

马 闯,李明峰,赵继红,等. 通风策略对废弃物好氧堆肥的影响综述[J]. 江苏农业科学,2013,41(11):350-353.

通风策略对废弃物好氧堆肥的影响综述

马 闯,李明峰,赵继红,张宏忠,魏明宝,叶长明

(郑州轻工业学院材料与化学工程学院,河南郑州 450001)

摘要:有机废弃物堆肥化处理是人工调控微生物快速发酵降解和转化有机物的过程,通气供氧是好氧堆肥过程中最主要的调控手段,合理的通风策略是成功快速堆肥的基础。本文系统总结了通风方式、通风量、通风频率对废弃物好氧堆肥过程的影响。建议根据各地区实际,针对不同堆肥物料,选用适宜的通风方式,并通过试验研究和模拟计算筛选最佳通风量、通风频率。

关键词:堆肥;通风控制方式;通风量;通风频率

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)11-0350-04

堆肥化处理是人工调控的微生物快速发酵降解和转化有机物的过程^[1]。在厌氧条件、有氧条件下堆肥微生物均可发酵,好氧发酵主要产物是 CO_2 、 H_2O 、热量,厌氧发酵主要产物是 CH_4 、 H_2S 、 CO_2 和大量未完全降解的低分子中间产物,这种特点决定了厌氧发酵将会产生臭味气体^[2]。因此,几乎所有现代化堆肥处理工程中均采用好氧发酵工艺,包括处理城市污泥、生活垃圾、畜禽粪便等。堆肥发酵过程主要受上堆料含水率、碳氮比(C/N)、pH 值等初始参数以及温度、 O_2 含量等过程参数的影响^[3]。通风具有供氧、调控堆体温度、促进脱水的作用,是调控堆肥过程的最主要手段^[4],同时通过优化

通风还可以有效改善堆肥发酵效果,缩短发酵周期,控制臭味产生和释放^[5]。因此,有必要针对不同发酵物料选择适宜的通风方式、通风量、通风频率等通风策略,以达到成功堆肥的目的。本文综述了通风方式、通风量、通风频率对废弃物好氧堆肥的影响,旨在为选择合理的通风策略提供参考。

1 堆肥过程中通风的作用

1.1 堆肥过程中通风的作用

堆肥化是利用自然界广泛存在的细菌、放线菌、真菌等微生物,人为控制有机废弃物向腐殖质转化的微生物学过程。合适的通风方式不仅能够满足好氧微生物的需要,而且保证堆体温度升高和 O_2 浓度,还能够保证堆体不会过热。通过控制通气保持适宜温度是控制堆肥恶臭、保持最佳生产量、生产优质堆肥产品的关键,同时足够的通风量有助于堆体充分发酵,降低含水率,以达到减容的目的。堆肥通风方式有多种,如自然通风、翻堆、被动通风、强制通风等^[6]。通风在堆肥过程中的作用主要体现以下 3 点。

1.1.1 供氧 O_2 是微生物好氧发酵的必要条件,如果堆体

收稿日期:2013-04-12

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题(编号:2012ZX07204-001);河南省重大公益招标项目(编号:101100910300)。

作者简介:马 闯(1982—),男,河南开封人,博士,讲师,主要从事固体废物资源化研究。E-mail:machuang819@163.com。

通信作者:赵继红,博士,教授,主要从事固体废物资源化与应用环境微生物研究。E-mail:zjh@zzuli.edu.cn。

[3] Mccarty J L, Justice C O, Korontzi S. Agricultural burning in the southeastern United States detected by MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(2): 151-162.

[4] Chen Y, Tessier S, Cavers C, et al. A survey of crop residue burning practices in Manitoba [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21: 317-323.

[5] 金海洋,姚 政,徐四新,等. 秸秆还田对土壤生物特性的影响研究[J]. 上海农业学报,2006,22(1): 39-41.

[6] 黄春红,唐章亮,文慕芬. 瑞莱特微生物催腐剂在甘蔗叶中的腐熟试验[J]. 现代农业科技,2008(11): 188-189.

[7] 谭德水,金继运,黄绍文,等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(1): 133-139.

[8] 单玉华,蔡祖聪,韩 勇,等. 淹水土壤有机酸积累与秸秆碳氮比及氮供应的关系[J]. 土壤学报,2006,43(6): 941-947.

[9] 沙春燕. 催腐剂快速腐熟玉米秸秆还田技术[J]. 现代农业,2008(8): 24-25.

[10] 连兆煌. 无土栽培与原理与技术[M]. 北京:中国农业出版社,

2002:57.

[11] GB 20287—2006 农用微生物菌剂[S].

[12] 杨 胜. 饲料分析及饲料质量监测技术[M]. 北京:北京农业大学出版社,1983.

[13] 谷 洁,李生秀,秦清军,等. 水解类酶活性在农业废弃物静态高温堆腐过程中的变化[J]. 中国农学通报,2005,21(5): 32-35.

[14] 李淑君. 植物纤维水解技术[M]. 北京:化学工业出版社,2009: 55-59.

[15] 于建光,常志州,黄红英,等. 秸秆腐熟剂对土壤微生物及养分的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(3): 563-570.

[16] 姜佰文,潘俊波,王春宏,等. 秸秆常温快速腐熟生物技术的研发[J]. 东北农业大学学报,2005,36(4): 439-441.

[17] 张世敏,汪伦记,贾新成,等. 秸秆降解菌制剂的研究初报[J]. 河南农业大学学报,2001,35(3): 259-261.

[18] 李庆康,王振中,顾志权,等. 秸秆腐解剂在秸秆还田中的效果研究初报[J]. 土壤与环境,2001,10(2): 124-127.

[19] 谭周进,肖嫩群,张杨珠,等. 纤维素分解混合菌群腐解稻草的使用技术研究[J]. 生态环境,2007,16(2): 573-578.

内 O_2 含量不足,微生物易厌氧发酵,有机物降解速率减缓,从而影响堆肥处理效果,同时微生物厌氧发酵还会产生 H_2S 等恶臭物质^[7]。在好氧堆肥过程中,通风是补充 O_2 的主要途径之一。由于堆肥物料和发酵方式差异,所需的通风速率也不相同。一般认为,堆体中 O_2 含量保持在 5% ~ 15% 比较适宜。 O_2 含量低于 5% 易导致微生物厌氧发酵而产生恶臭气体, O_2 含量高于 15% 则会因为通风量过大导致堆体过早冷却,不能彻底杀死病原菌等微生物^[8]。Michel 等在进行园林废弃物堆肥时,发现 O_2 供给充足时大部分 C 转化成 CO_2 ,而 O_2 供给不足时只有少部分 C 转化成 CO_2 ,且 O_2 供给充足可以缩短发酵周期^[9]。

1.1.2 调节温度 堆肥过程中须要维持一段时间的高温才能满足堆肥无害化、稳定化的要求,温度过低无法完成无害化,而温度过高则会对微生物造成灭活作用。通风供氧为微生物提供了适宜的生存环境,从而促进微生物活动产热,促进堆体升温。一定温度范围内,堆肥反应速率随着温度的升高而加快,但当温度超过 60 °C 时,有机质降解速率反而有所衰退,这是因为温度过高导致部分嗜热微生物活动受到抑制^[10],因此高温堆肥温度最好控制在 55 ~ 60 °C^[11]。在堆肥过程中温度高于 60 °C 时应启动鼓风机进行通风,以降低堆温;当温度低于 60 °C 时停止鼓风,让堆体升温;如此反复,使堆体温度始终保持在 60 °C 左右。

1.1.3 促进水分散失 强制通风的好氧堆肥中,水分含量直接影响微生物活性,进而影响好氧堆肥的成败。有研究发现,污泥堆肥时水分含量对微生物活性的影响比温度更大,并且可以仅通过调控水分含量来提高微生物活性^[12]。污泥堆肥、畜禽粪便堆肥等的重要目的之一就是降低物料含水率。对于污泥堆肥来说,不存在水分过低的现象,但对于含水率较低的城市生活垃圾堆肥来说,过量水分散失会导致好氧发酵失败^[13]。微生物利用 O_2 分解有机物时产生大量水分,通风时空气中水分也是水分来源之一。不饱和空气进入堆体后,在大量 O_2 被消耗的同时,气相与液相、固相之间进行物质交换,使大量水分由液相转化为气相,随尾气排出堆体。由于堆体温度较高,与空气进行热量交换,使得空气温度上升,饱和水蒸气浓度也相应增大,这也是通风可以带走大量水蒸气的重要因素。在堆肥前期,通气的作用主要是为微生物提供 O_2 ,以降解有机物;但在堆肥后期,则应加大通风频率和通风量,在带走多余水分的同时冷却堆体、促进降温。

1.2 常见通风供氧方式

堆肥系统主要有 4 种通风方式:自然通风、定期翻堆、被动通风、强制通风^[6,14]。

1.2.1 自然通风 自然通风是利用堆体表面与其内部 O_2 的浓度差产生扩散,使 O_2 与物料接触。通过表面接触供氧,在一次发酵阶段只能保证离表层 22 cm 距离内有足够 O_2 。显然,采用此法为一次发酵供氧,堆体内部会因为供氧不足呈厌氧状态,也会导致堆体内 O_2 分布和发酵不均匀及堆肥周期过长,并影响堆肥产品质量^[15]。在二次发酵阶段, O_2 可由堆体表面扩散至堆体内 1.5 m 处,因此在此阶段推荐采用自然通风方式供氧,以节省能源和成本。同时由于自然通风主要靠扩散,因此采用此方式堆肥的升温 and 降温过程都较慢,堆肥周期较长^[16]。

1.2.2 被动通风 被动通风即由于热空气上升引起的所谓“烟囱”效应而使空气进入堆体的方式。条垛式堆肥常用该通风方式,被称为被动通风条垛系统^[17]。被动通风方式与自然通风方式相似,但与自然通风相比,可基本满足堆体对 O_2 的需求,避免厌氧发酵产生。与强制通风相比,不会因为冷空气的过量鼓入使热量散失而降低堆温。但被动通风过程不能有效控制通风量的变化以满足不同堆肥阶段的需要^[2],因此也存在发酵周期长的问题,不够快速和高效。

1.2.3 翻堆通风 翻堆是利用机械对发酵物料进行翻倒或搅拌,使空气进入到固体颗粒间隙中,条垛式堆肥系统也常用这种通风方式。翻堆还能使堆料混合均匀,促进水分蒸发,有利于堆肥干燥^[11,18]。

在堆肥起始阶段耗氧速率很大,如果仅靠翻堆供氧,则堆体内的 O_2 约 30 min 就会被耗尽,即每 30 min 左右就须翻堆 1 次。实际上对于常规条垛系统,在堆肥开始的 2 ~ 3 周内,一般每隔 3 ~ 4 d 翻堆 1 次,以后 1 周左右翻堆 1 次即可正常发酵^[19]。Tiquia 等也发现,采用不同翻堆频率进行猪粪堆肥时每 4 d 翻堆 1 次不仅能满足微生物对 O_2 的需求,也能保证堆体温度,减少了工人劳动量^[20]。陈同斌等发现,高温阶段翻堆有利于提高堆肥效率,而升温期、降温期翻堆的效果不理想^[21]。同时,增加翻堆次数会引起堆体温度下降,增加臭味物质释放量^[22]。

翻堆是提高堆肥效率和产品质量的重要措施,低水平的条垛式堆肥系统有很多优点:设备简单,投资少;促进水分散失,堆肥易干燥;长时间堆肥后,产品腐熟度高、稳定性好^[23]。但其缺点也很明显:占地面积大,腐熟周期长;需要大量翻堆机械和人力;臭味扩散,影响周围环境,给公众健康带来危害^[24]。

1.2.4 强制通风 强制通风方式是通过机械通风系统对堆体强制鼓风供氧。强制通风分为正压鼓风、负压抽气和由正压鼓风、负压抽气组成的混合通风等方式,是利用风机的强制作用使堆体进行气体交换,促进物质传输和对微生物的氧传递^[25]。与其他方式相比,强制通风易于操作和控制,是为堆料供氧的最有效通风手段,因而被大多数堆肥工艺所采用。静态通风垛系统和发酵仓(反应器)系统常采用这种通风方式。强制通风的目的除了供氧并去除多余水分外,更重要的目的是控制系统温度,尤其是在堆肥后期起加速堆体温度下降的作用^[26]。过量通风会过度降低堆体温度,延长发酵过程,而通风量过低则会造成局部厌氧环境^[27]。通风方式上应根据堆肥发酵进程选用鼓风或抽风。一般在堆肥前期和中期采用鼓风方式,后期采用抽风方式,以控制臭气及尽快降低堆温^[28]。

任何堆肥通风控制系统的最终目标都是在最佳生物降解速率下提供高质量堆肥。对于强制通风静态垛堆肥系统,主流的控制方式有 4 种,即时间控制、温度反馈控制、耗氧速率控制、综合控制^[29]。比较先进的控制方式是综合控制法,是将温度传感器及 O_2 传感器测得的数据连续输入计算机,经过程序加工处理后,来反馈控制鼓风机的通断。该方法可将温度控制法和耗氧速率控制法有机结合起来,保持最佳堆温和 O_2 含量,当 O_2 浓度控制在 15% 左右时,可保证整个堆肥过程中堆温不会超过 70 °C,水分含量逐渐降低,获得堆肥产

品,并实现堆肥通风系统的自动化控制^[30]。

2 通风量对强制通风堆肥过程的影响

强制通风系统中通风量起着极重要作用,风量不足时堆体内易呈缺氧状态,微生物对 O_2 的需求难以满足,其活动受抑制;风量过高时,虽然能为微生物提供充足 O_2 ,但对堆体的散热作用过大,会改变微生物种群结构,影响堆体正常升温及高温期持续时间^[31]。

2.1 通风量对堆体温度的影响

通风量与堆体温度密切相关。堆体温度会随着通风量的大小而改变,通风量会对堆肥产品质量产生影响,合适的通风量能够促进堆体升温 and 延长高温持续期。不同堆肥物料需要不同通风量^[32],厨余垃圾堆肥的通风量为 $390\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 时可达到无害化所要求温度^[33];城市垃圾堆肥过程中对堆体升温 and 微生物代谢最适宜的通风量为 $380\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ ^[34];禽畜粪便堆肥时,以 $190\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 的通风量堆肥温度最高,高温维持时间最长^[35]。不同堆肥阶段所需要的通风量也不尽相同,起曝阶段的通风量为 $0.01\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$,缓慢升温阶段为 $0.02\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$,快速升温期为 $0.04\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$,高温维持期为 $0.17\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$,降温期为 $0.04\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ ^[36]。可见,针对不同堆肥物料须选择合适的通风量,在堆肥不同发酵阶段须针对性地调整通风量,以优化堆肥效果,提高堆肥效率。

2.2 通风量对脱水效果的影响

堆肥物料的干化和脱水是堆肥化处理的主要目的之一,尤其是对于含水率较高的城市污泥更是堆肥成功与否的评价指标之一。在保持较高温度的情况下,去除水分的有效条件是较大通风量^[37]。对于含水率 65% 左右的物料, $0.104\text{ m}^3/\text{min}$ 通风量下的脱水效果要优于 $0.156\text{ m}^3/\text{min}$ 通风量,其含水率分别下降 23%、11.5%,原因就在于适合的通风量促进了反应的良好进行^[38]。齐凯佳通过对不同通风环境下生物干化试验的分析发现,在 $0.07 \sim 0.10\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 通风量下有很好的生物干化效果^[39]。

2.3 通风量对堆体 pH 值的影响

通风量对微生物降解有机质产物有显著影响,一般认为 pH 值为 7.5~8.5 时,降解速率最大^[40]。张相锋等通过开展不同通风量下的堆肥试验发现,在堆肥进行过程中,试验堆体都很快由酸性变为中性,其 pH 值连续上升,发酵结束时堆体 pH 值达到了 8~9^[37]。将污泥与熟料混合后进行堆肥,当堆肥通风量为 $0.05\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 时,物料 pH 值均大于 7;当通风量减为 $0.025\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 时,物料 pH 值在大部分时间内小于 7,且表现为先降后升的趋势^[41],原因可能是堆肥过程中某段时间内供氧量不足,堆体内为厌氧或兼氧,微生物厌氧发酵产生有机酸。

2.4 通风量对堆体 C/N 的影响

堆肥物料 C/N 在堆肥中有特殊意义。只有严格控制堆肥初期的 C/N 才能确保堆肥的微生物降解和有机物转化顺利进行,同时 C/N 也是评价堆肥腐熟度的一个传统方法。因此,研究 C/N 的变化不仅有助于了解堆体降解情况,也对堆肥腐熟进程有进一步认知。一般初始堆肥物料的 C/N 控制在 25~30 为宜^[42]。Rasapoor 等进行城市固体废弃物堆肥时

发现,与 $700\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 通风量相比,在 310、470 $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ 通气量条件下堆体 C/N 下降更显著^[43]。孟潇等研究餐厨垃圾堆肥时发现,分别以 0.001、0.002、0.004、0.006、0.008 m^3/min 的通风量强制鼓风供氧,通风量为 0.001、0.006、0.008 m^3/min 条件下水溶性 C/N 分别下降 43.8%、43.8%、41.3%,而通风量为 0.002、0.004 m^3/min 条件下水溶性 C/N 分别下降 50%、49%,因此在堆肥初期通风量为 0.002、0.004 m^3/min 比较适宜^[44]。

3 通风频率对堆肥过程的影响

强制通风好氧堆肥不仅要有合适的通风量,而且还要有合适的通风频率。通风频率过低,微生物生命活动需氧量难以满足,微生物活性将受到限制;通风频率过高,堆体内热量累积时间过短,影响腐熟效果^[45],因此通风频率的合理确定极为重要。对于同一通风量条件下的低频率通风和高频率通风,后者堆体达到的最高温度和高温持续期(高于 55℃)都要高于前者^[46]。

4 结论及建议

根据不同地区实际,针对不同堆肥物料,应该选用适宜的通风方式,但对于产生量大、连续的市政有机废弃物如城市污泥,一般推荐采用强制通风方式,以达到提高处理效率、稳定生产、节约占地面积、控制臭气的目的,从而实现有机固体废物废弃物的减量化、无害化、资源化。

通风量、通风频率均对堆肥过程有重要影响,建议针对不同发酵物料,通过试验研究和模拟计算筛选最佳通风量、通风频率,并采用计算机自动控制进行风机变频通风,时刻调整通风量、通风频率,以取得较好的堆肥效果。

参考文献:

- [1] Tsai C J, Chen M L, Ye A D, et al. The relationship of odor concentration and the critical components emitted from food waste composting plants[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(35): 8246–8251.
- [2] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. Bioresource Technology, 1992, 42(2): 103–111.
- [3] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] Adani F, Baido D, Calcaterra E, et al. The influence of biomass temperature on biostabilization – biodrying of municipal solid waste[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(3): 173–179.
- [5] Diaz M J, Madejon E, López F, et al. Optimization of the rate vinasse/ grape marc for co – composting process[J]. Process Biochemistry, 2002, 37(10): 1143–1150.
- [6] Sesay A A, Ke L D, Stentiford E I. Aerated static pile composting of municipal solid waste(MSW): a comparison of positive pressure aeration with hybrid positive and negative aeration[J]. Waste Management & Research, 1998, 16(3): 264–272.
- [7] Haug R T. Engineering principles of sludge composting[J]. Water Pollution Control Federation, 1979, 51(8): 2189–2206.
- [8] 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.
- [9] Michel J C, Reddy C A. Effect of oxygenation level on yard trimmings composting rate, odor production, and compost quality in bench – scale reactors[J]. *Compost Science & Utilization*, 1998, 6(4): 6 – 14.
- [10] Mayrhofer S, Mikoviny T, Waldhuber S, et al. Microbial community related to volatile organic compound (VOC) emission in household biowaste[J]. *Environmental Microbiology*, 2006, 8(11): 1960 – 1974.
- [11] Schloss P D, Chaves B, Walker L P. The use of the analysis of variance to assess the influence of mixing during composting [J]. *Process Biochemistry*, 2000, 35(7): 675 – 684.
- [12] 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.
- [13] 文昊深. 城市生活垃圾高温好氧堆肥工艺优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [14] 李国学, 李玉春, 李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(2): 252 – 256.
- [15] 蔡华帅. 垃圾渗滤液微生物循环接种强化堆肥通风供氧模式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [16] Larney F J, Olson A F, Carcamo A A, et al. Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75(2): 139 – 148.
- [17] 魏源送, 樊耀波, 王敏健, 等. 堆肥系统的通风控制方式[J]. *环境科学*, 2000, 21(2): 101 – 104.
- [18] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Effects of turning frequency on composting of spent pig – manure sawdust litter[J]. *Bioresource Technology*, 1997, 62(1/2): 37 – 42.
- [19] Walker L P, Nock T D, Gossett J M, et al. The role of periodic agitation and water addition in managing moisture limitations during high – solids aerobic decomposition[J]. *Process Biochemistry*, 1999, 34(6/7): 601 – 612.
- [20] Tiquia S M, Tam N F. Characterization and composting of poultry litter in forced – aeration piles [J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(8): 869 – 880.
- [21] 陈同斌, 罗 维, 郑国砥, 等. 翻堆对强制通风静态垛混合堆肥过程及其理化性质的影响[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(1): 117 – 122.
- [22] 化党领, 刘 方, 李国学, 等. 翻堆与覆盖工艺对猪粪秸秆堆肥性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 210 – 217.
- [23] 吴鸿强. 城市垃圾堆肥深度加工的处理工艺及设备[J]. *环境保护*, 1998(3): 22 – 24.
- [24] 余 群, 董红敏, 张肇鲲. 国内外堆肥技术研究进展(综述)[J]. *安徽农业大学学报*, 2003, 30(1): 109 – 112.
- [25] Liang Y, Leonard J J, Feddes J J, et al. A simulation model of ammonia volatilization in composting[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(5): 1667 – 1680.
- [26] 陈世和. 城市生活垃圾堆肥化处理[J]. *环境污染与防治*, 1985, 6(4): 29 – 34.
- [27] Sanchez – Monedero M, Roig A, Paredes C, et al. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 78(3): 301 – 308.
- [28] Georgakakis D, Krintas T. Optimal use of the Hosoya system in composting poultry manure[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72(3): 227 – 233.
- [29] Iannotti D A, Grebus M E, Toth B L, et al. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(6): 1177 – 1183.
- [30] de Bertoldi M, Rutili A, Citterio B, et al. Composting management: A new process control through O₂ feedback[J]. *Waste Management & Research*, 1988, 6(3): 239 – 259.
- [31] Cegarra J, Albuquerque JA, González J, et al. Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive – mill by – product (“alperujo”) managed by mechanical turning [J]. *Waste Management*, 2006, 26(12): 1377 – 1383.
- [32] 张向阳, 牛华寺, 吴星五. 生活垃圾好氧堆肥过程中氧浓度的变化规律及其应用[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(15): 86 – 88.
- [33] 杨延梅. 通风量对厨余堆肥氮素转化及氮素损失的影响[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(12): 1 – 4, 19.
- [34] Lu Y, Wu X, Guo J. Characteristics of municipal solid waste and sewage sludge co – composting [J]. *Waste Management*, 2009, 29(3): 1152 – 1157.
- [35] Li X, Zhang R, Pang Y. Characteristics of dairy manure composting with rice straw [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(2): 359 – 367.
- [36] 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.
- [37] 张相锋, 王洪涛, 聂永丰. 通风量对蔬菜和花卉废弃物混合堆肥的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 134 – 137.
- [38] 李宇庆, 陈 玲, 赵建夫. 城市污水厂污泥堆肥中试实验研究[J]. *环境科学与管理*, 2006, 31(5): 93 – 96.
- [39] 齐凯佳. 不同通风量对污泥生物干化效果的影响[J]. *山西建筑*, 2011, 37(6): 100 – 102.
- [40] 孙晓杰, 王洪涛, 陆文静. 通风量对粪渣与树叶共堆肥的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 249 – 253.
- [41] 魏国强, 张向阳, 刘华超. 通风条件对城市污水厂污泥好氧堆肥过程的影响[J]. *四川环境*, 2012, 31(3): 21 – 25.
- [42] 秦 莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 比堆肥碳素物质变化规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1388 – 1393.
- [43] Rasapoor M, Nasrabadi T, Kamali M, et al. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method [J]. *Waste Management*, 2009, 29(2): 570 – 573.
- [44] 孟 潇, 韩 涛, 任连海, 等. 通风量对餐厨垃圾好氧堆肥的影响[J]. *北京工商大学学报: 自然科学版*, 2008, 26(3): 4 – 8.
- [45] Hobson J, Yang G. The ability of selected chemicals for suppressing odour development in rising mains[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(6): 165 – 173.
- [46] 张永涛, 张增强, 孙西宁. 添加锯末对污泥堆肥腐熟的影响研究[J]. *延安大学学报: 自然科学版*, 2009, 28(2): 85 – 91.