

餐厨垃圾制菌肥对番茄根结线虫病的防效 以及对土壤生物活性的影响

余 真^{1,2}, 张又弛¹, 罗文邃^{1*}

(1.中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:采用盆栽试验方法,研究了以腐熟餐厨废弃物有机肥为载体,添加生防真菌淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinus*)制成的菌肥(BOF)对番茄根结线虫病的防效和对土壤生物活性的影响。结果表明:施用菌肥可显著降低根结线虫病的发生,在对照(CK)防效指定为0时,BOF处理达到54%,比化肥(CF)和有机肥(OF)处理分别提高了218.6%和178.4%;在养分含量相当的情况下,BOF处理的株高、茎粗、地上部鲜重分别比CF处理增加了14.7%、12.7%、7.6%,表现出显著的促生效果。利用荧光定量PCR对不同处理组土壤中细菌和放线菌含量测定发现,与CK和CF处理组相比,BOF处理组土壤中细菌和放线菌数量显著增加。土壤酶活测定结果显示,BOF处理土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性均显著提高。研究结果表明,餐厨废弃物制成的淡紫拟青霉菌肥能有效降低番茄根结线虫病害的发生,促进番茄生长,改善土壤微生物区系,提高土壤酶活性,具有广泛应用前景。

关键词:餐厨废弃物;菌肥;淡紫拟青霉;防病效果;土壤生物活性

中图分类号:X705 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)06-1217-08 doi:10.11654/jaes.2015.06.028

Effects of Biological Organic Fertilizer Made from Food Waste on the Control of Tomato Root Knot Disease and Soil Biological Properties

YU Zhen^{1,2}, ZHANG You-chi¹, LUO Wen-sui^{1*}

(1. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, the effect of biological organic fertilizer (BOF) on the control of the tomato root knot disease and soil biological activities was studied in pot experiment. The BOF was made by inoculating food waste organic fertilizer with nematophagous fungus *Paecilomyces lilacinus* and compared other types of fertilizer, e.g., chemical fertilizer (CF) and food waste organic fertilizer (OF). Results showed that the root knot disease was significantly reduced in the pots treated with BOF as compared with CF (by 218.6%) or OF (by 178.4%) ($P < 0.05$). Among all the treatments, the highest values of plant height, stem diameter and fresh weight were also obtained in BOF treatment, which may be attributed to the disease control ability of BOF. The real-time quantitative polymerase chain reaction (qPCR) detected significantly larger populations of bacteria and actinomyces in BOF treated soils than those in CK (no application of fertilizer) or CF treatments ($P < 0.05$). Besides these, the activities of soil dehydrogenase, urease, invertase and acid phosphatase in the BOF treatment were dramatically higher than other treatments. These results indicated that the BOF has promising future for reducing tomato root knot disease, promoting the growth of tomato and improving the soil biological properties.

Keywords: waste; biological organic fertilizer; *Paecilomyces lilacinus*; disease-control effect; soil biological properties

收稿日期:2015-01-20

基金项目:国家“863”计划项目(2012AA06A204-2)

作者简介:余 真(1985—),女,博士研究生,研究方向为固体废弃物资源化利用。E-mail:zhenyu@iue.ac.cn

* 通信作者:罗文邃 E-mail:wsluo@iue.ac.cn

餐厨废弃物是城市固体垃圾中有机垃圾的重要组成部分,主要包括米和面粉类食品残余、蔬菜、肉骨类、植物油、动物油等能被微生物分解的有机物。基本理化特点是高水分(80%~85%)、高盐分和高有机质含量。从营养角度来看餐厨废弃物是一种高能高蛋白优质饲料原料,而当其作为动物饲料使用时,就有可能产生同源性污染,存在潜在的、不确定性的传播疾病的风险^[1]。如果能够将其转化成高效的微生物制品有机肥,便能够在避免当前焚烧/填埋等处置工艺带来的二次污染风险^[2-4]的同时,提供有利于农作物生长的优质肥料,提高废弃物处理过程中产生的附加价值。刘继芳等^[5]认为施用微生物制品可增加土壤细菌数量、降低土壤含盐量。蔡燕飞等^[6]发现生物有机肥能够调节土壤中微生物区系组成,使其向着健康方向发展,从而在一定程度上减少作物病害的发生。目前餐厨垃圾堆肥工艺研究以及堆肥中理化特性的研究屡见不鲜^[4,7],但是餐厨垃圾有机肥对植物生长、病害发生和土壤微生物生态的影响还少有报道。

根结线虫(*Meloidogyne* spp.)是植物的重要病害之一,由于其寄生范围广^[8],环境适应性强,造成巨大的农作物损失。对线虫病害的生物防治因其具有无污染、不杀伤天敌、不会(或较少)产生抗药性的优点而备受人们重视^[9]。在根结线虫的生物防治中,淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinus*)是一种被公认为非常有效的用于防治土壤根结线虫的食线虫真菌。传统的生物防治方法是将淡紫拟青霉菌液或粉剂施入土壤中抑制根结线虫病害的发生,但由于定殖效果等原因导致防治效果不稳定^[10]。张志红等^[11]研究发现,生物有机肥由于其含有丰富的有机质,能够促进微生物在土壤中定殖,是吸附生防菌剂的良好载体。李胜华等^[12]认为尽管前人利用有机肥来改良土壤,防治青枯病取得了一定的效果,但将生防菌与腐熟的有机肥共同发酵制成的微生物有机肥,通常具有抑制病原菌和促进植物生长双重作用^[13-14]。刘会清等^[15]研究了枯草芽孢杆菌等生防菌与生物有机肥复配对黄瓜形态指标、产量和蔓枯病发病率的影响,发现各种复配组合都能够提高黄瓜产量,增强抗病性。

番茄是一种重要的经济作物,其30%产量损失是由根结线虫病害造成的^[16]。目前利用餐厨废弃物制成的微生物有机肥用于防治番茄根结线虫病还未见报道。因此,本研究通过盆栽试验评估由淡紫拟青霉与餐厨废弃物有机肥混合二次发酵得到的菌肥对番茄生长及根结线虫病的防治作用,并检测施用该菌肥后

土壤微生物菌群数量和酶活性的变化,旨在为推广使用餐厨垃圾生物有机肥提供理论依据,促进餐厨废弃物的资源化利用。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

盆栽试验用土采自中科院城市环境研究所试验田土壤。供试土壤为赤红壤,质地为砂质壤土(砂粒72.67%,粘粒26.98%,粉粒0.35%)。土壤基本性质:pH6.6,CEC10.92 cmol·kg⁻¹,有机质20.5 g·kg⁻¹,速效氮116.3 mg·kg⁻¹,有效磷49.1 mg·kg⁻¹,速效钾99.6 mg·kg⁻¹,可溶性盐860 mg·kg⁻¹。

1.2 菌株的来源与肥料制备

淡紫拟青霉菌株 PL1210(GenBank ID:KF880384)由本实验室在根结线虫卵囊中分离得到。

餐厨垃圾收集于中国科学院城市环境研究所食堂,主要由青菜、辣椒、肉类、主食(米饭和面食)组成,其主要成分见表1。

表1 餐厨垃圾的基本性质

Table 1 Representative characteristics of collected food waste mixture

pH	总固体/%	糖类/%	蛋白质/%	脂类/%
6.12±0.1	14.55±0.41	43.54±0.11	12.07±0.13	16.12±0.09

注:总固体以湿基计,糖类、蛋白质和脂类含量均以干基计。

Note: The total solid was calculated on a wet basis and the sugar, protein and lipid contents were calculated on a dry basis.

供试餐厨垃圾有机肥料(OF)由本实验室自制。餐厨垃圾收集后,先沥去水分并将骨头等难以绞碎的物质以及塑料袋、纸杯等杂物拣出,再用绞肉机绞碎,充分混匀。以质量分数为15%的麸皮为辅料,调节含水率至65%左右后进行好氧堆肥。堆肥周期20 d。OF成分状况见表2。

将淡紫拟青霉菌株 PL1210 装入 PDA 液体培养基中,28℃振荡培养48 h,含量达到1.0×10⁹ CFU·mL⁻¹以上,离心去除上层发酵液,用无菌水按相同的比例将菌体悬浮后备用,再按照10%(V/m)接种量接种于上述由餐厨垃圾发酵而成的有机肥(OF)中,28℃下发酵7 d,得到含菌株 PL1210 浓度3.0×10⁹ CFU·g⁻¹的菌肥(BOF)。BOF成分状况见表2。

1.3 供试植物

供试番茄为粉番一号,番茄播种前先用2%次氯酸钠消毒5 min,然后用无菌水反复冲洗5次,催芽后

表 2 供试有机肥、菌肥的基本理化性质

Table 2 Physico-chemical parameters of experimental organic fertilizer and biological organic fertilizer

项目	pH	总碳/%	全氮/%	P ₂ O ₅ /%	K ₂ O/%	含盐量/%	有机质/%
OF	6.52	48.34±0.01	4.18±0.01	1.55±0.04	1.13±0.09	0.11±0.01	57.62±6.01
BOF	6.21	46.64±0.03	3.90±0.01	1.5±0.05	1.1±0.13	0.12±0.01	52.14±5.53

播种在育苗盘中(基质由草炭、细沙、珍珠岩按 7:3:2 比例混合而成),20 d 后移苗。

1.4 南方根结线虫二龄幼虫和卵囊的获得

在厦门市根结线虫危害严重的农田采取土样,接种至番茄苗上进行人工繁殖,从感染根结线虫的番茄病根挑取新鲜卵囊,置于培养皿($d=6\text{ cm}$),皿底垫湿润滤纸 1 张,在 $(25\pm1)^{\circ}\text{C}$ 培养箱中,待卵孵化产生大量二龄幼虫时收集线虫备用。

1.5 实验设计

采用番茄盆栽试验方法,设置 4 个处理:T1(CK)对照,无肥;T2(CF)化肥;T3(OF)有机肥;T4(BOF)菌肥。BOF 按氮含量为 $1.5\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$ 土施入,CF 和 OF 用量按照与 BOF 中相等养分含量计算施入。BOF 用量为 $38.46\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$,OF 用量为 $35.88\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$,化肥处理肥料用量为尿素(含 N 46.30%) $3.24\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$ 、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12.00%) $4.81\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$ 、硫酸钾(含 K₂O 45.00%) $0.94\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$ 。

圆形塑料花盆作为培养容器(上口径 26 cm,下口径 17 cm,高度 22 cm),每盆装 5 kg 供试土壤。风干土壤过 10 目筛,并将称好的土壤与肥料混匀装盆。移栽大小长势基本一致的番茄秧苗,每盆定植 1 株番茄。定植后统一浇一次缓苗水,以后按常规进行浇水,浇水量控制在土壤田间持水量的 60%~70%。移苗 5 d 后在根围随水分别接种 5000 条南方根结线虫二龄幼虫。每个处理 8 盆,每 1 盆为 1 个重复,随机排列。

1.6 样品测定与分析

1.6.1 病情调查

在作物收获期末(移栽 60 d 后),调查根结线虫病害等级。根据根结的多少,病情分级标准为:0 级,无根结;1 级,根结占根系的 25% 以下;2 级,根结占根系的 26%~50%;3 级,根结占根系的 51%~75%;4 级,根结占根系的 75% 以上^[17]。

根结指数(GI)= $\frac{\sum(\text{各级植株数}\times\text{该级代表值})}{\text{调查总株数}\times\text{最高级代表值}}\times100$

相对防效(%)= $\frac{\text{对照根结指数}-\text{处理根结指数}}{\text{对照根结指数}}\times100\%$

1.6.2 生物量测定

收获时挖取各处理番茄植株,洗净抹干,将番茄植株平铺,分别测定株高、茎粗、鲜重和干重。株高以从根部到生长点为基准,用卷尺测量;茎粗以第 1 片真叶下部节间为准,用千分尺测量;收获期鲜重、干重(105°C 杀青 30 min; 70°C ,烘干至恒重)用百分之一天平称重。以对照为标准,分别计算:

地上部植株株高增长率=(处理株高-对照株高)/对照株高 $\times100\%$

地上部植株鲜重增长率=(处理鲜重-对照鲜重)/对照鲜重 $\times100\%$

1.6.3 土壤酶活测定

脱氢酶采用 TTC 分光光度法,以每克土生成的三苯基甲月替(TPF)表示;土壤转化酶采用二硝基水杨酸(DNS)法,以每克土产生的葡萄糖的毫克数表示;脲酶活性用奈氏比色法,以 $\text{NH}_4^+-\text{N}\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 为单位;酸性磷酸酶活性测定采用氯代二溴对苯醌亚胺比色法,酶活性以每克土壤中酚的毫克数表示^[18-19]。

1.6.4 实时荧光定量 PCR 分析

根际细菌总量和淡紫拟青霉 PL1210 在番茄根际的定殖,在播种后第 1、20、40、60 d 测定。取 0.5 g 根际土壤样品,利用土壤 DNA 提取试剂盒(Mo-Bio Laboratories Inc.,California,USA)提取土壤样品总 DNA,按试剂盒使用说明进行操作。PL1210、细菌以及放线菌定量 PCR 分析的分子标靶基因如表 3 所示。在得到上述各微生物分子标靶基因的重组质粒后,分别以 10 倍梯度稀释各基因重组质粒获得各自的标准曲线。每个样品 3 次重复。PL1210 的测定根据 Atkins^[20]的方法采用 Stratagene Brilliant QPCR Master Mix TaqMan 试剂盒,细菌和放线菌总量的测定采用宝生物工程(大连)有限公司的 SYBR[®] Premix Ex Taq[™] Perfect Real Time 试剂盒于 Roche Lightcycler[®] 480 扩增仪上分析。PCR 反应条件为: 95°C 预变性 5 min; 94°C 变性 30 s, 55°C 退火 45 min, 72°C 延伸 1 min,40 个循环; 72°C ,10 min。

1.7 数据分析

所有试验数据利用 Excel 2003 进行均值和标准误差的计算;用 SPSS16.0 统计软件的方差分析(One-

表3 实时荧光定量 PCR 扩增引物
Table 3 PCR primers for real-time PCR assay

目标基因	引物名称	序列(5'~3')
<i>P. lilacinus</i> ITS	PLrtF	GACCCAAAACCTCTTTTTCATTACG
	PLrtR	AGATCCGTTGTTGAAAGTTTTGATTCAATTTGTTTTG
	PLrt P	FAM-CCGGCGGAATTTCTTCTGTGAGTTGC-TAMRA
Bacterial 16S rRNA	358F	CCTACGGGAGGCAGCAG
	517R	ATTCCGCGCTGCTGGCA
Actinomyces 16S rRNA	Primer A	AGAGTTTGATCCTGGCTCAG
	Primer B	AAGGAGGTGATCCAGCCGCA

wayANOVA)对数据进行处理,用 Duncan 方法对数据进行差异显著性分析(显著水平 $P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 淡紫拟青霉 PL1210 在番茄根际的定殖

生防菌要发挥其作用的前提是在土壤中建立种群,必然会与根际其他菌之间产生空间、能源的竞争。因此,生防菌的定殖能力是开发应用的基础,也是菌肥防效的基础。由图1可以看出,在番茄定植后的30 d内,随菌肥进入番茄根际土壤中的淡紫拟青霉菌量在逐渐减少,但是仍然维持在 10^5 CFU·g⁻¹ 水平左右。Kiewnick 等^[21]研究发现,当卵或者二龄幼虫的接种量在 1000~16 000 条·m⁻³ 土时,淡紫拟青霉的最低施用量 2×10^5 CFU·g⁻¹ 土已经足以使根结和卵囊分别减少 45%和 69%。由此可以看出,本研究制得的菌肥中生防菌的定殖能力应该足以发挥作用。

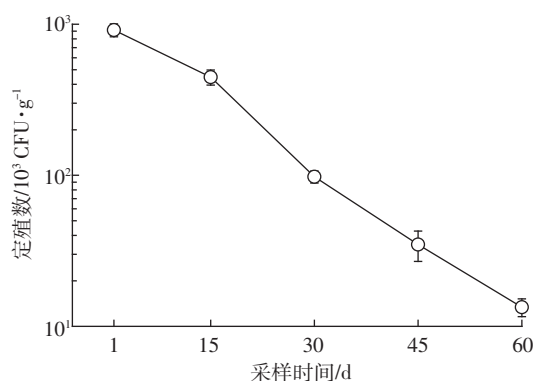


图1 PL1210 在番茄根际的定殖

Figure 1 Survival of PL1210 in the tomato rhizosphere

2.2 不同处理对番茄生长的影响及对根结线虫的防效

从表4可以看出,各处理的植株都出现不同程度的根结线虫病症状,对照CK土壤中根结线虫虫口密度最大,发病率最高,根结指数高达82.72。与对照相比,生物有机肥(BOF)处理显著抑制了根结线虫的

繁殖(虫口密度仅为对照的33.1%);番茄根结线虫病发病率也显著下降,防治效果达到54%,而CF和OF处理的防效只有16.95%和19.4%。这一实验结果表明,添加淡紫拟青霉菌的菌肥能够有效防治番茄根结线虫病。

在所有处理中,BOF、OF和CF的有效养分虽然相同,但是BOF处理的番茄株高、茎粗和地上部鲜重比CF处理分别增加了14.7%、12.7%和7.6%,并显著高于其他处理组,说明生物有机肥中添加的功能微生物对促进番茄生长起到了较重要的作用。这可能与菌肥能减少根结线虫对番茄根部的侵染,对根结线虫具有较高的防效有关。同时,前人研究与我们的实验室均证实淡紫拟青霉能够合成类似吲哚乙酸的植物生长促进物质^[22]。因此,在植物根系施菌不仅能明显抑制线虫侵染,而且能促进植株营养器官的生长。普通有机肥OF处理后的番茄各项生长指标稍高于CF处理组植株,对照组最低。葛均青等^[23]认为微生物菌肥含有有益微生物菌群、活性物质、有机质及多种微量元素,可制造和协助作物吸收营养,提高植物抗性,增加产量,提高质量。杨丽娟等^[24]比较了施用餐厨废弃物的堆肥产品与施用猪粪、牛粪、马粪、鸡粪、化肥等,发现在几种添加物中餐厨垃圾有机肥促进番茄植株生长发育和提高产量改善品质的效果最优。

2.3 不同处理对根际微生物的影响

图2表明,各处理组根际土壤中的细菌含量均随着番茄的生长呈先升高再降低的趋势。定殖后的前30 d土壤中的细菌数量逐渐增加,而后则逐渐降低。有机肥的施用(BOF和OF)能够有效提高土壤细菌数量,三次采样时间检测的BOF与OF中细菌数量均显著高于对照和CF处理组。定殖30 d后,OF和BOF中细菌数量比CK分别提高了196%和164%;收获期,OF和BOF中细菌数量分别比CK提高了314%

表 4 不同处理对番茄生长的影响及对根结线虫的防效

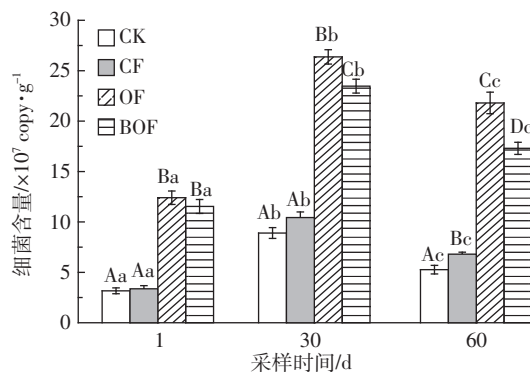
Table 4 Control effects of different treatments on tomato growth and root knot disease

处理	株高/cm	茎粗/cm	地上部鲜重/g	土壤根结线虫数/条·kg ⁻¹	根结指数	相对防效/%
CK	46.5±1.5a	0.56±0.03a	90.6±1.5a	6480a	82.72	—
CF	57.8±2.1b	0.63±0.02b	101.5±1.9b	5737b	68.7	16.95
OF	58.5±1.9b	0.67±0.02bc	103.8±1.8b	5504b	66.67	19.4
BOF	66.3±2.4c	0.71±0.02c	109.2±1.4c	2144c	38.05	54

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters within a column represent significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below.

和228%,比 CF 提高了 221%和 154%。可以看出,有机肥施用能够更加有效地调控土壤微生物群落结构。土壤中细菌数量的增加有利于土壤养分的转化,为植物的生长和有机无机物的转化提供了良好的环境。



不同大写字母表示相同采样时间不同处理间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同采样时间相同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different uppercase letters indicate significant difference ($P<0.05$) among different treatments at the same sampling time. Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$) among different sampling time within the same treatment. The same below

图 2 不同肥料处理对土壤中细菌含量的影响

Figure 2 Effect of the different fertilizer treatments on the amount of bacteria in the soil

放线菌是土壤微生物中的一大类,在数量方面仅次于细菌,它们对土壤中有机化合物的分解及土壤腐殖质合成起着重要作用。图 3 显示土壤中放线菌数量的变化情况,其变化趋势与细菌相似;定殖 30 d 后,OF 和 BOF 中放线菌数量比 CK 分别提高了 142%和 110%;定殖后 60 d,OF 和 BOF 中放线菌数量分别比 CK 提高了 257%和 235%,比 CF 提高了 131%和 117%。放线菌不仅能转化土壤有机质,而且能产生抗生素,对其他有害微生物能起到拮抗作用。放线菌的增加在一定程度上提高了菌肥的防病效果^[25]。

BOF 和 OF 处理组细菌、放线菌含量较高的原因和生物有机肥本身含有有益菌群,对土壤土著微生物

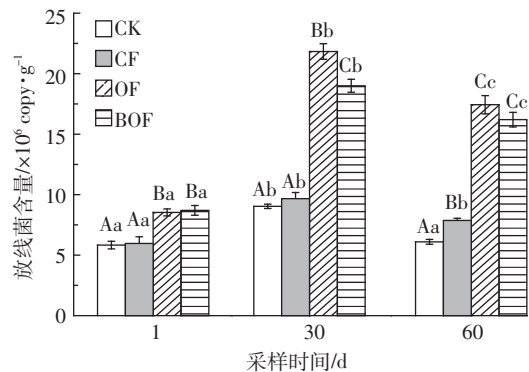


图 3 不同肥料处理对土壤中放线菌含量的影响

Figure 3 Effect of the different fertilizer treatments on the amount of actinomyces in the soil

有一定活化作用有关,而且餐厨垃圾多为有机物,用其生产的有机肥可丰富土壤中微生物可利用营养,增加菌群数。Alarez 等^[26]研究表明施用有机肥能够提高番茄根际细菌数量;Pascual 等^[27]报道餐厨废弃物含有大量氮和碳水化合物,可以作为土壤微生物的氮源和能源从而增加土壤微生物菌群,提高土壤生物量,为作物高产优质提供良好的土壤环境。此外,土壤微生物活动与植物的生长发育状况有关,根系功能强,分泌物增多,根部土壤微生物活动也往往较高^[27]。但是 BOF 处理与 CK 相比,细菌和放线菌数量的增加幅度低于 OF 处理组。这可能由于 BOF 是在 OF 的基础上经过二次发酵,使 pH 降低,含盐量增加,有机质减少(表 2),而这些变化都不利于微生物的繁殖。另外,BOF 中含有大量的淡紫拟青霉,而拟青霉属真菌常常能合成一些生物活性物质,包括能抑制乙酰胆碱脂酶的吡啶酮^[28]和有细胞毒性的环己缩酚肽^[29]。因此,BOF 中可能含有由 PL1210 产生的生物毒素,进而抑制了一些细菌和放线菌的生长。

2.4 不同处理对根际土壤酶活的影响

土壤酶主要来自于土壤微生物代谢过程,其活性是土壤生物活性和土壤肥力的重要指标^[30]。土壤脱氢酶是胞内酶,只存在于活的微生物细胞内,能够促进

有机物脱氢,起到传递氢的作用^[31]。如表5所示,BOF和OF有机肥处理的土壤中脱氢酶活性差异不显著,但都明显高于CF和CK处理。这一实验结果表明,餐厨垃圾制成的有机肥可为微生物生长提供易利用的碳源、氮源等营养成分,有效促进土壤中微生物的生长与活动,从而提高了土壤脱氢酶的活性。

表5 淡紫拟青霉 PL1210 对土壤酶活性的影响

Table 5 Effect of *P. lilacinus* PL1210 on soil enzyme activities

处理	脱氢酶 TPF/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ soil}\cdot\text{h}^{-1}$	脲酶 $\text{NH}_4\text{-N}/$ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{ soil}\cdot\text{h}^{-1}$	转化酶 Glucose/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{ soil}\cdot\text{d}^{-1}$	酸性磷酸酶/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{ soil}\cdot\text{d}^{-1}$
CK	9.2±0.6a	23.4±1.2a	16.1±0.4a	1.2±0.11a
CF	12.3±0.5b	27.3±1.4b	19.9±0.9b	1.9±0.18b
OF	16.8±1.1c	35.6±1.5c	24.8±1.3c	3.1±0.2c
BOF	15.5±0.8c	33.7±2.6c	28.7±0.6d	3.3±0.16c

脲酶是土壤中分解酰胺态氮的酶,对土壤中氮的转化,特别是对尿素的利用率等有重要影响作用,其活性强度与土壤氮素供应水平密切相关^[32]。与CK和CF相比,土壤在BOF和OF处理下脲酶活性均显著增加($P<0.05$)。

转化酶能够释放土壤中作为植物和微生物重要能量来源的小分子糖,其活性大小可以间接地表征土壤中有有机碳的转化情况^[33]。与CK相比,土壤在BOF、OF与CF三种肥料处理下转化酶活性均显著增加($P<0.05$),且增加的幅度为BOF>OF>CF。

土壤磷酸酶为磷的矿化和植物吸收提供了一条重要途径,是评价土壤磷素生物转化方向与强度的重要指标^[34]。土壤中的磷酸酶有酸性、中性和碱性之分,在不同酸碱性的土壤中3种磷酸酶比例是不同的。本试验用土为酸性,因此测定酸性磷酸酶活性。由表5可以看出,不同处理土壤酸性磷酸酶活性表现为BOF>OF>CF>CK,且BOF和OF处理磷酸酶活性显著高于其他处理,表明生物有机肥可以提高土壤酸性磷酸酶的活性。

吴凤芝等^[35]发现绝大多数土壤酶的活性与土壤有机质含量呈显著正相关,测定相应土壤酶活性可以间接地了解或预测某些营养物质的转化情况以及土壤肥力的演变趋势。申进文等^[36]的试验结果表明,施用餐厨垃圾平菇栽培废料不仅可以增加土壤中活性有机质的含量,而且可以增加土壤中脲酶、转化酶和脱氢酶的活性,其效果还要优于干腐熟牛粪和烘干鸡粪。在本研究中,餐厨垃圾制成的有机肥处理的番茄根际土壤中酶活性均高于其他处理组,究其原因可能是施用有机肥使土壤中的活性有机质以及微生物数

量增加,而活性有机质不仅为酶提供了载体或底物,也促进了土壤微生物的活性大幅度提高,从而使土壤中酶的含量与活性得到提高。此外,生物有机肥中存在大量有益微生物,其施用丰富了土壤中的微生物,土壤微生物的活动和代谢更加旺盛,从而提高了土壤酶的活性^[37]。BOF中土壤磷酸酶、脲酶和转化酶的活性最好,可能是由于其所含的功能菌淡紫拟青霉可以分泌这三种酶或者对于这三种酶活性具有有益的作用。此外,刘登义等^[38]的研究结果表明,根际土壤各种酶活性显著大于非根际土壤。土壤微生物活动和土壤酶的活性与植物的生长发育状况有关,根系功能强,分泌物增多,根部土壤微生物活动旺盛,脲酶、转化酶和脱氢酶的活性也往往较高^[39]。由于处理组番茄生长状况比对照组更为良好,其较丰富的根系分泌物伴随着更为旺盛的微生物活动可能也是土壤酶活性更高的原因。

3 结论

施用餐厨垃圾制成的菌肥可以促进番茄的生长,抑制根结线虫在土壤中的繁殖,显著降低番茄根结线虫病的发病率,提高植株的防病效果;从土壤微生物角度来说可提高土壤微生物活性,改善微生物结构和功能,从而实现土壤微生物生态平衡;从固体废弃物处理方面来说可以变废为宝,减少环境污染,是一条有效的资源化利用途径。

参考文献:

- [1] 徐长勇,宋薇,赵树青.餐厨垃圾饲料化技术的同源性污染研究[J]. 环境卫生工程, 2011, 19(1):9-15.
XU Chang-yong, SONG Wei, ZHAO Shu-qing. Homologous pollution for transforming food residue to food[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2011, 19(1):9-15.
- [2] Kim M H, Kim J W. Comparison through a LCA evaluation analysis of food waste disposal options from the perspective of global warming and resource recovery[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(19):3998-4006.
- [3] Song M, Tang M, Lv S F. The pyrolysis of multi-component municipal solid waste in fixed bed reactor for activated carbon production[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, 109:278-282.
- [4] 郭倩倩,吴拥军,韩丽珍.餐厨垃圾自然升温堆肥工艺研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(7):2706-2710.
GUO Qian-qian, WU Yong-jun, HAN Lin-zhen. Study on natural composting process of kitchen waste[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(7):2706-2710.
- [5] 刘继芳,逢焕成,严慧峻,等.用微生物对六六六污染土壤进行生物修复的初步试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6):677-680.

- LIU Ji-fang, PANG Huan-cheng, YAN Hui-jun, et al. Primary study on biomediation of contaminated soil with Hexachlorocyclohexane (BHC) by microorganisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):677-680.
- [6] 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.
- CAI Yan-fei, LIAO Zong-wen, ZHANG Jia-en, et al. Effect of ecological organic fertilizer on tomato bacterial wilt and soil microbial diversities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3):349-353.
- [7] 李小建, 周振鹏, 谢锡龙, 等. 餐厨垃圾连续堆肥处理系统中试研究[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(1):341-345.
- LI Xiao-jian, ZHOU Zhen-peng, XIE Xi-long, et al. Pilot study on continuous composting processing system for food waste[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, 7(1):341-345.
- [8] Huang W K, Sun J H, Cui J K, et al. Efficacy evaluation of fungus *Syncephalastrum racemosum* and nematicide avermectin against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* on cucumber[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2):e89717.
- [9] Ritz B, Rull R P. Assessment of environmental exposures from agricultural pesticides in childhood leukaemia studies: Challenges and opportunities[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2008, 132(2):148-155.
- [10] Kiewnick S, Sikora R A. Biological control of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* by *Paecilomyces lilacinus* strain 251[J]. *Biological control*, 2006, 38(2):179-187.
- [11] 张志红, 李华兴, 冯宏, 等. 堆肥作为微生物菌剂载体的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7):1382-1387.
- ZHANG Zhi-hong, LI Hua-xing, FENG Hong, et al. Compost as a carrier for microbial inoculants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1382-1387.
- [12] 李胜华, 谷丽萍, 刘可星, 等. 有机肥配施对番茄土传病害的防治及土壤微生物多样性的调控[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4):965-969.
- LI Sheng-hua, GU Li-ping, LIU Ke-xing, et al. Effects of combined application of organic fertilizers on the control of soilborne diseases and the regulation of soil microbial diversity[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4):965-969.
- [13] 曹明慧, 冉炜, 杨兴明, 等. 烟草黑胫病拮抗菌的筛选及其生物效应[J]. *土壤学报*, 2011, 48(1):151-159.
- CAO Ming-hui, RAN Wei, YANG Xing-ming, et al. Screening of antagonist against tobacco black shank and biological of the strain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(1):151-159.
- [14] 江欢欢, 程凯, 杨兴明, 等. 辣椒青枯病拮抗菌的筛选及其生物防治效应[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6):1225-1231.
- JIANG Huan-huan, CHENG Kai, YANG Xing-ming, et al. Isolation and biological effect of *Capsicumwilt* antagonist[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6):1225-1231.
- [15] 刘会清, 张爱香, 马海莲, 等. 生防菌剂与生物有机肥复配对黄瓜抗病促生效果的研究[J]. *北方园艺*, 2011(5):1-4.
- LIU Hui-qing, ZHANG Ai-xiang, MA Hai-lian, et al. Study on the growth promoting and disease prevention effect of biological control fungus applying with organic fertilizer to cucumber in greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2011(5):1-4.
- [16] Siddiqui Z A, Futai K. Biocontrol of *Meloidogyne incognita* on tomato using antagonistic fungi, plant-growth-promoting rhizobacteria and cattle manure[J]. *Pest Management Science*, 2009, 65(9):943-948.
- [17] 朱震, 陈芳, 肖同建, 等. 拮抗菌生物有机肥对番茄根结线虫的防治作用[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4):1033-1038.
- ZHU Zhen, CHEN Fang, XIAO Tong-jian, et al. Controlling effect of antagonist bioorganic fertilizer on tomato root-knot nematode[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4):1033-1038.
- [18] Xun F, Xie B, Liu S, et al. Effect of plant growth-promoting bacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on oats in saline-alkali soil contaminated by petroleum to enhance phytoremediation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 22(1):598-608.
- [19] Yu Y L, Shan M, Fang H, et al. Responses of soil microorganisms and enzymes to repeated applications of chlorothalonil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(26):10070-10075.
- [20] Atkins S D, Clark I M, Pande S, et al. The use of real-time PCR and species-specific primers for the identification and monitoring of *Paecilomyces lilacinus*[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, 51(2):257-264.
- [21] Kiewnick S, Neumann S, Sikora R A, et al. Effect of *Meloidogyne incognita* inoculum density and application rate of *Paecilomyces lilacinus* strain 251 on biocontrol efficacy and colonization of egg masses analyzed by real-time quantitative PCR[J]. *Phytopathology*, 2011, 101(1):105-112.
- [22] Hashem M, Abo-Elyousr K A. Management of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* on tomato with combinations of different biocontrol organisms[J]. *Crop Protection*, 2011, 30(3):285-292.
- [23] 葛均青, 于贤昌, 王竹红. 微生物肥料效应及其应用展望[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3):87-88.
- GE Jun-qing, YU Xian-chang, WANG Zhu-hong. The function of microbial fertilizer and its application prospects[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3):87-88.
- [24] 杨丽娟, 李天来, 储慧霞, 等. 餐厨废弃物作堆肥对盆栽番茄产量及品质影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2010, 41(6):721-724.
- YANG Li-juan, LI Tian-lai, CHU Hui-xia, et al. Effect of food waste compost on tomato yield and quality[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(6):721-724.
- [25] 袁英英, 李敏清, 胡伟, 等. 生物有机肥对番茄青枯病的防效及对土壤微生物的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7):1344-1350.
- YUAN Ying-ying, LI Min-qing, HU Wei, et al. Effects of biological organic fertilizer on tomato bacterial wilt and soil microorganism[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7):1344-1350.
- [26] Alarez M B, Gagn S, Antoun H. Effect of compost on rhizosphere microflora of the tomato and on the incidence of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61(1):194-199.
- [27] Pascual J A, Garcia C, Hernandez T. Comparison of fresh and composted organic waste in their efficacy for the improvement of arid soil quali-

- ty[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 68(3):244-264.
- [28] Teles A P, Takahashi J A. Paecilomide: A new acetylcholinesterase inhibitor from *Paecilomyces lilacinus*[J]. *Microbiol Res*, 2013, 168(4):204-210.
- [29] Isaka M, Palasarn S, Lapanun S, et al. Paecilodepsipeptide A, an anti-malarial and antitumor Cyclohexadepsipeptide from the insect pathogenic fungus *Paecilomyces cinnamomeus* BCC 9616[J]. *J Nat Prod*, 2007, 70(4):675-678.
- [30] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期不同施肥制度下几种土壤微生物学特征变化[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4):891-899.
LI Juan, ZHAO Bing-qiang, LI Xiu-ying, et al. Changes of soil microbial properties affected by long-term fertilization regimes[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(4):891-899.
- [31] 高大翔, 郝建朝, 金建华. 重金属汞、镉单一胁迫及复合胁迫对土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):903-908.
GAO Da-xiang, HAO Jian-chao, JIN Jian-hua. Effects of single stress and combined stress of Hg and Cd on soil enzyme activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):903-908.
- [32] Roscoe R, Vasconcellos C A, Neto A. Urease activity and its relation to soil organic matter, microbial biomass nitrogen and urea-nitrogen assimilation by maize in a Brazilian Oxisol under no-tillage and tillage systems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(1):52-59.
- [33] Zhang Y M, Wu N, Zhou G Y. Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 30(3):215-225.
- [34] 孙薇, 钱勋, 付青霞. 生物有机肥对秦巴山区核桃园土壤微生物群落和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5):1224-1233.
SUN Wei, QIAN Xun, FU Qing-xia. Effects of bio-organic fertilizer on soil microbial community and enzymes activities in walnut orchards of the Qinling-Bashan region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5):1224-1233.
- [35] 吴凤芝, 赵凤艳, 谷思玉, 等. 保护地黄瓜连作对土壤生物化学性质的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2002, 18(1):19-22.
WU Feng-zhi, ZHAO Feng-yang, GU Si-yu, et al. Effect of the continuous cultivating cucumber on the bio-chemical properties of soil in the plastic greenhouse[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2002, 18(1):19-22.
- [36] 申进文, 沈阿林, 张玉亭, 等. 平菇栽培废料等有机肥对土壤活性有机质和土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4):631-636.
SHEN Jin-wen, SHEN A-lin, ZHANG Yu-ting, et al. Effects of different organic fertilizers on soil labile organic matter and enzyme activity[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4):631-636.
- [37] 张静, 杨江舟, 胡伟, 等. 生物有机肥对大豆红冠腐病及土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3):548-554.
ZHANG Jing, YANG Jiang-zhou, HU Wei, et al. Effect of biological organic fertilizer on soybean red crown rot and soil enzyme activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3):548-554.
- [38] 刘登义, 沈章军, 严密. 铜陵铜矿区凤丹根际和非根际土壤酶活性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7):1315-1320.
LIU Deng-yi, SHEN Zhang-jun, YAN Mi. Enzyme activities in *Paeoniaostii* rhizosphere and non-rhizosphere soil of Tongling copper mining[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7):1315-1320.
- [39] 陈娟, 何云晓, 冉琼. 重金属污染下土壤酶活性的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(21):10083-10084.
CHEN Juan, HE Yun-xiao, RAN Qiong. Progress of studies on soil enzyme activity under heavy metal contamination[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(21):10083-10084.