

庞师婵,王帅帅,张文静,等.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,2021,40(3):141-151.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.016

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

庞师婵¹,王帅帅²,张文静¹,黄子粤¹,覃仁柳¹,肖健¹,唐小付¹,杨尚东¹

1.广西大学农学院/植物科学国家级实验教学示范中心,南宁 530004;

2.陕西省榆林市蔬菜产业发展中心,榆林 719000

摘要 设置不施肥(A)、100%氮肥(B)、75%氮肥/25%花生饼肥(C)、50%氮肥/50%花生饼肥(D)、25%氮肥/75%花生饼肥(E)及100%花生饼肥(F),共6组处理,基于高通量测序技术,分析番茄植株根际土壤及根系内生细菌多样性,探讨氮肥/花生饼肥不同配比处理对番茄根际土壤及根系内生细菌群落结构的影响,为番茄的平衡施肥提供理论依据。结果表明:与不施肥(A)相比,不同施肥处理的根际土壤优势细菌门分类组成的占比发生了改变;单一的氮肥和饼肥处理均导致番茄植株内生细菌优势细菌门的数量减少;与不施肥(A)相比,不同施肥处理改变了番茄根际土壤和根系内生细菌中优势细菌属的组成和占比。B处理或F处理条件下,假单胞菌属(*Pseudomonas*)、鞘脂菌属(*Sphingobium*)、泛菌属(*Pantoea*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)等优势菌属缺失,不仅不利于营造番茄植株根际土壤微环境健康,而且不利于植株抗性能力的提升;此外,单一的氮肥或饼肥处理,诱导了青枯菌属(*Ralstonia*)等病原细菌富集,并成为植株根系优势内生细菌属,不利于改良番茄植株根际土壤微环境和提高番茄植株抗性;25%氮肥和75%饼肥处理是改良番茄植株根际土壤微环境以及提高番茄植株抗性的最佳施用配比。

关键词 番茄;氮肥/花生饼肥;根际土壤;内生细菌;有机肥;细菌群落;植株抗性;减量施肥

中图分类号 S 641.206 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0141-11

番茄富含番茄红素,拥有强抗氧化功能,具有提高机体免疫、延缓衰老的作用;同时,番茄中富含苹果酸、柠檬酸和各种糖类,对调整胃肠功能、降低胆固醇以及减缓高血脂症状颇有益处^[1-2]。番茄是广西“南菜北运”和“西菜东调”的重要蔬菜品种之一。但随着其生产规模逐年扩大^[3],以及长期不科学地施肥,导致广西番茄产区土壤氮、磷、钾养分比例失衡,土壤酸化加剧,青枯病等土传病害频发,连作障碍发生严重^[4-5]。生产者为了保持和提高番茄产量,盲目地施用化肥与农药;其中,氮肥的过量施用问题尤其突出。据统计,我国部分蔬菜产地全年氮肥施用量高达1 732 kg/hm²,蔬菜施用的氮肥其一半的氮素直接挥发,并有5%~10%流失^[6]。过量施用氮肥不仅导致地表水富营养化,还会引起地下水硝酸盐污染^[7]。目前,如何提高我国蔬菜生产中的氮肥利用率,减量施用氮肥是蔬菜生产中的一个重要

研究方向。研究表明,科学合理地施肥不仅可以有效地提高土壤肥力,而且有助于维护土壤健康^[8];其中,有机肥和化肥配施不仅可以提高作物产量和品质,而且有助于增加土壤肥力、维护土壤健康^[9-10]。同时,土壤微生物对土壤理化性状的变化非常敏感,至今已被广大科技工作者用作反映土壤肥力状况及质量评价的生物学指标^[11]。根际土壤细菌作为根际微生态环境的重要组成部分,对土壤环境变化十分敏感,同时在植物根际土壤有机质的分解、氮的固定以及土壤养分转化过程中发挥着重要的作用^[12]。另一方面,植物内生细菌分布在植物各个部位,不仅具有种属多样性特征,而且具有固氮^[13-14]、解磷^[15]、产生植物生长调节物质^[16]、增强宿主抗性^[17]和生物修复^[18]等功能,对调节宿主体内的微生态平衡、增强抗逆性和促进宿主植物的健康生长发挥着重要作用^[19-20]。为此,本研究设置不施肥(A)、100%氮

收稿日期:2020-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(31860547);广西创新驱动发展专项(桂科AA17204039);广西科技重大专项(AA17204041)

庞师婵,E-mail:380621991@qq.com

通信作者:唐小付,E-mail:tang_xiaofu@163.com

肥(B)、75%氮肥/25%花生饼肥(C)、50%氮肥/50%花生饼肥(D)、25%氮肥/75%花生饼肥(E)及100%花生饼肥(F)共6组处理,基于高通量测序技术,分析番茄植株根际土壤及根系内生细菌多样性,旨在为番茄生产中科学施用氮肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料处理

“樱粉1号”番茄种子来自广西大学农学院;花

生饼肥购于南宁市农贸市场,含氮量为5.84%;氮肥(尿素)购置于光耀农资园艺,含氮量为46.4%。本试验于2018年9月至2019年12月在广西大学农学院蔬菜生产基地(东经108°18',北纬22°51.2')进行。试验根据番茄全生育期所需氮量约8 g^[21-22]进行施肥,按7:3的比例分基肥、追肥分2次施肥。基肥配施于番茄移栽前,追肥从第一花序肥大期开始进行,追肥时根据表1追肥量,撒施于植株根系周围后等量覆土;同时,不施肥处理亦做相同的等量覆土处理。试验设计见表1。

表 1 试验设计及施肥量

Table 1 Experimental design and fertilizer application

g

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer	追肥 Topdressing	总施氮量 Total nitrogen content
A:不施肥 No fertilizer application(F0)	0.00	0.00	0.00
B:100%氮肥 100% nitrogen fertilizer (N _{100%})	12.07/0.00	5.17/0.00	8.00
C:75%氮肥/25%花生饼肥 75% nitrogen and 25% peanut residue compost (N _{75%} ,PC _{25%})	9.05/23.97	3.88/10.27	8.00
D:50%氮肥/50%花生饼肥 50% nitrogen and 50% peanut residue compost (N _{50%} ,PC _{50%})	6.03/47.95	2.59/20.55	8.00
E:25%氮肥/75%花生饼肥 25% nitrogen and 75% peanut residue compost (N _{25%} ,PC _{75%})	3.02/71.92	1.29/30.82	8.00
F:100%花生饼肥 100% peanut residue compost(PC _{100%})	0.00/95.89	0.00/41.10	8.00

注:“/”前后数字分别表示施入氮肥和花生饼肥的用量。Note:Numbers before and after“/” show the application of nitrogen fertilizer and peanut residue compost amount.

定植土壤 pH 5.50,有机质含量 6.20 g/kg,全氮0.86 g/kg,全磷 0.54 g/kg,全钾 14.5 g/kg,碱解氮 57.3 mg/kg,速效磷 3.56 mg/kg,速效钾 80.6 mg/kg。试验期间除草灌溉、病虫害防治等管理措施按常规方法进行相同管理。

1.2 样品采集与分析方法

育苗至长出第3片真叶时移栽。番茄定植至果实成熟,进入采收期后随机取样。每个处理均随机取9株番茄根际土壤,混合3株土样为1个重复,即每个处理3个重复。采用抖根法^[23]采集各个施肥处理番茄根际土壤,装入无菌袋的后混匀。样品经孔径2 mm的筛网过筛后,装入无菌袋,用于分析土壤细菌群落结构。番茄根系经灭菌蒸馏水洗涤、沥干后,装入无菌袋,用于内生细菌分析。

根际土壤细菌及根系内生细菌群落结构分析由上海美吉生物医药科技有限公司使用 Miseq^[24]平台进行高通量测序。原始数据上传至 NCBI 数据库中比对。

1.3 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 统计软件对试验

数据进行统计分析,多重比较采用邓肯氏新复极差检验法(Duncan’s multiple ranger test,DMRT)。利用生物科技公司提供的云数据分析平台 I-sanger 进行 Alpha 多样性及物种组成 Venn 图分析。采用 Shannon 指数和 Simpson 指数表征番茄根际土壤细菌和根系内生细菌多样性,Chao1 指数指示细菌丰富度。

2 结果与分析

2.1 样本序列数据分析

由表2可知,与不施肥处理(A)相比,施肥处理均不同程度地改变了番茄植株根际土壤细菌和根系内生细菌不同分类水平数量;其中,氮肥与饼肥配施对根际土壤细菌和根系内生细菌不同分类水平的影响总体上呈提升效果;但单一的氮肥或饼肥处理,虽然提高了番茄植株根际土壤细菌不同分类水平数量,但整体上均导致根系内生细菌不同分类水平数量下降。

表 2 不同施肥处理番茄植株根际土壤和根系内生细菌的不同分类阶元归类数量

Table 2 Number of endophytic bacteria in rhizosphere soil and root of tomato under different fertilization treatments

来源 Source	处理 Treatment	门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species	分类操作单元 OTU
根际土壤细菌 Bacteria in rhizosphere soil	A	35	97	236	399	769	1 568	4 465
	B	34	95	234	402	779	1 595	4 602
	C	34	94	236	400	778	1 587	4 504
	D	34	97	239	411	790	1 623	4 692
	E	36	95	242	425	817	1 673	4 709
	F	37	99	237	415	789	1 571	4 268
根系内生细菌 Endophytic bacteria in root	A	16	27	72	132	227	316	409
	B	11	17	50	84	147	195	241
	C	18	30	85	162	271	391	529
	D	17	31	86	157	268	389	503
	E	17	26	73	130	213	293	368
	F	6	7	33	49	86	102	116

2.2 细菌多样性分析

与不施肥处理(A)相比,不同施肥处理对番茄植株根际土壤细菌多样性 Shannon 和 Simpson 指数无显著影响,但对丰富度 Chao1 指数的影响效果各异。单一的氮肥(B)和低比例的饼肥处理(C)具有降低番茄植株根际土壤细菌丰富度的趋势(表 3)。

另一方面,与不施肥处理(A)相比,单一的氮肥和饼肥处理(B 和 F)不仅导致番茄植株根系内生细菌多样性显著降低,而且还导致根系内生细菌丰富度显著降低;此外,氮肥与饼肥配施对番茄根系内生

细菌多样性和丰富度的影响效果依氮肥与饼肥的配比而异,提升效果最优的施肥处理为 75%的氮肥和 25%的饼肥配比,其次为氮肥和饼肥配比各占 50%的处理(D)(表 3)。

综上,施肥处理不仅影响番茄植株根际土壤细菌的多样性与丰富度,也对植株根系内生细菌的多样性与丰富度有重要影响;单一的化肥或饼肥施用导致番茄植株根际土壤或内生细菌多样性与丰富度降低,不利于番茄植株根际微环境土壤健康与植株抗逆(病)能力的提升。

表 3 不同施肥处理番茄植株根际土壤和根系内生细菌 Alpha 多样性指数

Table 3 Alpha diversity index of endophytic bacteria in rhizosphere soil and root of tomato under different fertilization treatments

来源 Source	处理 Treatment	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Chao1 指数 Chao1 index	覆盖率/% Coverage
根际土壤细菌 Bacteria in rhizosphere soil	A	4.89±0.04a	0.02±0.0006ab	721.28±14.69abc	99.56
	B	4.92±0.06a	0.02±0.0014ab	707.02±19.34bc	99.57
	C	4.91±0.09a	0.02±0.0017ab	684.63±37.11c	99.64
	D	4.93±0.05a	0.02±0.0025ab	708.06±11.16bc	99.61
	E	4.97±0.09a	0.01±0.002b	752.71±18.32a	99.55
	F	4.93±0.03a	0.02±0.0026a	732.42±14.82ab	99.50
根系内生细菌 Endophytic bacteria in root	A	2.42±1.42ab	0.21±0.18b	152.04±102.01ab	99.63
	B	0.68±0.51bc	0.79±0.18a	123.96±32.08ab	99.65
	C	3.43±0.38a	0.09±0.04b	229.75±25.52a	99.52
	D	2.75±1.29a	0.19±0.18b	205.8±125.43ab	99.52
	E	1.94±1.49abc	0.35±0.32b	133.22±88.77ab	99.66
	F	0.41±0.39c	0.82±0.22a	72.93±18.19b	99.74

2.3 细菌群落组成分析

1)细菌门分类水平。由图 1 可知,不同施肥处理番茄植株根际土壤中,细菌门分类水平组成的占比大于 1%的优势细菌主要由 10 个菌门组成,分别是变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、己科河菌门(Rokubacteria)、Patescibacteria 和硝化螺旋菌门(Nitrospirae),占比小

于 1.0%的非优势菌门的分类归属于其他(Other)门类。此外,虽然不同施肥处理番茄根际土壤中,优势细菌门分类组成相同,但不同施肥处理条件下,相同菌门分类占比表现各异,如:不施肥处理中,变形菌门(Proteobacteria)细菌的占比为 33.5%,单一的氮肥、饼肥和不同配比氮肥/饼肥处理中的占比分别为 19.47%、22.29%、21.29%、26.42%和 22.46%,不同施肥处理改变了番茄植株根际土壤中优势细菌门分类水平组成的占比(图 1)。

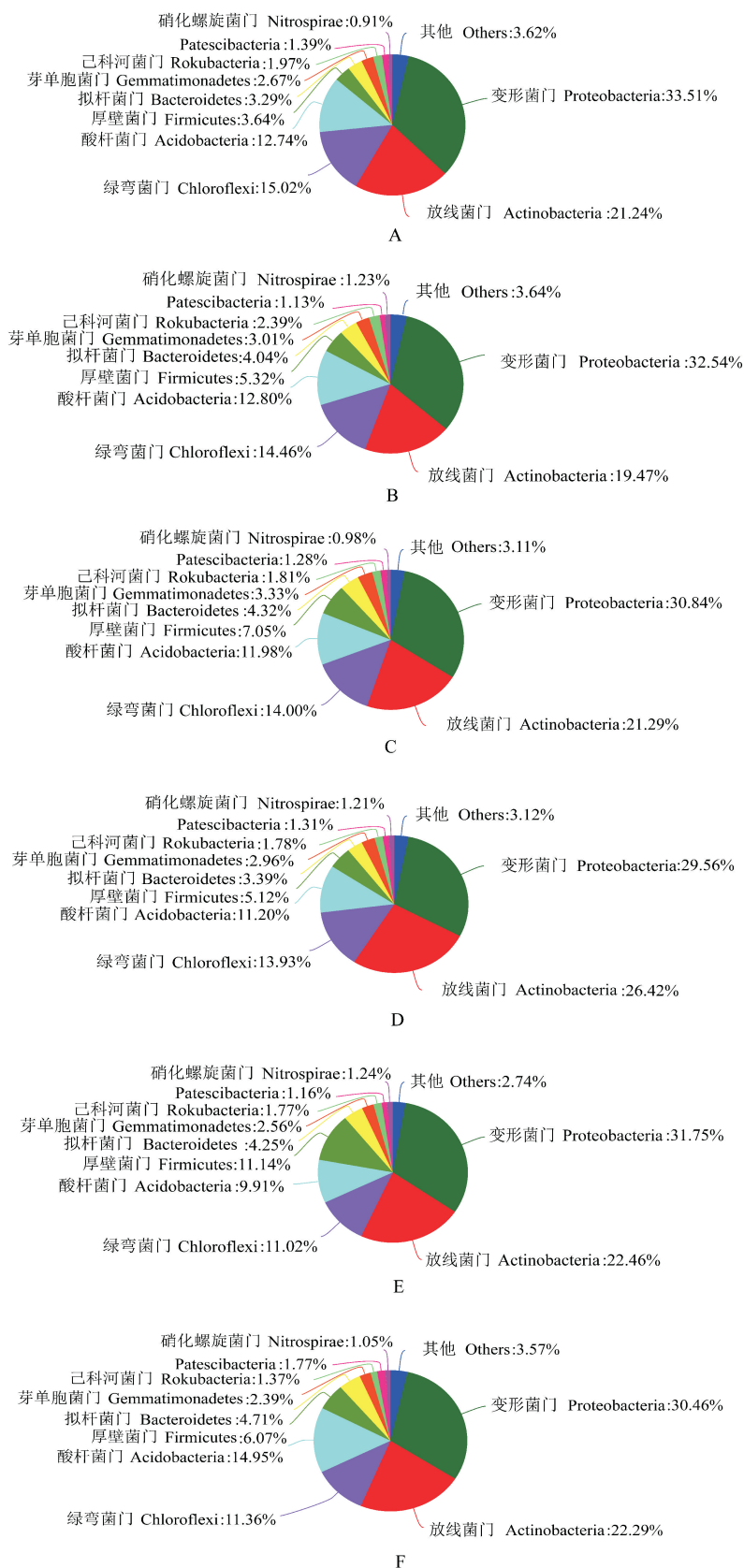


图 1 不同施肥处理下根际土壤细菌门分类水平组成分布

Fig.1 The distribution of soil bacterial community structure in rhizosphere at phylum level

同样地,不同施肥处理条件下,番茄植株根系内生细菌门分类水平主要由变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和厚壁菌门(Firmicutes)组成(图2)。

但不同施肥处理显著影响了番茄植株根系优势内生细菌门分类水平组成。其中,单一的氮肥处理,占比大于1%的根系优势内生细菌门分类组成由不施肥处理的4个优势菌门锐减至2个菌门,仅由变

形菌门(Proteobacteria)和放线菌门(Actinobacteria)组成;单一花生饼肥处理则仅剩变形菌门(Proteobacteria)1种优势菌门;氮肥/饼肥不同配比处理中,随着配比中氮肥比例降低、花生饼肥比例提高,番茄植株根系中,变形菌门(Proteobacteria)内生细菌的占比逐渐提高,放线菌门(Actinobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和厚壁菌门(Firmicutes)细菌占比逐步降低(图2)。

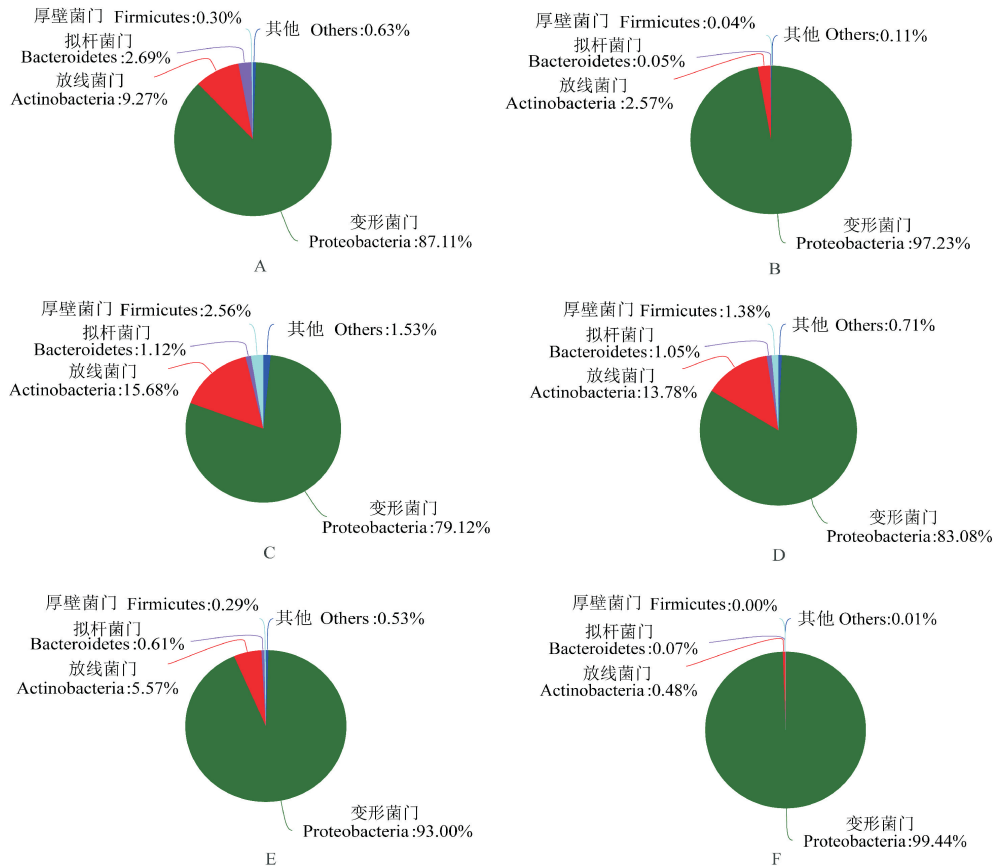


图2 不同施肥处理下根系内生细菌门分类水平结构分布

Fig.2 The distribution of endophytic bacterial community structure in root at phylum level

2)细菌属分类水平。由图3可知,不同施肥处理条件下,番茄植株根际土壤中的优势细菌属由norank_c__subgroup_6、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)等15个优势细菌属组成(表4)。其中,norank_c__subgroup_6、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、norank_o__Gaiellales、norank_f__Roseiflexaceae、黄色杆菌属(norank_f__Xanthobacteraceae)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、*Gaiella*等7个细菌属是不同施肥处理条件下番茄植株根际土壤中的共有优势细菌属。此外,norank_c__KD4-96是不施肥

处理番茄植株根际土壤中的特有优势细菌属;norank_f__JG30-KF-CM45是单一氮肥处理及氮肥高配比(75%)处理中的特有优势细菌属;微杆菌属(*Microbacterium*)细菌则是氮肥高配比(75%)和单一饼肥处理中的特有优势细菌属;RB41是单一饼肥处理的特有优势细菌属;而芽孢八叠球菌属(*Sporosarcina*)则是低氮素配比(25%)饼肥处理中的特有优势细菌属。结果表明:不同施肥处理不仅改变了番茄根际土壤中优势细菌属组成的占比,而且还改变了番茄根际土壤中的优势细菌属组成。

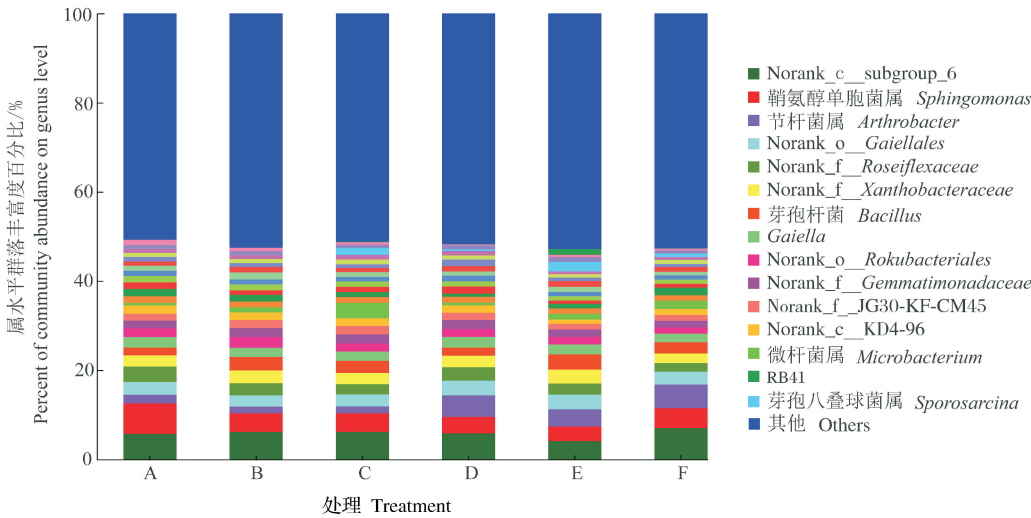


Fig.3 The distribution of soil bacterial community structure in rhizosphere at genus level

表 4 根际土壤优势细菌属分类水平的组成占比

Table 4 The proportion of dominant soil bacteria in rhizosphere at genus level

优势菌属 Dominant bacteria	A	B	C	D	E	F
Norank_c_subgroup_6	5.74	6.14	6.15	5.84	4.12	7.02
鞘氨醇单胞菌属 <i>Sphingomonas</i>	6.82	4.20	4.19	3.68	3.28	4.46
节杆菌属 <i>Arthrobacter</i>	1.93	—	—	4.82	3.82	5.31
Norank_o_Gaiellales	2.86	2.54	2.70	3.33	3.31	2.82
Norank_f_Roseiflexaceae	3.44	2.77	2.30	2.97	2.46	1.99
黄色杆菌属 Norank_f_Xanthobacteraceae	2.51	2.83	2.51	2.62	3.13	2.14
芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i>	1.79	3.01	2.73	1.83	3.40	2.48
<i>Gaiella</i>	2.31	2.06	2.09	2.35	2.21	1.93
Norank_o_Rokubacteriales	1.97	2.39	—	1.78	—	—
芽单胞菌属 Norank_f_Gemmatimonadaceae	—	2.01	2.01	1.96	2.51	—
Norank_f_JG30-KF-CM45	—	1.80	1.93	—	—	—
Norank_c_KD4-96	1.88	—	—	—	—	—
微杆菌属 <i>Microbacterium</i>	—	—	3.45	—	—	1.86
RB41	—	—	—	—	—	1.72
芽孢八叠球菌属 <i>Sporosarcina</i>	—	—	—	—	2.17	—

同样地,不同施肥处理不仅改变了番茄植株根 属组成(图 4)。系内生细菌优势菌属的占比,而且亦改变了优势菌

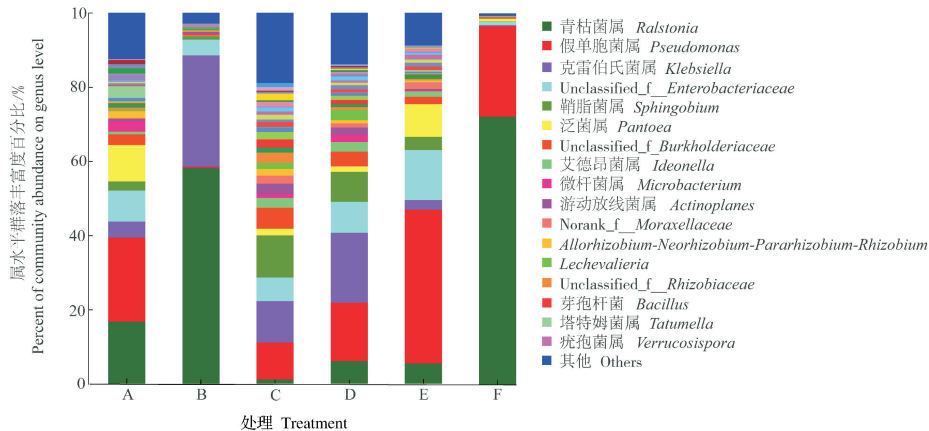


Fig.4 The distribution of endophytic bacterial community structure in root at genus level

与不施肥处理(A)相比,单一的氮肥处理导致假单胞菌属(*Pseudomonas*)、鞘脂菌属(*Sphingobium*)以及泛菌属(*Pantoea*)等 7 种优势菌属缺失;单一的饼肥处理(F)同样导致了克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)等 8 种优势菌属缺失;氮肥/饼肥配施处理虽然拥有与不施肥处理相同数量的优势内生菌属,但种类发生了明显变化。与不施肥处理相比,高氮肥(75%)/饼肥配比的处理(C)中,缺失了青枯菌属(*Ralstonia*)、泛菌属(*Pantoea*)、微杆菌属(*Microbacterium*)、*Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium*、塔特姆菌属(*Tatumella*)等优势细菌,但富集了艾德昂菌属(*Ideonella*)、游动放线菌属(*Actinoplanes*)、*norank_f__Moraxellaceae*、*unclassified_f__Rhizobiaceae*、芽孢杆菌属(*Bacillus*)等优势细菌属;50%氮肥和 50%饼肥配

比处理(D)中,则缺失了不施肥处理的泛菌属、*Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium* 和塔特姆菌属(*Tatumella*)细菌,但同样富集了艾德昂菌属(*Ideonella*)、游动放线菌属(*Actinoplanes*)和 *Lechevalieria* 属细菌;而 25%氮肥和 75%饼肥配比处理(E)中,缺失了不施肥处理中的微杆菌属(*Microbacterium*)、*Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium* 和塔特姆菌属(*Tatumella*)细菌,同时富集了艾德昂菌属(*Ideonella*)、*norank_f__Moraxellaceae* 和疣孢菌属(*Verrucosisspora*)细菌。综上,不同施肥处理同样改变了番茄植株根系内生细菌的群落结构,单一的氮肥或饼肥处理不仅不利于提高番茄植株根系内生细菌群落的多样性和丰富度,而且还导致部分优势内生细菌属缺失,从而降低了植株的抗性(表 5)。

表 5 根系优势内生细菌属分类水平的组成占比

Table 5 The proportion of dominant endophytic bacteria in root at genus level

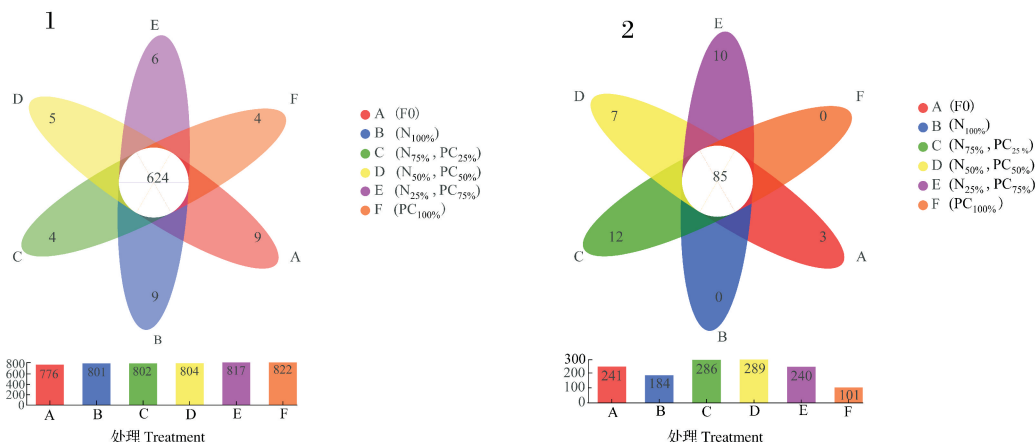
优势菌属 Dominant bacteria	A	B	C	D	E	F
青枯菌属 <i>Ralstonia</i>	16.76	58.17	—	6.14	5.55	72.23
假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i>	22.65	—	9.97	15.71	41.34	24.31
克雷伯氏菌属 <i>Klebsiella</i>	4.35	30.03	11.11	18.87	2.59	—
<i>Unclassified_f__Enterobacteriaceae</i>	8.28	4.25	6.38	8.33	13.51	—
鞘脂菌属 <i>Sphingobium</i>	2.48	—	11.37	8.06	3.56	—
泛菌属 <i>Pantoea</i>	9.82	—	—	—	8.80	—
<i>Unclassified_f__Burkholderiaceae</i>	2.87	—	5.69	4.01	1.98	—
艾德昂菌属 <i>Ideonella</i>	—	—	2.61	2.55	1.51	—
微杆菌属 <i>Microbacterium</i>	2.78	—	—	2.04	—	—
游动放线菌属 <i>Actinoplanes</i>	—	—	2.77	1.86	—	—
<i>Norank_f__Moraxellaceae</i>	—	—	2.13	—	1.83	—
<i>Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium</i>	1.81	—	—	—	—	—
<i>Lechevalieria</i>	—	—	—	2.79	—	—
<i>Unclassified_f__Rhizobiaceae</i>	—	—	2.78	—	—	—
芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i>	—	—	2.30	—	—	—
塔特姆菌属 <i>Tatumella</i>	3.18	—	—	—	—	—
疣孢菌属 <i>Verrucosisspora</i>	—	—	—	—	1.28	—

3) 属分类水平 Venn 图。单一的氮肥或饼肥处理以及不同氮肥/饼肥配比处理番茄植株根际土壤中,细菌属分类水平数量均高于相应的不施肥处理,但不同施肥处理无助于提高番茄植株根际土壤中的特有细菌属分类水平数量;与不施肥处理相比,仅单一施用氮肥处理特有细菌属数量与不施肥处理持平,均为 9 个,单一的饼肥处理以及不同氮肥/饼肥配比施肥均导致番茄植株根际土壤中特有的细菌属分类水平数量下降(图 5-1)。

另一方面,不同施肥处理亦改变了番茄植株根系内生细菌属分类水平数量。与不施肥处理相比,单一的氮肥和饼肥处理均导致了番茄植株根系内生细菌属分类水平数量的下降,分别由不施肥处理的 241 下降至 184 和 101,且缺乏特有的细菌属(图 5-2)。不同氮肥/饼肥配比施肥则有助于提高番茄植株根系内生细菌属分类水平数量,尤其以 50%氮肥和 50%饼肥配比的处理提升效果最佳;但随着饼肥比例的增加,至饼肥比例达 75%时,与不施肥处

理相比属分类水平数量基本一致。但氮肥/饼肥配施均不同程度地提高了番茄植株根系内生细菌特有的细菌属分类水平数量。研究结果表明:氮肥/饼肥配施不

仅有助于提高番茄植株根系内生细菌属分类水平数量,尤其有利于增加植株根系特有的内生细菌属数量,从而增强了植株抵御外界环境或病害胁迫的能力。



1.根际土壤细菌 Soil bacteria in rhizosphere; 2.根系内生细菌 Endophytic bacteria in root.

图 5 根际土壤细菌、根系内生细菌属分类水平 Venn 图

Fig.5 Venn diagram of the soil bacteria in rhizosphere and endophytic bacteria in root at genus level

3 讨论

土壤细菌作为土壤微生物群落中最大的类群,其占比高达 70%~90%,是承担维护土壤健康与土壤肥力以及促进植物吸收土壤养分的重要角色之一^[25]。植物内生细菌则是植物微生态系统的重要组成部分,其在植物不同器官分布数量存在差异。其中,根系内生细菌群落结构易受环境因素影响^[26]。

本研究中施肥处理不仅改变了番茄植株根际土壤细菌和根系内生细菌不同分类水平数量,而且氮肥/饼肥配施对根际土壤细菌和根系内生细菌不同分类水平的影响总体上呈提升效果;但单一的氮肥或饼肥处理,虽然提高了番茄植株根际土壤细菌不同分类水平数量,但整体上均导致根系内生细菌不同分类水平数量下降。这一结果与赵力光等^[27]和靳晓拓等^[28]研究化肥减量配施有机肥对土壤细菌多样性和丰富度影响的结果类似。

门分类水平上,变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、己科河菌门(Rokubacteria)、Patescibacteria 和硝化螺旋菌门(Nitrospirae)是不同施肥处理番茄植株根际土壤中的优势细菌门分类。但相同优

势细菌门分类占比在不同施肥处理中表现各异。这一结果表明,基于门分类水平,施肥处理对番茄植株根际土壤中的细菌群落结构并无显著影响,仅仅改变了根际土壤细菌群落组成的占比;与之相比,施肥处理则显著改变了番茄植株根系内生细菌群落组成,尤其单一的氮肥或饼肥处理,根系优势内生细菌群落组成由不施肥处理的 4 个优势细菌门类锐减至 2 个;但有机/无机(氮肥/饼肥)配施处理则没有发生单一化肥或有机肥处理相同的现象,仅发生优势细菌门类组成占比的变化。这一现象表明:单一的化肥或有机肥施用处理,容易引起番茄植株内生细菌群落结构失衡,存在导致植株抗性减弱的可能性。

属分类水平上,鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、*Gaiella*、*norank_c__subgroup_6*、*norank_o__Gaiel* 上 *lales*、*norank_f__Roseiflexaceae*、黄色杆菌属(*norank_f__Xanthobacteraceae*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)等 7 个细菌属是不同施肥处理条件下番茄植株根际土壤中的共有优势菌属,但不同施肥处理番茄植株根际土壤中,与不施肥处理相比,仅高比例的饼肥和单一的饼肥处理植株根际土壤中存在特有的优势细菌属:芽孢八叠球菌属(*Sporosarcina*)和 *RB41*;这一结果表明,施用有机肥更有助于富集土著细菌以外的细菌属,与化肥相比更有助于改变土壤细菌群落结构。另一方面,不同施肥处理亦改变了番茄植株根系内生细菌的群落结构;单一

的氮肥或饼肥处理不仅无助于提高番茄植株根系内生细菌群落的多样性和丰富度,而且导致部分优势内生细菌属缺失、青枯菌属细菌富集成为番茄植株内生细菌的优势菌属。已有研究证实青枯菌属(*Ralstonia*)中的茄劳尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*)是引起番茄青枯病的病原菌^[29],表明施用单一的氮肥或饼肥均不利于番茄植株根系内生细菌群落结构平衡,容易引起植株抗性降低甚至出现病害危害症状。与之相比,氮肥/饼肥配施则不同程度地富集了假单胞菌属(*Pseudomonas*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*)等有益细菌成为番茄植株根系的优势内生细菌属。

综上,施肥处理对番茄植株根际土壤细菌的多样性与丰富度有显著影响;与单一地施用氮肥或饼肥处理相比,氮肥/饼肥配施更有利于改良番茄植株根际土壤微环境,更有助于提高番茄植株的抗性;施用单一的氮肥或饼肥处理,不仅导致番茄植株根际土壤或内生细菌多样性与丰富度降低,而且还导致拟杆菌门(Bacteroidetes)厚壁菌门(Firmicutes)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、鞘脂菌属(*Sphingobium*)、泛菌属(*Pantoea*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)等根际土壤和根系内生细菌中,部分优势细菌门、属缺失,同时富集了青枯菌属等病原细菌。单一的氮肥和饼肥施用处理均不利于改良番茄植株根际土壤微环境和提高番茄植株抗性,25%氮肥和75%饼肥配比是改良番茄植株根际土壤微环境及提高植株抗性的最佳配比。

参考文献 References

- [1] 陈建平,陈曦,钟赛意,等. 番茄红素对人体血清自由基的清除作用[J]. 食品工业科技,2018,39(24):309-312,317. CHEN J P, CHEN C, ZHONG S Y, et al. Scavenging effect of lycopene on free radical of human serum[J]. Science and technology of food industry, 2018, 39(24): 309-312, 317 (in Chinese with English abstract).
- [2] 董蓬,刘春霖. 番茄红素对高血脂大鼠的降血脂作用研究[J]. 山东化工,2019,48(3):21,32. DONG P, LIU C L. Study on the hypolipidemic effect of lycopene on hyperlipidemia rats[J]. Shandong chemical industry, 2019, 48(3): 21, 32 (in Chinese).
- [3] 黄梅红. 番茄产业现状与发展建议——以广西田阳县为例[J]. 广西农学报,2016,31(3):76-81 HUANG M H. Current situation and development suggestions of tomato industry: a case study of Guangxi Tianyang[J]. Journal of Guangxi agriculture, 2016, 31(3): 76-81 (in Chinese).
- [4] 马文奇,毛达如,张福锁. 山东省蔬菜大棚养分积累状况[J]. 磷肥与复肥,2000,15(3):65-67. MA W Q, MAO D R, ZHANG F S. Nutrients accumulation within vegetable awning (green house) in Shandong Province[J]. Phosphate & compound fertilizer, 2000, 15(3): 65-67 (in Chinese with English abstract).
- [5] 葛晓光,张恩平,高慧,等. 长期施肥条件下菜田-蔬菜生态系统变化的研究(II)土壤理化性质的变化[J]. 园艺学报,2004,31(2):178-182. GE X G, ZHANG E P, GAO H, et al. Studies on changes of field-vegetable ecosystem under long-term fixed fertilizer experiment (II) changes of physical and chemical nature of vegetable soil[J]. Acta horticulturae sinica, 2004, 31(2): 178-182 (in Chinese with English abstract).
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO world agriculture: towards 2015/2030: summary report [R]. Rome: FAO's Publishing and Multimedia Service, 2002: 106.
- [7] 张晓楠,邱国玉. 化肥对我国水环境安全的影响及过量施用的成因分析[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(4):104-114. ZHANG X N, QIU G Y. Causes of excessive use of chemical fertilizer and its impacts on China's water environment security[J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2019, 17(4): 104-114 (in Chinese with English abstract).
- [8] 陈建国. 不合理施肥引起的稻田生态系统退化机理及其施肥修复效应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008. CHEN J G. Studies on mechanism of degradation of paddy field ecosystem due to unreasonable fertilization and it's restoring effects[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [9] 陶磊,褚贵新,刘涛,等. 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, et al. 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 with English abstract).
- [10] ZHAO J, NI T, LI J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. Appl Soil Ecol, 2016, 99: 1-12.
- [11] BOSSIO D A, FLECK J A, SCOW K M, et al. Alteration of soil microbial communities and water quality in restored wetlands [J]. Soil biology and biochemistry, 2006, 38(6): 1223-1233.
- [12] DEGENS B P, SCHIPPER L A, SPARLING G P, et al. Decreases in organic C reserves in soils can reduce the catabolic diversity of soil microbial communities[J]. Soil biology and biochemistry, 2000, 32(2): 189-196.
- [13] XU L H, ZENG X C, NIE Y, et al. Pontibacter diazotrophicus

- sp. nov., a novel nitrogen-fixing bacterium of the family cytophagaceae[J]. PLoS One, 2014, 9(3): 1-7.
- [14] ANDRADE L F, SOUZA GLOD, NIETSCH S, et al. Analysis of the abilities of endophytic bacteria associated with banana tree roots to promote plant growth. [J]. Journal of microbiology, 2014, 52(1): 27-34.
- [15] 胡倡, 李慧明, 伍惠, 等. 解磷菌和根瘤菌复合接种对大豆和紫云英共生固氮的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 38-45. HU C, LI H M, WU H, et al. Effects of co-inoculation of phosphate-solubilizing bacteria and rhizobium on symbiotic nitrogen fixation of soybean and *Astragalus sinensis*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 38-45 (in Chinese with English abstract).
- [16] SPAEPEN S, VANDERLEYDEN J, REMANS R. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling[J]. FEMS microbiology reviews, 2007, 31(4): 425-448.
- [17] BENHAMON N, KLOPPER J W, QUADT-HALLMAN A. Induction of defense-related ultrastructural modifications in pea root tissues inoculated with endophytic bacterial[J]. Plant physiology, 1996, 112(3): 919-929.
- [18] GERMAINE K J, LIU X M, CABELLOS G G, et al. Bacterial endophyte-enhanced phytoremediation of the organochlorine herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid[J]. FEMS microbiology ecology, 2010, 57: 302-310.
- [19] HALLMANN J, MAHAFFEE W F, KLOPPER J W, et al. Bacterial endophytes in agricultural crops[J]. Can J Microbiol, 1997, 43(10): 895-914.
- [20] 刘迎雪, 赵滢, 张宝香, 等. 植物内生细菌来源及生物学功能研究进展[J]. 特产研究, 2020, 42(4): 60-67. LIU Y X, ZHAO Y, ZHANG X B, et al. Research progress on the source and biological function of plant endophytic bacteria[J]. Special wild economic animal and plant research, 2020, 42(4): 60-67 (in Chinese with English abstract).
- [21] 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 J, REN F L, RE S L T. Absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by tomato and effect of fertilizer application[J]. Xinjiang agricultural sciences, 1990(3): 114-116 (in Chinese).
- [22] 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 L, HUANG Y N. Study on nutrient absorption of two tomato varieties in solar greenhouse[J]. China vegetables, 2005(4): 12-14 (in Chinese with English abstract).
- [23] RILEY D, BARBER S A. Salt accumulation at the soybean (*Glycine max*(L.) Merr.) root-soil interface[J]. Soil Society of America journal, 1970, 34(1): 154-155.
- [24] XU N, TANG C, WANG H Y, et al. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J]. European journal of soil biology, 2016, 74: 1-8.
- [25] 贾洪柏. 石油污染土壤的微生物修复及对相关土壤细菌群落多样性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013. JIA H B. Biodegradation of oil contaminated soil and the influence of biodegradation on soil bacterial community diversity[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [26] 喻江. 玉米和大豆根内生细菌多样性及促生细菌鉴定评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. YU J. Diversity of root endophytic bacteria and identification of promoting growth bacteria in corn and soybean[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [27] 赵力光, 唐兴莹, 汤利, 等. 化肥减量配施生物有机肥对植烟土壤微生物区系的影响及其与烤烟青枯病的关系[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2018, 33(4): 744-750. ZHAO L G, TANG X Y, TANG L, et al. Effects of bio-organic fertilizers combination with chemical fertilizer reduction on the soil microbial flora and its correlation of bacterial wilt of flue-cured tobacco[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (natural science edition), 2018, 33(4): 744-750 (in Chinese with English abstract).
- [28] 靳晓拓, 马继勇, 周彦好, 等. 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, et al. 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 with English abstract).
- [29] 黎起秦, 罗宽, 林纬, 等. 番茄青枯病内生拮抗细菌的筛选[J]. 植物病理学报, 2003(4): 364-367. LI Q Q, LUO K, LIN W, et al. Isolation of tomato endophytic antagonists against *Ralstonia solanacearum*[J]. Acta phytopathologica sinica, 2003(4): 364-367 (in Chinese with English abstract).

Effects of nitrogen/peanut residue compost on rhizosphere soil and endophytic bacterial community structure in root system of tomato

PANG Shichan¹, WANG Shuaishuai², ZHANG Wenjing¹, HUANG Ziyue¹,
QIN Renliu¹, XIAO Jian¹, TANG Xiaofu¹, YANG Shangdong¹

1.College of Agronomy/National Experimental Teaching Demonstration
Center of Plant Science, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2.Yulin Vegetable Industry Center, Shaanxi Province, Yulin 719000, China

Abstract Six treatments including no fertilizer application (A), 100% nitrogen fertilizer application (B), 75% nitrogen and 25% peanut residue compost application (C), 50% nitrogen and 50% peanut residue compost application (D), 25% nitrogen and 75% peanut residue compost application (E), and 100% peanut residue compost application (F) were set. The endophytic bacterial diversity in rhizosphere soil and root system of tomato was analyzed with high-throughput sequencing. The effects of different ratios of nitrogen/peanut residue compost on rhizosphere soil and endophytic bacterial community structure in root system of tomato were studied to provide a theoretical basis for the balanced fertilization of tomato. The results showed that the composition of dominant soil bacteria at phylum level in rhizosphere was not changed, but their ratios were altered by application different fertilizers. The amount of dominant endophytic bacteria at phylum level in root of tomato was all decreased by only applying single nitrogen or peanut residue compost. At genus level, the composition and ratios of soil bacteria in rhizosphere and endophytic bacteria in root were altered by application of different fertilizers as well. Some dominant bacteria including *Pseudomonas*, *Sphingobium*, *Pantoea* and *Klebsiella* were disappeared under the treatment B or F, indicating that single application of nitrogen or peanut residue compost is not helpful to build a healthy rhizosphere soil microenvironment of tomato and improve plant resistance. Some pathogenic bacteria including *Ralstonia* were enriched as dominant endophytic bacteria in roots of tomatoes under single nitrogen or peanut residue compost treatment, indicating that soil health in rhizosphere and crop resilience is not improved by single application of nitrogen or peanut residue compost. 25% nitrogen and 75% peanut residue compost are the best combination for improving soil health in rhizosphere and crop resilience among the 6 treatments.

Keywords tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill); nitrogen/peanut residue compost; rhizosphere; endophytic bacteria; organic fertilizer; bacterial community; plant resistance; reduced fertilization

(责任编辑: 张志钰)