

徐鹏翔, 王 越, 杨军香, 等. 好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2403–2408.

XU Peng-xiang, WANG Yue, YANG Jun-xiang, et al. Advances in ventilation systems and parameter choices during aerobic composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2403–2408.

好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展

徐鹏翔¹, 王 越¹, 杨军香^{2*}, 李 季¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 全国畜牧总站, 北京 100022)

摘 要:通风是影响好氧堆肥过程中温度变化、微生物活性、气体成分、水分去除和产品质量的重要参数,文章总结了好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展。主要结论如下:好氧堆肥有三种通风方式,即自然通风、被动通风和强制通风,其中强制通风在堆肥科学研究和堆肥工程中应用较多。定时开-关周期循环控制、氧含量反馈控制和最大氧消耗率反馈控制是好氧堆肥中典型的三种通风控制方式,定时开-关周期循环控制和氧含量反馈控制方式被认为是工厂化堆肥中应用的标准控制方式,最大氧消耗率反馈控制是一种新型的控制方式,控制效果较好,但在实际工程中尚未被应用。堆肥通风速率因原料和堆肥形式不同而不同,研究结果认为通风速率为 $0.2\sim 0.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质具有较好的应用效果。搅拌是一种特殊的堆肥通风方式,在搅拌过程中,通过分子扩散和能量梯度驱动空气质量运动,从而为堆体供给足够的氧气,这一方式在槽式和反应器堆肥中应用较多。实际堆肥工程中,条垛式堆肥一般采取翻堆结合自然通风工艺,槽式堆肥采取分段强制通风工艺,反应器堆肥一般采取间歇式通风工艺;条垛式和槽式堆肥建议翻堆频率为1 d 1次,槽式和反应器堆肥建议通风速率为 $0.05\sim 0.2\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 有机物质。

关键词:好氧堆肥;通风;工艺参数;研究进展

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)11-2403-06 doi:10.11654/jaes.2018-0898

Advances in ventilation systems and parameter choices during aerobic composting

XU Peng-xiang¹, WANG Yue¹, YANG Jun-xiang^{2*}, LI Ji¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. National Animal Husbandry Station of China, Beijing 100022, China)

Abstract: Ventilation is an important parameter that affects the temperature change, microbial activity, gas composition, water removal, and product quality of aerobic composting. This article reviews current research into ventilation systems and parameter choices during aerobic composting. Aerobic composting has three ventilation modes: natural, passive, and forced ventilation. Forced ventilation is widely used both in composting research and composting engineering. There are three typical ventilation control methods used in aerobic composting: OUR (oxygen uptake rate) maximization control, cyclic control, and oxygen feedback control, where the latter two are considered the standard control methods in industrial composting. OUR maximization control is a new control method exhibiting good control effects, but it has not been applied in practical composting engineering. The ventilation rate of composting is different with raw materials. The results indicate good performance under a ventilation rate of $0.2\sim 0.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ of organic matter in composting plants. A combination of pile turning and natural ventilation is typically used in the windrow composting system, sectional forced ventilation technology is typically used in the bed composting system, and intermittent ventilation technology is typically used in the reactor composting system. The stirring parameters should be once per day in windrow and bed systems, and the ventilation parameters should be $0.05\sim 0.2\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ of organic matter in bed and reactor systems.

Keywords: aerobic composting; ventilation; process parameters; research progress

收稿日期:2018-07-10 录用日期:2018-09-18

作者简介:徐鹏翔(1980—),男,山西洪洞人,博士研究生,从事有机废弃物堆肥研究。E-mail: xpx527@126.com

*通信作者:杨军香 E-mail: 18611952670@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800601)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0800601)

好氧堆肥是在有氧条件下,好氧微生物对有机废弃物进行氧化、分解、吸收和转化的过程。影响堆肥发酵的因素很多,但堆肥的水分(水)、通透性(气)和温度(温)是其中的关键控制因素,通常把水、气、温称为堆肥三要素,三者相互影响,互为关联。

对于好氧堆肥来讲,通风系统的设计是一个十分重要的环节。通过控制通风速率,可以达到调节堆体温度的目的,从而为微生物生长代谢活动提供良好的环境。在堆肥过程中,通风有三个主要目的,分别是供氧、除湿和降温。具体表现在,通风为好氧微生物的生长繁殖和代谢活动提供氧气以完成堆肥过程;在温度较高条件下通风可以除去湿基质中的水分,空气被堆肥基质加热后,蒸发掉部分水分,使堆肥物料得到干化;通风可以除去有机质分解产生的热量,以控制过程温度^[1]。

堆肥过程中,通风方式和通气量(即曝气工艺和参数)的控制至关重要,它不仅会影响到堆肥效率、产品品质和气体排放等方面,还会影响堆肥运行成本。本文总结归纳了国内外堆肥通风工艺与参数研究结果,对比分析了实验室条件下和实际工程中曝气参数之间的关系,以期对通风工艺和参数在堆肥中的合理应用提供参考。

1 堆肥通风工艺

1.1 堆肥通风工艺类型

堆肥从形式上可以分为条垛式堆肥、槽式堆肥和反应器堆肥,每种堆肥类型可以结合工艺特点选择通风工艺。Neklyudov等^[2]将堆肥通风工艺总结为以下3种类型:(1)自然通风。不采用任何通风设备或辅助设施,在考虑风向的前提下通过自然风实现堆体供氧。(2)被动通风。堆体底部铺有通风管,管上预留通气孔,堆体根据风向图水平布置,确保空气能够顺着风向通过管道进入堆体内部,从而实现被动通风。(3)强制通风。通过通风管道将空气输送至堆体,可利用曝气风机或其他能使堆体达到好氧状态的设备。

强制通风和被动通风对通风速率要求不同,二者均具有各自的优缺点,详见表1^[2]。

一般而言,被动通风和自然通风工艺常用于条垛式堆肥,强制通风工艺常用于槽式堆肥和反应器堆肥系统。

1.2 堆肥通风控制方式

在堆肥科学研究和实际工程中,强制通风方式被广泛应用。为了实现最佳通风效率,降低能耗,需要

表1 不同通风方式比较

Table 1 Comparison of different ventilation methods		
项目	强制通风	被动通风
通风速率/L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	0.20~1.9	< 0.1
优点	提高堆肥效率 调节堆体温度	堆肥较彻底 运行成本低廉
缺点	损失一定数量的有机挥发物	堆肥效率低

在不同的堆肥工艺中选择适合的通风控制方式以实现对堆肥过程的合理控制。

Maulini-Duran等^[3]总结比较了3种通风控制方式,即:定时开-关周期循环控制、氧含量反馈控制和最大氧消耗率反馈控制,前两种控制方式被认为是在工厂化堆肥中应用的标准控制方式,第三种控制方式是Puyuelo发明的一种最新的通风控制方式,还未在实际工程中应用。

定时开-关周期循环控制^[3]:这是在好氧条垛堆肥中应用最广泛的通风控制方式,通风设备的运行用预先设置好的时间间隔进行周期循环控制。Ruggieri等^[4]在试验中将通风时间间隔设置为先用5 L·min⁻¹的速率通风5 min,再用0.2 L·min⁻¹的速率通风25 min,周期循环,以此来保持堆体始终处于好氧状态。

氧含量反馈控制^[3]:这种控制方式是通过测定堆肥系统排放的废气中氧气的浓度来进行反馈,它通常需要设定氧气浓度反馈点来维持系统中的氧气含量,氧反馈点被固定为11.5%~12.5%(指氧气在空气中的体积比,V/V)。在实际工程中,当氧气含量低于11.5%时,控制器指示通风设备以3 L·min⁻¹的高通量进行通风;当氧气含量高于12.5%时,控制器指示通风设备以0.2 L·min⁻¹的低通量进行通风;当氧气含量介于11.5%~12.5%之间时,控制器不对通风设备做任何指示以维持当前通风量。

最大氧消耗率反馈控制^[3]:这种控制方式通过获得一种自动控制通风规则,使堆体内的微生物具有最佳活性,以此测得的使堆肥好氧微生物保持最佳活性的通风参数被称为氧气消耗率。在堆肥过程中,控制器首先测得氧气消耗率,然后监测氧气消耗率的变化,由氧气消耗率的变化决定增大、减小或保持通风量不变。通过这种方式,控制系统有规则的将空气流输入堆体,使堆体中的好氧微生物在整个堆肥过程中始终保持较高的活性。

除了以上3种控制方式外,常勤学等^[5]还总结了以下几种控制方式。(1)时间-温度控制:利用设置在

堆体中的温度传感器产生的控制信号,调节通风速率或风机开关,以维持堆体温度在设定温度附近。在堆肥初期,堆体由时间控制器控制,允许堆体温度上升,当温度升高至高温设定点($55\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,风机持续开启,以降低堆体温度;当温度降低至低温设定点时,减小通风速率。该控制方式可以使堆体长时间保持在适宜的温度范围,从而使堆肥更好地达到无害化。(2)温度和氧气含量反馈控制:这种控制方式以温度和氧含量作为控制因素,首先确定温度设定点 T_{sp} ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$)和氧含量设定点 O_{sp} ($0.10\text{ kg O}_2\cdot\text{m}^{-3}$),当温度大于 T_{sp} 且氧气大于 O_{sp} 时开启高速风机,当温度大于 T_{sp} 且氧气小于 O_{sp} 时开启高速风机,当温度小于 T_{sp} 且氧气小于 O_{sp} 时开启高速风机,当温度小于 T_{sp} 且氧气大于 O_{sp} 时开启低速风机,通过这几种条件下的通风控制使堆肥过程所有阶段达到最佳的温度和氧含量。

在上述通风控制方式中,定时开-关周期循环控制方式和时间-温度联合通风控制方式在实际工程中应用最普遍。随着监测技术和信息化水平的提高,堆肥系统强制通风的控制方式将会不断涌现、不断升级。但所有堆肥通风控制方式的目的都是为了实现:(1)使堆体保持好氧状态,最大程度地发挥好氧微生物的活性;(2)保证堆肥产品达到无害化要求,降低挥发性物质的释放量;(3)提高堆肥效率,降低能耗。

2 堆肥通风与搅拌参数

2.1 堆肥通风速率

在强制通风中,通风速率因原料不同而不同^[6]:对畜禽粪便而言,通风速率为 $0.89\sim 1.9\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质;对城市垃圾和污泥堆肥而言,通风速率范围为 $0.20\sim 1.33\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质。在被动通风中,堆体通风速率不会太大,一般为 $0.04\sim 0.08\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质^[2]。

Keener等^[7]认为,农业废弃物通风速率需要 $0.3\sim 0.9\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质。对于城市垃圾而言,Nickolas等^[8]认为通风速率为 $0.06\sim 0.4\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质是比较合理的。Rasapoor等^[9]研究表明,对于城市垃圾废弃物而言,开始发酵时通风速率保持在 $0.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质,发酵后期通风速率降为 $0.4\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质是最合理的。

对于畜禽粪便堆肥来说,也有相关研究者给出了通风速率推荐范围。Hong等^[10]研究认为,在牛粪和秸秆混合堆肥中,通风速率为 $0.87\sim 1.07\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质比较合适;Li等^[11]用牛粪和稻秸堆肥,研究

结果表明 $0.25\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质通风速率效果最好;Lau等^[12]使用猪粪堆肥,得出通风速率推荐范围为 $0.04\sim 0.08\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质。Shen等^[13]使用鸡粪堆肥,得出 $0.1\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 的通风速率有利于温室气体的减排。Chowdhury等^[14]在使用畜禽粪便和秸秆堆肥中选择了高通风速率 $0.44\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和低通风速率 $0.22\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两个参数,研究结果表明低通风速率有利于减少氮素损失,且 N_2O 没有显著变化。由此可知,在不同的研究条件下,由于原料性质和堆肥方式不同,得出的通风速率也不同,表2对文献中的通风速率进行了汇总。

我国制定的《生活垃圾堆肥处理技术规范》CJJ 52—2014标准^[15]中,推荐曝气参数为 $0.05\sim 0.2\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 有机物质,经换算,对应值为 $0.22\sim 0.88\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质。

由表2可知,不同原料、不同工艺条件下堆肥过程中所需要的通风速率不一样。经比较分析发现,通风速率参数基本都在 $0.2\sim 0.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 有机物质之间,因此,在实际堆肥工程中可将此范围内的通风速率参数作为参考值。

2.2 堆肥翻堆与通风

堆肥过程中,通过翻堆或搅拌也能实现堆体通风,这种方式在条垛式堆肥中应用较多。翻堆是通过翻倒、搅拌等方式使堆料、水分、温度和氧气等达到均一化,还可以起到供给空气、混合物料、散发水蒸气的作用。对于强制通风式堆肥系统和很多发酵仓堆肥系统,供氧的作用过程十分清晰,比如,固定通风量的堆垛系统,鼓风机通入空气,使之穿过堆垛,借此提供需要交换的空气。但对于没有通风的条垛堆肥系统,主要的通气机制是通过搅拌来补充氧气。一般情况下,翻堆频率高,堆肥原料可进一步均一化、细粒化,再通过翻堆供给空气,加快堆肥化原料和微生物的表面更新作用,促进好氧发酵。同时,通过翻堆可以蒸发水蒸气,引起原料中的水分含量下降。但若翻堆频率过高,发酵中已升温的原料的散热量也增加,反而使发酵温度降低。因此,要根据堆肥原料中有机物的含量和翻堆设备,设定最适合的翻堆频率,通过翻堆来改善堆肥效果,促进发酵。Wei等^[27]研究表明,堆肥过程中翻堆和通风有利于氮素的转化。

一般通过搅拌条垛而交换自由孔隙中的空气并不能满足空气需求。如果不强制通风,在搅拌过程中,供应的氧气通过两种方式进入条垛孔隙内部,一种是通过分子扩散,另一种是通过能量梯度驱动下的

表2 堆肥通风速率
Table 2 Ventilation parameters in composting

原料	通风速率参数范围	最佳推荐值	参考文献
农业废弃物	0.13~0.74 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质	0.26 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质	Talib 等 ^[16] , 2014
农业废弃物	0.1~0.8 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	0.4 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Kulcu 等 ^[17] , 2004
农业废弃物	0.3~0.9 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质		Keener 等 ^[7] , 2001
粪便秸秆	0.17~0.48 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	0.22 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Chowdhury 等 ^[14] , 2014
粪污堆肥	0.89~1.9 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质		Neklyudov 等 ^[2] , 2006
牛粪秸秆	0.25 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质		Li 等 ^[11] , 2008
牛粪秸秆	0.87~1.07 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质		Hong 等 ^[10] , 1983
猪粪秸秆	0.24~0.72 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质	0.48 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质	Guo 等 ^[18] , 2012
猪粪	0.04~0.08 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质		Lau 等 ^[12] , 1992
猪屠宰场污泥	0.03~0.22 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	0.16 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Blazy 等 ^[19] , 2014
鸡粪	0.01~0.2 m ³ ·min ⁻¹ ·m ⁻³ 有机物质	0.48 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Shen 等 ^[13] , 2011
鸡粪锯末	0.3~0.7 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	0.5 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Gao 等 ^[6] , 2010
餐厨垃圾	0.1~0.3 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质	0.2 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质	Zhang 等 ^[20] , 2016
餐厨垃圾	0.43~0.86 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质		Lu 等 ^[21] , 2001
城市垃圾	0.10~0.48 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质		Evangelou 等 ^[22] , 2017
城市垃圾		0.56 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Kasinski 等 ^[23] , 2016
城市垃圾	0.12~1.72 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质	0.33 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 干物质	Almeira 等 ^[24] , 2015
城市垃圾	0.4~0.9 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	0.6 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Rasapoor 等 ^[9] , 2009
城市垃圾	0.06~0.4 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	0.5 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Nickolas 等 ^[8] , 2002
城市污泥	0.15~0.90 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	0.50 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Chen 等 ^[25] , 2015
城市污泥	15.37 m ³ ·min ⁻¹	0.26 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹ 有机物质	Zhou 等 ^[26] , 2014

空气质量运动。分子扩散的速率和堆肥所需的氧气供应速率相比较慢,而且随着含水率的增加,扩散的速率降低。总体而言,分子扩散在通风方面作用有限。由于分子扩散是不现实的氧气输送机制,很显然只有通过能量梯度驱动空气质量运动才能供给足够的氧气。在条垛或者反应器内部,气体的温度和湿度高,而周围环境的空气温度和湿度低,两者的密度差产生向上的浮力,从而引起自然通风。在不进行强制通风的条垛或反应堆中,自然通风是多数氧气传递的驱动力。周期性的机械翻堆对自然通风的效率有很大影响,这是由于翻堆增加了堆肥物料的自由孔隙,在物料颗粒尺寸不变的情况下,自由孔隙直接与自然通风率相关。Rasapoor 等^[28]对比研究了静态垛强制通风、翻堆、静态垛自然通风和翻堆结合自然通风四种工艺对城市垃圾堆肥理化性质的影响,结果表明:静态垛自然通风虽然能耗最低,但堆肥效果不理想;翻堆和静态垛强制通风两种工艺的都能达到较好的堆肥效果,但能耗偏高;翻堆结合自然通风工艺能耗稍高于静态垛自然通风工艺,且在减少 CO₂ 排放和提高堆肥品质方面均有很好的效果,可以在堆肥工程中替代翻堆工艺。

堆肥实际生产中,通风、搅拌是运行管理的重要因素。使用密闭隧道式和密闭容器式的发酵设施时,对原材料的水分进行调整之后,再把它投入密闭式的发酵设施中,进行翻堆通风控制^[21]。一般情况下,在横型发酵设施中,搅拌的频率为 1~2 次·d⁻¹,在密闭式的发酵设备中为 5~20 次·d⁻¹。

3 国内堆肥工程中通风与搅拌参数选择

目前我国常用的好氧堆肥工艺主要有:条垛式堆肥、槽式堆肥和反应器堆肥。

条垛式堆肥是一种典型的开放式堆肥,其特征是将混合好的原料排成条垛,并通过机械周期性地翻抛进行发酵。槽式堆肥一般在长而窄的被称作“槽”的通道内进行,槽壁上方铺设轨道,在轨道上安装翻堆机,可对物料进行翻搅,槽的底部铺设曝气管道可对堆料进行通风曝气,是一类将强制通风与定期翻堆相结合的堆肥系统。反应器堆肥指将有机废弃物置于集进出料、曝气、搅拌和除臭为一体的密闭式反应器内进行好氧发酵的一种堆肥工艺。

工程实践与研究结果表明,三种堆肥工艺所采用的通风和搅拌参数不同,具体可参见表 3^[29]。

表3 堆肥工程中通风与搅拌参数选择

Table 3 Choice of ventilation and mixing parameters in composting engineering

工艺参数		条垛式堆肥	槽式堆肥	反应器堆肥
一次发酵	发酵时间	20 ~ 30 d	15 ~ 20 d	5 ~ 10 d
	翻堆/搅拌频率	1 d 1次	1 d 1次	1 d 1 ~ 2次
	通风速率	自然通风速率	0.05 ~ 0.1 m ³ ·min ⁻¹ ·m ⁻³ 原料	0.05 ~ 0.2 m ³ ·min ⁻¹ ·m ⁻³ 原料
	通风工艺	搅拌通风	分段曝气	间歇曝气
二次发酵	发酵时间	20 ~ 30 d	15 ~ 20 d	20 ~ 30 d
	翻堆/搅拌频率	1 ~ 2 d 1次	1 d 1次	1 ~ 2 d 1次
	通风速率	自然通风速率	0.1 ~ 0.2 m ³ ·min ⁻¹ ·m ⁻³ 原料	自然通风速率
	通风工艺	搅拌通风	分段曝气	搅拌通风

在实际工程中,条垛式堆肥一般不设置通风系统,而是通过翻堆或搅拌补充氧气;建议在高温发酵期每日翻堆一次,在二次发酵期可根据工艺需要增加搅拌频率,以利于水分的去除。槽式堆肥中一般采取分段曝气工艺,在一次发酵过程中的发酵前期采取较小的通风速率(如0.05 m³·min⁻¹·m⁻³),在发酵中后期随着微生物活动的增强和耗氧速率的增加逐渐加大通风速率(如0.1 m³·min⁻¹·m⁻³);在二次发酵过程中可根据工艺需求选择通风速率,如需快速去除水分,可进一步加大通风速率(如0.2 m³·min⁻¹·m⁻³)。反应器堆肥一般采取间歇通风工艺,如采取开30 min/停30 min、开40 min/停20 min等控制模式,建议通风速率为0.05~0.2 m³·min⁻¹·m⁻³,实际运行中可根据堆体温度和出料水分含量调整通风与搅拌参数。

4 结论

(1)好氧堆肥有三种通风方式,强制通风在堆肥研究和堆肥实际工程中应用较多,是现代化堆肥中需要考虑的重要因素之一。

(2)好氧堆肥中典型的通风控制方式有三种,定时开-关周期循环控制和氧含量反馈控制方式被认为是在工厂化堆肥中应用的标准控制方式;最大氧消耗率反馈控制效果最好、能耗最低,但在实际工程中还没有被应用。

(3)堆肥原料不同、堆肥形式不同,相应的通风速率就不同,通过总结大量研究结果,认为0.2~0.6 L·min⁻¹·kg⁻¹有机物质的通风速率参数具有较好的应用效果,得到了较多的研究验证,在堆肥通风参数中具有较好的参考价值。

(4)实际堆肥工程中,条垛式堆肥一般采取翻堆结合自然通风工艺,建议翻堆频率为1 d 1次;槽式堆肥采取分段强制曝气工艺,一次发酵期间建议通风速

率为0.05~0.2 m³·min⁻¹·m⁻³,二次发酵期间建议通风速率为0.1~0.2 m³·min⁻¹·m⁻³,建议翻堆频率为1 d 1次;反应器堆肥一般采取间歇式通风和搅拌工艺,建议通风速率为0.05~0.2 m³·min⁻¹·m⁻³。通风与搅拌协同进行在槽式和反应器堆肥中具有较好的效果。

参考文献:

- [1] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 二版. 北京: 化学工业出版社, 2011: 74-78.
LI Ji, PENG Sheng-ping. Practical handbook of composting engineering[M]. 2nd edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 74-78.
- [2] Neklyudov A D, Fedotov G N, Ivankin A N. Aerobic processing of organic waste into composts[J]. *Applied Biochemistry & Microbiology*, 2006, 42(4): 341-353.
- [3] Maulini-Duran C, Puyuelo B, Artola A, et al. VOC emissions from the composting of the organic fraction of municipal solid waste using standard and advanced aeration strategies[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2014, 89(4): 579-586.
- [4] Ruggieri L, Gea T, Marisol M, et al. Performance of different systems for the composting of the source-selected organic fraction of municipal solid waste[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(1): 78-86.
- [5] 常勤学, 魏源送, 夏世斌. 堆肥通风技术及进展[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(10): 98-103, 107.
CHANG Qin-xue, WEI Yuan-song, XIA Shi-bin. Composting ventilation technology and progress[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(10): 98-103, 107.
- [6] Gao M C, Li B, Yu A, et al. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 1899-1903.
- [7] Keener H M, Elwell D L, Ekinci K, et al. Composting and value-added utilization of manure from high rise swine finishing facility[J]. *Compost Science & Utilization*, 2001, 9(4): 312-321.
- [8] Nickolas J, Young H K. Material and energy balances in a large scale aerobic bioconversion cell[J]. *Waste Management & Research*, 2002, 20(3): 234-242.
- [9] Rasapoor M, Nasrabadi T, Kamali M, et al. The effects of aeration rates

- on generated compost quality, using aerated static pile method[J]. *Waste Management*, 2009, 29(2):570-573.
- [10] Hong J H, Matsuda J, Ikeuchi Y. High rapid composting of dairy cattle manure with crop and forest residues[J]. *Trans Asae*, 1983, 26(2):533-545.
- [11] Li X J, Zhang R H, Pang Y Z. Characteristics of dairy manure composting with rice straw[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(2):359-367.
- [12] Lau A K, Lo K V, Liao P H, et al. Aeration experiments for swine waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 1992, 41(2):145-152.
- [13] Shen Y J, Ren L M, Li G X, et al. Influence of aeration on CH₄, N₂O and NH₃ emissions during aerobic composting of a chicken manure and high C/N waste mixture[J]. *Waste Management*, 2011, 31(1):33-38.
- [14] Chowdhury M A, Neergaard A, Jensen L S. Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting[J]. *Chemosphere*, 2014, 97(1):16-25.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾堆肥处理技术规范 CJJ 52—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China. Technical code for the composting of municipal solid waste CJJ 52—2014[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.
- [16] Talib A T, Mokhtar M N, Baharuddin A S, et al. Effects of aeration rate on degradation process of oil palm empty fruit bunch with kinetic-dynamic modeling[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169(5):428-438.
- [17] Kulcu R, Yaldiz O. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 93(1):49-57.
- [18] Guo R, Li G X, Jiang T, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 112(58):171-178.
- [19] Blazy V, De-Guardia A, Benoist J C, et al. Process conditions influence on pig slaughter house compost quality under forced aeration[J]. *Waste Biomass Valor*, 2014, 5(3):451-468.
- [20] Zhang H Y, Li G X, Gu J, et al. Influence of aeration on volatile sulfur compounds (VSCs) and NH₃ emissions during aerobic composting of kitchen waste[J]. *Waste Management*, 2016, 58:369-375.
- [21] Lu S G, Imai T, Li H F, et al. Effect of enforced aeration on in-vessel food waste composting[J]. *Environmental Technology*, 2001, 22(10):1177-1182.
- [22] Evangelou A, Chintzios V, Komilis D, et al. Effect of air flowrate on the dynamic respiration activity of the raw organic fraction of municipal solid wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224:748-752.
- [23] Kasinski S, Slota M, Markowski M, et al. Municipal waste stabilization in a reactor with an integrated active and passive aeration system [J]. *Waste Management*, 2016, 50:31-38.
- [24] Almeida N, Komilis D, Barrena R, et al. The importance of aeration mode and flowrate in the determination of the biological activity and stability of organic wastes by respiration indices[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 196(10):256-262.
- [25] Chen Z Q, Zhang S H, Wen Q X, et al. Effect of aeration rate on composting of penicillin mycelial dreg[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 37(11):172-178.
- [26] Zhou H B, Chen T B, Gao D. Simulation of water removal process and optimization of aeration strategy in sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171:452-460.
- [27] Wei S, Jeanette M N, Bruce E M, et al. Effects of aeration and moisture during windrow composting on the nitrogen fertilizer values of dairy waste composts[J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11:17-28.
- [28] Rasapoor M, Adl M, Pourazizi B. Comparative evaluation of aeration methods for municipal solid waste composting from the perspective of resource management: A practical case study in Tehran, Iran[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 184(5):528-534.
- [29] 全国畜牧总站中国饲料工业协会国家畜禽养殖废弃物资源化利用科技创新联盟. 粪便好氧堆肥技术指南[M]. 北京:中国农业出版社, 2017.
- National Livestock Station, China Feed Industry Association, National Technology Innovation Alliance for Resource Utilization of Livestock and Poultry Waste. Technical guidelines for aerobic composting of livestock manure[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.