

接种方式对堆肥过程中功能菌定殖的影响

鄢海印¹, 刘可星^{1*}, 毛敬麟¹, 张俊涛², 廖宗文¹

(1.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2.广州市园林科学研究所, 广州 510405)

摘要:利用园林绿化废弃物添加磷矿粉,在堆肥前期、后期以及前后期分两次接种复合菌剂进行好氧堆肥,通过抗生素标记、选择性培养基方法,研究堆肥过程功能菌(解磷菌、拮抗菌)的定殖状况,分析堆肥产品的微生物群落功能多样性、解磷效果以及对青枯病菌的拮抗性能。结果表明:堆肥后期和分前后两次接种复合菌剂明显增加堆肥枯草芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌功能菌数量,而前期接种经过堆肥高温期,堆体功能菌数量锐减,表明功能菌定殖效果取决于是否后期接种;堆肥后期和分前后两次接种显著提高了堆肥的微生物群落功能多样性、堆肥水溶性磷和有效磷含量以及堆肥对青枯病菌拮抗性能。

关键词:接种方式;堆肥;枯草芽孢杆菌;胶质芽孢杆菌;磷矿粉

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)10-2039-07

Effects of Different Inoculation Methods on the Colonization of Functional Microorganisms During Composting

YAN Hai-yin¹, LIU Ke-xing^{1*}, MAO Jing-lin¹, ZHANG Jun-tao², LIAO Zong-wen¹

(1.College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Guangzhou Institute of Landscape Gardening, Guangzhou 510405, China)

Abstract: With the construction of ecological city, garden wastes increase rapidly. How to deal with the garden wastes becomes a challenge problem. Aerobic composting with high temperature is one of important technologies, which kills harmful organisms and recover from garden wastes. However, exploitation of new added value to the compost is of great significance for the development of this technology. In the paper, garden wastes and powder rock phosphate were used as the raw material. The composting with different inoculation methods (inoculating at the early stage, inoculating at the late stage and inoculating at both early stage and late stage) were carried out to study the colonization of functional microorganisms (phosphate-solubilizing bacteria, antagonistic bacteria), using the antibiotic mark and selective medium. The functional diversity of microbial structure, phosphate-releasing and antagonistic effects on the pathogen of bacterial wilt were analyzed. The results showed that, the temperature of the compost inoculated with functional microorganisms was high enough to kill pathogens. Inoculating at the late stage and at both early and late stages increased the quantities of *Bacillus subtilis* and *Bacillus mucilaginosus*, while inoculating at the early stage did not increase the quantities of functional microbe due to the high temperature. This indicates the late stage of composting was the critic time to inoculate for the colonization of functional microorganisms. Inoculating at the late stage and inoculating at both stages also significantly increased the functional diversity, water-soluble and bio-available phosphate, and the antagonistic effect on the pathogenic bacterial wilt. These results provide new evidence of functional microorganisms developed during composting and promote the application of the compost.

Keywords: inoculation method; compost; *Bacillus subtilis*; *Bacillus mucilaginosus*; rock phosphate

收稿日期:2012-02-13

基金项目:广东省教育部产学研结合项目(2010B090400159);广东省科技计划项目(2011A030600002)

作者简介:鄢海印(1986—),男,江西黎川人,硕士研究生,主要从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail:jxnyanhaiyin@163.com

* 通信作者:刘可星 E-mail:kxliu@scau.edu.cn

随着生态城市的建设,城市绿化面积不断扩大,园林绿化废弃物也相应增加,高温好氧堆肥是实现这类废弃物无害化、资源化处理的主要途径之一^[1-2]。废弃物自然堆肥腐熟存在发酵时间长、肥效低等问题,研究者通过调节物料粒径、水分、碳氮比等措施加快堆肥腐熟^[1-3]。在此基础上,研究发现接种单一、复合菌剂堆肥对于加快堆肥腐熟进程起着积极作用^[4-5],而且复合菌剂效果远好于单一菌株效果^[6-7],为此研究者利用养分促释菌、固氮菌、腐熟菌组合制备复合功能菌剂进行堆肥应用^[7-9]。由于堆肥过程复杂性,微生物接种时机掌握是影响堆肥效果的关键因素。堆肥中较高浓度的土著微生物会抑制接种微生物的生长繁殖,席北斗等^[10]提出了三阶段控温接种法堆肥,利用堆料高温降低其数量,降温后再接种复合微生物使其快速生长繁殖;党秋玲等^[11-12]采用多阶段强化接种技术,使接种菌剂更好地定殖于堆体中,提高堆体细菌、放线菌群落多样性,加快堆肥稳定化进程。然而研究者主要通过接种复合菌剂后堆肥微生物群落结构变化及其演替规律来评价其效果,侧重于堆肥腐熟功能研究^[12-14],而堆肥的其他功能如防病、养分活化等则较少涉及。对于堆肥的养分活化功能,主要侧重于研究有机废弃物添加磷矿粉的堆肥模式对堆肥产品中有效磷、水溶性磷含量的影响,而且发现堆肥接种解磷菌也可以提高堆肥产品中有效磷含量^[15-18],但缺少对解磷菌的最佳接种方式以及定殖情况的研究。此外,堆肥的防病功能备受关注,施用堆肥可以有效防治青枯病、枯萎病等土传病害^[19-21],而且发现防病效果与拮抗菌的定殖作用密切相关^[22]。因此,通过研究解磷菌、拮抗菌等功能菌在堆肥过程中的定殖情况,掌握功能菌的动态变化规律,将有助于发挥解磷、拮抗的作用,不仅可提升堆肥产品的肥效功能,还可增强堆肥的拮抗作用。

本文利用园林绿化废弃物和磷矿粉进行好氧堆肥,研究复合菌剂的接种方式对堆肥过程中功能菌(解磷菌、拮抗菌)定殖的影响,分析堆肥产品的微生物群落功能多样性、解磷效果以及对青枯病菌的拮抗性能,以期复合功能菌剂的研发及在堆肥中应用提供指导作用。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 堆肥物料

园林绿化废弃物由广州市园林基质厂提供,粉碎

过3 cm筛,其理化性质为全氮0.91%,全磷(P_2O_5)0.36%,全钾(K_2O)0.74%,有机质64.89%;磷矿粉的全磷为23.02%。

1.1.2 培养基

硅酸盐细菌培养基,牛肉膏蛋白胨培养基,PDA培养基。液体培养基为对应培养基不加琼脂,其余成分一致。

1.1.3 供试菌种

(1)功能菌:枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)由华南农业大学新肥料资源研究中心分离并保存,对青枯病原菌具有拮抗作用,采用利福平标记,方法参照文献[23],筛选得到稳定的抗利福平 $200\mu g\cdot mL^{-1}$ 的枯草芽孢杆菌。胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)由新肥料资源研究中心提供,经摇瓶发酵试验确定其解磷能力,该菌发酵液磷浓度为 $3.15\mu g\cdot mL^{-1}$,而对照仅为 $0.05\mu g\cdot mL^{-1}$ 。

(2)腐熟菌:绿色木霉(*Trichoderma viride*)、巨大芽孢杆菌(*Bacillus magaterium*)、酿酒酵母(*Saccharomyces revisiae*)、假丝酵母(*Candida tropicalis*)、解脲假丝酵母(*Candida famata*)均由新肥料资源研究中心提供,主要是腐熟作用。

1.1.4 复合菌剂制备

挑选单菌落菌种分别加入对应液体培养基中, $150r\cdot min^{-1}$, $28^{\circ}C$ 条件下发酵72 h,各菌体含量高于 $10^8cfu\cdot mL^{-1}$,各菌液按等比例混匀,制得复合菌剂。

1.1.5 主要仪器

WSS-411型温度计;ELX800型酶标仪;HI-RAYAMA灭菌锅;H2C-280恒温振荡培养箱;SPX智能型生化培养箱;奥林巴斯CX21RTSF显微镜;UV759型紫外-可见分光光度计。

1.2 方法

1.2.1 堆肥试验

堆肥于2011年6月—8月在广州市园林基质厂进行,堆肥共设4个处理:CK堆肥开始时接入0.3%(质量比,下同)灭菌复合菌剂;T1堆肥开始时接入0.3%复合菌剂;T2堆肥第39 d接入0.3%复合菌剂;T3堆肥开始时接入0.15%复合菌剂,第39 d接入0.15%复合菌剂。每处理为 $4m^3$ 园林绿化废弃物,按 $5kg\cdot m^{-3}$ 的比例加入磷矿粉,按 $2kg\cdot m^{-3}$ 比例加入尿素调节其C/N为(30~35):1,堆肥初期含水量调节至50%~60%,堆体成圆锥状堆置。

堆肥物料起堆后,将3支温度计沿堆体3个方向斜插入堆体的中下部,探头深度为50~55 cm。每天读

取堆体温度值,同时记录环境温度。分别于第 6、13、21、28、35、39、47 d 进行翻堆并取样,测定枯草芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌数量。堆肥于 53 d 结束,翻堆混匀后取样,鲜样进行 Biolog 分析、拮抗作用分析,风干样测定有效磷、水溶性磷。

1.2.2 测定方法

(1)功能菌测定:枯草芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌分别采用含利福平的牛肉膏蛋白胨、硅酸盐细菌选择性培养基,进行稀释平板法测定^[24]。

(2)Biolog 分析:按 Garland 等^[25]和杨永华等^[26]的方法,采用培养 72 h 的数据计算每孔颜色平均变化率(AWCD)和微生物群落功能多样性指数。

(3)拮抗作用测定:堆肥鲜样按水肥 10:1 比例,摇床(28 ℃, 150 r·min⁻¹)浸提 2 h,浸提液进行平板对峙青枯病菌实验,参照文献[27]。

(4)有效磷测定采用柠檬酸浸提-钒钼黄比色法,水溶性磷测定采用水浸提-钼锑抗比色法^[28]。

1.2.3 数据分析

数据多重比较分析采用 SAS 9.0 邓肯氏新复极差法,Biolog 方法 72 h 的测定数据标准化处理后,应用 SAS 9.0 对 31 种碳源做主成分分析。

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中温度变化

温度可以通过影响堆肥微生物种群及数量的变化,进而影响物质的分解和堆肥的进程,是判定堆肥能否达到无害化要求的最重要指标之一。从图 1 可以看出,堆肥的温度变化主要经历了快速升温、持续高温、缓慢降温 3 个阶段,图中多次温度急速下降是堆体翻堆的结果。起堆后,堆体温度迅速升高,第 2 d 就达到 65 ℃以上,主要原因是起堆后园林绿化废弃物在适宜含水量和碳氮比条件下微生物迅速生长繁殖,

产生大量热量,而且堆体较大,热量散失少。一般认为,堆肥内部的温度达到 55~65 ℃,且持续 5~10 d 可达到良好的灭菌效果,本次堆肥多次持续 55 ℃以上且超过 5 d,符合堆肥无害化标准。

2.2 枯草芽孢杆菌动态变化及堆肥的拮抗作用

枯草芽孢杆菌作为青枯病菌的拮抗菌,其定殖可以增加堆肥防病功能,而枯草芽孢杆菌数量影响堆肥的防病效果。

从图 2 可以看出,由于堆肥 CK 处理接种灭菌复合菌剂,并且堆肥过程中没有检出标记的枯草芽孢杆菌,图中没有堆肥 CK 的枯草芽孢杆菌数量变化。堆肥初期接入复合菌剂,枯草芽孢杆菌数量急剧下降,而且在堆肥 21、28 d 时,在含利福平 10⁻³ 的牛肉膏蛋白胨平板上未能检测出枯草芽孢杆菌,主要是由于堆肥第 2 d 温度迅速升高,达到 65 ℃以上,进入高温期,枯草芽孢杆菌不适合生长,大部分枯草芽孢杆菌死亡或处于休眠状态,高温期过后,随着温度的逐渐下降,处于休眠状态的芽孢开始生长,使枯草芽孢杆菌数量有所回升。这与兰时乐等^[8]研究高温堆肥微生物数量变化结果相似。主要原因是较高浓度的土著微生物会抑制接种微生物的生长繁殖^[10],堆肥高温环境

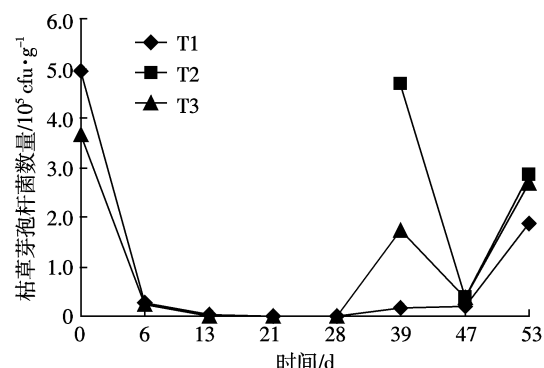


图 2 堆肥过程中枯草芽孢杆菌定殖状况

Figure 2 Variation curves of *Bacillus subtilis* during composting

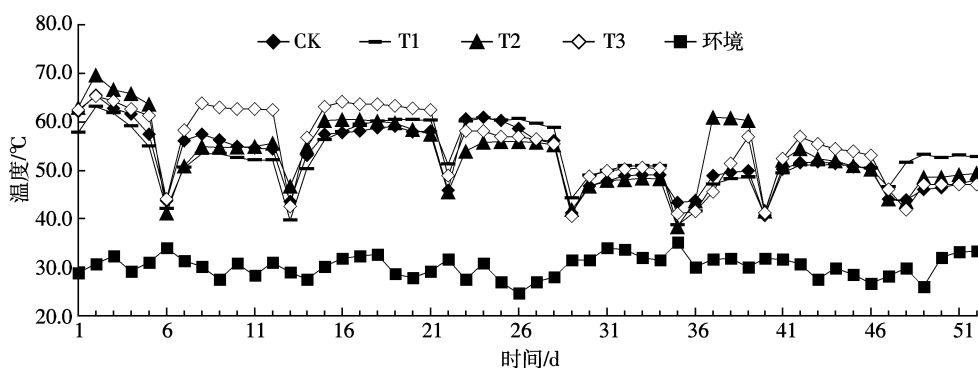


图 1 堆肥过程中温度变化

Figure 1 Variation curves of temperature during composting

也会引起大量接种微生物死亡^[8]。堆肥后期接种枯草芽孢杆菌数量变化也是先下降后上升,主要是接种枯草芽孢杆菌与堆体土著微生物竞争作用,适应堆体环境的结果,而且后期接种是堆肥降温期,有效避免了堆肥高温导致的菌体大量死亡。后期接种能在较短时间内适应堆体环境,然后数量迅速上升,堆肥结束,处理 T2、T3 枯草芽孢杆菌数量接近,明显高于处理 T1。因此,后期和分两次接种复合菌剂可以促进堆肥过程中枯草芽孢杆菌定殖,即枯草芽孢杆菌定殖效果取决于堆肥后期是否接种复合菌剂。

堆肥产品通过平板对峙实验,结果表明(表 1),接种灭菌复合菌剂堆肥产品(CK)对青枯菌无拮抗作用,而接种复合菌剂堆肥产品(T1、T2、T3)均对青枯菌有明显拮抗作用。处理 T2、T3 之间拮抗效果无显著性差异,但其拮抗效果明显强于处理 T1,主要是由于不同接种方式条件下枯草芽孢杆菌定殖差异引起的。有研究发现土壤中枯草芽孢杆菌与土传青枯病菌存在消长变化关系^[2],进一步说明枯草芽孢杆菌数量与防治青枯病有着密切关系。因此,接种复合菌剂堆肥具有防病功能,而且拮抗效果强弱取决于是否堆肥后期接种菌剂。

表 1 堆肥浸提液对青枯病菌抑制作用

Table 1 The antagonistic effects of different compost extraction on the pathogen of bacterial wilt

处理	CK	T1	T2	T3
抑制圈直径/cm	—	1.80±0.06b	4.40±0.06a	4.33±0.07a

注:“—”表示无抑制圈,同一行不同字母代表 Duncan's 多重比较差异显著($P \leq 0.05$)。

Note: “—” stand for no inhibition circle. Numbers with different letter in the same row show Duncan's significant differences at $P \leq 0.05$.

2.3 胶质芽孢杆菌动态变化及堆肥的解磷效果

从图 3 可以看出,由于堆肥 CK 处理接种灭菌复合菌剂,并且堆肥过程中没有在选择性培养基上检出胶质芽孢杆菌,因此图中没有堆肥 CK 的胶质芽孢杆菌数量变化。堆肥前期加入复合菌剂,胶质芽孢杆菌数量先急剧下降,与枯草芽孢杆菌变化趋势一致,主要是堆体高温影响的结果,堆肥后期,胶质芽孢杆菌数量逐渐上升。T2 在 39 d 加入复合菌剂后,胶质芽孢杆菌数量先下降后上升,与枯草芽孢杆菌变化趋势相似,主要是接入胶质芽孢杆菌与堆体土著微生物竞争作用,适应堆体环境的结果。后期接种是堆肥的降温期,有效避免堆肥高温导致菌体大量死亡。堆肥后期接入菌体能在较短时间内适应堆体环境,数量迅速上

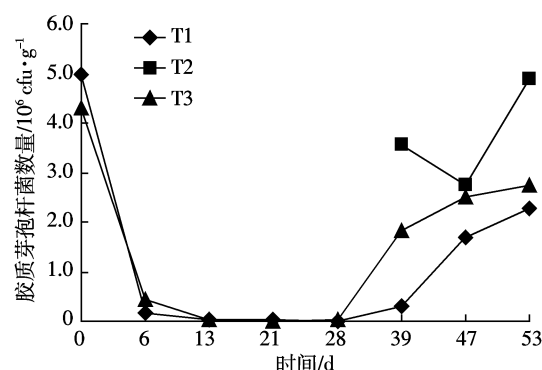


图 3 堆肥过程中胶质芽孢杆菌定殖状况

Figure 3 Variation curves of *Bacillus mucilaginosus* during composting

升,而处理 T1、T3 的胶质芽孢杆菌数量缓慢上升。堆肥结束的处理 T2 胶质芽孢杆菌数量最多,明显高于处理 T3、T1。因此,后期接种复合菌剂对堆肥过程中胶质芽孢杆菌定殖有益,而且胶质芽孢杆菌作为解磷菌,其定殖效果直接关系到磷矿粉分解作用。堆肥解磷作用为解决园林废弃物堆肥资源化可利用磷含量偏低的难题开拓了一条生物学途径,也为充分利用中低品位磷矿提供科学依据,而且解磷菌随堆肥施入土壤,还可以提高土壤磷利用率。

通过测定堆肥中水溶性磷、有效磷,分析胶质芽孢杆菌解磷作用。结果表明(表 2),与对照 CK 相比,接种复合菌剂处理(T1、T2、T3)水溶性磷、有效磷均显著提高。T2、T3 水溶性磷无显著差异,但显著高于前期接种处理 T1,处理 T2、T3、T1 与对照 CK 相比,水溶性分别增加 21.70%、15.83%、6.68%。分析有效磷可以看出,变化规律与水溶性磷变化规律基本一致,除了处理 T2 有效磷显著高于 T3,与对照 CK 相比, T2、T3、T1 有效磷分别增加 12.37%、5.03%、2.02%。因此,接种复合菌剂堆肥可以促进磷矿粉分解,提高堆肥中水溶性磷、有效磷含量,而且后期接种效果更佳,分两次接种效果次之。

表 2 堆肥产品水溶性磷及有效磷含量

Table 2 Water-soluble phosphate and available phosphate in the different composts

处理	水溶性磷/mg·kg ⁻¹	有效磷/g·kg ⁻¹
CK	171.198±3.975c	1.224±0.006c
T1	182.637±3.665b	1.249±0.001bc
T2	208.344±2.493a	1.376±0.033a
T3	198.294±2.890a	1.286±0.008b

注:同一列不同字母代表 Duncan's 多重比较差异显著($P \leq 0.05$)。

Note: Numbers with different letter in the same column show Duncan's significant differences at $P \leq 0.05$.

结合胶质芽孢杆菌定殖(图 3)分析,堆肥前期接种复合菌剂,胶质芽孢杆菌不适合高温环境、土著微生物竞争作用,数量锐减,堆肥前期几乎没有发挥解磷作用,胶质芽孢杆菌后期接入复合菌剂,定殖效果明显,解磷效果也相应增强。胶质芽孢杆菌数量与可溶性磷、有效磷含量具有一致性,即胶质芽孢杆菌数量对解磷效果起着关键作用。这进一步说明堆肥过程中微生物解磷效果可以通过接种时间把握,发挥其高效解磷作用。

2.4 堆肥微生物多样性分析

AWCD 可以衡量微生物利用不同碳源的整体能力,直接反映堆肥微生物的整体活性^[29]。Shannon index 评估群落物种丰富度和均匀度,表征微生物功能多样性^[26]。由表 3 可知,AWCD、Shannon index 变化规律具有一致性,接种复合菌剂处理(T1、T2、T3)显著大于对照 CK,处理 T2、T3 之间无显著差异,但显著大于 T1。表明堆肥接种复合菌剂可以显著提高微生物功能多样性,而且后期和分两次接种效果更佳。结合胶质芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌定殖分析也可以看出,功能菌数量增加对提高堆肥微生物多样性起着积极作用。

通过主成分分析可以在降维后的主元量空间中,用点的位置直观反映出不同堆肥微生物群落功能多

样性变化^[30]。由图 4 可知,不同处理点分布呈现明显分离,处理 T2、T3 分布在 PC1 轴正方向,T1、CK 位于 PC1 轴负方向,说明 T2、T3 堆肥微生物群落功能相似,前期接种复合菌剂处理 T1 与 T2、T3 存在很大差异,单独成为一种堆肥微生物群落功能,而未接种复合菌剂处理 CK 属于另一微生物群落功能,这与微生物多样性分析(表 3)结果相对应。有研究利用 Biolog 对土壤微生物群落进行主成分分析发现微生物多样性高的处理位于 PC1 正方向,还发现位于 PC1 正方向处理具有明显的防治土传病害效果^[21]。本研究堆肥 T2、T3 位于 PC1 正方向,结合堆肥拮抗青枯病菌效果(表 1),也说明位于 PC1 正方向堆肥对青枯菌具有明显拮抗效果,为堆肥防病提供科学依据和指导意义。

3 结 论

(1)园林绿化废弃物接种复合菌剂堆肥可以提高枯草芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌功能菌数量,且后期接种的定殖效果最佳,分两次接种的定殖效果次之。

(2)接种复合菌剂的园林绿化废弃物堆肥对青枯病菌具有明显的拮抗性能,而且后期和分两次接种的堆肥拮抗性能更显著。

(3)园林绿化废弃物接种复合菌剂可以增加堆肥解磷功能,提高堆肥中可利用磷含量,而且后期接种效果更优。

(4)园林绿化废弃物接种复合菌剂可以提高堆肥微生物总体活性及微生物群落功能多样性,而且后期和分两次接种效果更优,堆肥后期接种是其关键因素。

参考文献:

- [1] 孙克君,阮琳,林鸿辉. 园林有机废弃物堆肥处理技术及堆肥产品的应用[J]. 中国园林, 2009(4): 12-14.
SUN Ke-jun, RUAN Lin, LIN Hong-hui. The composting disposal of organic garden waste and the application of compost product[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2009(4): 12-14.
- [2] Fraser B S, Lau A K. The effects of process control strategies on composting rate and odor emission[J]. *Compost Science and Utilization*, 2000, 8(4): 274-283.
- [3] 李冰,王昌全,江连强,等. 化学改良剂对稻草猪粪堆肥氨气释放规律及其腐熟进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1653-1661.
LI Bing, WANG Chang-quan, JIANG Lian-qiang, et al. Effect of chemical amendments on NH_3 emissions and compost maturity during co-composting of pig manure and straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1653-1661.
- [4] 席北斗,刘鸿亮,孟伟,等. 高效复合微生物菌群在垃圾堆肥中的

表 3 不同处理堆肥微生物 AWCD 值和多样性指数

Table 3 AWCD and functional diversity indices of microbial communities in the different composts

处理	CK	T1	T2	T3
AWCD	0.848±0.015c	0.897±0.012b	1.026±0.012a	1.023±0.004a
Shannon index	3.157±0.010c	3.224±0.001b	3.272±0.008a	3.277±0.008a

注:同一行不同字母代表 Duncan's 多重比较差异显著($P \leq 0.05$)。

Note: Numbers with different letter in the same row show Duncan's significant differences at $P \leq 0.05$.

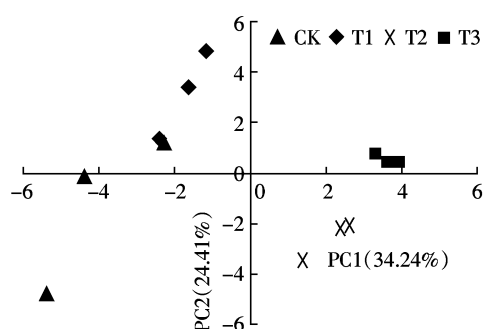


图 4 不同处理堆肥微生物群落功能主成分分析

Figure 4 Principal component analysis for metabolic function of microbial community in the different composts

- 应用[J]. 环境科学, 2001, 22(5):122-125.
- XI Bei-dou, LIU Hong-liang, MENG Wei, et al. Composting process of municipal solid waste with high effective complex microbial community[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2001, 22(5):122-125.
- [5] 殷中伟, 范丙全, 任 萍. 纤维素降解真菌 Y5 的筛选及其对小麦秸秆降解效果[J]. 环境科学, 2011, 32(1):247-252.
- YIN Zhong-wei, FAN Bing-quan, REN Ping. Isolation and identification of a cellulose degrading fungus Y5 and its capability of degrading wheat straw[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1):247-252.
- [6] Shin H S, Hwang E J, Park B S, et al. The effects of seed inoculation on the rate of garbage composting[J]. *Environmental Technology*, 1999, 20: 293-300.
- [7] 席北斗, 刘鸿亮, 孟 伟, 等. 垃圾堆肥高效复合微生物菌剂的制备[J]. 环境科学研究, 2003, 16(2):58-60.
- XI Bei-dou, LIU Hong-liang, MENG Wei, et al. Study on preparation technology of complex microbial community in composting process[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(2):58-60.
- [8] 兰时乐, 戴小阳, 李立恒, 等. 油菜秸秆和鸡粪高温堆肥中微生物数量变化研究[J]. 江苏农业科学, 2010(2):365-368.
- LAN Shi-le, DAI Xiao-yang, LI Li-heng, et al. Study on microorganism quantity changes during the composting of chicken manure and cole stalk under higher temperature[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010(2):365-368.
- [9] 胡春明, 姚 波, 席北斗, 等. 堆肥复合功能菌剂的优化组合研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(8):1039-1044.
- HU Chun-ming, YAO Bo, XI Bei-dou, et al. Study on optimized combination of complex functional bacteria in compost[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(8):1039-1044.
- [10] 席北斗, 孟 伟, 刘鸿亮, 等. 三阶段控温堆肥过程中接种复合微生物菌群的变化规律研究[J]. 环境科学, 2003, 24(2):152-155.
- XI Bei-dou, MENG Wei, LIU Hong-liang, et al. The variation of inoculation complex microbial community in three stages MSW composting process controlled by temperature[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(2):152-155.
- [11] 席北斗, 党秋玲, 魏自民, 等. 生活垃圾微生物强化堆肥对放线菌群落的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊):227-231.
- XI Bei-dou, DANG Qiu-ling, WEI Zi-min, et al. Effects of microbial inoculants on actinomycetes communities diversity during municipal solid waste composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(Suppl):227-231.
- [12] 党秋玲, 李鸣晓, 席北斗, 等. 堆肥过程多阶段强化接种对细菌群落多样性的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(9):2689-2695.
- DANG Qiu-ling, LI Ming-xiao, XI Bei-dou, et al. Effects of multi-stage strengthening inoculation on bacterial community diversity during composting[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(9):2689-2695.
- [13] 喻 曼, 肖 华, 张 棋, 等. PLFA 法和 DGGE 法分析堆肥细菌群落变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6):1242-1247.
- YU Man, XIAO Hua, ZHANG Qi, et al. Changes of bacterial communities in composting by PLFA and DGGE methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6):1242-1247.
- [14] 党秋玲, 刘 驰, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥过程中细菌群落演替规律[J]. 环境科学研究, 2011, 24(2):236-241.
- DANG Qiu-ling, LIU Chi, XI Bei-dou, et al. Dynamic succession law of bacterial communities during domestic waste composting[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(2):236-241.
- [15] Badr M A, Taalab A S. Release of phosphorus from rock phosphate through composting using organic materials and its effect on corn growth[J]. *Bulletin of the National Research Centre (Cairo)*, 2005, 30(6):629-638.
- [16] 魏自民, 王世平, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥对难溶性磷有效性的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3):679-683.
- WEI Zi-min, WANG Shi-ping, XI Bei-dou, et al. Effect of municipal solid waste composting on availability of insoluble phosphate[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3):679-683.
- [17] Nishanth D, Biswas D R. Kinetics of phosphorus and potassium release from rock phosphate and waste mica enriched compost and their effect on yield and nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Biore-source Technology*, 2008(99):3342-3353.
- [18] 魏自民, 席北斗, 王世平, 等. 高温解磷菌对堆肥所添加难溶性磷素转化的试验研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7):2073-2076.
- WEI Zi-min, XI Bei-dou, WANG Shi-ping, et al. Phosphate transform of composting with pre-mixing insoluble phosphate using high temperature dissolved phosphorus microbes inoculation[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7):2073-2076.
- [19] Termorshuizen A J, E van Rijn, vander Gaag D J, et al. Suppressiveness of 18 composts against 7 pathosystems: Variability in pathogen response[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006(38):2461-2477.
- [20] Gina M, Edurise Escudra, Yoshimiki Amemiya. Suppression of *Fusarium wilt* of spinach with compost amendments[J]. *J Gen Plant Pathol*, 2008(74):267-274.
- [21] 谭兆赞, 徐广美, 刘可星, 等. 不同堆肥对番茄青枯病的防病效果及土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2009, 40(2):10-14.
- TAN Zhao-zan, XU Guang-mei, LIU Ke-xing, et al. Effects of different composts on control of tomato bacterial wilt and soil microbial functional diversity[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2009, 40(2):10-14.
- [22] 肖相政, 刘可星, 廖宗文, 等. 枯草芽孢杆菌 X-4 对土壤青枯菌消长变化及防病效果的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(12):2425-2428.
- XIAO Xiang-zheng, LIU Ke-xing, LIAO Zong-wen, et al. Effect of inoculating *Bacillus subtilis* X-4 on *Ralstonia solanacearum* in soil and controlling tomato bacterial wilt[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(12):2425-2428.
- [23] 杜立新, 冯书亮, 曹克强, 等. 枯草芽孢杆菌 BS-208 和 BS-209 菌株在番茄叶面及土壤中定殖能力的研究[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(6):78-82.
- DU Li-xin, FENG Shu-liang, CAO Ke-qiang, et al. Study on colonization of *Bacillus subtilis* strains BS-208 and BS-209 on phylloplane of tomato and soil[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2004, 27(6):78-82.
- [24] 李振高, 骆永明, 滕 应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学

- 出版社, 2008:90-91.
- LI Zhen-gao, LUO Yong-ming, TENG Ying. The methods for studying soil and environmental microbial biomass[M]. Beijing: Science Press, 2008:90-91.
- [25] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1991, 57:2351-2359.
- [26] 杨永华, 姚 健, 华晓梅. 农药污染对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2000, 20(2):23-25.
- YANG Yong-hua, YAO jian, HUA Xiao-mei. Effect of pesticide pollution against functional microbial diversity in soil[J]. *Journal of Microbiology*, 2000, 20(2):23-25.
- [27] 黎志坤, 朱红惠. 一株番茄青枯病生防菌的鉴定与防病、定殖能力[J]. 微生物学报, 2010, 50(3):342-349.
- LI Zhi-kun, ZHU Hong-hui. Identification, colonization and disease prevention capacity of an antagonistic bacterium against *Ralstonia solanacearum*[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2010, 50(3):342-349.
- [28] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Science and Technology of China Agriculture Press, 2000.
- [29] 王 强, 戴九兰, 吴大千, 等. 微生物生态研究中基于 Biolog 方法的数据分析[J]. 生态学报, 2010, 30(3):817-823.
- WANG Qiang, DAI Jiu-lan, WU Da-qian, et al. Statistical analysis of data from Biolog method in the study of microbial ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3):817-823.
- [30] 席劲瑛, 胡洪营, 钱 易. Biolog 方法在环境微生物群落研究中的应用[J]. 微生物学报, 2003, 43(1):138-141.
- XI Jin-ying, HU Hong-ying, QIAN Yi. Application of Biolog system in the study of microbial community[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2003, 43(1):138-141.