

# 自由空域对猪粪麦秸好氧堆肥的影响实验分析\*

王永江 黄光群 韩鲁佳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**【摘要】** 为研究不同水平自由空域(Fas)对堆肥效果的影响,利用实验室小型反应器进行了好氧堆肥试验,使用等量猪粪分别与等量不同粒径(0~1 cm、2~5 cm和7 cm)麦秸按照质量比1:0.086混合获得不同Fas水平(56.70%、62.67%和68.36%),利用温度传感器、氧浓度传感器动态监测堆肥过程中温度和氧气体积分数的变化,研究分析了堆肥始末含水率和挥发性固体(VS)含量的变化,并基于Matlab平台建立了基于温度、氧气体积分数等多因素Monod形式的VS降解动力学模型。试验结果表明:等量猪粪与等量麦秸混合堆肥,麦秸粒径产生的Fas差异对堆肥过程影响显著;所建立的基于温度、氧气体积分数等多因素Monod形式VS降解动力学模型模拟结果与实际测量结果一致。

**关键词:** 好氧堆肥 反应器 自由空域 模拟

中图分类号: S141.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)06-0122-05

## Effects Analysis of Free Airspace to Pig Slurry Wheat Straw Aerobic Composting in Laboratory Reactor

Wang Yongjiang Huang Guangqun Han Lujia

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

### Abstract

To study the effects of different initial free airspaces (Fas) on pig slurry-wheat straw reactor scale composting, three levels of Fas (56.70%, 62.67%, 68.36%) were obtained by mixing pig slurry and wheat straw with the same mass ratio (1:0.086) but in different wheat straw sizes (0~1 cm, 2~5 cm, 7 cm). Oxygen concentration and temperature were monitored by sensors during the whole composting period, while moisture and volatile solid (VS) content were checked by chemical analysis method at the end of composting. In addition, a Monod form model was employed to simulate VS content during composting period. According to the results of composting test, changes of oxygen concentration, temperature, moisture and VS based on different initial Fas levels were respectively clearly different; effects of bulking agent sizes on mixture structure were apparent.

**Key words** Aerobic composting, Reactor, Free airspace, Simulation

### 引言

目前,利用猪粪作为主要原料经高温好氧发酵生产有机肥成为其资源化、减量化和无害化利用的重要途径。堆肥过程中自由空域(free airspace,简称Fas)直接影响堆体氧气体积分数和微生物活性等,从而影响腐熟进程和产品质量<sup>[1-5]</sup>。Fas过低,

将阻碍氧气在堆体中的传输,供氧不足易导致好氧微生物活性降低,引起局部或大部厌氧发酵<sup>[1,6]</sup>;Fas过高,易导致堆体热量散失过快,不利于有机质降解<sup>[1]</sup>。鲜猪粪的含水率一般大于70%,自然状态下其自由空域一般不满足好氧堆肥的工艺要求,需通过加入调理剂,如农作物秸秆等进行调节,使堆料固、液、气三相比例达到好氧发酵适宜水平。

收稿日期: 2010-07-23 修回日期: 2010-08-16

\*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD10B05)

作者简介: 王永江,硕士生,主要从事生物质资源与利用研究,E-mail: yongjiang\_cau@yahoo.com.cn

通讯作者: 韩鲁佳,教授,博士生导师,主要从事生物质资源与利用研究,E-mail: hanlj@cau.edu.cn

国内外研究者普遍认为合理的 Fas 值应在 30% 以上<sup>[1,7-11]</sup>,但最优的 Fas 值主要取决于原料与其堆肥工艺条件。目前,国内外研究者主要采用不同的膨脹剂<sup>[5,8-9]</sup>或调节物料配比<sup>[4,9-12]</sup>等方式来获取不同的 Fas 水平,之后再进一步考查其对堆肥过程的影响。

本文利用等量猪粪分别与等量不同粒径麦秸混合的方式,利用实验室小型反应器进行 3 种 Fas 水平的好氧堆肥试验,研究不同 Fas 水平下堆肥过程温度、氧气体积分数、含水率和挥发性固体含量的变化,利用堆肥降解动力学模型模拟堆肥过程可挥发性固体(volatile solid,简称 VS)降解情况。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原料

试验用鲜猪粪样取自北京市昌平区中国农业科学院养殖试验场,为幼猪当日鲜粪。堆肥调理剂为小麦干秸秆,取自北京郊区,利用铡草机进行粉碎处理后获取 0~1 cm 和 2~5 cm 长度麦秸,利用铡刀铡切处理获取 7 cm 长度麦秸。

### 1.2 实验室小型好氧反应器系统

实验室小型好氧发酵反应器系统结构如图 1 所示。反应器有效容积 15 L。数据采集系统包括:温度传感器(Pt100 电阻)、氧气浓度传感器(O2S-FR-T2-18X, Apollo Co., Ltd.)、数据采集器(DT85, DataTaker Pty Co., Ltd.)和计算机终端。试验采用 3 组规格和性能相同的反应器系统。

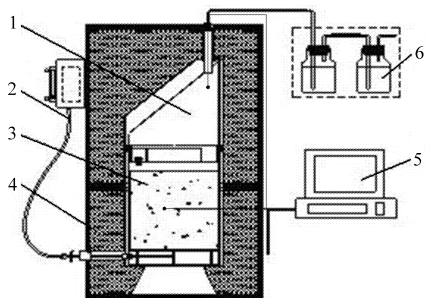


图 1 反应器系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reactor

1. 反应装置 2. 通风控制系统 3. 堆肥原料 4. 保温箱 5. 温度和氧浓度采集系统 6. 尾气处理装置

### 1.3 试验设计

使用 3 组性能相同的堆肥反应器系统进行猪粪、麦秸堆肥试验。每组反应器堆料质量均为 5 kg,其中麦秸 0.40 kg、猪粪 4.60 kg,3 个不同的 Fas 水平下的堆肥试验分别记为处理 1、处理 2 和处理 3。堆肥原料的基本理化指标及配比如表 1 所示。

研究表明,适宜猪粪和麦秸进行小型好氧反应器堆肥的通风速率(每千克 VS 每分钟的通风量)范

表 1 堆肥原料基本理化性质及配比

Tab. 1 Physicochemical properties and ratio of raw materials

原料	质量 /kg	含水率 /%	总固体质量 分数/%	灰分质量 分数/%	VS 质量 分数/%	碳氮比
猪粪	4.60	72.74	27.26	15.83	84.17	12.6
麦秸	0.40	3.20	96.80	6.13	93.87	102.3

围为 0.18~0.42 L/(min·kg)<sup>[13]</sup>,整个堆肥过程采用变通风速率:升温期(0~0.5 d)0.3 L/(min·kg),高温期(0.5~2.5 d)0.4 L/(min·kg),降温期(2.5~14 d)0.2 L/(min·kg),通风方式为连续通风。3 组堆肥试验的初始条件如表 2。

表 2 3 组堆肥试验的初始条件

Tab. 2 Initial conditions of composting experiments

初始条件	处理 1	处理 2	处理 3
Fas/%	56.70	62.67	68.36
通风速率/L·(min·kg) <sup>-1</sup>	0.3/0.4/0.2	0.3/0.4/0.2	0.3/0.4/0.2
含水率/%	66.80	66.10	66.04
VS 质量分数/%	86.06	86.07	86.08
碳氮比	15.27	15.54	15.88
密度/g·cm <sup>-3</sup>	0.42	0.36	0.31

### 1.4 试验方法

#### 1.4.1 测定分析方法

采用温度采集与记录系统测量堆体温度,由于堆体体积小,通风均匀,温度梯度较小<sup>[14-15]</sup>,将 Pt100 温度传感器置于堆体中心位置,以堆体中心点处测定的温度作为堆体温度。测量氧气体积分数采用氧浓度传感器,选取反应器上盖空间靠近出气口位置作为氧气体积分数的测量点。堆体密度通过质量/体积间接测量获得。堆肥含水率和 VS 质量分数的测定分别使用热风干燥法和灼烧法<sup>[2]</sup>。

#### 1.4.2 自由空域测算方法

利用堆料密度和相对密度等参数计算 Fas 理论值,公式<sup>[1,16]</sup>为

$$F = 1 - \frac{\delta_m S_m}{G_s \delta_w} - \frac{\delta_m (1 - S_m)}{\delta_w} \quad (1)$$

$$\frac{1}{G_s} = \frac{V_s}{G_v} + \frac{1 - V_s}{G_f} \quad (2)$$

式中  $V_s$ ——堆料中可挥发部分质量分数,%

$G_s$ ——堆料的相对密度

$G_v$ ——挥发部分的相对密度,约 1.0

$G_f$ ——灰分的相对密度,约 2.5

$\delta_m$ ——堆料的单位体积湿质量,g/cm<sup>3</sup>

$\delta_w$ ——水的单位体积质量,g/cm<sup>3</sup>

$S_m$ ——堆料总固体质量分数,%

### 1.4.3 挥发性固体降解模型建立

VS 降解模型采用 Monod 一级降解动力学方程

$$\frac{dm}{dt} = -k_d m \quad (3)$$

式中  $m$ ——堆料中 VS 的质量, kg

$k_d$ ——反应速率,  $d^{-1}$   $t$ ——反应时间, d

考虑反应速率受温度、氧浓度的影响,  $k_d$  表达式

为

$$k_d = k_0 k_T k_{O_2} \quad (4)$$

式中  $k_0$ ——反应速率常数, 取  $0.0029^{[1]}$

$k_T$ ——温度对反应速率的影响系数

$k_{O_2}$ ——氧体积分数对反应速率的影响系数

$k_T$  和  $k_{O_2}$  的表达形式<sup>[1]</sup>为

$$k_T = 1.066^{T-20} - 1.21^{T-60} \quad (5)$$

$$k_{O_2} = \frac{w(O_2)}{w(O_2) + 2} \quad (6)$$

式中  $T$ ——堆肥过程温度, 由实际测量数值拟合确定,  $^{\circ}C$

$w(O_2)$ ——堆肥过程中氧气体积分数, 由实际测量数值拟合确定, %

## 2 结果和讨论

### 2.1 堆肥过程温度变化

温度是表征堆肥过程有效性的一个重要指标<sup>[17]</sup>。图2为3组处理堆肥过程温度变化曲线, 由图2可知, 各处理温度变化趋势与已有研究<sup>[3-4, 10]</sup>基本一致, 其中, 处理3的温度变化具有明显的滞后性, 可能是因其  $F_{as}$  偏大, 通风降温作用明显而迟迟未能形成最有利于微生物生长和繁殖的适宜环境。

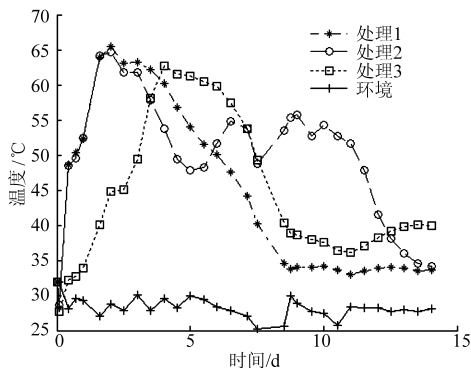


图2 温度变化曲线

Fig. 2 Curves of substrate temperature with different initial values of free airspace

处理1、处理2和处理3温度在  $50^{\circ}C$  以上的时间分别为 5.3、10.3 和 4.5 d。处理2维持  $50^{\circ}C$  以上的时间最长, 可能是因为处理2反应器自由空域水平使通风供氧和通风散热处于较好的平衡所致; 处理2的温度变化还表现出波浪形变化趋势, 这与

Yu 等<sup>[10]</sup>的试验研究相类似, 这与堆体高温对微生物的抑制作用和有机物浓度有关<sup>[17]</sup>。处理3在堆肥后期保持较高的温度, 这可能是因为该处理在这一时期保持相对较高的有机物浓度, 根据有机物降解的 Monod 方程<sup>[1]</sup>, 有机物浓度大有利于微生物降解和产热。

### 2.2 堆肥过程氧气体积分数变化

堆体氧气体积分数也是评价堆肥发酵效果的重要参数<sup>[18]</sup>, 堆肥过程各处理下堆体氧气体积分数变化如图3所示。由图3可知, 各处理下堆体氧气体积分数的变化与温度变化有较好的负相关性。3个处理下各堆体在堆肥初始阶段都经历了氧气体积分数的快速下降, 可能是因为堆肥初始阶段微生物呈自然对数生长, 温度未对嗜温性微生物造成抑制<sup>[4]</sup>, 大量微生物生长和繁殖耗氧使堆体氧气体积分数快速下降。

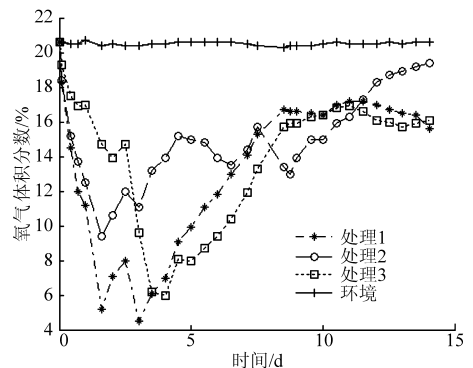


图3 氧气体积分数变化曲线

Fig. 3 Curves of oxygen content with different initial values of free airspace

处理1和处理2基本同时达到最低氧气体积分数, 此时两者的环境温度相近, 而处理1的氧气体积分数明显低于处理2, 可能是由于处理1的自由空域值较小, 造成通风不畅所致。处理1和处理3的氧气体积分数在 8.5 d 左右上升到 16% 左右并保持相对稳定, 而此时处理2的氧气体积分数变化仍表现出波浪形, 这与图2中温度变化趋势相吻合。

### 2.3 堆肥过程含水率和 VS 含量变化

表3为各处理堆肥初始和结束时含水率和 VS 含量变化情况。

堆肥试验结束时, 处理1、处理2和处理3的含水率与各自初始含水率相比分别下降 5.23%、7.08% 和 5.10%,  $F_{as}$  水平对堆肥含水率的变化影响不显著; VS 降解率分别为 3.25%、7.59% 和 1.18%。可见, 处理2  $F_{as}$  水平最有利于 VS 降解。由于 VS 降解将同时放热、耗氧和产水, 这与图2和图3所示的温度和氧气体积分数变化规律相一致, 但是, 处理2的含水率却降低较大, 可能是由于堆肥

表 3 含水率和 VS 含量变化

Tab. 3 Profiles of VS conversion and moisture content with different initial values of free airspace

处理方式	初含水率	末含水率	初 VS 含量	末 VS 含量
处理 1	0.668	0.617	0.861	0.833
处理 2	0.661	0.590	0.861	0.795
处理 3	0.660	0.609	0.861	0.851

过程温度对水分的散失作用大于微生物活动的产水作用所致。

## 2.4 堆肥过程模拟

### 2.4.1 堆肥过程温度、氧气体积分数拟合结果

利用 Matlab 7.0 分别对处理 1、处理 2 和处理 3 堆体温度、氧气体积分数变化的实际监测数据进行

三次多项式数值拟合,表达式为

$$T_1(t) = 0.12386t^3 - 2.7576t^2 + 14.459t + 38.646$$

$$T_2(t) = 0.019712t^3 - 0.76467t^2 + 6.344t + 42.473$$

$$T_3(t) = 0.10866t^3 - 2.6597t^2 +$$

$$17.2535t + 23.916$$

$$w(O_2)_1(t) = -0.049688t^3 + 1.1013t^2 - 5.917t + 16.740$$

$$w(O_2)_2(t) = -0.009128t^3 + 0.2766t^2 - 1.874t + 16.223$$

$$w(O_2)_3(t) = -0.042268t^3 + 1.0187t^2 - 6.4419t + 21.089$$

利用实测值对拟合模型进行检验,统计分析结果如表 4 所示。

表 4 三次拟合模型统计分析结果

Tab. 4 Statistics results of fitting models

参数	温度			氧气体积分数		
	处理 1	处理 2	处理 3	处理 1	处理 2	处理 3
相关系数	0.9267	0.7117	0.9283	0.9098	0.7556	0.9278
相对标准偏差	0.1034	0.1325	0.0876	0.1357	0.1194	0.1024
标准分析误差	4.5779℃	6.5717℃	3.8500℃	1.8177%	1.8010%	1.4417%

根据统计分析结果,三次多项式数值拟合模型可以较准确表达处理 1、处理 2 和处理 3 试验条件下温度和氧体积分数变化情况。

### 2.4.2 堆肥过程 VS 降解模拟结果

利用 Matlab 7.0 软件 ODE 45 算法求解 VS 降解动力学模型,图 4 为堆肥过程 VS 质量变化的降解动力学模拟曲线。

理,堆肥过程 VS 降解动力学模型结果与图 2 所示温度变化曲线以及图 3 所示氧气体积分数变化曲线十分吻合。

堆肥结束后,处理 1、处理 2 和处理 3 的 VS 含量的实测值分别为 83.26%、79.54%、85.06%,这与 VS 降解模拟结果一致。VS 降解模拟结果也证实了处理 3 堆肥后期有机物体积分数相对较高的假设。分析 VS 降解动力学模拟结果可知,处理 2 Fas 水平更有利于猪粪和麦秸堆肥有机物的降解。

## 3 结论

(1) 利用等量猪粪分别与等量不同粒径麦秸混合的方式,利用实验室小型反应器进行了优化 Fas 水平的好氧堆肥试验。研究发现,不同的初始 Fas 水平对堆肥过程中温度、氧气体积分数、含水率和 VS 降解均有显著影响。处理 2 更利于猪粪、麦秸好氧堆肥顺利进行。

(2) 基于 Matlab 平台采用 Monod 一级降解动力学模型建立了堆肥过程中基于温度、氧气体积分数等多因素的 VS 降解动力学模型,所建模型能够比较清晰地表达自由空域对 VS 降解的影响。

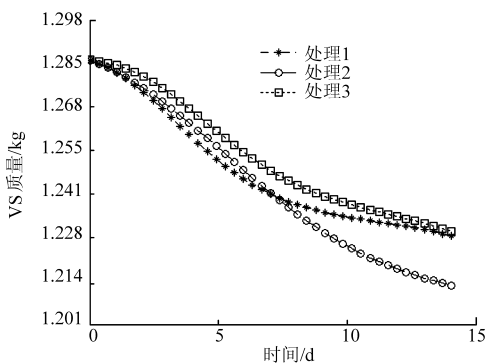


图 4 堆肥过程 VS 降解动力学模拟结果

Fig. 4 Simulation results of VS degradation

如图 4 所示,堆肥过程中处理 3 VS 含量保持较高;处理 1 和处理 2 在第 1 天里含量基本相同,在堆肥进行至第 6 天后,处理 2 VS 含量出现较大幅度的降低。根据 VS 降解消耗氧气并同时释放热量的原

## 参 考 文 献

- 1 Hang R T. The practical handbook of composting [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- 2 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 3 Gea T, Barrena R, Artola A, et al. Optimal bulking agent particle size and usage for heat retention and disinfection in domestic wastewater sludge composting [J]. Waste Management, 2007, 27(9): 1 108 ~ 1 116.
- 4 Ponsa S, Pagans E, Sanchez A. Composting of dewatered wastewater sludge with various ratio of pruning waste used as a bulking agent and monitored by respirometer[J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(4): 433 ~ 443.
- 5 James I C, Chen Y J. Effects of bulking agent on food waste composting [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 5 917 ~ 5 924.
- 6 Nakasaki K, Nakano Y, Akiyama T. Oxygen diffusion and microbial activity in the composting of dehydrated sewage sludge cakes[J]. Journal of Fermentation Technology, 1987, 65(1): 43 ~ 48.
- 7 Schultz L G. Continuous thermophilic composting [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1962, 10(2): 108 ~ 122.
- 8 Iqbal M K, Shafiq T, Ahmed K. Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 1 913 ~ 1 919.
- 9 Adhikari B K, Barrington S, Martinez J, et al. Effectiveness of three bulking agents for food waste composting [J]. Waste Management, 2009, 29(1): 197 ~ 203.
- 10 Yu S H, Clark O G, Leonard J J. Influence of free air space on microbial kinetics in passively aerated compost [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(2): 782 ~ 790.
- 11 Jolanun B, Towprayoon S. Novel bulking agent from clay residue for waste composting [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4 484 ~ 4 490.
- 12 Yanez R, Alonso J L, Diaz M J. Influence of bulking agent on sewage sludge composting process [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(23): 5 827 ~ 5 833.
- 13 吕黄珍, 韩鲁佳, 杨增玲. 猪粪麦秸反应器好氧堆肥工艺参数优化 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 101 ~ 105.  
Lü Huangzhen, Han Lujia, Yang Zengling. Optimization of aerobic composting parameters on pig slurry-wheat straw reactor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 101 ~ 105. (in Chinese)
- 14 Bach P D, Shoda M, Kubota H. Composting reaction rate of sewage sludge in a autothermal packed bed reactor [J]. Journal of Fermentation Technology, 1985, 63(3): 271 ~ 278.
- 15 张锐. 小型试验室好氧堆肥反应器系统研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2006.  
Zhang Rui. Study on the bench-scale aerobic composting reactor system [D]. Beijing: China Agriculture University, 2006. (in Chinese)
- 16 蔡建成. 堆肥工程与堆肥工厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- 17 Lau A K, Lo K V, Liao P H, et al. Aeration experiments for swine wastewater composting [J]. Bioresource Technology, 1992, 41(1): 45 ~ 52.
- 18 Tremier A, de Guardia A, Massiani C, et al. A respirometric method for characterising the organic composition and biodegradation kinetics and the temperature influence on biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(2): 169 ~ 180.