

# 有机固废堆肥过程的水分平衡模型研究进展

石晓晓<sup>1, 2</sup>, 陈同斌<sup>1, 2</sup>, 郑国砥<sup>1, 2\*</sup>, 高定<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 畜禽粪便等有机固体废物堆肥过程中水分含量影响堆肥反应过程, 并最终影响堆肥产品质量和后续的产品加工, 建立堆肥过程中的水分平衡模型有利于深入理解堆肥过程并优化堆肥过程的工艺参数。该文基于国内外研究进展, 对堆肥模型建立基础、水分模型及有机质降解模型研究现状进行综述, 概括了堆肥过程中水分迁移转化的主要途径, 明确了堆肥过程有机质降解产生的水分是水分平衡模型的重要组成部分。同时, 提出可以根据物料平衡思想建立堆肥过程中质量平衡模型, 由此分析了堆肥过程中水分平衡模型和有机质降解模型。现在的水分质量平衡模型考虑了堆肥过程中通风对流、水汽蒸发以及微生物作用有机质降解产水对水分的影响, 将水分模型分为对流模型、反应—对流模型、反应—蒸发模型和反应—对流—扩散模型 4 种模型。堆肥产水过程中的有机质降解模型主要有一阶动力学模型、Monod 模型和经验模型。

**关键词:** 有机固体废弃物; 好氧堆肥; 数学模型; 水分; 有机质降解

目前我国种植业、养殖业和食品加工业等的快速发展产生大量的秸秆、畜禽粪便、餐厨垃圾和酒糟等有机固体废弃物, 如果处理处置不当会导致严重的环境问题。2015 年中国畜禽粪便量高达 31.58 亿 t, 其中氮磷钾养分资源总量有 3 832.9 万 t<sup>[1]</sup>。若将这些固体废弃物通过堆肥, 把不稳定成分转化为稳定的腐殖质, 则可以实现有机固体废弃物无害化、减量化和资源化<sup>[2]</sup>。

堆肥主要驱动力是微生物, 而物料中的水分是微生物活动的重要介质, 且水分含量对微生物活性的影响大于温度的影响, 因此可以通过调节水分含量来提高微生物的活性<sup>[3]</sup>。水分是微生物进行新陈代谢、生理和生化反应的基础, 水分为微生物所需的可溶性营养物提供载体<sup>[4]</sup>, 还为堆肥中的化学和生物反应提供介质<sup>[5]</sup>。随着堆肥技术自动化水平日益提高, 堆肥过程中自动控制的参数控制也越来越重要。水分作为堆肥中重要的调控参数, 建立堆肥过程中水分平衡模型将有利于对堆肥进行自动化控制, 对调节堆肥工艺参数并达到堆肥优化有重要意义<sup>[6-7]</sup>。

## 1 建立模型的重要性

### 1.1 水的存在形式

有机固体废弃物在经过前处理进行堆肥时含水量较高, 水分在堆体中的存在形式决定了水分运移的途径和难易程度。研究人员根据污泥中水分和污泥絮体的结合方式不同提出了 4 种不同形态的分布: 自由水、表面吸附水、毛细管结合水和胞内水<sup>[8]</sup>。

### 1.2 堆肥过程水分迁移转化途径

在有机固体废弃物堆肥过程中, 堆体含水率会随着堆肥时间逐渐减少。水分的迁移转化主要过程是: 通风输水、微生物作用脱水、产水及堆体表面脱水<sup>[9]</sup>。通风输水包括在强制通风过程中空气进入堆体带入的水分和离开堆体携带的水分。微生物作用产水是指在堆肥过程中可生物降解有机物经微生物氧化作用产生水分, 在此过程中也消耗部分水分。堆体表面脱水指微生物作用使堆体温度升高水分蒸发流失的水分。

### 1.3 模型建立意义

模型对于堆肥研究十分重要, 通过数学模型的建立和研究, 可以对堆肥过程的数值进行模拟和仿真, 调控堆肥工艺, 还有利于对堆肥过程系统深入的理解和认识。好氧堆肥是在群落演替迅速的多个微生物种群作用下, 人为地将可生物降解的有机质向稳定的腐殖质转化的复杂过程, 其中水分是堆肥

收稿日期: 2018-12-25; 录用日期: 2019-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0501408, 2016YFC0401102)。

作者简介: 石晓晓(1996-), 女, 河南鹿邑人, 硕士研究生, 主要从事有机固体废弃物堆肥研究。E-mail: shixx.17s@igsnr.ac.cn。

通讯作者: 郑国砥, E-mail: zhenggd@igsnr.ac.cn。

过程中重要的影响因素。但水分在堆肥过程中迁移转化过程复杂,影响因素较多且存在耦合机制。建立水平衡模型将有助于对堆肥过程中各因素对水分的影响有更直观的认识,并且利用合理的水分模型,建立堆肥化可视动态模型,模拟堆肥反应过程中各参数的变化,从而达到优化堆肥操作参数和提高堆肥效率的目的<sup>[10-12]</sup>。

## 2 模型的理论基础

### 2.1 堆肥中物料平衡

计算好氧堆肥过程中物料平衡的思想是:输入的物料加上堆肥过程中加入物料的总和等于简单有机物、水分含量、气体总量及新增殖细胞等产物质量总和。即:混混合物料质量 + 输入气体质量 = 排出气体质量 + 堆肥质量 + 渗滤液质量。图1为堆肥过程中的物料平衡<sup>[13]</sup>:

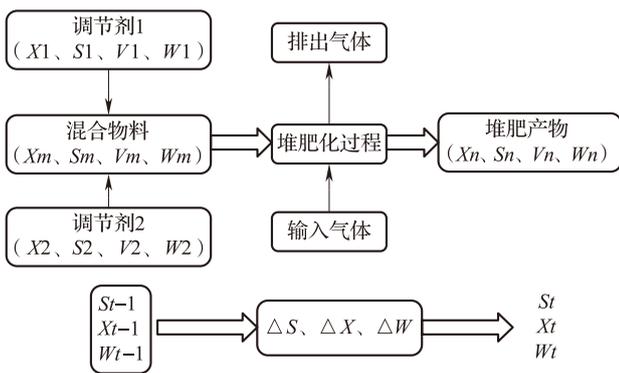


图1 堆肥过程中的物料平衡

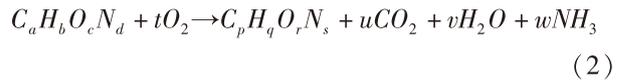
注:  $V$  代表反应器体积,  $S$  代表有机质量,  $X$  代表微生物量,  $W$  代表含水率。

由图1可以得出堆肥中各参数平衡,即有效容积  $V$  的堆肥反应器中有机质量  $S$ 、微生物量  $X$ 、含水率  $W$  变化关系如公式(1):

$$\frac{dS}{dt} = S_t - S_{t-1}; \quad \frac{dX}{dt} = X_t - X_{t-1}; \quad \frac{dW}{dt} = W_t - W_{t-1} \quad (1)$$

### 2.2 堆肥过程中有机质降解

堆肥是利用堆体中的微生物促进有机废弃物的稳定化,将可生物降解的有机物转化为稳定的腐殖质的生物化学过程。堆肥过程中,有机物经微生物有氧降解生成菌体混合物、 $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $NH_3$  等的化学反应如式(2)表示<sup>[14]</sup>:



式中:  $t=0.5(r+2u+v-c)$ ;  $u=a-p$ ;  $v=0.5(b-q-3w)$ ;  $w=d-s$ 。

式(2)中  $C_a H_b O_c N_d$  表示原材料中的有机成分;等式右边  $C_p H_q O_r N_s$  表示未反应完的原料和反应生成的菌体混合物,是堆肥产物的元素组成。为了使式(2)在定量上成为完整的体系,将原料的单位质量作为基准,则式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $p$ 、 $q$ 、 $r$ 、 $s$  可分别由他们分子式中各元素的分子数确定。

堆肥中有机质降解存在梯次性,为了比较简单的表示有机质在不同阶段的降解过程,有学者用图2表示堆肥过程中有机质种类与微生物种群的对应关系<sup>[15-16]</sup>。

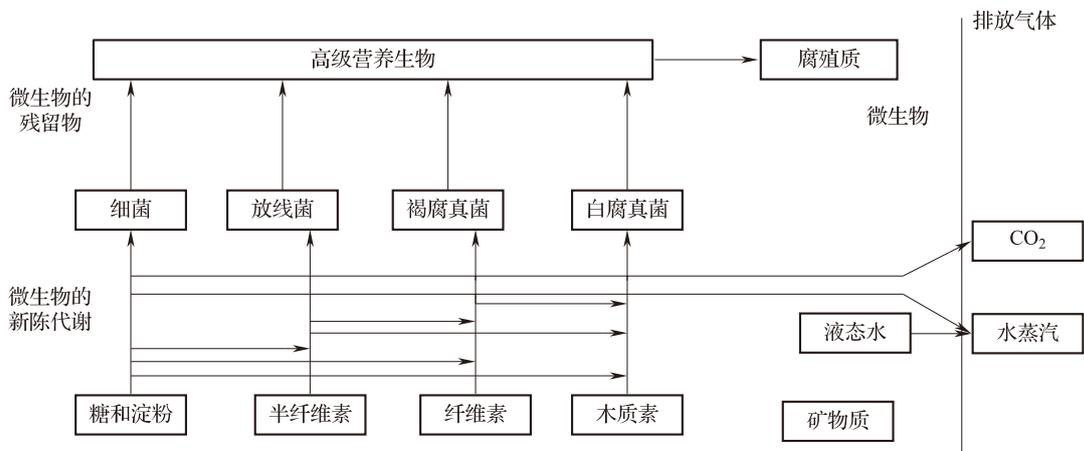


图2 微生物降解有机质过程

### 3 模型研究进展

#### 3.1 堆肥中水分模型

在堆肥过程中水分是控制工艺的重要参数<sup>[17-18]</sup>, 水分控制直接关系到堆肥产品的质量<sup>[19]</sup>, 保持适当的水分含量是平衡堆肥过程中的水分竞争需求的关键<sup>[20]</sup>。利用数学建模模拟堆肥过程水分变化可以更好地理解堆肥过程<sup>[21]</sup>。

堆体中水分迁移转化途径建立如下水分质量平衡方程: 进料初始含水量 + 输入水蒸气量 + 加水量 + 微生物反应产水量 = 出料含水量 + 输出水蒸气量 + 渗滤液含量<sup>[22]</sup>。基于上述不同的水分迁移转化途径已经开发了不同类型的水分模型, 有的模型涉及到生物水的产生, 有的模型仅考虑堆肥中水分对流等。根据不同的迁移转化途径, 水分模型可以分为以下 4 种: 对流模型、反应—对流模型、反应—蒸发模型和反应—对流—扩散模型<sup>[23]</sup>。由于有研究认为堆体内水分在水气相间的转化过程中其层间的扩散会被堆体层内的液相水蒸发影响, 因此上述学者们建立的水分模型通常不考虑水分的扩散<sup>[24]</sup>。

堆肥模型建立的基础是 Haug<sup>[25]</sup> 提出的堆肥中的物料平衡以及各参数之间的影响及动力学模型, 即公式:

$$R_a(T, O_2, M, BVS, FAS) = k_s BVS f_1(T) \cdot f_2(M) f_3(O_2) f_4(FAS) \quad (3)$$

式中  $R_a$  为绝对降解速率, kg/h;  $BVS$  为可降解挥发性固体, kg;  $k_s$  为标准率常量,  $h^{-1}$ ;  $FAS$  为自由空域;  $T$  为温度, °C;  $M$  为废物含水摩尔质量。

该模型综合考虑了环境中的因素, 不同环境因素将得出不同的结果。水分对流模型即是进出气口对流去除的水分模型。Higgins 等<sup>[26]</sup>、Sole-Mauri 等<sup>[20]</sup>、Petric 等<sup>[27]</sup>、Das 等<sup>[28]</sup> 和席北斗等<sup>[24]</sup> 也都在此基础上建立了堆体内水蒸气对流和微生物氧化产水的平衡方程。即假设堆肥过程中条件均匀的前提下, 建立了反应—对流模型, 其中最为经典的是 Higgins 等<sup>[26]</sup> 提出的水分质量模型:

$$\frac{dM_b}{dt} = \frac{G_a [H_s(T_a) - H_s(T)] + y_{H_2O/BVS} \frac{d(BVS)}{dt}}{V_r \rho_{db}} \quad (4)$$

式中,  $BVS$ : 可生物降解挥发性固体物质质量;  $M_b$ : 基质的含水率 ( $H_2O$  kg/kg 干固体);  $t$ : 堆肥进行的

时间 (d);  $G_a$ : 干空气质量流率 (干空气 kg/d);  $H_s$ : 堆体空气中的饱和水蒸气含量 ( $H_2O$  kg/kg 干空气);  $T$ : 基质的温度 (°C);  $T_a$ : 环境温度 (°C);  $y_{H_2O/BVS}$ : 降解反应产水率 ( $H_2O$  kg/kg 消耗的 BVS);  $V_r$ : 反应器的有效工作体积 ( $m^3$ );  $\rho_{db}$ : 基质的干容重 ( $kg/m^3$ )。

在此基础上, Vasiliadou 等<sup>[29]</sup> 考虑堆肥中水分各个方面的影响建立了一个更为全面的水分模型, 不仅考虑了堆肥中曝气对流去除水分和有机质降解产生水分, 还增加了微生物繁殖所需水分、微生物死亡产生水分及人工添加水分:

$$\frac{d(H_2O)}{dt} = G_a [H_s(T_a) - H_s(T)] + \frac{Y_{H_2O/S_L}}{Y_{X/S_L}} \mu X - \frac{1}{Y_{H_2O/X}} \mu X + Y_{H_2O/X_{dead}} k_d X + W_{added} \quad (5)$$

式中,  $X$ : 生物质 (kg);  $\mu$ : 比生长速率 (1/d);  $S_L$ : 可溶性有机物 (kg);  $Y_{X/S_L}$ : 消耗每单位底物的细胞产量 ( $kg-X/kg-S_L$ );  $Y_{H_2O/X}$ : 生物质代谢产水量 ( $kg-H_2O/kg-X$ );  $Y_{H_2O/S_L}$ : 可溶性有机物代谢产水量 ( $kg-H_2O/kg-S_L$ );  $Y_{H_2O/X_{dead}}$ : 微生物死亡产水量 ( $kg-H_2O/kg-X$ );  $k_d$ : 微生物死亡速率 (1/d);  $W_{added}$ : 堆肥过程中添加水量 ( $kg-H_2O/d$ )。

上述方程式 (5), 有学者认为在堆肥过程中微生物形成新细胞所需的水分远远小于微生物氧化有机物产生的水分量, 并且微生物所需的水分和死亡返回堆体的水分基本相等, 所以大多数模型可以忽略微生物所需水分和死亡返回堆体的水分<sup>[30]</sup>。

Petric 等<sup>[27]</sup> 和 Batstone 等<sup>[31]</sup> 考虑堆肥过程中水分蒸发对水分去除的影响, 建立了水分反应—蒸发模型, 其中水分蒸发最常用的模型为:

$$\Delta W = G \cdot k_{l a_w} \cdot (P_s - P_v) \quad (6)$$

式中  $\Delta W$ : 水分蒸发量;  $G$ : 曝气量体积 ( $m^3/h$ );  $k_{l a_w}$ : 水气液相传质系数 [ $kg/(m^3 \cdot Pa)$ ];  $P_s$ : 堆肥温度下的饱和蒸气压 (Pa);  $P_v$ : 入口水蒸气环境温度下的压强 (Pa)<sup>[21]</sup>。

除了上述建立的模型, 还有许多学者建立了经验模型。Li 等<sup>[32]</sup> 对堆肥过程的经验模型进行了总结, 许多开发的模型都是经验性的, 有线性<sup>[33-34]</sup>、多项式<sup>[35]</sup>、指数<sup>[36]</sup> 和统计表达式<sup>[37]</sup>。如席北斗等<sup>[24]</sup> 建立了水分质量与含水率和供气量呈正相关的水分模型:

$$\frac{dW}{dt} = -\lambda j q \frac{W}{M} \quad (7)$$

式中,  $W$ = 水的质量 (kg);  $q$ = 供气量 (L<sup>3</sup>/h);  $\lambda$ = 蒸气饱和率;  $j$ = 饱和水蒸气量 (kg/Nm<sup>3</sup>)。

在实际堆肥中, 常会由于信息的不完整或不精确而存在不确定性。在过去的几十年人们提出了许多能够解决这种不确定的数学方法<sup>[38-41]</sup>。随着研究的深入和理论的发展, 研究者逐渐将模糊集合理论引入堆肥模型中<sup>[40]</sup>。模糊理论可以帮助管理者确定堆肥性能的波动是由于堆肥过程中不可避免的系统不确定性还是人为因素<sup>[32]</sup>。

### 3.2 有机质降解模型

好氧堆肥有机质降解是一个消耗氧气并同时产生二氧化碳和水的微生物作用过程, 这也是堆肥过程中水分产生的主要途径。因此在水分模型中, 水分蒸发和通风输水都是堆肥中可控制变量, 有机质降解产水是不确定量, 因此有机质降解产水是模型中重要的组成部分。研究堆肥中有机质的降解过程也可以对堆肥中水分的产生有更深入的认识及对堆肥过程的实时控制<sup>[42]</sup>。

根据上述堆肥过程中水分模型, 可知堆肥过程中有机质降解产水量为:

$$\frac{d_{M_{or}}}{dt} = y_{H_2O/BVS} \cdot \frac{dBVS}{dt} \quad (8)$$

式中,  $d_{M_{or}}$ : 有机质降解产水量 (kg)。

堆肥过程中的有机质降解产水系数常为经验值, 并且不同的研究所选取的经验值不同。王永江等<sup>[42]</sup>认为堆肥过程中有机质降解产水率随时间变化的经验公式为:

$$y_{H_2O/BVS} = \begin{cases} -0.70 & (0 < t < 3.5) \\ -0.55 & (3.5 \leq t \leq 9) \\ -0.65 & (t > 9) \end{cases} \quad (9)$$

Zhang 等<sup>[43]</sup>在其研究中取产水率为常数 H<sub>2</sub>O 0.5 kg/kg 消耗的 BVS; Woodford<sup>[44]</sup>取值为 H<sub>2</sub>O 0.431 2 kg/kg 消耗的 BVS。有机质降解产水率目前还没有统一的标准值。

有机质降解产水中的有机质的降解模型主要分为以下 3 类:

#### (1) 一阶动力学模型

一阶动力学模型可以很好地描述有机质降解过程, 其中的参数变量少, 求解过程也相对简单, 已逐渐成为堆肥有机质降解模型的研究趋势<sup>[45]</sup>, 表 1 给出了一阶动力学模型中比较常见的几类模型。

在一阶动力学模型中应用最为成熟广泛的是

Haug<sup>[25]</sup>提出的动力学模型:

$$\frac{dBVS}{dt} = k_{BVS} \cdot BVS \quad (10)$$

式中  $k_{BVS}$  是 BVS 降解的动力学系数 (d<sup>-1</sup>), 有机质降解受温度、含水率、氧气浓度、自由空域等因素的影响, 所以 BVS 的一级动力学降解系数可以用如下方程表示:

$$k_{BVS} = k_T \cdot k_{MC} \cdot k_{O_2} \cdot k_{FAS} \quad (11)$$

式中  $k_T$ 、 $k_{MC}$ 、 $k_{O_2}$ 、 $k_{FAS}$  分别表示温度、含水率、氧气浓度、自由空域的校正系数。这些校正系数可以用不同的方程进行计算。

表 1 常见的有机质降解一阶动力学模型

模型	出处
$BOD_t = A [1 - e^{-k_1 t}] + B [1 - e^{-k_2 t}]$	[25]
$\frac{m(\theta) - m_e}{m_o - m_e} = e^{-kt}$	[46]
$OM_{loss} = A [1 - e^{-k_1 t}]$	[47-50]
$\frac{\Delta BVS}{BVS_0} = 1 - (1 - k'_1 \Delta t) \cdots x (1 - k'_n \Delta t)$	[51-52]
$\frac{dBVS}{dt} = k_{BVS} \cdot BVS$	[25]
$\frac{\partial (\varepsilon \cdot \rho_a)}{\partial t} = u \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial z} - y_{O_2/BVS} \cdot \frac{\partial BVS}{\partial t}$	[53]
$\frac{\partial (\varepsilon \cdot \rho_a \cdot C_{O_2})}{\partial t} = -u \cdot \frac{\partial (\rho_a \cdot C_{O_2})}{\partial z} + \frac{\varepsilon}{\beta^2} \cdot D_{O_2} \cdot \frac{\partial^2 (\rho_a C_{O_2})}{\partial z^2} + y_{O_2/BVS} \frac{\partial BVS}{\partial t}$	[35]

注: BOD 是化学需氧量; A、B 是 BOD 模型饱和和常数 (kg 或 g/m<sup>3</sup>);  $m_o, m_e$  是堆肥干物质 (kg);  $k$  是一阶速率系数 (d<sup>-1</sup>); OM 是堆肥中有机质含量 (kg); BVS 是可降解挥发性固体 (kg);  $k_{BVS}$  是 BVS 降解的动力学系数 (d<sup>-1</sup>);  $\varepsilon$  是孔隙度;  $\rho_a$  是干空气密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $C_{O_2}$  是堆体中氧气浓度 (kg/m<sup>3</sup>);  $y_{O_2/BVS}$  是降解耗氧量 (O<sub>2</sub> kg/kg 消耗的 BVS);  $\beta$  是堆体中孔隙曲折系数。

#### (2) Monod 模型

Monod 方程将微生物的生长速率描述为限制微生物生长的有机质的浓度函数, 考虑温度、氧气浓度、含水率、碳氮比等限制因素修正和优化模型。Monod 方程在好氧堆肥中微生物的生长不受限制时应用较好<sup>[12]</sup>。Kaiser<sup>[54]</sup>在充分考虑有机质组分在生物降解时产生的差异性时建立有机质降解模型, 采用了改进的 Monod 方程。罗玮等<sup>[55]</sup>、蔡建成<sup>[56]</sup>考虑氧气体积分数对有机质降解速率影响建立有机质降解 Monod 模型; Lin 等<sup>[57]</sup>将堆肥中的有机质分为可溶性有机质和不可溶性有机质建立有机质降解

Monod 模型。

### (3) 经验模型

经验模型是通过试验获得堆肥中需要的数据, 将堆肥试验数据进行回归分析等手段拟合并通过检验验证合成的模型, 利用堆肥中得到的数据拟合有机质的经验模型<sup>[35, 37, 58]</sup>。这种经验模型得出的有机质仿真曲线更贴合实际堆肥过程中有机质的波动性, 具有较高的模拟精确度。但是这种模型没有考虑到堆肥中温度、氧气浓度等因素的影响, 这些影响因素的变化也是拟合出来的<sup>[12]</sup>。

## 4 堆肥过程中水分平衡模型研究展望

堆肥中水分影响微生物的活性及堆肥反应品质, 因此研究堆肥中的水分迁移转化, 对调节堆肥工艺参数并达到堆肥最优化有重要意义。目前, 水分质量守恒模型中的有机质降解产水率参数均是经验值, 没有统一标准, 研究应该明确堆肥过程中有机质降解产水潜力, 标准化有机质降解产水系数。在已有的堆肥水分模型中, 有机质降解产水模型复杂, 需要输入模型参数较多, 求解过程复杂且不能得到解析解, 在今后的研究中应该简化有机质降解产水模型, 明确环境因素对堆肥过程中水分变化产生的耦合作用。另一方面堆肥中的水分模型关注点主要是水分含量的变化, 迄今为止对于水分在堆体中分布及动态迁移过程模型还没有深入的研究, 堆肥中水势梯度等因素对水分迁移的影响目前还不清楚。水分在堆体中的分布形态及迁移途径直接影响水分去除的难易程度。堆肥中水分形态转化过程还未进行研究。

### 参考文献:

- [1] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1131-1148.
- [2] 田智辉, 王亚妮, 邹超, 等. 牛粪和秸秆好氧发酵堆肥的初始条件研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2018, (6): 192-197.
- [3] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend [J]. Bioresource Technology, 2003, 86 (2): 131-137.
- [4] Stentiford E I. Composting control: principles and practice [M] // The science of composting. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996. 49-59.
- [5] Hamoda M F, Qdais H A A, Newham J. Evaluation of municipal solid waste composting kinetics [J]. Resources, Conservation and Recycling, 1998, 23 (4): 209-223.
- [6] 雷大鹏. 牛粪好氧堆肥能量转换与水分减量研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [7] Zhang J, Chen T, Gao D. Simulation of the mathematical model of composting process of sewage sludge [J]. Compost Science & Utilization, 2016, 24 (2): 73-85.
- [8] Vaxelaire J, Cézac P. Moisture distribution in activated sludges: a review [J]. Water Research, 2004, 38 (9): 2215-2230.
- [9] 蔡璐, 葛奇峰, 高定, 等. 城市污泥生物干化过程的有机质转化与产水规律 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (5): 274-279.
- [10] 金龙, 赵由才. 计算机与数学模型在固体废物处理与资源化中的应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] 王永江. 猪粪堆肥过程中有机质降解动力学模型研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [12] Mason L G. Mathematical modelling of the composting process: A review [J]. Waste Management, 2006, 26 (1): 3-21.
- [13] 宇鹏. 好氧堆肥过程中的物料和能量平衡的计算与研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [14] 柴晓莉, 张华, 赵由才, 等. 固体废物堆肥原理与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [15] 黄得扬, 陆文静, 王洪涛. 有机固体废物堆肥化处理的微生物学机理研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5 (1): 12-18, 71.
- [16] 徐杰, 许修宏, 刘月. 强化堆肥中木质纤维素降解的功能菌株筛选鉴定 [J]. 中国土壤与肥料, 2014, (6): 100-105.
- [17] 罗维, 陈同斌. 湿度对堆肥理化性质的影响 [J]. 生态学报, 2004, 24 (11): 2656-2663.
- [18] WWBLDM44, US EPA 625/4-85/014, Design Manual Number 44: Composting of municipal wastewater sludges [S]. 1985.
- [19] McCartney D, Tingley J. Development of a rapid moisture content method for compost materials [J]. Compost Science & Utilization, 1998, 6 (3): 14-25.
- [20] Sole-Mauri F, Illa J, Magri A, et al. An integrated biochemical and physical model for the composting process [J]. Bioresource Technology, 2007, 98 (12): 3278-3293.
- [21] Wang Y, Ai P, Cao H, et al. Prediction of moisture variation during composting process: A comparison of mathematical models [J]. Bioresource Technology, 2015, 193: 200-205.
- [22] 王洪涛, 李雨松. 动态好氧堆肥模拟模型研究与应用 [J]. 中国环境科学, 2001, 21 (3): 240-244.
- [23] 张军, 陈同斌, 高定, 等. 好氧生物堆肥中温度、氧气和水分模型的研究进展 [J]. 中国给水排水, 2010, 26 (11): 148-152.
- [24] 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.
- [25] Haug R T. The practical handbook of compost engineering [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- [26] Higgins C W, Walker L P. Validation of a new model for aerobic organic solids decomposition: simulations with substrate specific

- kinetics [J]. *Process Biochemistry*, 2001, 36 (8-9): 875-884.
- [27] Petric I, Selimbašić V. Development and validation of mathematical model for aerobic composting process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 139 (2): 304-317.
- [28] Das K, Keener H M. Numerical model for the dynamic simulation of a large scale composting system [J]. *Transactions of the Asae*, 1997, 40 (4): 1179-1189.
- [29] Vasiliadou I A, Chowdhury A K M M B, Akratos C S, et al. Mathematical modeling of olive mill waste composting process [J]. *Waste Management*, 2015, 43 (61): 61-71.
- [30] 周海滨, 高定, 陈同斌, 等. 污泥生物好氧发酵的脱水及其过程模拟研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31 (14): 1-6.
- [31] Batstone D J, Keller J, Angelidaki I, et al. The IWA anaerobic digestion model No 1 (ADM1) [J]. *Water Science and Technology*, 2002, 45 (10): 65-73.
- [32] Li Z, Lu H, Ren L, et al. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review [J]. *Chemosphere*, 2013, 93 (7): 1247-1257.
- [33] Kishimoto M, Preechaphan C, Yoshida T, et al. Simulation of an aerobic composting of activated sludge using a statistical procedure [J]. *Marcin Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, 1987, 3 (2): 113-123.
- [34] Nakasaki K, Kato J, Akiyama T, et al. A new composting model and assessment of optimum operation for effective drying of composting material [J]. *Journal of Fermentation Technology*, 1987, 65 (4): 441-447.
- [35] Van Lier J J C, Van Ginkel J T, Straatsma G, et al. Composting of mushroom substrate in a fermentation tunnel-compost parameters and a mathematical model [J]. *NJAS wageningen Journal of Life Sciences*, 1994, 42 (4): 271-292.
- [36] Vander Gheynst J S, Walker L P, Parlange J Y. Energy transport in a high-solids aerobic degradation process: mathematical modeling and analysis [J]. *Biotechnology Progress*, 1997, 13 (3): 238-248.
- [37] Seki H. Stochastic modeling of composting processes with batch operation by the Fokker-planck equation [J]. *Transactions of the Asae*, 2000, 43 (1): 169-179.
- [38] Kumar S, Kumar M, Thurow K, et al. Fuzzy filtering for robust bioconcentration factor modeling [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24 (1): 44-53.
- [39] Sun W, Huang G H, Zeng G, et al. A stepwise-cluster microbial biomass inference model in food waste composting [J]. *Waste Management*, 2009, 29 (12): 2956-2968.
- [40] Giusti E, Marsili-Libelli S. Fuzzy modeling of the composting process [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25 (5): 641-647.
- [41] Giusti E, Marsili-Libelli S, Spagni A. Modelling microbial population dynamics in nitrification processes [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26 (7): 938-949.
- [42] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳. 猪粪好氧堆肥过程中有机质降解和热量平衡模型 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42 (10): 121-124.
- [43] Zhang Y, Lashermes G, Houot S, et al. Modelling of organic matter dynamics during the composting process [J]. *Waste Management*, 2012, 32 (1): 19-30.
- [44] Woodford P B. In-vessel composting model with multiple substrate and microorganism types [D]. Manhattan: Kansas State University, 2009.
- [45] 张军, 李世好, 刘孟子, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中有机质降解模型 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44 (2): 348-351.
- [46] Ndgewa P M, Thompson S A, Merrka W C. A dynamic simulation model of in-situ composting of caged layer manure [J]. *Compost Science & Utilization*, 2000, 8 (3): 190-202.
- [47] Bernal M P, Navarro A F, Roig A, et al. Carbon and nitrogen transformation during composting of sweet sorghum bagasse [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 22 (1-2): 141-148.
- [48] Paredes C, Roig A, Bernal M P, et al. Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32 (3): 222-227.
- [49] Paredes C, Bernal M P, Roig A, et al. Effects of olive mill wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes [J]. *Biodegradation*, 2001, 12 (4): 225-234.
- [50] Paredes C, Bernal M, Cegarra J, et al. Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2002, 85 (1): 1-8.
- [51] Bari Q H, Koenig A, Guihe T. Kinetic analysis of forced aeration composting-I. Reaction rates and temperature [J]. *Waste Management and Research*, 2000, 18 (4): 303-312.
- [52] Bari Q H, Koenig A. Kinetic analysis of forced aeration composting-II. Application of multilayer analysis for the prediction of biological degradation [J]. *Waste Management and Research*, 2000, 18 (4): 313-319.
- [53] Ekinici K. Theoretical and experimental studies on the effects of aeration strategies on the composting process [D]. Columbus: The Ohio State University, 2001.
- [54] Kaiser J. Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach [J]. *Ecological modeling*, 1996, 91(1-3): 25-37.
- [55] 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.
- [56] 蔡建成. 堆肥工程与堆肥工厂 [M]. 湖南: 机械工业出版社, 1990.
- [57] Lin Y P, Huang G H, Lu H W, et al. Modeling of substrate degradation and oxygen consumption in waste composting processes [J]. *Waste Management*, 2008, 28 (8): 1375-1385.
- [58] Huang J S, Wang C H, Jih C G. Empirical model and kinetic behavior of thermophilic composting of vegetable waste [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2000, 126 (11): 1019-1025.

**Progress on water balance model during organic solid waste composting process: A review**

SHI Xiao-xiao<sup>1, 2</sup>, CHEN Tong-bin<sup>1, 2</sup>, ZHENG Guo-di<sup>1, 2\*</sup>, GAO Ding<sup>1</sup> ( 1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 )

**Abstract:** Usually the moisture content affects the composting reaction rate, the quality of composting products and the process of subsequent products. It can deeply understand the process and optimize the process parameters of the composting process through establishing water balance models. Based on the research progress, this paper reviewed the foundation of model establishment and the current study of water model and organic matter degradation model. The main ways of water migration and transformation were summarized. And it was made clear that the water produced by the degradation of microbial oxidation organic matter was the pathway of water production, which was an important part of the water balance model during composting. At the same time, water balance model and organic matter degradation model were analyzed according to the material balance. These effects of ventilation convection, water evaporation, and organic matter degradation during composting were considered in the current water models, which were divided into convection model, reaction-convection model, reaction-evaporation model and reaction-convection-diffusion models. There were three approaches to describe the biodegradation process; first-order kinetics, Monod kinetics and empirical equations.

**Key words:** organic solid waste; aerobic composting; mathematical model; water; organic matter degradation