

doi: 10.11838/sfsc.20180322

城市污泥与稻草混合堆肥的最佳通风量优化研究

安玉亭¹, 贾媛媛¹, 薛丹丹¹, 俞晓鹏¹, 杨禹治¹, 原宝东^{2*}

(1. 江苏大丰麋鹿国家级自然保护区, 江苏 盐城 224136;

2. 商丘师范学院生物与食品学院, 河南 商丘 476000)

摘要:以城市污泥+稻草秸秆混合物为研究对象,运用好氧堆肥方法,研究不同通风量对污泥堆肥过程的影响,测定了堆肥过程中温度、含水率、有机质含量和种子发芽指数的变化规律,分析了堆肥过程中通风与未通风之间的差异性。结果表明:(1)通风能够有效保证堆料升温 and 维持高温期,温度高达 74.20℃,高温持续时间达到 6 d,温度上升速率达到 24.03℃/d。(2)通风条件下,含水率呈现先升高,后降低,然后趋于稳定的变化规律。(3)堆肥结束后,各处理有机质含量均达到国家标准。(4)通风能够显著影响种子发芽系数,各处理 GI 值的大小顺序为 3 号箱>2 号箱>1 号箱>4 号箱>5 号箱。当通风量为 1.00 m³/h,高温维持时间最长(6 d),种子发芽指数最高(84.25%),堆肥效果最理想。

关键词:堆肥;通风;城市污泥;优化

中图分类号: S141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257(2018)03-0144-05

近年来,我国城镇污水处理产业发展迅速,由住建部发布通报显示,全国城镇污水处理能力已达 1.57 亿 m³/d^[1]。污水处理量的增加导致污泥量也在迅速增多,已经达到 246 万 m³/y^[2],其处置问题亟待解决。由于污泥中含有大量植物生长所需的 N、P 和有机质等物质,因此堆肥化处理是污泥减量化的最好途径^[3]。在污泥堆肥的过程中,通风是必备条件,通风量的大小直接影响发酵的进程和污泥肥料的品质。其特点主要表现为:通风量不足,不能满足堆肥耗氧的需求,出现厌氧发酵,延缓堆肥进程;通风量过大,热量散失过快,影响堆体升温,进而影响堆肥的无害化程度^[4]。国内已有部分学者对污泥堆肥通风量作了相关研究^[5-7],但研究结果差异较大,难以指导实践应用。

本研究以稻草秸秆为调理剂,在不同通风量的控制条件下,研究堆肥发酵过程中各腐熟指标变化规律,分析通风与未通风之间的差异性,通过优化

堆肥通风方案,实现提高堆肥效率和保证堆肥质量双重目的。

1 材料与方法

1.1 堆肥装置

堆肥箱由 PVC 板和保温泡沫箱制成(图 1),箱体内部尺寸为 50 cm×50 cm,高 50 cm,箱体底部安放一个高度为 5 cm 的 PVC 筛孔板,筛孔直径为 10 mm,箱体内部实际体积为 0.1 m³。进行试验时,装置底部垫厚塑料布,密封,保留进风口,以小型鼓风机供气,通风时间由时间继电器控制。

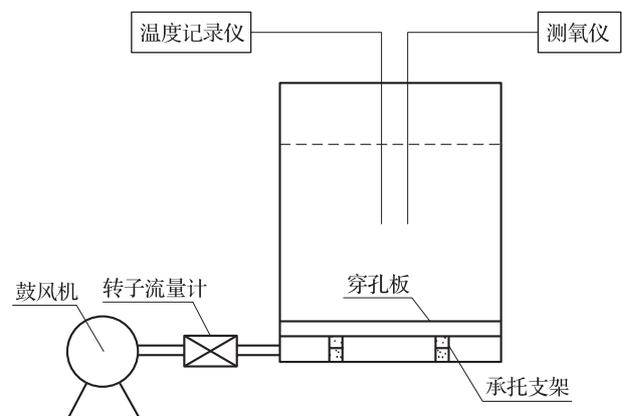


图 1 堆肥箱构造图

1.2 试验材料

以污泥为堆肥的基本材料,农作物秸秆为堆肥

收稿日期: 2017-08-11; 最后修订日期: 2017-09-27

基金项目: 江苏林业三新工程项目: LYSX2016 [41]; 江苏省博士后科研资助计划项目(1601112C); 河南省科技攻关计划项目(172102310443); 河南省自然科学基金项目(182300410071)。

作者简介: 安玉亭(1986-),男,江苏盐城人,硕士,工程师,主要从事固体废物资源化利用研究工作。E-mail: lanjingling200@163.com。

通讯作者: 原宝东, E-mail: yuanbao365@163.com。

调理剂。污泥取自盐城市城南污水处理厂；农作物秸秆来源于盐城近郊农村，农田废弃的稻秆经粉碎机进

行粉碎、研磨。堆肥箱堆料重约 40 kg，其中污泥 30 kg，稻草秸秆 10 kg。堆肥原料的基本性质见表 1。

表 1 堆肥物料特性

试验材料	pH 值	含水率 (%)	TOC (%)	TN (mg/g)	C/N
城市污泥	6.2~6.7	83.7~86.3	21.6~24.5	14.4~15.3	14.8~16.8
稻草秸秆	—	10.8~12.5	84.3~85.7	3.8~4.2	94.2~95.6
混合堆料	6.8~7.2	63.6~67.2	30.2~32.1	11.2~12.8	23.4~27.5

1.3 试验设计

试验分 5 个处理进行，1、2、3、4 号箱为试验组，5 号箱为对照组，通风量分别设置为 0.25、0.50、1.00、1.50 m³/h 和不鼓风，每个处理 3 个重复，取 3 个重复的平均值作为每个处理最后的结果。采用时间继电器控制离心风机（设定风机开 20 min，关 40 min），对堆体进行间歇通风供氧。

试验过程中，利用温度记录仪每半小时自动记录堆体温度，将温度传感器插入表层以下 15 cm 处，实时测量堆体温度，同时记录室内温度。在堆肥发酵过程中，每 2 d 取一次样，发酵期定为第 1~16 d。采样时间定在每天 9:00，采样点为堆肥温度控制点附近范围，每次均在表层以下 15 cm 处，每次采样约 300 g。新鲜样品保存在 4℃ 冰箱内，24 h 内分析完毕；剩余的平铺于小铝盒中在烘箱中烘干后磨细备用。

1.4 检测方法

分别检测堆肥过程中混合堆料的堆体温度、堆料水分、有机质含量、pH 值和种子发芽指数等指标，方法分别为：温度采用 RC-30B 温度记录仪进行测定；pH 值采用梅特勒-托利多精密 pH 计测定；重铬酸钾法测定堆肥有机质含量；种子发芽系数采用灵敏度高、发芽时间短的阳春白菜种子进行发芽试验。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2007 程序进行数据整理，SPSS 21.0 统计分析软件对试验数据进行分析。对各指标变量做 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验，对于不符合正态分布的数据，采用非参数统计学 Mann-Whitney U 检验方法进行检验。

2 结果与分析

2.1 通风与未通风堆料表观形态

从外观上看，堆肥过程中 2、3、4 号箱堆料风

干样品颜色逐渐变深，堆肥结束之后堆料呈深褐色，且疏松易于破碎，取样时可见堆体内出现大量白色或灰白色的菌丝，堆料原来具有的恶臭气味，经 16 d 发酵后消失，说明堆肥已经发酵腐熟。然而 1、5 号箱堆料颜色逐渐发黑，且臭味加重，吸引较多蚊蝇等，这主要是由于堆肥中氧气含量较低，出现厌氧发酵。

2.2 通风量对堆体温度的影响

不同通风量条件下，堆体和室温的变化见图 2。试验过程中温度的变化经历了 4 个时期：升温期、高温期、降温期和稳定期。堆肥初期，堆料中易分解的有机质在微生物的作用下迅速分解，堆体产生大量的热量导致温度快速上升，1、2、3 号箱在堆肥初期堆体温度上升明显，第 3 d 达到最高温度分别为 61.03、74.20、63.13℃，温度上升速率分别为 20.51、24.03、22.43℃/d，4、5 号箱分别在堆肥第 4、6 d 达到最高温度 55.70、45.30℃，升温速率分别为 13.81、7.55℃/d。2 号箱堆体的温度最高达到 74.20℃，当温度超过 70℃ 时，高温将会杀死堆料中有益微生物，导致堆肥速率变小，腐熟过程变慢。3 号箱在堆肥第 2 d 进入高温期 (>50℃)，持续 6 d，并且比 1 号箱持续时间更长，

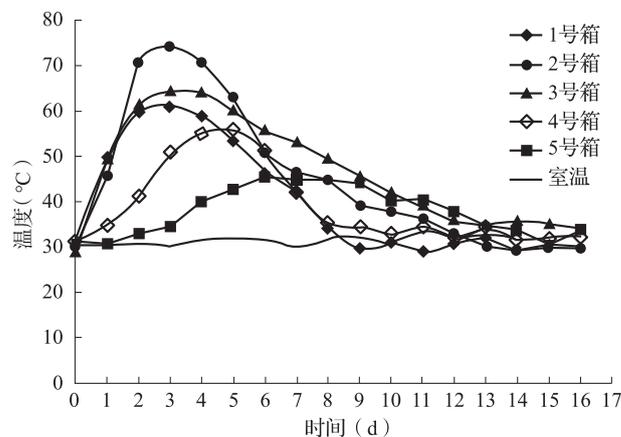


图 2 通风量对堆肥过程中堆体温度的影响

因此3号箱的通风量能满足堆肥发酵对氧气的需
求。4号箱通风量过大,导致大量热量散失,升温
效果较3号箱差。5号箱堆温上升缓慢并达不到进
入高温期的温度,在堆肥过程中,堆料臭味很重,
堆料颜色变黑,表明在堆肥过程中出现厌氧现象,
不利于堆肥的后期腐熟。

由表2可看出,通风与未通风相比,各处理的
温度存在差异,说明通风是影响温度变化的重要条
件。其中当通风量为 $1.00\text{ m}^3/\text{h}$ 时,差异性达到显著
水平($Z = -2.222, P = 0.026$);当通风量为 0.50
 m^3/h 时,差异性达到极显著水平($Z = -0.706,$
 $P = 0.009$)。

表2 通风与未通风堆肥的差异性分析

	1号箱		2号箱		3号箱		4号箱	
	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P
温度变化	-0.500	0.634	-0.706	0.009	-2.222	0.026	-0.052	0.973
含水率	-1.545	0.136	-1.898	0.043	-0.836	0.006	-1.722	0.094
有机质降质量分数	-1.367	0.160	-0.963	0.334	-1.155	0.343	-1.142	0.200
种子发芽率	-0.309	0.037	-0.039	0.006	-1.325	0.005	-0.839	0.048

注: $P < 0.05$ 表示达显著水平, $P < 0.01$ 表示达极显著水平, Z 为统计量。

2.3 通风量对堆料水分含量的影响

含水率是堆肥腐熟程度判定的重要指标,由于
微生物只能摄取水溶性养料,所以含水率直接影响
微生物的生长繁殖状况。有研究表明,堆料含水率
在 $60\% \sim 65\%$ 时有利于微生物的代谢活动^[8]。本试
验中,各堆体的初始含水率均为 64.65% 。由图3
可以看出,1、2、3、4号箱的含水率变化均呈现先
升高后降低的趋势,含水率升高的原因主要是由于
有机物的好氧分解,产生大量水分。随着堆肥的进
行,2、3号箱的含水量因蒸发而很快下降,尤其是
高温期水分含量下降更为迅速,高温结束时堆肥的
含水率分别为 46.51% 、 43.89% 。1号箱和4号箱
水分含量的下降趋势没有3号箱明显。5号箱由

于是厌氧发酵,水分散失最缓慢,导致堆肥前后含
水率差异最小。3号箱堆肥过程中水分散失量最多,
是通风引起的堆料高温蒸发和合适通风带走水分两
者共同作用。堆肥结束后,各堆体的含水率从大到
小顺序依次为5、1、4、2、3号箱。

由表2可知,通风与未通风相比,各处理的含
水率存在差异,说明通风对含水率的变化起到一定
的影响作用。通风能够保证堆体氧气充足,微生物
活性较高,消耗堆肥期间产生的水分,对堆肥原料
含水率的下降起到促进作用。其中当通风量为 0.50
 m^3/h 时,差异性达到显著水平($Z = -1.898, P =$
 0.043);当通风量为 $1.00\text{ m}^3/\text{h}$ 时,差异性达到极
显著水平($Z = -0.836, P = 0.006$)。

2.4 通风量对堆肥有机质含量的影响

有机质是微生物赖以生存和繁殖的基本条件,
有机质的变化能够很好地反映出堆肥的进程,可以
用来判断堆肥的腐熟度^[8]。由图4可见,堆料有机
质含量随堆肥过程的进行,在微生物的分解作用
下,堆料中的有机质含量呈逐渐下降的趋势,3号
箱堆料中有机质的含量降低变化最大,从初始值
 49.12% 降至 34.54% ,下降幅度为 14.58% 。1、2、
4号箱有机质含量下降幅度接近,分别下降
 10.14% 、 11.70% 、 11.09% 。5号箱的下降幅度最
低,仅为 4.65% 。堆肥结束后,1、2、3、4、5号
箱有机质含量分别为 38.25% 、 36.65% 、 34.54% 、
 36.43% 、 43.93% ,各处理有机质下降幅度从大到
小顺序依次为3、2、4、1、5号箱。

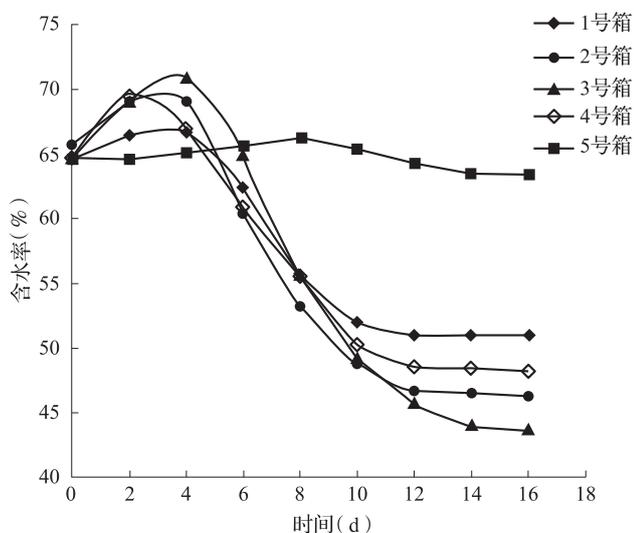


图3 通风量对堆肥过程中堆料含水率的影响

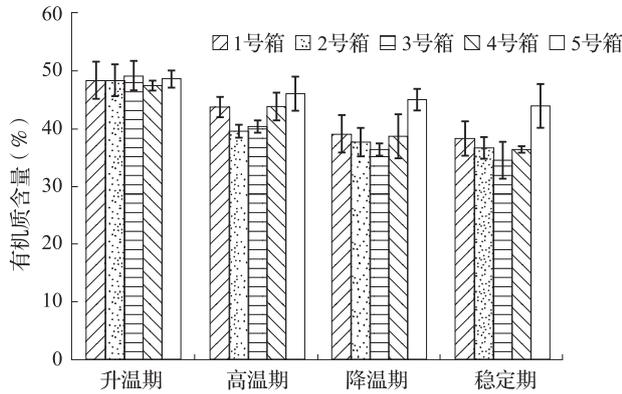


图4 通风量对堆肥过程中堆料有机质含量的影响

由表2可看出,通风与未通风相比,堆体有机质含量存在差异,但未达到显著水平。在升温期,由于2号箱温度上升最快,微生物活性较高,故有机质含量下降速率最快,随后由于温度过高(>70℃),导致微生物的活性降低甚至死亡,发酵微生物数量锐减,故下降速率变慢;3号箱温度及含水率条件都适合微生物的繁殖活动,因此堆体中大量有机质不断被分解,所以3号箱堆料的有机质含量减少最多。根据国家有机肥料标准^[9]可知,各处理堆肥结束后,有机质含量均达标。

2.5 不同通风量的堆肥对种子发芽系数(GI)的影响

种子发芽率是反映堆肥产品植物毒性和腐熟度的重要指标,当种子发芽指数大于50%时,表明堆肥产品基本无毒性或者基本达到腐熟,当GI达到80%~85%时,表明堆肥没有植物毒性或者已经腐熟^[10-11]。

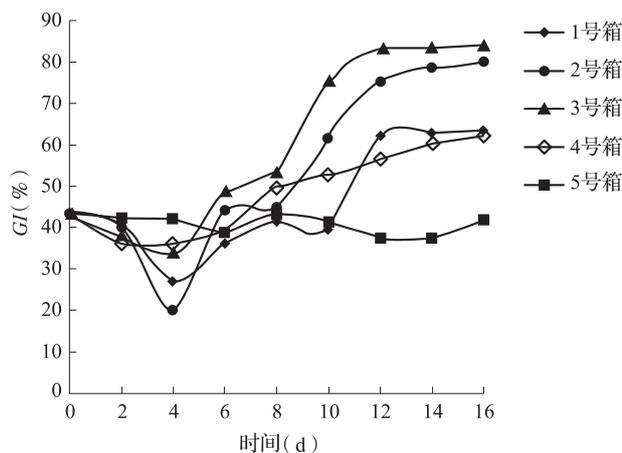


图5 不同通风量对堆肥过程中GI变化的影响

5种通风状态下GI的变化如图5,都经历了先下降后逐渐上升的过程。在堆肥的第2~10d,GI值出现波动性较大,不稳定,但总体呈上升趋势。在堆肥结束时,1、2、3、4、5号箱堆肥的GI值分

别达到63.34%、80.12%、84.25%、62.10%、45.63%。其中1、4号箱堆肥的GI值分别于第12、10d达到50%以上,堆肥结后GI值未达到80%,表明堆肥已基本腐熟;2、3号箱堆肥的GI值分别于第14、12d达到80%以上,表明堆肥已完全腐熟;5号箱GI值未达到50%,表明厌氧状态下堆肥不能发酵腐熟。各处理GI值从大到小顺序依次为3、2、1、4、5号箱。

由表2可看出,通风与未通风相比,各处理的GI值存在差异,且差异都在显著水平以上,说明通风对种子发芽率的影响起关键作用。其中当通风量为0.25和1.50 m³/h,差异性达到显著水平(P<0.05);当通风量为0.50和1.00 m³/h时,差异性达到极显著水平(P<0.01)。

3 讨论与结论

通风是导致温度发生变化的重要因素。Lau等^[12]认为堆料中有机物质被微生物快速分解导致堆料内部温度上升,温度变化能够反映堆体内部微生物活性的变化。周文兵等^[13]研究堆体温度升高是微生物代谢产热累积的结果。笔者研究结果表明:堆肥初期,堆体温度迅速上升,这是由于氧气增加使得微生物大量繁殖代谢,堆体迅速发酵产生热量;堆肥后期,堆体温度逐渐降至室温,微生物代谢活动减少,说明发酵过程已经完成,堆肥达到腐熟状态,这与以上的研究结果相一致。在通风量为1.00 m³/h时,堆体的高温期(>50℃)达到6d,在此环境下能够有效杀灭堆料所含致病微生物和害虫卵,保证堆肥卫生指标合格。

含水率是堆肥工艺的一个重要控制参数,直接影响着微生物的活性。Liang等^[14]研究表明,含水率是影响微生物活性的主要因素,并且可以通过调控含水率来提高微生物的活性。魏源送等^[15]认为堆料的初始含水率不宜超过80%。笔者研究结果表明:通风使得堆料含水率呈现先升高后降低的趋势,这可能是堆肥初期微生物迅速繁殖,有机质大量分解,产生大量水分,水分富集无法迅速排出,导致含水率上升;随着堆肥进入高温期,温度持续上升,水分散失加快,最终导致含水率下降。通风条件下含水率发生变化,一方面是有有机物氧化分解产生水分,含水率升高;另一方面是通风使得水分散失,含水率降低,因此含水率的调控是两者共同作用的结果^[16]。

有机质和种子发芽指数是判断有机肥特征的重要参数。张宗国等^[17]认为污泥中的有机质分解后形成的速效养分更利于植物吸收。丁文川等^[18]认为堆肥过程中温度的变化引起微生物活性的变化,进而影响有机物的降解。本研究结果表明:堆肥前期,微生物将大量易降解的有机物迅速降解,有机质下降速率较快;堆肥后期,部分复杂的有机物难以被微生物降解,下降速率减缓,有机质含量趋于稳定,这与李兵等^[19]的研究结果相一致。通风条件下污泥好氧堆肥能够消除肥料的植物毒性,显著提高种子发芽指数;但不同植物对植物毒性的承受能力和适应性有差异,因此污泥肥料应针对不同的用途做相应的毒理评价。

综上所述,以稻草秸秆为调理剂,当物料含水率为64.65%,体积为0.1 m³时,1.00 m³/h的通风量最适合污泥好氧堆肥发酵,可以达到节约能源和提高堆肥质量的双重目的。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于全国城镇污水处理设施2014年第四季度建设和运行情况的通报[R]. 建城函[2015]29号, 2015.
- [2] 张韵. 我国污泥处理处置的规划研究[J]. 给水排水动态, 2010, 4: 18-19.
- [3] 李萍萍, 薛彬, 孙德智. 施用城市污泥堆肥对土壤理化性质及白三叶生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 127-131.
- [4] 徐红, 樊耀波, 贾智萍, 等. 时间温度联合控制的强制通风污泥堆肥技术[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 51-55.
- [5] 张华, 吕德龙, 朱冬梅. 两种污泥堆肥通风控制方式对比研究[J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27(1): 75-79.
- [6] 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.
- [7] 魏源送, 李承强, 樊耀波, 等. 不同通风方式对污泥堆肥的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 54-59.
- [8] 许效天, 杨跃伟, 孟俊峰, 等. 城市污水污泥堆肥控制因素和腐熟度评价[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(10): 191-194.
- [9] 陈隆隆, 潘振玉. 复混肥料和功能性肥料分析测试与标准[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [10] 陈祥, 易吉林, 包兵, 等. 园林植物废弃物堆肥的理化性状及参数研究[J]. 北方园艺, 2010, (12): 225-228.
- [11] Cunha - Queda A C, Ribeiro H M, Ramos A, et al. Study of biochemical and microbiological parameters during composting of pine and eucalyptus bark [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(17): 3213-3220.
- [12] Lau A K, Lo K V, Liao O P H, et al. Aeration experiments for swine waste composting [J]. Bioresource Technology, 1992, 41: 145-152.
- [13] 周文兵, 刘大会, 朱端卫. 不同调理剂对猪粪堆肥过程及其养分状况的影响[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(4): 421-425.
- [14] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic activity of a bio - solids composting blend [J]. Bioresource Technology, 2003, 86: 131-137.
- [15] 魏源送, 李承强, 樊耀波, 等. 环境温度对污泥堆肥过程的影响[J]. 环境污染治理技术与设备, 2000, 1(6): 45-52.
- [16] 贾程, 张增强, 张永涛. 污泥堆肥过程中氮素形态的变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11): 2269-2276.
- [17] 张宗国, 吴永丽, 何梦玲, 等. 城市污水处理厂污泥的土地利用[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2004, 25(2): 78-81.
- [18] 丁文川, 郝以琼, 李宏. 污泥堆肥温度对微生物降解有机质的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 1999, 21(6): 20-23.
- [19] 李兵, 王英, 董志颖. 餐厨垃圾与水葫芦联合好氧堆肥生物质组分分类表征[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2531-2538.

The research of optimal ventilation for urban sewage sludge with rice straw composting

AN Yu-ting¹, JIA Yuan-yuan¹, XUE Dan-dan¹, YU Xiao-peng¹, YANG Yu-zhi¹, YUAN Bao-dong^{2*}

(1. Jiangsu Dafeng Milu National Nature Reserve, Jiangsu Yancheng 224136; 2. College of Biology and Food, Henan Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000)

Abstract: The effects of different aeration rates on sludge composting process were studied to compost urban sewage sludge with rice straw. Variations of the main composting factors including temperature, water content, organic matters, seed germination index were determined. The difference between ventilation and non-ventilation in the composting process were analyzed. Our results indicated that: (1) Proper ventilation increased the temperature, the maximum temperature was 74.20°C, the high-temperature duration was prolonged to 6 days, and the rising rate of temperature reached 24.03°C/d. (2) The water content was increased firstly, then decreased and trended to be stable. (3) At the end of composting, the organic content of 5 treatments reached the national standards. (4) Ventilation effected the seed germination index (GI), The orders of GI was treatment 3 > treatment 2 > treatment 1 > treatment 4 > treatment 5. In addition, when the aeration flow-rate was 1.00 m³/h, the longest high-temperature stage (6 d) and the biggest GI (84.25%) were able to be achieved.

Key words: composting; aeration; urban sewage sludge; optimization