

施用不同肥料对番茄植株根系内生细菌群落结构的影响

廖黎媛¹, 苏燕莉¹, 李欣霓¹, 王帅帅¹, 卢文², 杨尚东^{1*}

1. 广西大学农学院/广西农产品安全重点实验室/植物科学国家级实验教学示范中心, 广西南宁 530004; 2. 广西扶绥县农业科学研究所, 广西扶绥 532199

摘要: 探究施用不同种类肥料对番茄植株根系内生细菌群落结构的影响, 有助于揭示微生物与植物之间的互作机制, 为优化施肥策略、开发利用有机肥替代化肥提供理论依据和技术支撑。设置不施肥(CK)以及等氮水平的施用氮肥(T₁)、花生饼肥(T₂)、豆饼肥(T₃)和茶饼肥(T₄) 5个不同处理, 基于高通量测序技术分析不同施肥处理番茄植株根系内生细菌群落结构。结果表明: T₂、T₃处理显著提高番茄可溶性糖、可溶性固形物含量, 且与T₁处理相比, 可滴定酸含量显著降低。与CK相比, 不同施肥处理均提高了根系内生细菌不同分类数量。其中, 除T₄处理外, T₂、T₃处理提升内生细菌群落多样性和丰富度的效果均优于T₁处理; 此外, 与CK相比, 不同施肥处理番茄根系内生细菌门、属分类组成和占比均发生改变, 施肥处理不仅提高样本中优势菌门、优势菌属的数量, 而且塑造了更为丰富多样的内生细菌群落结构, 尤其以T₂处理效果最佳; T₂处理番茄根系中, 富集了中生根瘤菌属、芽孢杆菌属、生丝微菌属、卡斯特兰尼氏菌属等具有促进番茄生长、提高植株抗性和果实品质作用的有益功能细菌属。与CK相比, 不同施肥处理不仅提高番茄根系内生细菌群落多样性和丰富度, 而且重塑了番茄根系内生细菌群落组成。化肥、花生饼肥、豆饼和茶饼肥4种肥料中, 花生饼肥提升番茄根系内生细菌多样性及丰富度的效果最佳, 其次是豆饼肥, 均优于氮肥处理。另一方面, 与施用氮肥相比, 施用花生饼肥富集了中生根瘤菌属、芽孢杆菌属、生丝微菌属、卡斯特兰尼氏菌属等潜在的有益内生细菌属, 其维护番茄植株健康能力优于施用等氮水平的化肥、豆饼和茶饼肥。

关键词: 饼肥; 番茄; 根系; 内生细菌

中图分类号: S641.2 文献标志码: A

Effect of Different Fertilizers on the Endophytic Bacterial Community Structures in Tomato Roots

LIAO Liyuan¹, SU Yanli¹, LI Xinni¹, WANG Shuaishuai¹, LU Wen², YANG Shangdong^{1*}

1. College of Agriculture, Guangxi University / Guangxi Key Laboratory of Agricultural Product Safety / National Experimental Teaching Demonstration Center of Plant Science, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Fusui County Institute of Agricultural Sciences, Fusui, Guangxi 532199, China

Abstract: The study was aimed to develop organic fertilizers replacing chemical fertilizers and reveal the effect mechanism of fertilization on plant health, endophytic bacterial community structures in tomato roots. Five fertilization treatments were set up, no fertilization (CK), application with chemical fertilizer (T₁), peanut cake fertilizer (T₂), soybean cake fertilizer (T₃) and tea cake fertilizer (T₄) at the identical nitrogen level. Meanwhile, based on high-throughput sequencing technology, the endophytic bacterial community structure in tomato roots was analyzed. The numbers of endophytic bacterial communities in tomato roots at different taxonomic categories were all improved over CK. Meanwhile, except T₄ treatment, the diversity and richness of endophytic bacteria community in tomato roots under T₂ and T₃ were all higher than those of T₁. At the phylum or genus level, the endophytic bacterial composition and the percentage in tomato roots were all altered by different fertilizer treatments. Among them, not only the numbers of dominant en-

收稿日期 2025-04-07; 接受日期 2025-05-27

基金项目 广西大学巴马产教融合研究院专项(巴人科 20220005); 广西重点研发计划项目(桂科 AB23026076)。

作者简介 廖黎媛(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 植物与微生物互作。*通信作者(Corresponding author): 杨尚东(YANG Shangdong), E-mail: ysd706@gxu.edu.cn。

dophytic bacterial were improved, but also the endophytic bacterial community structures were reshaped. Particularly, some beneficial bacterial genera, such as *Rhizobium*, *Bacillus*, *Microbacterium*, *Castellaniella*, with the function of growth promotion, plant resistance and quality improvement enriched in tomato roots under T₂ treatment. Compared with CK, the diversity and richness of endophytic bacterial community in tomato roots were improved, and the endophytic bacterial composition in tomato roots could be reshaped by different fertilization. The highest diversity and richness of endophytic bacterial communities could be found in tomato roots under T₂ treatment, followed by T₃ treatment. The beneficial endophytic bacterial genera, such as *Rhizobium*, *Bacillus*, *Microbacterium* and *Castellaniella* enriched in tomato roots under T₂ treatment only. It indicated that the effect of peanut cake fertilizer on plant health was better than those of chemical fertilizer, soybean and tea cake fertilizers under the identical nitrogen levels.

Keywords: cake fertilizers; tomato; root; endophytic bacteria

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.09.018

番茄 (*Solanum lycopersicum* L.) 是茄科番茄属的一年生草本植物, 起源于南美洲, 现已成为全球广泛种植的重要食用果蔬之一^[1]。番茄富含番茄红素、胡萝卜素、矿物质和维生素等多种营养物质, 具有很强的抗氧化作用, 备受全球消费者青睐^[2]。全球番茄产业中, 我国不仅是全球最大的番茄生产国, 还是最大的番茄出口国^[3], 番茄及其制品已成为我国最重要的出口优势农产品之一, 居蔬菜单项产品出口第二位^[4]。然而, 随着产业的快速发展, 部分种植户为了追求更高的产量, 盲目增施化肥, 导致番茄品质下降及增加生产种植成本^[5-6]。此外, 过量施用化肥还导致土壤酸化、盐渍化, 以及地下水硝酸盐污染等生态环境破坏^[7], 严重制约着番茄产业的可持续发展。因此, 探寻既能提高番茄产量和品质, 又能减少化肥使用、保护生态环境的可持续发展方案显得尤为重要。

饼肥是植物种子或果核压榨提取油脂后所剩下的副产品, 是一种富含多种有机酸、肽类和包括氮、磷、钾等丰富营养元素的有机缓效肥料。与化肥相比, 饼肥不仅能为作物提供全面的营养, 而且肥效长, 养分释放缓慢, 能够满足作物长时间的生长需求。前人研究发现, 饼肥含有大量的有益菌类, 充分腐熟后施用不但能起到增加产量的效果, 还可以增强作物抗性、提高土壤及肥料养分利用率、改善作物品质^[8-13]。常见饼肥有花生饼肥、大豆饼肥、菜籽饼肥、棉籽饼肥、芝麻饼肥、油茶饼肥、葵花籽饼肥等, 这些饼肥因其丰富的营养成分和良好的肥效, 作为一种有机的绿色肥料, 在生产中越来越受重视。此外, 施用饼肥可以促进有益菌群的富集, 改善作物内生细菌群落结构^[14]。

另一方面, 植物内生菌可通过生态位竞争^[15]、

合成抗菌活性物质^[16]和调节植物生理机制^[17]等诱导宿主植物抗性, 其多样性和丰富度越高, 群落结构越复杂, 微生物互作网络的稳定性就越强。优化植物内生细菌群落结构对于提高植物的生长、健康和适应自然环境的能力至关重要。

为此, 本研究以樱粉 1 号番茄为试验材料, 探究施用不同肥料对番茄植株根系内生细菌群落结构的塑造特征, 为优化施肥策略、开发利用有机肥替代化肥, 推动番茄产业可持续发展提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2021 年 6 月至 2022 年 1 月在广西大学农学院蔬菜教学试验基地 (108°17'25"E, 22°51'02"N) 进行。供试番茄品种为广西大学选育的无限生长型品种樱粉 1 号。

试验地土壤类型为赤红壤, 理化性质如下: 土壤 pH 5.64, 有机质含量为 23.26 g/kg, 全氮含量为 1.22 g/kg, 全磷含量为 0.57 g/kg, 全钾含量为 6.8 g/kg, 碱解氮含量为 126.8 mg/kg。试验所用氮肥含氮量为 46.2%, 绵阳市光耀农资有限公司生产; 所用饼肥 (花生饼含氮量为 58.4 g/kg, 豆饼含氮量为 65.2 g/kg, 茶饼含氮量为 14.7 g/kg) 均购于南宁市农贸市场。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 2021 年 8 月下旬对番茄种子进行催芽处理, 随后进行盘穴育苗, 9 月定植, 定植 80 d 后陆续采摘成熟番茄果实, 2022 年 1 月采集植株根系样品。试验共设以下 5 个处理: (1) 不施肥 (CK); (2) 施氮肥 (T₁); (3) 施花生饼 (T₂); (4) 施豆饼 (T₃); (5) 施茶饼 (T₄)。每个处理重复 3 次, 采用随机区组排列, 共有 15 个

小区，总面积为 42 m²。

以番茄整个生长期所需的氮量 (8 g) 作为施肥的基准^[18-19]等氮施肥。参照王林等^[20]的方法，施用饼肥前将饼肥置于 35 °C 恒温培养箱中发酵 21 d，期间定期观察和翻堆，使其充分腐熟。

试验设计及施肥用量详见表 1。发酵完成后，使用小松菜种子发芽试验验证饼肥是否已完全腐熟，然后进行饼肥施用试验。番茄植株生长期间，灌溉排水、松土除草、病虫害防治等生产管理措施均按照常规相同管理。

表 1 试验设计及施肥用量
Tab. 1 Experimental design and fertilizer application rates 单位: g

处理 Treatment	基肥 (70%) Base fertilizer (70%)	追肥 (30%) Additional fertilization (30%)	总氮量 Total nitrogen
CK	0	0	0
T ₁	12.06	5.17	8
T ₂	95.80	41.40	8
T ₃	85.80	36.80	8
T ₄	381.00	163.00	8

1.2.2 样品采集 果实采摘后，各施肥处理每个重复小区随机选取长势一致的番茄植株 5~6 株，用经 75%乙醇溶液消毒灭菌过的小铁锹，以植株根部为圆心挖疏松环形圈 (深度约 30 cm、直径约 40 cm)，将植株拔起，装入标记好的无菌密封袋放入装有冰袋的盒子带回实验室。

将植株根系用超纯水冲洗 3 次后用软毛刷轻轻擦拭 2 min，去除表面杂质和附着物，再用无菌纸擦拭去除水分，随后转移至 2%次氯酸钠溶液中充分浸泡 10 min，用超纯水冲洗 3 次后转移至 70%乙醇溶液中再次充分浸泡 5 min，后用无菌水冲洗 3 次，最后用无菌吸水纸吸干表层水分后待用。同时注意收集第 3 次冲洗后的超纯水。为确定植株根系表面灭菌是否成功，取第 3 次冲洗后的超纯水 100 μL 置于 Luria-Bertan (iLB) 琼脂平板 (NaCl 10 g、胰蛋白胨 5 g、酵母提取物 5 g、琼脂 20 g) 上，于 25 °C 条件下培养 7 d。平板中未见菌落，证实已彻底灭菌。将表面无菌化的番茄根系样品用于内生菌群的检测分析。

1.2.3 高通量测序 番茄根系样品总 DNA 提取、PCR 扩增和序列测定均由上海美吉生物医药科技有限公司完成。使用 Miseq 平台进行高通量测序。

根据 FastDNA[®] Spin Kit for Soil 试剂盒 (MP

biomedicals, U.S.) 说明书进行总 DNA 抽提，DNA 浓度和纯度使用 NanoDrop 2000 分光光度计 (thermo fisher scientific, U.S.) 检测。在 ABI GeneAmp[®]9700 上进行 PCR 扩增，具体引物和测序类型见表 2。

表 2 引物名称及序列
Tab. 2 Primer names and sequences

引物类型 Primer type	名称 Name	序列 (5'-3') Sequence(5'-3')	测序平台 Sequencing platform	序列长度 Sequencing length/bp
内生细菌 Endophytic bacteria	799F	AACMGGATTA GATACCKG	PE250	394
	1193R	ACGTCATCCCC ACCTTCC		

Illumina Miseq 测序：利用 AxyPrep DNA gel extraction kit (axygen biosciences, union city, CA, USA) 将同一样本的 PCR 产物进行回收产物纯化，混合后使用 2%琼脂糖凝胶进行回收检测，并用 Quantus[™] Fluorometer (promega, USA) 对回收产物进行检测定量。使用 NEXTFLEX[®] Rapid DNA-Seq Kit 进行建库。利用 Illumina 公司的 Miseq PE250 平台进行测序 (上海美吉生物医药科技有限公司)。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据录入与处理；运用 SPSS 18.0 软件进行数据统计与分析，采用邓肯氏新复极差检验法 (duncan's multiple range test, DMRT) 进行多重比较。在线数据分析平台使用 I-sanger 云数据分析平台 (上海美吉生物医药科技有限公司) 进行在线数据分析。采用 Shannon 指数和 Simpson 指数表示内生菌群的多样性，其丰富度则采用 Ace 指数和 Chao1 指数分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对番茄品质的影响

不同施肥处理番茄果实可滴定酸、可溶性糖、可溶性固形物的含量如表 3 所示。由于 T₄ 处理的果实小而坚硬且颜色青绿、无成熟迹象，无法达到商品要求，故本试验未测量其果实品质指标。数据显示，除 T₄ 处理外，各处理的番茄果实可溶性糖含量均在 4% 以上。T₂、T₃ 处理的番茄果实可溶性糖含量显著高于 CK 和 T₁ 处理，且与 T₁ 处理相比，可溶性糖含量分别增加 10.74% 和 12.65%。

T₂、T₃ 处理的番茄果实可溶性固形物含量均达到 7% 以上, 显著高于 CK 的 6.45%。与 T₁ 处理相比, T₂、T₃ 处理的可溶性固形物含量也显著提高, 分别增加 9.65%、7.54%。不同施肥处理的番茄果实可滴定酸含量存在一定差异, 但总体处于相近水平。其中, T₁ 处理的番茄果实可滴定酸含量相对较高。而 T₂、T₃ 处理相较于 CK 均有所降低, 但差异不显著。与 T₁ 处理相比, T₂、T₃ 处理显著降低了番茄果实中可滴定酸含量。

施用花生饼、豆饼显著提升了番茄果实的可

表 3 不同施肥处理对番茄品质的影响
Tab. 3 Effect of different fertilization treatments on tomato quality 单位: %

处理 Treatment	可溶性糖含量 Soluble sugar conten	可溶性固形 物含量 Soluble solids conten	可滴定酸含量 Titratable acid content
CK	4.05±0.04 ^b	6.45±0.21 ^b	0.39±0.04 ^b
T ₁	4.19±0.07 ^b	6.63±0.06 ^b	0.44±0.02 ^a
T ₂	4.64±0.02 ^a	7.27±0.12 ^a	0.35±0.04 ^b
T ₃	4.72±0.03 ^a	7.13±0.15 ^a	0.34±0.02 ^b
T ₄			

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments (P<0.05).

溶性糖和可溶性固形物含量, 并有效降低可滴定酸水平, 而氮肥处理对果实品质的改善作用相对有限。

2.2 样本序列聚类分析

由表 4 可知, 对 5 个不同施肥处理的样本进行 OTU 聚类分析, 共获得 28 个门、64 个纲、171 个目、327 个科、639 个属、1117 个种、2081 个 OTU。且 T₁~T₄ 处理的番茄植株根系中, 内生细菌不同分类数量均高于相应的 CK 处理。表明施肥均不同程度地改变了番茄植株根系内生细菌不同分类水平数量。

2.3 多样性分析

由表 5 可知, 样本检测的覆盖率数值达到 98% 以上, 表明测序深度足以覆盖番茄植株根系内生细菌中的绝大多数物种, 所获数据能够客观反映其多样性和丰富度。

其中, 表征番茄植株根系内生细菌多样性的 Shannon 和 Simpson 指数在各施肥处理之间均差异不显著, 但与 CK 处理之间差异显著; 另一方面, 表征内生细菌丰富度的 Ace 和 Chao1 指数同样表现为施肥处理显著大于 CK 处理, 且所有施用有机饼肥处理亦显著高于施用化肥处理。表明有机饼肥比化肥更有利于塑造丰富的内生细菌群落。

表 4 不同施肥处理番茄植株根系内生细菌群落不同分类水平数量

Tab. 4 Numbers of endophytic bacterial communities at different taxonomic levels in tomato roots under different fertilizations

处理 Treatment	OTU 数量 Numbers of operational taxonomic units	不同分类类别数量 Numbers of different taxonomic categories					
		门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species
		14	27	70	114	176	238
T ₁	1262	26	54	146	271	474	787
T ₂	1425	28	55	140	271	528	872
T ₃	1408	27	56	144	277	515	869
T ₄	1215	24	53	133	260	493	786
总计	2081	28	64	171	327	639	1117

表 5 不同施肥处理番茄植株根系内生细菌群落的多样性指数

Tab. 5 Diversity indices of endophytic bacterial communities in tomato roots under different fertilizations

处理 Treatment	香农指数 Shannon index	辛普森指数 Simpson index	Ace 指数 Ace index	Chao1 指数 Chao1 index	覆盖范围 Coverage/%
CK	0.47±0.07 ^b	0.88±0.02 ^a	438.25±47.46 ^c	330.31±41.71 ^c	0.99
T ₁	4.63±0.29 ^a	0.04±0.01 ^b	959.97±27.43 ^b	941.73±22.88 ^b	0.99
T ₂	5.39±0.39 ^a	0.01±0.01 ^b	1258.60±47.84 ^a	1262.80±46.39 ^a	0.98
T ₃	5.29±0.03 ^a	0.01±0.002 ^b	1155.70±46.88 ^a	1150.90±63.08 ^a	0.99
T ₄	4.14±0.46 ^a	0.11±0.06 ^b	1152.80±34.30 ^a	1137.30±44.35 ^a	0.99

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments (P<0.05).

此外,由图 1 可知,与 CK 相比, T₁~T₄ 处理均诱导番茄植株根系内生细菌群落组成发生显著变化;其中,CK 与 T₁~T₄ 处理之间均存在组间距离,无任何交集;仅 T₁、T₃ 处理之间相对距离小,存在交集;表明无论施用何种肥料,均重塑了番茄根系内生细菌群落结构,且不同肥料塑造的内生细菌群落亦存在显著差异。

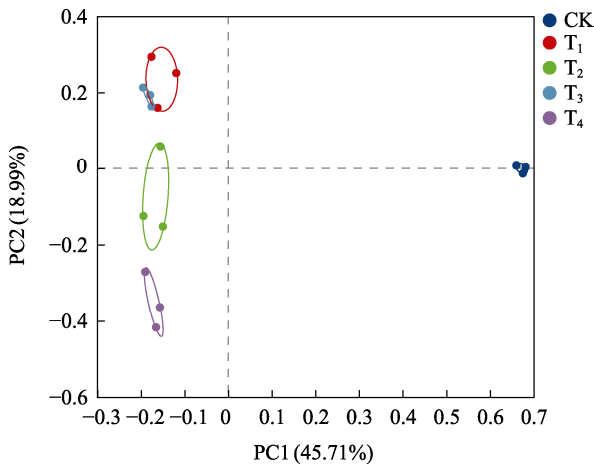


图 1 不同施肥处理番茄植株根系内生细菌 PCoA 分析 (OTU 水平)

Fig. 1 PCoA analysis of endophytic bacteria in tomato roots under different fertilizations (OTU level)

2.4 细菌群落物种 Venn 图分析

由图 2 可知,CK、T₁~T₄ 处理的番茄植株根系中,共有的内生细菌 OTU 数量为 201 个,且特有的内生细菌 OTU 数量分别为 2、139、124、135、

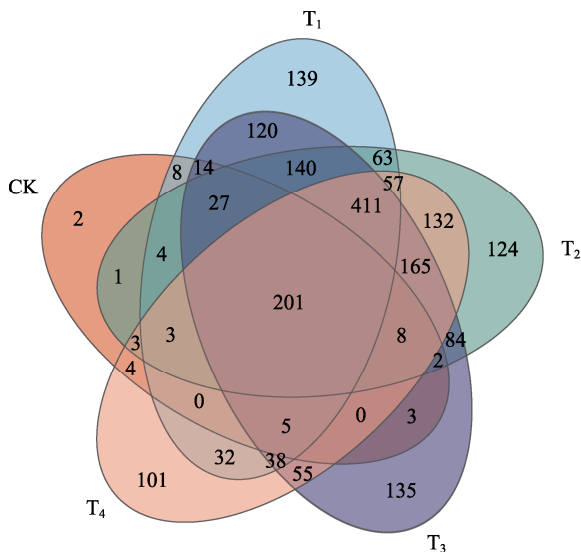


图 2 不同施肥处理番茄根系内生细菌 Venn 图 (OTU 水平)

Fig. 2 Venn diagram of endophytic bacteria in tomato roots under different fertilization (OTU level)

101 个,结果表明,与 CK 相比,施用化肥降低了番茄根系特有的内生细菌 OTU 数量,但施用有机饼肥处理则增加了番茄植株根系特有的内生细菌 OTU 数量。

2.5 细菌群落组成分析

由图 3 可知,不同施肥处理不仅改变了番茄植株根系内生细菌门分类水平组成,而且改变了共有优势内生细菌门的相对丰度占比。除 T₄ 处理外,其余施肥处理番茄植株根系中,相对丰度占比排序前三的细菌门类均为:变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteriota) 和绿弯菌门 (Chloroflexi);而 T₄ 处理则为:变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteriota) 和拟杆菌门 (Bacteroidota)。

另一方面,与 CK 相比, T₁ 处理显著增加了变形菌门细菌的相对丰度,同时降低了其他细菌门类的相对丰度,尤其是放线菌门和绿弯菌门; T₂ 和 T₃ 处理诱导变形菌门细菌的相对丰度下降,放线菌门、绿弯菌门和厚壁菌门细菌的相对丰度增加;而 T₄ 处理在变形菌门的相对丰度上与 T₁ 处理接近,但在其他门类的相对丰度上与 T₁ 处理之间差异显著。化肥与有机饼肥处理之间的差异主要体现在变形菌门、放线菌门、绿弯菌门和厚壁菌门细菌的相对丰度,不同有机饼肥处理之间的差异主要体现在绿弯菌门和厚壁菌门细菌的相对丰度上。

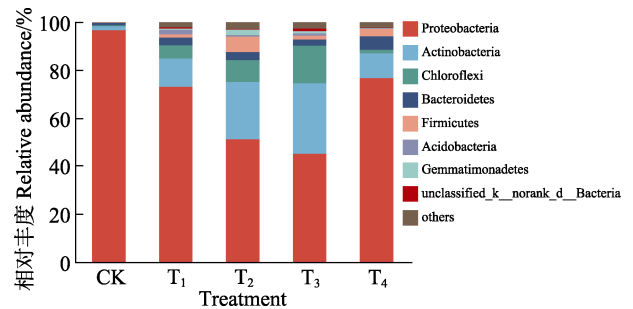


图 3 不同施肥处理下根系内生细菌门分类水平组成

Fig. 3 Compositions of endophytic bacteria in tomato roots at phylum level under different fertilization

由图 4 可知,CK 处理的番茄植株根系中,仅检测出 1 个优势细菌属 (相对丰度占比>1%),即罗尔斯通氏菌属 (*Ralstonia*),其相对丰度占比高达 93.91%,表现出极高的单一菌属优势。与之相比,所有施肥处理均显著提高了根系内生细菌的多样性水平。其中, T₁ 处理的番茄植株根系中,共检测出 19 个优势细菌属,最高丰度菌属为伯克霍尔德菌科未分类菌属 (*unclassified_f__Burkho-*

Ideriaceae, 17.05%); 而 T₂ 处理番茄植株根系中, 共检测出 25 个优势细菌属, 最高丰度菌属为罗河杆菌属 (*Rhodanobacter*, 5.20%); T₃ 处理的番茄植株根系中, 则检测出 18 个优势内生细菌属, 以红弯曲菌科未分类菌属 (*norank_f__Roseiflexaceae*, 11.22%) 为主; 同时, T₄ 处理的番茄植株根系中, 共检测出 13 个优势细菌属, 艾德昂菌属 (*Ideonella*, 30.22%) 占据主导地位。

此外, CK 中番茄根系中未检测出特有的优势内生细菌属; 而 T₁~T₄ 处理的番茄植株根系中,

特有的优势细菌属数量分别为 7、7、4、3 个 (图 4)。

上述结果表明, 与 CK 相比, 不同施肥处理改变了番茄植株根系内生细菌群落组成和结构。与 T₁ 处理相比, T₂ 处理表现出最优的多样性提升效果: 其优势菌属数量 (25 个) 和特有菌属数量 (7 个) 均高于其他处理, 且富集了多种功能菌属 (如芽孢杆菌属 *Bacillus*、慢生根瘤菌属 *Bradyrhizobium*)。豆饼肥和茶饼肥处理则未表现出花生饼肥类似的效果。



图 4 不同施肥处理下根系内生细菌属分类水平结构分布

Fig. 4 Distribution of endophytic bacteria in tomato roots at genus level under different fertilization

LEfSe 分析还发现, 变形菌门 (Proteobacteria) 细菌在 CK 处理番茄植株根系中显著富集, 而厚壁菌门 (Firmicutes) 细菌在 T₂ 处理番茄植株根系中显著富集, 放线菌门 (Actinobacteriota) 和绿弯菌门 (Chloroflexi) 细菌在 T₃ 处理番茄植株根系中显著富集; 但 T₁ 和 T₄ 处理的番茄植株根系中, 不存在显著富集的细菌门类 (图 5)。

属分类水平, 伯克霍尔德菌科未分类菌属 (*unclassified_f__Burkholderiaceae*)、嗜甲基菌科未分类菌属 (*unclassified_f__Methylophilaceae*)、类固醇杆菌属 (*Steroidobacter*)、嗜酸杆菌属 (*Acidibacter*) 细菌在 T₁ 处理的番茄植株根系中显著富集; 而罗河杆菌属 (*Rhodanobacter*)、微杆菌属 (*Microbacterium*) 细菌则在 T₂ 处理的番茄植株根系中显著富集; 红弯曲菌科未分类菌属 (*norank_f__Roseiflexaceae*)、游动放线菌属 (*Actinoplanes*) 细菌在 T₃ 处理的番茄植株根系中显著富集; 艾德昂菌属 (*Ideonella*)、食酸菌属 (*Acidovorax*)、*Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium*、固氮菌属 (*Azotoba-*

cter)、贪噬菌属 (*Variovorax*) 细菌则在 T₄ 处理的番茄植株根系中显著富集 (图 5)。

3 讨论

植物健康与微生物的关系极为密切, 微生物在植物生长、发育和繁殖过程中扮演着不可或缺的角色, 深刻地影响着植物的每一个生命阶段。内生菌是植物微生物类群的主要成员^[21]。目前的研究已发现, 植物内生菌可与宿主共生。一方面, 宿主为内生菌提供营养和保护; 另一方面, 内生菌可以通过不同的途径协助植物生长^[22]。其中, 根系内生细菌作为根系微生物群落的重要组成部分, 其菌群结构变化能改变植物的激素水平或产生植物生长调节因子促进植物生长, 而植物亦调控内生菌群落结构的变化, 形成互利共生关系, 对植物的健康和生长具有重要意义^[23]。

本研究发现, T₂、T₃ 处理使番茄中可溶性糖和可溶性固形物含量显著增加, 可滴定酸含量显著降低, 促进番茄的果实品质的提升; 而 T₁ 处理使番茄中可滴定酸含量升高, 使番茄风味偏酸,

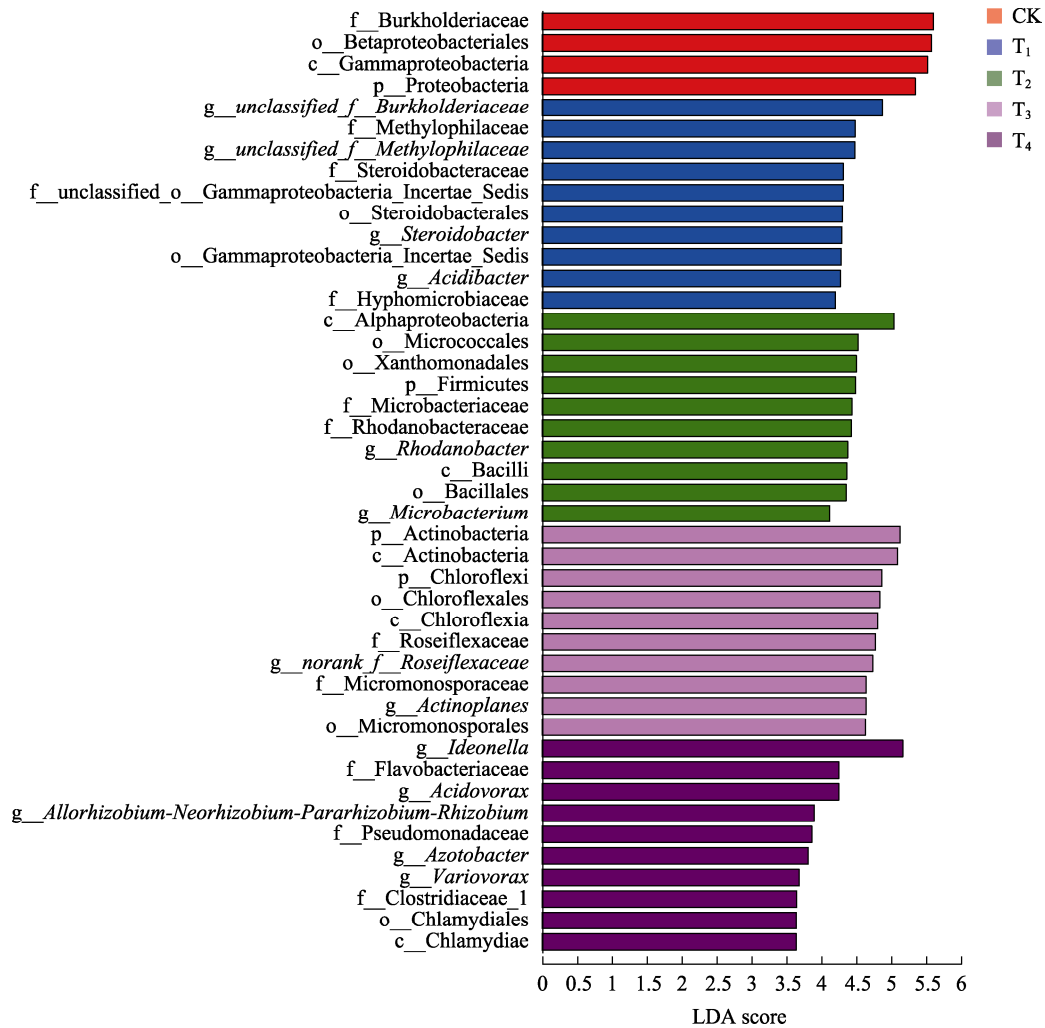


图 5 不同施肥处理下番茄植株根系内生细菌的 LEfSe 分析 (LDA 阈值 3.0)

Fig. 5 LEfSe analysis of endophytic bacteria in tomato roots under different fertilization (LDA threshold 3.0)

果实品质降低。这与前人的研究结果一致^[24], 有机肥中的营养成分较为全面, 富含多种营养成分、有机质和微生物, 施入土壤后能改善土壤结构, 缓慢且持续地为番茄植株提供均衡的养分; 此外, 有机肥中的微生物可通过代谢活动分泌植物激素 IAA、铁载体^[25], 以直接或间接的方式促进根系发育, 这可能增强养分吸收, 从而增加糖分的积累。

与 CK 相比, 施肥处理显著提高了番茄植株根系中内生细菌多样性和丰富度, 施用化肥、花生饼肥、豆饼肥和茶饼肥 4 种施肥处理中, T₂ 处理的提升效果最佳。前人研究已证实, 多样性丰富的内生细菌群落可直接或间接地改善植物的营养吸收^[26]、增强抗逆性^[27]和抑制病原菌的生长^[28]。因此, 提升内生微生物多样性不仅有助于减少对化学农药和化肥的依赖, 而且有利于生态恢复和发展可持续农业。另一方面, 与施用化肥处理相比, 施用饼肥 (花生饼、豆饼、茶饼) 处理更有利

于提升番茄根系内生细菌丰富度, 表明施用有机肥比施用化肥更有利于维护番茄植株健康。

此外, 与 CK 相比, 不同施肥处理同样改变了番茄植株根系内生细菌群落组成。在门分类水平, 不同施肥处理均诱导变形菌门细菌丰度占比下降, 并提升了其他门分类水平细菌的丰度占比; 其中, T₂ 和 T₃ 处理的诱导效果最为显著, 但 T₄ 处理的诱导效果最小。在属分类水平, CK 处理中, 番茄根系内生细菌相对丰度占比最高的细菌属为罗尔斯通氏菌属, 该菌属内某些细菌是多种植物病害的病原菌, 例如, 罗尔斯通氏菌 (*Ralstonia solanacearum*) 是全球范围内最具有破坏性的植物病原菌之一^[29]。而不同施肥处理均降低了罗尔斯通氏菌属的丰度占比, 提高了其他优势内生细菌属的丰度占比。此外, 在各施肥处理中, T₂ 处理的番茄根系优势内生细菌属的数量最多, 达 25 个, 但施用豆饼肥和茶饼肥处理分别为 18 和 13

个,略逊色于施用化肥处理的 19 个。这一结果表明:施肥虽有助于改变番茄根系内生细菌群落组成,但施用不同肥料种类的效果各异。另一方面,与施用化肥处理相比, T₂ 处理的番茄根系中,丰度占比最高的优势内生细菌属为罗河杆菌属,其功能包括参与氮循环^[30]、合成植物生长激素^[31]等;同时,中生根瘤菌属、芽孢杆菌属、生丝微菌属、卡斯特兰尼氏菌属细菌亦是 T₂ 处理的番茄根系中特有的优势内生细菌属。研究已证实中生根瘤菌属、芽孢杆菌属细菌在固氮、促进植物生长、增强抗逆性和抑制病原菌等方面发挥着重要作用^[32-33];生丝微菌属细菌亦具有降解环境污染物的潜力^[34],卡斯特兰尼氏菌属细菌则具有脱氮功能^[35]。上述优势内生细菌属富集于施用花生饼肥处理的番茄根系中,表明施用花生饼肥比施用化肥、豆饼肥和茶饼肥更有利于番茄植株的健康。同时,施用茶饼肥改变番茄植株根系内生细菌群落组成的效果不仅差于花生饼肥和豆饼肥,甚至差于化肥。这一现象可能与茶饼肥中含有多酚、茶皂素、挥发性有机化合物和生物碱等抑菌成分或化感物质有关。

4 结论

施用花生饼和豆饼肥提高了番茄中可溶性糖和可溶性固形物含量,降低了可滴定酸含量,有助于番茄果实品质的提升;而施用氮肥使番茄中可滴定酸含量升高,导致番茄风味偏酸,果实品质下降。与 CK 处理相比,不同施肥处理不仅提高了番茄根系内生细菌群落多样性和丰富度,而且重塑了番茄根系内生细菌群落组成。化肥、花生饼肥、豆饼和茶饼肥 4 种肥料中,花生饼肥提升番茄根系内生细菌多样性及丰富度的效果最佳,其次是豆饼肥,均优于化肥处理。另一方面,与施用化肥相比,施用花生饼肥富集了中生根瘤菌属、芽孢杆菌属、生丝微菌属、卡斯特兰尼氏菌属等潜在的有益内生细菌属,其维护番茄植株健康能力优于施用等氮水平的化肥、豆饼和茶饼肥。同时,在使用茶饼肥作为有机肥替代化肥时,需进一步降低化感物质含量后再使用更有助于作物健康。

参考文献

[1] 高飞,王倩姿,朱娜娜,韩宝,朱文. 基于主成分分析的 3

种微藻有机水溶肥料施用效果评价[J]. 中国土壤与肥料, 2024(9): 159-165.

GAO F, WANG Q Z, ZHU N N, HAN B, ZHU W. Evaluation of the application effects of three types of organic algal liquid fertilizers based on principal component analysis[J]. Chinese Journal of Soils and Fertilizers, 2024(9): 159-165. (in Chinese)

[2] 孟鑫鹏,史凤玉. 不同种类肥料对番茄生长的影响[J]. 中国果菜, 2024, 44(9): 53-57.

MENG X P, SHI F Y. Effects of different types of fertilizers on tomato growth[J]. Chinese Journal of Fruit and Vegetables, 2024, 44(9): 53-57. (in Chinese)

[3] 吴鹏辉,孔令捷,郎一山,赵海蒙,周浩楠,姜浩楠,吴瑕. 分蘖洋葱伴生对番茄果实品质及根际土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(19): 33-39.

WU P H, KONG L J, LANG Y S, ZHAO H M, ZHOU H N, JIANG H N, WU X. Effects of intercropping with multiplier onion on tomato fruit quality and rhizosphere soil nutrients[J]. Chinese Bulletin of Agricultural Sciences, 2024, 40(19): 33-39. (in Chinese)

[4] 张姝,韩一军,王岫嵩. 中国番茄制品出口下滑原因及对策分析[J]. 中国蔬菜, 2015(4): 1-6.

ZHANG S, HAN Y J, WANG X S. Analysis of the causes and countermeasures for the decline in China's tomato product exports[J]. Chinese Vegetables, 2015(4): 1-6. (in Chinese)

[5] 邓爱妮,罗金辉,苏初连,酒元达,刘子记,杨衍,赵敏. 碱性含腐植酸营养液对樱桃番茄产质量影响及其改土效果[J]. 南方农业学报, 2021, 52(5): 1282-1290.

DENG A N, LUO J H, SU C L, JIU Y D, LIU Z J, YANG Y, ZHAO M. Effects of alkaline humic acid-containing nutrient solution on yield and quality of cherry tomato and its soil improvement effects[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(5): 1282-1290. (in Chinese)

[6] 苏秀敏,王佼,韩文清,李鹏,王秋兰,刘永忠. CRITIC 法分析化肥减量配施有机肥对旱地番茄产量和品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(5): 1037-1041.

SU X M, WANG J, HAN W Q, LI P, WANG Q L, LIU Y Z. Analysis of the effects of reduced chemical fertilizer application combined with organic fertilizer on yield and quality of upland tomatoes using the CRITIC method[J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(5): 1037-1041. (in Chinese)

[7] ZHANG Y, YE C, SU Y, PENG W C, LU R, LIU Y X, HUANG H C, HE X H, YANG M, ZHU S S. Soil Acidification caused by excessive application of nitrogen fertilizer aggravates soil-borne diseases: evidence from literature review and field trials[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 340: 108176.

- [8] FU Y, LI G, WANG S, DAI Z. Effect of sesame cake fertilizer with γ -PGA on soil nutrient, water and nitrogen use efficiency[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 18669.
- [9] 孟笑男, 孔德辉, 李豪, 王惠, 董昆乐, 宋正熊, 张辉, 赵世民, 江凯, 雷朋岭. 芝麻饼肥不同施用量对豫西烤烟生长发育及产质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 63-65.
MENG X N, KONG D H, LI H, WANG H, DONG K L, SONG Z X, ZHANG H, ZHAO S M, JIANG K, LEI P L. Effects of different application rates of sesame cake fertilizer on the growth, development, and yield and quality of flue-cured tobacco in Western Henan[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(36): 63-65. (in Chinese)
- [10] 徐玉洁. 不同氮肥处理对土壤和椴柑碳氮磷化学计量比的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
XU Y J. Effects of different nitrogen fertilizer treatments on soil and ponkan citrus carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [11] 李富强, 廖成, 陈红华, 乔保明, 向泽第, 王雪松, 徐祥玉, 谭军. 菜子饼肥等氮替代化肥雪茄烟叶产质量及土壤有效养分含量变化[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(2): 79-83.
LI F Q, LIAO C, CHEN H H, QIAO B M, XIANG Z D, WANG X S, XU X Y, TAN J. Changes in yield and quality of cigar tobacco leaves and soil available nutrient content with rapeseed cake fertilizer as a nitrogen substitute for chemical fertilizer[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2024, 63(2): 79-83. (in Chinese)
- [12] 马兴华, 陈乐, 石屹, 张忠锋, 李晓, 王永, 王俊岩, 姜鹏超, 宋旭明, 李伟, 王永利. 化肥与豆饼配施对烤烟中性致香成分含量及产质量的影响[C]. 北京: 中国烟草学会 2017 年学术年会, 2017.
MA X H, CHEN L, SHI Y, ZHANG Z F, LI X, WANG Y, WANG J Y, JIANG P C, SONG X M, LI W, WANG Y L. Effects of combined application of chemical fertilizer and soybean cake on the content of neutral aromatic components and yield and quality of flue-cured tobacco[C]. Beijing: Proceedings of the 2017 Annual Academic Conference of the Chinese Tobacco Society, 2017. (in Chinese)
- [13] 刘倩雯, 王渭玲, 徐福利, 刘璇. 施用沼肥和发酵豆饼肥对黄土高原山地梨枣产量和品质的影响[J]. 西北林学院学报, 2012(4): 39-42.
LIU Q W, WANG W L, XU F L, LIU X. Effects of applying biogas slurry and fermented soybean cake fertilizer on the yield and quality of mountain jujube in the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry College, 2012(4): 39-42. (in Chinese)
- [14] 庞师婵, 王帅帅, 张文静, 黄子粤, 覃仁柳, 肖健, 唐小付, 杨尚东. 氮肥/花生饼肥配施对番茄根际土壤及根系内生细菌群落结构的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021(3): 141-151.
PANG S C, WANG S S, ZHANG W J, HUANG Z Y, QIN R L, XIAO J, TANG X F, YANG S D. Effects of combined nitrogen fertilizer and peanut cake fertilizer application on the rhizosphere soil and endophytic bacterial community structure of tomato roots[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021(3): 141-151. (in Chinese)
- [15] OLIVA J, RIDLEY M, REDONDO M A, CABALLO M. Competitive exclusion amongst endophytes determines shoot blight severity on pine[J]. Functional Ecology, 2021, 35(1): 239-254.
- [16] RABBE M F, ALI M D S, ISLAM M D N, RAHMAN M M, HASAN M D M, BAEK K H. Endophyte mediated bio-control mechanisms of phytopathogens in agriculture[J]. Research in Microbiology, 2024, 175(8): 104229.
- [17] ZHANG H, LI X, WHITE JF, WEI X, HE Y, LI C. Epichloë endophyte improves ergot disease resistance of host (*Achnatherum inebrians*) by regulating leaf senescence and photosynthetic capacity[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2022, 41(2): 808-817.
- [18] 肖纪珍, 任凤兰, 热沙来提. 番茄对氮磷钾的吸收规律及肥料施用效应[J]. 新疆农业科学, 1990(3): 114-116.
XIAO J Z, REN F L, Rezshaleti. Absorption patterns of nitrogen, phosphorus, and potassium by tomato and the effects of fertilizer application[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1990(3): 114-116. (in Chinese)
- [19] 刘军, 高丽红, 黄延楠. 两个番茄品种日光温室栽培养分吸收规律[J]. 中国蔬菜, 2005(4): 12-14.
LIU J, GAO L H, HUANG Y N. Nutrient uptake patterns of two tomato varieties in solar greenhouse cultivation[J]. Chinese Vegetables, 2005(4): 12-14. (in Chinese)
- [20] 王林, 黎妍妍, 吴风光, 何结望, 汪健, 吴文琪, 李志刚, 张楠, 刘领. 烟用饼肥快速发酵方法研究及应用[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(4): 798-801.
WANG L, LI Y Y, WU F G, HE J W, WANG J, WU W Q, LI Z G, ZHANG N, LIU L. Research and application of fermentation rapid methods for tobacco cake fertilizer[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(4): 798-801. (in Chinese)
- [21] 卢玉君, 王孝先, 赵伟进, 刘晓凤, 付彩青, 何建清. 砂生槐根瘤内生菌对青稞种子萌发及幼苗的促生作用[J]. 广西植物, 2021, 41(2): 206-215.
LU Y J, WANG X X, ZHAO W J, LIU X F, FU C Q, HE J Q. Promotive effects of endophytic rhizobia from *Caragana korshinskii* on the germination and seedling growth of barley[J]. Guangxi Plants, 2021, 41(2): 206-215. (in Chinese)
- [22] 刘梦洁, 徐亚军, 黄雪珍, 赵龙飞. 植物内生菌研究方法[J]. 微生物学通报, 2024, 51(6): 1887-1897.
LIU M J, XU Y J, HUANG X Z, ZHAO L F. Research methods for plant endophytes[J]. Microbiology Bulletin, 2024, 51(6): 1887-1897. (in Chinese)

- [23] 李林, 孙毅, 杨晓琼, 方海东, 闫帮国. 七彩花生根瘤内生菌对氮添加的响应及其与植物化学计量特征的关系[J]. 植物生态学报, 2024, 48(10): 1374-1384.
LI L, SUN Y, YANG X Q, FANG H D, YAN B G. Response of rhizobia from colored peanut to nitrogen addition and its relationship with plant stoichiometric characteristics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 48(10): 1374-1384. (in Chinese)
- [24] 裴宇. 饼肥替代不同比例尿素对柑橘产量品质、树体营养及橘园土壤养分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
PENG Y. The impacts of cake fertilizer replacing different proportions of urea on citrus yield quality, tree nutrients and soil fertility in citrus orchard[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [25] 杨金新, 王璐, 覃天涵, 段莹泽, 韦靖, 李佳慧, 朱英芝, 李战彪. 水稻内生菌 *Acinetobacter soli* JKDY-3 分离鉴定及其促生作用[J/OL]. 南方农业学报, (2025-04-10) [2025-05-05]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=i7m15r_oBqrDh8IEwqy9FvyAnM3JNlbMhvg2Q7s9_prQ_Mhm_b17SKtrd-JOzos-y51yA19ycE6EA8dvhuA2jYHjDVj-81gan4bBMGlUqUVLwNjVnal_VE-Ev9ohtVWSo_rwhEMCAIECMhftcr64iuYn8xEYIDaXKKwWZsj4vEog_QaNfuLgUPg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
YANG J X, WANG L, QIN T H, DUAN Y Z, WEI J, LI J H, ZHU Y Z, LI Z B. Isolation and identification of endophytic *Acinetobacter soli* JKDY-3 from rice and evaluation of its plant growth-promoting effect[J/OL]. Journal of Southern Agriculture, (2025-04-10)[2025-05-05]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=i7m15r_oBqrDh8IEwqy9FvyAnM3JNlbMhvg2Q7s9_prQ_Mhm_b17SKtrd-JOzos-y51yA19ycE6EA8dvhuA2jYHjDVj81gan4bBMGlUqUVLwNjVnal_VE--Ev9ohtVWSo_rwhEMCAIECMhftcr64iuYn8xEYIDaXKKwWZsj4vEog_QaNfuLgUPg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [26] KUMAWAT K C, SHARMA P, SIRARI A, SINGH I, GILL B S, SINGH U, SAHARAN K. Synergism of *Pseudomonas aeruginosa* (LSE-2) nodule endophyte with *Bradyrhizobium* sp. (LSBR-3) for improving plant growth, nutrient acquisition and soil health in soybean[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2019, 35(3): 47.
- [27] KAUR G, PATEL A, DWIBEDI V, RATH S K. Harnessing the action mechanisms of microbial endophytes for enhancing plant performance and stress tolerance: current understanding and future perspectives[J]. Archives of Microbiology, 2023, 205(9): 303.
- [28] SHEHATA H R, LYONS E M, JORDAN K S, RAIZADA M N. Bacterial endophytes from wild and ancient maize are able to suppress the fungal pathogen *Sclerotinia homoeocarpa*[J]. Journal of Applied Microbiology, 2016, 120(3): 756-769.
- [29] 曾献莹. 十字花科黑腐病菌Ⅲ型分泌系统 *hrp* 基因致病功能分析[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
ZENG X Y. Analysis of the pathogenic function of the *hrp* gene in the type III secretion system of *Xanthomonas black rot*[D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)
- [30] 吴浩. 基于静态及动态过程污染物去除的基质比选和 SI-VSSFCW 系统研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
WU H. Substrate selection based on static and dynamic pollutant removal processes and research on SI-VSSFCW systems[D]. Fuzhou: Donghua University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [31] 聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷. 高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 5176-5185.
NIE Y M, BU L Y, CHEN W F, AN D R, WEI G H, WANG H L. Effects of high-rate straw returning combined with *Bacillus* application on bacterial communities and soil fertility in sandy soils[J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 5176-5185. (in Chinese)
- [32] 陈佳. 根际促生菌调控岷山红三叶生长和耐盐性的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
CHEN J. Study on the regulation of plant growth-promoting rhizobacteria on the growth and salt tolerance of *Trifolium pratense* in the Minshan Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (in Chinese)
- [33] 朱滕滕, 岳思君, 谢志鹏, 王国琴, 郑蕊, 苏建宇. 晒砂瓜根系不同生态位细菌群落多样性及结构分析[J]. 南方农业学报, 2024, 55(4): 985-995.
ZHU T T, YUE S J, XIE Z P, WANG G Q, ZHENG R, SU J Y. Diversity and structure analysis of bacterial communities in different ecological niches of the root system of Seashell melon[J]. Journal of Southern Agriculture, 2024, 55(4): 985-995. (in Chinese)
- [34] 杨军. 电芬顿联合 A/O 工艺处理制药园区废水研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
YANG J. Study on the treatment of pharmaceutical park wastewater using electro-Fenton combined with A/O process[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023. (in Chinese)
- [35] 刘魁, 杨亚丽, 杨继周, 王正旭, 田阳阳, 杨博凯, 严杰, 吴昊, 赵文军. 化肥减量配施有机肥对田烟根际土壤细菌群落多样性的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(10): 2191-2196.
LIU K, YANG Y L, YANG J Z, WANG Z X, TIAN Y Y, YANG B K, YAN J, WU H, ZHAO W J. Effects of reduced chemical fertilizer application combined with organic fertilizer on the diversity of bacterial communities in the rhizosphere soil of field-grown tobacco[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(10): 2191-2196. (in Chinese)