

肖礼, 黄懿梅, 赵俊峰, 等. 外源菌剂对猪粪堆肥质量及四环素类抗生素降解的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 172-178.

XIAO Li, HUANG Yi-mei, ZHAO Jun-feng, et al. Effects of exogenous microbial agents on pig manure compost quality and tetracycline antibiotic degradation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 172-178.

外源菌剂对猪粪堆肥质量及四环素类抗生素降解的影响

肖礼, 黄懿梅*, 赵俊峰, 周莉娜

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了探讨不同外源菌剂组合对猪粪秸秆堆肥质量及猪粪中四环素类抗生素的降解影响,以猪粪为原料,秸秆为调理剂,分别设置了不加菌剂处理(CK)、添加白腐真菌处理(F)以及同时添加白腐真菌、氨化和硝化菌剂(FAN)三个处理,在自制的长方体翻转式好氧堆肥反应器中进行了猪粪秸秆的堆肥化模拟试验。通过定期采样,分析了堆肥的基本物理性质、氮素形态和其中有机碳(OC)、全磷(TP)、全钾(TK)和四环素(TC)与土霉素(OTC)含量的变化。结果显示:菌剂添加处理(F和FAN)对堆肥腐熟(种子发芽率)影响不大,但促进了堆肥中有机碳降解及全磷和全钾的增加,单一白腐真菌处理下的铵态氮的损失最小($0.24\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$);四环素和土霉素的浓度随堆肥时间显著下降,经过42 d两种抗生素降解率达90%以上(OTC、TC浓度 $<5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);白腐真菌起到加速堆肥中四环素降解的作用。

关键词:外源菌剂;土霉素;四环素;堆肥

中图分类号:X705 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)01-0172-07 doi:10.11654/jaes.2016.01.023

Effects of exogenous microbial agents on pig manure compost quality and tetracycline antibiotic degradation

XIAO Li, HUANG Yi-mei*, ZHAO Jun-feng, ZHOU Li-na

(Key Laboratory of Plant Nutrition and The Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Microbes have important impacts on composting of animal waste, thus influencing compost quality. An experiment was conducted to investigate the effects of different exogenous microbial agent combinations on pig manure-straw composting and tetracycline antibiotic degradation. A forced ventilation pig manure-straw composting box was employed. Three microbial treatments included: no exogenous microbial agent (CK), white rot fungi (F), and combined white rot fungi, ammonification and nitrification bacteria (FAN). Samples were collected from each treatment at different composting time. Basic physical properties, nitrogen, carbon, total phosphorus, total potassium and tetracycline and oxytetracycline content were determined. Results showed that the addition of foreign microbial agents (F and FAN) had little effect on the maturity of the pig manure-straw compost indicated by seed germination rate, but increased degradation of organic carbon in the compost as well as total phosphorus and potassium content. Of three treatments, the loss of ammonium nitrogen was the lowest ($0.24\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) in the F treatment. The concentrations of tetracycline (TC) and oxytetracycline (OTC) decreased significantly ($P<0.05$) over the time. On the 42nd day of composting, the content of both OTC and TC was lower than $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and their degradation rates were greater than 90%. The addition of white rot fungus accelerated the degradation of tetracycline to some extent.

Keywords: exogenous agents; oxytetracycline; tetracycline; composting

收稿日期: 2015-06-11

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD15B04-4-3); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(QN2013072)

作者简介: 肖礼(1990—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境工程。E-mail: xiaoli047@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者: 黄懿梅 E-mail: ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

微生物是堆肥化过程中降解有机质的主体,氮素生理群参与堆肥中的主要氮素循环过程,包括氨化作用、硝化作用、反硝化作用、无机氮固定作用等,使堆肥原料中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和有机氮(Org-N)等发生变化,从而影响到堆肥过程中的氮素损失与堆肥质量^[1]。微生物菌剂在堆肥中的使用能够起到保氮促腐的作用。氨化细菌能够加速堆肥腐熟,但同时会加大氮素通过氨气挥发的形式损失^[2];白腐真菌能降解各种结构相异的化学物质,包括在环境中持久且难以处理的污染物,且于固、液环境下均能生长,有着其他微生物所不具备的优点,因而在环境保护与环境治理方面显示出较大的应用潜力^[3]。但是,目前将白腐真菌与氮素生理群一起应用于堆肥过程中,探讨堆肥中物质转化特征和堆肥质量的研究报道较少。另外,由于兽用抗生素的消耗量在我国较大^[4],其潜在生态健康风险不容忽视。尽管研究表明^[5],堆肥能有效去除畜禽粪便中的四环素类抗生素残留,但关于外源微生物菌剂对畜禽粪便中四环素类抗生素残留在堆肥过程中变化的影响还不清楚。本文拟在长方体翻转式好氧堆肥反应器中,研究添加不同外源菌剂后猪粪和麦秆堆肥过程中堆肥质量和四环素含量的动态变化特征,为利用堆肥技术消除四环素类抗生素的残留,提高堆肥质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 堆制材料与装置

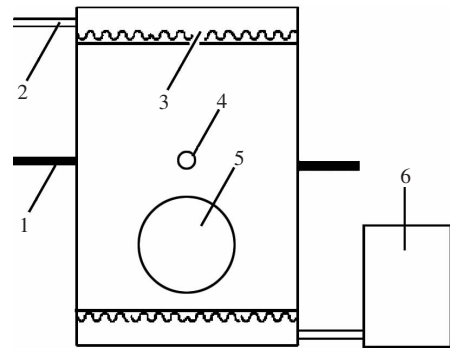
新鲜猪粪采自于西北农林科技大学生态养殖场,小麦秸秆剪碎成段(3~5 cm),各原料的基本性状见表1。氨化细菌和亚硝化细菌菌种由猪粪堆肥分离培养而得^[6],白腐真菌是从菌种库购买的黄孢原毛平革菌。使用前先将菌种在 28 ℃ 条件下活化 24 h,加入灭菌水制备成菌悬液。菌悬液接种于固体培养基上,涂布均匀并于 28 ℃ 扩增 48 h。选生长良好且无杂菌的培养基刮下菌体制备菌悬液,每 7 皿 100 mL。

堆肥试验装置为自行设计的长方体翻转式好氧堆肥反应器,如图1所示。外形尺寸为 0.40 m×0.40 m×

表 1 堆肥原料基本性状

Table 1 Basic properties of composting materials

堆制原料 Composting material	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Organic carbon	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Total nitrogen	含水率/% Moisture content	碳氮比 C/N
猪粪 Pig manure	455.0±0.7	30.9±0.7	66.9	14.7
秸秆 Wheat straw	421.6±0.5	6.0±0.6	13.5	70.1



1.转轴;2.排气孔;3.布气系统;4.测温孔;5.进料口;6.通风自控系统

图 1 堆肥反应器示意图

Figure 1 Schematic diagram of composting reactor

0.70 m,用厚度为 1.0 cm 的 PVC 板焊接,有效容积为 0.10 m^3 ,并包裹 4.0 cm 厚泡沫塑料板作为保温层。

1.2 试验设计与样品采集

试验设置三个处理。对照(CK):猪粪与秸秆按 10:1 比例混合,总重控制在 22 kg,装满但不压实,水分控制在 65%左右进行堆制,在高温期后(第 22 d)加 100 mL 蒸馏水。加白腐真菌处理(F):物料配比和水分控制同 CK,在堆肥高温期后投加白腐真菌菌剂 100 mL。加混合菌剂处理(FAN):物料配比和水分控制 CK,在高温期后添加白腐真菌、氨化细菌和硝化细菌混合菌剂共 100 mL。

各处理从 2013 年 4 月 15 日到 5 月 27 日共堆制 42 d。堆制期间每天上、下午用 XMT616 智能温度测定仪分别于堆体上部、中部、下部测定温度,取平均值作为当天的堆温,并以约 60 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流量从底部筛板向堆体均匀充气,通风时间根据堆温调节,一般情况下每天上、下午各通风 30 min,当堆温超过 65 ℃ 时,加大通风量。

根据温度变化分别于第 0、7、15、22、30、42 d 取样。先将堆体充分摇匀,然后多点取样,混合成三份平行样,每份样品总量控制在 500 g 左右,其中 200 g 保存于 -20 ℃ 冰箱,用于液体浸提液提取测定 pH、电导率、种子发芽率,其余风干粉碎后过 1 mm 筛存储备用。

1.3 测定项目及方法

pH 值和电导率分别用配有 IntelLical pH 电极和电导率电极的 HQ 测定仪测定;种子发芽指数(GI)利用浸提液在 28 ℃ 培养小白菜种子(四季小白菜)的方法进行测定^[7]。

进行堆肥铵态氮与硝态氮测定时,先用 1.0 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液浸提,由适量浸提液在定氮仪上直接蒸馏定氮测定铵态氮,然后向适量浸提液中加入 1 g

Zn-FeSO₄ 混合加速剂并在定氮仪上测出速效氮,再减去铵态氮即得到硝态氮的含量。全氮用硫酸-H₂O₂ 消煮,定氮仪测定;有机碳用重铬酸钾外加加热法测定;总磷用硫酸-H₂O₂ 消煮,钒钼黄分光光度法^[8]测定;四环素类抗生素采用 SPE-HPLC 法测定^[9]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 统计分析软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)以及多重比较,运用 Excel 2013 处理数据和 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 堆肥温度、pH 值、电导率和发芽指数的变化

对于堆肥系统而言,温度是堆料中微生物生命活动的重要标志,堆肥的目的是为了使堆体温度快速上升,并在适宜的温度维持一段时间,从而使有机物降解并杀死其中的病原体。由图 2 可以看出,CK、F 以及 FAN 处理的温度变化有所不同:前两种处理在第 2 d、FAN 处理在第 4 d 达到了 50℃以上,而后随着环境温度的变化有所下降,在第 11 d 后再次达到了 50℃以上(50~55℃),且分别持续了 7、9、8 d。三种处理的高温期主要出现在第 0~5 d 和第 11~19 d。添加菌剂后,在堆肥的第 34 d, F 处理温度又上升到 45℃并持续了 3 d。根据国标《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—2012),各处理在堆肥结束时均达到了无害化的基本要求。

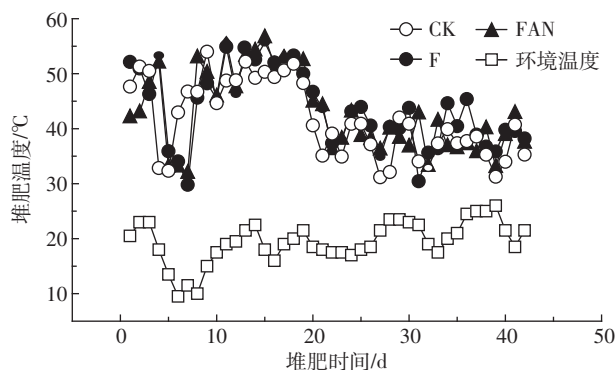
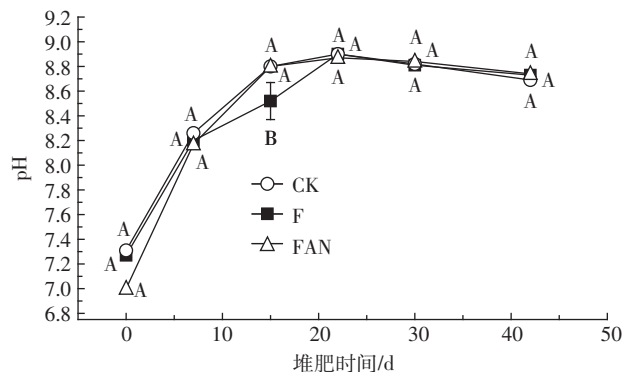


图2 堆肥温度的变化

Figure 2 Changes of temperature during composting

由图 3 可知,堆肥前 20 d 三个处理 pH 值均随着温度的升高迅速上升,由初始的 7.0~7.31 增加到 8.69~8.74,增加了 1.4~1.6 个单位。此后随着时间延续各处理 pH 均略有下降,至堆肥结束 CK、F、FAN 三个处理的 pH 分别为 8.69、8.73、8.74,添加菌剂对 pH 没有明显影响。



不同大写字母代表同一时期不同处理之间的差异显著($P < 0.05$)。下同
Data with different capital letters are significantly different between different treatments at 0.05 level. The same below

图3 堆肥 pH 的变化

Figure 3 Changes of pH during composting

图 4 显示各处理电导率随着堆肥进行呈现出波动变化。在第 30 d, F 和 FAN 处理的电导率低于 CK, 以后各处理电导率均下降, 至堆肥结束 CK、F、FAN 三个处理电导率分别为 2.45、2.92、2.63 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 均小于《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—2012)给出的腐熟堆肥的电导率值($> 4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), 可以安全施用。

图 5 是三个处理种子发芽率的变化, 总体上呈现升高的趋势, 至第 15 d, 三个处理(CK、F、FAN)的发芽率分别为 80.6%、72.6%、75.3%; 而在第 22 d 各处理的 GI 大幅下降, 可能与堆肥中产生有机酸等对植物种子有毒害的物质有关; 此后随着堆肥的继续进行有毒物质消失, GI 又开始增加, 至堆肥结束各处理(CK、F、FAN)GI 分别为 83%、85%、82%。

2.2 不同菌剂处理堆肥中养分含量的动态变化

各处理铵态氮含量变化如图 6 所示, 整体上呈现先升高后降低的趋势。在堆肥第 15 d 达到最高值, 三

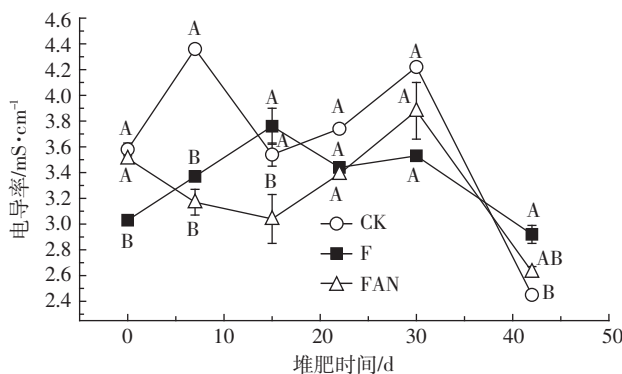


图4 堆肥电导率的变化

Figure 4 Changes of electrical conductivity during composting

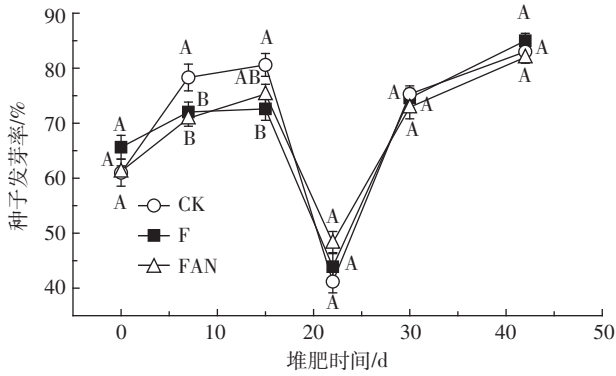


图5 种子发芽率的变化

Figure 5 Changes of seed germination rate during composting

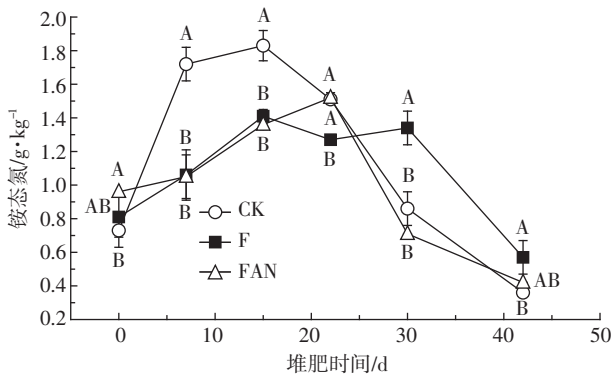


图6 铵态氮的变化

Figure 6 Changes of ammonium nitrogen content during composting

个处理(CK、F、FAN)铵态氮最大值分别为1.83、1.41、1.52 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。至堆肥结束各处理铵态氮含量分别为0.36、0.57、0.42 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与初期相比分别降低了0.37、0.24、0.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，降幅分别为50.7%、29.2%、56.3%，添加白腐真菌菌剂铵态氮降低幅度小于其他两个处理。

三个处理(CK、F、FAN)全氮含量(图7)均呈下降趋势，至堆肥结束分别为12.89、18.82、14.02 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与初始相比分别降低了10.50、8.03、10.95 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，降幅分别为44.9%、29.9%、43.8%。添加白腐真菌菌剂全氮降低幅度小于其他两个处理。

三个处理(CK、F、FAN)全钾含量(图8)一直呈上升趋势，堆肥结束分别为126.30、124.07、130.32 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，分别比初始增加了99.74%、128.4%、93.03%。这也在一定程度上说明，高温后期添加混合菌剂对全钾影响不大，与空白处理基本一致。

如图9所示，全磷(TP)含量均呈上升趋势。有机物质在高温期降解速率最大，干物质减少较快，因此

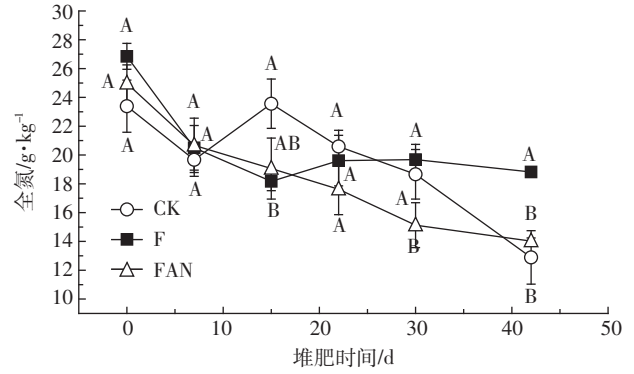


图7 全氮的变化

Figure 7 Changes of total nitrogen content during composting

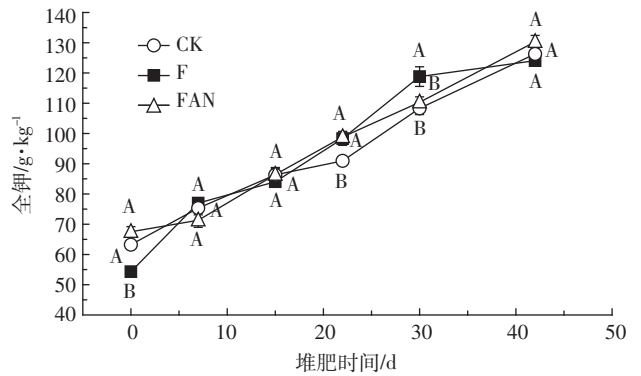


图8 全钾的变化

Figure 8 Changes of total potassium during composting

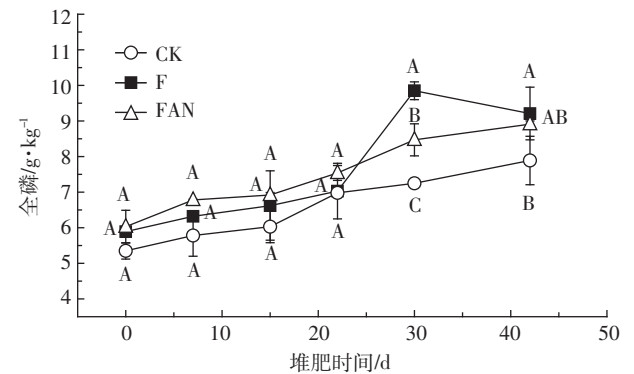


图9 全磷的变化

Figure 9 Changes of total phosphorus during composting

TP含量增加。在高温后期添加菌剂后，F处理在第30 d有一个峰值，TP含量达到了9.85 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在第22~42 d，三个处理(CK、F、FAN)的全磷增加率分别为13%、31%、18%。至堆肥结束时，三个处理的TP含量依次为7.89、9.21、8.91 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，分别比堆肥开始时增加了47.48%、56.37%、47.76%。

2.3 不同菌剂处理堆肥中四环素类抗生素以及有机碳的动态变化

抗生素在堆肥过程中的变化趋势如图 10、图 11 所示。堆肥试验开始时,猪粪堆肥中 OTC 的初始浓度约为 $33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, TC 的初始浓度约为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,堆肥开始后,OTC、TC 浓度均迅速降低,且浓度变化趋势相似。前 7 d,土霉素和四环素的降解速度最快,三个处理(CK、F、FAN)的土霉素降解率分别为 32.8%、42.5%、48.9%,四环素的降解率分别为 42.1%、47.9%、44.8%。高温后期添加菌剂后,第 22~30 d, F、FAN 及 CK 四环素的降解率分别为 42.3%、42.7%、33.6%。到堆肥后期,土霉素和四环素的含量趋于稳定,其值均小于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。三个处理(CK、F、FAN)土霉素和四环素的去除率分别为 86.5%、92.4%、91.3%和 92.5%、95.0%、94.8%。

三个处理(CK、F、FAN)有机碳的变化(图 12)一直呈下降趋势,堆肥结束时分别为 309.60、325.48、307.10 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与初始值比分别降低 22.7%、26.9%、27.2%。与对照相比,混合菌剂处理的有机碳降解量更多。

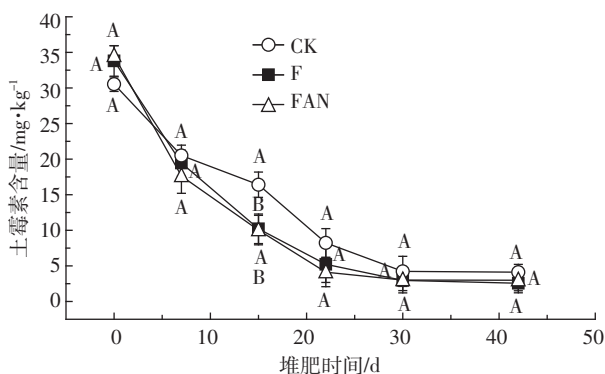


图 10 土霉素含量变化

Figure 10 Changes of oxytetracycline during composting

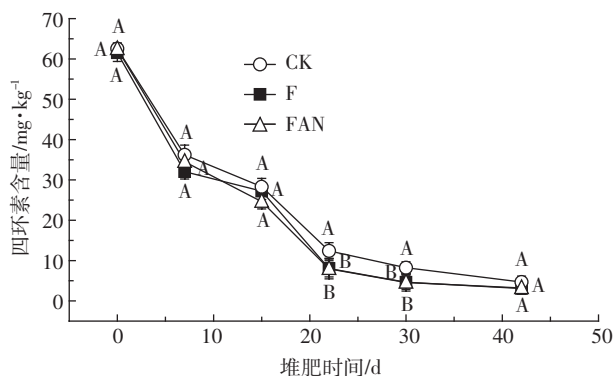


图 11 四环素含量变化

Figure 11 Changes of tetracycline during composting

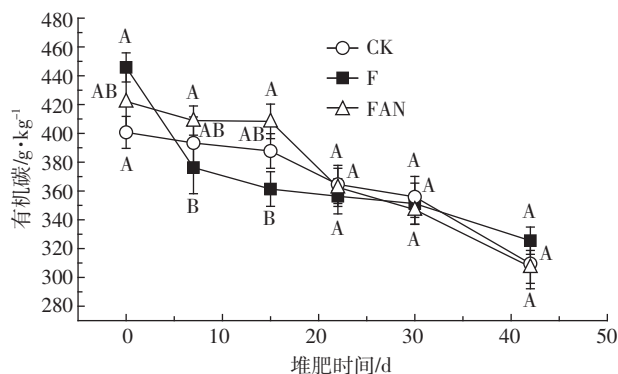


图 12 有机碳的变化

Figure 12 Changes of organic carbon during composting

3 讨论

3.1 外源菌剂对堆肥养分含量的影响

堆肥过程中,有机氮化物分解产生氨气,氨气溶于堆体物料形成铵态氮主要是通过微生物的氨化作用^[10]。堆体的 pH 值、通气条件、温度以及氨化、硝化和反硝化微生物活性等影响着铵态氮含量。在堆肥过程中,铵态氮不仅作为细胞生长的氮源供微生物同化,同时能被硝化微生物转变成硝态氮^[11],并且发生反硝化从而脱氮损失^[12],另外还可以通过氨气挥发的途径损失^[13]。有研究发现,在堆肥中添加微生物菌剂能够减少氮素损失、提高堆肥肥效,还可以加快发酵进程以及有机物质分解转化、提高堆体温度,从而达到无害化处理要求^[14]。铵态氮会随着有机质的矿化而增加,峰值出现在高温阶段,随后迅速下降。从本实验结果可以看出,铵态氮呈先上升后下降的趋势,在高温后期添加菌剂后,单添加白腐真菌处理(F)的氨氮有一个上升的小峰值。这有可能是白腐真菌加速了木质素、纤维素分解,提高堆肥氮素含量,并且促进了堆肥过程中磷的可溶性^[15]。另外,接种白腐菌能够促进氮源转化为硝态氮,降低氮源向铵态氮的转化,减少氮的挥发,从而降低氮素的损失,提高堆肥质量^[16]。随着时间延长,堆肥的全氮含量总体呈现下降趋势,研究表明在有机废物堆肥过程中的氮损失达 16%~76%,其中绝大部分是由氨挥发所致^[17]。本试验过程中,堆体无渗沥液产生,所以气态形式逸出的氮应是堆肥全部的氮损失,三个处理(CK、F、FAN)的全氮损失率分别为 44.8%、29.9%、43.8%,可以看出添加白腐真菌有利于保存氮素。同时,单独添加白腐真菌处理在后期有增氮趋势,再次证明白腐真菌能够提高堆肥氮素含量^[18]。全磷和全钾含量在堆肥过程中的变化趋势相同,均随着有机质的降解呈逐步增加的趋势^[16],

三种处理之间全钾的变化没有差异,而在高温后期添加菌剂,处理F的全磷含量第30 d有一个峰值,达到了 $9.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在第22~42 d,三种处理的全磷增加率分别为13%、31%、18%,可见添加白腐真菌后堆肥中磷的含量增加更多。

3.2 外源菌剂对堆肥无害化和稳定性的影响

相关研究表明,接种外源微生物菌剂的处理堆肥升温速度较CK快,且接种外源微生物菌剂能够提高堆肥高温期的温度^[19]。从本实验可以看出,CK、F以及FAN处理所产生的温度变化有所不同,添加菌剂后,在堆肥第34 d,F处理温度再次上升,达到45℃并持续了3 d。一般认为,种子发芽指数(GI)是评价堆肥是否达到无害化和稳定性的生物学指标^[20],本试验堆肥结束时,CK、F、FAN的GI值分别为83%、85%、82%,EC值分别为2.45、2.92、2.63 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,达到了农用标准^[21]。在堆肥过程中,碳源是微生物利用的能源,碳的变化是堆肥化过程的基本特性之一^[22],在CK、F、FAN处理中,有机碳分别降低了22.7%、26.9%、27.2%,F、FAN处理的有机碳降解率大于CK处理。这是由于堆料中接种白腐菌菌剂,可分解堆体中难降解的有机物木质素,促进纤维素的降解,从而加速堆肥进程,使堆肥原料中有机物降解得更为彻底^[23]。

有相关研究表明^[24],残留的四环素类抗生素在堆肥过程中均能被迅速降解。在本研究中,抗生素在堆肥前期降解速度较快,前15 d土霉素和四环素的降解率都达到了50%以上。这与孙刚等^[18]的研究相似,也进一步说明了堆肥有利于抗生素的降解。不添加四环素类抗生素、添加四环素类抗生素及增加BM菌剂的3个不同堆肥处理对四环素类抗生素的降解效果不同,但总体去除残留的趋势一致^[5]。本实验中,三种处理之间对四环素和土霉素的最终降解影响不明显,但是在添加菌剂后,F和FAN处理能加速四环素的降解,第22~30 d,F、FAN及CK四环素的降解率分别为42.3%、42.7%、33.6%。这可能是由于白腐菌产生的天然木质素过氧化物酶和锰过氧化物酶在体外对四环素有很强的降解能力^[25]。

4 结论

添加白腐真菌、硝化细菌、氨化细菌能够提高氮素的含量,后期添加白腐真菌使堆肥在温度的稳定期上升到45℃,并且持续3 d。两种添加菌剂的处理对堆温、电导率均产生一定的影响。单独添加白腐真菌菌剂处理其氮损失量最小,有利于氮素保存。白腐真

菌在一定程度上能够加速抗生素的降解,进一步研究白腐真菌在堆肥中的作用是大有前景的。

参考文献:

- [1] 刘学玲,黄懿梅,姜继韶,等.微生物生理群在猪粪秸秆高温堆肥碳氮转化中的作用[J].环境工程学报,2012,6(5):1713-1720.
LIU Xue-ling, HUANG Yi-mei, JIANG Ji-shao, et al. Function of microbial physiological group in carbon and nitrogen transformation during a swine manure-straw compost[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(5): 1713-1720.
- [2] 王立群,肖维伟,曹立群,等.好氧反硝化细菌的筛选及其在鸡粪发酵氮素转化中的作用[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2494-2498.
WANG Li-qun, XIAO Wei-wei, CAO Li-qun, et al. Screening of aerobic denitrifiers and their function in nitrogen transformation of aerobic composting of chicken manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2494-2498.
- [3] 黄丹莲,曾光明,黄国和,等.白腐菌的研究现状及其在堆肥中的应用展望[J].微生物学通报,2004,31(2):112-116.
HUANG Dan-lian, ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, et al. Recent research on white-rot fungi and its expected application in composting[J]. *Microbiology China*, 2004, 31(2): 112-116.
- [4] 张浩,罗义,周启星.四环素类抗生素生态毒性研究进展[J].农业环境科学学报,2008,27(2):407-413.
ZHANG Hao, LUO Yi, ZHOU Qi-xing. Research advancement of ecotoxicity of tetracycline antibiotics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 407-413.
- [5] 张树清,张夫道,刘秀梅,等.高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用[J].中国农业科学,2006,39(2):337-343.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Degradation of antibiotics and passivation of heavy metals during thermophilic composting process[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 337-343.
- [6] 刘学玲.猪粪高温堆肥中氮转化复合微生物菌剂及其保氮机理的研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2012.
LIU Xue-ling. Study on microbe consortium of N transformation and its mechanism for N conservation of a swine manure straw compost [D]. Yangling: North West A&F University, 2012.
- [7] 杨国义,夏钟文,李芳柏,等.不同通风方式对猪粪高温堆肥氮素和碳素变化的影响[J].农业环境科学学报,2003,22(4):463-467.
YANG Guo-yi, XIA Zhong-wen, LI Fang-bai, et al. Transformation of nitrogen and carbon during pig manure composting under different aeration modes at high-temperature[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(4): 463-467.
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
BAO Shi-dan. Agrochemical soil analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [9] 孙刚,袁守军,彭书传,等.固相萃取-高效液相色谱法测定畜禽粪便中的土霉素、金霉素和四环素[J].环境化学,2010,29(4):739-743.
SUN Gang, YUAN Shou-jun, PENG Shu-chuan, et al. Determination of

- oxytetracycline, tetracycline and chlortetracycline in manure by spectrophotometric method[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(4):739-743.
- [10] 黄向东, 韩志英, 石德智, 等. 畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1):247-254.
HUANG Xiang-dong, HAN Zhi-ying, SHI De-zhi, et al. Nitrogen loss and its control during livestock manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):247-254.
- [11] Cegarra J, Alburquerque J A, Gonzlez J, et al. Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") managed by mechanical turning[J]. *Waste Management*, 2006, 26(12):1377-1383.
- [12] Meunchang S, Panichsakpatana S, Weaver R W. Co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(4):437-442.
- [13] Pagans E, Barrena R, Font X, et al. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes: Dependency on process temperature[J]. *Chemosphere*, 2006, 62(9):1534-1542.
- [14] 范志金, 艾应伟, 李建明, 等. 控制畜禽粪氮素挥发的措施探讨[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 23(5):548-550.
FAN Zhi-jin, AI Ying-wei, LI Jian-ming, et al. Discussion of controlling N loss from volatilization in animal manure[J]. *Journal of Sichuan Normal University(Natural Science)*, 2000, 23(5):548-550.
- [15] 王连祺, 王祯丽, 黄华波. 白腐菌在秸秆堆肥化中的应用[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2003, 7(2):161-164.
WANG Lian-zhen, WANG Zhen-li, HUANG Hua-bo. Application of white rot fungi in stalk composting[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 2003, 7(2):161-164.
- [16] 张晶, 鲁娟, 孙学成, 等. 接种白腐菌对城市污泥堆肥效果的影响[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(11):2601-2605, 2609.
ZHANG Jing, LU Juan, SUN Xue-cheng, et al. Effects of inoculating white rot fungi on the quality of urban sewage sludge compost[J]. *Hubei Agricultural Sciences* 2015, 54(11):2601-2605, 2609.
- [17] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1992, 42(2):103-111.
- [18] 孙刚. 畜禽粪便中四环素类抗生素检测分析及其在堆肥中的降解研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
SUN Gang. Determination of tetracyclines in manure and their degradation during manure composting[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [19] 徐智, 张陵利, 张发宝, 等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(8):856-860.
XU Zhi, ZHANG Long-li, ZHANG Fa-bao, et al. Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on composting in a bioreactor[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(8):856-860.
- [20] 李家祥. 以玉米秸秆为基质的鸡粪堆肥及资源化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
LI Jia-xiang. Characteristics of co-composting chicken manure with maize straw as organic substrate[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [21] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 畜禽粪便堆肥过程中各种氮化合物的动态变化及腐熟度评价指标[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2):374-380.
BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, YAN Li, et al. Dynamic changes of nitrogen forms in livestock manure during composting and relevant evaluation indices of compost maturity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):374-380.
- [22] 贺琪. 堆肥氮素转化及原位减少氮素损失的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
HE Qi. Studies on nitrogen transform and reducing nitrogen loss during composting[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [23] 黄丹莲, 曾光明, 胡天觉, 等. 白腐菌应用于堆肥处理含木质素废物的研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6(2):29-32.
HUANG Dan-lian, ZENG Guang-ming, HU Tian-jue, et al. Preliminary study on the application of white-rot fungus in composting of lignin waste[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(2):29-32.
- [24] Dolliver H, Gupta S, Noll S. Antibiotic degradation during manure composting[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(3):1245-1253.
- [25] 李伟明, 鲍艳宇, 周启星. 四环素类抗生素降解途径及其主要降解产物研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8):2300-2308.
LI Wei-ming, BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing. Degradation pathways and main degradation products of tetracycline antibiotics: Research progress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(8):2300-2308.