

不同预堆期对牛粪堆肥进程的影响研究

高建程¹, 于金莲¹, 石登荣¹, 任丽萍²

(1. 上海师范大学环境科学系, 上海 200234; 2. 中国农业大学动物科技学院, 北京 100083)

摘要:实验研究了不同预堆期对牛粪和秸秆混合堆肥进程的影响及其用生化参数评价堆肥腐熟度的可能性。实验按预堆天数分为4堆, 预堆期分别为0、5、10、15 d, 分别标记0#、5#、10#和15#。实验中对温度、pH、TOC、TN、C/N、总菌数和发芽指数(germination index, GI)进行了测定。结果表明, 堆肥中, 10#和15#处理发酵温度要高于5#和0#, 且持续的时间更长, 表明设置预堆期有利于堆肥快速升温加快发酵腐熟进程。在堆肥中, pH、TOC和TN参数在不同堆体间的差异显著($P<0.05$; $P<0.001$; $P<0.001$), 而总菌数和GI均没有达到显著水平($P>0.05$)。依据堆肥中各指标参数的相关关系, 以GI为腐熟度标志, pH和C/N为自变量, 以44个样本数经多重逐步回归分析建立模型, 多重线性方程为: $GI = -215.754 + 44.31pH - 2.804[C/N]$, $R^2 = 0.472$, 相关系数达到极显著水平($P<0.0001$)。依据方程预测值, 建议GI>105%时可作为牛粪堆肥腐熟度的参考指标, 但从相关系数看出回归方程仍需进一步修正, 以提高预测的准确性。

关键词: 预堆期; 腐熟度; 牛粪; 秸秆; 多重回归分析

中图分类号: X141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)03-1214-05

Effects of Different Pretreatment Periods on Composting Process of Cattle Manure

GAO Jian-cheng¹, YU Jin-lian¹, SHI Deng-rong¹, REN Li-ping²

(1. Department of Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 2. College of Animal Science & Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The research was to study the effects of different pretreatment periods on composting processes of cattle feces mixed with straw, and the possibility of using chemical and biological parameters to evaluate the compost maturity. Four composting treatments were designed with pretreatment time 0, 5, 10 and 15 days (marked 0#, 5#, 10# and 15#) respectively. The chemical and biological parameters of composting processes were detected, including temperature, pH value, total organic carbon (TOC), C/N ratio, total nitrogen (TN), total bacteria and germination index (GI). The results showed that the temperature in 10# and 15# treatments was higher than in the 5# and 0#, and the high temperature stage of 10# and 15# treatments lasted longer than others, indicating that long time of pretreatment could raise the composting temperature and promote composting to reach the stability quickly. Significant differences of pH, TOC, and TN parameters between different treatments were observed ($P<0.05$ or $P<0.001$). A mathematical model was developed using multiple stepwise regression analysis and the regression equation was $GI = -215.754 + 44.31 pH - 2.804[C/N]$ ($R^2 = 0.472$, $P<0.0001$). The GI value greater than 105% was proposed to be the threshold value for determining the maturity of cattle manure composting. Nevertheless, further corrections of the model were needed in order to improve the accuracy of predicting compost maturity.

Keywords: pretreatment period; maturity; cattle manure; straw; multiple regression analysis

堆肥是一种有效的生物处理方法, 是粪便和秸秆管理与利用的重要手段之一, 有利于粪便达到无害化, 并生产商品有机肥实现粪便和秸秆的资源化

利用^[1]。牛粪与秸秆混合堆肥是一种普遍的牛粪无害化处理方式, 但堆肥的效果受诸多因素影响。水分是影响微生物活性的重要因素之一, 通常堆肥水分控制范围在60%~70%之间较为理想^[2], 但新鲜的牛粪水分含量在70%以上, 会造成堆肥温度难以上升, 分解速度明显降低, 水分过多使堆肥物质粒子之间充满水阻碍通风, 从而造成厌氧环境, 不利于好氧微生物的生长^[3]。实际生产中, 如何以简单实用的方式加快堆肥进

收稿日期: 2007-08-24

项目基金: 国家自然科学基金资助项目 (30125033)

作者简介: 高建程 (1982—) 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事环境微生物方面的研究。E-mail: jingkang971@sina.com

通讯作者: 于金莲 E-mail: yujl@shnu.edu.cn.

程,降低成本和提高产品质量是商品有机肥生产者关心的重要问题。腐熟度是堆肥产品质量的重要控制参数,腐熟程度影响到堆肥产品的使用^[4]。许多研究者认为单独使用 pH、总氮、总有机碳等均不适于作为堆肥腐熟度的指标,提出用水溶性碳、Solvita CO₂ 指数、阳离子交换率、水溶性有机氮、NH₄/NO₃、腐殖质、总菌数和发芽指数 (GI)等化学和生物参数来综合评价堆肥的腐熟度^[1-5-7]。Bernal 等研究认为 C/N<12、C_w<1.7%、C_w/N_{org}<0.55、NH₄/NO₃<0.16、NH₄-N<0.04%和 GI>50%可作为堆肥腐熟指标,并在有机物堆肥中有很好的适用性^[8],但堆肥腐熟度会受到堆肥原料和条件等各种因素的影响,因此,针对不同的堆肥样品选择简单而且合适的评价腐熟度指标尤为重要。

本实验研究了通过设置预堆期调节牛粪的水分和粒度以适合微生物生长的需求,加快堆肥进程的可能性。并分析了牛粪堆肥处理中的各参数变化。通过多重逐步回归分析样品中 GI 与其他参数的关系并建立预测模型,筛选简单合理的牛粪堆肥腐熟度评价指标。

1 材料与方法

1.1 堆肥原料和制作方法

堆肥的原料采用新鲜的牛粪、玉米秸秆及麦秸,来源于中国农业大学肉牛研究中心。混合前粪样预堆天数分别为 0、5、10、15 d (分别标记 0#、5#、10#、15#),将秸秆切成 3~5 cm 长与粪样按 C/N 为 25~30 的比例均匀的混合,自然堆肥共 4 堆,堆体按长×宽×高 (4.8 m×1.5 m×1.0 m)。堆制 63 d,发酵期水分控制在 60%~70%之间。堆肥过程中,在第 3 和第 7 d 进行翻堆,以后每隔 7 d 进行一次翻堆。堆肥原料的性质见表 1。

表 1 堆肥原料的性质

Table 1 Characteristics of the composting materials

堆肥材料	有机碳/%	全氮/%	C/N	含水率/%
鲜牛粪	40.82	1.50	27.31	75.36
麦秸	44.24	1.07	41.46	8.18
玉米秸	43.70	0.63	68.93	9.57

1.2 测定项目及分析方法

每个堆体分别在 0、7、14、21、28、35、42、49、56、63 d 进行采样,共 10 次,取部分样品进行 pH、总菌数、发芽指数测定,其余样品自然风干,磨碎过 0.5 mm 筛测定总有机碳 (TOC)、全氮 (TN)。每天分别在 8:00 和 16:00 测定温度 (包括环境温度和堆体温度)。

pH 值用 10 g 样品溶解在 100 mL 蒸馏水中采用 PHS-3C 型精密 pH 计测定;总菌数采用稀释平板计数法,发芽指数的测定参照文献^[9、10];有机碳采用重铬酸钾法;全氮采用氧氮燃烧法测定^[11]。

本实验采用单因素随机变量方差分析 (ANO-VA),在 0.05 水平下进行显著性检验,相关性分析均由 excel 统计软件执行,多重线性回归由 DPS v3.01 数据处理系统执行。

2 结果与分析

试验中测定堆肥进行中的温度、pH、总有机碳、总氮等物理化学指标以及总菌数和发芽指数等生物学指标,在各处理堆肥中各指标的方差分析结果见表 2。各指标的动态变化见图 1~图 6。

表 2 堆肥中的化学与生物学指标

Table 2 The chemical and biological properties of different composts (mean±SE)

参数	处理				P
	0#	5#	10#	15#	
温度/℃	39.6±0.8	41.5±0.8	40.8±1.1	41.0±1.2	0.538 0
总氮/%	1.18±0.06	1.59±0.07	1.08±0.05	1.29±0.08	0.000 0***
总有机碳/%	22.21±1.75	25.67±0.96	32.42±1.65	27.14±1.80	0.000 6***
C/N	22.44±1.69	20.49±1.68	20.88±1.97	20.38±1.47	0.818 8
pH (1:10H ₂ O)	8.11±0.05	8.24±0.04	8.28±0.04	8.27±0.04	0.033 0*
总菌数 (×10 ⁸)	1.83±0.43	2.30±0.34	1.35±0.26	2.40±0.86	0.423 1
发芽指数/%	88.14±8.37	89.57±9.48	92.61±8.35	90.99±8.68	0.985 8

注:*** 表示极显著 P<0.001;* 表示显著 P<0.05
*** indicates very significant (P<0.001), and *indicates significant (P<0.05).

2.1 堆肥中物理和化学指标变化动态

2.1.1 堆肥中温度变化动态

堆肥过程中的温度变化是堆肥发酵腐熟的重要参数之一。图 1 是各堆体的温度变化,0# 和 5# 的堆体温度升温较慢,分别在第 12 d 和第 10 d 上升至 50℃以上,且两堆体高温持续的时间也较短分别是 6 d 和 10 d,均在 40 d 时达到稳定。10# 堆体在第 5 d 上升到 50℃以上并持续 19 d,最高温到 57℃,在第 30 d 达到稳定。15# 的堆体也在第 5 d 上升到 50℃以上并持续 17 d,最高温到 61℃,在第 29 d 达到稳定。实验表明,经不同预堆期后,各堆体在高温发酵期温度上存在显著性差异 (P<0.001),但 4 个堆体最高温在 50~55℃以上时持续的时间均在 5 d 以上,均达到了粪便无害化卫生标准^[12]。从表 2 中得出,4 个堆体堆肥

中温度变化趋势没有显著差异 ($P>0.05$), 堆肥末期各堆体的温度与环境温度趋于一致, 可以认为各处理都达到了腐熟^[1]。但从数值上看, 预堆 10 d 和 15 d 的两个处理, 能尽快进入高温期, 并持续较长的高温时间, 到达稳定期的时间短。说明经过一段时间预堆期, 牛粪的水分降低, 粒度变小且松散, 有利于好氧微生物的生长, 堆肥开始后微生物迅速增长并对有机物进行分解释放出大量的热量, 使堆体的温度升高, 堆肥能够快速进入高温发酵期, 且延长了高温持续时间, 有利于杀死致病菌达到无害化, 有利于堆肥的腐熟, 同时节省了堆肥的时间。

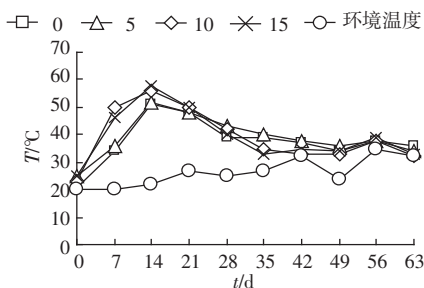


图 1 堆肥过程中温度变化

Figure 1 Changes of temperature during composting

2.1.2 堆肥中 pH 的变化动态

有研究发现, pH 值的大小对微生物的生长有重要作用, pH 过高或过低都会影响到微生物的生长, 适宜的 pH 可使微生物有效地发挥作用。一般认为, pH 值在 8 左右堆肥可获得最大效率, 此范围内可显著提高初期的反应速度, 缩短堆肥达到高温所需求的时间, 亦可避免由堆肥反应延缓所造成的臭味问题^[3]。堆肥过程中, 4 个堆体的 pH 值均在 7.6~8.5 范围内变化, 从图 2 中可以看出, pH 在前 21 d 呈现上升的趋势, 在 28 d 至 63 d 堆体在 8.0~8.5 之间变化, 这是因

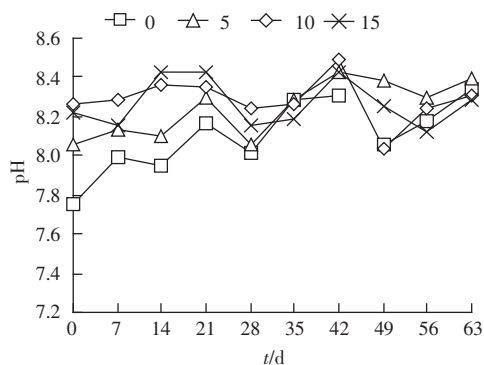


图 2 堆肥过程中 pH 值变化

Figure 2 Changes of pH during composting

为随着堆肥进行有机酸逐渐被中和^[12], 并且挥发的部分氨充满在堆体中造成偏碱性环境。堆体之间的 pH 值差异达到了显著水平 ($P<0.05$), 这是由于新鲜的牛粪初始 pH 值为 7.36, 而经过预堆处理以后的堆体 pH 值都达到了 8.0 以上, 说明预堆可以使 pH 更快地达到适宜微生物生长的范围。

2.1.3 堆肥中总氮及 C/N 的变化动态

总氮在堆肥中随着堆肥时间的延长而呈现上升的趋势 (图 3), 堆肥发酵中, 随着温度的下降, NH_3 的挥发损失减少, 而微生物的分解使有机碳的数量减少引起的浓缩效应增加, 从而使总氮的含量增加^[13,14]。各处理间总氮含量变化呈现显著性差异 ($P<0.001$)。5#堆体总氮含量显著高于其他的堆体, 主要是堆肥中 5# 的发酵温度低且持续的时间较短, 导致氨态氮产生量少氮流失较少, 而 0# 总氮与 5# 相比产生差异的原因可能是有机碳分解较少浓缩效应不明显。

随着堆肥过程的进行各处理间 C/N 呈现下降的趋势 (图 4), 各处理间 C/N 没有显著差异 ($P>0.05$)。这是由于堆肥中有机碳被微生物分解转化成 CO_2 , 总有机碳的含量随堆肥进行不断减少, 而各处理总氮的含量在增加, 使 C/N 在堆肥中不断下降^[15]。

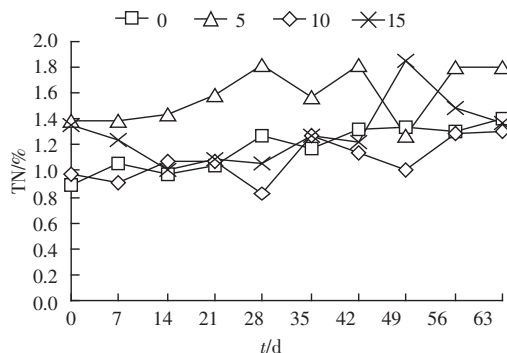


图 3 堆肥过程中总氮变化

Figure 3 Changes of TN during composting

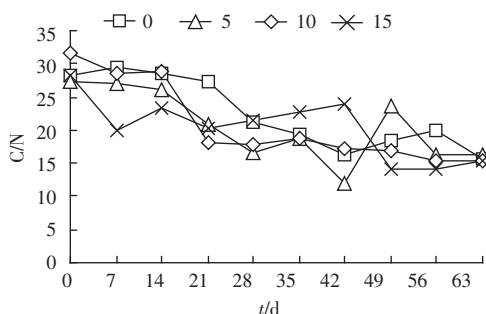


图 4 堆肥过程中 C/N 值变化

Figure 4 Changes of the ratio C to N during composting

2.2 堆肥中生物学指标

2.2.1 堆肥过程中总菌数的变化动态

从图 5 中可以看出,在堆肥初期微生物的总量迅速上升,各堆体在 21 d 后总菌数趋于稳定,0# 处理总菌数的增长速度较慢,在 14 d 才达到最高点,15# 在 7 d 时总菌数显著高于其他处理。这主要是由于 0# 处理的微生物未经过预堆期,而 15# 处理先进行了 15 d 的预堆处理,微生物很快地适应堆体环境并迅速增长。同时,比较图 1 可以看出总菌数变化与温度变化趋势呈现出一致性,这是由于微生物在分解有机物的过程中会释放热量,微生物量越多发酵产生的热量越多温度越高^[8],在堆肥的初期,主要是嗜温性微生物(包括细菌、真菌等)组成的群落,细菌和真菌是有机固体废物的最初降解者;在高温发酵期,嗜热菌占主导优势,在堆肥的腐熟阶段,温度降低,中温微生物又开始活跃,重新成为优势菌,继续对部分较难分解有机物作进一步的分解^[7]。

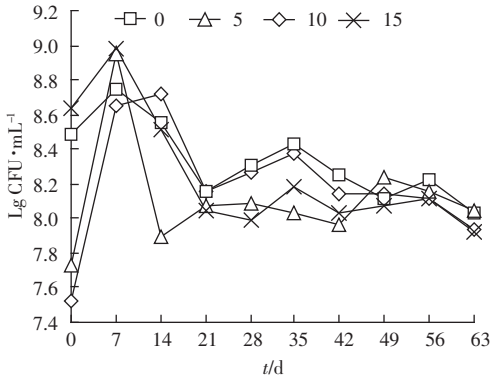


图 5 堆肥过程中总菌数变化

Figure 5 Changes of total bacteria during composting

2.2.2 发芽指数的变化

堆肥中所含的重金属、氨和一些有机物会对植物生长和根的发育产生抑制,因此,发芽指数常被作为评价堆肥产品植物毒性的指标。图 6 的结果表明,4 个处理起始的发芽指数在 13.04~30.45 之间,在 42 d 以后各处理发芽指数均在 100% 左右变化,水浸提液的种子发芽指数变化趋势一致,各堆间发芽指数没有达到显著性差异水平(见表 2, $P>0.05$)。这是由于堆肥初期产生了大量的氨和有毒物质,随着堆肥时间的延长这些物质挥发或转化成无害的物质,对种子生长抑制作用明显下降,到腐熟期堆肥水提取液的生理毒性降至与对照相近^[9,12]。

2.3 GI 多重回归分析

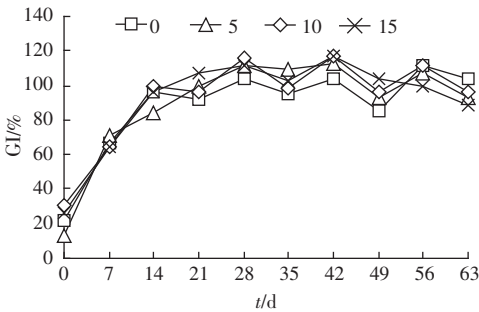


图 6 堆肥过程中发芽指数变化

Figure 6 Changes of germination index during composting

在研究中,越来越多的研究者采用 GI (germination index, GI) 值作为堆肥腐熟度的重要参数之一^[7,10,12,16,17], Zucconi 等^[10]认为当 $GI\geq 80\%$ 时,堆肥产品对植物已没有毒性达到腐熟。Han 等^[12]则建议动物粪便堆肥中 $GI\geq 110\%$ 时作为腐熟度的限值。而实际中,堆肥中 GI 受种子品种、萃取率、堆肥样品、环境条件和设备的影响,因此,针对牛粪堆肥本实验做了进一步的探讨,经统计分析发现 GI 与 pH 和 C/N 有显著的相关性 ($P<0.01$; $P<0.001$) (见表 3)。

表 3 堆肥腐熟度参数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between compost maturity

parameters					
	GI	pH	TN	C/N	总菌数
GI	1				
pH	0.449 6**	1			
TN	0.228 2	0.183 6	1		
C/N	-0.642 6***	-0.344 8	-0.538 6**	1	
总菌数	-0.183 9	-0.160 5	0.019 1	0.261 2	1

注:*** 表示极显著 $P<0.001$; ** 表示显著 $P<0.01$; * 表示显著 $P<0.05$

Note: ***indicates very significant ($P<0.001$), ** indicate significant ($P<0.01$) and * significant ($P<0.05$)

参照 Miyuki^[17]以发芽指数作为堆肥腐熟标志,以 pH、TN、C/N 和总菌数作为参数,使用多重线性逐步回归分析(44 个样本)。与 GI 相关系数较高并达到显著水平的 pH 和 C/N 作为模型的变量得出以下的方程:

$$GI=-215.754+44.31pH-2.804[C/N]$$

式中:方程的 $R=0.687$; $R^2=0.472$ 1 达到了极显著的水平 ($P<0.000$ 1),表明可以利用 pH 和 C/N 两参数来预测 GI 值。根据李艳霞^[4]和 Bernal 等^[8]提出的有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标取 pH 为 8.0, C/N 为 12, 得出 GI 为 105.08%, 由于此值综合考虑了其他的因素,可作为牛粪堆肥腐熟的参

考指标。

3 结论

牛粪和秸秆通过混合堆肥能够得到有效地利用,可用来解决畜牧业固体废弃物环境污染问题。设置 10 d 或 15 d 的预堆期能使堆肥快速升温,促进牛粪堆肥腐熟稳定,在利用牛粪堆肥进行有机肥生产中,可以成为一种既经济又合理化的选择。

许多研究者研究表明以单一参数变化不能准确地预测堆肥的腐熟度,应综合各指标参数对腐熟度进行综合评价。本实验依据堆肥中各指标的相关关系,经多重逐步回归分析以 GI 为因变量,以 pH 和 C/N 为自变量建立方程得出 GI 为 105.08%,由于此预测值综合考虑其他因素,建议当 GI>105%时可作为牛粪堆肥腐熟的参考指标。但与 Miyuki 建立的方程相比,本实验选取的因素较少,可在以后的实验中综合其他因素对方程进一步修正,提高其预测的准确性,为实际生产为服务。

参考文献:

- [1] Wei Shi, Jeanette M Norton, Bruce E Miller, et al. Effects of aeration and moisture during windrow composting on the nitrogen fertilizer values of dairy waste composts [J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11: 17–28.
- [2] Suzelle Barrington, Denis Choinière, Maher Trigui, et al. Compost convective airflow under passive aeration[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86: 259–266.
- [3] 曾光明, 黄国和, 袁兴中, 等. 堆肥环境生物与控制[M]. 北京:科学出版社, 2006. 360–375.
ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, RUAN Xing-zhong, et al. Environmental biology and control of composting[M]. Beijing, Science Press, 2006. 360–375.
- [4] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学, 1999, 20 (3): 98–102.
LI Yan-xia, WANG Min-jian, WANG Ju-si. The maturity indexes and standards of organic solid waste composting[J]. *Journal of Environmental Science (China)*, 1999, 20 (3): 98–102.
- [5] Wang P, Changa C M, Watson M E, et al. Maturity indices for composted dairy and pig manures [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 767–

776.

- [6] Paré T, Dinel H, Schnitzer M, et al. Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper[J]. *Bio Fertil Soils*, 1998, 26: 173–178.
- [7] Gazi A Z, Kyriacou A, Kotsou M, et al. Microbial community dynamics and stability assessment during green waste composting[J]. *Global NEST Journal*, 2007, 9 (1): 35–41.
- [8] Bernal M, Paredes P C, Cegarra J, et al. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes [J]. *Biore-source Technology*, 1998, 63: 91–99.
- [9] 李国学, 张福锁, 黄焕忠, 等. 用水芹菜种子发芽特性评价污泥堆肥腐熟和生理毒性[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4 (增刊): 109–116.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo, HUANG Huan-zhong, et al. Seed germination and root growth of cress in water extract of sewage sludge compost for maturity and phytotoxicity[J]. *Journal of China Agricultural university*, 1999, 4 (suppl): 109–116.
- [10] Zueconi F, Forte M, Monaco A, et al. Biological evaluation of compost maturity [J]. *Biocycle*, 1981, 22 (4): 27–29.
- [11] GB 7959—1987, 粪便无害化卫生标准[S].
GB 7959—1987, Sanitary standard for the non-hazardous treatment of might soil[S].
- [12] Ko H J, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure[J]. *Waste management*, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2007.05.010.
- [13] Vuorinen A H, Saharinen M H. Evaluation of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting in a drum composting system[J]. *Agri Ecosys and Environ*, 1997, 66: 19–29.
- [14] Sánchez monedero M A, Roig A, Paredes C, et al. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures[J]. *Biore-source Technology*, 2001, 78: 301–308.
- [15] Goyal Sneh, Dhull S K, Kapoor K K. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96: 1584–1591.
- [16] Daniel Said Pullicino, Flora G Erriquez, Giovanni Gigliotti. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 1822–1831.
- [17] Miyuki Chikae, Ryuzoh Ikeda, Kagan Kerman, et al. Estimation of maturity of compost from food wastes and agro residues by multiple regression analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97: 1979–1985.