

李洋, 席北斗, 赵越, 等. 不同物料堆肥腐熟度评价指标的变化特性[J]. 环境科学研究, 2014, 27(6): 623-627.

LI Yang, XI Beidou, ZHAO Yue, et al. Study of maturity parameter characteristics in composting process using different materials [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(6): 623-627.

不同物料堆肥腐熟度评价指标的变化特性

李 洋¹, 席北斗², 赵 越^{1*}, 魏自民¹, 徐小楠¹, 靳世蕊¹, 李晨辰¹

1. 东北农业大学生命科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150030

2. 中国环境科学研究院水环境系统工程研究室, 北京 100012

摘要: 为探讨工厂化好氧堆肥的堆肥周期及腐熟度评价体系, 提高工厂堆肥效率, 选取上海地区不同来源典型的 9 种物料, 采用工厂化工艺进行堆肥试验, 对堆体的温度、含水率、pH、C/N、 $w(\text{OM})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 、 $\rho(\text{DOC})$ 、 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 及 GI (种子发芽指数) 腐熟度评价指标变化规律进行研究. 结果表明: 堆肥腐熟度受多方面因素影响, T [(C/N)_{终点}/(C/N)_{起点}] 与 $w(\text{OM})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、GI、 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 之间相关性显著, T 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、GI 3 个指标能准确有效地判断堆肥腐熟情况. 堆肥结束后 T 在 0.50~0.59 之间, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 301~346 mg/L, GI 为 81.31%~91.03%. 不同物料堆肥腐熟难易程度不同, 通过聚类分析将 9 种物料分为 5 类: 第 1 类 厨余、杂草、生活垃圾、园林垃圾; 第 2 类 果蔬、污泥; 第 3 类 秸秆; 第 4 类 鸡粪; 第 5 类 猪粪. 厨余、杂草、生活垃圾、园林垃圾、污泥、秸秆堆肥成分复杂较难腐熟, 需要 35 d 达到腐熟标准; 鸡粪及猪粪堆肥结构简单较易腐熟, 29 d 即可达到腐熟标准. 据此可适当将工厂化堆肥周期缩短为 35 d.

关键词: 不同物料; 腐熟度评价; 统计分析; 评估

中图分类号: X75

文章编号: 1001-6929(2014)06-0623-05

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2014.06.09

Study of Maturity Parameter Characteristics in Composting Process Using Different Materials

LI Yang¹, XI Bei-dou², ZHAO Yue¹, WEI Zi-min¹, XU Xiao-nan¹, JIN Shi-rui¹, LI Chen-chen¹

1. College of Life Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Laboratory of Water Environmental System Engineering, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: In order to explore the composting cycle and the compost maturity evaluation system, the effectiveness of maturity parameters during the composting process was assessed based on chemical and biological measurements. The parameters included temperature, moisture content, pH, C/N, Organic Matter (OM), NH_4^+-N , NO_3^--N , dissolved organic carbon (DOC), the ratio of DOC to dissolved organic nitrogen (DON) and Germination Index (GI). The samples included nine typical compost sources in Shanghai. The results showed that T value (the ratio of C/N at initial stage and C/N at final stage of composting), OM, NH_4^+-N , NO_3^--N , DOC/DON and GI were correlated with each other. The parameters indicated that the compost maturity was affected by the combination of all parameters, but not necessarily by each measure individually. The results suggested that T value, NH_4^+-N and GI were more suitable for use as indicators of the compost maturity than others. In order to describe the level of maturity, a hierarchical cluster analysis was performed based on T value, NH_4^+-N and GI. At the end of composting, the ranges of T value, NH_4^+-N and GI were from 0.50 to 0.59, 301 to 346 mg/L and 81.31% to 91.03%, respectively. The different composts were clustered into five groups: the first group included kitchen waste (KW), lawn waste (LW), municipal solid waste (MSW) and green waste (GW); the second group were sludge (S) and fruit and vegetable waste (FVW); the third group was primarily straw waste (SW); the fourth group was composed of chicken manure (CM); and the fifth group was pig manure (PM). According to the parameters of compost maturity (T value, NH_4^+-N and GI), the maturity was lower in KW, LW, MSW and GW, which reached an acceptable level of stability in 35 days, while the maturity was higher in CM and PM, which reached an acceptable level of stability in 29 days. The results suggested that the composting process with different materials could come to an end in 35 days based on the compost technology.

收稿日期: 2013-10-14

修订日期: 2014-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178090); 黑龙江省自然科学基金项目(200917); 国家科技支撑计划项目(2012BAJ21B00)

作者简介: 李洋(1987-), 女, 黑龙江双城人, liyang_0229@126.com.

* 责任作者 赵越(1970-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士, 博导, 主要从事生物化学与分子生物学领域的研究, zhao1970yue@163.com

Key words: different materials; compost maturity; statistical analysis; assessment

固体废物种类繁多,其中农业废弃物(畜禽粪便、秸秆、果蔬等)、生活垃圾、污泥等由于含有大量的可降解物质,堆肥法成为其生物处理的主要方式之一^[1-4]。堆肥过程中物料稳定化进程是判断堆肥成功与否的重要依据,因此,堆肥腐熟度评价一直是该领域研究的主要内容^[5-7]。由于正确评价堆肥腐熟状况是一个复杂的问题,因此至今鲜见统一的指标筛选标准。目前,堆肥腐熟度评价指标主要包括物理、化学指标(如碳氮组分、阳离子代换量、腐殖化程度等)及生物学指标(如发芽指数、微生物种群数量等)^[8-10]。但由于不同堆肥原料组成、性质的不同,致使堆肥过程中物质转化效率存在显著的差异,很难用单一指标对堆肥腐熟度进行正确评价。因此,在堆肥腐熟度评价方面,通常对堆肥物料开展多个指标的检测以确定堆肥的腐熟度^[11-15]。综合以往报道可知,堆肥过程中碳氮组分特性、发芽指数等指标已广泛用于堆肥腐熟程度的评价,但对来源不同的物料堆肥评价结果有时并不一致,因此,堆肥腐熟度指标在工厂化堆肥中需要进行实践验证。对堆肥腐熟度相关参数进行科学率定,不仅可以指导工厂化堆肥生产,还克服了以往只依据温度、气味或固定堆肥周期等经验判断的主观因素影响,可为工厂化堆肥提高堆肥效率、保障堆肥质量提供理论与实践依据。

基于此,该研究以上海松江区固体废物处理厂为依托,选取不同有机废弃物,采用工厂化好氧堆肥工艺开展堆肥实践,通过对堆肥过程中相关指标的动态分析评价,以期为工厂化堆肥质量及其过程控制提供科学依据,进而提升工厂化堆肥的环境、经济效益。

1 材料与方法

1.1 堆肥场地

堆肥试验场地依托上海美圣环保科技有限公司(上海松江固废综合处理厂),厂区占地面积12.4 hm²,日处理量为1 500 t,采用二次发酵堆肥工艺,堆肥周期为40 d。

1.2 样品的采集和预处理

样品采集:采集工厂附近9种不同物料——鸡粪、猪粪、厨余、杂草、果蔬垃圾、秸秆、园林垃圾、污泥以及生活垃圾。

由于江南地区湿度大,为避免堆肥厌氧发酵,堆肥前对物料进行预处理,用秸秆作为调节剂进行含水率和C/N的调节,控制初始含水率为70%左右,初始C/N在20~25之间,颗粒直径为1.5~3.0 cm。将不

同物料于发酵车间统一堆肥,堆成长5.0 m、宽2.0 m、高1.5 m的条形堆,在堆肥过程中每周进行1次翻堆,通风、透气。在不同堆肥时间测量堆肥温度。采用四分法收集样品(总量500 g),贮存于零下20℃冰箱备用。

1.3 分析方法

1.3.1 浸提液的获取

取5 g鲜样,计算样品干质量,按固液比(g/mL)为1:10加入2 mol/L KCl溶液,200 r/min振荡浸提1 h,过0.45 μm滤膜,用于 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的测定。

取10 g堆肥干样,按1:10(g/mL)加入双蒸水,在24℃下于200 r/min下震荡24 h,在4℃下12 000 r/min离心20 min,上清液过0.45 μm的滤膜,用于 $\rho(\text{DOC})$ (DOC为可溶性有机碳)、 $\rho(\text{DON})$ (DON为可溶性有机氮)的测定。

1.3.2 试验测定方法

$\rho(\text{总碳})$ 、 $\rho(\text{DOC})$ 和 $\rho(\text{DON})$ 均采用岛津TOC-VcpH有机碳分析仪测定; $\rho(\text{TN})$ 采用凯氏消煮法测定; $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 采用纳氏比色法^[16]测定; $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 采用分光光度计法^[16]测定。 $w(\text{OM})$ 采用灼烧法测定;GI(种子发芽指数,%)参照Gress发芽试验^[17]测定。

$$GI = (c_{\text{处理}} \times l_{\text{处理}}) / (c_{\text{对照}} \times l_{\text{对照}}) \times 100\%$$

式中: c 为种子发芽率; l 为根长,mm。

1.4 统计分析

采用SPSS 19.0、Origin 8.0软件对试验数据进行统计分析。

按照变量分群、组间关联的聚类方法进行系统聚类分析,绘制树状图。

2 结果与讨论

2.1 $\rho(\text{DOC})$ 、 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 的变化

$\rho(\text{DOC})$ 是堆料中各种微生物优先利用的碳源^[18]。堆肥初期易降解物质快速分解,随后特殊的难降解物被降解,此时微生物对DOC的利用率大于有机物被胞外酶降解速率^[19],因此 $\rho(\text{DOC})$ 呈先升后降的趋势,在第7天达到峰值。研究表明,堆肥过程中 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 可以表征堆肥的腐熟程度。一般认为^[20],当堆肥 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 降为5~6时,表明堆肥已达到腐熟标准。如图1(a)所示,堆肥过程中 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 均呈先升后降的趋势。至堆肥结束(35 d)时,各物料 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 范围在7~12。因此,如果以 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 判断,显然各种物

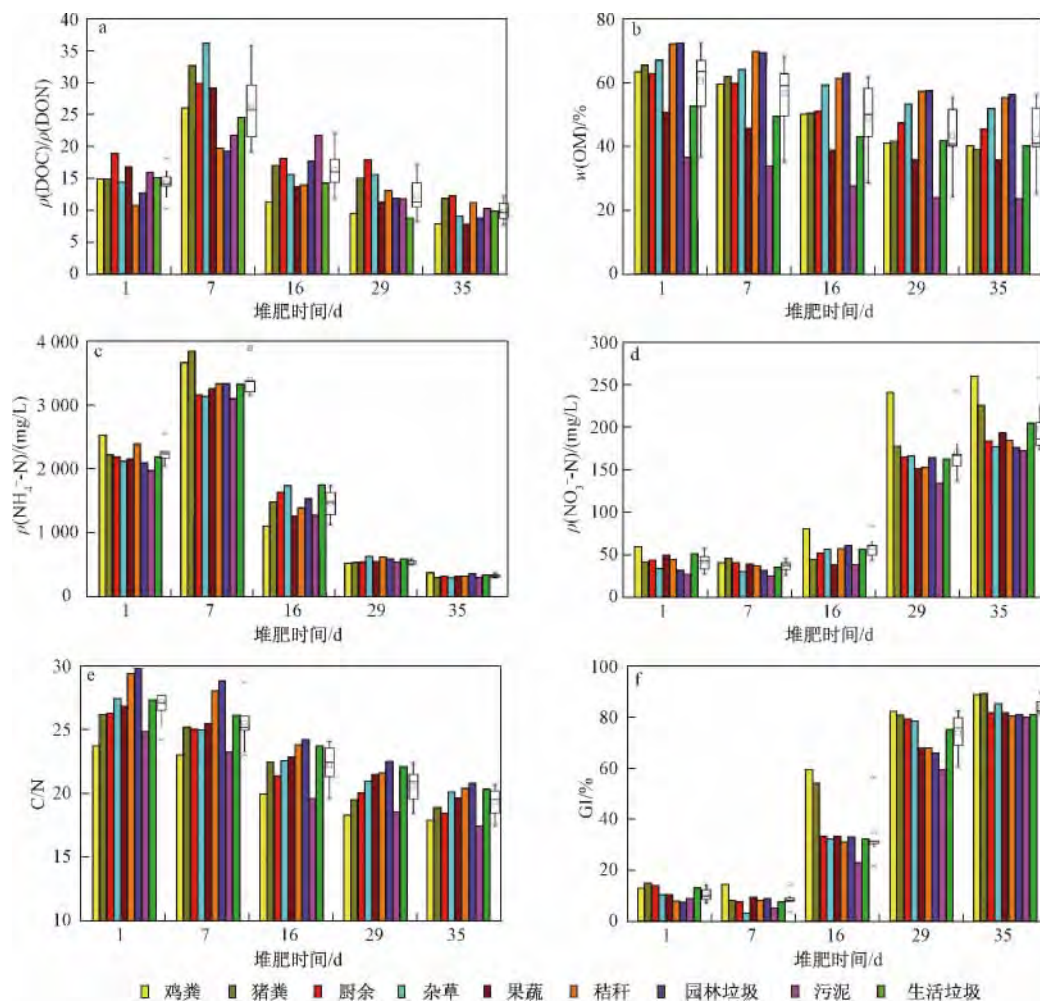


图1 不同物料堆肥过程中各指标的变化

Fig. 1 The changes in maturity parameters during the composting process

料堆肥均未达到腐熟标准,因此 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 不适合作为工厂堆肥的评价指标。

2.2 $w(\text{OM})$ 的变化

堆肥实际上是有机质在微生物的作用下分解,同时分解产物又合成新的腐植酸物质的过程^[21],因此, $w(\text{OM})$ 的变化可以用来表征堆肥的腐殖化程度。由图1(b)可见,堆肥过程中各物料 $w(\text{OM})$ 均呈逐渐降低趋势,但 $w(\text{OM})$ 及降幅存在明显差异。分析表明,OM的降解率与其含量不具相关性。由于秸秆、园林垃圾等物料中难降解的有机物(纤维素、木质素)含量较高,虽然二者的 $w(\text{OM})$ 较高,但降解率较低,分别为23.23%、22.17%;鸡粪、猪粪中易降解的有机物(蛋白类、脂类)含量较高^[22],二者的OM降解率也相对较高,分别为36.27%、40.11%。

2.3 堆肥过程中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的变化

堆肥过程中氮素形态之间的变化是一个复杂的

过程,各阶段微生物伴随着明显的氨化和硝化反应过程,因此 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的变化趋势可以作为判断堆肥腐熟度的依据^[23]。由图1(c)可见,不同物料堆肥升温期 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 显著上升,在高温期达到峰值,后期逐渐趋于稳定。在堆肥中、前期,不同物料堆肥的 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 差异较大,但堆肥后期不同物料的 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 基本一致,约为300 mg/L。Luz等^[24]认为,当堆肥过程中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 低于400 mg/L时,物料基本腐熟。由此初步判断,鸡粪、猪粪、杂草、污泥等堆肥第29天基本达到腐熟,其他物料第35天时也达到腐熟。由图1(d)可知,虽然不同物料的 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 在堆肥中、前期变化不大,但在第16天后均大幅上升。这主要是由于堆肥前期温度高,抑制了硝化细菌的生长,堆肥降温后,硝化细菌大量繁殖,导致 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 快速升高^[25]。堆肥结束后 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 在301~346 mg/L之间。

2.4 固相 C/N 的变化

堆肥处理是微生物在适宜条件下,利用其中可降解的碳源作为能源的反应过程^[26],因此,C/N是评价堆肥腐熟度的直观的化学指标之一。由图1(e)可见,堆肥过程中不同来源物料固相C/N均呈明显下降趋势。一般认为堆肥C/N<20时可以认为其基本腐熟^[27]。该研究堆肥结束后的C/N降至11.02~16.00之间,但对一些原料(如污泥)而言,其本身C/N就很低,结合其他指标分析可知,此时C/N不适合作为工厂堆肥腐熟度的评价指标。为此,Morel等^[28]建议采用 $T = (C/N)_{\text{终点}} / (C/N)_{\text{起点}}$ 指标评价,并认为当 $T < 0.6$ 时,堆肥达到腐熟。该研究表明,猪粪、秸秆、污泥等物料在堆肥第29天达到腐熟标准, $T < 0.6$;其他物料在堆肥第35天达到腐熟标准,其 T 值在0.50~0.59之间。

2.5 GI 的变化

GI是一种常用的评价堆肥腐熟度的指标,可靠性较好,可以直接反应堆肥的腐熟状况^[29]。由图1(f)可见,堆肥初期(1~7d)GI均较低,变幅较小,堆肥7d后,GI呈明显增加趋势,并在后期趋于平稳。研究^[30]表明,当培养48h时,GI达到80%~85%,就可以认为堆肥对植物没有毒性达到腐熟。该研究表明,在堆肥过程中,猪粪和鸡粪堆肥的GI在各堆肥阶段均明显高于其他物料,二者在第23天分别达到80.52%和81.02%;杂草和厨余垃圾的GI在第29天也达到了80%以上;其余物料的GI则在第35天达到了80.00%。堆肥结束后,GI在81.31%~91.03%之间。

2.6 指标间的相关性分析

综上,固相C/N、 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 等指标不适合于该研究试验所开展的不同来源物料腐熟度评价,同时应用不同指标评价堆肥腐熟度也存在一定的差异,因此,进行了堆肥腐熟度指标的相关性分析,以期对不同来源堆肥腐熟度指标的进一步优选提供依据。相关分析表明, T 与 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ ($R = 0.39, P = 0.00$)、 $w(\text{OM})$ ($R = 0.70, P = 0.00$)、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ ($R = 0.71, P = 0.00$)呈显著正相关,与 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ ($R = -0.83, P = 0.00$)、GI ($R = -0.84, P = 0.00$)呈显著负相关;GI与 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ ($R = 0.94, P = 0.00$)呈显著正相关,与 $w(\text{OM})$ ($R = -0.46, P = 0.00$)、 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ ($R = -0.63, P = 0.00$)、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ ($R = -0.87, P = 0.00$)呈显著负相关; $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 与 $w(\text{OM})$ ($R = 0.47, P = 0.00$)、

$\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ ($R = 0.72, P = 0.00$)呈显著正相关,与 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ ($R = -0.79, P = 0.00$)呈显著负相关。在该研究条件下,各指标的相关性显著,多个指标联合可快速有效地说明堆肥腐熟情况。

2.7 聚类分析

选取相关性显著并且具有量化标准的腐熟度评价指标—— T 、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、GI进行层次聚类分析,结果如图2所示。由图2可知,将9种物料分为5类:第1类,厨余、杂草、生活垃圾、园林垃圾;第2类,果蔬、污泥;第3类,秸秆;第4类,鸡粪;第5类,猪粪。由此可见,不同物料堆肥过程整体变化趋势一致,但个体之间也存在差异。研究^[27]表明,秸秆中木质素、纤维素含量较高,不易降解;厨余盐分较高;生活垃圾成分相对复杂;杂草及园林垃圾堆肥中含有少量的纤维素、半纤维素物质,因此以上几种堆肥中微生物降解过程相对较慢,腐熟较慢。果蔬、污泥组成相对简单,微生物反应相对剧烈,禽畜粪便氮素含量高,易被微生物利用,堆肥更易腐熟,鸡粪及猪粪堆肥第29天达到腐熟。该研究结果表明,虽然不同物料堆肥腐熟难易程度不同,但在第35天时均达到了完全腐熟标准,建议将堆肥周期统一为35d。与工厂实际40d的堆肥周期相比,该研究结果缩短了堆肥周期,提高了堆肥效率,降低了投资和运行成本,因此建议工厂实际堆肥周期调节至35d。

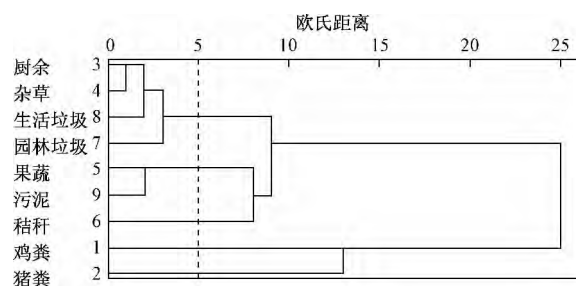


图2 9种物料的聚类分析

Fig. 2 Clustering analysis of nine composts

3 结论

a) 堆肥腐熟度受多方面因素影响,单个指标只能片面的反应堆肥情况, T 与 $w(\text{OM})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、GI、 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 之间相关性显著,C/N及 $\rho(\text{DOC})/\rho(\text{DON})$ 不适宜作为工厂化堆肥腐熟度的评价指标,具有量化标准的 T 、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、GI能准确、有效的判断堆肥腐熟情况,更适用于工厂化堆肥腐熟度的评价。堆肥结束后 T 在0.50~0.59之间, $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 在301~346 mg/L之间,GI在81.31%~91.03%之间。

b) 不同物料堆肥腐熟难易程度不同,聚类分析将9种物料分为5类:第1类 厨余、杂草、生活垃圾、园林垃圾;第2类 果蔬、污泥;第3类 秸秆;第4类,鸡粪;第5类 猪粪。禽畜粪便堆肥相对较易腐熟,堆肥35 d时,各物料均达到腐熟标准,因此建议工厂化堆肥周期可适当调整为35 d,以提高生产效率。

参考文献(References):

- [1] TREMIER A,TEGLIA C,BARRINGTON S. Effect of initial physical characteristics on sludge compost performance [J]. *Bioresource Technology* 2009,100(15):3751-3758.
- [2] MANFRED S. Trace and nutrient elements in manure,dung and compost samples in Austria [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007,39(6):1383-1390.
- [3] ZHANG R,EL-MASHAD H M,HARTMAN K,et al. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology* 2007,98(4):929-935.
- [4] 杨天学,席北斗,魏自民,等.生活垃圾与畜禽粪便联合好氧堆肥[J].*环境科学研究* 2009,22(10):1187-1192.
- [5] BERNAL M P,ALBURQUERQUE J A,MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment[J]. *Bioresource Technology*,2009,100(22):5444-5453.
- [6] CASTALDI P,GARAU G,MELIS P. Maturity assessment of compost from municipal solid waste through the study of enzyme activities and water-soluble fractions [J]. *Waste Manage* 2008,28(3):534-540.
- [7] KATO K,MIURA N. Effect of matured compost as a bulking and inoculating agent on the microbial community and maturity of cattle manure compost [J]. *Bioresource Technology* 2008,99(9):3372-3380.
- [8] OFOSU-BUDU G K,HOGARH J N,FOBIL J N,et al. Harmonizing procedures for the evaluation of compost maturity in two compost types in Ghana. *Resources [J]. Conservation and Recycling* 2010,54(3):205-209.
- [9] 杨延梅,席北斗,刘洪亮,等.餐厨垃圾堆肥理化特性变化规律研究[J].*环境科学研究* 2007,20(2):72-77.
- [10] 魏自民,王世平,席北斗,等.生活垃圾堆肥过程中腐殖质及有机态氮组分的变化[J].*环境科学学报* 2007,27(2):235-240.
- [11] RAUT M P,PRINCE WILLIAM S P M,et al. Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste: a compost maturity analysis perspective [J]. *Bioresource Technology* 2008,99:6512-6519.
- [12] 牛俊玲,郑宾国,梁丽珍.餐厨垃圾与麦秸混合堆肥中碳素物质变化规律研究[J].*农业环境科学学报* 2012,31(3):626-630.
- [13] GAJALAKSHMI S,ABBASI S A. Neem leaves as a source of fertilizer-cum-pesticide vermicompost [J]. *Bioresource Technology*, 2004,92(3):291-296.
- [14] KHALIL A I,HASSOUNA M S,EL-ASHQAR H M A,et al. Changes in physicalchemical and microbial parameters during the composting of municipal sewage sludge [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2011,27(10):2359-2369.
- [15] LIM S,LEE K S,LEE S I,et al. Carbon mineralization and retention of livestock manure composts with different substrate qualities in three soils [J]. *Journal of Soils and Sediments* 2012,12(3):312-322.
- [16] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [17] TIQUIA S M,TAM N F Y. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge [J]. *Bioresource Technology* 1998,65(1):43-49.
- [18] KOH J,KIM K Y,HYEON T K,et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metalcontents in composts made from animal manure [J]. *Waste Manage* 2008,28(5):813-820.
- [19] 戴芳,曾光明,袁兴中,等.生物表面活性剂在农业废物好氧堆肥中的应用[J].*环境科学* 2005,26(7):181-185.
- [20] ZMORA-NAHUM S,MARKOVITCH O,TARCHITZKY J,et al. Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2005,37(11):2109-2116.
- [21] 陈鲜妮,来航线,田霄鸿,等.接种微生物条件下牛粪+麦秸堆腐过程有机组分的动态变化[J].*农业环境科学学报* 2009,28(11):2417-2421.
- [22] RUGGIERI L,GEA T,MOMPEO M,et al. Performance of different systems for the composting of the source-selected organic fraction of municipal solid waste [J]. *Biosystems Engineering* 2008,101(1):78-86.
- [23] 许效天,杨跃伟,孟俊峰.城市污水污泥堆肥控制因素和腐熟度评价[J].*环境科学与管理* 2008,33(10):191-194.
- [24] LUZ R,TERESA G,MARISOL M,et al. Performance of different systems for the composting of the source-selected organic fraction of municipal solid waste [J]. *Biosystems Engineering* 2008,101:78-86.
- [25] MOHAMMAD A I K,KIHACHI U,SAKAE H,et al. Physicochemical,including spectroscopic,and biological analyses during composting of green tea waste and rice bran [J]. *Biol Fertl Soils* 2009,45:305-313.
- [26] 江定钦,徐志平,阮琳.园林垃圾堆肥过程中理化性质的变化及堆肥对几种园林植物生长的影响[J].*中国园林* 2004(8):63-65.
- [27] 廖新佛,吴银宝,汪植三,等.堆体大小对猪粪堆肥影响和袋装堆肥的研究[J].*农业工程学报* 2003,19(4):287-290.
- [28] MOREL T L,COLIN F,GERMON J C,et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost [M]//GASSER T K R. *Composting of agriculture and other wastes*. London & New York: Elsevier Applied Science Publish,1985:56-72.
- [29] ZHU Nengwu. Composting of high moisture content swine manure with corncobin a pilot-scale aerated static bin system [J]. *Bioresource Technology* 2006,97:1870-1875.
- [30] BERTRAN E,SORT X,SOLIVA M,et al. Composting winery waste: sludges and grape stalks [J]. *Bioresource Technology* 2004,95:203-208.

(责任编辑:孙彩萍)