

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.18151

城市污泥与稻草混合堆肥氧气消耗的通风量优化研究

安玉亭¹, 刘彬¹, 薛丹丹¹, 王立波¹, 贾媛媛¹, 吴永波^{2*}, 原宝东³

(1. 江苏大丰麋鹿国家级自然保护区, 江苏 盐城 224136; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037; 3. 商丘师范学院生物与食品学院, 河南 商丘 476000)

摘要: 对城市污泥和稻草秸秆混合物料进行好氧堆肥试验, 研究不同通风量堆肥过程氧气浓度的变化特征和差异性, 分析了耗氧速率与温度和含水率之间的相关性。结果表明: (1) 温度的变化经历 4 个时期: 升温期、高温期、降温期和稳定期, 最高温度达到 74.20 ℃; 含水率先升高, 后降低, 然后趋于稳定; (2) 不同时期氧气浓度逐渐下降, 高温期下降最明显; (3) 氧气浓度在高温期与稳定期之间差异性达到极显著水平 ($P < 0.01$); (4) 各处理耗氧速率最大值的大小顺序为: 3 号箱 > 2 号箱 > 1 号箱 > 4 号箱, 耗氧速率下降为 0.11%/min, 可以作为堆肥的腐熟评价指标, 3 号箱耗氧速率和温度与含水率的相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$)。当通风量为 1.00 m³/h 时, 堆肥历时共 16 d, 高温期最长 (6 d), 氧气浓度超过 17%, 耗氧速率最大 (0.75%/min), 最适合污泥好氧堆肥发酵。

关键词: 城市污泥; 好氧堆肥; 通风; 氧气浓度; 耗氧速率

随着我国城市化进程的加快, 城镇污泥产量也在不断增加。据调查, 2016 年我国城镇生活污泥产量为 3.95×10^7 t, 预计 2020 年末污泥产量将超过 4.6×10^7 t。与污泥产量连续递增趋势相背, 我国污泥无害化处理率依然低下, 大量污水厂采取简单填埋处置, 甚至直接倾倒排放, 造成了严重的二次污染, 污泥的处理问题愈加突出。由于污泥中含有大量 N、P 和有机质, 因此污泥减量化的最好途径是好氧堆肥处理^[1]。在好氧堆肥过程中, 氧气供给和消耗对微生物的活性、堆体温度、有机物的降解速率有重要影响^[2-3], 能够决定污泥堆肥发酵的进程和肥料的质量^[4]。国内外已有学者对温度、水分和氧气含量的变化特征进行研究^[5-6], 研究结果阐明了氧气含量的变化规律, 但对堆肥过程中氧气浓度与耗氧速率的变化和其他堆肥因子之间内在联系的研究鲜有报道。

本研究以稻草秸秆作为调理剂, 在不同通风量

控制条件下, 研究污泥好氧堆肥过程中温度、含水率的变化特征, 探讨不同时期氧气浓度变化特征和差异性, 分析好氧速率和温度与含水率之间的关系, 以为优化通风策略, 提高堆肥效率提供科学依据。

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 45 cm × 40 cm, 高 47 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。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。

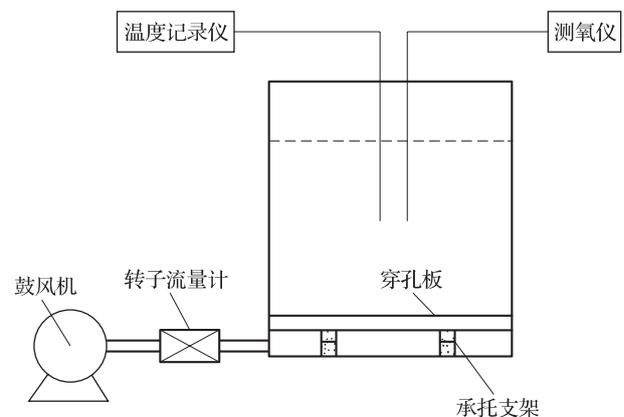


图 1 堆肥箱构造图

收稿日期: 2018-04-23; 录用日期: 2018-08-11

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0502704); 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, 高级工程师, 硕士, 主要从事固体废弃物资源化利用方面的研究, E-mail: lanjingling200@163.com。

通讯作者: 吴永波, E-mail: yongbowu0920@163.com。

1.2 试验材料

以污泥为堆肥的基本材料, 水稻秸秆为堆肥调理剂。污泥取自盐城市城南污水处理厂; 水稻秸秆来源于盐城近郊农村, 农民田地废弃的秸秆, 经粉碎机进行粉碎、研磨, 长度小于 2 cm。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

污泥中的重金属可能对生态系统造成潜在危害。根据现行国家标准和行业标准^[7-8], 对有机肥中镉 (Cd)、铅 (Pb)、铬 (Cr)、汞 (Hg)、砷 (As) 5 种重金属的最高含量作了明确规定。本文对污泥中重金属含量进行测定, 烘干城市污泥中 5 种重金属总量范围为 51.39 ~ 58.35 mg/kg, 各重金属的含量也远远低于国家标准和行业标准, 满足污泥发酵制作有机肥的要求, 具体指标见表 2。

表 2 城市污泥与肥料产品重金属无害化指标 (mg/kg)

标准	Cd	Pb	Cr	Hg	As
GB/T 23349-2009 肥料中镉、铅、铬、汞、砷生态指标	≤ 10	≤ 200	≤ 500	≤ 5	≤ 50
NY525-2012 有机肥料	≤ 3	≤ 50	≤ 150	≤ 2	≤ 15
城市污泥	0.32~0.61	12.23 ~ 14.51	37.48~41.37	0.11~0.23	1.25~1.63

1.3 试验设计

试验分 4 个处理进行, 1、2、3、4 号箱设计通风量分别为 0.25、0.50、1.00 和 1.50 m³/h, 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, 每个堆肥箱堆料重约 40 kg, 其中污泥 30 kg, 稻草秸秆 10 kg。采用时间继电器控制离心风机鼓风的间歇时间 (设定风机开 20 min, 关 40 min), 对堆体进行间歇通风供氧。鼓风停止后 0 ~ 40 min 内, 每隔 5 min 测定氧气浓度, 每天测定

2 次。本试验室内平均温度在 30.7 ~ 33.37 范围内。

试验过程中, 利用温度记录仪每 30 h 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, 每天取一次样, 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 检测及计算方法

采用 RC-30B 温度记录仪测定堆体温度, 梅特勒-托利多精密 pH 计测定 pH 值, 重铬酸钾法测定堆肥有机质含量, 凯氏定氮法测定全氮含量, CY-12C 测氧仪测定氧气浓度, HNO₃-HF-HClO₄ 电热板消解、PE Optima 4300DV ICP 测定污泥中重金属含量, 耗氧速率为耗氧周期中氧气浓度的减少量和耗氧周期所耗时间的比值。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2013 进行数据整理, 采用 SPSS 21.0 对各指标数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 相关性分析采用 Pearson 相关系数, 双侧检验相关性, $P < 0.05$ 为显著相关, $P < 0.01$ 为极显著相关。

2 结果与分析

2.1 氧气对温度变化的影响

氧气的供给对堆肥过程中温度控制和含水率的变化有重要的影响。不同通风条件下, 堆体温度和含水率的变化见图 2。堆体温度从开始升温到降至环境温度 (室温) 的堆肥过程共历时 16 d, 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, 微生物利用氧气迅速分解易分解的有机物, 产生大量的热量, 导致温度快速上升。1、2、3 号箱堆体温度上升明显, 在堆肥第 2 d 进入高温期 (>50℃), 最高温度分别达到 61.03、74.20、63.13℃; 4 号箱温度上升缓慢, 在堆肥第 4 d 达到最高温度 55.70℃。2 号箱堆体的最高温度超过 70℃, 温度过高使得大量好氧微生物死亡, 导致堆肥速率变小, 腐熟进程减缓。3 号箱堆体温度比 1 号箱高, 高温持续最长 (6 d), 表明 3 号箱的通风量更加适宜微生物活动对氧气的需求, 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。4号箱通风量过大, 导致大量热量散失, 升温效果较差。

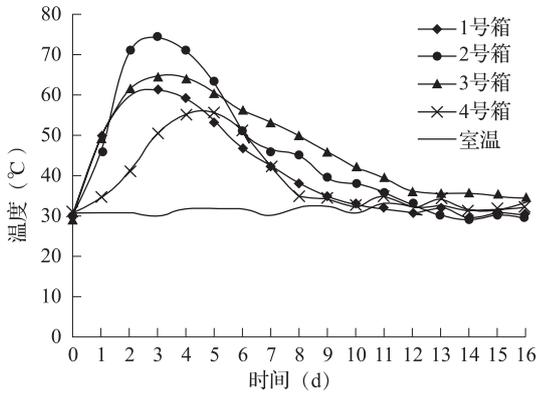


图2 堆肥过程中温度的变化

2.2 氧气对含水率变化的影响

含水率的变化能够改变堆料的通气状况, 间接对氧气含量造成影响^[9]。本研究中, 各处理的初始含水率均为 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微生物利用氧气将有机物分解, 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号箱通风量过小, 堆体内氧气浓度较低, 微生物代谢微弱, 有机物分解受限, 故水分含量变化不明显。3号箱中堆肥过程中的水分散失量最多, 是由于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。

4号箱含水率下降至 48.2%, 下降趋势没有 3号箱明显。

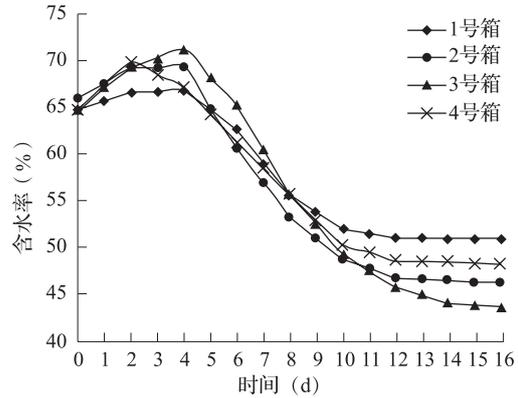


图3 堆肥过程中含水率的变化

2.3 氧气浓度的动态变化

堆肥过程中充足的氧气是保证好氧堆肥发酵的重要条件。由图 4 可以看出, 不同时期氧气浓度的变化均表现为逐渐下降趋势, 这是由于堆体中好氧微生物的繁殖代谢需要消耗氧气。在通风停止时, 1~4号箱氧气浓度分别达到 11.5%、13.8%、17.8%、19.2%, 只有 3 和 4 号箱中最高氧气浓度均超过 17%, 可以保证堆体微生物生命活动对氧气的的需求^[10]。1号箱在升温期和高温期氧气浓度分别降至 4% 和 4.3%, 3号箱在高温期氧气浓度降至 4.3%, 均低于好氧堆肥最低氧气浓度 (5%), 此时堆肥进入厌氧状态^[11], 说明鼓风机间歇时间较长, 可通过缩短间歇时间来保证堆肥过程中氧气的供应。

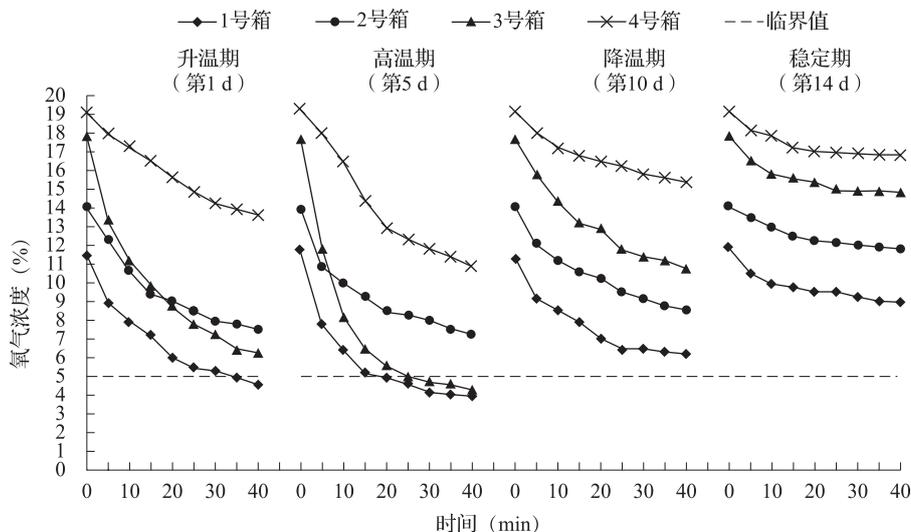


图4 不同时期氧气浓度变化

通风停止后 0 ~ 40 min 内, 不同时期氧气的消耗量有区别, 表现为高温期最大, 升温期和降温期次之, 稳定期最小。1 ~ 4 号箱氧气消耗量的最大值和最小值分别为 7.5% 和 2.6%、7.3% 和 2.4%、13.5% 和 3%、8.3% 和 1.5%; 其中 3 号箱氧气消耗量最大, 1 号箱氧气消耗量最小, 表明通风量为 1.00 m³/h 微生物活动最旺盛, 通风量为 0.25 m³/h 微生物活动最微弱。

将各处理在不同时期的氧气浓度进行差异性分析, 结果见表 3。各处理的升温期与稳定期、降温期与稳定期的氧气浓度差异性达到显著水平 ($P < 0.05$); 高温期与稳定期差异性达到极显著水平 ($P < 0.01$)。1 和 3 号箱的高温期与降温期差异性达到显著水平 ($P < 0.05$); 3 号箱的升温期与高温期差异性也达到极显著水平 ($P < 0.01$)。其中 3 号箱各时期之间氧气浓度的差异更为明显, 说明当通风量为 1.00 m³/h 时, 微生物活性在好氧堆肥过程中波动较大, 耗氧量差异显著。

表 3 不同时期氧气浓度差异性分析

	1 号箱							
	升温期		高温期		降温期		稳定期	
	t	p	t	p	t	p	t	p
升温期								
高温期	7.187	0.296						
降温期	4.942	0.367	-5.480*	0.022				
稳定期	-6.203*	0.018	-7.036**	0.008	-5.899*	0.025		
	2 号箱							
	升温期		高温期		降温期		稳定期	
	t	p	t	p	t	p	t	p
升温期								
高温期	6.511	0.325						
降温期	4.405	0.579	-6.479	0.086				
稳定期	-6.193*	0.035	-6.966**	0.007	-5.885*	0.026		
	3 号箱							
	升温期		高温期		降温期		稳定期	
	t	p	t	p	t	p	t	p
升温期								
高温期	7.322*	0.047						
降温期	6.985*	0.044	-6.526*	0.037				
稳定期	-5.083*	0.025	-6.816**	0.007	-6.190*	0.018		
	4 号箱							
	升温期		高温期		降温期		稳定期	
	t	p	t	p	t	p	t	p
升温期								
高温期	4.229	0.684						
降温期	3.357	0.064	-4.508	0.087				
稳定期	-4.126*	0.034	-4.323**	0.009	-3.750*	0.028		

注: * 表示达显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示达极显著水平 ($P < 0.01$)。下同。

2.4 耗氧速率的动态变化特征

耗氧速率是指堆肥过程中微生物消耗氧气的速率, 是微生物分解和转化有机物快慢的标志^[9]。本

研究中氧气浓度在鼓风停止后 15 min 之内减少最多, 占氧气消耗量的 57.3% ~ 84.6% (图 5), 所以用这段时间的耗氧速率来表达氧气消耗的快慢程度。

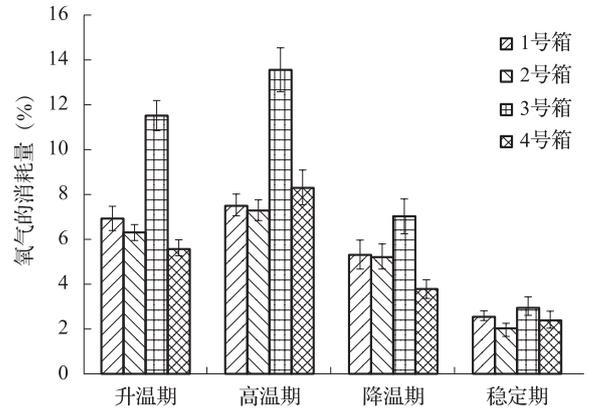


图 5 不同时期氧气的消耗量

由图 6 可以看出, 耗氧速率的变化均呈现先升高, 后降低, 然后趋于稳定, 这与温度变化 (图 2) 趋势相一致。在堆肥初期, 易降解的有机物含量丰富, 微生物生长繁殖旺盛, 耗氧速率较高, 各处理耗氧速率的最大值均在堆肥高温期 (第 5 d), 1 ~ 4 号箱耗氧速率最大值分别为 0.42%/min、0.45%/min、0.75%/min、0.33%/min。随着堆肥的进行, 由于高温期的灭活效应和有机质能源物质逐渐减少, 微生物活性降低, 耗氧速率逐渐减小。堆肥过程中 3 号箱的耗氧速率最大, 1 号箱和 2 号箱次之, 4 号箱的耗氧速率最小。堆肥结束后, 1 ~ 4 号箱耗氧速率分别为 0.10%/min、0.12%/min、0.11%/min、0.11%/min, 因此, 本研究提出耗氧速率为 0.11%/min 可以作为堆肥腐熟指标。

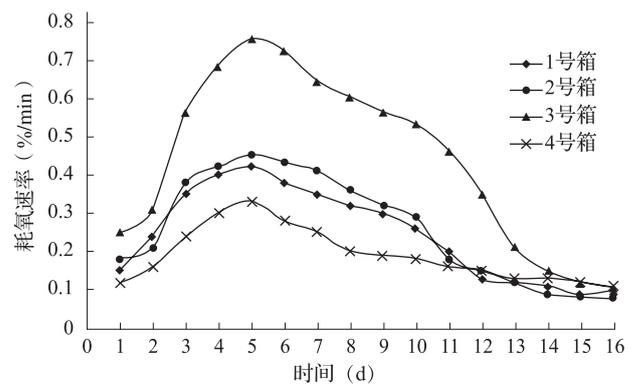


图 6 堆肥过程中耗氧速率的变化

将各处理的好氧速率与温度和含水率之间相关性进行分析,结果见表4。各处理耗氧速率与温度之间呈正相关关系,说明耗氧速率变大促进堆体温度升高。其中1、2和4号箱的相关性达到显著水平($P<0.05$),3号箱的相关性达到极显著水平($P<0.01$)。各处理耗氧速率与含水率之间也呈正相关关系,表明消耗速率变大,有利于含水率升高;消耗速率变小,有利于含水率降低,这与微生物代谢产生水分的多少有关。其中1号箱的相关性达到显著水平($P<0.05$),2和3号箱达到极显著水平($P<0.01$),4号箱的相关性未达到显著水平。

表4 耗氧速率与温度和含水率的 Pearson 相关系数

指标		1号箱	2号箱	3号箱	4号箱
温度	Pearson 相关系数	0.538*	0.681*	0.805**	0.611*
	p	0.048	0.018	0.008	0.034
含水率	Pearson 相关系数	1.262*	0.814**	0.796**	1.835
	p	0.035	0.004	0.005	0.219

3 讨论与结论

氧气的供应和消耗可以改变堆料的微环境,对温度的变化产生重要影响^[12]。孔建松等^[13]认为氧气充足时,堆体温度很快上升;氧气不足时,堆体温度上升缓慢。刘斌等^[14]研究表明,通入氧气体积分数不同,堆体升温速度和最高温度有所区别。笔者研究结果表明:堆肥初期,微生物快速消耗氧气产生大量热量,使得温度迅速上升,进入高温期并维持一段时间后,微生物活动减弱,堆体温度逐渐降至室温,这与以上的研究结果相一致。含水率先升高后降低,一方面是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^[15]。在通风量为 $1.00\text{ m}^3/\text{h}$ 时,堆体的高温期达到6 d,含水率下降至45%以下,堆肥卫生指标和水分含量均符合有机肥质量标准^[16]。

堆肥过程中充足的氧气是保证好氧堆肥发酵的重要条件。蔡全英等^[17]研究表明,当堆肥中氧气浓度过低,水分含量较高时,堆肥从好氧状态转化为厌氧状态。陈同斌等^[18]认为,充足的氧气供给可以保证微生物的活动,加快堆肥腐熟进程,氧气供给不足可导致堆肥不稳定并产生生物毒性。本研究结果表明:不同时期氧气浓度的变化均呈现逐渐

下降趋势,高温期氧气消耗量最大,稳定期氧气消耗量最小,这与徐智等^[19]的研究结果一致。氧气浓度在高温期与稳定期存在极显著差异,这是由于微生物高温期代谢旺盛,稳定期代谢微弱。堆肥过程中出现厌氧发酵,为保证好氧堆肥状态持续进行,应制定合理的通风策略以保证氧气的供应。

耗氧速率反映出有机物的降解程度和堆肥发酵的进程,是判断堆肥是否腐熟的一个重要指标^[20]。沈玉君等^[21]研究通风量与好氧速率的结果表明,通气速率能够影响堆体氧气消耗速率,进而影响堆肥的腐熟度。马闯等^[22]认为,耗氧速率的变化与温度的变化有内在的关联,耗氧速率的峰值出现的时间与温度曲线的峰值相对应。笔者研究结果表明:耗氧速率的变化呈现先升高后降低,然后趋于稳定,本研究可以将耗氧速率达到 $0.11\%/min$ 作为堆肥腐熟的判断依据。耗氧速率在高温期出现最大值,表明微生物活性最高;稳定期出现最小值,表明微生物活性最低。耗氧速率与温度和含水率呈正相关关系,表明在污泥好氧堆肥过程中,耗氧速率与温度和含水率的变化趋势相似,因此可以通过对温度或含水率进行实时监测,来推断耗氧速率的变化特征。

综上所述,以稻草秸秆为调理剂,当通风量为 $1.00\text{ m}^3/\text{h}$ 时,堆体中氧气浓度超过17%,高温持续时间最长(6 d),耗氧速率最大($0.75\%/min$),最适合污泥好氧堆肥发酵。本研究提出耗氧速率为 $0.11\%/min$ 可以作为堆肥腐熟指标。该研究可通过缩短鼓风机在高温期的间歇时间,延长升温期、降温期和稳定期的间歇时间来优化堆肥工艺,最终达到节约能源和提高堆肥质量的双重目的。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wilshusena J H, Hettiaratchi J P A, Visscherb A D, et al. Methane oxidation and formation of EPS in compost: effect of oxygen concentration [J]. Environmental Pollution, 2004, 129(2): 305-314.
- [3] Ekinici K, Keener H M, Akbolat D. Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(7): 922-932.
- [4] 张旭兰,张淑娟.城市污泥与水葫芦堆肥性质变化规律[J].环境工程学报,2017,11(7):4343-4348.

- [5] 朱欣洁, 孙先锋, 周秋丹, 等. 好氧堆肥与蚯蚓堆肥对污泥处理污泥效果比较研究 [J]. 环境科学与技术, 2015, 38 (4): 79-83.
- [6] Lakhdar A, Slatni T, Iannelli M A, et al. Risk of municipal solid waste compost and sewage sludge use on photosynthetic performance in common crop (*Triticum durum*) [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34 (3): 1017-1026.
- [7] GB/T 23349-2009, 肥料中镉、铅、铬、汞、砷生态指标 [S].
- [8] NY525-2012, 有机肥料 [S].
- [9] 倪姆娣, 陈志银, 程绍明, 等. 不同通风量下猪粪好氧堆肥中氧气浓度的变化 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2005, 31 (5): 603-607.
- [10] 聂永丰. 固体废物处理工程技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 538-539.
- [11] 高定, 陈同斌, 黄启飞. 城市污泥堆肥过程自动测控系统及其应用 [J]. 中国给水排水, 2005, 21 (4): 17-19.
- [12] 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.
- [13] 孔建松, 郑玉琪, 陈同斌, 等. 好氧堆肥过程中的氧气变化及其监测 [J]. 生态环境, 2003, 12 (2): 232-236.
- [14] 刘斌, 陈同斌, 郑国砥, 等. 污泥堆肥处理过程中氧气消耗的动态变化与分布特征 [J]. 环境科学学报, 2009, 29 (5): 968-973.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 蔡全英, 莫测辉, 朱夕珍, 等. 城市污泥与稻草堆肥中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 的研究 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (11): 1993-1996.
- [18] 陈同斌, 郑玉琪, 高定, 等. 猪粪好氧堆制不同阶段氧气含量变化特征 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (11): 2179-2183.
- [19] 徐智, 张琴, 张陇利, 等. 强制好氧堆肥不同阶段氧气浓度变化及其与腐熟指标关系 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (1): 189-193.
- [20] 郑玉琪, 陈同斌, 高定, 等. 静态垛好氧堆肥堆体中氧气浓度和耗氧速率的垂直分布特征 [J]. 环境科学, 2004, 25 (2): 134-139.
- [21] 沈玉君, 李国学, 任丽梅, 等. 通风对堆肥供氧的影响及堆高优化研究 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34 (11): 171-175.
- [22] 马闯, 郑国砥, 刘洪涛, 等. 新型调理剂 CTB-2 污泥堆肥的氧气时空变化特征研究 [J]. 生态环境学报, 2012, 21 (5): 929-932.

The research of optimal ventilation: the oxygen consumption study of urban sewage sludge composting with rice straw

AN Yu-ting¹, LIU Bin¹, XUE Dan-dan¹, WANG Li-bo¹, JIA Yuan-yuan¹, WU Yong-bo^{2*}, YUAN Bao-dong³
 (1. Jiangsu Dafeng Milu National Nature Reserve, Yancheng Jiangsu 224136; 2. Nanjing Forestry University, Jiangsu Nanjing 210037; 3. College of Biology and Food, Henan Shangqiu Normal University, Shangqiu Henan 476000)

Abstract: In order to analyze the correlation between oxygen consumption rate with temperature and water content in the aerobic composting of urban sewage sludge with rice straw, the oxygen concentration variation and fluctuation were analyzed in different aeration rates of composting process. Our results indicated that: (1) The change of temperature in each treatment showed four periods: raising-temperature period, high-temperature period, cooling-temperature period and constant-temperature period, and the maximum temperature was 74.20 °C. The water content was increased at first, then decreased and trended to stable at last. (2) The oxygen concentration decreased gradually in different periods and descended obviously in the high-temperature period. (3) The difference of oxygen concentration between the high-temperature period and the constant-temperature period had significant difference ($P < 0.01$). (4) The regularities of the maximum oxygen consumption rate was treatment 3 > treatment 2 > treatment 1 > treatment > 4 treatment. The compost would be matured when the oxygen consumption rate dropped to 0.11%/min. The correlation between oxygen consumption rate with temperature and moisture content of treatment 3 had significant difference ($P < 0.01$). In addition, when the aeration flow-rate was 1.00 m³/h, the oxygen concentration exceed 17%, the high-temperature stage (6 d) was the longest in the whole composting stage (16 d) and the maximum oxygen consumption rate was able to achieve (0.75%/min). The aeration rate of 1.00 m³/h was the best flow-rate for urban sewage sludge composting.

Key words: urban sewage sludge; aerobic composting; aeration; oxygen concentration; oxygen consumption rate