

土壤调理剂协同夹竹桃对江苏滨海黏质盐碱地的改良效果^①

田志恒¹, 燕 潇², 乐佳潞², 邵天韵^{2*}, 隆小华^{3*}

(1 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3 内蒙古自治区农牧业科学院特色作物研究所, 呼和浩特 010031)

摘要: 针对江苏连云港市徐圩新区黏性盐碱地的特点, 在施用土壤改良剂的基础上, 采用原位种植夹竹桃, 并以无植被空白地块为对照, 研究了种植夹竹桃对不同深度(0~20、20~40 和 40~60 cm)黏性盐碱土的改良效果及机制。结果表明: 种植夹竹桃不仅可以显著降低0~40 cm深度土层的土壤含盐量和Cl⁻含量, 还可以显著提升0~40 cm深度土层的土壤有机质、全氮、有效磷等养分含量, 且在施用土壤调理剂的同时种植夹竹桃, 对于土壤理化性质的改良具有协同作用。种植夹竹桃可以显著改变不同深度土层微生物群落组成与结构, 但土壤物种分布均匀度、物种丰富度与物种多样性均没有显著提升。从门水平看, 种植夹竹桃使得泉古菌门(Crenarchaeota)的相对丰度显著降低, 但放线菌门(Actinobacteria)的相对丰度显著提升; 从属水平看, 种植夹竹桃使得土壤中黄色土源菌属(Flavisolibacter)、海杆菌属(Marinobacter)、Ohtaekwangia、假单胞菌属(Pseudomonas)和盐坑微菌属(Salinimicrobium)等菌属的丰度显著提升。总体上, 夹竹桃可通过降盐减碱、提升土壤肥力及促进微生物群落分异等作用有效改良江苏滨海黏质盐碱地, 且土壤调理剂施用与夹竹桃种植对于改善盐碱土壤理化性质具有协同功效。

关键词: 滨海盐碱地; 土壤改良; 土壤酶; 土壤微生物; 协同效应

中图分类号: S156; S68 文献标志码: A

Synergistic Effects of Soil Conditioner and *Nerium indicum* on Coastal Saline-alkali Clay Soil in Jiangsu Province

TIAN Zhiheng¹, YAN Xiao², LE Jialu², SHAO Tianyun^{2*}, LONG Xiaohua^{3*}

(1 College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3 Institute of Characteristic Crop Sciences, Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China)

Abstract: In response to the characteristics of clay saline-alkali soil in the Xuwei New District of Lianyungang, Jiangsu Province, this study applied soil conditioner and adopted in-situ planting of oleander (*Nerium indicum*), with bare land without vegetation as the control, to investigate the improvement effects and mechanisms of oleander planting on clay saline-alkali soil at different depths (0–20 cm, 20–40 cm and 40–60 cm). The results showed that planting oleander not only significantly reduced soil salinity and Cl⁻ content in the 0–40 cm soil layer but also significantly increased the content of nutrients such as soil organic matter, total nitrogen, and available phosphorus in the 0–40 cm soil layer. Moreover, the combined application of soil conditioner and oleander planting had a synergistic effect on the improvement of soil physicochemical properties. Planting oleander significantly altered the composition and structure of soil microbial communities across different soil layers, although soil microbial species evenness, richness and diversity did not increase significantly. At the phylum level, oleander planting significantly reduced the relative abundance of Crenarchaeota but increased the relative abundance of Actinobacteria. At the genus level, the abundances of *Flavisolibacter*, *Marinobacter*, *Ohtaekwangia*, *Pseudomonas* and *Salinimicrobium* were significantly increased by oleander planting. Overall, oleander can effectively improve coastal clay saline-alkali soil in Jiangsu by reducing salt and alkali levels, enhancing soil fertility, and promoting microbial community differentiation, and the combined application of soil conditioner and

①基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2023M741739)、江苏省卓越博士后计划项目(2023ZB509)和江苏省科技计划专项资金重点研发项目社会发展项目(BE2023824)资助。

* 通信作者(2041289691@qq.com; lxh3555@126.com)

作者简介: 田志恒(2003—), 女, 江苏南京人, 本科, 研究方向为土壤改良与利用。E-mail: 9212010604@stu.njau.edu.cn

oleander planting exhibits a synergistic effect on improving the physicochemical properties of saline-alkali soil.

Key words: Saline-alkali soil; Soil improvement; Soil enzymes; Soil microorganisms; Synergistic effect

盐渍土，俗称盐碱土，是对受盐或(和)碱影响的所有类型土壤的统称，除典型盐土和碱土外，还包括各类盐化和碱化土壤，作为一种重要的土地资源，其改良利用一直备受关注^[1]。滨海盐碱地普遍存在土壤板结、通气透水性差、盐分含量和 pH 高、肥力水平低等突出问题，严重限制植物正常生长，治理难度较大^[2-3]。我国滨海盐碱地主要分布于长江口以北的沿海 11 个省、直辖市，成土母质以氯化物(NaCl)为主，土壤盐分组成与海水成分相似，且部分区域仍处于河口淤积推进过程中^[3]。该类土壤因其地下水埋深浅、矿化度高，排水不畅，加之受海潮顶托和海水倒灌影响，水—盐交互频繁，季节性返盐严重，次生盐碱化风险高，土壤中的氯化物等对植物造成显著生理胁迫^[4-6]。此外，滨海地区常年受海陆风、风暴潮和盐尘等恶劣环境的影响，植物立地条件差，绿化植物成活率极低，严重制约区域生态修复与社会经济可持续发展^[7-8]。

目前，盐碱地治理主要采取工程、化学、生物及综合改良等技术途径。其中，土壤调理剂在滨海盐碱土改良中发挥着重要作用。例如，通过添加经特殊处理的农业有机废弃物(如秸秆等)，能够有效提升土壤有机质、改善团粒结构、增强土壤透气性和保水能力；施用化学型调理剂(如石膏、腐殖酸等)能够置换土壤钠离子、降低 pH 与盐碱度，为作物生长营造更有利的环境条件^[9-10]。此外，种植如柽柳、紫穗槐、夹竹桃等耐盐碱植物进行生物修复，也是一种环境友好且具有多重生态效益的改良方式^[11-12]。夹竹桃(*Nerium indicum* Mill.)属于常绿大型灌木，具有较强的耐盐碱能力和生命力^[13]，可在含盐量较高的脱盐土和轻盐土中较快生长，兼具景观美化与生态修复功能，是滨海盐碱地绿化的先锋树种之一^[14-15]。由此，土壤调理剂与耐盐植物联合应用被认为是一种具有巨大潜力的协同改良方式：调理剂可快速改善根际微域土壤的理化性质，为植物生长创造良好条件；而植物的根系活动、有机质归还及微生物效应又能进一步促进土壤结构与肥力的持续提升，二者相互作用，形成良性循环。

近年来，夹竹桃在江苏滨海地区的绿化应用日益广泛，然而现有研究多集中于其毒性、化学成分和药理价值方面，其在环境修复方面的研究也以大气污染治理和重金属土壤修复为主，关于其在盐碱地改良中的应用效果与机制的研究仍较为缺乏。因此，本研究以江苏

省连云港市徐圩新区重度黏性盐碱土为对象，在施用土壤调理剂的基础上种植夹竹桃，通过连续 3 年的田间试验，系统分析了不同土层(表层、中层、深层)的化学性质、微生物群落组成与多样性变化，探讨了土壤调理剂与夹竹桃协同模式对滨海黏质盐碱地的改良效果与作用机制，以为该区域盐碱地生态修复与可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于江苏省连云港市徐圩经济开发区(34°75'N, 119°37'E)进行。该区地处江苏省东北部，东临黄海，属典型滨海气候。年平均气温约 14 ℃，极端最高气温 40 ℃，极端最低气温−18.1 ℃，年平均风速 3.1 m/s，多年平均降水量为 900.9 mm，其中 70% 以上集中于 6—9 月，多年平均蒸发量为 855.1 mm，5—9 月蒸发量占全年蒸发量的 59.0%，降水与蒸发在季节上分布不均。

供试土壤为黏质盐碱土。试验前，0~60 cm 土层的基础理化性质为：容重 1.58 g/cm³，pH 8.78，含盐量 9.31 g/kg，有机质含量 4.40 g/kg，Na⁺、Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Cl[−] 含量分别为 3.20、0.18、0.27、0.15 和 3.30 g/kg。

1.2 试验设计

试验地设置空白地块(空白处理，CK)和夹竹桃种植地块(夹竹桃种植处理，T)。空白地块和夹竹桃种植地块的面积分别为 4.00 m × 2.00 m 和 4.00 m × 6.00 m。夹竹桃种植前两周，两种地块均以 100 kg/666 m² 施加盐碱土改良剂(ZL 201310386417.1)。改良剂均匀撒施于土面，而后与 0~40 cm 土壤一同翻耕、充分混匀。供试夹竹桃苗株高 80 cm、冠幅 30 cm，培育于天然盐碱土上。本试验夹竹桃种植时间为 2020 年 3 月 20 日至 2023 年 4 月 21 日，其间不曾施用任何肥料，株行距为 50 cm × 60 cm。试验期间，试验地块除人工除草外，没有其他人为干扰。夹竹桃洒水次数根据季节气候变化、土壤干湿程度等情况而定，在采样前半个月停止洒水。试验期间其他田间管理方法与一般园林绿化标准相同。空白地块的田间管理与夹竹桃种植地块完全相同。

试验结束时(2023 年 4 月 21 日)，按表层土(0~20 cm)、中层土(20~40 cm)和深层土(40~60 cm)在

各地块采集土壤样品, 同时采集未经任何处理的天然地块(原始地块)土壤样品。采样时, 在夹竹桃种植地块完整采集滴水线至树干之间的土壤(图 1), 在空白地块和天然地块则用土钻按照“S”形随机采集 9 个土壤样点, 每 3 个样点按照土壤分层分别混合成 1 个混合样品, 将采集到的土壤样品装入单独的无菌塑料袋中并做好标签。另外, 每个土壤样品取一部分用锡纸包好并做好标记, 投放于液氮罐中转运, 用于后续土壤 DNA 提取和微生物分析^[5-6,16]。

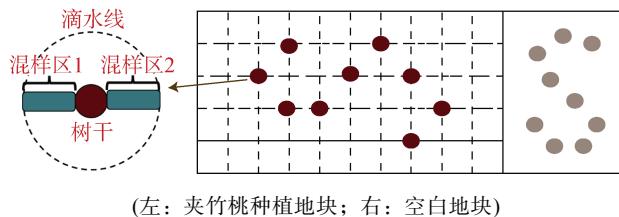


图 1 试验地块采样点示意图
Fig. 1 Distribution of sampling points in test plot

1.3 样品测定

使用台式电导率仪(FE38-Standard, Mettler Toledo, 中国上海)测定土壤浸提液电导率并换算为土壤含盐量, 使用 pH 计(FE28-Standard, 梅特勒托利多, 中国上海)测定土壤 pH。采用浓硫酸-高氯酸对土壤进行消煮, 使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES, Agilent 710, 美国)测定土壤全氮、全磷、全钾以及 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量。采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量, 硝酸银直接滴定法测定 Cl^- 含量。采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量。使用醋酸铵浸提-火焰原子吸收光谱法测定土壤速效钾含量。按照土壤酶活性检测试剂盒(Solarbio, 中国北京)使用方法进行土壤处理, 而后使用酶标仪(PE EnSight 多功能检测仪器, PerkinElmer)测定土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性^[5-6,16]。土壤微生物群落 DNA 提取及高通量测序由北京诺禾致源生物信息科技有限公司完成。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2007、SPSS 26.0 和 Remote Diagnostic Agent 进行数据的处理与统计分析。本试验中的所有数据均为 3 次重复的平均值, 用平均值 \pm 标准误差表示。采用单因素方差分析和双因素(处理 \times 深度)方差分析进行处理间显著性检验, 显著性水平为 $P<0.05$ 。通过冗余分析(RDA)揭示物种或功能与环境因子之间的关系。运用线性判别分析(LefSe)方法, 筛选在不同处理间具有显著丰度差异的微生物类群(生物标志物), 以识别对群落差异贡献最大的物种。

2 结果与分析

2.1 种植夹竹桃对重度黏性盐碱地化学性质的影响

通过比对 T 与 CK 处理土壤中盐分含量(表 1), 发现种植夹竹桃后表层和中层土壤盐分含量分别显著下降了 65.00% 和 37.5%, 且夹竹桃种植土壤中盐分含量随着土层的加深而显著增大, 而 CK 处理土壤中盐分随土层深度的变化不显著。土壤中速效钾含量与土壤盐分含量的变化趋势相同, T 处理下表层、中层和深层土壤中速效钾含量与 CK 处理相比分别降低了 0.92%、2.30% 和 8.64%。同时, 与 CK 处理相比, T 处理下表层土壤的 pH 显著升高了 0.76 个单位, 而中层和深层土的 pH 分别下降了 0.16 和 0.03 个单位; 表层和中层土壤有机质含量分别显著上升了 42.60% 和 55.80%; 表层、中层和深层土壤有效磷含量分别显著上升了 80.20%、71.80% 和 82.90%。由此可见, 种植夹竹桃对 0~40 cm 土层降盐、脱盐有着显著的效果, 且能够明显提升 0~40 cm 土层中有机质的含量和 0~60 cm 土层中有效磷的含量(表 1)。

双因素方差分析显示, 土层、处理及其二者的交互作用对土壤 pH、盐分、有效磷和速效钾含量的影响显著($R^2>0.62$, 表 2)。其中, 土层 \times 处理的交互作用对土壤盐分、pH 和速效钾含量影响显著($P<0.05$), 单一土层变化对 pH 影响也显著($P<0.05$), 而单一土层、处理及其交互作用对土壤有机质含量均无显著影响。此外, 单一土层或处理均对土壤有效磷有较强的影响($P<0.05$), 但二者的交互作用反而削弱了这种影响。

相较空白地块(CK), 种植夹竹桃后表层和中层土壤中 TN 含量分别提高了 18.20% 和 2.67%, 而深层土壤中 TN 含量下降了 9.09%; 同时, 表层和中层土壤中 TP 含量分别显著提高了 16.16% 和 20.29%, 深层土壤中稍提升了 2.74%。且在夹竹桃种植土壤中, 不同深度土层中 TN 和 TP 的含量均呈现出表层 \geq 中层 \geq 深层土壤的规律, 而在 CK 处理土壤中则表现为表层 \leq 中层 \leq 深层土壤的规律(图 2)。然而对于土壤中的 TK, 无论是土层深度还是是否种植夹竹桃, 均对 TK 含量没有显著影响。

试验开始前的原始土壤 0~60 cm 土层中主要盐分离子含量分别为 Na^+ 3.20 g/kg、 Cl^- 3.30 g/kg、 K^+ 0.27 g/kg、 Mg^{2+} 0.18 g/kg、 Ca^{2+} 0.15 g/kg。与原始土壤相比, CK 处理 0~60 cm 土层 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 含量分别下降了 35.63%~63.13%、27.78%~88.89%、33.33%~74.07%、6.67%~80.00% 和 4.55%~

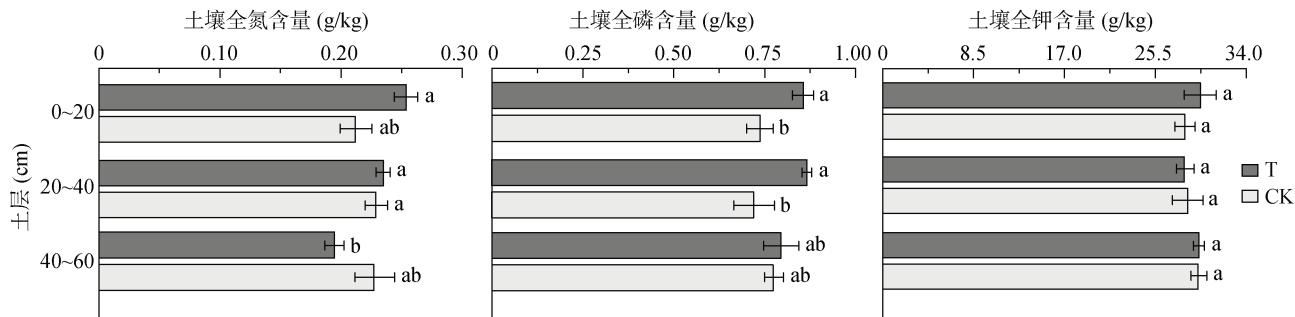
表 1 不同处理下不同深度土壤化学性质的变化情况
Table 1 Chemical properties of soil at different depths under different treatments

土层(cm)	处理	pH	盐分(g/kg)	有机质(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
0~20	T	8.53 ± 0.32 a	1.50 ± 0.46 d	6.71 ± 1.22 a	5.82 ± 0.74 b	216 ± 4.21 a
	CK	7.77 ± 0.11 b	4.28 ± 0.37 bc	4.73 ± 1.51 b	3.23 ± 0.55 c	218 ± 1.56 a
20~40	T	7.84 ± 0.28 b	3.34 ± 0.65 c	6.70 ± 1.33 a	7.49 ± 0.66 a	212 ± 5.33 ab
	CK	8.00 ± 0.10 b	5.34 ± 0.12 ab	4.34 ± 2.12 b	4.36 ± 0.18 c	217 ± 2.02 a
40~60	T	7.73 ± 0.47 b	6.53 ± 1.33 a	4.51 ± 1.94 b	7.17 ± 0.77 a	201 ± 6.17 b
	CK	7.76 ± 0.09 b	5.45 ± 1.06 ab	4.83 ± 1.70 b	3.92 ± 0.43 c	220 ± 2.49 a
0~60	T	8.03 ± 0.36 b	3.79 ± 0.81 c	5.97 ± 1.50 ab	6.83 ± 0.72 a	210 ± 5.24 ab
	CK	7.84 ± 0.10 b	5.02 ± 0.52 b	4.63 ± 1.78 b	3.84 ± 0.39 c	218 ± 2.02 a

注: CK 表示空白处理, T 表示夹竹桃种植处理; 同列不同小写字母表示不同处理及土层间差异显著($P<0.05$)。

表 2 土层深度和处理对土壤化学性质影响的双因素方差分析
Table 2 Two-factor variance analysis of effects of soil depth and treatment on soil chemical properties

统计值	因素	pH	盐分	有机质	有效磷	速效钾
F 值	土层	3.44	23.55	0.66	9.00	3.99
	处理	2.26	11.17	3.05	115.17	20.93
	土层 \times 处理	5.17	10.19	1.17	0.53	7.65
P 值	土层	0.066	0.00	0.53	0.004	0.047
	处理	0.16	0.006	0.11	0.00	0.001
	土层 \times 处理	0.024	0.003	0.34	0.60	0.007
R^2 值	-	0.62	0.87	0.36	0.92	0.79



(图中不同小写字母表示不同处理及土层间差异显著($P<0.05$), 下同)

图 2 不同处理下不同深度土壤中全氮、磷、钾含量

Fig. 2 Total contents of nitrogen, phosphorus and potassium in soil at different depths under different treatments

33.33%。种植夹竹桃 3 年后(T 处理), 0~40 cm 土层中 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Cl^- 含量分别是 CK 处理土壤的 1.75 倍、1.89 倍和 40.15%, 而 40~60 cm 土层中 K^+ 和 Cl^- 含量是 CK 处理土壤的 75.76% 和 1.36 倍, 中层和深层土壤中 Ca^{2+} 含量分别是 CK 处理的 50.90% 和 57.00%(图 3)。此外, 种植夹竹桃后, 表层、中层和深层土壤中 Na^+ 含量分别是 CK 处理土壤的 1.48 倍、1.40 倍和 98.50%, Mg^{2+} 含量分别是 CK 处理土壤的 2.48 倍、92.59% 和 65.79%(图 3)。

2.2 种植夹竹桃对重度黏性盐碱地土壤酶活性的影响

种植夹竹桃后, 表层、中层和深层土壤中脲酶活性分别显著下降了 21.82%、18.42% 和 68.71%; 而表层和中层土壤中碱性磷酸酶活性在两处理间没有显著差异, 在深层土壤中 T 处理较 CK 处理显著降低了 33.37%。此外, 处理和土层两因素均对过氧化氢酶活性没有显著影响(图 4)。

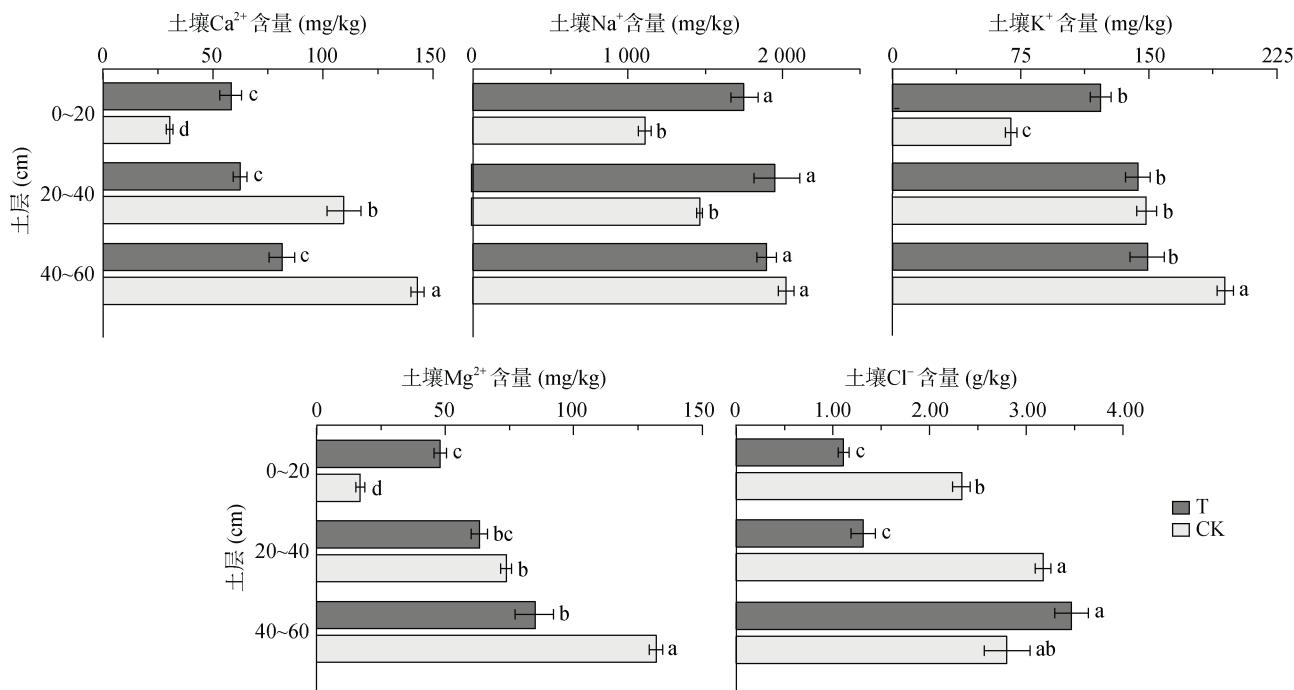


图3 不同处理下不同深度土壤中盐分离子含量
Fig. 3 The content of salt ions in soil at different depths under different treatments

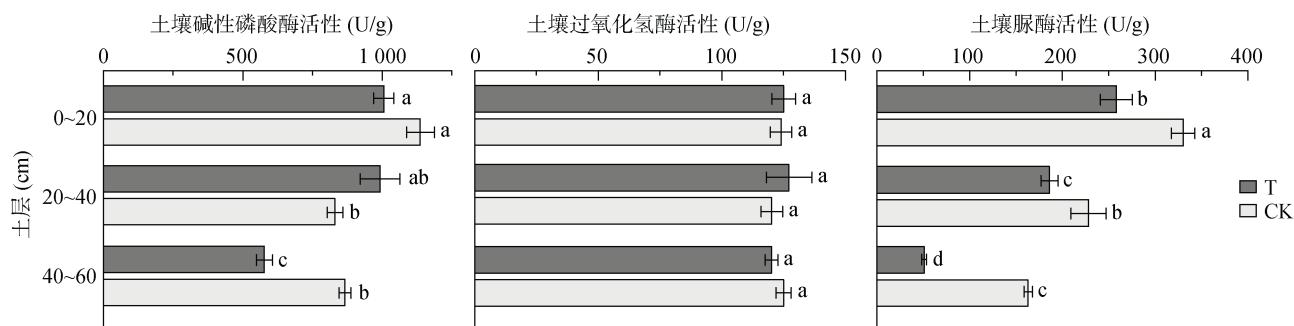


图4 不同处理下不同深度土壤中酶活性
Fig. 4 Soil enzyme activities in different depths under different treatments

2.3 种植夹竹桃对重度黏性盐碱地土壤细菌群落多样性的影响

在本研究 16S rDNA 检测中, 虽然表层、中层和深层土壤中 T 处理的 OUT 数分别是 CK 处理的 85.00%、83.00%、80.00%(图 5A), 但 T 处理各土层细菌群落 α 多样性指数均未表现明显差异(表 3)。

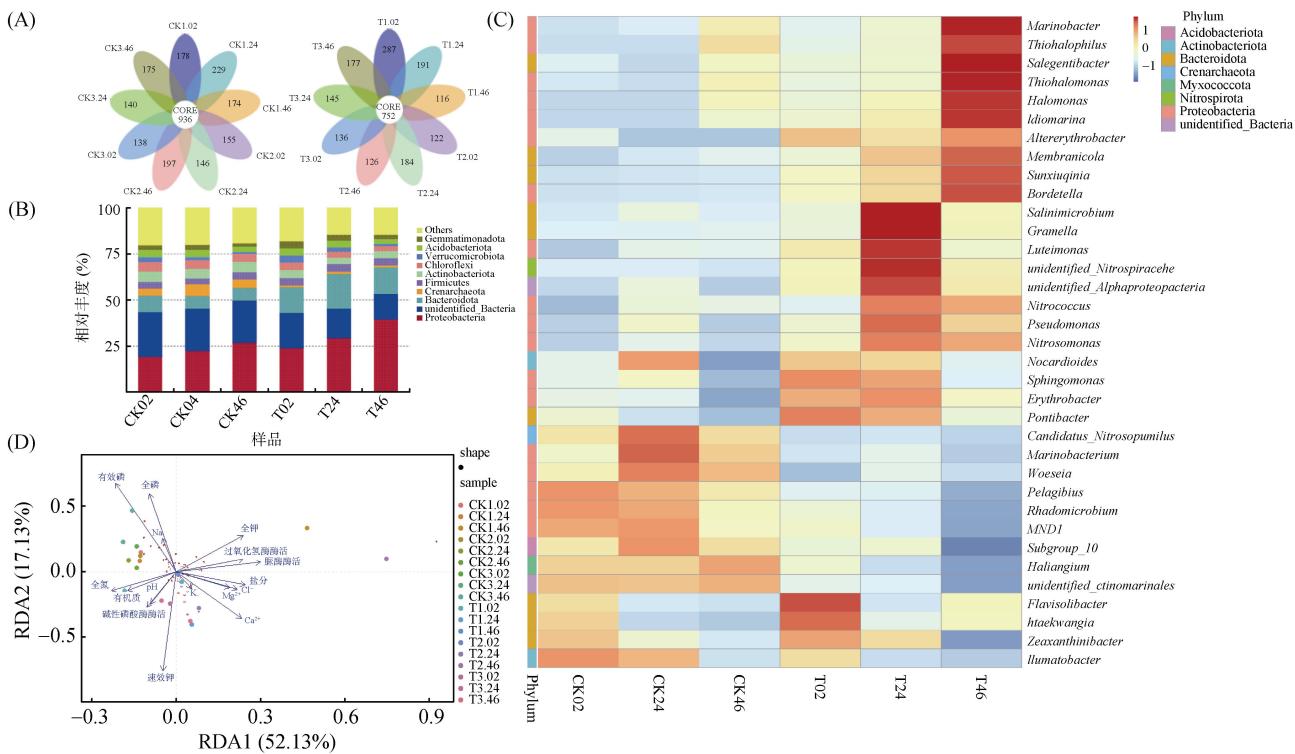
在本次检测出的 53 个细菌门中, T 处理土壤中古菌门(Crenarchaeota)的相对丰度显著降低, 而放线菌门(Actinobacteria)的相对丰度显著提升(图 5B)。从属水平看, CK 处理土壤不同土层中的细菌优势菌属没有显著差异, 且完全区别于 T 处理土壤的优势菌属, 而 T 处理土壤不同土层中的细菌优势菌属有明显的层次差异。表层和中层土壤中, CK 和 T 处理共有的优势菌属有诺卡氏菌属(*Nocardioides*)、鞘氨醇单胞菌

(*Sphingomonas*)、赤杆菌属(*Erythrobacter*)和海洋杆菌属(*Pontibacter*)(图 5C)。通过 RDA 分析, 本研究发现 16 个土壤环境因子中, 脲酶、盐分、全钾、Ca²⁺、过氧化氢酶与细菌群落多样性有密切的正相关关系, 而全氮、有效磷、有机质、碱性磷酸酶、全磷与细菌群落多样性有密切的负相关关系(图 5D)。

3 讨论

3.1 种植夹竹桃对土壤理化性质的影响

在滨海盐碱地生境下, 土壤盐分是植物生长的主要限制因子。本试验中, 施用调理剂后试验地块的 pH、含盐量以及肥力均有较明显的改善, 主要是由于其含有麦饭石、腐殖酸以及一些生物活性物质。该结果前期已发表^[5]。研究表明, 夹竹桃根系对浓度 1.0% 及



(图中处理代号 CK 和 T 后的数字 1~3 代表平行样品数, 02 表示 0~20 cm 土层, 24 表示 20~40 cm 土层, 46 表示 40~60 cm 土层。图 D 中, 箭头表示环境因子, 箭头所指方向表示环境因子的变化趋势; 箭头连线和排序轴的夹角以及箭头连线之间的夹角代表微生物群落与环境因子间的正、负相关关系(锐角: 正相关; 钝角: 负相关; 直角: 无相关性); 由不同的样本向各环境因子做垂线, 投影点越相近, 说明样本间该环境因子属性值越相似, 即环境因子对样品的影响程度相当)

图 5 不同处理下不同深度土壤细菌群落多样性分析: 花瓣图(A)、门水平上的物种相对丰度(B)、属水平物种丰度聚类图(C)和冗余分析(D)

Fig. 5 Analysis of bacterial community diversity at different soil depths under different treatments: Venn diagram (A); Relative abundance at phyla level(B); Abundance cluster diagram at genus level (C); Redundancy analysis(D)

表 3 不同土壤样品中 16S rDNA 的 α 多样性指数
Table 3 Alpha diversity indexes of 16S rDNA in different soil samples

土层(cm)	Observed_species		Shannon		Simpson		Chao1	
	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK
0~20	2458 ± 152 a	2437 ± 52 a	9.15 ± 0.12 a	9.04 ± 0.10 a	0.99 ± 0 a	0.99 ± 0 a	2 780 ± 177 a	2751 ± 95 a
20~40	2512 ± 72 a	2487 ± 130 a	8.95 ± 0.19 a	8.88 ± 0.21 a	0.99 ± 0.004 a	0.99 ± 0.002 a	3 043 ± 361 a	2865 ± 85 a
40~60	2300 ± 172 a	2487 ± 152 a	8.39 ± 0.45 a	8.56 ± 0.25 a	0.98 ± 0.02 a	0.99 ± 0.006 a	2 810 ± 315 a	3134 ± 384 a

注: 表中同列不同小写字母表示不同土层间差异显著($P < 0.05$)。

以下的盐胁迫均有较好的耐受性, 可以保持生长^[17], 且夹竹桃发达的根系多集中于 0~40 cm 土层, 有助于改善土体的通透性, 进而促进盐分的淋洗^[18]。因此, 在本研究中, 种植夹竹桃后, 0~40 cm 土层的含盐量和 Cl^- 含量均有大幅降低(表 1、图 3)。

此外, 施用调理剂后提升了土壤有机质含量, 种植夹竹桃后有机质含量又进一步提升, 不同深度土层全氮、全磷和有效磷含量也有相似的变化趋势(图 2), 这说明夹竹桃种植与调理剂施用有协同提升土壤肥力的效果。这与孟猛等^[19]的研究结果相印证, 夹竹桃有 5%~27% 的光合碳以根系分泌物的形式被转

移至土壤中, 使得土壤有机质、全氮和有效磷等的含量得以提升。

3.2 种植夹竹桃对土壤酶活性及微生物多样性的影响

土壤酶在土壤碳、氮及其活性组分转化过程中发挥关键作用^[20]。在根际环境中, 植物根系活动对土壤微生物生长、代谢和分布状况产生影响, 进而调控土壤酶的释放^[21~22]。相关研究表明, 夹竹桃的根系分泌物可以显著提升土壤中微生物生物量碳、有机质含量, 导致过氧化氢酶活性下降^[17,21]。本试验中土壤有机质和全氮含量分别与过氧化氢酶活性呈显著负相

关(图 5), 进一步印证了这一结果。此外, 在夹竹桃种植土壤中蔗糖酶活性增强可以显著增加土壤易溶性营养物质, 而土壤有效磷含量的变化会影响土壤中对磷元素变化较为敏感的碱性磷酸酶活性^[21], 因此在本研究中不同深度土层的有机质、全磷和有效磷含量在种植夹竹桃后均有所增加(图 2)。

土壤微生物是生态系统中重要的组成部分, 土壤微生物量的多少及其变化影响着土壤肥力的高低及其变化^[21-22]。在本研究中, 种植夹竹桃后土壤中泉古菌门(*Crenarchaeota*)的相对丰度显著降低, 而放线菌门(*Actinobacteria*)的相对丰度显著提升(图 5)。泉古菌作为古菌的一大分支, 常被发现生活于各种极端自然环境下(在低氮、不利或贫瘠的环境中占主导地位), 含有氨氧化关键功能基因(*amoA*)的它们在土壤碳、氮循环过程中也起着重要作用^[23-24]。有研究表明, 有机肥或无机化肥的施用均会导致土壤中泉古菌丰度的降低^[25-26]。在本研究中, 泉古菌丰度的降低可能是由于种植夹竹桃后土壤盐碱逆境的缓解和营养物质的增加, 无法满足这类古菌的适宜生存环境, 效果与施用肥料相似。放线菌大部分是腐生菌, 能促使土壤中的动植物残体腐化, 在自然界的碳、氮循环中起着一定的作用。而放线菌丰度的提升可能是由于夹竹桃的凋落物等残体为其生长繁殖提供了足够的物质条件, 同时其生长代谢也促进了土壤中有机物质的转化, 提升了土壤中有机质和全氮的含量。此外, 有研究表明, 土壤中放线菌的丰度与土壤中有效磷含量、铵态氮含量和蔗糖酶活性显著正相关^[26-27], 本研究印证了这一结果。

此外, 本研究还发现从属水平看, 空白处理土壤不同土层中的细菌优势菌属没有显著差异, 且完全区别于夹竹桃种植土壤不同土层中的优势菌属。例如, 在 20~40 cm 土层的特异优势菌属盐坑微菌属(*Salinimicrobium*)被认为是几丁质酶产生菌^[28]; 亚硝基单胞菌属(*Nitrosomonas*)被认为是一种氨氧化细菌^[29]; 假单胞菌属(*Pseudomonas*)包含降解外源有机化合物、促进植物生长、拮抗植物致病真菌和卵菌, 及诱导植物系统性抗性的物种和菌株^[30]。在 40~60 cm 土层的特异优势菌属海杆菌属(*Marinobacter*)被认为是各种海洋栖息地中重要的碳氢化合物降解者^[31]。在 0~20 cm 土层的特异优势菌属黄色土源菌属(*Flavisolibacter*)是一种根际促生菌^[32]; *Ohtaekwangia* 以易降解有机物质为底物, 属于生长速度较快的富营养菌^[33]。在本研究中, 土壤盐分、脲酶活性和过氧化氢酶活性与细菌群落多样性呈正相关, 全氮、有效磷、有机质、碱性磷酸酶、全磷与细菌群落多样性呈负相关(图 5), 这在

一定程度上也说明种植夹竹桃促进了滨海盐碱地土壤微生物群落的分异。

4 结论

连续 3 年夹竹桃种植显著降低了江苏滨海黏质盐碱地土壤含盐量, 提升了土壤养分含量及养分供应能力, 促进了土壤微生物群落分异。土壤调理剂施用与夹竹桃种植对于改善盐碱土壤化学和生物学性质具有协同功效, 尤其对 0~40 cm 深度土层的改良效果更佳。

参考文献:

- [1] Omuto C T, Vargas R R, El Mobarak A M, et al. Mapping of salt-affected soils – Technical manual[M]. Rome: FAO, 2020.
- [2] 胡炎, 杨帆, 杨宁, 等. 盐碱地资源分析及利用研究展望[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 489–494.
- [3] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. 科学, 2021, 73(6): 30–34, 2, 4.
- [4] FAO, ITSPS. Status of the world's soil resources (SWSR)-technical summary [DB/OL]. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 2015.
- [5] Zhou Y J, Shao T Y, Men G T, et al. Application of malrstone-based conditioner and plantation of Jerusalem artichoke improved properties of saline-alkaline soil in Inner Mongolia[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: 117083.
- [6] Shao T Y, Long X H, Liu Y Q, et al. Effect of industrial crop Jerusalem artichoke on the micro-ecological rhizosphere environment in saline soil[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 166: 104080.
- [7] 李金彪, 陈金林, 刘广明, 等. 滨海盐碱地绿化理论技术研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 246–251.
- [8] Li J G, Pu L J, Han M F, et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 943–960.
- [9] 赵维彬, 王松, 刘玲玲, 等. 生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 551–561.
- [10] 周思怡, 李晓佳, 张恂, 等. 不同物料对海滨沙性盐碱地改良效果研究[J]. 土壤, 2023, 55(2): 356–362.
- [11] 邓丞. 天津滨海盐碱地沿海防护林配置模式及构建技术的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [12] 孙金江. 潍坊滨海地区盐碱地改良与绿化分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [13] 常鹏飞. 不同生态环境夹竹桃的结构比较研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- [14] Aeri V, Narayana D B A, Singh D. Chapter 6.9 - *Nerium indicum*[M]//Powdered crude drug microscopy of leaves and barks. 2020: 163–165.

- [15] 范红, 王亚, 王钟. 夹竹桃的环保和经济价值[J]. 北方园艺, 2011(20): 119–120.
- [16] Yue Y, Shao T Y, Long X H, et al. Microbiome structure and function in rhizosphere of Jerusalem artichoke grown in saline land[J]. Science of the Total Environment, 2020, 724: 138259.
- [17] 丁伟伦, 陈慧英, 汤坤贤, 等. 盐胁迫下夹竹桃生理光合特性及生态修复应用[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(9): 66–76.
- [18] 杨果林, 李亚龙, 林宇亮, 等. 夹竹桃根系拉拔力学试验及计算模型研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2085–2099.
- [19] 孟猛, 徐永艳. 植物光合碳在不同器官-土壤系统的动态分布特征 ^{13}C 示踪[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 331–336, 344.
- [20] 边雪廉, 赵文磊, 岳中辉, 等. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(4): 171–178.
- [21] 沈凤英, 吴伟刚, 李亚宁, 等. 不同浓度植物根系分泌物微生态效应研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 313–319.
- [22] 刘威, 陈小龙, 赵园园, 等. 有机肥施用对植烟土壤氮素矿化及土壤酶和微生物群落的影响[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1025–1034.
- [23] 贺纪正, 沈菊培, 张丽梅. 土壤中温泉古菌研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5047–5055.
- [24] Könneke M, Bernhard A E, de la Torre J R, et al. Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon[J]. Nature, 2005, 437(7058): 543–546.
- [25] 何瑞成, 吴景贵. 有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 774–782.
- [26] 李双异, 刘旭, 张维俊, 等. 长期施肥与覆膜对土壤细菌、放线菌和氨氧化微生物丰度的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 891–898.
- [27] 王纪坤, 安锋, 周立军, 等. 保水剂施用量对胶园土壤微生物和土壤酶活性及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(7): 1424–1431.
- [28] 张瑞祥, 杨忠. 海底沉积物中几丁质酶的筛选、分离及活性分析[J]. 中国生物工程杂志, 2015, 35(8): 76–82.
- [29] Koops H P, Bottcher B, Moller U C, et al. Classification of eight new species of ammonia-oxidizing bacteria: *Nitrosomonas communis* sp. nov., *Nitrosomonas ureae* sp. nov., *Nitrosomonas aestuarii* sp. nov., *Nitrosomonas marina* sp. nov., *Nitrosomonas nitrosa* sp. nov., *Nitrosomonas eutropha* sp. nov., *Nitrosomonas oligotropha* sp. nov. and *Nitrosomonas halophila* sp. nov[J]. Journal of General Microbiology, 1991, 137(7): 1689–1699.
- [30] Kruijt M, Tran H, Raaijmakers J M. Functional, genetic and chemical characterization of biosurfactants produced by plant growth-promoting *Pseudomonas putida* 267[J]. Journal of Applied Microbiology, 2009, 107(2): 546–556.
- [31] Prince R C. Eukaryotic hydrocarbon degraders[M]//Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 2065–2078.
- [32] Yoon M H, Im W T. *Flavisolibacter ginsengiterrae* gen. nov., sp. nov. and *Flavisolibacter ginsengisoli* sp. nov., isolated from ginseng cultivating soil[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2007, 57(Pt 8): 1834–1839.
- [33] Li X Z, Rui J P, Mao Y J, et al. Dynamics of the bacterial community structure in the rhizosphere of a maize cultivar[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: 392–401.