

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.05.010

杨天杰, 王玉鑫, 王佳宁, 等. 不同基质生物有机肥防控番茄土传青枯病及促生效果研究. 土壤, 2021, 53(5): 961–968.

不同基质生物有机肥防控番茄土传青枯病及促生效果研究^①

杨天杰, 王玉鑫, 王佳宁, 韦 中, 董彩霞, 沈其荣, 徐阳春*

(南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省固体有机废弃物资源化高新技术研究重点实验室/江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心/资源节约型肥料教育部工程研究中心/国家有机类肥料工程技术研究中心, 南京 210095)

摘 要: 利用功能菌株解淀粉芽孢杆菌配合不同原料的有机肥制备不同生物有机肥, 研究其防控番茄土传青枯病以及促生的效果, 并考察土壤养分及根际细菌群落的响应, 以获得能够有效防控番茄青枯病的生物有机肥。本研究以解淀粉芽孢杆菌 T-5 为功能菌株, 分别配合秸秆有机肥及鸡粪有机肥, 经二次发酵分别制得秸秆生物有机肥(BIO1)和鸡粪生物有机肥(BIO2), 并于江苏省南京市一处青枯病多发的番茄大棚进行试验。结果表明: 两种生物有机肥均能显著降低番茄土传青枯病的发病率, 且 BIO1 处理的防控效果最佳, 使发病率降低了 94.45%; 两种生物有机肥均能显著促进番茄生长, 增加番茄地上部生物量并提高产量, 但对于番茄果实品质并无显著提升; BIO1 处理可显著增加土壤有机质含量, BIO2 处理则显著提高土壤 pH; 土壤有机质含量与番茄发病率呈负相关, 与番茄地上部生物量和产量呈显著正相关关系; 基于高通量测序结果, 发现生物有机肥可显著提高根际细菌多样性, 同时改变细菌群落结构; 防控效果最好的 BIO1 处理中, 变形菌门相对丰度最高, 放线菌门相对丰度最低, 土壤硝态氮和 pH 与这两个门水平的细菌类群具有显著相关性。可见, 以解淀粉芽孢杆菌为功能菌株、秸秆为原料制备的秸秆生物有机肥可有效防控番茄土传青枯病, 效果优于鸡粪生物有机肥。该生物有机肥还可显著促进番茄生长及产量提升, 并通过调控根际细菌群落中变形菌门和放线菌门的相对丰度, 提高土壤抑病能力, 减少土传青枯病的发生。

关键词: 番茄; 生物防控; 土传青枯病; 生物有机肥

中图分类号: S144.1 **文献标志码:** A

Effects of Different Bioorganic Fertilizers on Tomato Bacterial Wilt and Plant Growth Promotion

YANG Tianjie, WANG Yuxin, WANG Jianing, WEI Zhong, DONG Caixia, SHEN Qirong, XU Yangchun*

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University/Jiangsu Provincial Key Lab of Organic Solid Waste Utilization/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Waste Resource Utilization/Educational Ministry Engineering Center of Resource-saving Fertilizers/National Engineering Research Center for Organic-based Fertilizers, Nanjing 210095, China)

Abstract: Using the functional strain *Bacillus amyloliquefaciens* combined with organic fertilizers of different raw materials to prepare different bio-organic fertilizers, the prevention and control of soil-borne bacterial wilt and the promotion of tomato growth, as well as the response of soil nutrients and rhizosphere bacteria to the different bioorganic fertilizers were investigated, to obtain a kind of bioorganic fertilizer that can effectively prevent and control tomato bacterial wilt. *B. amyloliquefaciens* T-5 was used as a functional strain and was combined with straw organic fertilizer and chicken manure organic fertilizer, the straw bio-organic fertilizer (BIO1) and chicken manure bio-organic fertilizer (BIO2) were prepared through secondary fermentation, then an experiment was conducted in a tomato greenhouse where bacterial wilt is common in Nanjing City of Jiangsu Province. The results showed that both bioorganic fertilizers significantly reduced the incidence of tomato soil-borne bacterial wilt, and the BIO1 had the best prevention and control effect, reducing the incidence by 94.45%. Both bioorganic fertilizers significantly promoted the growth of tomato, increased the biomass of the above ground and the yield of tomato, but did not significantly improve the quality of tomato fruit. In addition, BIO1 significantly increased soil organic matter content, while BIO2 significantly

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800205)和江苏省自然科学基金项目(BK20180527)资助。

* 通讯作者(ycxu@njau.edu.cn)

作者简介: 杨天杰(1990—), 女, 江苏南京人, 博士, 讲师, 主要从事有机肥与土壤微生物研究。E-mail: tjyang@njau.edu.cn

increased soil pH. Soil organic matter had a negative correlation with tomato disease rate and a significant positive correlation with tomato aboveground biomass and yield. High-throughput sequencing analysis found that bioorganic fertilizer significantly increased the bacterial diversity of the rhizosphere meanwhile changed the bacterial community structure. BIO1 had the highest relative abundance of Proteobacteria and lowest relative abundance of Actinomycota. Soil nitrate nitrogen and pH had a significant impact on bacterial communities at the two levels. In conclusion, the straw bio-organic fertilizer prepared with *B. amyloliquefaciens* as the functional strain and straw as the raw material effectively could prevent and control tomato soil-borne bacterial wilt, and has better effect than chicken manure bio-organic fertilizer. The bioorganic fertilizer could also significantly promote the growth and yield of tomato, improve soil disease suppression and reduce the occurrence of soil-borne bacterial wilt by regulating the relative abundance of the *Proteobacteria* and *Actinomycetes* in the rhizosphere bacterial community.

Key words: Tomato; Biocontrol; Bacterial wilt; Bio-organic fertilizer

近年来,我国大力发展集约化种植,不仅施用了大量化肥,而且连续多年种植单一作物^[1]。这种不合理的生产方式造成了土壤酸化、土壤有机质降低和土壤微生物群落严重失衡,致使作物出现严重的连作障碍,产量急剧下降,给农业经济带来了巨大损失^[2-3]。以土传青枯病为例,该土传病害是由茄科劳尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*)引起的细菌性土传病害^[4],其传播范围广、易存活,可侵染番茄、辣椒、烟草等 200 多种作物^[5],严重影响着我国茄科作物的产业发展。施用农药和熏蒸等传统方法虽然可在短时间内快速杀灭土传病原菌,但同时也会降低土壤微生物群落多样性,无法长期、有效地应对土传病害的再次爆发^[6]。因此,绿色可持续的防控措施越来越受到人们重视,如施用生物有机肥的生物防控。生物有机肥是将有机肥料与功能微生物相结合制得的一种新型肥料,不仅能够培肥土壤,促进作物生长,其中的功能菌还能够抑制土传病原菌的生长^[7-8]。

但有机肥会因堆肥原料的不同,导致不同原料堆制的有机肥养分含量差异显著。因此施用不同有机肥可能会影响土壤的肥力性状,如豆粕有机肥因含氮量较多,可有效提升土壤碱解氮和全氮含量,鸡粪有机肥对速效磷提升效果较好^[9];秸秆有机肥可促进土壤有机碳的增加^[10]。肥料的养分也有可能影响与其配伍的功能微生物发挥其在田间的功能,如有机肥发酵原料中含有较多氨基酸等含氮化合物,可促进功能菌解淀粉芽孢杆菌的增殖^[11]。但尚未有研究表明不同原料的有机肥与功能菌配伍是否会影响作物的生长以及土传病害的防控。因此,本试验将以番茄土传青枯病为研究对象,研究以两种原料制备的生物有机肥对田间番茄的促生以及青枯病防控效果,探究土壤各理化因子与番茄促生及发病率的相关性,最终,结合不同生物有机肥对田间番茄土壤微生物群落的影响,确定更适于番茄生长且防控土传青枯病的生物有机

肥类型。本研究有助于为选择适合功能菌株发酵的有机载体提供理论依据,并为选择合适的生物有机肥进行番茄土传青枯病防控提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试菌株和番茄品种 供试菌株为解淀粉芽孢杆菌 T-5(*Bacillus amyloliquefaciens*),该功能菌株有较强的防控土传青枯病和促进番茄生长的效果^[12];供试番茄品种为 GBS-极品 903。

1.1.2 供试基质生物有机肥的制备 使用秸秆有机肥和鸡粪有机肥与功能菌解淀粉芽孢杆菌 T-5 分别进行基质生物有机肥的制备。秸秆有机肥由南京明珠肥料有限责任公司生产,鸡粪有机肥由南通尔康生物有机肥有限公司生产。

秸秆基质生物有机肥与鸡粪基质生物有机肥由解淀粉芽孢杆菌 T-5 分别与秸秆有机肥和鸡粪有机肥经二次发酵制成,具体过程如下:将解淀粉芽孢杆菌 T-5 菌悬液(1×10^9 cfu/ml)按 50 ml/kg 接种至秸秆或鸡粪有机肥中,堆置混合发酵 5 d,发酵过程中每天定时翻堆 1 次,保持通气并维持湿度在 60%~65% 范围内。二次发酵完成后,肥料中解淀粉芽孢杆菌含量达到 1×10^8 cfu/g 以上,分别获得秸秆基质生物有机肥(BIO1)和鸡粪基质生物有机肥(BIO2)。两种生物有机肥理化性质如表 1 所示。

1.1.3 试验地点 田间试验地点为南京市江宁区麒麟镇后村(118°57'E, 32°03'N),该地连作番茄多年,番茄土传青枯病频发。土壤为黄棕壤,土壤基本理化性质如下:有机质含量 32.88 g/kg,全氮含量 1.27 g/kg,有效磷含量为 145.63 mg/kg,速效钾含量为 220.15 mg/kg,土壤 pH 为 6.23。

1.2 试验设计

试验设置 4 个处理,具体如下:农户习惯施肥

表 1 各肥料化学性质
Table 1 Chemical properties of fertilizers in this study

编号	肥料名称	pH	全碳(g/kg)	全氮(g/kg)	全钾(K ₂ O, g/kg)	全磷(P ₂ O ₅ , g/kg)
1	秸秆生物有机肥(BIO1)	7.06	126.48	9.52	43.32	36.49
2	鸡粪生物有机肥(BIO2)	8.76	244.64	16.61	53.22	45.74

(CF)、秸秆基质生物有机肥(BIO1)、鸡粪基质生物有机肥(BIO2)、不施肥(CK)。农户习惯施肥用量和时间为: 复合肥(13-7-21)在 2 月上旬作为基肥施入, 施肥量为 1 000 kg/hm²; 在 3 月下旬使用复合肥(10-6-32)进行追肥一次, 施肥量为 500 kg/hm²。生物有机肥处理将生物有机肥作为基肥施入(200 g/株)。基肥均在番茄移栽前以撒施形式施入土壤, 覆土拌匀后将番茄移栽至土壤中。试验地其他田间管理均保持一致。每个处理 3 个重复(3 个小区), 共计 12 个小区, 采用随机区组排列。每个小区面积 12 m², 每小区种植 48 株苗。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 田间番茄生物量的测定及土样采集 于番茄收获期采集番茄植株样品, 测定番茄株高、茎粗、地上部鲜干物质量, 番茄株高和茎粗分别用卷尺和游标卡尺测定。各小区随机选择 4 株健康番茄测定植株地上部生物量并获取根际土。轻摇番茄根掉落下的土壤为土体土, 一部分放入 4℃冰箱待测土壤铵态氮和硝态氮, 另一部分风干用于测定土壤理化性质。植物根系放入锥形瓶中, 经超声波震荡, 分离下来的土壤为根际土壤, 存于 -80℃冰箱待用。

1.3.2 番茄产量和品质的测定 从番茄始果期开始每 4 d 采集各小区番茄果实, 第 5 次采摘全部剩余番茄果实, 计算 5 次各小区番茄质量总和, 即为各小区番茄总产量。

每个小区取 3 个成熟番茄, 环切番茄取得番茄果实样品, 测定果实中可溶性固形物、可滴定酸和维生素 C 的含量。可溶性固形物采用手持折光仪测定^[13]; 可滴定酸采用酸碱滴定法测定^[14]; 维生素 C 采用 2,6-二氯酚法测定^[15]。糖酸比为可溶性固形物与可滴定酸含量的比值。

1.3.3 青枯病发病情况的统计 移栽 72 d 后番茄开始发病, 每 5 d 记录 1 次发病情况直至病情稳定。选取最后一次记录表征番茄发病率。发病率计算公式: 发病率(%)=小区发病植株数/小区总植株数×100。根据青枯病发病开始到病情稳定时期的发病趋势计算病程线下面积^[16], 表征番茄青枯病的严重程度。

1.3.4 土壤样品理化性状测定 测定指标包括土壤 pH、铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾、有机质。

其中土壤 pH 采用酸度计法($V_{水}:m_{土}=5:1$)测定; 土壤铵态氮、硝态氮采用流动分析仪测定^[14]; 其他土壤化学性质测定参考《土壤农化分析》^[17]。

1.3.5 根际土 DNA 提取及高通量测序 称取 0.3 g 番茄根际土, 采用 PowerSoil 土壤 DNA 提取试剂盒(MoBio, Carlsbad, CA, USA)提取土壤 DNA。详细的操作步骤按 DNA 提取试剂盒说明书进行, 提取后的 DNA 用 Nanodrop(ND2000, Thermo Scientific, DE, USA)检测浓度, 并于 -20℃保存备用。土壤微生物群落高通量测序使用细菌 16S rRNA(V4 区)通用引物(515F 5'-GTGCCAGCMGCCGCGG-3' 和 806R 5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')进行测序。

1.3.6 数据统计与分析 试验数据采用 Microsoft Excel 2016、IBM SPSS Statistics 25 和 R(3.6.3)进行处理与分析, 采用 ANOVA 单因素方差分析法进行方差分析, 邓肯(Duncan)多重检验法检验处理间的差异显著性($P \leq 0.05$), 利用 Spearman 相关系数来研究变量间的相关性。土壤微生物高通量测序数据利用 R(3.6.3)中 vegan 包进行多样性和冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同生物有机肥对土传青枯病发病率的影响

如图 1A 所示, 与不施肥对照(CK)和常规施肥(CF)处理相比, 施用秸秆生物有机肥(BIO1)和鸡粪生物有机肥(BIO2)均可显著降低番茄青枯病的发病率。但两种生物有机肥处理对降低番茄青枯病发病率的能力不同, BIO1 处理下青枯病发病率最低(2.08%), 与 CF 处理相比可降低 94.45% 的发病率; BIO2 处理下番茄青枯病的发病率为 20.14%。

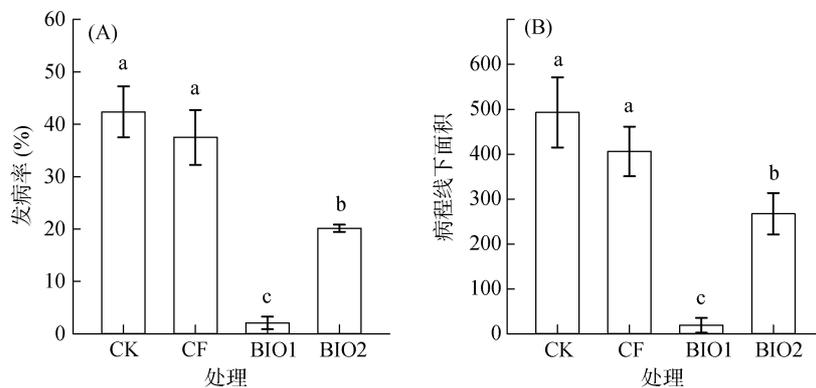
不同施肥处理的病程线下面积与发病率表现出同样的趋势(图 1B)。BIO1 和 BIO2 处理均可显著减轻番茄青枯病的发病程度, 其中 BIO1 处理的番茄发病程度最低, 比 CK 处理的发病率减少了 96.13%, 比 CF 处理减少了 95.30%。

2.2 不同生物有机肥对番茄植株生长的影响

如图 2 所示, 与 CF 处理相比, 两种生物有机肥均能显著促进番茄地上部的生长, 但效果略有差异。具体而言, BIO1 和 BIO2 处理对番茄株高、地上部干鲜物质量的促进作用并无显著差异($P > 0.05$), 图

2A、2C 和 2D), 而对茎粗的促进作用具有显著差异, BIO2 处理的番茄茎粗比 BIO1 处理提高了 3.9%(图

2B); 与 CF 处理相比, BIO1 处理可增加 14.55% 茎粗, BIO2 处理可增加 19.09% 茎粗。



(柱图上方不同小写字母代表处理间差异达显著水平($P < 0.05$), 下同)

图 1 不同生物有机肥对土传青枯病发病的影响

Fig. 1 Effects of different bio-organic fertilizers on soil-borne bacterial wilt

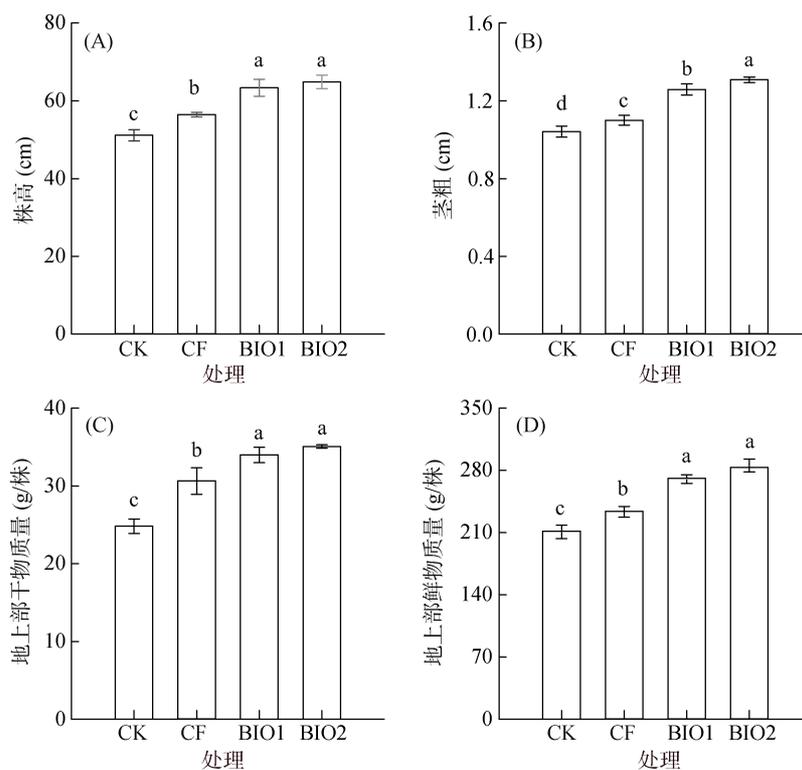


图 2 不同生物有机肥施用对番茄株高、茎粗及地上部干鲜物质质量的影响

Fig. 2 Effects of different biological organic fertilizers on tomato plant growth

2.3 不同生物有机肥对番茄产量及果实品质的影响

如图 3 所示, 两种生物有机肥对番茄产量和果实品质均有不同的影响。与 CF 处理相比, 施用两种生物有机肥均可显著提高番茄的产量。BIO1 处理的番茄产量最高, 达 $4\,306.29\text{ kg}/667\text{ m}^2$, 与 CF 处理相比增产 55.80%; 但 BIO1 与 BIO2 处理间番茄产量并无显著差异(图 3A)。

与 CF 处理相比, 施用两种生物有机肥对番茄果实中维生素 C、可溶性固形物、可滴定酸含量及糖酸比均无显著影响(图 3B ~ 3E)。与 CK 处理相比, BIO1 处理可显著提高番茄果实维生素 C 含量和糖酸比(图 3B 和 3E), 可显著降低可滴定酸度(图 3D), 显著提高糖酸比(图 3E)。

2.4 不同生物有机肥对土壤理化性质的影响

不同基质生物有机肥处理后土体土的理化性

质检测结果如表 2 所示。总体而言，两种基质生物有机肥处理均可提高土壤有机质含量。与 CF 处理相比，BIO1 处理可显著提升土壤有机质含量，但 BIO2 处理则无显著影响，两种生物有机肥处理间也无显著差异。与 CF 处理相比，施用生物有机肥

后，土壤 pH 均呈上升的趋势，其中，BIO2 处理的土壤 pH 显著升高，但 BIO1 处理无显著影响(图 4A)。此外，与 CF 处理相比，两种生物有机肥处理后对土壤硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾的含量无显著影响。

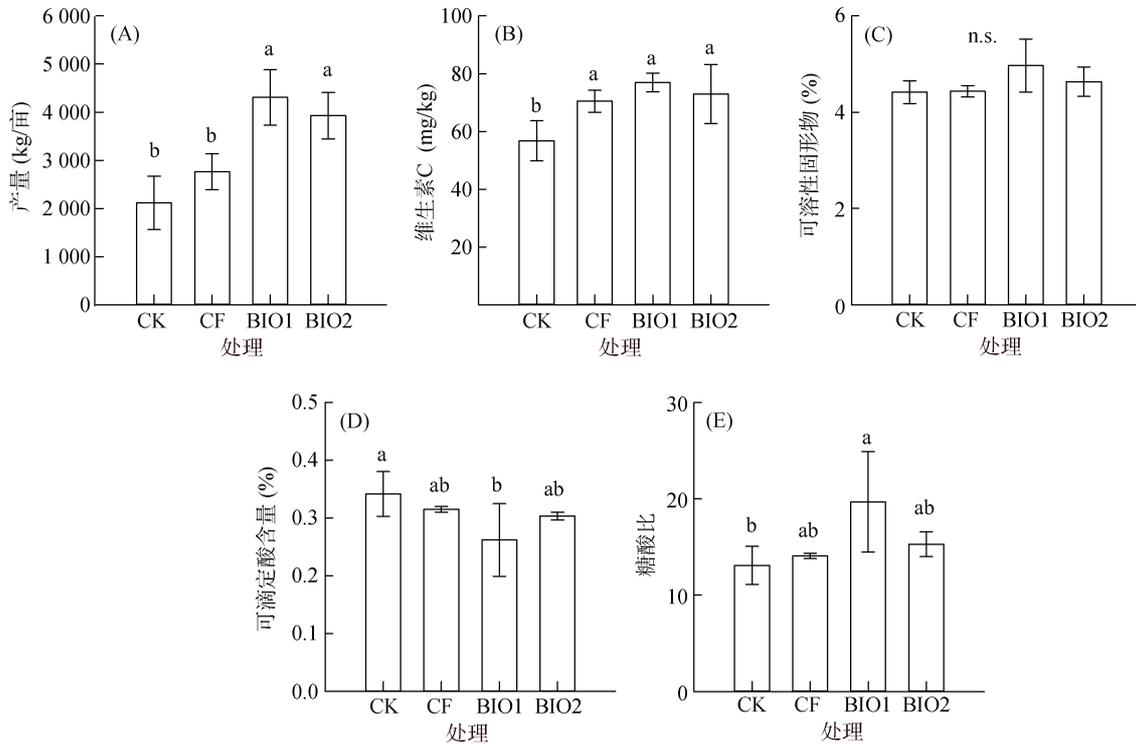


图 3 不同生物有机肥施用对番茄产量和果实品质的影响
Fig. 3 Effects of different biological organic fertilizers on tomato quality

表 2 不同生物有机肥施用对土壤化学属性的影响
Table 2 Effects of different biological organic fertilizers on chemical properties of soil

施肥处理	土壤 pH	硝态氮(mg/kg)	铵态氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有机质(g/kg)
CK	6.66 ± 0.14 ab	81.94 ± 9.91 b	10.07 ± 5.43 a	167.80 ± 9.24 a	260.83 ± 15.6 b	29.98 ± 0.22 c
CF	6.34 ± 0.12 c	179.99 ± 26.36 a	5.77 ± 1.24 a	160.35 ± 22.07 a	383.72 ± 66.58 ab	26.34 ± 3.43 bc
BIO1	6.49 ± 0.07 bc	154.35 ± 28.47 ab	4.52 ± 1.19 a	196.17 ± 22.07 a	375.03 ± 52.7 ab	40.43 ± 5.60 a
BIO2	6.76 ± 0.08 a	185.39 ± 69.45 a	5.88 ± 1.36 a	201.81 ± 42.1 a	448.18 ± 104.74 a	36.54 ± 2.3 ab

注：表中同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)

2.5 土壤化学性质与番茄发病和促生的相关性

通过分析土壤各化学因子与番茄发病率、生长、产量与果实品质的相关性，探究对番茄发病和促生具有显著影响的土壤化学因子，结果(表 3)表明，土壤有机质含量与番茄的发病率、株高、茎粗、地上部鲜物质量和产量呈显著正相关关系，说明土壤有机质含量的增加有利于减轻番茄土传病害的发生，并促进番茄生长和产量增加。此外，土壤硝态氮和速效钾含量与番茄地上部干物质量具有显著正相关关系，说明土壤硝态氮和速效钾含量的提高有助于增加番茄整体生物

量；土壤中铵态氮含量则与番茄产量具有显著负相关关系。土壤各理化因子与番茄果实品质均无相关性。

2.6 不同生物有机肥对根际细菌群落的影响

对各处理番茄根际土的细菌群落进行扩增子测序，分析不同施肥处理对番茄根际细菌群落的影响，结果如图 4 所示。施用化肥(常规施肥，CF)会降低根际细菌群落的 α-多样性，即 Chao1 指数，而施用生物有机肥(BIO1 和 BIO2)可显著提高根际细菌群落的 α-多样性，但与 CK 处理无显著差异(图 4A)。β-多样性分析结果表明，施用肥料后，根际细菌群落结构显

表 3 土壤化学属性与番茄发病率、生长、产量与果实品质的相关性

Table 3 Correlations between chemical properties of soil and disease incidence, plant growth, yield and fruit quality of tomato

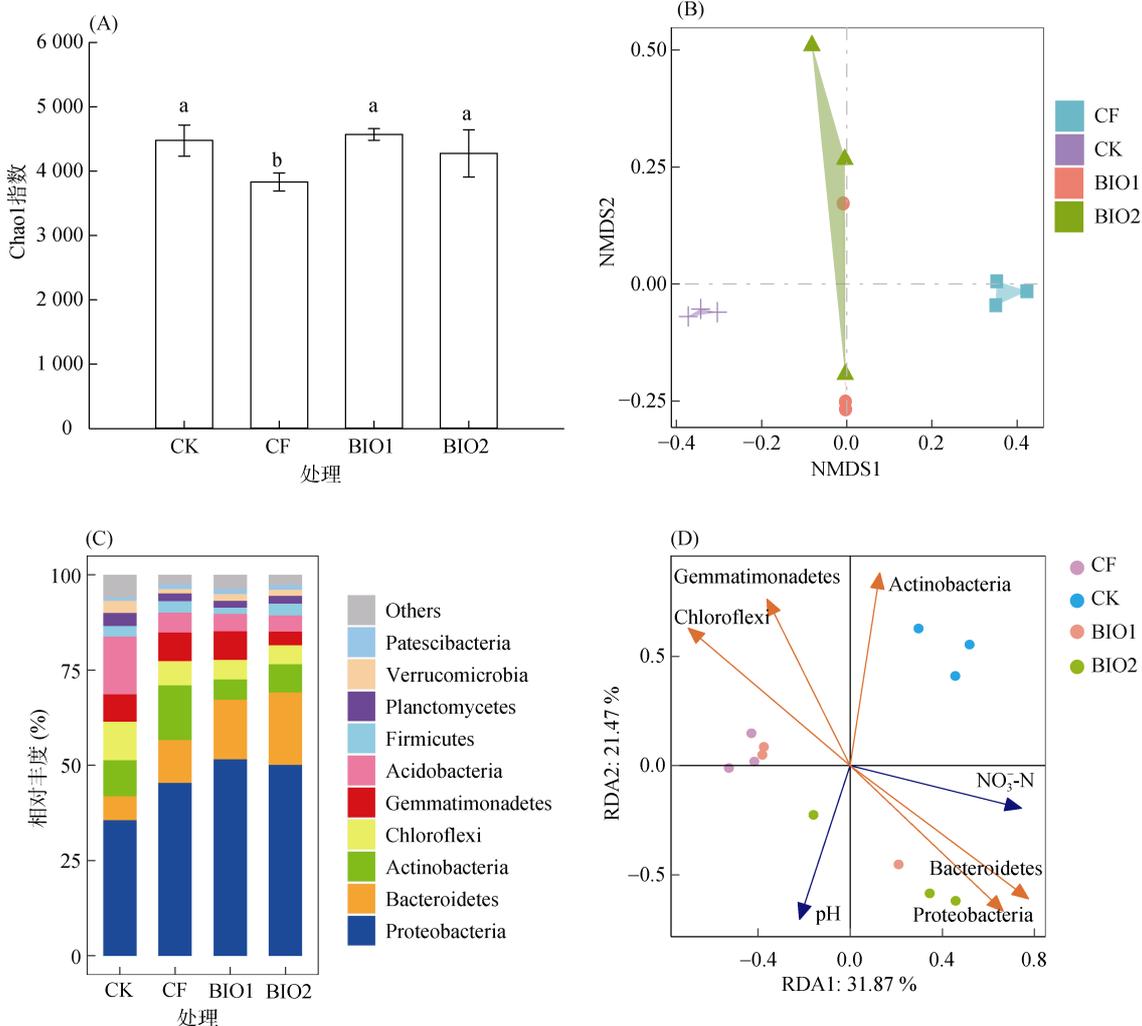
土壤理化	发病率	番茄生长				产量	果实品质			
		株高	茎粗	地上部鲜物质质量	地上部干物质质量		可滴定酸	糖酸比	可溶性固形物	维生素 C
土壤 pH	-0.038	0.201	0.267	0.245	0.063	-0.010	0.182	-0.175	-0.058	-0.221
硝态氮	-0.251	0.528	0.505	0.540	0.584*	0.368	-0.306	0.357	0.520	0.489
铵态氮	0.574	-0.492	-0.441	-0.539	-0.573	-0.679*	0.212	-0.262	-0.207	-0.360
速效磷	-0.362	0.449	0.564	0.449	0.342	0.308	-0.512	0.488	0.405	0.059
速效钾	-0.284	0.486	0.544	0.485	0.598*	0.365	-0.186	0.197	0.339	0.436
有机质	-0.678*	0.688*	0.728**	0.646*	0.474	0.594*	-0.573	0.519	0.309	0.304

注: *表示在 $P < 0.05$ 水平相关性显著(双尾), **表示在 $P < 0.01$ 水平相关性显著(双尾)。

著改变, 其中施用生物有机肥(BIO1 和 BIO2)均可显著改变根际细菌群落的 β -多样性(Stress = 0.06, 图 4B)。

进一步考察不同生物有机肥处理对根际不同种类细菌相对丰度的影响发现, 不同施肥处理下细菌 OTU 主要属于 10 个门, 细菌在门水平上的相对丰度存在差异。与 CF 处理相比, BIO1 和 BIO2 处理可提

高变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)的丰度, 但降低了放线菌门(Actinobacteria)和酸杆菌门(Acidobacteria)的丰度(图 4C)。值得一提的是, 与 BIO2 处理相比, BIO1 处理的变形菌门相对丰度最高, 放线菌门相对丰度最低, 但芽孢杆菌属(*Bacillus* spp.)的相对丰度无显著差异($P > 0.05$)。



(图 D 中蓝色箭头代表显著影响根际细菌群落的土壤化学因子($P < 0.05$), 红色箭头代表门水平根际细菌)

图 4 不同生物有机肥施用对细菌群落结构的影响及土壤化学属性与细菌群落多样性的关系

Fig. 4 Effects of different biological fertilizers on bacterial community structure RDA ordination summarizing correlations between soil chemical properties and bacterial community composition

2.7 土壤理化性质对根际细菌群落的影响

为了考察土壤理化因子对根际细菌群落的影响,进行了土壤化学参数和各施肥处理下根际细菌群落构成的相关性分析,结果如图4D所示。冗余分析结果表明,土壤硝态氮和pH是显著影响根际细菌群落的两个主导因子(硝态氮: $F=3.02$, $P=0.003$; pH: $F=2.18$, $P=0.034$),其中土壤硝态氮的影响最显著。土壤硝态氮和pH与变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)呈正相关关系,与放线菌门(Actinobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)和绿弯菌门(Chloroflexi)呈负相关关系。

3 讨论

大量研究表明,施用生物有机肥可降低作物土传病害的发病率、促进作物生长,并提高果实品质^[18-19]。本研究也发现,施用生物有机肥可显著降低番茄土传病害的发病率,并且提高番茄果实的产量和果实品质。这是由于施用生物有机肥可改善土壤理化性质,如提高土壤pH、增加土壤中的有机质。土壤理化性质与番茄发病、生长的相关性分析表明,番茄的株高、茎粗、地上部鲜物质量和产量都与土壤有机质含量呈正相关关系,发病率与有机质含量呈显著负相关。本文推测一方面生物有机肥的施用增加了土壤微生物多样性和活性,加快了矿质养分的释放,持续提供给作物生长需要^[20];另一方面生物有机肥中的功能菌解淀粉芽孢杆菌可分泌抗生素、生长素、铁载体等功能物质,降低番茄发病率并促进番茄生长^[21]。此外,虽然试验结果表明速效钾、铵态氮和硝态氮含量与番茄生长或产量有相关性,但这些养分能否影响番茄的生长情况均有待进一步的养分调控试验验证。有研究表明,长期施用生物有机肥可提高土壤中的速效养分^[22],本研究只在番茄温室施用了一次有机肥(作为基肥施入),有效磷和速效钾含量虽有提高,但并不显著,推测如果继续或长期施用生物有机肥,不同处理间土壤的速效养分(氮、磷、钾)差异会逐渐显现,生物有机肥对作物生长的效果也会更明显。

此外,本研究还发现两种生物有机肥表现出显著不同的番茄青枯病防控效果,秸秆生物有机肥(BIO1)对番茄青枯病的防控效果显著优于鸡粪生物有机肥(BIO2)。这可能是由于两种有机肥的制备原料影响了功能菌株的生长或生防功能的发挥。进一步分析两个生物有机肥处理的芽孢杆菌属微生物相对丰度,发现二者并无显著差异,推测可能是不同原料的有机肥对

功能菌拮抗和促生物质分泌的影响不同。有机肥作为功能菌发酵过程中的营养载体,为功能菌的增殖提供可利用的养分,为功能菌发挥生防特性奠定基础^[23];养分种类以及有机载体成分可影响功能菌拮抗物质的产量^[24-25]。而本研究中不同原料有机肥对功能菌T-5拮抗物质产量的影响有待进一步研究,以为功能菌二次发酵条件的优化提供理论基础。

施用生物有机肥还可通过调控根际细菌群落影响土传病害的发生^[26-29]。本研究中通过分析根际细菌群落结构发现,施用生物有机肥可增加细菌群落多样性,改变细菌群落结构;可增加变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)的丰度,降低放线菌门(Actinobacteria)和酸杆菌门(Acidobacteria)的丰度。Xiong等^[30]研究发现,生物有机肥通过重塑土壤微生物群落来诱导土壤对枯萎病的抑制作用,生物有机肥可显著提高细菌变形菌门的丰度,降低放线菌门的丰度。本研究的结果与之一致,说明生物有机肥对土壤细菌群落的调控作用主要是影响了变形菌门和放线菌门的相对丰度,进而提高了土壤整体的抑病能力,减少了土传病害的发生。虽然两个生物有机肥处理中芽孢杆菌属微生物相对丰度并无显著差异,但BIO1处理中变形菌门相对丰度升高,本文推测芽孢杆菌属的微生物激发了变形菌门微生物的丰度,进而增强了根际的抑病能力^[29]。本研究还发现土壤细菌群落受土壤硝态氮和pH影响最大,与Jiang等^[31]试验发现硝态氮是影响土壤微生物群落较大的驱动因素之一较为一致。但硝态氮对微生物群落,尤其是变形菌门和拟杆菌门的影响需通过养分投入试验进一步验证。

4 结论

施用生物有机肥可显著降低番茄土传青枯病的发病率,但不同原料制备的生物有机肥对番茄抵抗土传青枯病和促生的效果不同。其中以秸秆为原料发酵制备的生物有机肥的抑病效果最佳,对番茄果实产量及糖酸比有提升作用;与常规施肥相比,其显著提升了土壤的有机质含量,增加了根际微生物多样性,其中变形菌门和拟杆菌门相对丰度增加。

参考文献:

- [1] 黄新琦,蔡祖聪.土壤微生物与作物土传病害控制[J].中国科学院院刊,2017,32(6):593-600.
- [2] 高毓晗.连作和有机改良对设施黄瓜番茄土壤性质和根际微生物种群结构的影响[D].北京:中国农业科学院,2019.

- [3] 谢奎忠, 陆立银, 罗爱花, 等. 长期连作对马铃薯土传病害和产量的影响[J]. 中国种业, 2018(2): 65–67.
- [4] Hayward A C. Biology and epidemiology of bacterial wilt caused by *Pseudomonas solanacearum*[J]. Annual Review of Phytopathology, 1991, 29(1): 65–87.
- [5] Peeters N, Guidot A, Vailliau F, et al. *Ralstonia solanacearum*, a widespread bacterial plant pathogen in the post-genomic era[J]. Molecular Plant Pathology, 2013, 14(7): 651–662.
- [6] Mowlick S, Inoue T, Takehara T, et al. Changes and recovery of soil bacterial communities influenced by biological soil disinfection as compared with chloropicrin-treatment[J]. AMB Express, 2013, 3(1): 46.
- [7] Wu K, Fang Z Y, Wang L L, et al. Biological potential of bioorganic fertilizer fortified with bacterial antagonist for the control of tomato bacterial wilt and the promotion of crop yields[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016, 26(10): 1755–1764.
- [8] Qiu M H, Zhang R F, Xue C, et al. Application of bio-organic fertilizer can control *Fusarium* wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(7): 807–816.
- [9] 韦增辉, 潘运舟, 王雨阳, 等. 不同原料商品有机肥对土壤肥力性状及冬瓜产量的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(2): 232–237.
- [10] 邵慧芸. 有机物料施用对壤土有机碳组分和团聚体的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [11] 黄炎. 鸡粪生物有机肥的研制及其促生防病效果与机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [12] Tan S Y, Jiang Y, Song S, et al. Two *Bacillus amyloliquefaciens* strains isolated using the competitive tomato root enrichment method and their effects on suppressing *Ralstonia solanacearum* and promoting tomato plant growth[J]. Crop Protection, 2013, 43: 134–140.
- [13] 颜斐. 不同番茄生育期沼液调控对其生长及产量品质的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [14] 王玉涛. 氮、磷和钾营养对番茄风味物质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006.
- [15] 李润丰, 赵希艳, 高亚弟. 2,6-二氯酚反滴定法测定红色果蔬中还原型 VC[J]. 营养学报, 2012, 34(5): 507–509.
- [16] Mehari Z H, Elad Y, Rav-David D, et al. Induced systemic resistance in tomato (*Solanum lycopersicum*) against *Botrytis cinerea* by biochar amendment involves jasmonic acid signaling[J]. Plant and Soil, 2015, 395(1/2): 31–44.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 巩子毓, 高旭, 黄炎, 等. 连续施用生物有机肥提高设施黄瓜产量和品质的研究[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 777–783.
- [19] 庄钟娟, 高俊, 揣俊峰, 等. 海藻生物有机肥对番茄生长·土壤有机质及 pH 的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(4): 104–106.
- [20] 闫实, 郭宁, 于跃跃, 等. 生物有机肥在设施番茄上的施用量研究[J]. 中国农技推广, 2016, 32(7): 50–53.
- [21] 谭石勇. 解淀粉芽孢杆菌 T-5 防控番茄土传青枯病的效果及机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [22] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91–99.
- [23] Adam E, Groenenboom A E, Kurm V, et al. Controlling the microbiome: Microhabitat adjustments for successful biocontrol strategies in soil and human gut[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1079.
- [24] Yang C L, Dong Y, Friman V P, et al. Carbon resource richness shapes bacterial competitive interactions by alleviating growth-antibiosis trade-off[J]. Functional Ecology, 2019, 33(5): 868–875.
- [25] Bonanomi G, Lorito M, Vinale F, et al. Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: Toward a unified framework for disease suppression[J]. Annual Review of Phytopathology, 2018, 56(1): 1–20.
- [26] Shen Z Z, Wang B B, Zhu J X, et al. Lime and ammonium carbonate fumigation coupled with bio-organic fertilizer application steered banana rhizosphere to assemble a unique microbiome against *Panama* disease[J]. Microbial Biotechnology, 2019, 12(3): 515–527.
- [27] Xue C, Ryan Penton C, Shen Z Z, et al. Manipulating the banana rhizosphere microbiome for biological control of *Panama* disease[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11124.
- [28] Zhong S T, Shen Z Z, Sun Y F, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer on banana production and cultural microflora of bulk soil in orchard with serious disease incidence[J]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao, 2015, 26(2): 481–489.
- [29] Tao C Y, Li R, Xiong W, et al. Bio-organic fertilizers stimulate indigenous soil *Pseudomonas* populations to enhance plant disease suppression[J]. Microbiome, 2020, 8(1): 1–14.
- [30] Xiong W, Guo S, Jousset A, et al. Bio-fertilizer application induces soil suppressiveness against *Fusarium* wilt disease by reshaping the soil microbiome[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 114: 238–247.
- [31] Jiang S Q, Yu Y N, Gao R W, et al. High-throughput absolute quantification sequencing reveals the effect of different fertilizer applications on bacterial community in a tomato cultivated coastal saline soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 601–609.