

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.019

猪粪麦秸反应器好氧堆肥水分平衡模型研究*

王永江 黄光群 韩鲁佳

(中国农业大学工学院,北京 100083)

【摘要】 分别建立了基于质量守恒方程和水分蒸发一级动力学方程的猪粪麦秸好氧堆肥水分平衡模型。水分平衡质量守恒模型考虑进口气体水分含量、出口气体携水量和堆肥微生物产水量对水分质量平衡的影响,并将堆肥过程有机质降解的梯次性作为影响生物产水量的重要因素。水分蒸发一级动力学模型考虑堆体自身含水率和通风速率对水分蒸发速率的影响,且堆体自身含水率在堆肥过程中呈动态变化。实验室好氧堆肥反应器验证试验结果表明,2种水分平衡模型的模拟结果与实际测量结果一致性良好,水分平衡质量守恒模型水分含量变化的实际结果与模拟结果的相对标准偏差为8.01%,水分蒸发一级动力学模型水分含量变化的实际结果与模拟结果的相对标准偏差为8.86%。

关键词: 猪粪 好氧堆肥 水分平衡 数学模型

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0102-05

Modeling of Moisture Balance during Pig Slurry Reactor Composting

Wang Yongjiang Huang Guangqun Han Lujia

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

Abstract

Simulation models regarding moisture content were developed respectively by law of conversation of mass and first order assumption with respect to the quality of moisture content. Approaches by law of conversation of mass to moisture content prediction was based on an analysis of biologically produced water, exit gas content and inlet air content, with the biological water estimated from yield factors based on biodegradable volatile solid degradation. The other approach to moisture content prediction based on first order moisture evaporation kinetics was developed by an analysis of composting pile moisture content and aeration rate. An aerobic composting process of pig slurry and wheat straw was conducted in order to verify the models constructed. The experimental results showed that modeling results gave good accuracy, and the relative standard error of law of conservation of mass model and first order assumption model were respectively 8.01% and 8.86%.

Key words Pig slurry, Aerobic composting, Moisture balance, Mathematical model

引言

高温好氧堆肥技术作为畜禽粪便无害化和资源化处理的主要技术之一,在环境保护和农业循环经济上体现出了重要的应用价值。好氧堆肥过程数学建模对优化堆肥工艺参数和实现堆肥过程实时控制

具有重要的意义^[1-5]。堆肥过程中堆肥微生物降解有机质需要一定的水环境,水分蒸发带走热量起到调节堆肥温度的作用,因此堆肥过程中水分的控制将直接影响堆肥反应速率,关系到堆肥产品的质量^[6-8],建立好氧堆肥过程水分平衡模型,将有助于探究堆肥过程动力学特征,优化水分控制工艺参数,

收稿日期:2011-09-21 修回日期:2011-11-14

*公益性行业(农业)科研专项资助项目(201003063)和中国农业大学科研创新专项资助项目(KYCX2011065)

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

有效确保堆肥成效。

国内外研究者^[1-2,4]大都根据堆肥反应器进口气体水分含量、出口气体携水量和堆肥微生物产水量之间的相互关系建立堆肥过程水分平衡模型,但充分考虑到堆肥过程主要种类有机质(糖类、脂肪类、纤维类等)参与降解的时间段、降解速率和产水率差异对生物产水量影响的研究较为鲜见。本研究拟充分考虑好氧堆肥有机质降解的梯次性^[9]对堆肥过程水分平衡的影响,建立猪粪麦秸好氧堆肥水分平衡模型。本文同时建立水分蒸发一级动力学方程模型^[10],并对2种模型的预测效果进行比较研究。

1 模型建立

1.1 水分平衡质量守恒模型

根据质量守恒定律,堆肥反应器中堆体保有的水分等于堆肥微生物产生的水分与进口气体携带的水分之和减去出口气体中含有的水分^[11],基于此建立的反应器堆肥系统水分平衡模型为

$$\frac{dM}{dt} = \frac{k_m \frac{dM_{BVS}}{dt} - Q_a (W_a(T) - W_a(T_a))}{W(1-M)} \quad (1)$$

式中 M ——堆体含水率,初值为65%

t ——时间,d T ——堆体温度,℃

k_m ——有机质降解产水率,即每1 kg有机质降解产生的水分质量,kg/kg

M_{BVS} ——有机质含量,kg

Q_a ——空气质量流通速率,取 $Q_a = 0.56$ kg/d

W_a ——在堆体温度或室温下气体的饱和湿度,即每1 kg气体中含有水分的质量,kg/kg

T_a ——室温(进气口温度),℃

W ——堆料质量,初值为5 kg

1.2 水分蒸发一级动力学模型

假定堆体水分蒸发速率与堆体含水率和供气量呈正相关^[10],则在好氧堆肥过程中水分变化为

$$\frac{dM}{dt} = -\lambda j q \frac{M}{W} \quad (2)$$

其中

$$j = \frac{18}{22.4} \frac{P_s}{P_0 - P_s} \quad (3)$$

$$\frac{P_s}{P_0} = \exp\left(11.961 - \frac{3993.7}{T + 233.9}\right) \quad (4)$$

式中 λ ——进、出口气体的饱和率,取 $\lambda = 80\%$

j ——饱和气体水分质量浓度,kg/m³

P_0 ——标准大气压,取 $P_0 = 1.01 \times 10^5$ Pa

P_s ——饱和蒸气压,Pa

q ——通风速率,取 $q = 0.43$ m³/d

2 主要过程变量

2.1 可生物降解有机质含量

堆肥过程微生物的产水量为可生物降解有机质(BVS)的降解量与产水率的乘积,在水分平衡质量守恒模型中,BVS含量是十分重要的过程变量。假定好氧堆肥过程中BVS的降解符合Monod一级降解动力学方程^[4,12],有

$$\frac{dM_{BVS}}{dt} = -k_T k_M k_{O_2} k_F M_{BVS} \quad (5)$$

其中 $k_T = k_o (1.066^{T-20} - 1.21^{T-60})$ (6)

$$k_M = \frac{1}{e^{-17.684M + 7.062} + 1} \quad (7)$$

$$k_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{O_2} + 2} \quad (8)$$

$$k_F = \frac{1}{e^{-23.675F + 3.4945} + 1} \quad (9)$$

式中 k_T ——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0~1

k_{O_2} ——氧浓度对反应速率的影响校正系数,取值0~1

k_F ——自由空域对反应速率的影响校正系数,取值0~1

k_o ——堆肥有机质在20℃时的降解速率

V_{O_2} ——堆体内部氧气体积分数,%

F ——堆体的自由空域,%

堆肥反应器内氧体积分数的变化和堆体温度的变化呈一定的负相关性^[4],在通气速率一定的前提下,可近似认为氧体积分数为堆体温度的一次函数,根据验证试验数据拟合函数关系为

$$V_{O_2} = -0.27T + 28.66 \quad (10)$$

假设堆肥过程中自由空域随时间的变化满足二级反应动力学方程^[13],根据验证试验结果拟合函数关系为

$$F = -0.3041t^2 + 4.1586t + 50.7 \quad (11)$$

2.2 温度

温度是堆肥系统微生物活动的反映,是影响堆肥微生物产水量和出口气体携水量的重要因素,本研究中还假定氧体积分数的变化也与温度具有相关关系,建立温度随时间变化的模型方程^[11]为

$$Wc \frac{dT}{dt} = G_i H_i - G_o H_o - UA(T - T_a) + \frac{dM_{BVS}}{dt} H_c \quad (12)$$

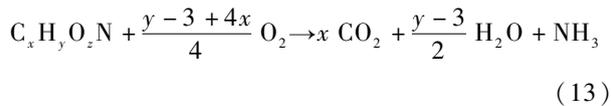
其中 $UA = 0.4077$

式中 c ——堆体和反应器比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 G_i, G_o ——进、出口气体质量流量, kg/d
 H_i, H_o ——进、出口气体焓值, kJ/kg
 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_c ——生化反应热, kJ/kg

2.3 堆肥有机质降解产水率

水分平衡质量守恒模型中生物产水量为有机质降解量与堆肥有机质降解产水率的乘积,堆肥有机质降解产水率是十分重要的过程变量。

根据堆肥过程有机质的化学组成和堆肥期间的降解量,采用化学计量法可以确定降解产水量的多少,假定猪粪麦秸混合好氧堆肥可降解有机质有氧降解反应式为



根据式(13)可以推知相同质量的糖类、蛋白质、脂类和纤维素类有机质降解产水量是不同的,堆肥过程中有机质的降解具有梯次性,所以猪粪麦秸好氧堆肥有机质降解产水率是时间的函数。根据文献[4,14]和实验室堆肥反应器堆肥试验所取得数据,得到堆肥有机质降解产水率随时间变化的经验公式为

$$k_m = \begin{cases} -0.70 & (0 < t < 3.5) \\ -0.55 & (3.5 \leq t \leq 9) \\ -0.65 & (t > 9) \end{cases} \quad (14)$$

2.4 堆料质量

随着可挥发性有机质的挥发、可生物降解性有机质的降解和水蒸气不断从堆肥反应器出气口被带出,堆料的质量在堆肥过程中动态变化。水分蒸发一级动力学模型中堆料质量是关系堆体含水率的重要过程变量,根据验证试验数据拟合堆料质量随时间变化的关系为

$$W = -0.0571t + 5 \quad (15)$$

3 验证试验

试验用猪粪样为幼猪当日鲜粪,堆肥调理剂为小麦干秸秆,利用铡草机进行粉碎处理至2~5 cm。堆肥试验中猪粪与麦秸的混合质量比为1:0.09。试验用堆肥反应器^[15-16]如图1所示,反应器有效容积15 L,其数据采集系统包括:温度传感器(Pt100电阻),氧气浓度传感器(O2S-FR-T2-18X型, Apollo Co., Ltd.),数据采集卡(DT85型, DataTaker Pty Co., Ltd.)和计算机终端。基于单位质量堆体

有机质含量进行好氧堆肥通风控制,连续通风速率调节范围为0.19~0.38 L/min,根据温度和氧浓度进行反馈调节,堆肥反应的初始条件如表1所示。堆肥试验使用3组规格相同的堆肥反应器在相同的试验条件下同时进行,验证试验所取数据为3组堆肥反应器测得数据的平均值。

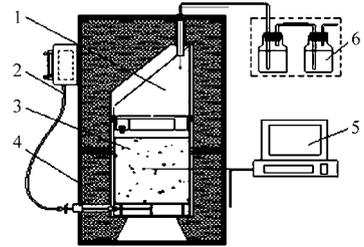


图1 反应器系统结构示意图

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

表1 堆肥试验的初始条件

Tab.1 Initial conditions of composting experiments

原料	质量 /kg	含水率 /%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	自由空 域/%	VS质量 分数/%	C/N
猪粪、麦秸	5	66	0.43	55	86	20

4 结果与讨论

水分平衡质量守恒模型中,堆肥生物产水量和出口气体携水量是水分平衡的2个重要组成部分。图2为水分平衡质量守恒模型模拟的堆肥微生物产水量曲线,主要由BVS降解速率和有机质降解产水率决定,在堆肥初始阶段,堆肥微生物大量繁殖产生大量的水,随着温度的升高和有机质浓度的下降,堆肥微生物活动受到限制,产水量到达顶峰之后开始下降,好氧堆肥降温期,有机质降解速率的不断降低致使堆肥微生物产水量不断降低。图3为水分平衡质量守恒模型模拟的出口气体携水量曲线,主要由气体流量和堆体温度决定,出口气体携水量的变化趋势与温度的变化趋势基本保持一致,好氧堆肥保温期出现的温度波动导致了出口气体携水量在第4~10天的波动。水分平衡质量守恒模型中,微生物产水量占水分平衡各个部分之和的比例约为29%,出口气体携水量占水分平衡各个部分之和的比例约为57%。水分平衡质量守恒模型模拟结果的准确度与堆肥微生物产水量和出口气体携水量模拟的准确度有直接关系^[17-18]。

猪粪麦秸好氧堆肥水分变化规律与2种水分平衡模型的模拟结果基本一致(图4),堆料中含有的水分在整个堆肥过程中是趋于减少的。水分平衡质

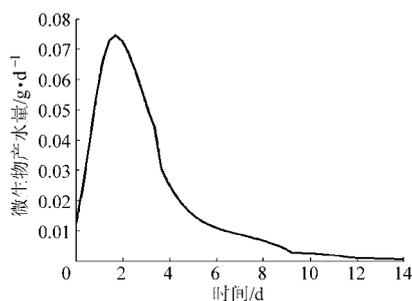


图2 堆肥微生物产水量模拟曲线

Fig. 2 Moisture value of respiration

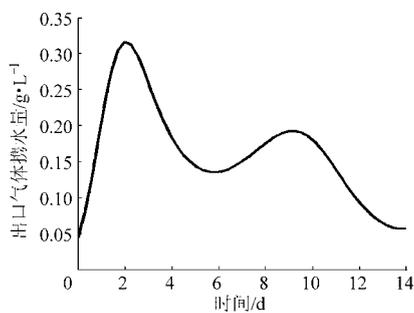


图3 出口气体携水量模拟曲线

Fig. 3 Moisture value of exhaust air

量守恒模型中水分含量变化的实际结果与模拟结果的最大绝对误差为 0.363 5, 最小绝对误差为 0.006 1, 平均偏差为 -0.181 7, 相对标准偏差为 8.01%; 水分蒸发一级动力学模型中水分含量变化的实际结果与模拟结果的最大绝对误差为 0.339 4, 最小绝对误差为 0.079 0, 平均偏差为 0.222 0, 相对标准偏差为 8.86%。

在好氧堆肥的初始阶段, 堆肥微生物在营养充分, 环境适宜, 种内、种间竞争较小的情况下大量繁殖产生了大量水分, 而此时堆体温度较低, 水分的散失速度较慢, 所以在此阶段水分含量会有一定程度的升高^[19-20](图4)。水分平衡质量守恒模型的模拟结果证实了这一现象, 与试验实际测量结果一致。

水分蒸发一级动力学模型的模拟结果在这一阶段呈现下降趋势, 这是由于水分蒸发一级动力学模型没有将微生物产水量作为影响水分平衡的主要因素考虑所致。

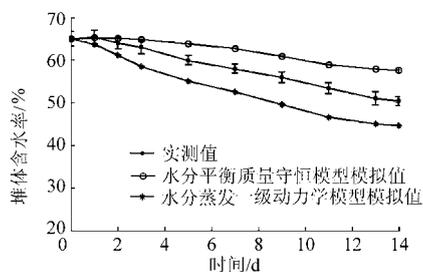


图4 水分含量的实测值与模拟值对比

Fig. 4 Predicted and observed values of moisture

水分蒸发一级动力学模型将温度、堆体自身含水率作为影响水分散失的重要影响因素, 而水分平衡质量守恒模型仅考虑温度对出口气体携水量的影响。水分蒸发一级动力学模型在没有引入太多过程变量的前提下取得了准确度与水分平衡质量守恒模型基本等价的模拟结果。

5 结束语

堆肥过程中堆体水分含量的变化是一个复杂的物理、化学等变化过程, 本研究采用 2 种方法建立水分平衡模型, 并将 2 种模型的模拟结果对比研究。考虑堆肥过程有机质降解的梯次性原理建立了水分平衡质量守恒模型, 水分蒸发一级动力学模型中考虑了堆体质量在堆肥过程中随时间的动态变化。利用实验室小型堆肥反应器进行了好氧堆肥水分平衡模型验证试验, 试验结果表明 2 种水分平衡模型的模拟结果与实际测量结果一致性均较好, 但模型的准确度有待于进一步提高, 水分散失速率与堆体自身含水率和温度的相关关系需要进一步研究。

参 考 文 献

- Yeomans J S, Huang G H, Yoogalingam R. Combining simulation with evolutionary algorithms for optimal planning under uncertainty: an application to municipal solid waste management planning in the regional municipality of Hamilton - Wentworth [J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2003, 2(1): 11 ~ 30.
- Huang B, Xiong D, Li H. An integrated approach to real-time environmental simulation and visualization [J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2004, 3(1): 42 ~ 50.
- He L, Huang G H, Zeng G M, et al. Wavelet-based multiresolution analysis technique for data cleaning and its application to water quality management system [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35(3): 1 301 ~ 1 310.
- Hang R T. *The practical handbook of composting* [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- 蔡建成. 堆肥工程与堆肥工厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- Jimenez E I, Garcia V P. Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. evaluation of temperature, pH, C/N ratio and action-exchange capacity [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 1991, 6(1): 45 ~ 60.
- Andersen J K, Boldrin A, Christensen T H, et al. Mass balances and life-cycle inventory for a garden waste windrow composting plant (Aarhus, Denmark) [J]. *Waste Management and Research*, 2010, 28(11): 1 010 ~ 1 020.

- 8 Zhang J C, Zeng G M, Chen Y N, et al. Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2 950 ~ 2 956.
- 9 Kaiser J. Modeling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach [J]. *Ecological Modeling*, 1996, 91(1~3): 25 ~ 37.
- 10 席北斗,李英军,张晓萱,等. 垃圾堆肥工艺过程动态模拟及优化研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6(2): 20 ~ 23.
Xi Beidou, Li Yingjun, Zhang Xiaoxuan, et al. Study on dynamic simulation of composting processes for domestic solid wastes [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(2): 20 ~ 23. (in Chinese)
- 11 Mason I G. Mathematical modeling of the composting process: a review [J]. *Waste Management*, 2006, 26(1): 3 ~ 21.
- 12 王永江,黄光群,韩鲁佳. 猪粪好氧堆肥过程有机质降解和热量平衡模型[J]. *农业机械学报*, 2011,42(10): 121 ~ 124, 115.
Wang Yongjiang, Huang Guangqun, Han Lujia. Modeling of organic matter degradation and thermal balance during pig slurry aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(10): 121 ~ 124, 115. (in Chinese)
- 13 陈同斌,罗维,高定,等. 混合堆肥过程中自由空域(FAS)的层次效应及动态变化[J]. *环境科学*, 2004, 25(6):150 ~ 153.
Chen Tongbin, Luo Wei, Gao Ding, et al. Stratification of free air space and its dynamics in the process of co-composting [J]. *Environment Science*, 2004, 25(6): 150 ~ 153. (in Chinese)
- 14 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:自然科学版*, 2005, 32(5): 104 ~ 107.
Luo Wei, Zeng Guangming. Study on the composting kinetic model of municipal solid waste [J]. *Journal of Hunan University: Natural Science*, 2005, 32(5): 104 ~ 107. (in Chinese)
- 15 张锐. 小型实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 Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 16 王永江,黄光群,韩鲁佳. 自由空域对猪粪麦秸好氧堆肥的影响实验分析[J]. *农业机械学报*, 2011,42(6): 122 ~ 126.
Wang Yongjiang, Huang Guangqun, Han Lujia. Effects analysis of free airspace to pig slurry wheat straw aerobic composting in laboratory reactor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(6): 122 ~ 126. (in Chinese)
- 17 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.
- 18 Higgins C, Walker L. Validation of a new model for aerobic organic solids decomposition: simulations with substrate specific kinetics[J]. *Process Biochemistry*, 2001, 36(8~9): 875 ~ 884.
- 19 Kim K Y, Kim H W, Han S K, et al. Effect of granular porous media on the composting of swine manure [J]. *Waste Management*, 2008, 28(11): 2 336 ~ 2 343.
- 20 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.

(上接第 101 页)

- 12 Khan A A, De Jong W, Jansens P J, et al. Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies [J]. *Fuel Processing Technology*, 2009,90(1): 21 ~ 50.
- 13 李军,李吉昌,吴晓华,等. 烟草废弃物利用研究[J]. *云南化工*, 2010,37(2): 44 ~ 49.
Li Jun, Li Jichang, Wu Xiaohua, et al. Progress in research on comprehensive utilization of tobacco waste [J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2010,37(2): 44 ~ 49. (in Chinese)
- 14 Elisabet B, Marcus O, Anders A, et al. Mechanisms of bed agglomeration during fluidized-bed combustion of biomass fuels [J]. *Energy & Fuels*, 2005,19(3): 825 ~ 832.
- 15 Olofsson G, Ye Z C, Bjerle I, et al. Bed agglomeration problems in fluidized-bed biomass combustion [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002,41(12): 2 888 ~ 2 894.
- 16 沈国章,鲁许鳌,钟振成,等. 流化床燃烧麦秸床料团聚结渣研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011,31(23): 14 ~ 20.
Shen Guozhang, Lu Xuao, Zhong Zhencheng, et al. Research on bed agglomeration formed during fluidized bed combustion of wheat straw [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011,31(23): 14 ~ 20. (in Chinese)