进行,采用随机区组试验设计,以常规施肥、不添加任何改良材料为对照(CK),设置 5 个有机物料添加处理(表 1),每个处理 3 个重复,共 18 个小区,每个小区面积 20 m²。所有处理保持总施氮量相等,均为 N 300 kg/hm²。腐熟秸秆和木本泥炭于 2022 年 3 月底均匀施入土壤,浅旋 20 cm,使得肥料与土壤混合均匀。40% 氮肥(尿素,含 N 460 g/kg)、磷肥(过磷酸钙,含 P₂O₅ 160 g/kg)、钾肥(硫酸钾,含 K₂O 360 g/kg)于覆膜播种前基施翻匀,60% 的氮肥在玉米拔节期和抽雄期追施。添加有机物料处理中,添加的腐熟秸秆和木本泥炭所含的氮素等量替代部分基施的尿素氮,剩余部分氮素用尿素补足。种植作物为玉米,品种为德光 168 号,株距×行距为 15 cm×20 cm。2022 年 4 月 16 日种植,10 月 11 日收获;2023 年 4 月 9 日种植,9 月 28 日收获。试验期间水肥管理同日常大田管理。

1.4 样品采集与指标测定

土壤样品于 2023 年 10 月玉米收获后采集。每个小区按照“S”形采集 0~20 cm 土层 5 个点的土壤样品,混匀后作为该小区的代表性样品。采集的土样置于样品处理室自然风干,除去根系、砂砾等杂质,过 2 mm 筛后,用于土壤化学指标测定;同时,在每个小区采集 250 g 新鲜土壤,重复 3 次,及时放入装有干冰的保温盒内,寄送至南京集思慧远生物科技有限公司进行 PCR 扩增测序。

表 1 田间试验不同处理施肥种类及施肥量
Table 1 Types and amounts of fertilizers applied in different treatments of field experiment

试验处 理编号	基肥				追施 N 肥 (kg/hm ²)	总施 N 量 (kg/hm ²)
	木本泥炭(t/hm ²)	腐熟秸秆(t/hm ²)	N 替代量(kg/hm ²)	N 补充量(kg/hm ²)		
CK	0	0	0.0	120	180	300
T1	6.0	0	37.8	82.2	180	300
T2	0	9.0	49.5	70.5	180	300
T3	4.5	1.5	36.6	83.4	180	300
T4	9.0	3.0	73.2	46.8	180	300
T5	13.5	4.5	109.8	10.2	180	300

1.4.1 土壤化学指标 土壤化学指标和盐基离子的具体测定方法参考《土壤农业化学分析方法》^[8], 其中, pH 采用电位法测定; 电导率采用电导法测定; 有机质采用重铬酸钾-外加热氧化法测定; 全氮采用全自动凯氏定氮法测定; 有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定; 水溶性盐采用重量法测定; CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 采用双指示剂滴定法测定; Cl⁻ 采用硝酸银滴定法测定; SO₄²⁻ 采用 EDTA 法测定; K⁺、Na⁺ 采用火焰光度法测定; Ca²⁺、Mg²⁺ 离子采用 EDTA 法测定; CEC 采用乙酸铵交换法测定。

1.4.2 土壤微生物指标 基于 Illumina Novaseq 6000 测序平台, 采用双末端测序法(Paired-End)对细菌的 16S rDNA 基因的 V3 ~ V4 区进行扩增及测序。通过 pandaseq 软件和 PRINSEQ 软件对 Reads 拼接、过滤, 在 97% 的相似水平下将序列分成不同的操作分类单元(OTU), 并进行物种注释及丰度分析, 以及进行微生物多样性分析^[9]。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2010 对试验数据进行汇总统计和制图, 采用 SPSS 21.0 进行方差分析, 并对处理间差异进行 Duncan's 多重比较。

2 结果与分析

2.1 盐渍化农田土壤化学性状

由表 3 可以看出, 与对照(CK)相比, 除 pH 外, 添加木本泥炭和腐熟秸秆对土壤化学性状有明显的改善作用, 其中电导率随着木本泥炭和腐熟秸秆施用量的增加降低 13.44% ~ 95.18%, 有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量随着木本泥炭和腐熟秸秆添加量的增加分别增加 15.32% ~ 72.43%、14.39% ~ 40.59%、0.73% ~ 34.76%、3.17% ~ 45.20%、4.07% ~ 79.07%, 各有机物料处理与 CK 处理间差异基本显著 ($P < 0.05$), T4 与 T5 处理除碱解氮外, 差异均不显著, 与 T1、T2、T3 处理基本均表现显著差异 ($P < 0.05$)。说明木本泥炭和腐熟秸秆可以改善盐渍化土壤化学性状, 腐熟秸秆效果略强于木本泥炭, 二者配施效果更佳。

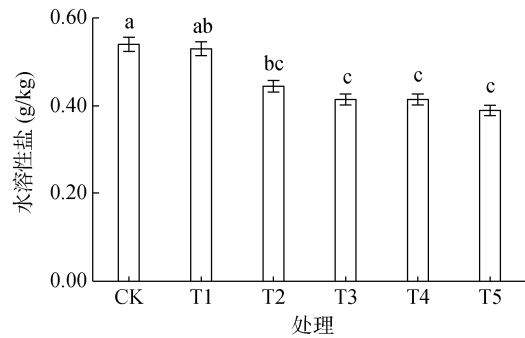
2.2 盐渍化农田土壤盐分

2.2.1 水溶性盐 外源添加木本泥炭、腐熟秸秆对土壤表层(0 ~ 20 cm)水溶性盐含量具有一定的降低作用(图 1)。各处理水溶性盐含量从小到大为: T5 < T4 < T3 < T2 < T1 < CK, 分别较 CK 处理降低 27.78%、23.15%、23.15%、17.59%、1.85%, 除 T1 处理外,

表 2 不同处理对盐渍化土壤化学性状的影响
Table 2 Effects of different treatments on chemical properties of salinized farmland soil

处理	pH	电导率(μS/cm)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾(mg/kg)
CK	8.21 ± 0.10 a	331.8 ± 6.39 a	15.35 ± 0.57 e	0.63 ± 0.02 d	56.04 ± 0.16 e	13.36 ± 0.28 c	172 ± 7.42 c
T1	8.08 ± 0.09 a	287.2 ± 4.26 b	17.70 ± 0.32 d	0.72 ± 0.01 c	56.45 ± 0.57 e	13.79 ± 0.39 c	179 ± 8.11 c
T2	8.01 ± 0.06 a	286.4 ± 6.40 b	21.56 ± 0.58 c	0.76 ± 0.02 b	57.33 ± 0.38 d	14.00 ± 0.44 c	272 ± 9.21 b
T3	7.93 ± 0.08 a	278.4 ± 5.08 b	23.43 ± 0.47 b	0.74 ± 0.01 bc	58.23 ± 0.45 c	16.44 ± 0.17 b	283 ± 5.67 ab
T4	7.87 ± 0.11 a	181.8 ± 3.80 c	25.56 ± 0.56 a	0.85 ± 0.02 a	74.39 ± 0.35 b	19.09 ± 0.29 a	288 ± 8.33 ab
T5	7.89 ± 0.07 a	170.0 ± 3.07 c	26.47 ± 0.48 a	0.88 ± 0.02 a	75.52 ± 0.46 a	19.40 ± 0.37 a	308 ± 8.42 a

注: 表中同列不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 下同。



(图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$), 下同)

图 1 不同处理对盐渍化农田土壤水溶性盐含量的影响

Fig.1 Effects of different treatments on water-soluble salt contents in salinized farmland soil

其余各处理与 CK 处理差异显著($P<0.05$)。说明单独添加木本泥炭对土壤盐分抑制效果不明显,腐熟秸秆和木本泥炭一定比例配施可有效降低土壤水溶性盐含量。

2.2.2 土壤盐基离子组成 由表 3 可知,盐基离子在不同处理中呈现多样性的变化。从阴离子组成来看,无 CO_3^{2-} 存在,CK 处理中以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为阴

离子主体,随着木本泥炭和腐熟秸秆添加量的增加, Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 含量逐渐降低,分别降低 13.08%~38.32%、1.22%~38.62%、7.41%~92.13%;其中,除 T2 处理 HCO_3^- 和 T1 处理 SO_4^{2-} 外,其余处理 3 种阴离子含量与 CK 处理差异显著($P<0.05$),以 T4 和 T5 处理降低效果相对较佳。

从阳离子组成来看, Ca^{2+} 为阳离子主体,其次为 Mg^{2+} ,随着木本泥炭和腐熟秸秆添加量的增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 含量一定程度降低,分别降低 10.50%~44.20%、31.28%~66.48%、8.16%~30.61%,其中,各有机物料处理 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量与 CK 处理差异显著($P<0.05$), Na^+ 含量仅 T4、T5 与 CK 处理差异显著($P<0.05$),而 T4、T5 处理二者间差异不显著; K^+ 含量随木本泥炭和腐熟秸秆添加量的增加先降低后增加再降低,变幅 -15.38%~88.46%,其中 T4 与 CK 处理差异显著($P<0.05$),T4 处理含量最高。表明木本泥炭和腐熟秸秆可以对土壤盐基离子含量起到调节作用,一定程度消减障碍因子,缓解盐渍化程度。

表 3 不同处理对盐渍化农田土壤盐基离子的影响

Table 3 Effects of different treatments on base cation compositions in salinized farmland soil

处理	$\text{Ca}^{2+}(\text{g/kg})$	$\text{Mg}^{2+}(\text{g/kg})$	$\text{K}^+(\text{g/kg})$	$\text{Na}^+(\text{g/kg})$	$\text{Cl}^-(\text{g/kg})$	$\text{HCO}_3^-(\text{g/kg})$	$\text{SO}_4^{2-}(\text{g/kg})$
CK	0.181 ± 0.004 a	0.109 ± 0.003 a	0.016 ± 0.003 b	0.031 ± 0.002 a	0.076 ± 0.003 a	0.40 ± 0.02 a	0.42 ± 0.01 a
T1	0.118 ± 0.001 d	0.051 ± 0.002 c	0.014 ± 0.002 b	0.027 ± 0.002 a	0.066 ± 0.004 b	0.37 ± 0.01 b	0.38 ± 0.03 a
T2	0.101 ± 0.004 d	0.049 ± 0.003 c	0.019 ± 0.005 b	0.027 ± 0.001 a	0.064 ± 0.004 b	0.39 ± 0.01 a	0.34 ± 0.01 b
T3	0.138 ± 0.002 c	0.037 ± 0.001 c	0.022 ± 0.008 ab	0.028 ± 0.004 a	0.059 ± 0.002 b	0.33 ± 0.01 b	0.09 ± 0.006 c
T4	0.162 ± 0.006 b	0.049 ± 0.003 c	0.031 ± 0.006 a	0.022 ± 0.001 bc	0.048 ± 0.004 c	0.33 ± 0.01 c	0.03 ± 0.003 d
T5	0.142 ± 0.005 c	0.075 ± 0.005 b	0.022 ± 0.009 ab	0.021 ± 0.001 c	0.047 ± 0.001 c	0.24 ± 0.01 d	0.03 ± 0.004 d

2.2.3 土壤阳离子交换量 木本泥炭和腐熟秸秆对盐渍化农田土壤 CEC 具有显著的提升效果(图 2),各处理 CEC 从大到小为: $\text{T4}>\text{T5}>\text{T3}>\text{T2}>\text{T1}>\text{CK}$,分别较于 CK 处理提升 51.32%、38.96%、29.81%、25.57%、14.11%,且各处理间差异显著($P<0.05$)。

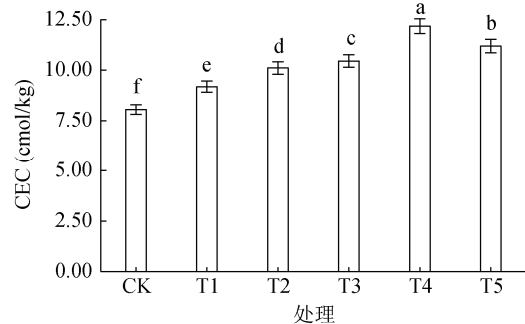


图 2 不同处理对盐渍化农田土壤 CEC 的影响

Fig.2 Effects of different treatments on CEC of salinized farmland soil

2.3 盐渍化农田土壤细菌群落组成

外源有机物料添加后,盐渍化农田土壤细菌 16S rRNA 高通量测序序列经过物种注释后归属于 36 个门,98 个纲,241 个目,340 个科和 516 个属(图 3),本研究对门水平下细菌群落相对丰度大于 1% 的且具有鉴定结果的物种进行比较,其他的归为 Others。各处理土壤中细菌优势菌门相同,门水平相对丰度大于 1% 的有变形菌门(Proteobacteria, 16.37%~24.29%)、酸杆菌门(Acidobacteriota, 17.63%~21.51%)、放线菌门(Actinobacteriota, 11.88%~17.61%)、浮霉菌门(Planctomycetota, 6.47%~13.51%)、芽单孢菌门(Gemmatimonadota, 8.78%~13.00%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 7.71%~10.19%)、拟杆菌门(Bacteroidota, 3.70%~5.04%)、疣微菌门(Verrucomicrobiota, 2.45%~3.82%)、黏球菌门(Myxococcota, 1.96%~3.46%)、甲基微菌门

(Methylomirabilota, 1.81%~2.40%)。

不同处理中相对丰度排名前 3 位的优势菌门存在一定的差异,CK 处理为酸杆菌门、变形菌门、浮霉菌门;T1 和 T2 处理为酸杆菌门、变形菌门、放线菌门,T3、T4、T5 处理为变形菌门、酸杆菌门、放线菌门,其相对丰度均与 CK 处理差异显著($P<0.05$)。随着木本泥炭和腐熟秸秆的添加,土壤中变形菌门对丰度基本呈增加趋势,以 T4 处理最高、T5 处理次之,分别较 CK 处理提高 5.45 和 2.03 个百分点;放线菌门相对丰度亦呈增加趋势,以 T2 处理最高、T4 处理次之,分别较 CK 处理提高 4.96 和 4.43 个百分点;酸杆菌门相对丰度随之呈降低的趋势,以 T5 处理最低、T4 处理次之,分别较 CK 处理降低 3.79 和 3.56 个百分点。说明添加一定量木本泥炭和腐熟秸秆会促进盐渍化土壤变形菌门、放线菌门相对丰度增加,不利于酸杆菌门、浮霉菌门群落的集聚。

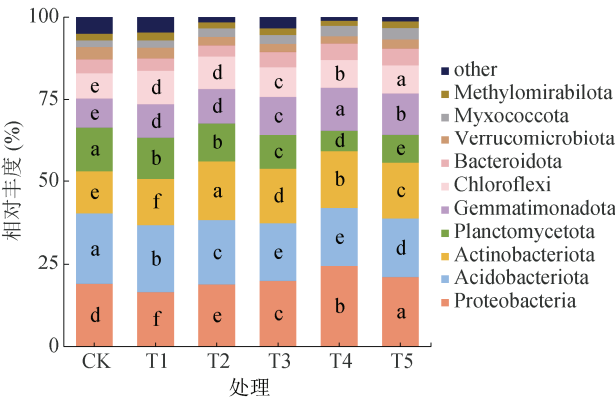


图 3 门水平下相对丰度排名前 10 位细菌群落组成和相对丰度

Fig. 3 Compositions and relative abundances of top 10 bacterial communities at phylum level

2.4 差异物种与相关土壤化学性状间的关系

将各处理相对丰度排名前 3 位的细菌差异物种与相关土壤理化性状进行相关性分析,结果如表 4 所示。变形菌门与全氮显著正相关($r=0.811$, $P<0.05$);酸杆菌门与土壤 pH 显著正相关($r=0.969$, $P<0.01$),与土壤有机质、CEC 显著负相关($r=0.949$, $P<0.01$; $r=0.910$, $P<0.05$);放线菌门与有机质显著正相关($r=0.845$, $P<0.05$),与水溶性盐显著负相关($r=0.956$, $P<0.01$)。

表 4 差异物种与土壤相关理化性状之间的关系
Table 4 Relationships between bacterial different species and soil physiochemical properties

	pH	电导率	有机质	水溶性盐	全氮	CEC
变形杆菌	ns	ns	ns	ns	0.811*	ns
酸杆菌门	0.969**	ns	-0.949**	ns	ns	-0.910*
放线菌门	ns	ns	0.845*	-0.956**	ns	ns

注: *、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关。

3 讨论

3.1 添加有机物料对土壤化学性状的影响

大量研究表明^[10-12],有机物料施用能够有效增强土壤肥力,在降低土壤 pH 和电导率、有效提高土壤速效养分、增加 CEC、平衡土壤盐分方面具有关键作用。本研究中,外源添加有机物料,土壤 pH 随着木本泥炭和腐熟秸秆施用量的增加呈降低趋势,但降幅各处理间差异不显著,与李慧敏等^[13]研究结果一致,与王良梅等^[6]的研究结果略有不同,这可能与有机物料的添加量和添加时长有关系。各有机物料处理电导率显著低于对照,且木本泥炭和腐熟秸秆二者配施比单施效果更显著,可能是木本泥炭和腐熟秸秆的添加改善了土壤结构,提高了土壤脱盐抑盐能力,从而降低了土壤电导率,这与曲成闯等^[14]的研究结果一致。木本泥炭和腐熟秸秆对土壤有机质和养分的提高作用在潮土、红壤土上已有许多研究结论,本研究结果与之一致^[15],随着木本泥炭和腐熟秸秆添加量的增加,土壤有机质、全氮、速效钾、有效磷、碱解氮含量均有不同程度提高,这与木本泥炭本身高腐殖质、强吸附性特性有关,结构稳定的腐殖质可以短期内迅速提升土壤有机质,且其疏松多孔的大空隙结构可以吸附储存足够的营养物质来维持土壤肥力。

3.2 添加有机物料对土壤盐分的影响

盐渍化土壤中盐分对土壤理化性状和微生物性状均有一定程度的影响^[12]。本研究结果显示,施用一定量的木本泥炭和腐熟秸秆后,土壤表层 0~20 cm 水溶盐含量降低,CEC 不同程度显著提高,这可能是木本泥炭和腐熟秸秆比表面积大,离子交换能力强,添加后改善了土壤团聚体结构,增加了土壤保水透气功能,从而缓解了土壤盐分向表层聚集的程度,降低了返盐的频次。该结果与王涵等^[16]、樊丽琴等^[17]的研究结果基本一致。土壤阳离子参与作物根系渗透作用,可以调节土壤盐渍化,提升土壤质量。马宏秀等^[18]研究指出,培肥对土壤中水溶性 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的影响存在差异性,添加有机肥后 K^+ 含量显著增加, Na^+ 含量呈相反的趋势, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量在 0~40 cm 土层均降低。本研究也发现,添加木本泥炭和腐熟秸秆后,土壤水溶性 K^+ 含量增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 含量不同程度降低,这也与王世斌等^[19]在黄河三角洲地区中度盐碱土施用生物炭的研究中的发现类似。土壤阴离子在平衡土壤酸碱度,缓解土壤次生盐渍化方面具有关键作用^[20]。本试验条件下,土壤无 CO_3^{2-} 存在,添加有机物料处理土壤 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量与对照相比均呈降低趋

势, 其中 HCO_3^- 占阴离子总量比例较大, 同时土壤 pH 也呈降低趋势, 可能是由于有机物料木本泥炭本身为酸性物料, 与易分解的腐熟秸秆配施后, 在微生物的作用下, 促进有机酸分解电离 H^+ , 酸化土壤环境, 中和盐碱土壤中的 OH^- , 使得土壤碱度降低, 这与孔芊芊^[21]、冉继伟等^[22]研究结果类似。说明木本泥炭和腐熟秸秆的施用会起到平衡土壤酸碱度的作用, 对土壤盐渍化程度有一定的缓解效果, 其中以 T4、T5 处理效果最佳。

3.3 添加有机物料对土壤微生物群落结构的影响

不同类型的外源有机物料添加会影响土壤微生物群落结构, 并逐渐富集优势菌群, 其多样性也随之改变^[23-24]。研究表明, 碱化土壤中添加有机物料土壤微生物细菌的多样性较高, 在多个地理尺度上土壤盐碱度与土壤微生物群落组成密切相关^[25-27]。本研究中, 细菌群落在盐渍化农田土壤微生物类群中起主导作用, 各处理在门水平上相对丰度排名前 3 位的优势菌群为变形菌门、酸杆菌门、放线菌门, 与滨海盐碱土、土默川平原碱化土中的研究结果类似^[28-29]。随着木本泥炭和腐熟秸秆施用量的增加, 变形菌门、放线菌门相对丰度逐渐增加, 酸杆菌门相对丰度各处理均降低, 可能是木本泥炭和腐熟秸秆的添加, 促使土壤碳氮比满足适宜微生物生长, 微生物群落结构向变形菌门、放线菌门等富养型菌群占优方向调整, 从而优先利用易分解有机组分, 激发外源有机底物快速分解。相关性分析结果也显示, 变形菌门、放线菌门相对丰度与土壤有机质、全氮含量正显著相关, 与水溶性盐含量负显著相关; 而酸杆菌门作为寡养型菌群则相反, 其与 pH 正显著相关, 与有机质和 CEC 负显著相关, 这与赵欣蕊等^[9]、李磊等^[30]的研究结果相似。说明木本泥炭和腐熟秸秆有利于石羊河灌区盐渍化农田沃土微生物群落富集。

4 结论

1) 与照相比, 所有添加有机物料处理均能不同程度降低盐渍化农田土壤电导率、水溶性盐含量, 增加土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量, 调节盐基离子浓度, 提高 CEC, 表明有机物料木本泥炭和腐熟秸秆在缓解盐渍化程度、提升土壤肥力方面均有一定效果, 且多数指标在 T5 处理下表现最佳, 但与 T4 处理下差异不明显。

2) 在微生物群落结构方面, 各处理细菌群落组成在门水平上未发生显著变化。相对丰度排名前 3 位的优势菌门随着木本泥炭和腐熟秸秆施用量的增

加, 变形菌门、放线菌门相对丰度一定程度增加, 分别与土壤有机质、全氮含量正显著相关, 放线菌门相对丰度还与水溶性盐含量负显著相关; 酸杆菌门与之不同, 与 pH 正显著相关, 与有机质、CEC 负显著相关。整体上, 以 T4 和 T5 处理微生物群落结构变化较为显著。

3) 综合而言, 在石羊河盐渍化农田中施用不同用量木本泥炭和腐熟秸秆对土壤化学性状、盐分和微生物群落结构的影响不同。相比于单施, 二者配施更有助于改善土壤结构、提升土壤肥力、缓解土壤盐渍化、促进土壤微生物优势菌群富集, 以木本泥炭 ($9\,000 \sim 13\,500 \text{ kg/hm}^2$) + 腐熟秸秆 ($3\,000 \sim 4\,500 \text{ kg/hm}^2$) 处理对石羊河灌区盐渍化农田改良效果较好, 建议在实际生产中应用。

参考文献:

- [1] 张子璇, 牛蓓蓓, 李新举. 不同改良模式对滨海盐渍土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 275-284.
- [2] 申天澳. 秸秆深翻还田改良盐碱地对盐碱地土壤特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [3] 张寅. 有机肥和微生物菌剂耦合对滨海盐碱地水盐动态及饲用玉米产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [4] 解雪峰, 吴涛, 沈洪运, 等. 滨海新围滩涂不同改良方式对土壤盐渍化调控效应及其主控因素[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 340-347.
- [5] 高广贤, 刘义强, 杨波, 等. 化肥减量配施有机肥对盐碱地土壤性状及镉形态的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1): 30-38.
- [6] 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.
- [7] 汪顺义, 冯浩杰, 王克英, 等. 盐碱地土壤微生物生态特性研究进展[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 233-239.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [9] 赵欣蕊, 张翠英, 张树明, 等. 不同施肥模式对滨海盐碱地土壤性质及玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(8): 84-90.
- [10] 肖雅寅, 蒲子天, 张瑞芳, 等. 不同有机物料对盐碱地改良效果的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2024(3): 229-239.
- [11] 李磊, 王晶, 朱志明, 等. 氮肥减施与有机肥/秸秆配施对盐碱地土壤肥力指标及玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 928-935.
- [12] 王丽娜. 改性棉秆基生物炭对盐碱土壤改良效果的研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- [13] 李慧敏, 田胜营, 李丹丹, 等. 有机物料施用对潮土活性有机碳及微生物群落组成的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 777-787.
- [14] 曲成闯, 陈效民, 张佳宝, 等. 基于木本泥炭快速构建

- 红壤新垦耕地优质耕作层技术与效果[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 134–140.
- [15] 赵文慧, 马垒, 徐基胜, 等. 秸秆与木本泥炭短期施用对潮土有机质及微生物群落组成和功能的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 153–164.
- [16] 王涵, 张忠庆, 刘金华, 等. 不同改良剂对苏打盐碱土的改良效果[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(5): 569–575.
- [17] 樊丽琴, 王旭, 李磊, 等. 不同淋洗水—改良材料对银北灌区碱化盐土盐分离子的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1439–1446.
- [18] 马宏秀, 张开祥, 孟春梅, 等. 棉粕对盐渍化土壤团聚体中交换性盐基离子的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(7): 1411–1417.
- [19] 王世斌, 高佩玲, 赵亚东, 等. 生物炭、有机肥连续施用对盐碱土壤改良效果研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 154–161.
- [20] 李响, 辛刚. 土层置换及土壤培肥对石灰性黑钙土土壤水溶性盐离子的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(4): 798–805.
- [21] 孔芊芊. 生物炭对南疆盐渍土团聚体特征和水盐运移的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- [22] 冉继伟, 齐昕, 武栋, 等. 施用生物炭对土壤养分有效性和离子交换性能影响的整合分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(9): 1449–1459.
- [23] 王丽, 赵惠丽, 赵英. 生物质炭配施木灰对石灰性土壤固碳和微生物群落的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 320–328.
- [24] 王振, 王文敏, 顾嘉诚, 等. 棉秆生物质炭添加对棉田土壤理化性质及根际微生物群落结构的影响[J]. 土壤, 2024, 56(3): 540–547.
- [25] 夏晓阳, 王响玲, 夏浩, 等. 改性生物炭特征及其对盐碱化土壤改良的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 12–19.
- [26] Zhu X C, Sun L Y, Song F B, et al. Soil microbial community and activity are affected by integrated agricultural practices in China[J]. European Journal of Soil Science, 2018, 69(5): 924–935.
- [27] Yang J, Ma L A, Jiang H C, et al. Salinity shapes microbial diversity and community structure in surface sediments of the Qinghai-Tibetan Lakes[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25078.
- [28] 王焱敏. 有机培肥下滨海盐碱地土壤微生物群落结构演替特征及驱动因子研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [29] 赵卉鑫. 有机物料添加对碱化土壤微生物群落的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [30] 李磊, 朱志明, 王旭, 等. 秸秆还田对银北盐碱地土壤主要肥力指标及细菌群落多样性的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(10): 1603–1615.