

整合微生物组菌剂对番茄种子萌发和幼苗生长的影响及其对青枯病的防治效果

郑雪芳, 刘波*, 朱育菁, 王阶平, 张海峰, 陈倩倩, 陈燕萍, 雷闽

(福建省农业科学院农业生物资源研究所, 福州 350003)

摘要: 整合微生物组菌剂是利用微生物发酵床作为发酵槽, 通过二次好氧发酵生产含有多个功能微生物组的一种新型土壤连作障碍修复剂。本研究采用室内培养皿法, 研究整合微生物组菌剂不同浸提液浓度对番茄种子萌发的影响, 结果表明, 整合微生物组菌剂浸提液的 100 倍稀释液处理的番茄种子发芽指数 (36.75) 和种子活力指数 (106.07) 均显著高于无菌水对照 (发芽指数 33.98, 种子活力指数 65.26); 整合微生物组菌剂浸提液的稀释倍数低于 50 倍会抑制番茄种子萌发, 其发芽率、发芽指数和种子活力指数均显著低于无菌水对照。通过盆栽试验, 研究不同添加量整合微生物组菌剂对番茄植株生长及青枯病害的防治效果, 结果表明, 低浓度整合微生物组菌剂 (添加量为小于 60%) 会促进番茄植株生长, 而高浓度整合生物组菌剂 (添加量大于 80%) 抑制番茄植株生长; 添加量为 40%, 其促长效果最好, 植株的株高、茎粗和根长分别比对照增加 13.77%、26.00%和 79.51%, 其根系活力 $31.15 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 也显著高于对照组 $24.72 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$; 整合微生物组菌剂对番茄青枯病的防治效果随添加量增大而增加, 添加量大等于 40%, 其对番茄青枯病的防治效果均大于 65%, 添加量为 100%的防治效果最好, 为 77.37%。综合促长效果、青枯病的防治效果及成本, 建议整合微生物组菌剂使用剂量为添加量 40%。

关键词: 整合微生物组; 种子萌发; 青枯病; 番茄

中图分类号: S476 文献标志码: A 文章编号: 1005-9261(2019)06-0908-07

Effects of an Integrated Microbiome Agent on Tomato Seed Germination and Plant Growth, and Its Control Efficiency against Bacterial Wilt

ZHENG Xuefang, LIU Bo*, ZHU Yujing, WANG Jieping, ZHANG Haifeng,
CHEN Qianqian, CHEN Yanping, LEI Min

(Agricultural Bioresources Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The integrated microbiome agent is a new type of soil amendment for continuous cropping obstacle, which was manufactured by using the microbial fermentation bed of pig raising as a fermentation tank. In this study, the effect of the integrated microbiome agent extract with different dilution ratio on tomato seed germination was analyzed by using indoor Petri dish method. Compared to sterile water control, the extract with 100 dilution ratio had significant higher of seed germination index (33.98) and vigor index (65.26), while the extract with less than 50 dilution ratio significantly inhibited seed germination percentage, germination index and vigor index ($P < 0.05$). Meanwhile, the effect of the integrated microbiome agent with different dosage on tomato plant growth and its control efficiency against bacterial wilt were also tested. The results showed that the integrated microbiome agent with low dosage ($< 60\%$) could improve plant growth, while that with high dosage ($> 80\%$) could inhibit plant

收稿日期: 2019-04-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0201100); 福建省属公益类科研院所专项 (2018R1017-1); 福建省农业科学院基金延伸项目 (AB2017-6); 福建省农业科学院科技创新团队 (STIT2017-1-11)

作者简介: 郑雪芳, 博士, 副研究员, E-mail: zhengxuefangfz@163.com; *通信作者, 博士, 研究员, E-mail: fzliubo@163.com。

DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2019.06.018

growth. Compared to sterile water control, the treatment of adding 40% of integrated microbiome agent could increase plant height, stem diameter and root length with 13.77%, 26.00% and 79.51%, respectively. The root activity for adding 40% of integrated microbiome agent was 31.15 $\mu\text{g/g/h}$, which was significant higher than that for sterile water control (24.72 $\mu\text{g/g/h}$) ($P < 0.05$). The result of biological test also showed that the control efficiency of the integrated microbiome agent addition was increased by the increasing dosage. The control efficiency was above 65% for the dosage more than 40%, and the dosage of 100% had the highest control efficiency of 77.37%. Based on the assessments of grow promotion, control efficiency and cost, the dosage of 40% was suggested for using the integrated microbiome agent.

Key words: integrated microbiome agent; seed germination; bacterial wilt; tomato

番茄 *Solanum Lycopersicum* L. 是我国重要蔬菜之一, 据统计, 我国番茄每年种植面积近 2000 万亩。连作是目前番茄的主要栽培方式。然而, 长期连作会引发严重的连作障碍, 如土壤有害微生物的富集、土壤理化性状劣变、自毒物质的产生、病虫害 (如青枯病) 发生越来越严重等^[1-3]。目前解决连作障碍措施主要有轮作换茬^[4]、增施有机肥^[5]、土壤改良^[6]等。Cheng 等^[7]研究表明, 低浓度的大蒜分泌物有利于番茄植株生长, 可以减轻连作障碍。许永利等^[8]研究发现蚯蚓粪可通过调节植物根系微生物环境和土壤养分来减轻番茄连作障碍问题。在连作土壤中添加一部分养分含量丰富的新土壤或利用土壤改良剂, 在克服连作障碍上是行之有效的办法之一^[9,10]。

许多研究报道, 家畜沤肥可有效减轻植物病害, 特别是土传病害的危害^[11,12]。由福建省农业科学院和厦门江平生物基质有限公司合作研发的整合微生物菌剂, 能够很好地修复土壤连作障碍问题, 抑制土传病害, 具有良好的应用前景。整合微生物菌剂是基于猪粪循环利用, 以养猪微生物发酵床作为发酵槽, 通过二次好氧发酵生产的微生物制剂。作者通过 16S rRNA 高通量测序发现, 整合微生物菌剂含有元素降解、病害抑制、毒素分解等多个功能微生物组 (NCBI 登入号为 SRP144025), 其作用原理可能是通过整合微生物组的干预, 改变土壤微生物种群结构, 提升有益微生物在土壤环境中的功能, 从而降低病害特别是土传病害的发病率, 相关研究未见报道。

本研究采用室内培养皿法研究整合微生物菌剂对番茄种子萌发的影响, 通过温室盆栽试验研究整合微生物菌剂对番茄植株生长的影响及其对番茄青枯病的防治效果, 分析整合微生物菌剂作为一种新型制剂在番茄生产中应用的可行性, 为其推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的整合微生物菌剂是福建省农业科学院和厦门江平生物基质有限公司合作研发的中试产品。整合微生物菌剂的土壤理化性质: pH 7.82, 土壤有机质 (SOC) 含量为 145.12 g/kg, 全氮 (TN) 含量为 4.62 g/kg, 全磷 (TP) 含量为 3.18 g/kg, 全钾 (TK) 含量为 16.51 g/kg, 交换性钙含量为 28.54 g/kg。番茄 (金石王 1 号) 种子和种苗均购自厦门如意科技股份有限公司。供试青枯雷尔氏菌强致病力菌株 FJAT-91 由福建省农业科学院农业生物资源研究所菌种库保存。培养青枯雷尔氏菌的固体培养基 TTC 的配制参照 Kelman^[13]方法, 液体培养基为 SP (蔗糖 20 g, 蛋白胨 5 g, KH_2PO_4 0.5 g, MgSO_4 0.025 g, 定容至 1 L, pH 值 7.0)。

1.2 试验方法

1.2.1 整合微生物菌剂浸提液制备 分别称取 125 g 整合微生物菌剂, 用无菌水慢慢浇灌至饱和, 静置 24 h 后, 用 4 层纱布包裹, 挤压过滤, 收集滤液, 获得浸提液。用无菌水将浸提液分别稀释至 5、20、50、80、100 倍, 4 °C 保存备用。

1.2.2 整合微生物菌剂对番茄种子萌发的影响 采用纸上萌发法, 番茄种子于 55 °C 温水漂洗 2 次, 捞出沥干, 用不同稀释倍数的浸提液浸种 8 h, 无菌水浸种为对照。浸种后转移至底部铺置两层滤纸的 9 cm 的透明培养皿中, 每培养皿 15 粒种子, 6 个处理, 3 个重复。将培养皿置于 27 °C 恒温人工气候箱, 光照 16 h、

黑暗 8 h, 跟踪观察种子萌发情况, 记录发芽数, 直至连续 3 d 无新的发芽粒出现, 测定种子发芽率、发芽指数、种子活力指数。发芽率 (%) = (指定天数的发芽种子数/供试种子数) × 100; 发芽指数 (GI) = $\sum (Gt/Dt)$, Gt 为第 t 天的种子发芽数, Dt 为相应发芽天数; 活力指数 (VI) = 发芽指数 × 胚根长 (cm)。

1.2.3 整合微生物组菌剂对番茄幼苗生长的影响 将整合微生物组菌剂与栽培基质按 0:5、1:5、2:5、3:5、4:5 和 5:5 (体积比 v/v) 混合, 即整合微生物组菌剂的添加量为 0、20%、40%、60%、80%、100%, 然后装至塑料小钵中 (小钵直径 15 cm、高 10 cm), 500 g/钵。选用 5~6 叶龄长势一致的番茄种苗, 移栽至钵中, 4 株/盆。整合微生物组菌剂与栽培基质 6 种不同配比为 6 个不同处理, 每处理 6 盆, 设 3 个重复, 番茄盆栽苗移至人工气候室培养, 温度为 (30±1) °C, 相对湿度 90%。培养 20 d 后随机选取 15 株测量番茄植株的株高、茎粗、根长和根系活力。根系活力测定采用 2,3,5-氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法^[14]。

1.2.4 整合微生物组菌剂对番茄青枯病的防治效果 将青枯雷尔氏菌 FJAT-91 在 TTC 平板上活化后, 转接至 SP 液培养基中, 于 170 r/min、30 °C 培养 24 h, 菌液稀释至 10⁸ CFU/mL。将 5~6 叶龄长势一致的番茄苗, 移栽至装有不同配比整合微生物组菌剂和栽培基质的盆钵中, 方法与 1.2.3 同, 整合微生物组菌剂添加量为 0 的处理组为对照 (CK)。移栽 3 d 后, 伤根接种菌株 FJAT-91 的菌悬液 (接种浓度 10⁸ CFU/mL), 接种量为 80 mL/盆, 每处理 15 盆, 3 个重复。接种后每天观察番茄植株的发病情况。根据病害发生程度分为 5 个等级: 0 级, 植株健康, 未出现萎蔫症状; 1 级, 1/4 叶片出现萎蔫; 2 级, 1/2 叶片出现萎蔫; 3 级, 2/3 叶片出现萎蔫; 4 级, 整株植株枯萎、死亡^[15,16]。统计番茄青枯病发病率和病情指数及不同添加量整合微生物组菌剂对番茄青枯病的防治效果。发病率 (%) = (发病株数/总株数) × 100, 病情指数 = $\sum (\text{病级株数} \times \text{病级数}) / (\text{调查总株数} \times \text{最高病级数}) \times 100$ ^[17], 防治效果 (%) = (对照组发病率 - 处理组发病率) / 对照组发病率 × 100。

1.3 数据统计与分析

原始数据用 Excel 2007 整理, 数据统计分析采用 DPS V16.05 软件, 差异显著性分析采用 LSD 法进行多重比较, 试验数据用“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 整合微生物组菌剂对番茄种子萌发的影响

高浓度的整合微生物组菌剂会抑制番茄种子萌发, 而低浓度的整合微生物组菌剂会促进番茄种子萌发。整合微生物组菌剂浸提液的 80 倍和 100 倍稀释液处理的番茄种子活力指数分别为 85.52 和 106.07, 均显著高于对照组 (65.26) ($P < 0.05$), 100 倍稀释液处理的番茄发芽指数 (36.75) 也显著高于无菌水对照 (发芽指数 33.97)。整合微生物组菌剂浸提液的稀释倍数低于 50 倍会抑制番茄种子萌发, 其发芽率、发芽指数和种子活力指数均显著低于无菌水对照, 浸提液稀释 5 倍处理的番茄种子不萌发 (表 2)。

表 1 整合微生物组菌剂对番茄种子萌发的影响

Table 1 Effect of the integrated microbiome agent on seed germination of tomato

浸提液稀释倍数 Dilution ratio of the extract	发芽率 Germination percentage (%)	发芽指数 Germination index (GI)	种子活力指数 Vigor index (VI)
CK	80.87±0.99 a	33.97±1.31 b	65.26±3.99 c
100	82.38±0.74 a	36.75±1.42 a	106.07±5.23 a
80	75.59±2.88 b	25.06±0.39 c	85.52±2.91 b
50	53.56±1.86 c	14.50±1.70 d	28.95±3.48 d
20	21.74±1.15 d	4.34±1.12 e	4.41±1.09 e
5	0 e	0 f	0 e

注: 同例不同字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Data with different lowercase letters within a column indicated significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 整合微生物组菌剂对番茄幼苗生长的影响

整合微生物组菌剂添加量为 20%~60% 会促进番茄植株生长, 添加量为 40% 促长效果最好, 植株的株

高、茎粗和根长分别比对照增加 13.77%、26.00%和 79.51%。添加量为 80%和 100%会显著抑制番茄植株生长，添加量为 100%时，其对番茄株高、茎粗和根长的抑制率达 11.06%、10.00%和 33.17%（表 2）。

表 2 整合微生物组菌剂对番茄幼苗生长的影响

Table 2 Effect of the integrated microbiome agent on growth of tomato plant

整合微生物组菌剂添加量 Percentage of the integrated microbiome agent addition (%)	株高 Height (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	根长 Root length (cm)
CK	25.41±2.34 b	0.50±0.06 bc	2.05±0.12 c
20	26.53±4.13 ab	0.53±0.05 b	3.07±0.55 b
40	28.91±3.87 a	0.63±0.08 a	3.68±0.21 a
60	25.68±3.66 b	0.50±0.06 bc	2.38±0.31 c
80	24.55±1.85 bc	0.43±0.05 c	1.63±0.21 d
100	22.60±3.12 c	0.45±0.05 c	1.37±0.14 d

2.3 整合微生物组菌剂对番茄根系活力的影响

整合微生物组菌剂添加量为 40%和 60%处理的番茄植株根系活力分别为 31.15 和 31.10 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ，显著高于对照组的番茄根系活力 24.72 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ($P<0.05$)；添加量为 20%和 80%时，番茄根系活力与对照相当；添加量为 100%时，番茄根系活力为 20.84 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ，显著低于对照组的番茄根系活力 ($P<0.05$)（图 1）。

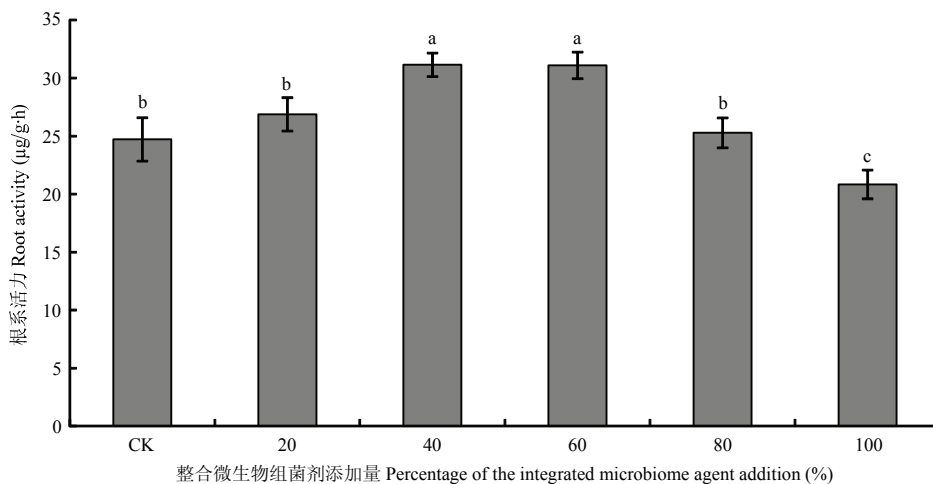


图 1 不同添加量整合微生物组菌剂对番茄根系活力的影响

Fig. 1 The effect of the integrated microbiome agent with different dosage on the tomato root activity

2.4 整合微生物组菌剂对番茄青枯病的防治效果

对照组在接种菌株 FJAT-91 后 5 d 植株开始发病，接种后 18 d 发病率达 100%，病情指数为 0.89；整合微生物组菌剂添加量为 100%处理的番茄植株发病率最低为 22.22%，病情指数也最低为 0.31；其次是添加量为 80%处理的番茄植株，其发病率和病情指数分别为 27.78%和 0.38；添加量为 40%和 60%处理的番茄植株发病率（分别为 33.33%和 31.94%）和病情指数（分别为 0.44 和 0.42）均相当。

整合微生物组菌剂添加量越高其对番茄青枯病的防治效果越好，添加量为 100%时，对番茄青枯病的防治效果最好，为 77.37%，显著大于其他添加量处理 ($P<0.05$)。添加量为 20%时，对番茄青枯病的防治效果最低，为 14.55%。添加量大于 40%，对番茄青枯病的防治效果均大于 65%（图 2）。

3 讨论

近年来，畜禽粪便、农业秸秆、食用菌渣等农业废弃物通过堆肥、发酵转化成腐殖质、有机肥等已有大量报道^[18-20]。Chen 等^[21]研究发现，养猪发酵床垫料中含有多种功能微生物，如降解有机物的微生物棒状杆菌属 *Corynebacterium* sp.、芽胞杆菌属 *Bacillus* sp.、枝芽胞杆菌属 *Virgibacillus* sp.、假单胞杆菌属

表 3 不同处理组番茄植株青枯发病率和病情指数调查情况

Table 3 Disease incidence and disease severity index of tomato bacterial wilt under different treatments

整合微生物组菌剂添加量 Percentage of the integrated microbiome agent addition (%)	调查时间 Investigation time	发病率 Disease incidence (%)	病情指数 Disease severity index
CK	接种后 5 d	13.89±4.82 a	0.06±0.02 a
20		5.56±2.40 b	0.02±0.01 b
40		1.39±2.41 bc	0.01±0.01 bc
60		1.39±2.41 bc	0.01±0.01 bc
80		0 c	0 c
100		0 c	0 c
CK	接种后 18 d	100±0.00 a	0.89±0.05 a
20		84.70±2.41 b	0.69±0.09 b
40		33.33±4.17 c	0.44±0.03 c
60		31.94±6.36 c	0.42±0.05 c
80		27.78±4.81 cd	0.38±0.01 cd
100		22.22±2.41 d	0.31±0.07 d

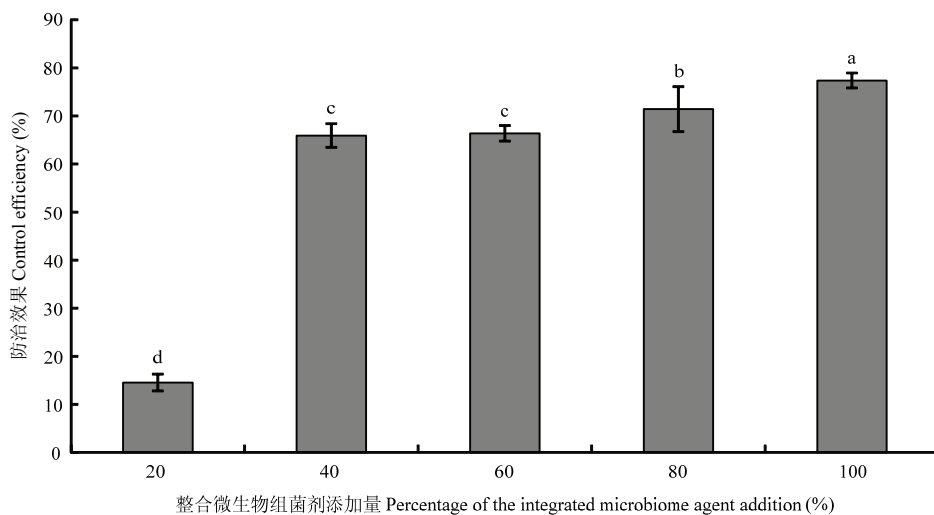


图 2 不同添加量整合微生物组菌剂对番茄青枯病的防治效果

Fig. 2 Control efficiency of the integrated microbiome agent with different dosage against tomato bacterial wilt

Pseudomonas sp.、放线菌属 *Actinobacteria* sp.、乳杆菌属 *Lactobacillus* sp.等。本研究将使用过的养猪发酵床垫料,进行科学化处理和资源化利用生产出整合微生物组菌剂,能够很好地修复土壤连作障碍问题。前期研究发现,在连作 7 年的番茄种植地,利用整合微生物组菌剂进行土壤修复,结合利用青枯病植物疫苗,能有效控制番茄青枯病害发生^[22]。

为了番茄生产能够安全、有效利用整合微生物组菌剂,本研究系统地研究了整合微生物组菌剂对番茄种子萌发、植株生长的影响及对青枯病的防治效果。首先,为了检测整合微生物组菌剂对植物是否有毒害,本研究以番茄种子发芽率、发芽指数和种子活力为指标,分析整合微生物组菌剂不同浓度浸提液对番茄种子萌发的影响。研究发现,整合微生物组菌剂对番茄种子萌发的影响与浸提液浓度密切相关,低浓度促进,高浓度抑制,这与陈燕萍等^[23]、魏云霞等^[24]研究结果相吻合。本研究发现,整合微生物组菌剂浸提液的 100 倍稀释液能显著提高番茄种子发芽指数和种子活力指数,而发芽率无显著提高。发芽指数既可反映发芽的速度,也可反映发芽的整齐程度^[25]。种子活力指数是种子发芽速率和生长量的综合反映^[26],本研究结果说明低浓度的整合微生物组菌剂不仅能提高种子萌发数目,更主要是能缩短种子发芽时间,促进胚根生长。

根系活力大小与植物的生命活动紧密相关^[27], 根系活力降低, 会使植株对养分、水分的吸收能力降低, 进而导致生长发育受阻^[28]。本研究发现, 低浓度整合微生物组菌剂(添加量为40%)处理的番茄植株根系活力显著高于对照组的番茄根系活力, 从而促进植株生长(株高、茎粗和根长分别比对照增加13.77%、26.00%和79.51%), 高浓度的整合微生物组菌剂(添加量100%)处理的番茄植株根系活力显著低于对照组, 从而抑制番茄植株的生长(株高、茎粗和根长的抑制率分别为11.06%、10.00%和33.17%)。整合微生物组菌剂处理对番茄根长的促进或抑制作用强于对株高和茎粗, 可能是因为根系直接接触整合微生物组菌剂, 影响更为敏锐。

国内外已有报道表明利用农业废弃物、家畜堆肥、生态有机肥等能提高植株的抗病性^[29-32]。马利平等^[29]认为, 堆肥浸渍液能有效抑制一些土传病害。蔡燕飞等^[30]研究发现, 施用生态有机肥显著降低了连作地番茄青枯病的发生。Ding等^[31]、Yuan等^[32]利用有机肥结合生防菌剂分别控制马铃薯和烟草青枯病。本研究发现, 番茄盆栽时, 在栽培基质中添加一定量的整合微生物组菌剂, 能有效抑制番茄青枯病的发生, 其对番茄青枯病的防治效果随添加量增大而增加。

综上所述, 低浓度整合微生物组菌剂会促进番茄种子萌发和植株生长, 而高浓度整合微生物组菌剂会抑制番茄种子萌发和植株生长。在栽培基质添加40%整合微生物组菌剂, 对番茄植株促生长效果最好, 但其对番茄青枯病防效只有66.67%, 因此, 在生产应用中应结合其他生防措施来有效控制番茄青枯病。此外, 整合微生物组菌剂的作用机制有待进一步的研究, 整合微生物组菌剂对其他植物的作用效果也需要进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Nie L, Peng S, Bouman B A, *et al.* Alleviating soil sickness caused by aerobic monocropping: responses of aerobic rice to soil oven-heating[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1-2): 185-195.
- [2] Liu X B, Herbert S J. Fifteen years of research examining cultivation of continuous soybean in northeast China: a review[J]. *Field Crops Research*, 2002, 79(1): 1-7.
- [3] 雷娟利, 周艳虹, 丁桔, 等. 不同蔬菜连作对土壤细菌 DNA 分子水平多态性影响的研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2076-2083.
- [4] Qin S, Yeboah S, Cao L, *et al.* Breaking continuous potato cropping with legumes improves soil microbial communities, enzyme activities and tuber yield[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(5): e0175934.
- [5] Chen W, Teng Y, Li Z G, *et al.* Mechanisms by which organic fertilizer and effective microbes mitigate peanut continuous cropping yield constraints in a red soil of south China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 128: 23-34.
- [6] Su L X, Ruan Y Z, Yang X J, *et al.* Suppression on plant-parasitic nematodes using a soil fumigation strategy based on ammonium bicarbonate and its effects on the nematode community[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17597.
- [7] Cheng F, Cheng Z H, Meng H W. Transcriptomic insights into the allelopathic effects of the garlic allelochemical diallyl disulfide on tomato roots[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38902.
- [8] 许永利, 张俊英, 袁跃广, 等. 设施番茄连作土壤的改良措施研究[J]. *北方园艺*, 2010, 5: 60-62.
- [9] 殷振江, 周勇, 张宇, 等. 浅析温室泛番茄连作障碍防控技术[J]. *陕西农林科学*, 2015, 61(7): 109-111.
- [10] Renaud M, Chelinho S, Alvarenga P, *et al.* Organic wastes as soil amendments – Effects assessment towards soil invertebrates[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 330: 149-156.
- [11] Hadar Y, Mandelbaum R. Suppression of *Pythium aphanidermatum* damping-off container media containing composted liquorice roots[J]. *Crop Protection*, 1986, 5(2): 88-92.
- [12] Lumsden R D, Millner P D, Lewis J A. Suppression of lettuce drop caused by sclerotinia minor with composted sewage sludge[J]. *Plant Disease*, 1986, 70(3): 197-201.
- [13] Kelman A. The relationship of pathogenicity in *Pseudomonas solanacearum* to colony appearance on a tetrazolium medium[J]. *Phytopathology*, 1954, 44: 693-695.
- [14] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [15] Roberts D P, Denny T P, Schell M A. Cloning of the *egl* gene of *Pseudomonas solanacearum* and analysis of its role in phytopathogenicity[J]. *Journal of*

- Bacteriology, 1988, 170(4): 1445-1451.
- [16] Tans-Kersten J, Huang H, Allen C. *Ralstonia solanacearum* needs motility for invasive virulence on tomato[J]. Journal of Bacteriology, 2001, 183(12): 3597-3650.
- [17] Li B, Su T, Yu R, *et al.* Inhibitory activity of *Paenibacillus macerans* and *Paenibacillus polymyxa* against *Ralstonia solanacearum*[J]. Journal of Microbiology Research. 2010, 4(19): 2048-2054.
- [18] Yang R P, Mo Y L, Liu C M, *et al.* The effects of cattle manure and garlic rotation on soil under continuous cropping of watermelon (*Citrullus lanatus* L.)[J]. PLoS ONE, 2016,11(6):e0156515.
- [19] Li J G, Dong Y H. Effect of a rock dust amendment on disease severity of tomato bacterial wilt[J]. Antonie Van Leeuwenhoek, 2013, 103(1):11-22.
- [20] 陈智毅, 赵晓丽, 刘学铭. 金针菇菌糠堆肥生产有机肥研究[J]. 中国食用菌, 2012, 31(4): 30-31.
- [21] Chen Q Q, Liu B, Wang J P, *et al.* Diversity and dynamics of the bacterial community involved in pig manure biodegradation in a microbial fermentation bed system[J]. Annals of Microbiology, 2017, 67(7): 491-500.
- [22] 郑雪芳, 刘波, 朱育菁, 等. 设施番茄连作障碍修复及其对青枯病害的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(1): 117-123
- [23] 陈燕萍, 肖荣凤, 刘波, 等. 利用微生物发酵床养猪垫料制备蔬菜育苗基质的研究[J]. 福建农业学报, 2015, 30(8): 802-809.
- [24] 魏云霞, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 秸秆及绿肥浸提液对莴苣种子的化感作用[J]. 中国蔬菜, 2013, 4: 60-64.
- [25] 刘贵河, 郭郁频, 任永霞, 等. PEG 胁迫下 5 种牧草饲料作物种子萌发期的抗旱性研究[J]. 种子, 2013, 32(11): 15-19.
- [26] 胡建芳, 陈建中, 王玉国, 等. 优化高压电场处理提高高粱种子活力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 253-259.
- [27] 李朝苏, 刘鹏, 蔡妙珍, 等. 荞麦对酸铝胁迫生理响应的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3):105-109.
- [28] Veen B. Relation between root respiration and root activity[J]. Plant and Soil, 1981, 63(1-2): 73-76.
- [29] 马利平, 乔雄梧, 高芬, 等. 家畜沤肥浸渍液对青椒枯萎病的防治及作用机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 84-87.
- [30] 蔡燕飞, 廖宗文, 章家恩, 等. 生态有机肥对番茄青枯病及土壤微生物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 349-353.
- [31] Ding C Y, Shen Q R, Zhang R F, *et al.* Evaluation of rhizosphere bacteria and derived bio-organic fertilizers as potential biocontrol agents against bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) of potato[J]. Plant and Soil, 2013, 366(1-2): 453-466.
- [32] Yuan S, Wang L, Wu K, *et al.* Evaluation of *Bacillus*-fortified organic fertilizer for controlling tobacco bacterial wilt in green house and field experiments[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 75: 86-94.