

人粪便中温好氧堆肥过程的有机物降解特性研究

白帆^{1,2} 王晓昌²

(1. 宝鸡文理学院环境工程系, 宝鸡 721016;

2. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要 利用密闭式小型堆肥反应器,以锯末作为堆肥载体,采用批量反应的操作方式,在35℃的温控条件下进行了人粪便的中温好氧堆肥实验。结果表明,在14 d的堆肥反应周期内,粪便中以COD为参数的有机物去除率可达到70%左右,且在10~12 d内基本完成有机物降解。在中温条件下,堆体容易保持适宜的含水率和pH值,维持适宜微生物繁殖生长的条件。运用磷脂法进行堆肥过程中微生物总量的分析,表明在一个堆肥周期内,微生物经历了环境适应期、稳定增殖期、生物量下降期等3个阶段,这一微生物繁衍规律与有机物的去除密切相关。与高温堆肥相比,中温堆肥能够减少设备加热的能量消耗,是缺水地区人粪便处置的可选方法之一。

关键词 好氧堆肥 人粪便 有机物 生物量 磷脂分析法

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)08-1863-04

Study on characteristics of fecal organic matters degradation in an aerobic composting reactor under mesophilic condition

Bai Fan^{1,2} Wang Xiaochang²

(1. Department of Environmental Engineering, Baoji University of Arts & Sciences, Baoji 721016, China;

2. Key Lab of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract Experimental studies were conducted for human feces disposal using a closed composting reactor with sawdust as bulk matrices at a controlled temperature of 35℃ and under batch operation condition. As a result, about 70% COD removal could be achieved within a 14 days operation cycle, and the compost could be matured in 10 to 12 days. Under such a mesophilic condition, the moisture content and pH could be easily controlled at a level suitable for the growth of microorganisms in the reactor. By using the phospholipid fatty acids method, the biomass in the composting mixture was measured throughout the composting process. It was found that the microorganisms underwent three phases of growth, namely adaptation period, steadily growth period and decreasing period, each closely related to the availability of biodegradable organics in the reactor. Comparing with a thermophilic operation at about 60℃, the mesophilic operation at 35℃ could bring about a significant reduction of the power input for heating the reactor, and would thus become an option for sanitary disposal of human feces especially in water deficient areas.

Key words aerobic composting; human feces; organic matter; biomass; phospholipid fatty acids

好氧堆肥是人粪便卫生处置的有效技术,对于缺水地区卫生条件的改善具有实用价值^[1,2]。在已往的研究中,我们对以锯末作为堆肥载体的“生态厕所”操作方式进行了探讨,表明在高温(50~60℃)条件下,通过好氧堆肥能有效完成人粪便中有有机物的分解,达到无害化处置的目的^[3,4]。然而,保持高温堆肥条件往往需要对堆体的连续加热,需要消耗较大的能量,从而影响了该技术的应用推广。

为此需要探讨在中温或常温条件下好氧堆肥反应器的性能和功效。本文采用实验用小型装置和批量操作的方式,研究了在35℃的条件下,人粪便中有机

基金项目:长江学者基金和创新研究梯队(IRT0853);国家自然科学基金基金重大国际合作项目(50621140002)

收稿日期:2010-08-13; 修订日期:2010-09-27

作者简介:白帆(1973~),男,博士研究生,主要研究方向为水污染治理、固废处理以及资源回收利用等。

E-mail: bjwlb@ yahoo. com. cn

物的生化降解特性。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置和材料

实验设备为图1所示的密封式堆肥反应器,反应器的筒体由内外2层柱状有机玻璃构成,内径10 cm,高55 cm。内外层间构成水浴,以保持堆体温度恒定。水浴通过热水泵、温度传感器、加热棒以及温控微处理器进行温控。反应器设有手动搅拌装置,以使堆肥材料混合均匀。内筒底部装有布气板,通过气泵强制输入的空气可均匀分布于反应器中,保持堆体处于好氧状态。顶部的排气管与冷凝系统连接,可冷凝回收蒸发的水分,以维持堆体含水率基本保持稳定。

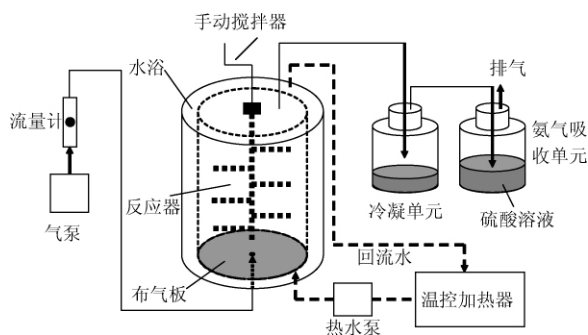


图1 堆肥反应器的结构示意图

Fig.1 Diagram of the composting reactor

堆肥的空白载体锯末由本地木材加工厂提供,其主要成分为纤维素(44%)、半纤维素(约18%)和木质素(约35%)。实验用的粪便来源于校园内学生区,采用批量采集、均匀混合后分装、冷冻保存的方法进行取样和存储,以保持整个实验过程中粪便的性质不变。锯末和粪便的物化特性见表1,各种成分均以干重为基准。

表1 所用锯末和粪便的物化特性

Table 1 Physico-chemical properties of the sawdust and feces used

项目	水分 (%)	S_{org} (g/kg)	TOC (g/kg)	COD (g/kg)	N_{tot} (g/kg)	N_{org} (g/kg)	N_{ino} (g/kg)
锯末	11.1	956.9	378.1	1 270.3	2.10	2.10	0
粪便	81.8	901.0	497.9	1 671.3	68.23	55.94	12.29

S_{org} : 有机固体; COD: 化学需氧量; TOC: 总有机碳; N_{tot} : 总氮; N_{org} : 有机氮; N_{ino} : 无机氮。

1.2 实验方法

堆肥实验采用批量式加料方法。粪便与锯末的

干重比(F/S)为1:4,加入一定量的去离子水,使初始加料的含水率为60%,总重为1.0 kg,混合均匀后投入密闭反应器中,开始堆肥反应操作。堆肥温度设定为35℃,堆肥过程中保持进气流速 $0.4 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{kg})$,每8 h进行一次2 min的手动搅拌。每次实验的堆肥周期为14 d,同一条件下的实验重复2次以上。

1.3 采样与分析

实验中每日进行定时取样,搅拌均匀后取出10 g湿样。采用标准方法^[3,5]分别测定水分、有机固体 S_{org} 、COD、TOC、总氮 N_{tot} 。按固液比1:10制取浸出液,分析亚硝态氮 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,其总和为无机氮 N_{ino} 。 N_{tot} 和 N_{ino} 之差为有机氮 N_{org} 。分析结果均以干锯末为基准表示。

采用磷脂法^[6,7]进行微生物总量分析,操作方法如下:1)取出适量填料作为试样;2)将试样置于100 mL具塞三角瓶中,加入氯仿、甲醇和水的萃取混合液(体积比为1:2:0.8)1 mL,强力震荡10 min后静置12 h;3)加入氯仿和水各5 mL,使得最终氯仿、甲醇、水的比例为1:1:0.9,然后静置12 h;4)取出含有脂类组分的下层氯仿相5 mL转移至10 mL具塞刻度试管,在水浴(温度 $<65^\circ\text{C}$)中蒸干;5)加入0.8 mL 5%过硫酸钾溶液,并加水至10 mL刻度,在高压蒸汽灭菌锅内(121°C)消解30 min;6)加入0.2 mL 抗坏血酸溶液,混匀30 s后加入0.4 mL 钼酸铵溶液充分混合,室温下放置15 min显色后,在700 nm波长下测定其吸光度,结果以 nmol P/g 干物质表示,1 nmol P约相当于大肠杆菌(*E. coli*) 10^8 个。分析中所用试剂均为分析纯。

2 结果与讨论

2.1 堆肥反应器中有有机物的降解过程

如图2和图3所示,在35℃的好氧堆肥条件下,一个反应周期内以COD为代表的有机物去除率可达到70%左右, S_{org} 和TOC的去除率也基本与此相当。若以COD达到稳定值的时间作为堆肥的腐熟期,大约为10~12 d。与60℃左右的高温堆肥相比^[3],腐熟期明显延长,但有机物去除率差距并不大,说明中温好氧堆肥也能取得良好的有机物降解效果。

2.2 堆肥反应器中水分的维持和pH的变化

如图4所示,在堆肥反应过程中,通过冷凝水的

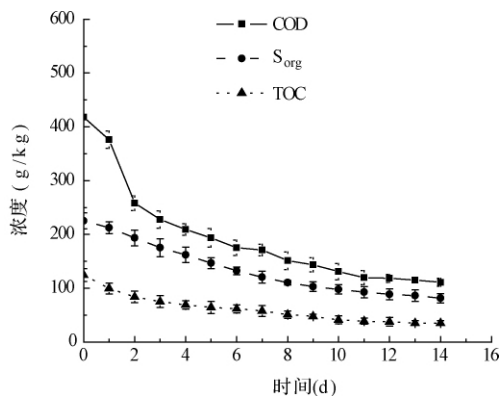


图 2 堆肥过程中有机物的变化

Fig. 2 Variation of organic matters in composting process

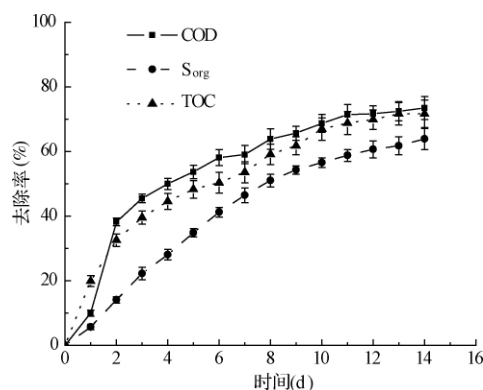


图 3 堆肥过程中有机物去除率

Fig. 3 Removal of fecal organic matters in composting process

回收,堆体的水分能够基本维持在 60% 左右,与 60℃ 左右的高温堆肥相比^[3],水分维持的更为稳定,从而保证了微生物生长的湿润条件。在堆肥反应过程中,如图 5 所示,堆体渗出液的 pH 在初期有降低的趋势,但后期又有回升,维持在 pH = 7 左右的中性条件。这也比 60℃ 左右的高温堆肥条件更为稳定^[3]。

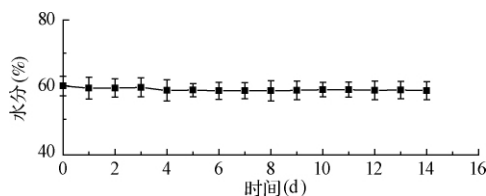


图 4 堆肥过程中水分的变化

Fig. 4 Change of moisture during composting period

2.3 堆肥过程中微生物量的变化

堆肥过程中有机物的降解主要是微生物的作

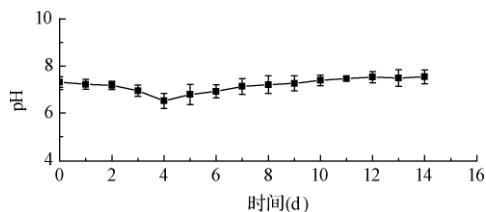


图 5 堆肥过程中渗出液 pH 的变化

Fig. 5 Variation of pH in leachate during composting period

用。在本实验中,堆体的水分、pH 和温度保持基本稳定,适合于在该条件下繁殖和生存的微生物总量的变化是反映有机物降解规律的重要参数。常规的微生物培养计数法只能反映可培养的微生物数量的多寡,但堆肥中往往存在大量难以培养的微生物,因而需要采用脂磷法来得到接近真实的微生物总量^[8-13]。脂磷法的特点在于,它是一种属于微生物原位分析的方法,可以避免培养法中的细胞分离和培养基的选择性等缺陷,通过萃取出所有微生物细胞的脂类物质,利用绝大多数的生物膜脂类是以磷脂的形式存在的特点,以磷脂中的磷含量来计量微生物的总量。

如图 6 所示,在堆肥反应的初期(直到 4~5 d)堆体中微生物量的波动较大,这可能是因为原来存在于人粪便中的微生物经历了一个对环境的适应过程。到 5 d 之后,微生物总量呈现出稳定增大的阶段,说明其已完全适应了反应器中的环境,利用堆体中丰富的有机物为底物,进行稳定的微生物繁殖。这一过程一直持续到 11~12 d,微生物数量最高达到 1.2×10^{11} cfu/g。但在最后的几天内,微生物总量又呈减少的趋势,到一个周期的堆肥反应结束时为 6.3×10^{10} cfu/g。对照图 3 中有机物累积去除率的变化,可知在 12 d 前后有机物的去除以明显减缓。

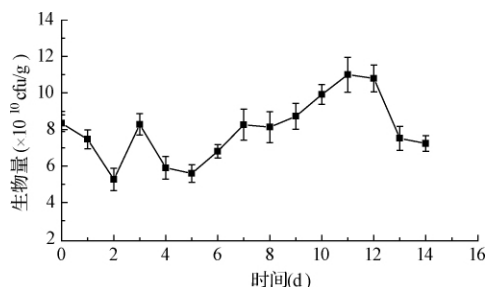


图 6 堆肥过程中微生物总量的变化

Fig. 6 Changes of microbial biomass during the composting period

由于堆体中可利用底物的量已不足以维持微生物的持续繁殖和生长,微生物总量开始减少。堆肥反应器中微生物繁殖和有机物降解的这一关系充分说明在 35℃ 的中温堆肥条件下,微生物的底物利用和繁衍是有机物降解的主要原因。

3 结 论

利用密闭式小型堆肥反应器装置,采用锯末为载体,在 35℃ 的温控条件下进行了人粪便的好氧堆肥实验,研究了堆肥过程中有机物去除率和微生物量的变化规律。研究工作可得出以下主要结论:

(1) 中温好氧堆肥操作在 14 d 的堆肥周期内,以 COD 为参数的有机物去除率可达到 70% 左右, S_{org} 和 TOC 的去除率也与此接近,且在 10~12 d 内即基本完成有机物的降解,说明中温好氧堆肥也是人粪便卫生处置的有效方法。

(2) 中温好氧堆肥操作时反应器中能保持较为稳定的物化条件,在冷凝水回收的条件下,堆体内水分含量能稳定维持在 60% 左右,渗出液 pH 也能稳定保持中性条件。

(3) 应用磷脂法进行堆体中微生物总量分析,表明一个堆肥周期中微生物经历了环境适应期、稳定增殖期、生物量下降期等 3 个阶段,这与有机物的降解过程密切相关,说明中温条件下微生物的底物利用是有机物降解的重要原因。

参 考 文 献

- [1] Lopez-Zavala M. A., Funamizu N. Design and operation of the bio-toilet system. *Water Science & Technology*, **2006**, 53(9): 55-61
- [2] Lopez-Zavala M. A., Funamizu N., Takakuwa T. Biological activity in the composting reactor of the bio-toilet system. *Bioresource Technology*, **2005**, 96(7): 805-812
- [3] Bai Fan, Xiaochang Wang. Nitrogen-retaining property of compost in an aerobic thermophilic composting reactor for the sanitary disposal of human feces. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, **2010**, 4(2): 228-234
- [4] 王洪波,王晓昌. 新型堆肥生物反应器人粪便堆肥功效的评价. *环境工程学报*, **2008**, 2(1): 97-100
Wang Hongbo, Wang Xiaochang. Evaluation on the effect of human feces composting in new type composting reactor. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2008**, 2(1): 97-100(in Chinese)
- [5] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 环境科学出版社, **2002**
- [6] Robert H. Findlay, Gary M. King, Les Watling. Efficacy of phospholipid analysis in determining microbial biomass in sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, **1989**, 55(11): 2888-2893
- [7] Woo Hang Kim, Wataru Nishijima, Eiji Shoto, *et al.* Pilot plant study on ozonation and biological activated carbon process for drinking water treatment. *Water Science and Technology*, **1997**, 35(8): 21-28
- [8] 叶劲松,吴克,蔡敬民,等. 好氧堆肥微生物研究方法进展. *安徽农业科学*, **2008**, 36(30): 13287-13291
Ye Jinsong, Wu Ke, Cai Jinmin, *et al.* Progress on research methods for microorganisms during aerobic composting. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, **2008**, 36(30): 13287-13291(in Chinese)
- [9] 唐景春, Katayama Arata. 醌类图谱分析在环境微生物生态测定中的应用. *应用与环境生物学报*, **2004**, 10(4): 530-536
Tang Jingchun, Katayama Arata. Application of quinone profile analysis for the characterization of microbial ecology in environment. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, **2004**, 10(4): 530-536(in Chinese)
- [10] 颜慧,蔡祖聪,钟文辉. 磷脂脂肪酸分析方法及其在土壤微生物多样性研究中的应用. *土壤学报*, **2006**, 43(5): 851-859
Yan Hui, Cai Zucong, Zhong Wenhui. PLFA analysis and its applications in the study of soil microbial diversity. *Acta Pedologica Sinica*, **2006**, 43(5): 851-859(in Chinese)
- [11] 吴振斌,王亚芬,周巧红,等. 利用磷脂脂肪酸表征人工湿地微生物群落结构. *中国环境科学*, **2006**, 26(6): 737-741
Wu Zhenbin, Wang Yafen, Zhou Qiaohong, *et al.* Microbial community structure in the integrated vertical-flow constructed wetland utilizing phospholipid fatty acids analysis. *China Environmental Science*, **2006**, 26(6): 737-741(in Chinese)
- [12] 王道营,徐幸莲,徐为民. 磷脂的提取与分析检测技术. *粮油加工与食品机械*, **2005**, (7): 51-54
- [13] 齐鸿雁,薛凯,张洪勋. 磷脂脂肪酸谱图分析方法及其在微生物生态学领域的应. *生态学报*, **2003**, 23(8): 1576-1582
Qi Hongyan, Xue Kai, Zhang Hongxun. Phospholipid fatty acid analysis and its applications in microbial ecology. *Acta Ecologica Sinica*, **2003**, 23(8): 1576-1582(in Chinese)