

间歇式曝气与人工翻堆对堆肥化进程的影响

吕育财^{1,2} 王俊刚² 李 宁³ 龚大春¹ 王伟东⁴ 崔宗均^{2*}

(1. 三峡大学 艾伦麦克德米德再生能源研究所/新能源研究院,湖北 宜昌 443002;

2. 中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193;

3. 三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443002;

4. 黑龙江八一农垦大学 生命科学技术学院,黑龙江 大庆 163319)

摘 要 利用间歇式曝气方式,控制堆肥堆体内氧气体积分数调节堆体内有氧/无氧交替周期,与翻堆方式比较,考察不同发酵模式对堆肥化进程及堆肥性质的影响。结果表明:间歇式曝气和翻堆方法均能有效提升堆体内氧气体积分数(翻堆后可使堆体内氧气体积分数达 18.5%,曝气可使堆体内氧气体积分数达 15.5%)。但曝气和翻堆结束后,堆体内的氧气会迅速下降,翻堆方式在 27 min 内耗尽氧气,间歇式曝气方式在 24 min 内耗尽氧气。在堆肥化过程中,间歇式曝气与翻堆相比,堆体温度提前约 10 d 达到室温;堆体含水量提前约 18 d 达到稳定状态;间歇式曝气能够促进堆肥 pH 快速恢复至中性。堆肥化结束后,间歇式曝气方式与翻堆方式分别使堆肥物料减少 51.3%和 44.6%(质量分数);总氮含量分别稳定在 1.66 和 1.62 mg/g。可见,间歇式曝气与传统翻堆方式相比,能够促进堆肥快速达到稳定状态,缩短腐熟周期。且比连续曝气节约能源。

关键词 堆肥; 间歇式曝气; 翻堆; 氧气浓度; 腐熟度

中图分类号 S 141.4

文章编号 1007-4333(2013)01-0069-07

文献标志码 A

Effects of intermittent aerating and pile-turning on composting process

LÜ Yu-cai^{1,2}, WANG Jun-gang², LI Ning³, GONG Da-chun¹,
WANG Wei-dong⁴, CUI Zong-jun^{2*}

(1. Alan G. Macdiarmid Research Institute of Renewable Energy/Research Institute for New Energy,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Agronomy and Biotechnology/Center of Biomass Engineering,

China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

4. College of Life Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract The purpose of the study is to explore the effects of different fermentation modes on the composting process and compost quality, using intermittent aeration mode, regulating aerobic fermentation and anaerobic fermentation time and alternate cycles in the compost through the control of oxygen content of the compost, and taking investigation of compost property changes, compared with pile-turn treatment. The results showed that both of the intermittent aerating and manual pile-turning treatments can increase oxygen content of the compost effectively (in the pile-turning mode, the oxygen content of the compost got up to 18.5%, and the oxygen content got up to 15.5% in the intermittent aeration mode), but at the end of the aerating or turning treatments, the oxygen content decreased rapidly, the oxygen of compost body can be depleted within 27 minutes by using the manual turning mode, and within 24 minutes by using the

收稿日期: 2012-05-16

基金项目: 国家“863”计划(2012AA101803); 国家科技支撑计划(2011BAD15B01, 2012BAD14B01)

第一作者: 吕育财, 讲师, 博士, 主要从事生物质能源转化及微生物生态研究, E-mail: lv_yucaic@ctgu.edu.cn

通讯作者: 崔宗均, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质资源转化与利用研究, E-mail: acuizj@cau.edu.cn

intermittent aeration mode. During the composting process, comparing with the turning treatment, the composting temperature reached room temperature about 10 days in advance by using the intermittent aerating treatment, and the moisture content of landfill reached a steady state about 18 days in advance. The intermittent aeration treatment can promote composting pH to be a neutral state in the mid and late composting process. At the end of the composting, the composting material decreased 51.3% and 44.6% by using the intermittent aeration treatment and the overturn treatment respectively, and the total nitrogen content was found to be stable at 1.66 mg/g and 1.62 mg/g respectively with the above two treatments. Therefore, compared with traditional turning mode, the intermittent aerating treatment can promote the compost to reach a steady state quickly, shorten the maturity cycle, and save energy compared with continuous aeration treatment.

Key words compost; intermittent aeration; turning; oxygen content; compost maturity

秸秆、禽畜粪便是农业生产的主要副产品和废弃物,特别是禽畜粪便,大量积累处理不当会造成一定程度的环境污染,危害人类的生活及健康^[1]。利用堆肥化方式处理秸秆及禽畜粪便等农业固体废物是目前转化农业有机废弃物的有效手段^[2],它不仅能够解决废弃物对环境造成的污染压力,同时能够将有机废弃物再次转化为农业可利用资源,提高肥力,改善农田土壤性状。

堆肥化是在微生物的作用下各种有机物质分解转化,最终形成稳定状态的过程^[3]。堆肥中的氧气是影响堆肥化的重要因素之一。根据氧气的供应情况堆肥可分为好氧发酵和厌氧发酵^[4]。在好氧发酵过程中,通过曝气处理可使堆体中好氧微生物获得足量的呼吸代谢的氧气,致使堆体中的蛋白质、淀粉类物质和单糖等迅速分解,产生大量的热量,促进堆体快速升温^[5]。而在厌氧条件下,堆肥物料中的各种物质,包括纤维素等难分解物质,在厌氧微生物的作用下也可进行有效的分解^[6]。

目前常用的堆肥换气主要有强制通风及翻堆等方式。有研究认为翻堆方式的堆肥一般有一个较长的高温期^[7],但通风方式的堆肥一般比翻堆方式提前 10 d 腐熟。翻堆方式的堆肥虽然升温降温缓慢,发酵时间长,但在堆肥化过程中没有引入通风设备,能耗低,能够有效减少堆肥的生产成本,在堆肥化生产及固体废物处理工艺中占有重要地位。前人研究认为强制通风堆肥可以节省空间且操作方便^[8],适宜于在大规模集约化处理畜禽粪便时应用,而翻堆通风由于其低建设成本和低温温室气体排放量,以及较高的有机质分解效率,更适宜在我国农村采用。还有的研究认为无论是静态通风或者翻堆供氧都很难满足微生物对氧的需要^[9]。机械通风可以促进氨态氮向硝态氮的转化,但单纯的机械通风其最后物料的均匀度不如人工翻堆的。

间歇式曝气堆肥是非连续对堆肥进行曝气处理的一种方式,通过人为控制一段时间堆体内的氧气,实现好氧发酵与厌氧发酵交替进行。在好氧发酵阶段,可实现堆体内糖、有机酸和各种代谢产物等易分解物质的快速转化;而在厌氧发酵阶段,则有利于木质纤维素等难分解物质的分解^[6],从而,促进堆肥腐熟进程,降低连续曝气的能耗成本。

本研究通过利用间歇式曝气的方法,在堆肥发酵的前期和中期对堆体中的氧气进行调节,控制堆体内好氧/厌氧发酵的交替频率。通过与翻堆式堆肥性质的比较,旨在探索间歇式曝气对堆肥性质的影响。

1 材料与方法

1.1 堆肥材料来源

堆肥使用的新鲜鸡粪、牛粪取自于中国农业大学小牧场,草坪草来源于中国农业大学校园草坪草。

1.2 堆肥方法

草坪草切碎约 5~10 cm 长度,鸡粪、牛粪、草坪草体积比为 1:3:6(C/N 为 32),混合堆砌,调节水分为 60%。堆肥在堆肥槽内进行,堆肥槽宽 1.5 m,深 1.2 m,长 20 m。堆肥物料在堆肥槽内,堆砌成下部长 2 m,上部长 1 m 的梯台形状。堆肥分为 2 堆:一堆采用为翻堆处理方式,当堆体温度达到 50℃时,开始翻堆,每 2 d 翻堆一次,堆体温度低于 50℃后,每 5~10 d 翻堆一次;另一堆采用间歇式曝气处理方式,曝气装置为 60 cm×50 cm×8 cm 的曝气箱,将其埋于堆体正中距堆体底部 30 cm 处,通气管导入气体,空气压缩机提供稳定气流,每天曝气 7 次,每次曝气 1 h。气体流量为 60 L/min,当堆体温度高于 50℃时,每 5 d 翻堆一次,堆体温度低于 50℃后,每 10 d 翻堆一次,并不再通气。2 种模式的堆

肥样品分别于堆体的上中下 3 层获取,每层又分左中右 3 点,共 9 点取样,然后将样品混合,四分法获得样品。所获样品部分冰箱冻存(测定 pH),部分风干(测定水溶性糖、总氮)。

1.3 氧体积分数及堆肥减重测定

用 HORIBA OM-14 型 DO meter 测定堆体中央 50 cm 深度的氧体积分数浓度。分别在堆肥化前及结束后,利用磅秤称取堆肥物料的总重量,计算 2 种方式堆肥化过程中堆肥物料的减少量。

1.4 pH 测定

新鲜的堆肥样品与水 1 : 1(质量比)混合,充分搅拌均匀,浸提 20 min。取待测液 0.5 mL,用微量 pH 计(Compact pH meter, model B-212, Japan)测定 pH。

1.5 水溶性糖测定

堆肥样品风干后,经粉碎,过 1 mm 筛。称取样品 0.5 g,使用 6 mL 蒸馏水沸水浸提,8 000 r/min 离心后,取上清液 1 mL(糖质量浓度最适在 20~80 mg/L 之间)放入试管中,沿瓶壁缓缓注入蒽酮试剂(100 mg/L)5 mL,小心摇动 0.5 min,放入沸水浴中加热 10 min,取出放入冷水中迅速冷却,10 min 显色稳定后进行比色。比色光谱波长 620 nm。同时做标准曲线。

标准曲线的绘制:吸取系列标准糖液各 1 mL,

分别放入 5 只试管中,按上述步骤显色。

1.6 总氮测定

堆肥样品风干,粉碎过 1 mm 筛。称取样品 0.5 g,用凯式定氮法测定样品中总氮含量^[10]。

1.7 数据处理

采用 Sigma Plot 12.0 分析软件计算和作图。

2 结果与分析

2.1 堆体内氧气体积分数变化

翻堆不仅将堆肥物料进行混拌,同时改变了堆体内的氧气分布。图 1 显示堆肥化第 14 天,堆体在高温的旺盛分解期,人工翻堆后 48 h 内堆体内部氧气和温度的变化。结果表明,通过翻堆处理,可将堆体内的氧气体积分数提高到 18.5%。翻堆结束后,堆体内的氧气的体积分数迅速下降,并在 27 min 下降至 0%。此后堆体中氧气的体积分数还会有微弱的回升,最终可保持在 0.7%左右。堆肥是由群落结构演替非常迅速的多个微生物群体共同作用而实现的动态过程^[11]。翻堆后堆体内氧气的变化,可致使堆体内部分菌群的活性和发酵方式发生转变,加速易分解有机物的矿化。然而堆体内高浓度氧存在的时间非常短暂,当堆体内氧气耗尽,发酵模式又转变为厌氧发酵模式,这有利于木质纤维素等难分解物质的分解^[6,12]。

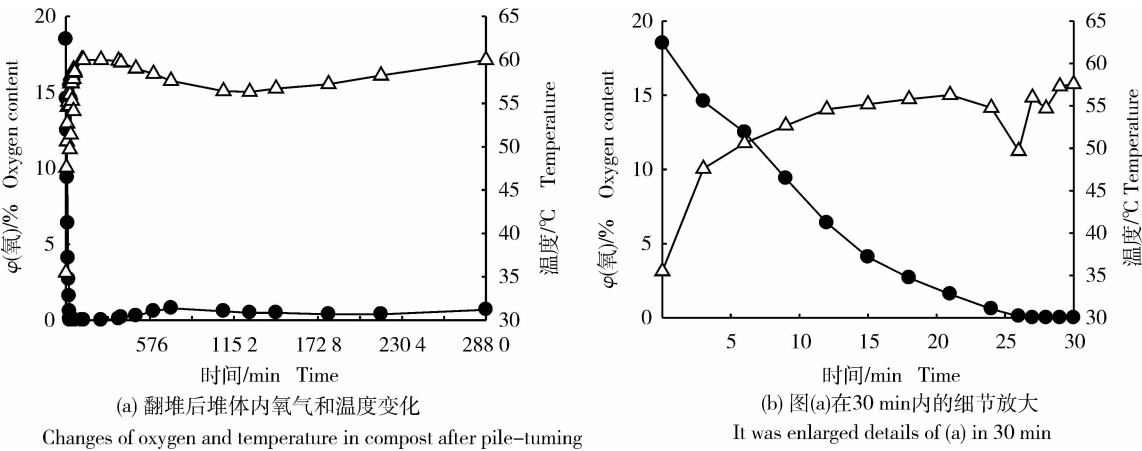


图 1 翻堆后堆体内氧气和温度变化

Fig. 1 Changes of oxygen and temperature in compost after pile-turning treatment

翻堆后,堆体温度下降,但在微生物好氧呼吸的作用下,堆体温度迅速上升,在 30 min 内即可恢复到翻堆前温度。可见,翻堆并不影响堆体进行持续高温发酵。

翻堆可使堆体内的微生物经过一个短时间的好氧发酵之后(27 min),进入一个长时间的厌氧发酵状态(2 d)。而间歇式曝气方式,通过控制堆肥曝气时间,可调节堆体内好氧发酵与厌氧发酵交替作用

的频率和周期。图 2 显示与翻堆处理同一时间进程(第 14 天)的间歇式曝气过程和曝气后堆体内氧气的变化。曝气开始后,堆体内的氧气迅速上升,在 5 min 后氧气体积分数可达 12.4%;经过 1 h 的曝气处理,堆体氧气体积分数平衡在 15.5%,停止曝气,堆体内的氧气迅速下降,经过 24 min 后降至 0%。与翻堆相似,堆体内的氧气还会有稍许的回升,最终维持在 0.2%的状态。堆体中淀粉、可溶性糖、各种代谢产物等易分解物质容易在好氧状态下快速分解,而纤维素等难分解物质在微好氧或厌氧条件下更有利于分解^[6]。在本研究中,翻堆模式的一个周期(2 d)内只有一次高氧状态(翻堆过程),并在 24 min 内降低到低氧状态。而间歇式曝气处理,在 2 d 内,堆体高氧状态累积时间为 14 h(每天 7 次曝气,每次 1 h)。因此在相同时间内,间歇式曝气处理在高氧状态下的总好氧发酵时间远高于翻堆处理。因此间歇式曝气相比于翻堆处理有效的提高了堆体内厌氧发酵和好氧发酵的交替频率和总好氧发酵时间。有利于堆体内各种可溶性糖、中间代谢产物的分解^[13],有利于实现堆肥的快速腐熟。

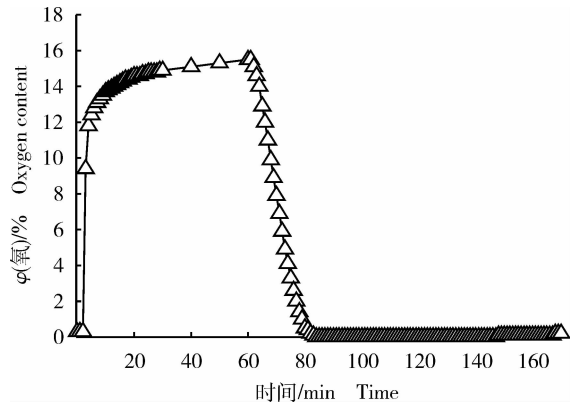


图 2 间歇式曝气处理堆肥堆体内氧气浓度变化

Fig. 2 Changes of oxygen content in compost with intermittent aerating treatment

2.2 间歇式曝气和翻堆处理对堆肥温度的影响

堆肥在间歇式曝气和翻堆 2 种处理方式下,堆体温度变化如图 3 所示。在堆肥化初期,间歇式曝气处理的堆体温度上升速度较快,第 2 天达到 68℃,此后堆体温度在 50~61℃间波动,19 d 后堆体温度低于 50℃,35 d 后堆体温度接近室温。翻堆处理的温度上升较为缓慢,在堆肥化的第 16 天,堆体温度达到最高值 58℃,此后,堆体温度开始缓慢

下降,并于堆肥化的 46 d 后,堆体温度接近室温。与翻堆方式不同,间歇式曝气在堆肥的 30 d 左右出现二次升温现象。王伟东等^[6]认为堆肥中后期纤维素等难分解物质的分解促成了堆肥二次发酵升温现象。曝气处理的堆肥在经过二次升温现象后,比翻堆方式提前约 10 d 恢复到室温稳定状态,表明间歇式曝气处理可加快堆肥的腐熟过程。

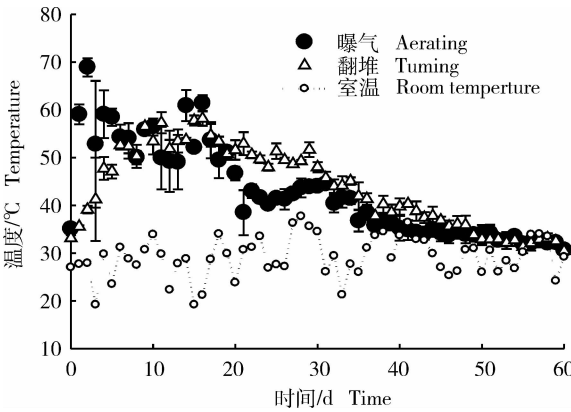


图 3 间歇式曝气与翻堆处理堆肥堆体温度变化

Fig. 3 Changes of compost temperature with intermittent aerating and pile-turning treatments

2.3 间歇式曝气和翻堆对堆肥含水量影响

在间歇式曝气和翻堆 2 种处理方式下,堆体物料的含水量变化如图 4 所示。堆肥启动时,将堆肥物料的含水量调至 58%左右。堆肥开始后,2 种方式下堆体含水量随堆肥化时间延长而下降。间歇式曝气堆肥含水量在堆肥化的前、中期都低于翻堆处理。而堆肥化的后期,间歇式曝气堆肥含水量高于翻堆处理。最终间歇式曝气比翻堆方式的堆体含水量提前 18 d 左右达到稳定状态;含水量是堆肥成功

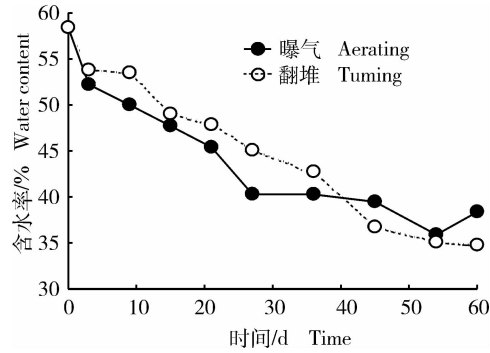


图 4 间歇式曝气和翻堆对堆肥含水量影响

Fig. 4 Effect of intermittent aerating and pile-turning treatments on water content of compost

的关键要素之一,罗维等在总结各学者的研究基础上,认为堆肥化启动时物料含水量在 50%~60%为宜^[14],而在堆肥腐熟时堆体的含水量降低,但根据堆肥物料的不同,腐熟堆肥的含水量也存在差异。本研究在堆肥结束时,间歇式曝气及翻堆的堆肥含水率分别减少到 38%和 35%,与一般堆肥腐熟后的含水量相符合^[15-17]。

2.4 间歇式曝气和翻堆对堆肥 pH 的影响

间歇式曝气与翻堆 2 种方式的堆肥, pH 在堆肥化的前期具有相似的变化趋势,均随着堆肥发酵的进行 pH 上升(图 5)。堆肥过程中 pH 上升的原因是由于堆肥物料中大量的含氮有机物质剧烈分解,产生大量氨态氮,同时,一部分有机酸氧化分解和挥发而造成的^[18]。在堆肥化中后期,间歇式曝气方式和翻堆方式的堆肥物料 pH 均下降,并在堆肥结束时 pH 分别为 7.0 和 7.5。图 5 显示了间歇式曝气和翻堆的堆肥在 pH 下降过程中呈现 2 个不同特征:一是曝气处理的 pH 低于翻堆处理 pH;二是曝气处理的 pH 下降趋势比翻堆处理提前 6 d。因堆肥物料后期的 pH 降低与物料中碳水化合物的分解相关^[6],所以 pH 可以表征堆肥的理化性质和腐熟进程。在本研究中,pH 的变化特性显示,间歇式曝气处理不仅可以加快堆肥化进程,而且其碳水化合物的分解程度更为强烈。

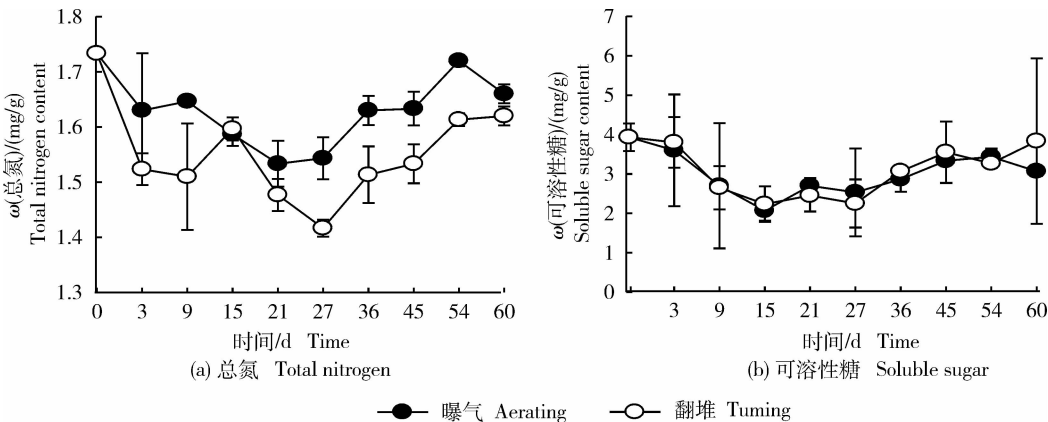


图 6 间歇式曝气和翻堆对堆肥总氮(a)及可溶性糖(b)质量分数的影响
Fig. 6 Effect of intermittent aerating and pile-turning treatments on soluble sugar and total nitrogen content of compost

2.6 堆肥重量变化

间歇式曝气和翻堆的堆肥在发酵 60 d 后,结束发酵进程,并称重量(图 7)。间歇式曝气的堆肥,在发酵之初,堆体物料重 1 021.7 kg,经过 60 d 的堆

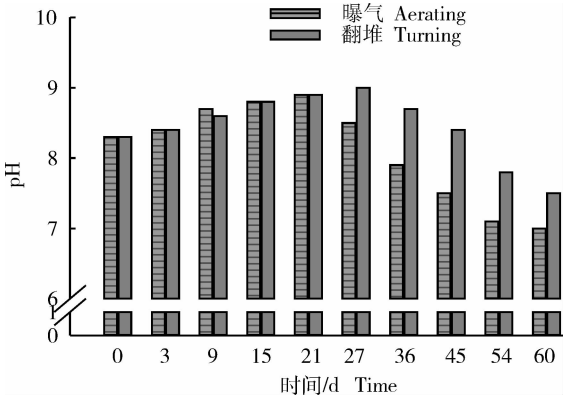


图 5 间歇式曝气和翻堆对堆肥 pH 的影响
Fig. 5 Effect of intermittent aerating and pile-turning treatments on pH value of compost

2.5 间歇式曝气和翻堆对堆肥可溶性糖及总氮含量的影响

堆肥化过程中,间歇式曝气的总氮含量高于翻堆处理(图 6(a))。堆肥结束时,间歇式曝气堆肥和翻堆堆肥的总氮含量分别为 1.66 和 1.62 mg/g。2 种处理方式的可溶性糖含量均变化趋势差异不大,均维持在较低水平(4 mg/g 左右)(图 6(b))。因此无论间歇式曝气还是翻堆,堆体内可溶性糖在微生物的作用下很难积累,而间歇式曝气与翻堆堆肥在腐熟后,堆体中总氮含量变化差别不明显。

腐后,减为 497.5 kg,减少 51.3%。而翻堆的堆肥初始重 1 032.5 kg,堆肥结束时为 571.9 kg,减少 44.6%。间歇式曝气比翻堆具有更高的有机物料损失率,这可能是曝气过程微生物活动旺盛,有机物质

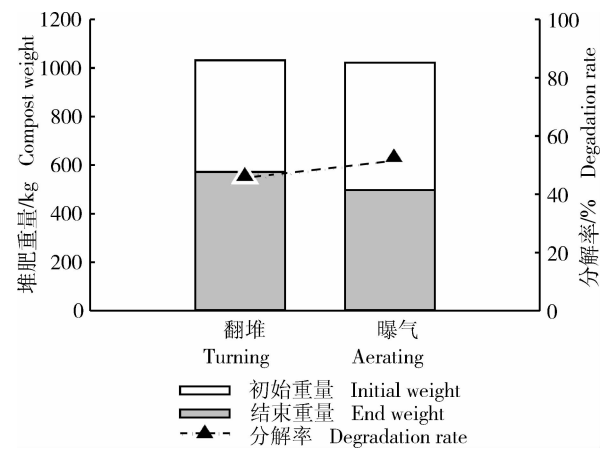


图7 间歇式曝气和翻堆的堆肥重量变化

Fig. 7 Changes of wight on intermittent aerating and pile-turning treatment

矿化比较彻底转化为CO₂等气体成分较多及代谢产生的水分大量逸出堆体而造成的^[11]。

2.7 间歇式曝气与翻堆堆肥经济成本的比较

以中国农业大学上庄试验站堆肥场的堆肥设备为基础对堆肥化过程中,翻堆及间歇式曝气的经济成本进行估算见表1。本试验由于规模较小,可采用人工翻堆模式,但大规模作业时,翻堆通常采用翻堆机进行。由于翻堆机的购买成本的限制,当堆肥生产量超过386.61 m³后翻堆方式的经济成本优势开始表现出来。因此对于小规模堆肥,间歇式曝气更显经济优势。且堆肥腐熟进程快于翻堆方式,也是隐性的提高减小经济成本。而对于大规模堆肥,翻堆方式具有良好的经济效益。

表1 间歇式曝气与翻堆堆肥经济成本的比较

Table 1 Comparing economic cost on intermittent aerating and pile-turning treatment

项目 Project	间歇式曝气 Intermittent aerating	翻堆 Turning
机械 Machine cost	曝气用空气压缩机、曝气管线 1 万元 Air compressor and pipeline;10 000 yuan	翻堆机 10 万元 Turner;100 000 yuan
能耗 Energy consumption	除第一次曝气 1 h 外,余下每次曝气 0.5 h,每天曝气 7 次,连续曝气 30 d。同时每发酵 5 d 对堆肥物料进行翻堆混拌 1 次。30 d 后每 5 d 翻堆 1 次。40 d 后每 10 d 翻堆 1 次。空压机每次曝气功率为 4 kWh。 The first aeration was 1 hour. Thereafter, the aeration was continued 30 day,7 times a day, 0.5 hour a times. Early fermentation period, every 5 days once a turn. After 40 days,every 10 days once a turn. The power of air compressor was 4 kWh. 总耗能为 4×3.5×(30+4)×(0.5+0.07)×9=422.6 kW; Total energy consumption 4×3.5×(30+4)×(0.5+0.07)×9=422.6 kW; 电费成本为 422.6×0.554 0= 234.12 元 The cost 422.6×0.554 0= 234.12 yuan	堆肥进入高温发酵即进行翻堆,30 d 内每 2 d 翻堆 1 次。30 d 后每 5 d 翻堆 1 次,40 d 后每 10 d 翻堆 1 次。翻堆机功率为 0.07 kWh。 Early fermentation period,every 2 days once a turn. After 30 days,every 5 days once a turn. After 40 days,every 10 days once a turn. The power of turner was 0.07 kWh. 总耗能为 (30/2+10/5+20/10)×0.07= 1.33 kW; Total energy consumption (30/2+10/5+20/10)×0.07=1.33 kW; 电费成本 1.33×0.554 0=0.736 8 元 The cost 1.33×0.554 0=0.736 8 yuan

注:根据北京市发展和改革委员会官方网站,北京农业生产用电:0.554 0 元/kWh(2012)。

Note:according to the official website of Beijing Municipal Development and Reform Commission,the cost of agricultural production of electricity was 0.554 0 yuan/kWh (2012).

3 结 论

1)堆肥化过程中,间歇式曝气和翻堆均可使堆

肥的堆体内氧气体积分数显著提升,但曝气结束或翻堆后,堆体内的氧气体积分数会迅速下降(翻堆约 27 min,间隙式曝气约 27 min 左右回复到无氧

状态)。

2)间歇式曝气与翻堆方式相比能够加快堆肥腐熟进程。间歇式曝气相比于翻堆处理在堆肥化过程中获得了更多的总好氧发酵时间以及厌氧发酵/好氧发酵的交替频率,使堆体温度提前 10 d 左右达到室温稳定状态。

3)间歇式曝气比连续曝气方式显著的节约能源,而比翻堆方式加快了堆肥的稳定化进程。在大规模堆肥化过程中,间歇式曝气具有经济优势,而对于大规模堆肥,翻堆方式具有良好的经济效益。

参 考 文 献

[1] 胡学玉,李学垣. 有机固体废弃物的堆肥化处理与资源化利用[J]. 农业环境与发展,2002(2):20-21

[2] 吕育财,王小芬,朱万斌,等. 木薯加工废弃物堆肥化中氰化物的降解及腐熟度的研究[J]. 环境科学,2009,30(5):1556-1560

[3] 丁文川,李宏,郝以琼,等. 污泥好氧堆肥主要微生物类群及其生态规律[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2002,25(6):113-116

[4] 陈林根,姜雪芳. 固体有机废物好氧堆肥发酵工艺概述与展望[J]. 环境污染与防治,1997,19(2):35-38

[5] 陈志强,吕炳南,于春晓,等. 城市垃圾好氧堆肥处理的几个关键问题[J]. 城市环境与城市生态,2002,15(6):45-47

[6] 王伟东,王小芬,刘建斌,等. 供氧方式及供氧量对堆肥发酵进程的影响[J]. 环境科学,2006,27(3):594-598

[7] 李国学. 不同通气方式和秸秆切碎程度对堆制效果和养分转化的影响[J]. 农业环境保护,1999,18(3):106-110

[8] LIU Jin-shan, XIE Zu-bin, LIU Gang, et al. A holistic evaluation of CO₂ equivalent greenhouse gas emissions from compost reactors with aeration and calcium superphosphate addition[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(2): 177-185

[9] 廖新伟,吴银宝. 通风方式和气温对猪粪堆肥的影响[J]. 华南农业大学学报:自然科学版,2003,24(20):77-80

[10] 杨延梅,杨志峰,张相锋,等. 底物含氮量对厨余堆肥氮素转化及其损失的影响研究[J]. 环境科学学报,2007,27(6):993-999

[11] 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):187-189

[12] 崔宗均,李美丹,朴哲,等. 一组高效稳定纤维素分解菌复合系 MC1 的筛选及功能[J]. 环境科学, 2002,23(3):36-39

[13] 黄国锋,钟流举,张振钿,等. 有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价[J]. 应用生态学报,2003,14(5):813-818

[14] 罗维, 陈同斌. 湿度对堆肥理化性质的影响[J]. 生态学报, 2004,24(11):2656-2663

[15] 钱晓雍,沈根祥,黄丽华,等. 畜禽粪便堆肥腐熟度评价指标体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2009,28(3):549-554

[16] 王丽莉,陈丽君,李国学. 堆肥含水量与腐熟度对其粉碎度的影响研究[J]. 农业工程学报,2006,22(8): 264-266

[17] 牛俊玲,崔宗均,李国学,等. 城市生活垃圾堆肥的成分变化及腐熟度评价[J]. 农业环境科学学报,2006,25(1):249-253

[18] 秦莉,李玉春,李国学,等. 城市生活垃圾堆肥过程中腐熟度指标及控制参数[J]. 农业工程学报,2006,22(12):189-194

责任编辑：苏 燕