

强制好氧堆肥不同阶段氧气浓度变化 及其与腐熟指标关系

徐 智¹, 张 琴¹, 张陇利¹, 梁丽娜¹, 王 琳², 李 季¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475001)

摘 要:以鸡粪为主要原料采用自制不锈钢堆肥发酵罐,研究了强制好氧堆肥过程中氧气浓度的变化规律以及堆肥中氧气浓度的变化与堆肥部分腐熟指标的关系。结果表明,堆肥不同阶段耗氧特征不同,即堆肥的各个时期氧气浓度从 19%左右下降到 5%左右的时间不同,快速升温期、高温期、降温期和腐熟期分别耗时为 15、30、60 和 180 min;根据耗氧特征设定通风方案,并且通过堆肥过程中氧气浓度的动态变化规律,验证和调整了通风方案。通风方案最终确定为:快速升温期、高温期、降温期和腐熟期通风间隔时间分别为 15、20~30、60 和 180 min;堆肥腐熟后期氧气浓度变化与腐熟指标有密切的关系,以 C/N 比和发芽指数(GI)为考核指标,发现堆肥停止供氧 3 h 后,堆体内氧气浓度保持在 7%以上可以考虑作为堆肥腐熟的标志。

关键词:堆肥;氧气浓度;耗氧周期;腐熟指标

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)01-0189-05

Dynamics of Oxygen Concentration and Its Relationship with Maturity Indexes During Forced Aeration Composting

XU Zhi¹, ZHANG Qin¹, ZHANG Long-li¹, LIANG Li-na¹, WANG Lin², LI Ji¹

(1. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. College of Environment and Planning of Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: Dynamics of the temperature, oxygen concentration, oxygen consumption rate, C/N ratio and germinate index (GI) during composting of chicken manure were studied, and the relationship between oxygen consumption rate with the classic indicators of evaluating the maturity of compost, C/N ratio and GI, and maturity of compost were researched. The results showed that the oxygen depletion time varied from about 19% to 5% with different periods of composting, being 15, 30, 60 and 180 min at rapid rising-temperature stage, persistent high-temperature stage, descending-temperature stage and maturity stage respectively. According to this, the ventilation plan was designed and tested. The final ventilation time was set as 15, 20~30, 60 and 180 min for those 4 different composting stages. To take C/N ratio and germinate index (GI) as criteria, the compost would be matured when the aeration terminated 3 h after and the oxygen concentration inside the pile still maintained above 7%.

Keywords: composting; oxygen concentration; ventilation cycle; maturity index

氧气是影响好氧高温堆肥过程的关键因素之一,主要包括通气量、通风工艺以及氧气与堆肥稳定性等方面的研究。堆肥过程中氧气的消耗量通常包括生物

降解所需要的化学需氧量,带走多余水分和热量所需要的气流量,通气量被认为是影响堆体温度的重要因素^[1-2],同时它还影响堆肥中微生物的活性,堆体内氧气含量降低会直接影响生物降解的动力学机制^[3],并影响到堆肥化的进程。一般认为,化学需氧量(折合成空气量)是进料物质干质量的 2 倍,而除去堆肥水分和热量的需氧量(折合成空气量)大约是基质干质量的 30~50 倍^[4]。

国外对堆肥通风工艺的研究较早,自 20 世纪 30 年代即开始堆肥装置的研究,体积从 10~10 000 L 不

收稿日期:2008-03-22

基金项目:北京市生态学重点学科项目(XK10019440);北京都市农业学科群建设项目(XK100190553);广东省农业攻关项目(2006A20302001)

作者简介:徐 智(1980—),男,湖北公安人,博士研究生,主要从事有机固体废物资源化利用方面的研究。

E-mail: xuzhicau@yahoo.com.cn; xuzhi9910@126.com

通讯作者:李 季 E-mail: lijicau@cau.edu.cn

等,体积越大,越接近工厂化的规模,模拟效果越好^[5-6]。典型的通风控制方式有 Beltsville、Rutgers、Leeds 和混合通风控制方式。相比之下,国内这方面的研究起步较晚,采用实验室规模的装置模拟工厂堆肥过程,集中出现在近年,采取的方式主要有通风静态仓式,静态垛式^[7],卧式滚筒式^[8]等,通风工艺主要是温度-时间反馈控制的连续通风方式和间歇通风的方式。

关于氧气与堆肥的稳定性方面的研究,主要集中在呼吸速率与堆肥稳定性的关系上。随着监测手段的提高,也有关于利用耗氧速率判断堆肥腐熟度和不同堆肥阶段耗氧特征的报道^[9-10],但是,对于堆肥不同阶段氧气浓度的动态变化规律以及氧气浓度的变化与堆肥腐熟指标关系关注的较少。另外,堆肥原料的特性也是影响堆肥进程的关键因素之一^[11-12],研究和探讨不同原料堆肥过程中的耗氧动态变化规律也很有必要。

本研究以鸡粪为堆肥的主要原料,利用卧式发酵仓系统,采用间歇式强制通风供氧堆肥方式,研究其强制通风堆肥过程中不同阶段氧气浓度的动态变化规律以及堆体中氧气浓度的变化与堆肥腐熟指标关系,并通过优化堆肥通风方案,为堆肥腐熟判断及好氧过程控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以鸡粪为堆肥基本原料,以锯末为堆肥调理剂,试验在中国农业大学科学园完成。鸡粪取自中国农业大学动物科技学院养鸡场;锯末取自北京市海淀区上庄木器厂,为杨木锯末,取回后过筛。堆肥原料的基本性质见表 1。

表 1 堆肥原料的基本性质

Table 1 The properties of composting materials

堆肥原料	总碳/%	全氮/%	C/N	含水率/%
鸡粪	28.2	2.1	13.4	49.0
锯末	52.7	0.4	131.8	16.4

1.2 试验设计

在堆肥发酵前,参照堆肥物料性质,按一定的比例调节堆肥物料的 C/N 比在 25~30 之间,水分调节在 55%左右。充分混合均匀后装入实验室自制的堆肥发酵罐中。发酵罐尺寸为:长 2 m,直径 0.8 m,有效容积 1 m³ 的卧式圆柱形不锈钢罐体,外壁包有一层厚为 50 mm 的保温层,罐体内配有搅拌桨,以便于自

动翻堆。通风方式为强制通风伴随翻堆方式,堆肥开始后以 4.0 kg·cm⁻² 的压力向堆体中通风,通风量为 1.0 m³·min⁻¹,通风频率根据堆肥需氧量来调节;每 3 d 翻堆一次。堆肥时间设计为 17 d(2007 年 1 月 3 日至 2007 年 1 月 20 日)。

在堆体的上中下共 5 个不同部位放置 5 个温度探头(PT-100 铂电极),在堆体的中心位置插入氧气探头(MF010-0-LC 型 O₂ 传感器),将每个探头连接到高精度远传数采系统上,并和计算机连接,实施温度和氧气的在线监测。

1.3 采样及测定

1.3.1 采样时间及方法

在堆肥开始后位于堆肥表层 15 cm 处分别于第 1、4、8、11 和 17 d 采样,通过发酵罐上预留的采样孔,按 5 点采样法的原则,充分混匀、风干备用。

1.3.2 测定指标及方法

温度和氧气通过 PT-100 铂电极和 MF010-0-LC 型 O₂ 传感器在线监测。

有机碳用重铬酸钾容量法-外加热法^[13],全 N 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,凯氏定氮法^[14]。

耗氧速率的测定:耗氧周期中 O₂ 浓度减少的量和耗氧周期所耗时间的比值。

种子发芽指数(GI)测定:取 5 g 鲜样加入 50 mL 蒸馏水,振荡 1 h,吸取 5 mL 滤液,加到铺有 2 张滤纸的 9 cm 培养皿中,每个培养皿播 20 粒黄瓜种子,30 ℃下培养 48 h,测定发芽率和根长,计算种子发芽指数(GI)值。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度动态变化

在整个堆肥过程中,温度变化经历了升温、持续高温和降温阶段,总共历时 17 d(图 1)。堆体温度上升到 50 ℃需要的时间约为 2 d,高温阶段(>50 ℃)持续了 9 d,其中 60 ℃以上的温度持续 4 d,堆体的温度从第 12 d 开始迅速降温。堆体温度符合国家《粪便无害化卫生标准(GB7959—1987)》的要求。

2.2 堆肥不同阶段耗氧特点和规律

堆肥不同阶段的耗氧特点如图 2 所示。经过 5 min 的强制通风,堆肥内的氧气浓度都能够迅速恢复,各个时期氧气浓度降到 5%左右的时间分别为 15、30、60 min 和超过 180 min。因此,确定堆肥在升温期、高温期、降温期和腐熟期的通风间隔时间分别为 15、30、60 min 和 3 h。

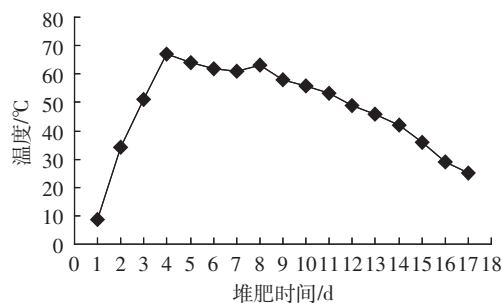


图1 堆肥过程中温度动态变化

Figure 1 Changes of temperature during composting

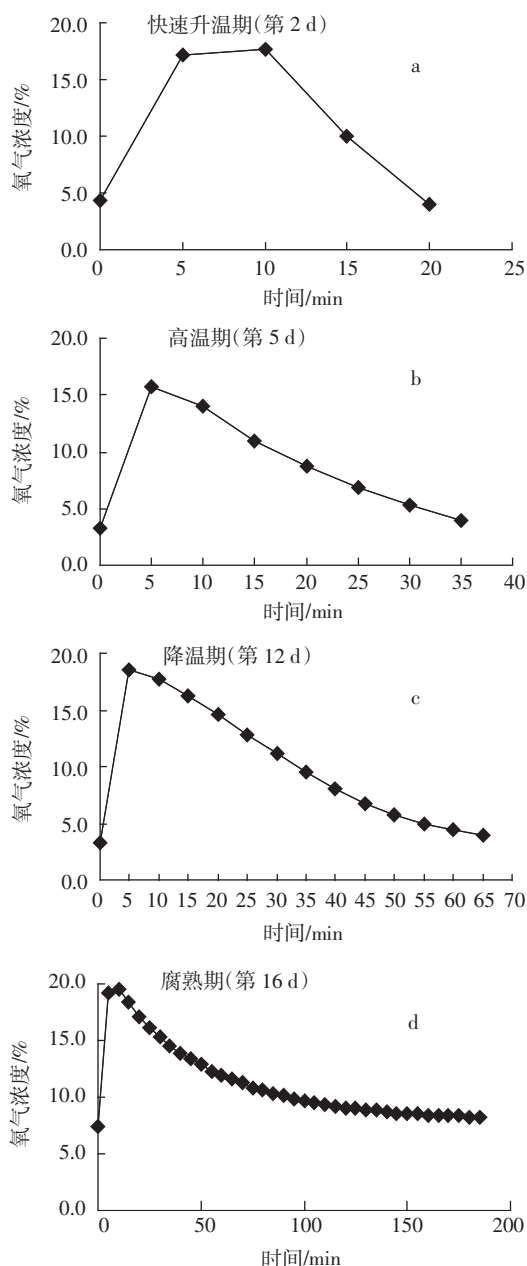


图2 堆肥不同阶段一个通风周期内氧气浓度的变化

Figure 2 Changes of oxygen concentration in a ventilation cycle at different composting stages

堆肥不同阶段耗氧规律如图3所示。堆肥在快速升温阶段经过5 min强制通风后,氧气的浓度在15 min左右下降到5%左右,各个周期的变化相对一致,经历时间为15 min(图3a)。第5~8 d是堆肥发酵的高温阶段($>60^{\circ}\text{C}$)。堆肥过程中氧气浓度的变化趋势相似,在第5 d经过1个通风周期以后(30 min),氧气的浓度降到3%左右;第8 d经过1个通风周期以后(30 min),氧气的浓度降到5%左右(图3b、图3c)。这种差异的存在,可能是因为第5 d时,堆肥处于高温前期,有机物质分解和微生物的作用都较高温后期(第8 d)要旺盛,高温前期的耗氧速率较后期要快。堆肥进行到第12 d,堆肥进入降温期,通风周期调整为间隔1 h一次(图3d),经历一个通风周期后,氧气浓度基本保持在4%左右。堆肥末期(第16 d和第17 d)(图3e和图3f),经过5 min通风后,氧气的浓度能够恢复到20%左右,氧气在堆体内经过3 h的消耗后堆肥里的氧气浓度还在7%以上。

2.3 氧气浓度变化与腐熟指标

如图4所示,C/N比在整个堆肥过程中呈下降趋势,当堆肥进行到第17 d时,C/N下降到16.6;种子发芽指数(GI)呈上升趋势,到堆肥第17 d,GI达到81.1%;耗氧速率先上升后下降,在堆肥进行到第4 d时达到峰值 $1.76\%\cdot\text{min}^{-1}$,之后耗氧速率下降,到第17 d时,耗氧速率为 $0.22\%\cdot\text{min}^{-1}$ 。在堆肥后期一个通风周期后,堆体的氧气浓度保持在7.5%左右(图3e和图3f)。

在本试验条件下,以C/N比和GI值作为堆肥腐熟指标的参照值,堆肥腐熟期通气结束后3 h堆体里的氧气浓度比较稳定地维持在7%以上,耗氧速率下降为 $0.22\%\cdot\text{min}^{-1}$ 可以作为堆肥的腐熟评价指标。

3 讨论

温度是决定堆肥进程和堆肥微生物生长的重要因素。温度低于 20°C 时,堆肥的进程缓慢甚至处于停滞状态^[15]。因此,在堆肥的温度启动阶段,可以考虑不通风,有两方面的原因:一是堆肥堆制前,物料经过充分的拌匀,堆体有较好的孔隙度,加上这个阶段耗氧速度慢,氧气量比较充足;二是这个阶段温度需要积累,强制通风不利于温度的升高。随着堆肥的进行,堆体的温度升高,微生物的活性也随着增强,堆体的温度在 $30\sim 55^{\circ}\text{C}$ 之间微生物的活性和生长速率可能很快,该阶段也是整个堆肥过程中耗氧速率上升最快的区间,耗氧周期比较短,约在15 min左右(图3a和图4),与陈同斌等^[11]的研究结果相似。当温度高于 60°C

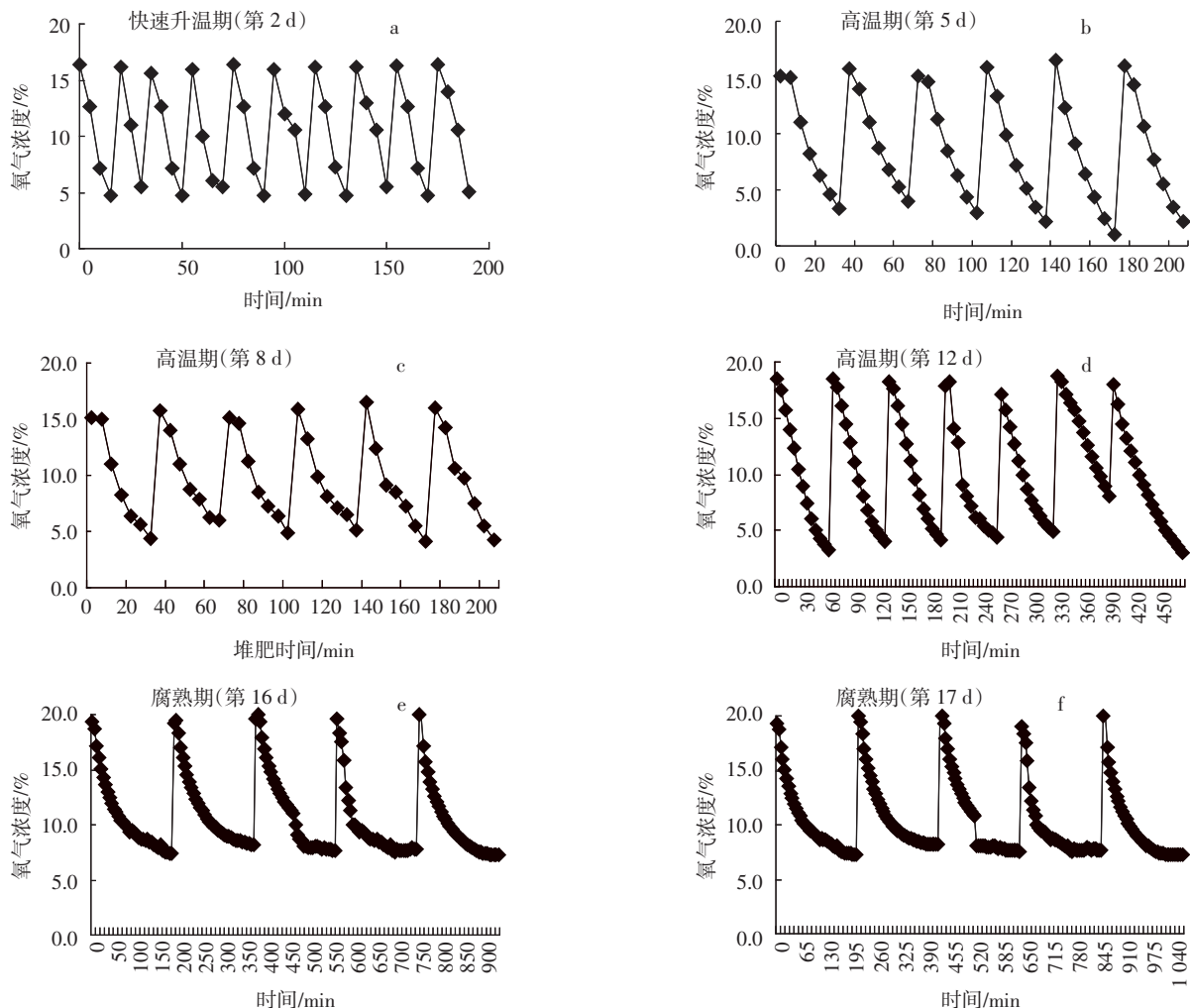


图 3 堆肥不同阶段氧气浓度动态变化

Figure 3 Changes of oxygen concentration during composting

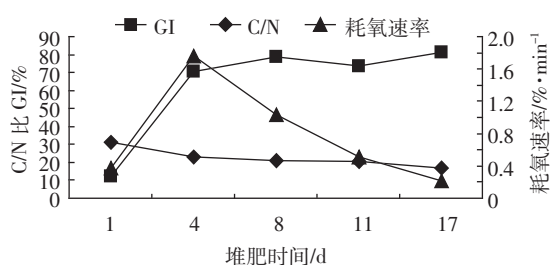


图 4 堆肥过程中 C/N 比、GI 值和耗氧速率动态变化

Figure 4 Dynamics of C/N ratio, germinate index (GI) and oxygen consumption rate during composting

时,堆肥微生物的活动开始受到抑制^[17],因此高温期(>60℃)耗氧周期的时间加长(图 3b 和图 3c),耗氧速率有所下降(图 4)。堆肥经过高温期的降解后,微生物的活动和化学降解的速率减小,耗氧周期进一步延长(图 3d、图 3f),耗氧速率减小(图 4),最终,到腐熟期时,经历一个耗氧周期后堆体里的氧气浓度较前

面各个阶段都增加。

堆肥各个阶段的耗氧速率不同。应该根据堆肥耗氧周期变化规律,调整通风周期。在堆肥温度启动阶段减少通风或者不通风,以利于温度的累积,升温阶段通风间隔时间为 15~20 min,高温期通风间隔时间约为 30 min,降温期和腐熟期氧气消耗速度较小,通风间隔分别为 1 h 和 3 h。

GI 值和 C/N 比是评价堆肥腐熟度的重要指标,C/N 比的下降程度可说明堆肥腐熟进程的快慢,通常当 C/N 降为 15~20:1^[16]和(终点 C/N)/(初始 C/N)值小于 0.5~0.6 之间^[17]时认为堆肥达到腐熟。种子发芽指数是测定堆肥植物毒性直接快速的方法,通常认为当 GI>80%时,堆肥已消除植物毒性。氧气浓度对堆肥中微生物活动、温度、臭味以及堆肥质量等有直接的影响^[3,18-19]。氧气和堆肥稳定性的关系,主要集中在呼吸速率与稳定性的关系的研究上。近几年来,由于监测

手段的提高,在线监测氧气浓度和耗氧速率成为可能。Tiquia^[20]和郑玉琪等^[9]都用氧气传感器在线测定了堆肥中耗氧速率的变化,并且分别提出耗氧速率为 $0.5\sim 0.75\ \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $100\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 可以作为堆肥腐熟的指标,同样,本研究也提出了耗氧速率为 $0.22\%\cdot\text{min}^{-1}$ 可以作为堆肥腐熟指标。但是各个研究耗氧速率所用的单位不一样。通过分析堆肥腐熟期堆体中氧气浓度与C/N比和GI值的关系,本研究还进一步提出了用比较直观、简单的氧气浓度来作为堆肥腐熟指标的可能性。

4 结论

(1)堆肥过程中各个阶段耗氧特点不同。堆肥在快速升温期($30\sim 50\ ^\circ\text{C}$)耗氧速率最快,耗氧周期最短,大约为15 min(氧气浓度从19%左右下降到5%左右);从高温持续期到堆肥腐熟期,耗氧速率开始减慢,堆肥腐熟期耗氧周期在3 h以上。

(2)在本试验条件下,参照堆肥C/N比和发芽指数(GI)判断堆肥腐熟度的标准,提出在堆肥腐熟过程中利用氧气浓度来推断堆肥的腐熟,即:堆体通风供氧后,氧气浓度能够迅速(5 min内)上升到20%左右,停止供氧后3 h,堆体内氧气浓度还在7%以上就标志着堆肥基本腐熟。

参考文献:

- [1] Bari Q H, Koenig A, Guihe T. Kinetic analysis of forced aeration composting I: reaction rates and temperature[J]. *Waste Manage Res*, 2000, 18(4):303-312.
- [2] Körner I, Braukmeier J, Herrenklage J, et al. Investigation and optimization of composting processes test systems and practical examples[J]. *Waste Manage*, 2003, 23(1):17-26.
- [3] Michel Jr, Frederick C, Reddy C A. Effect of oxygenation level on yard trimmings composing rate, odor production, and compost quality in bench-scale reactors[J]. *Compost Science & Utilization*, 1998, 6(4):6-14.
- [4] A de Guardia, Petiot C, Rogeau D. Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1):73-84.
- [5] Petiot C, A de Guardia. Composting in a laboratory reactor: a review[J]. *Compost Science & Utilization*, 2004, 12(1):69-79.
- [6] Mason I G, Milke M W. Physical modeling of the composting environment: a review. Part 1: Reactor systems[J]. *Waste Management*, 2005, 25(5):481-500.
- [7] 魏源送, 樊耀波, 王敏健, 等. 堆肥系统的通风控制方式[J]. 环境科学, 2000, 21(2):101-104.
WEI Yuan-song, FAN Yao-bo, WANG Min-jian, et al. Control modes of aeration for composting systems[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(2):101-104.
- [8] 冯明谦, 蒋培志. 卧式发酵滚筒的设计与研究[J]. 环境卫生工程, 2000, 8(3):97-100.
FENG Min-qian, JIANG Pei-zhi. Design and study of horizontal composting cylinder[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2000, 8(3):97-100.
- [9] 郑玉琪, 陈同斌, 孔建松, 等. 利用耗氧速率判断好氧堆肥腐熟度的探讨[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5):930-935.
ZHENG Yu-qi, CHEN Tong-bin, KONG Jian-song, et al. Maturity assessment by oxygen consumption rate in aerobic composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5):930-935.
- [10] 陈同斌, 郑玉琪, 高定, 等. 猪粪好氧堆制不同阶段氧气含量变化特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11):2179-2183.
CHEN Tong-bin, ZHENG Yu-qi, GAO Ding, et al. Variation of oxygen concentration during aerobic composting of pig manure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11):2179-2183.
- [11] Ekinci K, Keener H M, Akbolat D. Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(7):922-932.
- [12] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86(2):131-137.
- [13] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. (第三版), 北京: 中国农业出版社, 1999.
Nanjing Agricultural University. Soil and agricultural chemistry analysis[M](3rd Ed). Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [14] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准(NY525—2002)有机肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY525—2002 Organic Fertilizer[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [15] Anderson M D. Composting sewage sludge by high-rate suction aeration techniques; the process as conducted at bangor, ME, and some guides of general applicability[R]//Interim Report Number SW-614d. Washington, DC: United States of America Government Printing Office, 1977.
- [16] Garcia C, Hernaandez T, Fosta, et al. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1992, 23(14):1501-1512.
- [17] Morel T L, Colin F, Germon J C, et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost. In composting of agriculture and other wastes[M]. London & New York: Elsevier Applied Science publishers, 1985. 56-72.
- [18] Smars S, Gustafsson L, Beck-Friis B, et al. Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 84(3):237-241.
- [19] Wilshusena J H, Hettiamtchi J P A, Visscherb A D, et al. Methane oxidation and formation of EPS in compost: Effect of oxygen concentration[J]. *Environ Poll*, 2004, 129(2):305-314.
- [20] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Microbial activities during composting of spent pig manure sawdust litter at different moisture contents[J]. *Bioresource Technology*, 1996, 55(3):201-206.