

猪粪比例对烟草废弃物高温堆肥腐熟进程的影响

竹江良, 汤利, 刘晓琳, 李少明, 高文林, 李海山

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要:以烟草废弃物为基本原料进行堆肥试验,研究了不同比例猪粪与烟草废弃物混合堆肥体系中温度、pH、全氮、C/N比、水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和种子发芽指数(GI, germination index)的动态变化规律,探讨了不同猪粪比例对烟草废弃物高温堆肥腐熟进程的影响。结果表明,在烟草废弃物中加入猪粪能缩短进入高温分解阶段的时间,增加高温分解持续时间,增加全氮含量,加快物料 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和C/N比降低的速率,加快烟草废弃物堆肥腐熟化进程。添加一定比例猪粪的处理(烟草废弃物:猪粪=7:3、烟草废弃物:猪粪=8:2和烟草废弃物:猪粪=9:1),分别在堆肥第3、4、5 d进入高温分解阶段($>50^\circ\text{C}$),高温持续时间分别为11、10、8 d;而纯烟草废弃物处理,最高温度为 43°C ,未进入高温分解阶段;至堆肥26 d, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别比纯烟草废弃物对照降低47.7%、61.9%和25.6%;GI分别达到81.4%、84.1%和83.7%。

关键词:烟草废弃物;猪粪;堆肥;腐熟进程

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)04-0779-06

Effect of Swine Manure on High-Temperature Compost Maturity of Tobacco Fine Waste

ZHU Jiang-liang, TANG Li, LIU Xiao-lin, LI Shao-ming, GAO Wen-lin, LI Hai-shan

(College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Swine manure contains high content of nitrogen, which is a cheap and good nitrogen source. High temperature composting experiments were carried out to evaluate the effect of swine manure on tobacco fine waste composting processes and maturity and its optimal formula for the compost. The experiment design consisted of 4 treatments with 10:0, 9:1, 8:2 and 7:3 ratio of tobacco fine waste and swine manure. The dynamical changes of temperature, the contents of total-nitrogen (T-N) and water-soluble ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), carbon (C)/N ratio, seed germination index (GI) in the composting process of the different composting treatments were measured periodically. The results showed that adding swine manure shortened the time of reaching high temperature ($>50^\circ\text{C}$) and extended the high temperature sustaining time; increased total-N and GI, accelerated the reduction rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, C/N ratio and the composting process and maturity. The highest temperatures were 43°C and 58°C , 60°C , 52°C in pure tobacco fine compost and the compost with swine manure treatments, respectively. The times of reaching high temperature ($>50^\circ\text{C}$) in the compost treatments of adding swine manure (9:1~7:3 ratio) were 3 d, 4 d and 5 d, respectively and the high temperature decomposing durations were 11 d, 10 d and 8 d, respectively. After 26 days, the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in the compost treatments with swine manure were decreased by 47.7%, 61.9% and 25.6% compared to the pure tobacco fine compost treatment, and the GI reached 81.4%, 84.1% and 83.7%, respectively.

Keywords: tobacco fine waste; swine manure; compost; maturity

我国是世界上烟草产量最大的国家,每年烟叶产量达450~500万t,其中约有25%的烟叶、烟草等废弃物不能用于卷烟生产^[1]。云南作为全国著名的烟草

大省,2007年烟叶种植面积40万 hm^2 左右,烟叶产量达76.7万t^[2],每年烤烟产量中约有30%~35%属于无法进行卷烟加工的低等或等外级烟叶未能得到合理利用,各卷烟企业也积存有大量的烟草废弃物约60万t^[3]。废弃烟叶及其下脚料是卷烟生产的大宗副产品,富含各种具有生产应用价值的生物有机成分和次生代谢产物,同时含有大量的氮、磷、钾及微量元素,具有很高的利用价值。目前的利用方式主要有农

收稿日期:2009-04-17

基金项目:“948”项目(2006-G62);云南农业大学青年基金(A2002002)

作者简介:竹江良(1983—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为农业有机废弃物肥料化利用。

通讯作者:汤利 E-mail: ltang@ynau.edu.cn

药生产^[4]、辅酶 Q10 等药物生产^[5]、提取蛋白质^[1]、饲料添加剂^[6]、肥料化^[6]等,但尚有大量的烟草废弃物尚未得到很好的利用。

合理地开发和利用农业有机废弃物,实现农业有机废弃物的高附加值肥料化利用,是减少农业面源污染、节约资源、发展可持续农业和循环经济的重要途径^[7]。烟草废弃物偏碱性,C/N 比较高,具有很强的植物毒性,不能作为有机肥直接施于土壤^[8],而单独堆肥腐熟时间长,效果差^[6];国外有关烟草废弃物肥料化利用的研究大多集中在施用烟草废弃物对土壤的影响,未见有烟草废弃物堆肥工艺方面的系统研究报道^[9-11];而国内有关烟草废弃物堆肥的研究仅探讨了不同微生物菌剂在烟草废弃物堆肥过程中的作用^[6,8],尚未进行最佳物料配比的研究,而且腐熟时间较长。猪粪的 C/N 比较低,含有丰富的植物营养元素和有机质,是良好的有机肥源^[12]。随着禽畜养殖业的快速发展,猪粪的产生量与日俱增,除少数大型养殖场和部分养殖户实施沼气利用和集粪池处理外,大部分养殖场畜禽粪便随地堆积,污水任意流放,严重污染了周围的环境^[13]。因此,添加一定比例的猪粪不仅可能有利于加快烟草废弃物的堆肥化进程^[14-15],也大大减少了猪粪污染的环境风险。

本文结合云南烟草生产实际,以烟草废弃物和猪粪为基本原料,探讨猪粪和烟草废弃物两种农业有机废弃物堆肥的合适比例,以期实现烟草废弃物资源的肥料化利用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在云南农业大学植物营养系温室中进行,以烟草废弃物和猪粪作为堆肥的基本原料,试验用烟草废弃物由昆明铠泰纳工贸有限责任公司提供,猪粪取自云南农业大学养猪场,堆肥原料的主要成分见表1。

1.2 试验设计

每处理以烟草废弃物为基本堆肥材料,添加不同比例猪粪,总重量为 100 kg,每个堆肥处理搅拌均匀混合后,分别堆成高约 1 m 的金字塔形,覆盖农膜以便保

温。在堆肥发酵前,调节含水量至 60%左右,调节 pH 值至 6.5 左右。堆肥开始第 1 周每 3 d 翻堆 1 次,之后每 5 d 翻堆 1 次,堆肥时间为 31 d。试验方案见表 2。

表 2 烟草废弃物堆肥试验设计

Table 2 The experiment design of the tobacco fine composting			
处理代号	物料及配比(湿重比)	通风方式	C/N 比
1	烟草废弃物(100%)	人工翻堆	36
2	烟草废弃物:猪粪=9:1	人工翻堆	29
3	烟草废弃物:猪粪=8:2	人工翻堆	26
4	烟草废弃物:猪粪=7:3	人工翻堆	24

1.3 采样及测定

1.3.1 采样方法

分别于堆肥第 0、3、6、11、16、21、26、31 d 采样。在翻堆充分搅拌均匀后,按五点采样法,每处理每次采集 6 个混合样,其中 3 个混合样品风干测定全量,3 个混合样品作为鲜样现场保存于 4 ℃的冰箱中用于测定水溶性指标。

1.3.2 测定方法

在各处理 50 cm 深处分 3 个不同方向各插入 1 支温度计,每日 19:00 测 1 次温度;全氮、全磷、全钾、有机质测定按 NY525—2002 中所述方法进行;容重和孔隙度按常规方法测定^[16];新鲜样品用去离子水按土水比 1:10(以干物质计)浸提 1 h 后,取 50 mL 滤液以 4 000 r·min⁻¹ 离心 20 min,过滤,滤液测定 pH、EC、NH₄⁺-N、NH₃-N 采用靛酚蓝比色法^[17];种子发芽指数(GI)测定^[8,18]:培养皿内垫一张滤纸均匀放入 20 粒矮抗青青菜籽,加入浸提液 5.0 mL(固液比 1:5 浸提),在 25 ℃黑暗的培养箱中培养 48 h 后计算发芽率并测定根长,同时以去离子水做空白试验。

2 结果与分析

2.1 猪粪比例对烟草废弃物堆肥温度的影响

在本试验中,堆体温度变化如表 3。纯烟草废弃

表 3 烟草废弃物堆肥进程中温度的变化

Table 3 Changes of temperature during the passion tobacco fine composting				
处理代号 Treatment	堆肥达到 50 ℃ 所需时间/d Time reached 50 ℃	>50℃持续 达环境温度的时间/d Time>50 ℃ Time reached enviro-	最高温度/℃ The highest temperature	
1	—	—	28±1	43±0.5
2	3	11±1	25±1	58±1
3	4	10±1	25±0	60±0.5
4	5	8±1	25±1	52±1

表 1 堆肥原料的基本理化性状

Table 1 The basic physical and chemical properties of the composting material					
原料种类	pH	水分/%	总碳/%	总氮/%	C/N 比
烟草废弃物	7.2	8.6	28.7	0.8	35.9
猪粪	6.5	59.9	30.5	2.3	13.3

物的处理1最高温度为43℃,未进入高温分解阶段,添加猪粪堆肥处理2、3、4达到50℃所需时间分别为3、4、5 d,持续高温的时间分别为11、10、8 d,最高温度分别为58、60、52℃。随着猪粪添加比例的增加,达到50℃所需时间延长,高温持续时间缩短。这表明烟草废弃物堆肥过程中添加猪粪,能够缩短达到高温腐熟时间,延长高温持续时间,加快堆肥发酵速度,但是随着猪粪添加比例的增加,堆肥腐熟化进程趋于减缓。

2.2 猪粪比例对烟草废弃物堆肥 pH 值的影响

堆肥过程中 pH 值的变化如图1所示,各处理呈现的 pH 值变化基本一致,都是先上升后下降再缓慢上升的过程,最后稳定在7.93~8.45之间。在堆肥腐熟后期,随着猪粪添加比例的增加, pH 上升速度更快、幅度更大。堆肥腐熟后,除纯烟草废弃物的处理1外,各处理都符合腐熟堆肥 pH 值在8.0~9.0的标准^[19]。

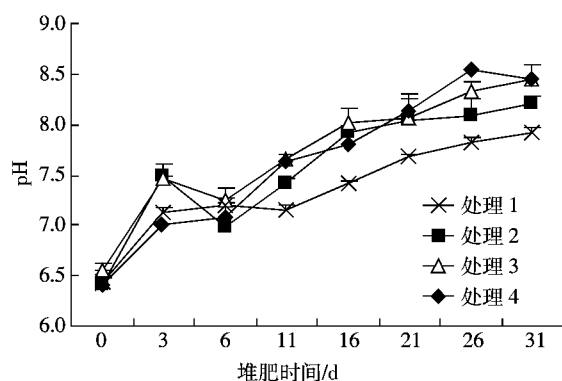


图1 烟草废弃物堆肥进程中 pH 值的变化

Figure 1 Changes of pH during tobacco fine composting

2.3 猪粪比例对烟草废弃物堆肥总氮的影响

堆肥进程中总氮的动态变化如图2所示。结果表明,添加猪粪明显提高了堆肥进程的总氮含量,至堆

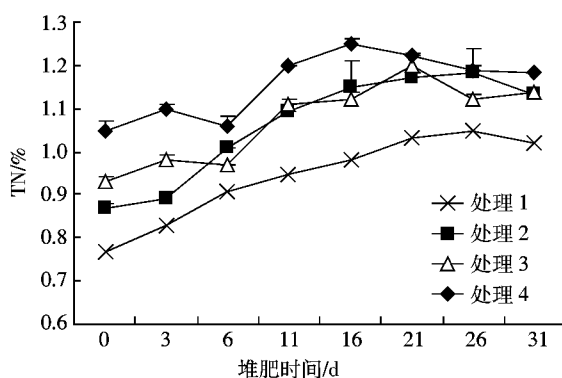


图2 烟草废弃物堆肥进程中全氮的变化

Figure 2 Changes of TN during tobacco fine composting

肥结束时,各处理总氮含量分别为1.02%、1.13%、1.14%、1.18%,随着猪粪添加比例增加,堆肥总氮含量增加。添加不同猪粪比例处理2、3、4总氮分别较纯烟草废弃物处理增加了10.8%、11.8%、15.7%。处理4与处理2、3差异显著($P<0.05$),但处理2、3间差异不显著($P>0.05$)。

2.4 猪粪比例对烟草废弃物堆肥 NH_4^+-N 的影响

图3为堆肥进程中铵态氮的变化。堆肥的铵态氮含量变化趋势为先升后降, NH_4^+-N 含量前期上升是由于微生物活动对有机物降解产生大量 NH_4^+ , 后期下降是由于硝化作用增强及氮的挥发损失双重作用的结果^[20]。添加猪粪处理明显促进堆肥进程中的 NH_4^+-N 含量上升和下降。纯烟草废弃物处理1在堆肥第16 d NH_4^+-N 含量才达到峰值,而添加猪粪处理2、3、4在堆肥第6 d NH_4^+-N 含量达到峰值,较纯烟草废弃物处理1,铵态氮含量分别增加了67.7%、77.5%和81.7%。添加猪粪显著促进堆肥后期铵态氮的减少。至堆肥26 d,添加猪粪处理2、3、4,铵态氮含量分别较纯烟草废弃物处理1降低了47.7%、61.9%和25.6%,其中以处理3下降速度最快,幅度最大,与处理2、4差异显著($P<0.05$)。

NH_4^+-N 的缺失及减少是堆肥腐熟的标志,当堆肥中氮的浓度小于 $400.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,被认为已经腐熟^[21],至堆肥31 d,各处理 NH_4^+-N 含量分别为624.18、292.03、286.82、462.46 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根据此标准,处理2、3满足堆肥腐熟要求。添加猪粪各处理 NH_4^+-N 含量显著低于纯烟草废弃物处理1,分别比对照降低53.2%、54.1%、25.9%,处理2和3 NH_4^+-N 含量显著低于处理4,而处理2、3之间差异不显著($P>0.05$),处理4至堆肥结束时依然有较高的铵态氮含量,这可能是由于高比例猪粪氮含量较高所致。因此,在烟草废弃物堆肥

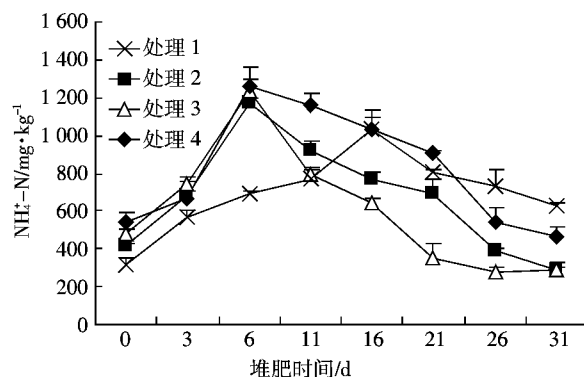


图3 烟草废弃物堆肥进程中水溶性 NH_4^+-N 的变化

Figure 3 Changes of water-soluble NH_4^+-N during tobacco fine composting

过程中加入猪粪,有利于烟草废弃物的腐熟化进程,但随着猪粪添加比例的增加,减缓了堆肥腐熟进程,烟草废弃物堆肥腐熟时间延长。

2.5 猪粪比例对烟草废弃物堆肥 C/N 比的影响

C/N 是检验堆肥产品腐熟度常用的指标,堆肥产品 C/N 比降为(15~20):1 时,可以认为堆肥腐熟^[22]。由图 4 可知,添加猪粪显著加快了堆肥 C/N 比的下降。其中以处理 3、4 下降最快,在堆肥 21 d 已下降至 18.4 和 18.9, C/N 比的下降速度依次为处理 3>处理 4>处理 2,其中处理 3 与处理 2、4 差异显著($P<0.05$)。纯烟草废弃物处理 1 至堆肥结束 C/N 比为 21.35,未达到腐熟要求,而添加猪粪处理 2、3、4 分别在堆肥 26、21、21 d 降到 18.4、18.9、18.4。至堆肥结束,添加猪粪处理 2、3、4 较纯烟草废弃物处理 C/N 比降低了 9.4%、15.8%、14.5%,各处理间差异显著($P<0.05$)。因此,在烟草废弃物堆肥过程中,添加猪粪显著促进了烟草废弃物 C/N 的降低,促进了烟草废弃物的腐熟,并且随着猪粪添加比例的增加,烟草废弃物的腐熟过程加快。

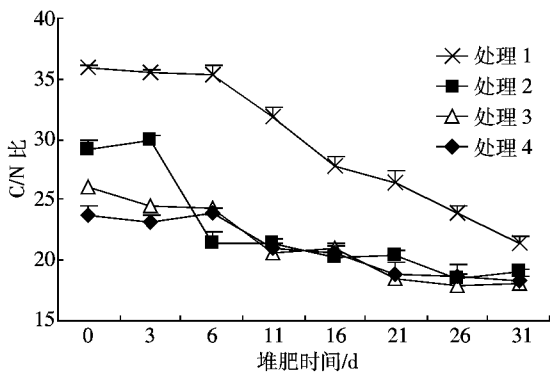


图 4 烟草废弃物堆肥进程中 C/N 比的变化

Figure 4 Changes of C/N during tobacco fine composting

2.6 猪粪比例对烟草废弃物堆肥 GI 的影响

种子发芽指数(GI, germination index)是通过检验堆肥对植物发芽是否产生抑制作用来评价堆肥无害化、稳定化程度的指标,一般情况下,当发芽指数达到 80% 时,即可认为堆肥没有植物毒性或堆肥已经腐熟^[23]。

由图 5 可知,随着堆肥时间的延长,各个处理的种子发芽指数均呈现逐步上升的趋势,其中添加猪粪处理 2、3、4 的种子发芽指数上升速度明显较快,至堆肥 26 d,纯烟草废弃物处理 1 为 72.7%,而添加猪粪处理 2、3、4 的 GI 分别达到 81.4%、84.1%、83.7%,分别比处理 1 增加了 12.0%、15.7%、15.1%。堆肥结束时,

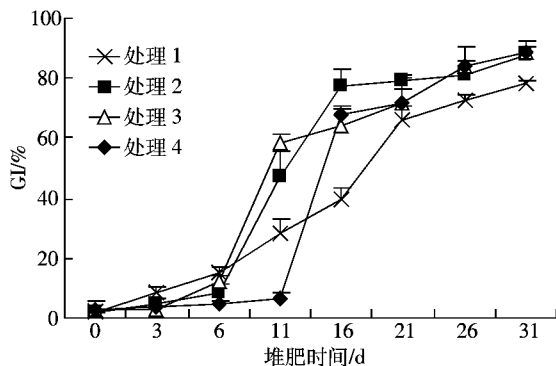


图 5 烟草废弃物堆肥进程中 GI 的变化

Figure 5 Changes of GI during tobacco fine composting

各处理的 GI 分别为 78.4%、87.8%、88.5%、88.3%,除处理 1 外都满足堆肥腐熟要求,添加猪粪各处理间差异不显著($P>0.05$)。因此,在烟草废弃物堆肥过程中添加猪粪能明显加速堆体内有毒有害物质的分解,加快堆肥腐熟化进程。

3 讨论

温度是堆肥过程中非常重要的变量,温度控制对于杀灭致病菌,优化呼吸速率、去除水分和稳定堆肥物料至关重要。堆肥的最适宜温度在 50~60℃ 之间,也有人认为城市固体废物堆肥的最适宜温度为 65~70℃^[24]。在本试验中,添加猪粪处理高温分解阶段温度稳定在 50~60℃ 之间,而纯烟草废弃物处理未进入高温分解阶段,这与高 C/N 条件下有效氮源不足抑制微生物的生长和活性有关^[25]。添加猪粪的处理进入高温分解阶段的时间随着添加猪粪比例的增加而增加,这可能是由于添加猪粪增大了堆体容重从而减缓了堆肥温度的上升速率^[26]。但堆肥高温持续时间随着猪粪添加比例的进一步增加而减少,这可能与低 C/N 条件下有效碳源不足有关^[27]。

NH_4^+-N 含量、C/N 比、种子发芽指数(GI)是评价堆肥腐熟度的常用指标。当 $\text{NH}_4^+-\text{N}<400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21],或堆肥 C/N 比降为 20 以下^[22],或种子发芽指数大于 80%^[23]时,可以认为堆肥已经腐熟。据此标准,添加不同比例猪粪的处理 2、3、4 在堆肥 21 d 或 26 d 均满足腐熟要求,而纯烟草废弃物的处理 1 至堆肥结束仍未达到要求。由于单一化学指标评价堆肥腐熟度只能片面地反映某个障碍因子的作用,而堆肥产品将作为有机肥应用于农业生产,种子发芽指数反映了堆肥产品的植物毒性,因此可能是最可靠、客观的堆肥腐熟度评价指标。

4 结论

(1)烟草废弃物单独堆肥过程中,C/N 比较高、升温慢,不能进入高温分解阶段,种子发芽指数较低,腐熟化进程较慢。

(2)加入猪粪有利于堆体迅速进入高温分解阶段,延长高温持续时间、有利于 C/N 比和 NH_4^+-N 的降低,促进烟草废弃物的无害化,加快烟草废弃物堆肥腐熟进程。

(3)综合分析堆肥过程中进入高温($>50\text{ }^\circ\text{C}$)分解阶段的天数、高温持续时间、堆肥 pH 变化、C/N 比、 NH_4^+-N 和 GI 动态变化及有关堆肥产品品质的各项指标,处理 3(烟草废弃物:猪粪=8:2)的比例是烟草废弃物快速腐熟和合理利用各种原料的最优处理。

参考文献:

- [1] 董占能, 白聚川, 张皓东. 烟草废弃物资源化[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(1): 39-42.
DONG Zhan-neng, BAI Ju-chuan, ZHANG Hao-dong. Comprehensive utilization of tobacco waste[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2008, 29(1): 39-42.
- [2] 云南年鉴编辑部. 云南年鉴[M]. 昆明: 云南年鉴出版社, 2008.
Editorial Department of Yunnan Yearbook. Yunnan yearbook[M]. Kunming: Yunnan Yearbook Press, 2008.
- [3] 彭靖里, 马敏象, 吴绍情, 等. 论烟草废弃物的综合利用技术及其发展前景[J]. 中国资源综合利用, 2001(08): 18-20.
PENG Jing-li, MA Min-xiang, WU Shao-qing, et al. On the technology and it's development prospect of comprehensive utilization of tobacco scrap[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2001(08): 18-20.
- [4] 郑奎玲, 于丹梅. 废弃烟叶的综合利用现状[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(3): 61-62.
ZHENG Kui-ling, YU Dan-mei. A summary of the comprehensive utilizations of discarded tobacco leaves[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2004, 27(3): 61-62.
- [5] 许晓风, 郁 锋, 杨启银, 等. 烟草工业下脚料综合利用研究[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(2): 270-271.
XU Xiao-feng, YU Feng, YANG Qi-yin, et al. Comprehensive utilization of waste material produced from tobacco industry[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, 31(2): 270-271.
- [6] 李少明, 汤 利, 范茂攀, 等. 不同微生物腐熟剂对废烟草废弃物高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 783-786.
LI Shao-ming, TANG Li, FAN Mao-pan, et al. Effect of different microbial blends on tobacco fine waste high temperature compost maturity[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(2): 783-786.
- [7] 杨兴明, 徐阳春, 黄启为, 等. 有机(类)肥料与农业可持续发展和生态环境保护[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 925-932.
YANG Xing-ming, XU Yang-chun, HUANG Qi-wei, et al. Organic-like fertilizers and its relation to sustainable development of agriculture and protection of eco-environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 925-932.
- [8] 李少明, 邓文祥, 郭亚妮, 等. 微生物菌剂对烟末堆肥理化性状及种子发芽指数的影响[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(5): 706-709.
LI Shao-ming, DENG Wen-xiang, GUO Ya-ni, et al. Effects of microbial strains on physical and chemical changes of tobacco fine waste compost and on germination index of *Brassica chinensis* L[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, 22(5): 706-709.
- [9] Nur OKUR, Hüseyin Hüsnü KAYIKÇIĞLU, Bülent OKUR, et al. Organic amendment based on tobacco waste compost and farmyard manure; influence on soil biological properties and butter-head lettuce yield[J]. *Turk J Agric*, 2008(32): 91-99.
- [10] Felicita Briški, Nina Horgas, Marija Vuković, et al. Aerobic composting of tobacco industry solid waste—simulation of the process[J]. *Clean Techn Environ Policy*, 2003(5): 295-301.
- [11] Stachowiak B, Piotrowska-Cyplik a, Dach J. Assessing the fungistatic activity of a compost prepared from plant biomass with the addition of tobacco waste[J]. *Ochrona Srodowiska*, 2008, 30(3): 27-29.
- [12] YUN Zhang, YONG He. Co-composting solid swine manure with pine-sawdust as organic substrate[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97: 2024-2031.
- [13] 王昆华, 金卫华. 对养殖业畜禽粪便污染综合治理的认识与建议[J]. 云南畜牧兽医, 2007(增刊): 63-66.
WANG Kun-hua, JIN Wei-hua. Cognitions and suggestions on comprehensive management of faecal contamination of livestock and poultry breeding[J]. *Yunnan Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2007(supplement): 63-66.
- [14] Tiquia S M, Tam N F Y. Co-composting of spent pig litter and sludge with forced-aeration[J]. *Bioresour Technol*, 2000, 72: 1-7.
- [15] M Ros, C Garc'a, T. Herna'ndez. A full-scale study of treatment of pig slurry by composting: Kinetic changes in chemical and microbial properties[J]. *Waste Management*, 2006, 26: 1108-1118.
- [16] 连兆煌. 无土栽培原理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
LIAN Zhao-huang. Theories and techniques of soilless culture[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第三版. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
State Environmental Protection Administration of China. The analysis method of water and waste water[M]. 3rd Ed. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.
- [18] 杨国义, 夏钟文, 李芳柏, 等. 不同填充料对猪粪堆肥腐熟过程的影响[J]. 土壤肥料, 2003(3): 29-33.
YANG Guo-yi, XIA Zhong-wen, LI Fang-bai. Effect of different bulk-ing agents on the maturity of pig manure composting[J]. *Soils and Fertilizers*, 2003(3): 29-33.
- [19] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数和指标[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 98-103.
LI Yan-xia, WANG Min-jian, WANG Ju-si. The maturity indexes and standards of organic solid waste composting [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1999, 20(2): 98-103.

- [20] 刘益仁, 刘秀梅, 李祖章, 等. 接种微生物菌剂对猪粪堆肥的效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2007(6):80-83.
LIU Yi-ren, LIU Xiu-mei, LI Zu-zhang, et al. Effect of microorganism inoculants on pig manure composting[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2007(6):80-83.
- [21] Zucconi F, Forte M, Monac A, et al. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981, 22:27-29.
- [22] Garcia C, Hernandez T, Fosta, et al. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1992, 23:1501-1512.
- [23] 陈同斌, 罗 维, 郑国砥, 等. 翻堆对强制通风静态垛混合堆肥过程及其理化性质的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1):117-122.
CHEN Tong-bin. LUO Wei, ZHENG Guo-di, et al. Effects of pile-turning on chemical and physical properties in static forced-aeration composting of sewage sludge and pig manure[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(1):117-122.
- [24] Bach P D, Shoda M, Kubota H. Rate of composting of dewatered sewage sludge in continuously mixed isothermal reactor[J]. *Journal of Fermentation Technology*, 1984, 62:285-292.
- [25] 贺 琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):169-173.
HE Qi, LI Guo-xue, ZHANG Ya-ning, et al. N loss and its characteristics during high temperature composting[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2005, 24(1):169-173.
- [26] 王 岩. 养殖业固体废弃物快速堆肥化处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
WANG Yan. Rapid composting of aquaculture solid waste [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [27] 吴银宝, 汪植三, 廖新伟, 等. 猪粪堆肥臭气产生与调控的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5):82-87.
WU Yin-bao, WANG Zhi-san, LIAO Xin. et al. Study on the odor production and control of swine manure composting[J]. *Tran CSAE*, 2001, 17(5):82-87.