

餐厨垃圾与麦秸混合堆肥中碳素物质变化规律研究

牛俊玲, 郑宾国, 梁丽珍

(郑州航空工业管理学院资源与环境研究所, 郑州 450015)

摘 要:餐厨垃圾堆肥是实现营养物质资源良性循环的重要途径,为了研究不同季节环境条件下餐厨垃圾与小麦秸秆混合高温好氧堆肥过程中碳素物质变化规律, 试验设定了具有中原地区季节代表性的 3 种环境温度在 15、25、35 ℃条件下分别进行了为期 21 d 的堆肥。结果表明,餐厨垃圾和麦秸混合堆肥在 25 ℃和 35 ℃条件下,堆体温度能满足堆肥产品无害化要求,而 15 ℃时不能满足; 35 ℃条件下的 pH 值在前期下降幅度最多,15 ℃条件下 pH 值则始终保持在 6.0 以下;在 25 ℃和 35 ℃条件下,TOC 含量明显比 15 ℃条件下下降幅度大,堆肥物料中的糖类物质很容易被微生物分解,经过 10 d 95%以上的糖类物质就被分解,粗纤维降解率均达到 60%以上,而在 15 ℃条件下到堆肥结束时,仍有 30%多的糖类没有被分解,粗纤维也只分解了 27.57%。

关键词:餐厨垃圾;麦秸;堆肥;碳素物质

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)03-0626-05

Change of Carbon Substance Characteristics During the Composting of Kitchen Wastes and Wheat Straw

NIU Jun-ling, ZHENG Bin-guo, LIANG Li-zhen

(Institute of Resources and Environmental Science, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Composting of kitchen waste is an important way to achieve the virtuous circle of the nutrition material resources. In order to study the changes of carbon materials during the process of high temperature aerobic composting, in which the kitchen waste was mixed with the wheat straw in different season environment conditions, the compost was proceeded for 21 days and under 15 ℃, 25 ℃ and 35 ℃ three ambient temperature conditions which had season representative for Central Plain. The result showed that the compost temperature of kitchen waste mixed with wheat straw could meet the harmless requirements under the conditions of 25 ℃ and 35 ℃, meanwhile, it could not meet under condition of 15 ℃. The initial pH value of compost material was partial acid, and during the initial stage of composting, the pH value had a descending trend and then slowly rose again. The pH value decreased mostly in the early period under 35 ℃, it kept below 6.0 all the time under 15 ℃. Under the condition of 25 ℃ and 35 ℃, TOC content obviously declined faster than that of 15 ℃. Carbohydrate material in compost material was also easier to be decomposed by microorganisms, more than 95% of the carbohydrate material was decomposed during 10 days, crude fiber degradation rate reached 60% above, but there were still more than 30% carbohydrate material not to be decomposed and 27.57% crude fiber was decomposed only at the end of the composting process under the condition of 15 ℃.

Keywords: kitchen waste; wheat straw; compost; carbon material

随着我国人民生活水平的提高,餐厨垃圾的产生量迅速增加。从国际上看,中国的食品垃圾在垃圾种类构成比重中远远高于世界其他国家和地区;从国内看,食品垃圾是仅次于建筑垃圾的第二大垃圾源。然而,由于我国城市生活垃圾分类体系尚不完善,数量

巨大的餐厨垃圾进入其他城市生活垃圾处理体系中,对现有的城市生活垃圾收运和处理处置产生了许多不良影响。餐厨垃圾有机物含量极高,包含糖、纤维、半纤维、脂肪、蛋白质、木质素等物质,在去除动物骨头、餐巾纸、筷子等少量杂质之后,挥发性固体与总固体含量的比值(VS/TS)达到 90%以上^[1],十分容易被生物降解。

收稿日期:2011-10-07

基金项目:河南省高校青年骨干教师资助计划项目(2009GGJS-0990);

河南省重点科技攻关项目(167202190009)

作者简介:牛俊玲(1972—),女,山西长治人,博士,副教授,研究方向为固体废物处理与资源化。E-mail:niujl72@zzia.edu.cn

目前,国内外餐厨垃圾生物资源化利用技术主要有饲料化技术、肥料化处理技术、生物厌氧发酵处理

技术和生物柴油技术等^[2-4]。其中肥料化技术是将餐厨垃圾转变成富含有机质和氮、磷、钾等营养元素的有机质肥料,这种使垃圾实现从自然界来又回归自然界的良性循环,是处理和消纳餐厨垃圾经济有效的重要途径。但由于餐厨垃圾具有含水率高、含油脂量高、含盐量高、易腐烂等特点,针对畜禽粪便、城市垃圾、生活污水泥等有机固体垃圾堆肥化的研究成果对其未必适用。国内研究餐厨垃圾堆肥大多以锯末为膨松剂^[5-6],但锯末来源有限,本研究采用餐厨垃圾与麦秸进行混合好氧堆肥,探讨堆肥过程中碳素物质转化规律,既有利于解决餐厨垃圾排放和麦秸随意焚烧带来的环境污染问题,又有利于麦秸和营养物质还田,对实现环境、经济与社会 3 种效益都具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用餐厨垃圾取自郑州航空工业管理学院食堂,经人工筛选出其中的大块骨头和筷子等杂物;小麦秸秆取自河南省中牟县,经粉碎后选取粒径为 1~2 cm 的麦秸待用。材料性质见表 1。

表 1 堆肥材料的性质

Table 1 Characteristics of compost material

试验材料	全碳/%	全氮/%	C/N	pH	含水率/%
餐厨垃圾	40.62	2.51	16.18	5.47	77.42
麦秸	42.35	0.57	74.30	6.70	2.37

注:碳、氮含量以堆料干基计,含水率以湿基计。

1.2 堆肥装置和堆制方案

好氧堆肥装置结构如图 1 所示,由堆肥反应器、塑料膜、导气杆、内袋、温度控制器等组成。堆体采用强制通风供氧方式,每间隔 1 h 进行 2 h 的通气。

将餐厨垃圾和麦秸按 C/N 为 25 左右的比例均匀地混合(二者的质量比 1.25:1),调节混合物料水分含量在 65%左右,然后按此质量比进行物料配比,将混合均匀的堆肥物料装入 3 个堆肥反应器中,分别置于 15、25、35 ℃ 3 个不同的环境温度下进行试验。堆制期间,每日早晚测定温度 1 次。堆制开始 1 d 后取样,以后每隔 2 d 取样 100~300 g,样品分成两份,一份为鲜样储存于 4 ℃ 冰箱中,待样品全部采集结束后,湿样用于测定 pH 值,其余样品自然风干后磨碎过 60 目筛,用于测定其他指标;另一份在 105 ℃ 下烘干测定水分。在每次取样时采用人工方法翻堆。

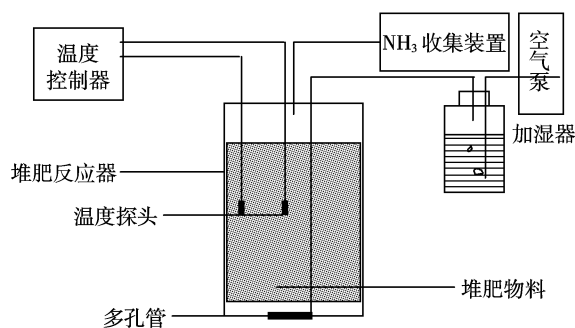


图 1 好氧静态堆肥试验装置

Figure 1 The diagram of equipment for aerobic static composting

1.3 测定方法

总有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定;全氮采用凯氏定氮法;总糖采用蒽酮比色法测定;pH 值的测定是按堆肥湿物料:蒸馏水=1:2 (7 g 湿物料与 14 mL 蒸馏水混合)的比例于振荡器上混匀、抽滤,以 pH 计测定^[7];粗纤维含量采用自动纤维素分析仪测定。所有测定项目均设 3 次重复。

2 结果与分析

2.1 温度的变化

堆体温度能在一定程度上反映堆肥系统中的微生物活性,同时也对其中微生物的活性产生影响,是堆肥化反应进程的直观表现,它是堆肥过程控制的一个重要指标^[8]。席北斗等测定了初始温度为 40、55、65 ℃ 时对生活垃圾堆肥效率的影响,认为当堆料初始温度为 40 ℃ 时,堆温上升最快,堆肥效率最高^[9];韩涛等采用小规模模拟试验,研究不同初始环境温度对餐厨垃圾堆肥过程和堆肥效率的影响,认为初始环境温度控制在 30 ℃ 时,堆料高温期持续时间较短,不能满足堆肥无害化要求;初试环境温度控制在 40 ℃ 时,能最有效地加快堆料分解时间,缩短堆腐时间,并满足堆肥产品无害化要求^[10]。

本研究从实际生产角度出发,设定具有中原地区季节代表性的 3 种温度条件,从图 2 可以看出:餐厨垃圾在 25 ℃ 和 35 ℃ 条件下,最高温度均达到 55 ℃ 以上,且升温速度较快,降温也快;而在 15 ℃ 时,最高温度仅 46.7 ℃ 左右,在 40 ℃ 以上持续了 5 d,到堆肥结束时,温度始终保持在 20 ℃ 左右,达不到无害化处理要求。25 ℃ 条件下的堆体温度在 55 ℃ 以上持续了 3 d,35 ℃ 条件下的堆体温度在 55 ℃ 以上持续了 6 d,这两种温度条件下堆肥均达到了美国环境保护局 (USEPA) 的堆肥无害化要求,均能起到较好的杀菌作

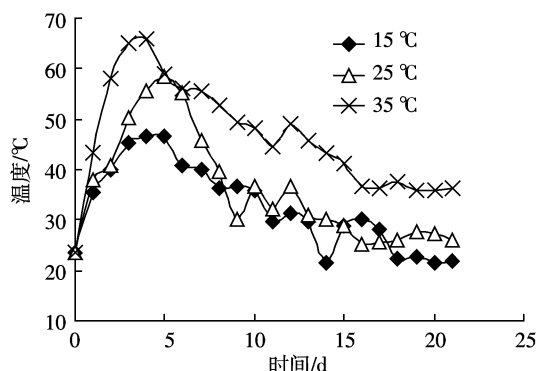


图2 堆肥过程中温度的日变化情况

Figure 2 Change of the temperature during composting

用^[11]。堆肥在高温期持续时间长短在一定范围内与堆体大小有关。

2.2 pH 值的变化

由于餐厨垃圾分散性差、容重大、空隙容易被压缩,堆体容易形成厌氧区,使得堆肥物料的初始 pH 值常为偏酸性。在本实验中,初始 pH 值为 5.31,堆肥过程中的 pH 值变化如图 3 所示,可以看出,在堆肥开始时,堆体的 pH 值都呈下降趋势,然后缓慢回升,其中以 35 °C 条件下的 pH 值在前期下降幅度最多,中期上升速度也最快。而在 15 °C 条件下 pH 值变化很缓慢,到堆肥后期 pH 值始终保持在 6.0 以下,这主要是由于高温促进餐厨垃圾发酵。在堆肥初期,堆体内含有大量有机质,大量的嗜酸性微生物(真菌、酵母菌等)将其转变成为小分子的有机酸,导致有机酸在堆体内累积,出现了堆体 pH 值下降^[12],其后由于有机氮矿化产生的大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,导致 pH 值上升。

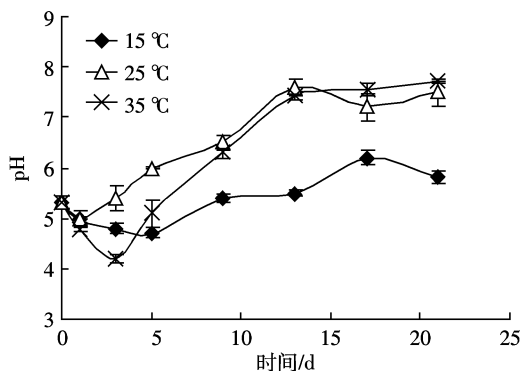


图3 堆肥过程中 pH 值的变化

Figure 3 Change of pH during composting

2.3 总有机碳(TOC)含量的变化

堆肥过程中碳源是微生物直接用来合成自身生命体的重要组成部分,有机物料中起始有效态碳物质

及分解过程中产生的碳强烈地影响着整个堆体的分解过程。在堆肥化过程中,一方面由于堆料中的不稳定有机质分解转化为二氧化碳、水、矿物质,另一方面分解产物在微生物的作用下又重新合成新的化合物——腐植酸物质,所以堆肥过程中 TOC 的变化情况能在一定程度上反映碳素物质变化规律。从图 4 可以看出,在整个堆肥过程中,3 种环境温度条件下 TOC 含量均呈下降趋势,且前期堆肥高温时间内下降幅度较大,后期较为平缓。在 25 °C 和 35 °C 条件下,TOC 含量明显比 15 °C 条件下降幅度大,在堆肥结束时,分别降低了 73.82% 和 81.83%,而在 15 °C 条件下只降低了 39.44%。

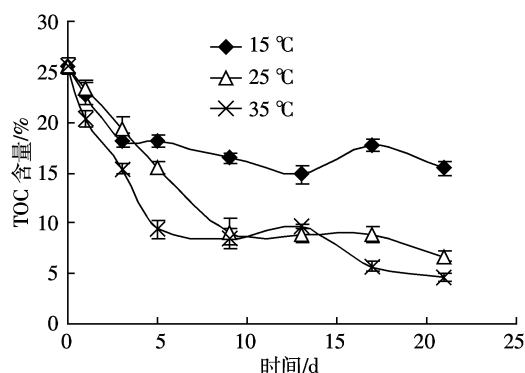


图4 堆肥过程中 TOC 含量的变化

Figure 4 Change of TOC during composting

2.4 总糖含量的变化

图 5 显示的是餐厨垃圾和麦秸混合堆肥过程中总糖含量的变化情况,可以看出,堆肥物料中的糖类物质很容易被微生物分解,在堆肥初期含量就迅速下降,在 25 °C 和 35 °C 条件下,10 d 时间 95% 以上的糖类物质就被分解了,这一阶段释放出大量的热量,也正是堆肥的高温阶段。而在 15 °C 条件下,堆体中的糖类分解缓慢,到 21 d 堆肥结束时,仍有 30% 多的糖类没有被分解,这也直接影响了堆体温度的上升。在堆肥化进程中,糖类易降解的有机物的含量变化会直接影响到整个过程中的微生物活动及难降解有机物的降解效率^[13]。

2.5 粗纤维物质含量的变化

餐厨垃圾中的可溶性糖和淀粉含量较高,粗纤维含量一般在 2.61%~4.64% 之间,而麦秸以粗纤维物质组成为主,对堆肥过程中的粗纤维含量变化进行分析,有助于了解堆肥的腐熟程度。从图 6 可以看出,在堆制初期的 3 d 时间内,3 种环境条件下粗纤维的相对含量基本没有变化,在堆肥 5 d 后,25 °C 和 35 °C 条

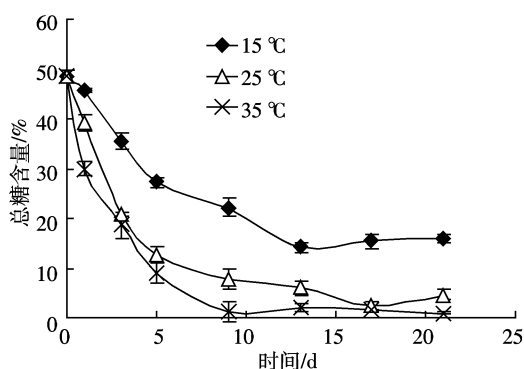


图5 堆肥过程中总糖含量的变化

Figure 5 Change of total sugar during compost

件下的粗纤维含量下降较为迅速,到21 d堆制结束时分别减少了60.90%和66.93%,而15 °C条件下的粗纤维含量在整个堆制过程中只降低了27.57%。从本实验结果可以看出,由于组成餐厨垃圾的碳水化合物大都是易被微生物降解的,高温出现比其他物料堆肥早且维持时间较短,堆体中的纤维素物质分解也有所提前,即使堆肥时间只有21 d,在微生物活性较强的25 °C和35 °C条件下,粗纤维降解率均达到60%以上,说明餐厨垃圾前期的分解为纤维素降解菌提供了良好的生存条件。

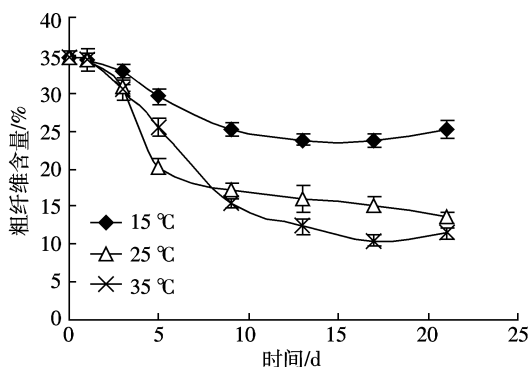


图6 堆肥过程中粗纤维含量的变化

Figure 6 Change of crude fiber during composting

3 讨论

(1)根据堆肥的一般规律,本次堆肥将餐厨垃圾和麦秸按C/N为25左右的比例均匀混合,调节混合物料水分含量在65%左右,在此条件下堆肥中微生物对物料的降解效果最好,满足了对水分和C/N要求。但在实际生产中C/N和水分含量的变化会直接影响到堆肥过程,特别是在开放式堆肥条件下,由于堆体温度升高和翻堆通风,在高温期后,堆体中的水分

会大幅减少,需要补充水分。本实验采用了密闭式强制通风高温静态堆肥装置,所以在堆肥过程中水分损失量有限^[8]。但从图2可以看出,由于在每次取样时进行人工翻堆,使堆体的温度发生起伏变化。

(2)本试验设定的15、25、35 °C的相对恒定环境温度,是具有中原地区季节代表性的3种环境温度条件,室外环境温度变化基本没有影响到本试验的环境温度。结果表明,餐厨垃圾和麦秸混合堆肥在25 °C和35 °C条件下,堆体温度能满足堆肥产品无害化要求,而15 °C时不能满足。本试验结果与韩涛等为了探索不同初始环境温度对餐厨垃圾堆肥过程和堆肥效率的影响,利用3组卧式可控温堆肥反应器进行的小规模模拟试验的结果有很大不同,他们的研究表明,初始环境温度控制在30 °C时,堆料高温期持续时间较短,不能满足堆肥无害化要求,初始环境温度控制在40 °C时,能最有效地加快堆料分解时间,初始环境温度超过50 °C,将导致堆肥pH值过低不利于好氧堆肥反应的进行^[10]。原因在于他们的试验中,初始环境温度为30 °C的反应器是以实验室温度为环境温度,无保温措施,自然升温堆肥,堆肥期间的环境温度基本保持在20 °C以下,而40 °C和50 °C温度条件的反应器没有保温层,必然受外界低温的影响,而在本试验中设置的3种环境温度均不受外界环境影响,能保证在25 °C和35 °C条件下,堆体温度不受外界低温影响,完全满足堆肥产品无害化要求。总之,不同的堆肥装置、不同的堆制方案和物料配比都会显著影响到堆肥过程中的温度和物质变化规律。

(3)国内外堆肥研究大多是以畜禽粪便、污泥和生活垃圾为主料进行堆制,餐厨垃圾由于含水率高、油脂含量高、易腐烂,针对上述有机固体垃圾的研究成果对其未必适用。同时餐厨垃圾由于含盐量较高,被普遍认为其堆肥产品品质不高,不仅抑制微生物的活性,降低堆肥效率,而且容易造成土壤酸化和损害作物根部,长期施用还会导致土壤的盐碱化^[14-15]。本文对TOC、总糖和粗纤维等碳素物质的变化规律进行研究,没有发现微生物分解活动的异常情况,这可能是由于堆肥物料中餐厨垃圾与麦秸的质量比例较小(1.25:1),相对于有的研究所取餐厨垃圾与膨化物质的质量比为3:1而言^[10],物料中含盐率较低,对堆肥效率以及微生物活动影响有限。但关于餐厨垃圾含盐率对有机质含量、营养元素、温度、C/N、pH等堆肥主要特性变化的影响,确实需要进一步研究,以推进餐厨垃圾高效好氧堆肥处理技术在大规模工业化处理中

的广泛应用。

4 结论

(1)从堆肥温度变化来看,餐厨垃圾和麦秸混合堆肥在 25 ℃和 35 ℃条件下,最高温度均达到 55 ℃以上,且升温速度较快,高温持续时间长,能起到较好的杀菌作用,而在 15 ℃时,最高温度仅 46.7 ℃左右,达不到无害化作用。

(2)堆肥物料的初始 pH 值偏酸,在堆肥初期,堆体的 pH 值都呈下降趋势,然后缓慢回升,其中以 35 ℃条件下的 pH 值在前期下降幅度最大,中期上升速度也最快,15 ℃条件下 pH 值变化很缓慢,到堆肥后期其 pH 值始终保持在 6.0 以下。

(3)从 TOC 和总糖含量变化情况来看,在 25 ℃和 35 ℃条件下,TOC 含量明显比 15 ℃条件下下降幅度大,堆肥物料中的糖类物质很容易被微生物分解,在堆肥初期含量就迅速下降,在 25 ℃和 35 ℃条件下,经过 10 d 95% 以上的糖类物质就被分解,使堆肥过程进入高温阶段。

(4)餐厨垃圾和麦秸混合堆肥在堆制初期的 3 d 时间内,3 种环境条件下粗纤维的相对含量基本没有变化,但高温出现时间早且维持时间较短,堆体中的纤维素物质分解也有所提前,在微生物活性较强的 25 ℃和 35 ℃条件下,粗纤维降解率均达到 60% 以上,在 15 ℃条件下的粗纤维含量则变化较少。

参考文献:

- [1] Chang J I, Tsai J J, Wu K H. Thermophilic composting of food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97: 116-122.
- [2] Wan Qunhui, Cheng Guishi, Sun Xiaohong, et al. Recovery of lactic acid from kitchen garbage fermentation broth by four-compartment configuration electrodialyzer[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41: 152-158.
- [3] Thomas Rundberget, Ida Skaar, Ame Flaoyen. The Presence of penicillium and penicillium mycotoxins in food waste[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2004, 90: 181-188.
- [4] 谢炜平, 梁彦杰, 何德文, 等. 餐厨垃圾资源化技术现状及研究进展[J]. *环境卫生工程*, 2008, 16(2): 43-48.
XIE Wei-ping, LIANG Yan-jie, HE De-wen, et al. Status and development of food residue resource technology[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2008, 16(2): 43-48.
- [5] 杨延梅, 席北斗, 刘鸿亮, 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.
YANG Yan-mei, XI Bei-dou, LIU Hong-liang, et al. Study on the change of physicochemical characteristics of food wastes during aerobic composting[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(2): 72-77.
- [6] 任连海, 何亮, 宁娜, 等. 餐厨垃圾高效好氧堆肥过程参数的影响因素研究[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(5): 40-44.
REN Lian-hai, HE Liang, NING Na, et al. Study of influencing factors on process parameters of high efficiency aerobic composting for restaurant garbage[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2010, 28(5): 40-44.
- [7] Lei F, Vander Gheynst J S. The effect of microbial inoculation and pH on microbial community structure changes during composting[J]. *Process Biochemistry*, 2000, 35: 923-929.
- [8] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 121-125.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Solid waste composting and organic fertilizer production[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2000: 121-125.
- [9] 席北斗, 李英军, 刘鸿亮, 等. 温度对生活垃圾堆肥效率的影响[J]. *环境污染防治技术与设备*, 2005, 16(7): 33-36.
XI Bei-dou, LI Ying-jun, LIU Hong-liang, et al. Effects of temperature on composting process of municipal solid waste[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 16(7): 33-36.
- [10] 韩涛, 任连海, 张相锋, 等. 初始环境温度对餐厨垃圾好氧堆肥过程的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(9): 1458-1462.
HAN Tao, REN Lian-hai, ZHANG Xiang-feng, et al. Impact of initial temperature on aerobic composting for the restaurant garbage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(9): 1458-1462.
- [11] USEPA. Composting: yard trimmings and municipal solid waste[Z]. SEPA, 530-R-94-003, 1993.
- [12] Elango D, Thinakaran N, Panneerselvam P, et al. Thermophilic composting of municipal solid waste[J]. *Applied Energy*, 2009, 86: 663-668.
- [13] 牛俊玲, 崔宗均, 李国学, 等. 高温堆肥中复合菌系对木质纤维素和林丹降解效果的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 375-379.
NIU Jun-ling, CUI Zong-jun, LI Guo-xue, et al. Study on the degradation of lignocellulose and lindane by composite microbial system during thermophilic compost process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 375-379.
- [14] 梁彦杰, 谢炜平, 何德文, 等. 水洗-脱水预处理降低餐厨垃圾堆肥含盐量的实验研究[J]. *环境卫生工程*, 2008, 16(3): 44-49.
LIANG Yan-jie, XIE Wei-ping, HE De-wen, et al. Study on decreasing salinity of food residue composting by pretreatment of water washing-dewatering[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2008, 16(3): 44-49.
- [15] Wen Chien Kuo, Kae Yiin Cheng. Use of respirometer in evaluation of process and toxicity of thermophilic anaerobic digestion for treating kitchen waste[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 1805-1811.