

猪粪好氧堆肥过程有机质降解和热量平衡模型^{*}

王永江 黄光群 韩鲁佳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 依据有机质降解一级动力学方程和系统热量平衡方程,充分考虑猪粪好氧堆肥有机质降解的梯次性对数学建模的影响,建立了反应器好氧堆肥过程有机质降解 Monod 模型和热量平衡模型。有机质降解 Monod 模型考虑了温度、含水率、氧体积分数和自由空域 4 种因素对降解系数的影响,其中温度作为最主要影响因素;热量平衡模型中主要考虑了对流、传导的热量传递方式。利用实验室好氧堆肥反应器进行的模型验证试验结果表明:堆肥试验实测值与模型模拟值表现出较好的一致性,有机质降解的实测值与模型模拟值的相对标准误差为 13.02%,温度变化的实测值与模型模拟值的相对标准误差为 9.9%。

关键词: 猪粪 好氧堆肥 有机质降解 热量平衡 数学模型

中图分类号: S141.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)10-0121-04

Modeling of Organic Matter Degradation and Thermal Balance during Pig Slurry Aerobic Composting

Wang Yongjiang Huang Guangqun Han Lujia

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

Abstract

Modeling of organic matter degradation and thermal balance were built based on the first order assumption with respect to the quantity of biodegradable volatile solid (BVS) and the law of thermal conservation during composting. Different kinds of organic matter were mainly degraded in different composting stages. For the organic matter degradation model, temperature, moisture content, oxygen content and free air space were considered as key influence factors to degeneration rate. For the model of thermal balance, forced convection and conduction were considered as the main heat removal form. In order to verify the constructed models, an aerobic composting process of pig slurry was conducted. Temperature, oxygen content, moisture content and organic matter concentration were all monitored in the process of composting. The results could be helpful for guiding composting process operation.

Key words Pig slurry, Aerobic composting, Organic matter degeneration, Thermal balance, Mathematical model

引言

高温好氧堆肥是畜禽粪便无害化和资源化的有效途径^[1-2]。堆肥过程模拟对深入研究堆肥机理和指导工程实践具有重要意义^[3-4],堆肥过程中有机质的降解是堆肥过程动力学研究的重要方面,堆肥过程中温度的变化是表征堆肥过程有效性的一个重

要指标^[3],建立好氧堆肥过程中有机质降解和热量平衡模型,将有助于进一步探究堆肥过程动力学特征,实现堆肥过程实时控制。

堆肥过程中能够降解的有机质主要有糖类、蛋白类、脂肪类和纤维类,这些有机质在堆肥过程中的降解呈现梯次性^[5]。但是,国内外研究者在建立堆肥过程有机质降解和热量平衡模型时均没有考虑有

收稿日期: 2010-12-24 修回日期: 2011-03-16

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD10B05)和中国农业大学研究生科研创新专项资助项目

作者简介: 王永江,博士生,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

机质降解的梯次性对数学建模的影响。本研究充分考虑堆肥有机质降解的梯次性对堆肥过程的影响,利用数学分析方法得到温度对猪粪好氧堆肥有机质降解速率影响的经验关系,建立猪粪好氧堆肥过程中有机质降解和热量平衡模型。

1 模型建立

1.1 有机质降解模型

假定堆肥过程中可生物降解性有机质(BVS)的降解符合 Monod 一级降解动力学方程形式

$$\frac{dw(\text{BVS})}{dt} = -k_i w(\text{BVS}) \quad (1)$$

式中 $w(\text{BVS})$ ——堆肥过程中 BVS 的含量, kg

t ——反应时间, d

k_i ——反应速率系数, d^{-1}

下角 $i = 1, 2, 3$, 分别代表快速反应阶段、过渡阶段和慢速反应阶段。快速反应阶段参与降解的主要是糖类、蛋白类和脂肪类, 慢速反应阶段参与降解的主要是纤维类。

反应速率受温度、含水率、氧体积分数和自由空域等因素的影响, 其中温度对反应速率的影响最为显著^[3,6]。本研究以温度为反应速率主要影响因素, 以含水率、氧体积分数和自由空域为校正因素建立模型

$$k_i = k_{T_i} k_M k_{O_2} k_{Fas} \quad (2)$$

式中 k_{T_i} ——不同反应阶段温度对反应速率的影响系数

k_M ——含水率对反应速率的影响校正系数, 取值范围为 0 ~ 1

k_{O_2} ——氧体积分数对反应速率的影响校正系数, 取值范围为 0 ~ 1

k_{Fas} ——自由空域对反应速率的影响校正系数, 取值范围为 0 ~ 1

温度对反应速率的影响可以由 Andrews-Kambhu 方程^[7]给出

$$k_{T_i} = k(c_1^{T-T_1} - c_2^{T-T_2}) \quad (3)$$

式中 k ——不同反应阶段的反应速率常数

c_1, c_2 ——温度系数 T ——堆体温度, $^{\circ}\text{C}$

T_1, T_2 ——参考温度, $^{\circ}\text{C}$

含水率、氧体积分数和自由空域对反应速率的影响系数分别表示为^[3]

$$k_M = \frac{1}{e^{-17.684M+7.0622} + 1} \quad (4)$$

$$k_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{O_2} + 2} \quad (5)$$

$$k_{Fas} = \frac{1}{e^{-23.675F+3.4945} + 1} \quad (6)$$

式中 M ——堆体含水率, %

V_{O_2} ——堆体内部氧气体积分数, %

F ——堆体的自由空域, %

1.2 热量平衡模型

根据热力学第一定律, 堆肥系统的热量平衡可以表达为: 热量积累等于热量输入减去热量输出加上热量产生^[6], 上述方程是堆肥过程能量平衡模拟的理论基础。在此基础上建立的反应器堆肥系统热量平衡模型为

$$mc \frac{dT}{dt} = G_i H_i - G_o H_o - UA(T - T_0) + \frac{dw(\text{BVS})}{dt} H_{Ci} \quad (7)$$

式中 m ——堆体质量, kg

c ——堆体和反应器的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

G_i, G_o ——进口、出口气体质量流量, kg/d

T_0 ——环境温度

H_i, H_o ——进口、出口气体焓值

U ——反应器总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

A ——反应器总传热面积, m^2

H_{Ci} ——生化反应热, kJ/kg

取 $UA = 0.4077 \text{ W}/\text{K}$ ^[8]。

由于本研究认为有机物降解存在梯次性, 所以快速反应阶段和慢速反应阶段的生化反应热也不同, H_{C1}, H_{C2}, H_{C3} 分别表示快速反应阶段、过渡阶段和慢速反应阶段的生化反应热。

2 模型主要参数确定

2.1 温度

通过取样试验分析和过程监测的方法可以得到堆肥过程中含水率、氧体积分数和自由空域的变化, 代入式(4)~(6)可以分别得到含水率、氧体积分数和自由空域对反应速率的影响系数, 从而可以假定 BVS 一级降解动力学方程中反应速率只是温度的函数, 对 Monod 方程两边积分可得

$$\ln \left(\frac{w_0(\text{BVS})}{w(\text{BVS})} \right) = k_{T_i} k_M k_{O_2} k_{Fas} t \quad (8)$$

根据 Schulze 的假设^[3], 选取 $T_1 = 20^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 60^{\circ}\text{C}$, 取样分析可以得到 BVS 的浓度, 利用式(8)回归得到不同温度下的反应速率, 再以 $T = 30^{\circ}\text{C}$ 时的反应速率为基准进行归一化处理, 所得数据再代入式(3)便得到温度对反应速率影响的方程

$$\begin{cases} k_{T1} = k_s (1.057^{T-20} - 1.186^{T-60}) & (0 < t < 3.5) \\ k_{T2} = (at + b) (1.057^{T-20} - 1.186^{T-60}) & (3.5 \leq t \leq 9) \\ k_{T3} = k_f (1.057^{T-20} - 1.186^{T-60}) & (9 < t < 14) \end{cases} \quad (9)$$

式中 k_s ——快速反应阶段温度系数,取 0.016 9
 $at + b$ ——过渡阶段温度系数, $a = -0.002\ 546$,
 $b = 0.025\ 891$,可由点 $(3.5, k_s)$ 、
 $(9, k_f)$ 回归得到
 k_f ——慢速反应阶段温度系数,取 $0.002\ 9$ ^[3]

2.2 含水率

堆肥过程中,有机物只有溶解于水后才能被微生物降解利用,所以堆体含水率将影响到有机物的降解速率。根据罗玮^[9]等假定,堆体含水率的变化可以表达为

$$\frac{dM}{dt} = k_m \frac{dw(\text{BVS})}{dt} - Q(w_a(T) - w_a(T_{\text{air}})) / (V_r F) \quad (10)$$

式中 k_m ——有机物降解产水量系数,取 -0.7
 Q ——干空气质量流量,kg/d
 V_r ——反应器体积,取 $0.015\ \text{m}^3$
 w_a ——空气在特定温度下的饱和湿度
 T_{air} ——进气口空气温度

2.3 氧体积分数

在通风速率恒定的情况下,氧体积分数的变化与温度的变化有近似的函数关系,研究^[3]发现,堆体内部温度和氧体积分数的变化表现出很好的负相关性,本研究认为在通风速率一定的情况下氧体积分数的变化是温度的函数,根据试验结果,拟合函数关系为

$$V_{\text{O}_2} = -0.273\ 826T + 28.658\ 860 \quad (11)$$

2.4 自由空域

描述堆肥过程中自由空域变化的表达形式^[3]为

$$\begin{cases} F = \left[1 - \frac{\delta_m s_m}{G_s s_w} - \frac{\delta_m (1 - s_m)}{s_w} \right] \times 100\% \\ \frac{1}{G_s} = \frac{v_s}{G_v} + \frac{1 - v_s}{G_f} \\ \delta_m = \frac{c}{s_m} \end{cases} \quad (12)$$

式中 v_s ——堆体中可挥发部分质量分数,%
 G_s ——堆体相对密度
 G_v ——堆体可挥发部分相对密度,取 1.0
 G_f ——灰分相对密度,取 2.5
 δ_m ——堆料单位体积含水量,g/cm³
 s_m ——堆料总固体质量分数,%
 c ——堆体质量系数,取 0.15 ~ 0.40

2.5 BVS 降解热

考虑到 BVS 降解的梯次性,假设存在快速降解阶段、过渡阶段和慢速降解阶段,由于不同的降解阶段降解的有机物种类不同,BVS 降解热亦是时间的函数,通过堆肥过程取样测定和文献数据^[3,5,9],得

到堆肥过程中 H_{C_i} 的时间函数为

$$\begin{cases} H_{C_1} = 1.837 \times 10^7 & (0 < t < 3.5) \\ H_{C_2} = (-0.040\ 9t + 1.980\ 2) \times 10^7 & (3.5 \leq t \leq 9) \\ H_{C_3} = 1.612 \times 10^7 & (9 < t < 14) \end{cases} \quad (13)$$

3 试验结果与讨论

利用实验室反应器进行了猪粪麦秸混合好氧堆肥试验研究。堆肥试验中的猪粪与麦秸按照质量比 1:0.086 混合堆肥,堆肥反应器^[8]有效容积 15 L,通风方式为连续通风(升温期、高温期、降温期的通风速率分别为 0.4、0.3、0.2 L/min),试验周期 14 d。堆肥试验中 BVS 含量变化和温度的实际测量值与模型模拟值的对比如图 1、2 所示。

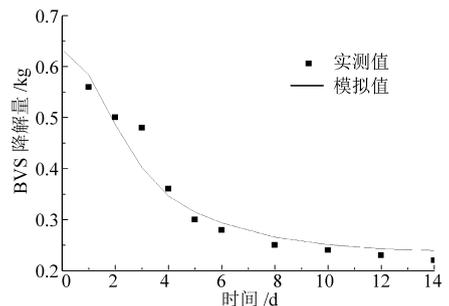


图 1 BVS 降解量实测与模拟结果

Fig. 1 Predicted and tested values of BVS

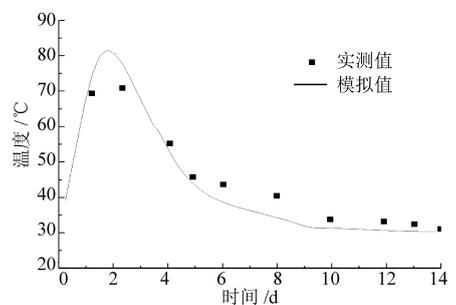


图 2 温度实测与模拟结果

Fig. 2 Predicted and tested values of temperature

从图 1 中可以看出,BVS 降解速率的试验结果与模拟结果吻合良好,猪粪 BVS 降解实测值(假定 BVS 含量约占可挥发性有机质总量的 60%^[3])与模型模拟值的相对标准误差为 13.02%,标准分析误差为 5.55℃。图 2 表明温度变化的实测值与模型模拟值有一定的差距,这可能是因为在建立热量平衡模型时没有考虑到辐射散热的影响,或是因为堆体体积小,空间梯度性的影响明显,这与模型对堆体均匀性的假定不符,影响了模型的准确性。但模型温度变化趋势与实际测量值变化趋势一致,温度实测值与模型模拟值的相对标准误差为 9.9%,标准分析误差为 36.5 g。

图3为进口气体的热量,主要由通气量的大小决定,图4为出口气体的热量,图5为通过反应器表面所散失的热量,图6为BVS降解的产热量。通过对比图3~6可知,热量主要是通过反应器表面散失的,因此,建造堆肥反应器时应注意保温设计,选择

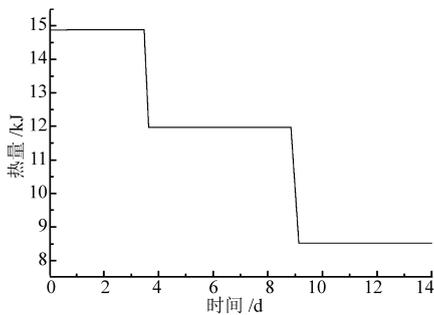


图3 进口气体的热量

Fig.3 Enthalpy value of inlet air

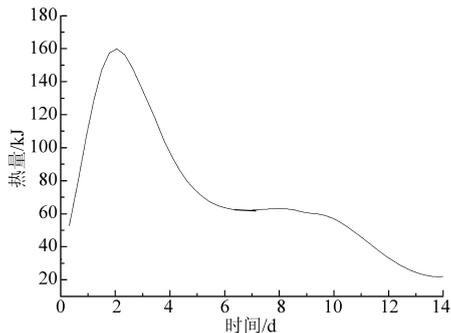


图4 出口气体的热量

Fig.4 Enthalpy value of outlet air

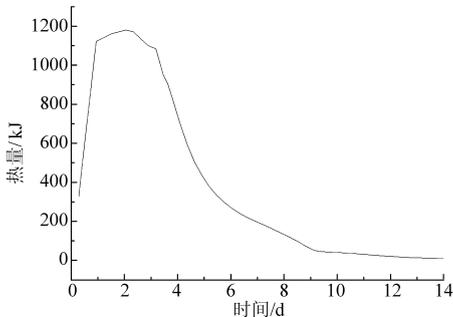


图5 反应器表面所散失的热量

Fig.5 Thermal loss through conduction during composting

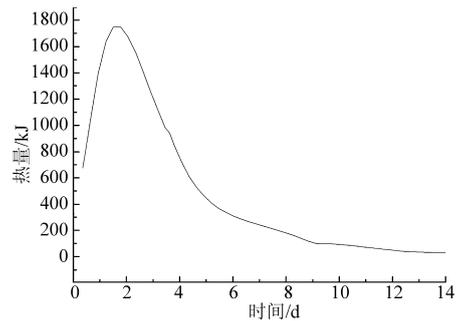


图6 BVS降解的产热量

Fig.6 Thermal generation from BVS degradation

热导系数小的材料作为反应器壁的主要部分或者添加保温层。

热量的散失方式主要取决于堆肥反应器型式和通风方式^[10],不同试验条件下,热量平衡各部分所占比例甚至有较大差别^[11],Ahn^[12]指出出口气体所携带的焓值占总焓值的17%~55%,本试验中出口气体的焓值占总焓值的比例较小,可能是因为反应器顶部冷凝集水装置的设计能够回收绝大部分出口气体中水蒸气所携带的潜热造成的,也可能与通风量少及气流平缓有关。

4 结束语

考虑堆肥有机质降解的梯次性原理建立了BVS降解模型和热量平衡模型,其中,BVS降解采用Monod一级动力学方程形式,综合考虑了温度、含水率、氧体积分数和自由空域对降解系数的影响。热量平衡模型中考虑传热和对流换热的热量传递方式,弱化热辐射对模型的影响。模型建立过程中采用了归一化处理、回归分析和数值拟合的方法,这些方法有利于提高模型的精度,但一定程度上降低了模型的通用性。为验证所建模型,利用实验室小型反应堆肥器进行了好氧堆肥验证试验,试验结果表明,模型模拟结果与实际测量结果一致性良好,所建数学模型对于深入研究堆肥机理,更好的指导生产实践具有一定的理论价值和实际意义。

参 考 文 献

- 1 王晓燕,黄光群,韩鲁佳. 鸡粪工厂化堆肥过程中有机质含量预测模型[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 101~105.
Wang X Y, Hang G Q, Han L J. Prediction model for organic matter content in chicken manure during plant-field composting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 101~105. (in Chinese)
- 2 Huang G Q, Han L J, Yang Z L, et al. Evaluation of the nutrient metal content in Chinese animal manure compost using near-infrared spectroscopy (NIRS) [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(17): 8164~8169.
- 3 Hang R T. The practical handbook of composting [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- 4 蔡建成. 堆肥工程与堆肥工厂[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- 5 Kaiser J. Modeling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach [J]. Ecological Modeling, 1996, 91(1~3): 25~37.

验结果与仿真结果吻合,表明了与单纯的模糊控制相比,灰色预测模糊控制系统的控制性能更加优越。

4 结束语

针对联合收获机工作过程中非线性、时变、大滞后的特点,设计了基于灰色预测模糊控制的联合收获机前进速度控制装置,建立了灰色预测模糊控制

模型。该控制系统以单片机为控制器,通过灰色预测模糊控制算法的计算,得到前进速度的改变量用以对前进速度进行调整。对控制过程进行了仿真及试验,结果表明该控制系统比单一模糊控制方法的控制过程调整时间更短、超调量更小、控制性能更加优越,使得联合收获机工作在高效稳定的工作状态。

参 考 文 献

- 1 余利锋,肖新棉,兰海军. 国内外农业机械化现状与发展趋势[J]. 湖北农机化, 2007(6):36~37.
- 2 Coen T, Saeys W, Missotten B, et al. Cruise control on a combine harvester using model-based predictive control[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 99(1):47~55.
- 3 李国栋,李勇智,张际先,等. 联合收获机脱粒滚筒的 PID 恒速控制[J]. 农业机械学报,2000,31(1):48~50.
Li Guodong, Li Yongzhi, Zhang Jixian, et al. PID control of constant palstance of a combine cylinder [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(1): 48~50. (in Chinese)
- 4 李耀明,丁为民,陈进. 梳脱式联合收获机脱粒输送装置自动控制系统[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5):86~89.
Li Yaoming, Ding Weimin, Chen Jin. Automatic controller for threshing and transporting devices of stripping combine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004,35(5):86~89. (in Chinese)
- 5 介战,陈家新,刘红俊. GPS 联合收获机随机喂入量模糊控制技术[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1):55~58.
Jie Zhan, Chen Jiixin, Liu Hongjun. Research on fuzzy control of random feed quantity of GPS combine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(1):55~58. (in Chinese)
- 6 张淑红,陈进. 联合收获机自动报警系统的设计[J]. 农机化研究, 2002,24(3):72~74.
Zhang Shuhong, Chen Jin. A study on the auto-alarm system of combine harvester[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2002,24(3):72~74. (in Chinese)
- 7 Zhou Yuan, Liu Mingshan, Zhang Zida, et al. Research on application of fuzzy neural network in combine harvester[C]// *Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2008.
- 8 蔡自兴. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- 9 钱积新,赵均,徐祖华. 预测控制[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- 10 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.

(上接第 124 页)

- 6 Mason I G. Mathematical modeling of the composting process: a review [J]. *Waster Management*, 2006, 26(1): 3~21.
- 7 Matshe N F, Andrews J F. A mathematical model for the continuous cultivation of thermophilic microorganisms [J]. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*, 1973: 77~90.
- 8 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 R. Study on the bench-scale aerobic composting reactor system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 9 罗玮,曾光明. 城市生活垃圾堆肥过程动力学模型研究[J]. 湖南大学学报, 2005, 32(5): 104~107.
Luo W, Zeng G M. Study on the composting kinetic model of municipal solid waste [J]. *Journal of Hunan University*, 2005, 32(5): 104~107. (in Chinese)
- 10 Petric I, Selimbasic V. Development and validation of mathematical model for aerobic composting process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 139(2): 304~317.
- 11 Yaldiz O, Kulcu R. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 93(1): 49~57.
- 12 Ahn H K, Richard T L, Choi H L. Mass and thermal balance during composting of poultry manure—wood shavings mixture at different aeration rates [J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(2): 215~223.