

化肥减量配施有机肥对木薯生长及根际土壤细菌菌群的影响

韦卓文¹, 刘沁雲¹, 欧文军¹, 魏云霞¹, 喻珊¹, 陆小静¹, 蔡杰^{1,2*}

1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/农业农村部木薯种质资源保护与利用重点实验室, 海南海口 571101;
2. 中国热带农业科学院三亚研究院, 海南三亚 572024

摘要: 为了研究化肥减量配施有机肥对木薯根际土壤细菌多样性和群落结构及产量的影响, 采用 Illumina Nova 6000 测序平台, 对未施肥 (CK)、有机肥 (T₁)、常规施肥+有机肥 (T₂) 和化肥减施+有机肥 (T₃) 等施肥方式处理下的华南 12 号木薯根际土壤进行 16S rRNA 高通量测序分析。结果表明, 与 CK 相比, T₃ 处理不仅能显著增加木薯株高和茎粗, 还能提高木薯产量。在相似水平为 97% 下聚类分析得到木薯根际土壤 OTUs, 分别为 3603 个 (CK)、1688 个 (T₁)、1276 个 (T₂) 和 3317 个 (T₃)。不同施肥方式改变土壤细菌的多样性和丰度, 其物种多样性由高到低依次为: CK>T₃>T₁>T₂。基于土壤细菌群落的 PCoA 和聚类分析, CK 和 T₃ 细菌群落结构组成较为相似, T₁ 与 T₂ 细菌群落结构组成相似。不同施肥处理下木薯根际土壤中优势菌门为变形菌门、拟杆菌门、酸杆菌门、厚壁菌门、放线菌门和绿弯菌门。化肥减施配施有机肥增加了变形菌门、拟杆菌门和放线菌门的相对丰度, 降低了厚壁菌门和绿弯菌门的相对丰度。冗余性分析结果表明速效钾是影响木薯根际土壤菌群的主要效应因子。研究表明, 化肥减量配施有机肥不仅能增加木薯的产量, 还能改变木薯根际土壤细菌群落结构和多样性, 为发展绿色、高效、可持续的木薯产业提供坚实的理论支撑。

关键词: 木薯; 化肥减量; 有机肥; 根际土壤; 细菌多样性; 菌群结构

中图分类号: S533; S154.3 文献标志码: A

Effect of Reduced Chemical Fertilizer Combined with Organic Fertilizer on the Growth of Cassava and the Bacterial Community in the Rhizosphere Soil

WEI Zhuowen¹, LIU Qinyun¹, OU Wenjun¹, WEI Yunxia¹, YU Shan¹, LU Xiaojing¹, CAI Jie^{1,2*}

1. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Germplasm Resources Conservation and Utilization of Cassava, Ministry of Agriculture & Rural Affairs, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Sanya Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Sanya, Hainan 572024, China

Abstract: The 16S rRNA high-throughput sequencing analysis was conducted on the rhizosphere soil of Cassava South China No.12 under treatment without fertilization (CK), organic fertilizer (T₁), conventional fertilization applied with organic fertilizer (T₂), and reduced chemical fertilizer applied with organic fertilizer (T₃) by using the Illumina Nova 6000 sequencing platform to study the effects of chemical fertilizer application combined with organic fertilizer on the growth of cassava and the bacterial diversity and community structure in cassava rhizospheric soil. T₃ not only significantly increased the height and stem thickness of cassava, but also improved the yield of cassava, compared to CK. Cluster analysis was performed on the sequences based on 97% similarity, the OTUs numbers of CK, T₁, T₂ and T₃ are 3603, 1688, 1276 and 3317 respectively. Different fertilization methods altered the diversity and richness of soil bacteria, with the species diversity ranked from highest to lowest as CK>T₃>T₁>T₂. Based on PCoA and cluster analysis, the community composition of CK and T₃ was similar, the community composition of T₁ and T₂ was similar. The dominant

收稿日期 2024-04-24; 修回日期 2024-05-09

基金项目 海南省自然科学基金面上项目 (No. 322MS135); 现代农业产业技术体系建设专项 (No. CARS-11-HNOWJ)。

作者简介 韦卓文 (1979—), 女, 本科, 助理研究员, 研究方向: 木薯高效栽培。*通信作者 (Corresponding author), 蔡杰 (CAI Jie), E-mail: caijie@catas.cn。

phylum in cassava rhizospheric soil under different fertilization treatments were Proteobacteria, Bacteroidetes, Acidobacteria, Firmicutes, Actinobacteria and Chloroflexi. The relative abundance of Proteobacteria, Bacteroidetes and Actinobacteria increased under T_3 treatment, while the relative abundance of Firmicutes and Chloroflexi decreased. Redundancy analysis results indicated that available potassium was the main factor affecting the bacterial community in the cassava rhizosphere soil. In summary, the study demonstrates that reduced chemical fertilizer application combined with organic fertilizer not only increases the yield of cassava, but also changes the community structure and diversity of the bacterial in the rhizosphere soil. The results would provide a solid theoretical foundation for the development of a green, efficient, and sustainable cassava industry.

Keywords: cassava; reduced chemical fertilizer application; organic fertilizer; rhizosphere soil; bacterial diversity; bacterial community structure

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.10.011

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 块根淀粉含量较高, 是世界第六大粮食作物, 是全球近 10 亿人的主要食粮, 也是我国工业乙醇、淀粉、变性淀粉及饲料的重要原料^[1]。近年来, 我国木薯原料大部分依赖进口, 是第一大木薯原料进口国和消费国。造成这样的缺口主要是缺乏与高产优质木薯新品种配套的栽培技术, 肥料施用不科学, 连作时间长, 且收获经济效益低, 限制了木薯的推广与利用。在农作物生产中, 为了获取更高的产量, 存在重用化肥, 导致土壤板结、肥力下降、土壤微生物的多样性及酶活性降低等诸多负面影响^[2-4]。因此, 调整与优化木薯施肥方式迫在眉睫, 而减少化肥施用量, 增加有机肥或添加土壤修复剂将是今后种植木薯的必然趋势。

化肥减施配施生物有机肥模式已广泛地应用在各种农作物的种植端, 配施有机肥或生物有机肥可以改善根际土壤微生物群落的多样性和群落结构, 提高农作物产量和提升农产品品质, 促进农作物生长, 改善农业生态环境^[5-7]。关于化肥减施配施有机肥研究主要集中在探讨对土壤肥力^[8-10]、土壤酶活性^[11-12]、作物生长发育及产量^[13-15]、土壤微生物多样性及菌群^[16-18]的影响等方面。在木薯中关于化肥减量配施有机肥对其生长发育、酶活性、根际土壤微生物多样性及群落结构的研究还未见报道。目前在木薯研究中仅见化肥减施虽能改变木薯根际微生物多样性和群落结构, 但会导致木薯根际微生物的多样性和丰度都下降^[19-20]的相关报道; 而在木薯中化肥减量配施有机肥的根际土壤细菌多样性及群落结构的变化尚未见相关报道。

本研究以木薯品种华南 12 号 (SC12) 为研究对象, 采用高通量测序平台 Illumina Nova 6000

对木薯根际土壤进行 16S rRNA 高通量测序分析, 分析未施肥、施有机肥、常规施肥配施有机肥和化肥减施配施有机肥的不同模式对木薯根际土壤细菌多样性和群落结构的影响, 结合土壤理化性质, 分析木薯生长及产量情况, 阐明土壤细菌与环境因子的相互作用对木薯生长发育的影响, 为木薯生产科学施肥、改善土壤生态环境、促进木薯提质增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2022 年在海南省儋州市红星队国家木薯种质资源圃进行, 试验地地理位置位于 109°30'E, 19°30'N。属热带季风气候, 年降雨量为 900~2000 mm。试验前基地土壤养分含量如下: 有机质为 10.99 g/kg, 速效钾为 26.42 mg/kg, 有效磷为 3.47 mg/kg, 碱解氮为 21.99 mg/kg。试验所用氮肥为尿素 (N 46.2%), 磷肥为钙镁磷肥 (P_2O_5 18%), 钾肥为硫酸钾 (K_2O 52%), 商品活性有机肥 ($N+P_2O_5+K_2O \geq 5\%$, 有机质 $\geq 80\%$, 总腐殖酸 ≥ 30 g/kg, 腐殖质 ≥ 300 g/kg, 元泰丰 (包头) 生物科技有限公司生产。供试木薯品种为华南 12 号。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验共设 4 个处理: (1) CK (未施肥); (2) T_1 (有机肥); (3) T_2 (常规施肥+有机肥); (4) T_3 (化肥减施+有机肥)。化肥减施为在常规施肥基础上减氮 25%+减磷 50%, 常规施肥用量: N 90 kg/hm²、 P_2O_5 90 kg/hm²、 K_2O 90 kg/hm²; 化肥减施用量: N 67.5 kg/hm²、 P_2O_5 45 kg/hm²、 K_2O 90 kg/hm², 有机肥用量均为 1500 kg/hm²。木薯种植后 2 个月离种茎基部 15~30 cm 处穴施 1 次肥料。每个试验

区面积 36 m²，3 次重复，共 12 个试验区。每个小区种植 6 行，每行 6 株，36 株/小区，株行距 1.0 m×1.0 m。小区间隔 50 cm，重复间隔 100 cm。木薯于 2022 年 5 月种植，2023 年 3 月收获。其他管理同一般常规栽培。

1.2.2 项目测定 (1) 样品收集及处理。木薯根际土壤样品采集于 2023 年 3 月在海南省儋州市国家木薯种质资源圃进行，具体参照 CAI 等^[20]的方法。采样时使用的工具、采集袋或其他物品均已灭菌。设置 10 个采样点，按照“S”型取样，用无菌毛刷将附着在木薯块根表面的土壤刷于报纸上，用 1 mm 土壤筛去杂质，将所有样品混匀作为该试验小区的木薯根际土样。采集的木薯土壤样品做好标记后，一份用于土壤有机质(OM)、碱解氮(AN)、速效钾(AK)、有效磷(AP)等指标测定；另一份置于干冰中用于细菌 16S rRNA 高通量测序分析。

(2) 农艺性状和产量测定。2023 年 3 月收获木薯，分别用卷尺和游标卡尺测定各个试验小区的木薯株高和茎粗；各小区分别选取木薯 10 株，统计并记录各小区木薯的薯条数和鲜薯重，以实收的 10 株木薯鲜薯重换算成每公顷鲜薯产量。

(3) 土壤 pH 和养分测定。测定土壤 pH、OM、AN、AK 和 AP 含量，具体参照鲍士旦^[21]的方法。

1.3 数据处理

将采集的样品送至广东美格基因科技有限公司进行 16S rRNA 高通量测序。原始测序数据(raw reads)通过质控得到最后的有效数据(clean tags)。利用美格云平台(<http://cloud.magigene.com/>)进行细菌 Alpha 多样性和 Beta 多样性分析。采用 Microsoft Excel 2003 处理数据和绘制表格。采用 Kruskal-Wallis test 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 化肥减量配施有机肥能促进木薯生长和产量增加

测定各处理下收获期木薯的植物学性状(株高、薯条数、茎粗等)和产量。结果表明，施肥处理后木薯在株高、茎粗、薯条数和鲜薯产量均显著高于 CK 处理的木薯(表 1)。以上结果表明，不同施肥处理在一定程度上促进了木薯的生长，并提高其产量，尤其是在化肥减量(减 25% N 和减 50% P)的基础上配施有机肥不但不会对木薯生长造成不良影响，还能显著增加木薯的产量。

表 1 不同施肥处理对木薯生长指标和产量的影响
Tab. 1 Effects on growth and yield of cassava under different fertilization treatments

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	薯条数 Number of tuberous roots	鲜薯产量 Yield of fresh tuberous roots/(t·hm ⁻²)
CK	192.67±18.27 ^b	24.85±3.03 ^b	8.70±0.46 ^c	52.41±0.67 ^c
T ₁	234.13±5.95 ^a	29.75±0.33 ^a	10.43±0.64 ^a	72.11±0.31 ^a
T ₂	243.37±9.14 ^a	30.86±1.47 ^a	10.60±0.06 ^a	73.97±0.41 ^a
T ₃	237.69±6.33 ^a	30.31±1.39 ^a	9.93±0.14 ^b	64.68±0.36 ^b

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).

2.2 不同施肥处理木薯根际土壤样品的高通量测序

利用高通量测序技术分析 12 个不同施肥处理的木薯根际土壤样品，统计每个处理(CK、T₁、T₂、T₃)样品通过测序得到的相关指标如表 2 所示。每个样品测序的覆盖度均大于 0.992，结果表明构建的测序文库涵盖了木薯土壤样品中 99%以上的细菌菌群。同时，随着测序数据量的增加，样品的稀释曲线也是升高后慢慢趋于平缓(图 1)，这说明高通量测序的深度和获得的数据量

足以覆盖样品中细菌菌群的多样性，可以用于后续的研究。

表 2 不同施肥处理的测序结果分析
Tab. 2 Analysis of sequencing results from different fertilization treatments

处理 Treatments	原始序列数 Raw data	有效序列数 Clean data	覆盖度 Good coverage
CK	127 872±2273	122 440±1946	0.9927±0.0010
T ₁	127 966±1379	121 416±1301	0.9958±0.0010
T ₂	123 846±2201	118 360±1913	0.9962±0.0002
T ₃	127 642±1937	122 248±2361	0.9935±0.0009

2.3 化肥减量配施有机肥等处理木薯根际土壤细菌 α -多样性指数分析

对各处理木薯根际土壤的 OTU 和 α -多样性指数进行分析(表 3)。与 CK 处理相比, T_1 、 T_2 、 T_3 处理土壤中 OTUs、细菌类群的丰度(Chao1

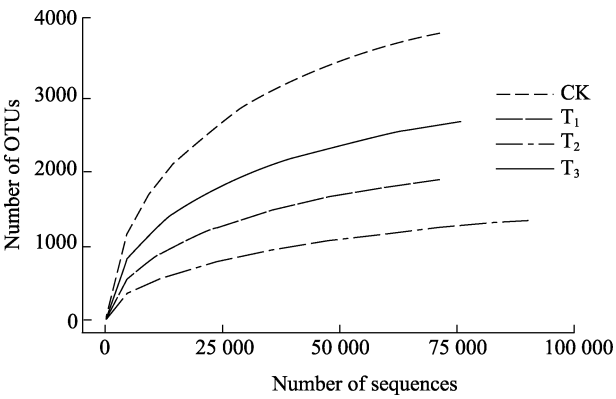


图 1 不同施肥处理下木薯根际土壤样品 OTUs 的稀疏曲线

Fig. 1 OTUs rarefaction curve of cassava rhizosphere soil under different fertilization treatments

和 ACE)均呈现下降的趋势,但 T_3 是施肥处理组中细菌丰度最高的。与 CK 处理相比,不同处理根际土壤的 Simpson 指数随着有机肥或化肥的施用呈现上升的趋势,而 Shannon 指数随着有机肥或化肥的施用均呈现出下降的趋势。研究结果表明,施有机肥或化肥会在一定程度上改变根际土壤中微生物的丰度和多样性,化肥减施配施有机肥虽然在细菌丰度和多样性上均有所降低,但其丰度和多样性最接近未施肥的土壤。

2.4 木薯根际土壤细菌 OTU 韦恩图分析

木薯根际土壤细菌共同的 OTUs 有 885 个(图 2)。与 CK 处理相比,不同施肥方式下的每个样本特有 OTUs 的数量少,分别是 1600 个(T_1)、413 个(T_2)、1371 个(T_3)。与 CK 处理相比,在各施肥处理中特有的 OTUs 的数量均呈现减少的趋势,与总 OTUs 数量减少表现一致。结果说明,各施肥处理改变了木薯根际土壤细菌类群的丰度。

表 3 不同施肥处理木薯根际土壤样品细菌多样性和丰度指数

Tab. 3 Bacterial diversity and richness in cassava rhizospheric soil samples under different fertilization treatments

处理 Treatment	OTUs	Chao1	ACE	Simpson	Shannon
CK	3603±265 ^a	3603±265 ^a	3997±213 ^a	0.01±0.002 ^b	8.68±0.25 ^a
T_1	1688±152 ^b	1689±191 ^b	2025±78 ^b	0.09±0.002 ^a	5.69±1.60 ^b
T_2	1276±99 ^c	1277±100 ^c	1646±127 ^c	0.07±0.006 ^b	5.53±0.48 ^b
T_3	3317±85 ^a	3317±86 ^a	3775±87 ^a	0.02±0.008 ^c	7.69±0.81 ^a

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 ($P<0.05$).

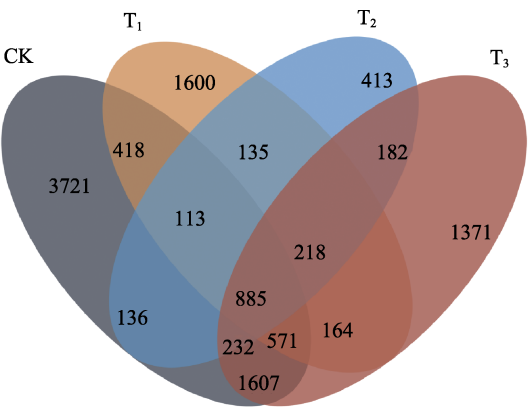


图 2 木薯根际土壤细菌 OTUs 韦恩图分析

Fig. 2 Venn diagram of bacterial OTUs in cassava rhizospheric soil

2.5 化肥减量配施有机肥等处理下木薯根际土壤细菌群落的 Beta 多样性分析

对各施肥处理下木薯根际土壤细菌群落进行主坐标分析(PCoA),结果表明主成分 1(PCoA1)

和主成分 2 (PCoA2) 的贡献率分别为 62.10%和 25.00%。如图 3 所示,样本 CK 和 T_3 距离较近,聚集在一起,说明这 2 个样本细菌类群组成结构相似;样本 T_1 和 T_2 距离较近,说明这 2 个样本的细菌类群组成结构相似。

为了进一步了解 PCoA 的结果,对不同样本进行聚类分析,结果如图 4 所示,细菌群落结构组成分成两大类,即 T_1 和 T_2 被聚为一个分支, T_3 和 CK 被聚为一个分支,说明 CK 和 T_3 在细菌群落组成结构上有较高相似度。结果表明化肥减施配施有机肥的细菌群落结构和多样性组成介于常规施肥配施有机肥和未施肥之间,不同施肥处理能够显著改变细菌的群落结构和多样性。

2.6 化肥减量配施有机肥等处理下木薯根际土壤细菌群落组成

细菌 16S rRNA 高通量测序获得序列经注释后,统计每个处理样本中细菌相对丰度及群落结

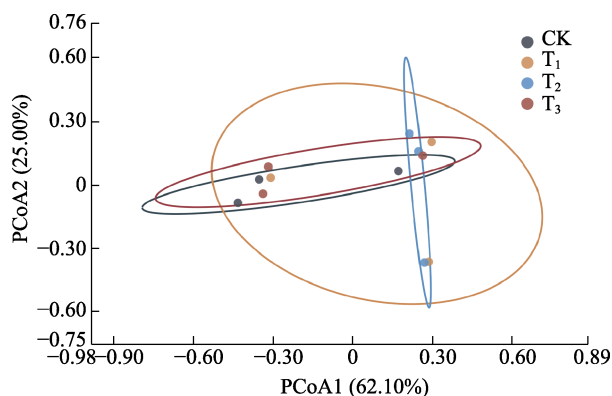


图 3 不同施肥处理下木薯根际土壤细菌群落主坐标 (PCoA) 分析

Fig. 3 PCA analysis of bacterial community in cassava rhizosphere soil under different fertilization treatments

构组成。在门水平下, 细菌菌落相对丰度如图 5 所示, 变形菌门 (Proteobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、

厚壁菌门 (Firmicutes)、放线菌门 (Actinobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 是木薯根际土壤样本的优势细菌菌门。与 CK 的木薯根际土壤细菌群落相比, 变形菌门 (Proteobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 在施肥组处理中的含量呈现升高的趋势。酸杆菌门 (Acidobacteria) 在 T₁ 和 T₂ 施肥处理后的含量明显下降, 但在 T₃ 中变化不大; 厚壁菌门 (Firmicutes) 在 T₁ 处理后的含量有所增加, 但在 T₂ 和 T₃ 处理中呈现下降的趋势; 绿弯菌门 (Chloroflexi) 在 T₁、T₂、T₃ 处理下的含量呈现下降趋势。放线菌门 (Actinobacteria) 经各施肥处理后 (T₁、T₂、T₃) 的含量均明显增加 ($P < 0.05$)。T₁、T₂、T₃ 处理的木薯根际土壤中放线菌门分别增加 6.3 倍、3.5 倍、2.4 倍。结果表明, 有机肥或化肥施用并未改变主要细菌的类群, 但提高了木薯根际土壤中有益细菌类群的相对丰度。

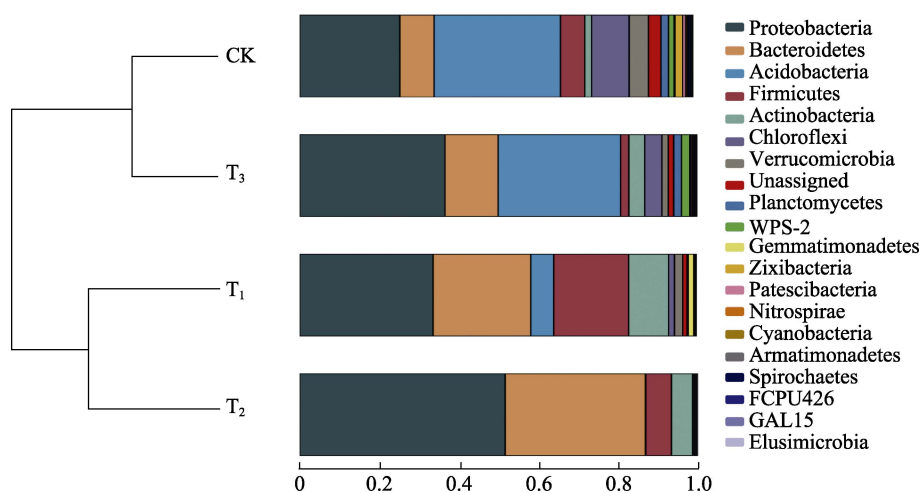


图 4 不同施肥处理下木薯根际土壤细菌菌落的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of bacterial communities in rhizosphere soil of cassava under different fertilization treatments

在属水平上, 相对丰度大于 0.5% 的共有 14 个属。黄杆菌属 (*Flavobacterium*)、不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 和马赛菌属 (*Massilia*) 是木薯根际土壤细菌群落的主要菌属 (相对丰度大于 10%) (图 6)。与 CK 处理相比, 黄杆菌属、不动杆菌属和马赛菌属的含量在 T₁、T₂ 和 T₃ 处理中均呈现显著增加。在各施肥处理中, 主要菌属的含量也有显著差异。黄杆菌属在 T₁、T₂ 处理下的含量相似, 但与 T₃ 处理下的含量有明显差异, 分别是 T₃ 处理下的 4.3 倍和 4.9 倍。类似的结果也在马赛菌属中观察到, T₁、T₂ 处理下的含量是 T₃ 处理的 19.4 倍和 5.4 倍。然而不动杆菌属在 T₂

和 T₃ 处理下的含量显著高于 T₁ 处理, 分别是 T₁ 处理下含量的 3.9 倍和 2.62 倍。

2.7 化肥减量配施有机肥等处理下木薯根际土壤环境因子的冗余性分析

利用 RDA 分析土壤环境因子如何影响木薯根际土壤细菌群落结构。选择 pH、SOM、AN、AP 和 AK 等 5 个环境因子进行冗余性分析, 结果如图 7 所示, 在门水平上, RDA1 解释了 72.40%, RAD2 解释了 18.50%, 共解释了 90.90% 以上。速效钾、pH、速效磷对土壤细菌落结构有着重要影响, 其中速效钾影响最大, 且速效钾含量与速效磷、碱解 N、有机质、pH 均呈正相关。

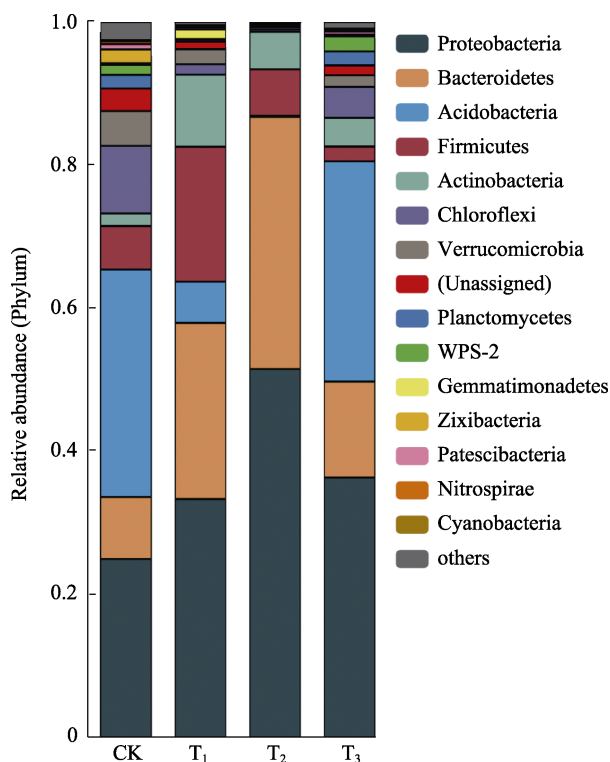


图 5 不同施肥处理下门水平上的
木薯根际土壤细菌相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of bacterial phylum in cassava rhizosphere soil under different fertilization treatments

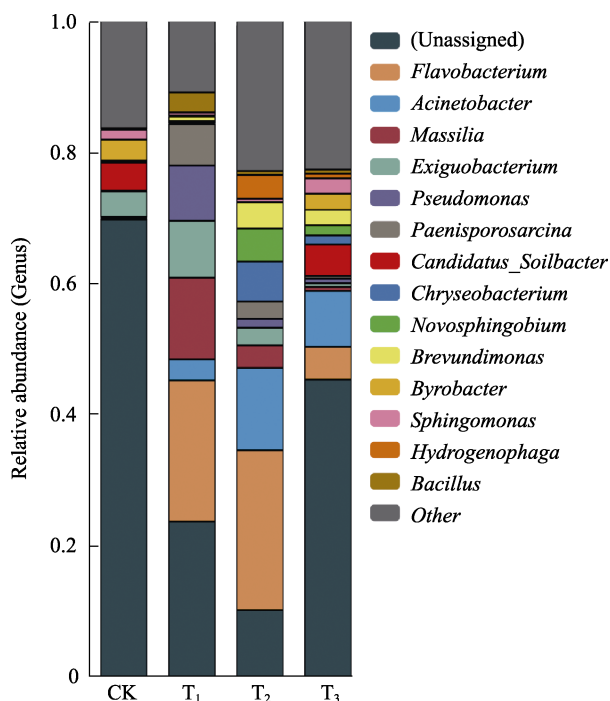


图 6 不同施肥处理下属水平上的
木薯根际土壤细菌相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of bacterial genus in cassava rhizosphere soil under different fertilization treatments

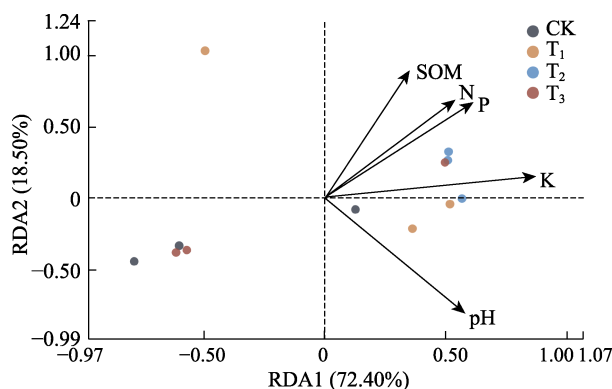


图 7 不同施肥处理下木薯根际
土壤环境因子相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of environmental factors in cassava rhizosphere soil under different fertilization treatments

3 讨论

土壤根际微生物组成及丰度受土壤质量^[22-23]、宿主植物^[20, 24-25]和种植模式^[26-27]等因素影响。本研究利用高通量测序分析化肥减量配施有机肥如何影响和改变木薯根际土壤细菌多样性及菌群结构。结果表明化肥减量配施有机肥的木薯根际土壤中, 在门水平上, 变形菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、放线菌门 (Actinobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 是木薯根际土壤样本的优势细菌菌门, 与前人报道的在间作或轮作下木薯根际土壤的优势菌门一致^[9, 25, 27-28]。因此, 推测在南方酸性土壤中宿主植物木薯通过分泌根系代谢物富集特定的微生物, 导致南方木薯根际土壤下所富集细菌类群结构组成相似, 只是在多样性和丰度上有所不同, 这说明木薯根际土壤细菌的类群主要受宿主植物影响和调配, 而种植模式 (间作或轮作) 或施肥方式只能在一定程度上改变其多样性和丰度。

本研究中, 化肥减量配施有机肥的木薯根际土壤中, 细菌菌群的多样性及丰度均显著高于施有机肥、常规施肥配施有机肥处理, 这结果与靳晓拓等^[8]、陆海飞^[29]、孙家骏等^[30]的报道一致。蔡杰等^[19]研究发现化肥减施的木薯根际土壤中, 细菌多样性和丰度均显著低于未施肥和常规施肥处理, 导致这种结果是由于未添加有机肥处理。本研究中, 单施有机肥、常规施肥配施有机肥和化肥减量配施有机肥都能提高有益细菌放线菌门的丰度, 与王庆等^[6]、姜蓉等^[7]、蔡杰等^[19]的研

究结果一致。研究表明, 土壤中放线菌数量的增加可以提高对土壤有机质利用率, 同时还能抑制一些土传病害, 促进土壤健康发展^[31]。同时, 本研究在属水平上也发现拟杆菌门的黄杆菌属在 T_1 、 T_2 和 T_3 处理下的丰度显著增加。研究表明, 黄杆菌属参与土壤中有机的分解, 对维持土壤肥力有积极作用^[32]。然而, 黄杆菌属的丰度在 T_3 处理中呈现最低, 这可能跟减少氮和磷肥施用有关。相关研究表明, 黄杆菌属能够通过其代谢活动参与氮、磷循环^[33-34]。*Candidatus Solibacter* 是分解有机质、利用碳源的细菌属^[35]。本研究中, 在 T_1 和 T_2 处理下 *Candidatus Solibacter* 的丰度显著低于 T_3 处理。综上, 合理配施有机肥不仅能为土壤提供大量的有机质及养分, 还能在一定程度上还增加土壤有益细菌的数量, 改善土壤细菌菌群结构^[36], 帮助其吸收转化养分, 为植物生长创造优良的环境, 减轻作物的连作障碍^[37]。

合理施肥或配施有机肥能够提高农作物产量, 提升农产品品质, 促进作物生长, 改善农业生态环境。本研究中, 不同施肥处理均能显著促进木薯生长发育, 增加木薯产量。与未施肥处理相比, 化肥减施配施有机肥能够显著增加木薯株高和茎粗, 获得较高的木薯产量。这可能与配施有机肥增加了土壤中有益微生物多样性有关, 从而改变土壤细菌的菌落结构, 促进土壤向健康发展。但化肥减量配施不同有机肥对木薯产量及品质的连续影响及其机制有待进一步深入研究。随着化肥减量施肥的倡导, 在其基础上合理配施有机肥, 在木薯主产区生产中, 逐步实现有机肥替代化肥, 实现化肥零增长, 发展绿色、可持续的木薯产业, 促进木薯产业提质增效, 具有非常重要的力量意义和应用价值。

4 结论

与未施肥相比, 化肥减量配施有机肥处理不仅能显著增加木薯株高和茎粗, 还能提高木薯产量。与单施有机肥和常规施肥配施有机肥的木薯根际土壤相比, 化肥减量配施有机肥的木薯根际土壤细菌的多样性和丰度有显著差异。化肥减量配施有机肥处理木薯根际土壤中优势菌门为变形菌门、酸杆菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、放线菌门和绿弯菌门, 这与已报道的木薯根际土壤细菌优势菌门一致。化肥减施配施有机肥增加了拟杆菌门、变形菌门及放线菌门的相对丰度, 降低了

绿弯菌门和厚壁菌门的相对丰度。冗余性分析结果表明速效钾是影响木薯根际土壤细菌群落的主要效应因子, 与速效磷、碱解 N、有机质、pH 等指标呈现正相关。

参考文献

- [1] 李开绵, 林雄, 黄洁. 国内外木薯科研发展概况[J]. 热带农业科学, 2001, 89(1): 56-60.
LI K M, LIN X, HUANG J. Overview of cassava research and development domestically and internationally[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2001, 89(1): 56-60. (in Chinese)
- [2] 袁旭, 张家安, 常飞杨, 王鑫月, 李寒, 张雪梅. 我国肥料施用现状及化肥减量研究进展[J]. 农业与技术, 2022, 42(18): 20-23.
YUAN X, ZHANG J A, CHANG F Y, WANG X Y, LI H, ZHANG X M. Current status of fertilizer application and progress in chemical fertilizer reduction research in China[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(18): 20-23. (in Chinese)
- [3] 杨忠妍. 化肥施用过量对农作物的危害[J]. 现代农业科技, 2020(21): 203-204, 212.
YANG Z Y. The harm of excessive chemical fertilizer application on crop plants[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(21): 203-204, 212. (in Chinese)
- [4] 周时艺, 韦云东, 陈蕊蕊, 盘欢, 徐钊, 李菊馨, 罗燕春, 郑华. 缓释肥不同施用深度对木薯生长的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 140-144.
ZHOU S Y, WEI Y D, CHEN R R, PAN H, XU C, LI J X, LUO Y C, ZHENG H. Effects of fertilization depth of slow-release fertilizer on cassava growth[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2023, 49(2): 140-144. (in Chinese)
- [5] 陈佳佳. 化肥减施配施生物有机肥对花生生长及土壤微生物菌群的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
CHEN J J. Effects of reduction of chemical fertilizer combined with application of bio-organic fertilizer on peanut growth and soil microbial community[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [6] 王庆, 海江波, 岳忠娜, 门倩. 化肥减量对麦田土壤微生物量及微生物区系的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 484-487.
WANG Q, HAI J B, YUE Z N, MEN Q. Effects of chemical fertilizer reduction on soil microbiological and microbial biomass in wheat field[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(3): 484-487. (in Chinese)

- [7] 姜蓉, 徐智, 汤利. 化肥减量配施不同有机肥对设施菊花土壤微生物功能多样性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(5): 895-902.
- JIANG R, XU Z, TANG L. Effects of different organic fertilizers on soil microbial functional diversity of greenhouse chrysanthemum under chemical fertilizers reduction[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32(5): 895-902. (in Chinese)
- [8] 靳晓拓, 马继勇, 周彦好, 陈丽君, 李涛, 赵洪伟. 化肥减量配施有机肥下芒果园土壤细菌多样性及群落结构特征[J]. 热带作物学报, 2019, 40(6): 1205-1212.
- JIN X T, MA J Y, ZHOU Y Y, CHEN L J, LI T, ZHAO H W. Bacterial diversity and community structure characteristics of mango orchard soil under reduced chemical fertilizer and increased organic fertilizer application[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(6): 1205-1212. (in Chinese)
- [9] 韦云东, 周时艺, 郑华, 李军, 盘欢, 罗燕春, 陈蕊蕊. 化肥减施对土壤肥力、木薯产量及种植效益的影响[J]. 农业研究与应用, 2021, 34(3): 9-15.
- WEI Y D, ZHOU S Y, ZHENG H, LI J, PAN H, LUO Y C, CHEN R R. Effects of chemical fertilizer reduction on soil fertility, cassava yield and planting benefit[J]. Agricultural Research and Application, 2021, 34(3): 9-15. (in Chinese)
- [10] 赵满兴, 刘慧, 王静, 常慧璇, 程治蓉. 减量复合肥配施生物有机肥对番茄土壤肥力及酶活性的影响[J]. 农学学报, 2020, 10(2): 56-61.
- ZHAO M X, LIU H, WANG J, CHANG H X, CHENG Z R. Reduced compound fertilizer with bio-organic fertilizer: effects on soil fertility and enzyme activity of tomato[J]. Journal of Agriculture, 2020, 10(2): 56-61. (in Chinese)
- [11] 宋以玲, 于建, 陈士更, 肖承泽, 李玉环, 苏秀荣, 丁方军. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 352-360.
- SONG Y L, YU J, CHEN S G, XIAO C Z, LI Y H, SU X R, DING F J. Effects of reduced chemical fertilizer with application of bio-organic fertilizer on grape growth, microorganism and enzymes activities in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 352-360. (in Chinese)
- [12] 门倩, 海江波, 岳忠娜, 薛少平, 王庆. 化肥减量对玉米田土壤酶活性及微生物量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 134-140.
- MEN Q, HAI J B, XUE Z N, YUE S P, WANG Q. Effects of maize field soil enzyme activities and microbial biomass of chemical fertilizer reduction[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2012, 40(6): 134-140. (in Chinese)
- [13] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 唐诚, 李俊华, 梁永超. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6137-6146.
- TAO L, CHU G X, LIU T, TANG C, LI J H, LIANG Y C. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6137-6146. (in Chinese)
- [14] 王宁, 南宏宇, 冯克云. 化肥减量配施有机肥对棉田土壤微生物生物量、酶活性和棉花产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 173-181.
- WANG N, NAN H Y, FENG K Y. Effects of reduced chemical fertilizer with organic fertilizer application on soil microbial biomass, enzyme activity and cotton yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 173-181. (in Chinese)
- [15] 范晓晖, 陈慕松, 刘文婷, 林旭, 翁琳琳, 吴寿华, 谢星. 化肥减量配施有机肥对葡萄产量、品质及土壤质量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 46-51.
- FAN X H, CHEN M S, LIU W T, LIN X, WENG L L, WU S H, XIE X. Effect of combined chemical fertilizer reduction with organic fertilizer on yield and quality of grape and soil quality[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(3): 46-51. (in Chinese)
- [16] LIU W X, WANG Q L, WANG B Z, FRANKS A E, TENG Y, LI Z G, LUO Y M. Changes in the abundance and structure of bacterial communities under long-term fertilization treatments in a peanut monocropping system[J]. Plant and Soil, 2015, 395: 415-427.
- [17] HAN J Q, DONG Y Y, ZHANG M. Chemical fertilizer reduction with organic fertilizer effectively improve soil fertility and microbial community from newly cultivated land in the Loess Plateau of China[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 165: 103966.
- [18] 宋以玲, 于建, 陈士更, 肖承泽, 李玉环, 苏秀荣, 丁方军. 化肥减量配施生物有机肥对玉米生长及土壤微生物和酶活性的影响[J]. 肥料与健康, 2019, 46(1): 55-61.
- SONG Y L, YU J, CHEN S G, XIAO C Z, LI Y H, SU X R, DING F J. Effects of reduced chemical fertilizer with application of bio-organic fertilizer on maize growth, microorganism and enzyme activities in soil[J]. Fertilizer and Health, 2019, 46(1): 55-61. (in Chinese)
- [19] 蔡杰, 张洁, 喻珊, 林洪鑫, 李开绵, 陈松笔, 欧文军. 施肥方式对木薯根际土壤细菌多样性与群落结构特征的影响[J]. 福建农林大学(自然科学版), 2021, 51(1): 15-20.
- CAI J, ZHANG J, YU S, LIN H X, LI K M, CHEN S B, OU W J. Effect of fertilization on bacterial diversity and community structure characteristics in cassava rhizospheric

- soil[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 51(1): 15-20. (in Chinese)
- [20] CAI J, ZHANG J, DING Y, YU S, LIN H X, YUAN Z Q, LI K M, OU W J, CHEN S B. Different fertilizers applied alter the fungal community structure in rhizospheric soil of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and increase crop yield[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 663781.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. BAO S D. Soil agronomic analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)
- [22] 叶静, 陈影, 屈爽, 赵文超. 不同微生物菌肥对滨海盐渍土土壤质量及玉米产量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4279-4292.
- YE J, CHEN Y, QU S, ZHAO W C. Effects of different microbial fertilizers on soil quality and maize yield in coastal saline soil[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4279-4292. (in Chinese)
- [23] 肖让, 张永玲, 赵芸晨, 郭世乾, 崔增团, 师伟杰. 化肥减量配施有机肥对日光温室土壤质量及茄子产量、品质的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(2): 188-198.
- XIAO R, ZHANG Y L, ZHAO Y C, GUO S Q, CUI Z T, SHI W J. Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer application on soil quality, egg plant yield and quality in solar greenhouse[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023, 38(2): 188-198. (in Chinese)
- [24] 林洪鑫, 袁展汽, 肖运萍, 汪瑞清, 吕丰娟, 张志华. 施氮和木薯间作对成熟期花生根际土壤细菌群落结构的影响[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(5): 723-733.
- LIN H X, YUAN Z Q, XIAO Y P, WANG R Q, LYU F J, ZHANG Z H. Effects of nitrogen application and intercropping with cassava on bacterial community structure in rhizosphere soil of peanut in maturation stage[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(5): 723-733. (in Chinese)
- [25] 林洪鑫, 袁展汽, 肖运萍, 汪瑞清, 吕丰娟, 张志华. 施氮和间作花生对木薯根际土壤细菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 56-65.
- LIN H X, YUAN Z Q, XIAO Y P, WANG R Q, LYU F J, ZHANG Z H. Effects of nitrogen application and intercropping with peanut on bacterial community structure in cassava rhizosphere soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(4): 56-65. (in Chinese)
- [26] 唐秀梅, 钟瑞春, 蒋菁, 熊发前, 贺梁琼, 李忠, 韩柱强, 黄志鹏, 唐荣华. 木薯/花生间作对根际土壤微生态的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2015, 34(1): 117-124.
- TANG X M, ZHONG R C, JIANG J, XIANG F Q, HE L Q, LI Z, HAN Z Q, HUANG Z P, TANG R H. The effect of cassava/peanut intercropping on microecology in rhizosphere soil[J]. Genomics and Applied Biology, 2015, 34(1): 117-124. (in Chinese)
- [27] HE C C, ZHOU B, WANG H, WEI Y X, HUANG J A. First-year maize/cassava relay intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community in the symbiotic period[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1087202.
- [28] 刘珊廷, 罗兴录, 吴美艳, 唐志平, 王超超, 张家陵. 连作与轮作下木薯产量及土壤微生物特征比较[J]. 热带作物学报, 2019, 40(8): 1468-1473.
- LIU S T, LUO X L, WU M Y, TANG Z P, WANG C C, ZHANG J L. Comparison of cassava yield and soil microbial characteristics under continuous cropping and rotation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(8): 1468-1473. (in Chinese)
- [29] 陆海飞. 长期无机有机肥配施对红壤性水稻土微生物群落多样性及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 632-643.
- LU H F. Microbial community diversity and enzyme activity of red paddy soil under long-term combined inorganic-organic fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(3): 632-643. (in Chinese)
- [30] 孙家骏, 付青霞, 谷洁, 王小娟, 高华. 生物有机肥对猕猴桃土壤酶活性和微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 829-837.
- SUN J J, FU Q X, GU J, WANG X J, GAO H. Effects of bio-organic fertilizer on soil enzyme activities and microbial community in kiwifruit orchard[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 829-837. (in Chinese)
- [31] 张瑞福, 沈其荣. 微生物肥料新型功能作用机理与根际定殖增强策略[J]. 微生物杂志, 2024, 44(1): 1-11.
- ZHANG R F, SHEN Q R. Mechanism of the microbial fertilizer's novel functions and the strategies to enhance its root colonization[J]. Journal of Microbiology, 2024, 44(1): 1-11. (in Chinese)
- [32] GREEN D H, SHENOY D M, HART M C, HATTON A D. Coupling of dimethylsulfide oxidation to biomass production by a marine *flavobacterium*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77: 3137-3140.
- [33] 于景丽, 范雅慧, 高晓霞, 史昊先, 赵吉. 高通量技术解析锡林河底泥反硝化菌群组成及丰度[J]. 微生物前沿, 2014, 3(3): 70-78.
- YU J L, FAN Y H, GAO X X, SHI H X, ZHAO J. Pyrosequencing analysis reveals abundance and community composition of denitrifying bacteria in xilin river sludge[J]. Advances in Microbiology, 2014, 3(3): 70-78. (in Chinese)

- [34] 李慧敏, 王瑞, 施卫明, 仲卫明, 李奕磷. 菜地土壤解磷微生物特征及其在磷形态转化调控中的作用[J]. 土壤, 2020, 52(4): 668-675.
- LI H M, WANG R, SHI W M, ZHONG W M, LI Y L. Characteristics of soil phosphorus-solubilizing microorganisms and their role in regulation of phosphorus morphological transformation in vegetable fields[J]. Soils, 2020, 52(4): 668- 675. (in Chinese)
- [35] 杜思瑶, 于森, 刘芳华, 肖雷雷, 张洪霞, 陶军, 顾卫, 顾京晏, 陈茜. 设施种植模式对土壤细菌多样性及群落结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1615-1625.
- DU S Y, YU M, LIU F H, XIAO L L, ZHANG H X, TAO J, GU W, GU J Y, CHEN X. Effect of facility management regimes on soil bacterial diversity and community structure[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(11): 1615-1625. (in Chinese)
- [36] TAO R, LIANG Y, WAKELIN S A, CHU G X. Supplementing chemical fertilizer with an organic component increases soil biological function and quality[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96: 42-51.
- [37] 杨宇虹, 陈冬梅, 晋艳, 王海斌, 段玉琪, 郭徐魁, 何海斌, 林文雄. 不同肥料种类对连作烟草根际土壤微生物功能多样性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(1): 105-111.
- YANG Y H, CHEN D M, JIN Y, WANG H B, DUAN Y Q, GUO X K, HE H B, LIN W X. Effects of different fertilizers on functional diversities of microbial flora in rhizospheric soil of monoculture tobacco[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(1): 105-111. (in Chinese)