

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.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.02.102

城市污泥好氧堆肥过程中有机质降解模型

张 军^{1,2,3}, 李世好^{1,2,3}, 刘孟子^{1,2,3}, 杨博闻^{1,2,3}, 王敦球^{1,2,3}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院,广西桂林 541004; 2. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室,广西桂林 541004;
3. 广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,广西桂林 541004)

摘要:以城市污泥、锯末为原料,在 250 L 温度-氧气反馈通风的自动控制发酵仓内,分别设置 2 组堆肥,堆体 1、堆体 2 均采用连续式通风控制工艺。通过分析总糖、脂肪、蛋白质、半纤维素、纤维素、木质素等有机质组分在不同阶段的含量变化,拟合得到各组分的一级反应速率常数。结果表明,总糖、脂肪、蛋白质等易生物降解部分在堆肥运行 0~6 d 降解效果明显,平均降解率可达 58.5%,后期降解效果较为缓慢。中等程度降解有机质如半纤维素、纤维素在持续高温期降解率高。难生物降解部分主要集中在堆肥后期进行降解,总降解小于 10%。各有机质组分的降解速率满足一阶降解动力学模型($r^2 > 90\%$)。其中,易降解有机质组分降解速率常数、中等程度降解部分降解速率常数、难降解部分降解速率常数分别为 0.081 5~0.096 9 d⁻¹、0.038 4~0.053 6 d⁻¹、0.008 6~0.008 9 d⁻¹,易降解组分的速率常数约为中等程度降解部分的 2 倍,难降解部分的 10 倍。各组分的平均降解速率大小关系为:总糖 > 蛋白质 > 脂肪 > 半纤维素 > 纤维素 > 木质素。

关键词:城市污泥;堆肥;有机质;降解速率常数

中图分类号: S141.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)02-0348-04

近年来,国内外很多学者对堆肥中的有机质进行了研究,并提出不同的有机质分类方法^[1-2]。李国学等在充分考虑物料中的有机质被好氧微生物氧化分解难易程度的基础上将其分为 3 类:易降解、中等程度降解、难降解^[3]。Tremier 等根据有机质在降解过程中具体经历的途径将之分为 3 类:容易被降解有机质、可缓慢被降解有机质、难被降解或惰性有机质,分别用 MB、MH、MI 表示^[4]。Kaiser 在综合考虑生物质的分类及各类有机质被微生物降解特异性的基础上,将其分为 4 部分:糖类和淀粉类、纤维素、半纤维素、木质素^[5]。

20 世纪 80 年代以来,许多学者利用数学模型作为工具描述堆肥进程并成功实现了对堆肥过程的模拟,主要涉及到堆肥的质量与热量平衡过程、氧气-温度-水分的动态变化过程、有机质降解规律等 3 个方面,分别对应的是质量与热量平衡模型、氧气-温度-水分动态变化模型、有机质降解动力学模型^[6-7]。目前被学者们认可的有机质降解动力学模型主要有 3 类:一阶降解动力学模型、莫诺方程模型(Monod)、经验公式总结模型。一阶降解动力学模型、莫诺方程模型具有良好的理论基础,能反映有机质降解机理,在模拟效果、应用范围上均要优于经验公式模型。与 Monod 模型相比,一阶模型中的参数变量少,模型求解过程也更简单,已逐渐成为堆肥

过程中有机质生物降解的研究趋势。本研究在智能化仓式好氧堆肥装置中利用氧气-温度联合反馈通风的自动控制方法,分析连续控制工艺下不同通风量堆体的有机质组分降解规律,确定污泥堆肥中各有机组分的降解速率常数,旨在为实现城市污泥堆肥资源化利用提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

污泥来源于广西壮族自治区桂林市七里店污水处理厂经过脱水处理后的污泥,锯末来自桂林市雁山区良丰农场。本试验采用的原料主要是城市污泥,受桂林多雨季节的影响,含水率较高,且污泥质地细软、透气性较差,为了保证微生物降解有机质所需要的氧气,采用锯末作为调理剂,以增大堆体的孔隙度,便于空气流通。锯末的 C/N 较高,可以用来调节堆体的 C/N。

1.2 反应装置

本试验装置示意图如图 1 所示,发酵仓主要由筛板、内仓、外仓、反应器盖、通风装置、排水装置构成。发酵仓本体为 PVC 双层圆柱体,在内外两层侧壁之间靠热气流形成保温层,利用堆体自身散发的热量对空气进行传热,反作用于堆体进行保温,相较外部水温浴加热方式能耗更低。发酵仓外形尺寸为: $\Phi \times H = 800 \text{ mm} \times 1\,300 \text{ mm}$,有效容积为: $\Phi \times H = 600 \text{ mm} \times 1\,100 \text{ mm}$ 。发酵仓底部从上至下依次设置风流缓冲区、92°“V”形折板、有孔盖板,可使堆体通风趋向均匀化。在风流缓冲区内设有通风管 1 套,外仓底部设置排水管 1 套和 20 L 耐酸碱处理槽,用 5 m 有机玻璃制处理槽,内仓顶部设置通风管 1 套。反应器顶部设有 5 个插孔,供监测系统探测温度、氧气。发酵仓配制 0~50 L/min 气泵 1 套,气泵通过通风连接管与仓体底部的通风口连接,通风连接管上从靠近气泵处依次设置电磁阀、电磁流量计。

收稿日期:2015-01-15

基金项目:国家自然科学基金(编号:41161075);广西“八桂学者”建设工程专项;广西壮族自治区自然科学基金重大项目(编号:2013GXNSFEA053002);广西壮族自治区自然科学基金(编号:2014GXNSFBA118210)。

作者简介:张 军(1983—),男,湖北荆州人,博士,讲师,研究方向为有机固体废弃物资源化利用。E-mail:zhangjuny@gmail.com。

通信作者:王敦球,博士,教授,主要从事水污染控制与资源化利用研究。E-mail:wangdunqiu@sohu.com。

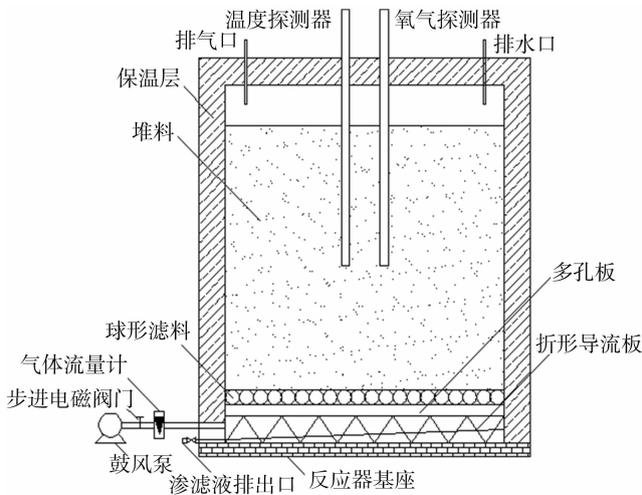


图1 好氧堆肥装置示意图

实时在线监测设备包括温度探头 (Pt100)、氧气监测仪。温度放置在堆体底部 450 mm 即堆体中心处。氧气监测仪量程为 0 ~ 25%，精度为 $\pm 3\%$ FS，与温度探头放置地点一致，气体质量流量计 (美国矽翔 FS4008) 量程为 0 ~ 25 NL/min。

表1 堆肥物料有机物组成

原料	易降解 (% , m/m)			中度降解 (% , m/m)		难降解 (% , m/m)	有机物总量 (% , m/m)	灰分 (% , m/m)
	总糖	脂肪	蛋白质	纤维素	半纤维素	木质素		
锯末	1.20	0.70	1.90	45.10	21.70	25.40	96.00	4.00
城市污泥	6.32	13.60	17.24	1.57	2.52	21.75	63.00	37.00
混合堆体	5.30	11.02	14.17	10.28	6.35	22.48	69.60	30.40

表2 通风量的设置

流量代号	参数条件	通风量 (L/h)	
		1号罐	2号罐
q_1	$t > t_a$ 30 °C < T ≤ 50 °C $O_2 < 10\%$	480	480
q_2	$t > t_a$ 30 °C < T ≤ 50 °C $O_2 > 10\%$	180	400
q_3	$t < t_b$ T ≤ 55 °C	120	240
q_4	$t < t_b$ 55 °C < T ≤ 60 °C	180	240
q_5	$t < t_b$ T > 60 °C	300	360
q_6	$t < t_c$	300	360

1.4 方法

在连续式自动控制工艺下的 1 号、2 号反应器中应用五点取样法，隔天从发酵罐上部预留的取样孔进行取样，测定堆肥样品中总糖、脂肪、蛋白质、纤维素、半纤维素、木质素含量，测定方法见表 3。

表3 堆肥样品各指标测定方法

序号	检测指标	方法
1	总糖	3,5-二硝基水杨酸法 ^[8]
2	脂肪	索氏抽提法
3	蛋白质	凯氏定氮法
4	纤维素	van Soest (范氏法) ^[9]
5	半纤维素	van Soest (范氏法) ^[9]
6	木质素	van Soest (范氏法) ^[9]

2 结果与分析

2.1 温度动态变化

由图 2 可知，堆体 1 第 3 天温度达 50 °C，堆体 2 温度较

通过温度 - 时间分阶段反馈控制策略控制鼓风机泵的启停。

1.3 试验设置

将混合物料按城市污泥：锯末为 4：1 (质量比) 充分混合，分别装入 2 组平行设置的 250 L 发酵罐。在发酵罐底部从上至下依次铺设直径为 50 mm 的球形悬浮滤料、沙网，确保通风布气均匀，减小因堆体水分下渗对通风造成的不利影响。1 号罐、2 号罐均采用连续式自动控制工艺，将堆肥进程分为 4 个时期：准备期、快速升温期、高温持续期、物料脱水期。在不同控制模式下，对通风量及通风时间采取不同的控制策略，相应设置不同的堆肥控制参数。设置 4 个温度控制点 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ，分别为 30、50、55、60 °C。设置 3 个时间主控点 t_a 、 t_b 、 t_c ，分别为 1、8、3 d。设置 6 个时间分控点 t_{4a} 、 t_{5a} 、 t_{6a} 、 t_{7a} 、 t_{8b} 、 t_{8b} ，均为 30 min，即堆肥处于快速升温期、高温持续期、物料脱水期时，鼓风机连续工作 1 个周期的时间相同，但通风量有所差异。整个堆肥过程设定 6 个不同的通风流量： q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 、 q_6 。设定 O_{21} (氧气含量) 控制值为 10%， O_2 为氧气在氧气泵工作时的实测值。堆体中氧气的采集周期和采集时间是处于自动运行时氧气泵的工作时间，具体为每 5 min 采集 1 次 (表 1、表 2)。

低，这可能是由于堆体 2 通风量较大、热量散失较多，同时也表明堆肥初期，通风量较小堆体温度上升越快^[10]。研究表明，堆体温度持续 5 ~ 7 d 50 °C 可以杀灭杂草种子、病原菌，达到无害化目标^[11]。堆体 1 可以达到高温好氧堆肥效果。

2.2 有机质组分的降解特征

由图 3、图 4 可知，堆肥结束时 2 个反应器中的总糖、脂肪、蛋白质成分降解效果显著，均超过 50%，且主要集中在快速升温期及高温持续期的前期，高温后期和物料脱水期时停止降解。研究表明，堆肥过程中有机质降解主要发生在堆肥前 6 d 以内^[12]。糖类的分解产生热量使堆体温度升高，嗜温类微生物活性受到抑制，堆肥后期纤维素、半纤维素分解会产生糖类，导致堆体中总糖含量相对上升，对降解率产生一定干扰。陈活虎等研究发现，堆肥中后期参与脂肪、蛋白质降解的酶类活性下降^[8]。比较 1 号、2 号罐中易生物降解有机质的最终降解率发现，在满足细菌、真菌等嗜中温类微生物正常需氧条件下，加大通风量对总糖的降解效果不大；当温度大于 50 °C 时，增大通风量时脂肪、蛋白质降解率明显上升，至堆肥结束时，高通风量下的脂肪、蛋白质总降解率相较于低通风量下分别高 13%、16%，这可能是由于通风降温的作用对嗜中温菌类微生物的抑制作用减弱，导致脂肪、蛋白质降解率仍然保持相对较高的水平。堆肥第 4 天，纤维素、半纤维素平均降解率分别为 10.5%、14.5%。第 4 天至第 8 天，纤维素、半纤维素降解速率持续上升，第 8 天结束时，纤维素、半纤维素平均降解率分别为 29.0%、36.5%。第 8 天至堆肥结束，降解速率上升幅度不明显，堆肥结束时平均降解率分别为 39.5%、43.5%。研究表明，半纤维素的降解率大于纤维素降

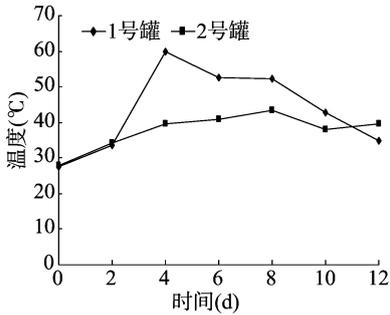


图2 不同时间堆体的温度变化

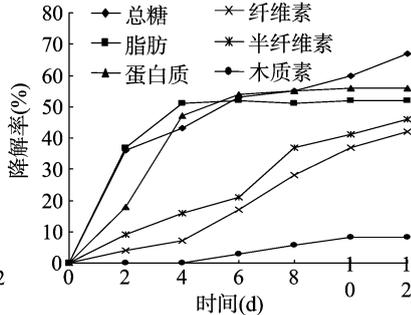


图3 1号堆体各有机质组分的降解率

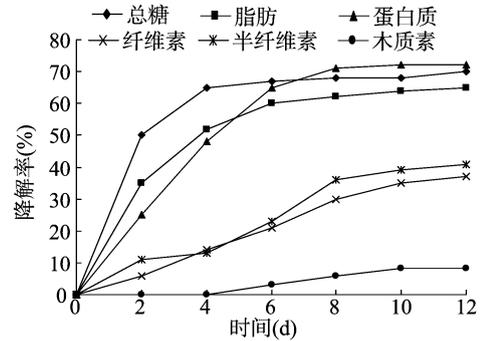


图4 2号堆体各有机质组分的降解率

解率^[13]。纤维素、半纤维素降解主要依靠放线菌作用,前期降解较快,进入物料脱水期,因有机质大部分被降解,放线菌增殖速率减缓,导致降解率没有明显变化。1号罐通风量较小,纤维素、半纤维素最终降解率均比2号罐高5%,可能由于较小的风量所带走的堆肥热量较少,使得1号罐维持了较长时间的高温。2个反应器中的半纤维素的最终降解率均比纤维素高。有学者认为,木质素对纤维素有束缚包裹作用,从而阻碍了纤维素酶吸附纤维素分子,因此纤维素降解较半纤维素困难^[14-15]。

堆肥前4 d,2个反应器内木质素没有发生生物降解,第4天至第9天,降解速率上升较快,但降解率并不高,在物料脱水期基本不发生降解。与总糖、脂肪、蛋白质等相比,木质素降解率明显偏低,且降解速度缓慢。研究表明,木质素是生物降解中最难进行的一部分,主要源于木质素的化学结构和参与木质素生物降解微生物的特性及堆体温度共同作用的结果^[14-16]。木质素结构稳定,不易发生水解反应,因此其生物降解比其他有机质组分的降解更为困难,导致其在堆肥初期降解速度缓慢。在堆肥持续高温期,温度适合分解木质素真菌(如白腐菌等)、细菌,降解速率上升。堆肥后期,放线菌在一定程度上可提高木质素在水中的溶解效果,木质素降解速率加快。堆肥至物料脱水期,脱水、降温以使堆体快速腐熟,无法维持持续高温状态,因此降解趋于静止。

2.3 堆肥有机质组分降解动力学

研究表明,固体废弃物在好氧发酵过程中有机质的降解满足一阶反应动力学^[17-18]。本试验假设有机质的各组分降解也符合一阶反应动力学方程:

$$\frac{dC_x}{dt} = -k_d \times C_x \quad (1)$$

式中: C_x 表示有机质组分中总糖、脂肪、蛋白质、半纤维素、纤维素、木质素浓度,以g/g VS计; k_d 表示不同有机质组分所对应的反应速率常数。当 $t=0$ 时, $C_x=C$,即有机质各组分的浓度等于它们的初始浓度。从而得到:

$$\ln\left(\frac{C}{C_t}\right) = k_d \times t \quad (2)$$

式中: C_t 表示 t 时刻各有机质组分各自对应的浓度。

将1号、2号反应器中的试验数据依照一阶降解动力学模型,利用Excel软件对各有机质组分的生物降解过程进行动力学参数拟合,如图5至图8所示,它们的线性关系显著,可以建立线性模型。

由表4可知,易降解有机质组分降解速率常数、中等程度

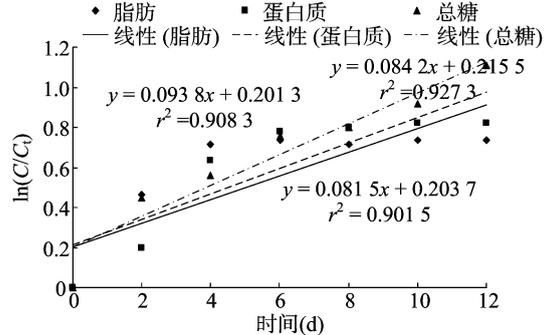


图5 堆体1中总糖、蛋白质、脂肪的反应速率常数

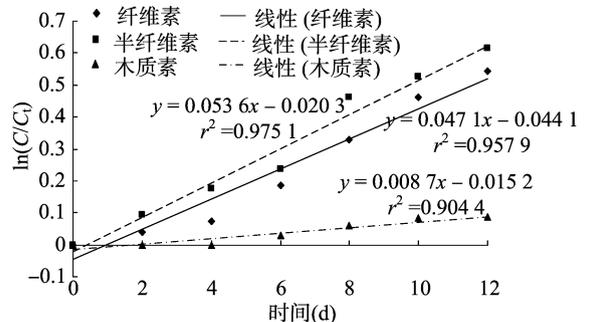


图6 堆体1中半纤维素、纤维素、木质素的反应速率常数

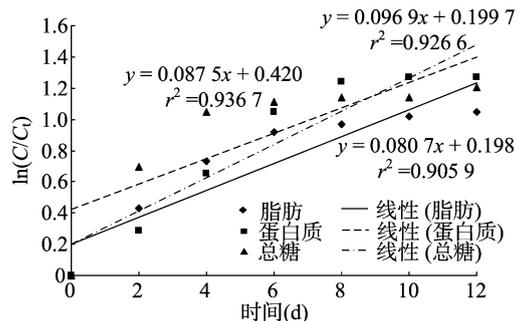


图7 堆体2中总糖、蛋白质、脂肪的反应速率常数

降解部分降解速率常数、难降解部分降解速率常数分别为 $0.0815 \sim 0.0969 \text{ d}^{-1}$ 、 $0.0384 \sim 0.0536 \text{ d}^{-1}$ 、 $0.0086 \sim 0.0089 \text{ d}^{-1}$,这与有些研究得出的最大降解速率常数 0.1051 d^{-1} 结论有所差异,这可能是由于物料配比存在差异^[19-22]。易降解组分的速率常数约为中等程度降解部分的2倍,约为难降解部分的10倍,各组分平均降解速率大小关系为:总糖>蛋白质>脂肪>半纤维素>纤维素>木质素。各有机质组分的

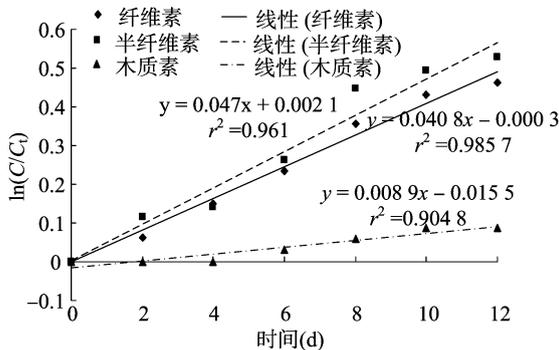


图8 堆肥2中半纤维素、纤维素、木质素的反应速率常数

平均降解速率不同,这可能是由于温度导致堆肥体系中微生物的主导群落发生明显更替,不同的微生物群落对相应有机质组分发挥降解作用^[13]。

表4 堆肥体系各有机质组分的一阶降解速率常数

有机质组分	一阶降解速率常数(d ⁻¹)		
	1号堆体	2号堆体	平均值
总糖	0.093 8	0.096 9	0.095 4
脂肪	0.081 5	0.080 7	0.081 1
蛋白质	0.084 2	0.087 5	0.085 9
半纤维素	0.053 6	0.045 8	0.049 7
纤维素	0.044 3	0.038 4	0.041 4
木质素	0.008 6	0.008 9	0.008 8

3 结论

本研究结果表明,城市污泥、锯末好氧堆肥过程中,总糖、脂肪、蛋白质为代表的易生物降解组分降解效果显著,其降解过程主要集中在快速升温期、高温持续期前期,堆肥6 d平均降解率可达58.5%,物料脱水期降解趋于停止。纤维素、半纤维素类中等程度降解有机质在前4 d降解效果不显著,平均降解率为10.5%、14.5%,4~8 d降解速率快速上升,堆肥后期降解速率上升幅度小。难降解有机质部分主要发生在堆肥中后期,其降解率较低,小于10%。堆肥过程中各有机质组分的降解满足一阶降解动力学模型,经拟合 $r^2 > 90\%$ 。易降解有机质组分降解速率常数、中等程度降解部分降解速率常数、难降解部分降解速率常数分别为 $0.081 5 \sim 0.096 9 \text{ d}^{-1}$ 、 $0.038 4 \sim 0.053 6 \text{ d}^{-1}$ 、 $0.008 6 \sim 0.008 9 \text{ d}^{-1}$,易降解组分的速率常数约为中等程度降解部分的2倍、难降解部分的10倍。各组分的平均降解速率大小关系为:总糖 > 蛋白质 > 脂肪 > 半纤维素 > 纤维素 > 木质素。

参考文献:

[1] Pietro M, Paola C. Thermal analysis for the evaluation of the organic matter evolution during municipal solid waste aerobic composting process[J]. *Thermochimica Acta*, 2004, 413(1/2): 209 - 214.

[2] Zhou L X, Wong J W. Effect of dissolved organic matter from sludge and sludge compost on soil copper sorption[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(3): 878 - 883.

[3] 李国学, 周立祥, 李彦明. 固体废弃物处理与资源化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.

[4] 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 the biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(2): 169 - 180.

[5] Kaiser J. Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach[J]. *Ecological Modelling*, 1996, 91(1/2/3): 25 - 37.

[6] Mason I G. Mathematical modelling of the composting process: a review[J]. *Waste Management*, 2006, 26(1): 3 - 21.

[7] Petric I, Selimbašić V. Development and validation of mathematical model for aerobic composting process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 139(2): 304 - 317.

[8] 陈活虎, 何晶晶, 邵立明, 等. 生物质分类表征蔬菜废物高温好氧降解特征及其动力学描述[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 802 - 806.

[9] 范鹏程, 田静, 黄静美, 等. 花生壳中纤维素和木质素含量的测定方法[J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2008, 10(5): 64 - 65, 67.

[10] 康军, 张增强. 污泥好氧堆肥不同阶段通风量研究[J]. *环境卫生工程*, 2009, 17(6): 5 - 8.

[11] 黄懿梅, 安韶山, 白红英, 等. 鸡粪与不同秸秆高温堆肥中氮素的变化特征[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(11): 53 - 58.

[12] 康军, 张增强, 贾程, 等. 污泥好氧堆肥过程中有机质含量的变化[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(6): 118 - 124.

[13] 张园, 耿春女, 何承文, 等. 堆肥过程中有机质和微生物群落的动态变化[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(11): 1745 - 1752.

[14] Doublet J, Francou C, Poitrenaud M, et al. Sewage sludge composting: influence of initial mixtures on organic matter evolution and N availability in the final composts[J]. *Waste Management*, 2010, 30(10): 1922 - 1930.

[15] 牛俊玲, 高军侠, 李彦明, 等. 堆肥过程中的微生物研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(6): 185 - 189.

[16] Francou C, Linères M, Derenne S, et al. Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(18): 8926 - 8934.

[17] Namkoong W, Hwang E Y, Park J S, et al. Bioremediation of diesel-contaminated soil with composting[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119(1): 23 - 31.

[18] 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.

[19] Haug R T. The practical handbook of compost engineering[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.

[20] Mohee R, White R K, Das K C. Simulation model for composting cellulosic (Bagasse) substrates[J]. *Compost Science & Utilization*, 1998, 6(2): 82 - 92.

[21] 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.

[22] 黄翠, 杨朝晖, 肖勇, 等. 堆肥嗜热纤维素分解菌的筛选鉴定及其强化堆肥研究[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(12): 2457 - 2463.