

堆肥处理过程中猪粪有机物的动态变化特征

高伟^{1,2}, 郑国砥¹, 高定¹, 陈同斌^{1*}, 韩晓日², 张义安¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 100161)

摘要: 为了解猪粪堆肥过程中各种有机物的变化特征, 并为判断猪粪堆肥腐熟度提供参考指标, 进行 42d 的高温好氧堆肥。结果表明, 堆体中的有机质含量呈下降趋势; 水溶性有机碳(DOC)含量在第 10d 达到最大值, 之后呈下降趋势; 易分解有机质含量呈下降趋势, 但在高温开始阶段呈上升趋势; 腐殖质含量呈上升趋势。说明堆肥过程中有机物不断向腐殖化方向转化。在研究 H/F 变化时发现, 它与判断堆肥腐熟度常用的化学指标(有机质、DOC)呈一定的相关性, 而且与易分解有机质和腐殖质也有较好的相关性。

关键词: 猪粪; 堆肥; 有机质; 水溶性有机碳; 易分解有机质; 腐殖质

中图分类号: X712 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2006)05-0986-05

Transformation of Organic Matter During Thermophilic Composting of Pig Manure

GAO Wei^{1,2}, ZHENG Guo-di¹, GAO Ding¹, CHEN Tong-bin¹, HAN Xiao-ri², ZHANG Yi-an¹

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Land and Environmental Sciences, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: Thermophilic composting of pig manure was studied in an attempt to elaborate upon organic matter transformation during the process and provided parameters for product maturity using chemical method. The following parameters were measured in 11 samples during the 42 days of composting: organic matter, dissolved organic carbon (DOC), degradable organic matter and humic matter (HM). Organic matter decreased during composting process constantly; DOC concentration increased to maximum at 10 days and declined thereafter; degradable organic matter decreased whole composting, but they increased in start of high-temperature stage; The increasing level of HM at various stages of composting indicate the progression of humification; H/F provide information correlating to conventional chemical parameters (organic matter, DOC) of compost maturity. Moreover, H/F has correlating to degradable organic matter and HM.

Key words: pig manure; composting; organic matter; dissolved organic carbon(DOC); degradable organic matter; HM

猪粪中含有丰富的植物营养元素和有机质, 是一种良好的有机肥源。腐熟的猪粪作为有机肥不仅可以提高作物的产量和品质, 而且可以增加土壤有机质含量, 改善土壤的理化性质^[1]。但未腐熟的猪粪施入土壤后, 由于不稳定有机物的强烈分解, 消耗根际土壤的氧气, 并产生有机酸等有毒物质, 抑制作物生长^[2]。

堆肥过程实质上是有机物质稳定化和腐殖化的过程。因此, 国内外学者对城市污泥、垃圾和牛粪等堆肥过程中各种有机物的变化特征做了许多研究^[3~5], 但对猪粪堆肥过程中有机物的变化特征仍缺乏深入研究。在不同堆肥物料的堆肥中, 其腐殖质及其组分存在差异^[6]。因此, 有必要进一步了解猪粪堆肥过程中各种有机物的变化特征。Chafetz 等^[3]和 Jiménez 等^[7]研究认为, 废弃物经过堆肥处理后腐殖质含量会显著增加; 而 Castaldi 等^[8]和廖新梯等^[9,10]认为, 城市垃圾等固体废弃物经过堆肥处理

后, 其腐殖质增加的很少或没有变化; 李吉进等^[11]的研究却发现, 在鸡粪和牛粪混合堆肥过程腐殖质呈下降趋势。因此, 到目前为止, 不同学者所得到的研究结论并不一致, 甚至相互矛盾。

易分解有机质和水溶性有机质(DOC)是有机质中比较活跃的部分, 对土壤微生物活动等许多过程均有明显的影响^[12]。其在堆肥产品中的含量无疑会直接影响到堆肥产品的质量及其应用效果。但目前对于堆肥过程中易分解有机质和 DOC 的动态变化过程的报道很少, 对此问题仍待深入研究。

了解猪粪中各种有机物在堆肥过程中的变化特征, 对于评价堆肥效果和堆肥产品的品质有重要意义。

收稿日期: 2005-04-22; 修订日期: 2005-08-10

基金项目: 国家杰出青年基金项目(40325003); 北京市自然科学基金重点项目(8051003)

作者简介: 高伟(1978~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为堆肥和有机废弃物资源化。

* 通讯联系人, E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

义,同时也可以为判断猪粪堆肥腐熟度和稳定性提供参考指标,为堆肥产品的安全农用提供保障。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试猪粪采自北京顺义南彩镇猪场,水分含量为67%,容重为 $710 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,有机质含量为 $424 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,易分解有机质为 $162 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,DOC为 $4399 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,C/N为27.填充材料为CTB调理剂^[13],调理剂的含水量和饱和含水量分别为2.68%、65.7%。

1.2 试验方法

采用堆肥池上部敞开,堆池尺寸为:1.5m×1.2m×1.8m,有效高度1.4m,调理剂与猪粪比例为1:1.试验采用温度反馈自动控制系统,通过堆肥自动监控软件 Compsort[™] 进行控制^[14],可以自动记录堆肥过程中温度变化情况,并对通风方式和通风量进行控制.堆肥方式为强制通风静态垛高温好氧堆肥.分别在堆肥开始的第1、3、6、8、10、12、18、22、26、32、42d采样,共11次.样品经过风干,粉碎用于分析。

1.3 分析方法

有机质采用 $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 外加热法^[15];水溶性有机碳(DOC)测定采用水:猪粪=10:1浸提,25℃振荡4h,过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜,浸提液中的碳用 Apollo-9000 TOC 分析仪测定;易分解有机质采用 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 外加热法^[16];腐殖质(HM)及其组成的测定采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 + 0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 提取 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法^[15]。

2 结果与讨论

2.1 有机质动态变化

在堆肥过程发生的各种生化反应中,有机质是微生物赖以生存和繁殖的基本条件,因此有机质的变化能在一定程度上反映出堆肥的进程,许多学者通过研究堆肥过程中有机质的降解率来判断堆肥的腐熟度^[3~7]。

由图1可见,猪粪经过高温好氧堆肥处理后,有机质含量明显降低.整个堆肥过程中,在微生物的分解作用下,猪粪中有机质含量从初始的 $424 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到堆后的 $224 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,猪粪的有机质含量共降低了60.8%.尤其在升温阶段后期和高温阶段(3~18d),堆体的水分含量(55%~60%)及温度条件都

比较适宜,微生物活动较为活跃,大量有机质不断被分解(图2).此阶段中,有机质的表观降解率为51.1%,占整个堆肥过程中有机质总降解率的84.0%.因此,在堆肥过程中应重点关注如何合理调节和控制堆肥高温期的温度、氧化条件,以加速有机质的降解,缩短堆肥时间.在高温阶段后期和降温阶段,大部分容易降解的有机质都已被降解,并且随着温度的降低,微生物活动减弱,其降解速率减慢并趋于稳定.在后续腐熟阶段,有机质的降解率仅为7.9%.对堆肥不同阶段猪粪中有机质含量进行差异显著性检验发现,只有后熟阶段有机质含量没有显著降低($p < 0.05$),因此可以适当缩短此阶段的时间,加快堆肥的反应进程。

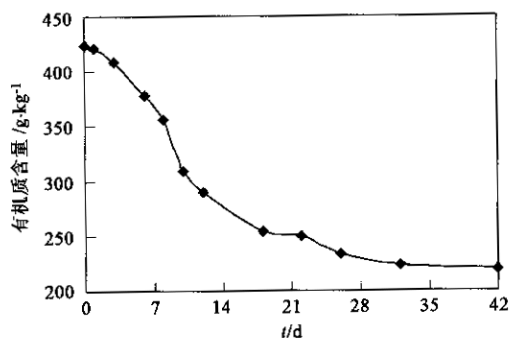


图1 猪粪堆肥过程中有机质的变化动态

Fig. 1 Variations in organic matter during composting

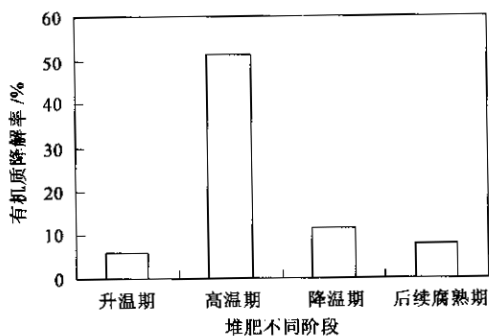


图2 猪粪堆肥过程中不同阶段有机质降解率

Fig. 2 Decomposed rate during composting

2.2 水溶性有机碳(DOC)的动态变化

由图3可见,猪粪经过42d的堆腐后,DOC整体呈先升高,后下降的变化趋势.猪粪中的DOC从堆肥前的 $4399 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下降到堆肥后的 $2634 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降低55.5%.但在升温和高温开始阶段,DOC却迅速增加,在第10d达到最大值($5997 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).这主要是在堆肥初始阶段,温度迅速升高,猪粪中易分解的脂肪和碳水化合物等有机物被

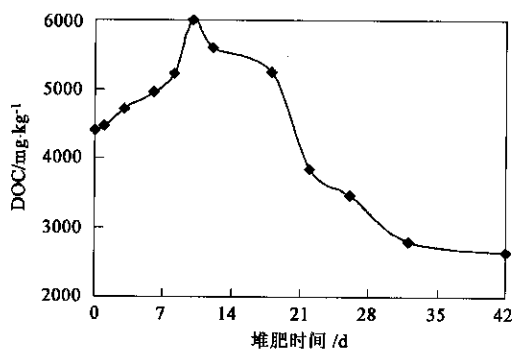


图3 猪粪堆肥过程中 DOC 的变化动态
Fig.3 Variations in DOC during composting

微生物降解,而且分解速度较快,生成较多的 DOC 的缘故.此后,随着有机物分解速度的减慢,原来分解的 DOC 又被微生物利用,使其含量又有所降低.有研究表明,堆肥过程中随着 DOC 的减少,猪粪中有效态重金属含量有所减少^[17]. Iannotti^[18] 等人在研究城市固体废弃物堆肥过程中 DOC 的动态变化时也发现相同的变化趋势.但是,Leita^[19] 和

Murwira 等人^[5] 分别研究城市固体废弃物和牛粪堆肥时,发现堆肥过程中 DOC 却是始终下降的.这说明在不同的堆肥物料和堆肥不同条件下,堆体中 DOC 的动态变化规律并不完全相同.

在堆肥过程中,微生物不能直接利用物料中的固相成分,需要通过微生物分泌胞外酶将物料中的可降解成分水解成水溶性成分才能加以利用^[20].因此很多学者通过研究物料浸提液中 DOC 的含量来判断堆肥腐熟度^[21-24].虽然 DOC 和有机质都有人用于判断堆肥的腐熟度,但是在本文中发现它们之间并没有相关性(表 1).在未腐熟的猪粪中 DOC 主要由蛋白质、多肽和多糖等物质组成,而在腐熟的猪粪中多由稳定的腐殖物质组成^[25].这种变化可以避免猪粪中 DOC 进入土壤后再发生降解.虽然有机固体废弃物中的 DOC 含量较少,但是它对重金属和有机污染物的有效性、毒性及其迁移特性等许多环境问题可能都有影响^[26].有研究发现,在施用猪粪堆肥产品的土壤上,DOC 可以提高土壤中重金属的水溶性和迁移性,提高土壤微生物的活性^[27].

表 1 不同有机物之间的相关分析¹⁾

Table 1 Correlation matrix between different organic matters

	有机质	DOC	易分解有机质	HM	FA	HA	H/F
有机质	1	0.460	0.698*	-0.799**	0.947**	-0.933**	-0.914**
DOC		1	0.652*	-0.777*	0.353	-0.669*	-0.718*
易分解有机质			1	-0.608	0.821**	-0.752*	-0.780*
HM				1	-0.667*	0.950**	0.950**
FA					1	-0.866**	-0.856**
HA						1	0.996**
H/F							1

1) ** 极显著 $p<0.01$; * 显著 $p<0.05$; $n=12$

2.3 易分解有机质的动态变化

如图 4 所示,猪粪中的易降解有机质从堆肥开始的 $162\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低到堆肥结束的 $106\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,共降低 38.7%.从总体来看,猪粪堆肥过程中,易分解有机质经历了一个由“降低→升高→降低”的波动过程;但在堆肥结束时,其含量明显减少.在升温阶段,猪粪中的易分解有机质减少的速度很快,由开始的 $162\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低到 $123\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,减少了 27.5%,占总减少量的 71.1%.升温阶段,堆体的氧气含量较高,有利于易分解有机质的分解,此阶段呈降低趋势.当堆体处于高温阶段时,微生物活动非常活跃,大量有机质被分解,在消耗易降解有机质的同时还会形成更多的易分解有机质,使其净含量反而呈上升趋势(达到 $140\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$).到了降温阶段,微生物分解有机物的能力下降,降解的易分解有机质主要满足微生物本身的需要,所以此阶段中堆体的易分

解有机质含量呈减少的趋势;在后熟阶段,易降解有机质含量稳定在相对较低的水平(约 $110\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$).

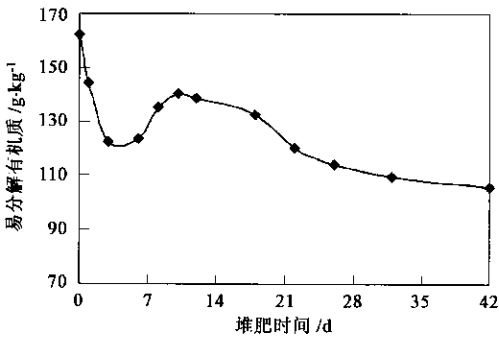


图4 堆肥过程中易分解有机质的动态变化
Fig.4 Variations in degradable organic matter during composting

在堆肥过程中易分解有机质的变化与 DOC 有一定的相关性(表 1),这是由于微生物的活性与

DOC 的含量有关,当 DOC 含量高时,微生物的活性也高,有机质被快速降解产生大量的易分解有机质. 猪粪经过堆肥处理后,易分解有机质的含量显著的降低($p < 0.0001$). 这可以避免易分解有机质进入土壤后再次大量分解,产生有害物质,影响作物生长. Garcia 等^[28]研究认为,在堆肥过程中,易降解有机质可能被微生物作为能源而最终消失,其含量可以作为判断堆肥腐熟度的参考指标. 但是对猪粪而言,易分解有机质含量的动态变化较为复杂,是否可以作为判断堆肥的腐熟度标准,还需通过研究进行检验和证实.

2.4 腐殖质(HM)及其组成的动态变化

由图 5 可见,在猪粪堆肥过程中,腐殖质(HM)、胡敏酸(HA)、富里酸(FA)都会发生显著的变化. 经堆肥处理后, HM 增加了 38.5%, 占总碳量的比例由堆肥前的 19.0%, 增加到堆肥腐熟后的 50.0%. 这与 Hsu 等人的研究结果一致^[29]. 从整个堆肥过程来看, HA 呈上升趋势, 从堆肥前的 $13.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $76.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; FA 则呈下降趋势, 从堆前的 $68.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $34.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. HA 与 FA 的比值(H/F)在堆肥过程中一直呈上升趋势; 堆肥开始和堆肥结束时, H/F 上升幅度相对较慢, 堆肥中期(10~22d)的高温阶段, H/F 上升的幅度较快. 这表明, 在猪粪好氧堆肥过程中, 微生物可以使腐殖化的程度不断提高, FA 的含量有所下降, 而 HA 的含量有所增加. 但廖新伟等^[9,10]在对猪粪和秸秆混合堆肥发现, 在堆肥的过程中 HM 含量变化不大, 只是在堆肥初始阶段 HM 含量有所增加, 堆肥结束时又有所回落. Inbar 等^[30]在研究牛粪堆肥时发现, 堆肥开始时 FA 含量较高, HA 较低; 随着堆肥过程的进行, 前者保持不变或稍有减少, 而后者大量产生. 这说明, 在不同学者所进行的堆肥试验中, HM 的变化趋势不尽相同. 因此, 一些学者试图通过腐殖质的变化来判断堆肥的腐熟度^[6~8], 至少在目前看来并不是十分可靠. 但在猪粪堆肥过程中发现, H/F 与各种有机物都有一定的相关性, 尤其与有机质呈极显著的相关性(表 1). 因此, 就本试验而言, H/F 在堆肥过程中不断增加, 在堆肥结束时达到一个稳定值(约 2.2), 因此当堆肥腐熟时, 其 H/F 大约稳定在 2.2 左右.

随着堆肥过程的不断进行, HM 堆肥中呈现为先降低, 后增加, 最后相对稳定的过程, 其变化幅度大约为 $70 \sim 110 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. HM 含量的增加可以提高堆肥质量. HM 是有机质的重要组成部分, 在土壤中

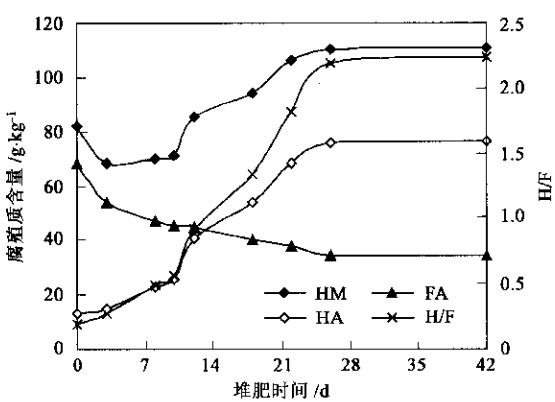


图 5 堆肥过程中 HM、FA 及 H/F 变化
Fig.5 Variations in HM, HF, FA and H/F during composting

可以吸附重金属离子, 加快杀虫剂的生物降解^[31], 减少其对作物的危害; 同时它还可以提高土壤的保肥保水能力, 促进土壤结构体的形成^[32].

3 结论

好氧高温堆肥处理后, 猪粪中的有机质、DOC、易降解有机质总体呈下降趋势; 腐殖质呈上升趋势, 其中 HA 增加, FA 降低, H/F 呈上升趋势, 但是当堆肥腐熟时, 这些指标都相对稳定. 这表明猪粪中的有机物不断向稳定化和腐殖化方向转化.

参考文献:

[1] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 717~722.
[2] Butler T A, Sikora L J, Steinhilber P M. *et al.* Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(6): 2141~2148.
[3] Chefetz B, Hatcher P G, Hadar Y. *et al.* Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste [J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(4): 776~785.
[4] Gennaro M C, Ferrara E, Abollino O. *et al.* Multi-method analysis in studies of characterization and degradation of municipal treatment sludges [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1993, 53(2): 101~114.
[5] Murwira H K, Kirchmann H, Swift M J. The effect of moisture on the decomposition rate of cattle manure [J]. Plant and Soil, 1990, 122(2): 197~199.
[6] Domcizel M, Khalil A, Prudent P. UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost [J]. Bioresource Technology, 2004, 94(2): 177~184.
[7] Jiménez E I, Garcia V P. Determination of maturity indices for city refuse composts [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1992, 38(4): 331~343.

- [8] Castaldi P, Alberti G, Merella R, *et al.* Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity [J]. *Waste Management*, 2005, **25**(2): 209~213.
- [9] 廖新伟, 吴银宝, 王植三, 等. 堆体大小对猪粪堆肥的影响和袋装堆肥的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, **19**(4): 287~290.
- [10] 廖新伟, 吴银宝. 通风方式和气温对猪粪堆肥的影响[J]. *华南农业大学学报(自然科学版)*, 2003, **24**(2): 77~80.
- [11] 李吉进, 郝晋民, 邹国元, 等. 高温堆肥碳氮循环及腐殖质变化特征研究[J]. *生态环境*, 2004, **13**(3): 332~334.
- [12] Smolander A, Loponen J, Suominen K, *et al.* Organic matter characteristics and C and N transformations in the humus layer under two tree species *Betula pendula* and *Picea abies*[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, **37**(7): 1309~1318.
- [13] 高定, 黄启飞, 陈同斌. 新型堆肥调理剂的吸水特性及应用[J]. *环境工程*, 2002, **20**(3): 48~50.
- [14] 陈同斌, 高定, 黄泽春, 等. 污泥堆肥自动化控制系统(V1.0)[Z]. 国家版权局: SR0529, 2001.
- [15] 鲍士旦主编. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 1999. 25~38.
- [16] 熊毅等编著. 土壤胶体(第二册): 土壤胶体研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 56~60.
- [17] 郑国砥, 陈同斌, 高定, 等. 好氧高温堆肥处理对猪粪中重金属形态的影响[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(1): 6~9.
- [18] Iannotti D A, Grebus M E, Toth B L, *et al.* Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**(6): 1177~1183.
- [19] Leita L, De Nobili M. Water-soluble fractions of heavy metal during composting of municipal solid waste [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991, **20**(1): 73~78.
- [20] Bernal M P, Paredes C, Sanchez M A, *et al.* Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes [J]. *Bioresource Technology*, 1998, **63**(1): 91~99.
- [21] Huang G F, Wong J W C, Wu Q T, *et al.* Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust [J]. *Waste Management*, 2004, **24**(8): 805~813.
- [22] Laor Y, Avnimelech Y. Fractionation of compost-derived dissolved organic matter by flocculation process [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(3): 257~263.
- [23] Bernal M P, SaÁnchez-Monedero M A, Paredes C, *et al.* Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, **69**(3): 175~189.
- [24] Goyal S, 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**(14): 1584~1591.
- [25] Hsu J H, Lo S L. Recycling of separated pig manure: characterization of maturity and chemical fractionation of elements during composting [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(1): 121~127.
- [26] Moore T R, Desouza W, Koprivnjak J F. Control on the sorption of dissolved organic-carbon by soils [J]. *Soil Science*, 1992, **154**(2): 120~129.
- [27] Japenga J, Dalenberg J W, Wiersma D, *et al.* Effect of liquid animal manure application on the solubilization of heavy metals from soil [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1992, **46**(1~3): 25~39.
- [28] Garcia C, Hernandez t, Costa F, *et al.* Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, **23**(13~14): 1501~1512.
- [29] Hsu J H, Lo S L. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure [J]. *Environmental Pollution*, 1999, **104**(2): 189~196.
- [30] Inbar Y, Hardar Y, Chen Y. Recycling of cattle manure: The composting process and characterization of maturity [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, **22**(4): 857~863.
- [31] Ra C S, Lo K V, Mavinic D S. Control of a swine manure treatment process using a specific feature of oxidation reduction potential [J]. *Bioresource Technology*, 1999, **70**(2): 117~127.
- [32] 史吉平, 张大道, 林葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质含量的影响[J]. *土壤肥料*, 2002, (1): 15~22.