

实验室小型好氧堆肥系统开发

夏子渊, 苟敏, 孙照勇

(四川大学 建筑与环境学院 四川 成都 610200)

摘要: 实验室好氧堆肥反应系统具有规模小、操作简便的特点。然而, 由于规模较小, 在实验室中很难成功进行堆肥过程模拟。小型好氧堆肥反应系统容易受到外界条件的影响, 如自发产热量较少和热损失较大, 从而导致温度无法升高或无法达到堆肥所需的最适温度 (50-60°C)。本堆肥系统能够自动监测堆肥过程中的温度、通风量和尾气 CO₂, 并通过设置程序控制, 在温度无法满足堆肥过程要求时进行自动补热和通风控制, 确保堆肥过程顺利进行, 避免实验失败。

关键词: 小型好氧堆肥反应器; 自动监测; 自动补热; 通风控制

The Development of Laboratory-scale Aerobic Composting System

Xia Ziyuan, Gou Min, Sun Zhaoyong

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610200, China)

Abstract: The laboratory aerobic composting system is characterized by its small scale and ease of operation. However, simulating the composting process successfully in the laboratory is difficult due to its small scale. The small-scale aerobic composting system is vulnerable to external conditions, such as low spontaneous heat production and substantial heat loss. This vulnerability can prevent the temperature from rising to or reaching the optimum temperature (50-60°C) necessary for composting. Temperature is the most direct and reliable operating parameter in the composting process. The composting system automatically monitors the composting temperature, ventilation, and CO₂ emissions. It is controlled by setting programs. When the temperature fails to meet the requirements of the composting process, the system initiates automatic heat supplementation and ventilation control to facilitate a smooth composting process and prevent experimental failures.

Keywords: small-scale aerobic composting system; automatically monitor; automatic heat supplementation; ventilation control

好氧堆肥是一种通过生物手段将有机固体废物进行处理的常用技术, 是实现固体废物稳定化、无害化和资源化的重要手段。堆肥化是指在人工控制的条件下, 依赖自然界中大量分布的细菌、真菌和放线菌等微生物的合成分解作用, 促使可生物降解的大分子有机质向稳定的小分子物质和腐殖质转化的过程, 堆肥化的产物称为堆肥。堆肥技术已被广泛地应用于处理各种有机废物, 如农业废物, 市政废物, 食品废物以及牲畜粪便^[1-4]。实验室规模的堆肥研究在优化实际生产规模的堆肥装置过程中起到了至关重要的作用^[5]。由于小型好氧堆肥反应器的局限性,

目前要成功实现实验室规模的堆肥还较为困难，其更易受外界条件影响，如自发产热量少、热损失大造成温度无法升高或无法达到堆肥所需最适温度（50-60°C）^[6]。因此本文在传统设备的基础上进行了创新改进，充分考虑了堆肥过程原理和实验室小型堆肥化实验的限制，成功研发了实验室小型好氧堆肥化系统。

1 好氧堆肥原理介绍

好氧堆肥是一种通过自然界中的大量好氧微生物在有氧气存在的条件下对有机固体废物进行分解合成，使其腐殖化的过程。在好氧堆肥过程中，微生物利用其细胞壁和细胞膜吸收和利用堆体中可溶性小分子物质；同时，它们通过分泌胞外酶来分解、吸收和利用微生物外部吸附的难溶和不溶胶体有机质。在微生物的代谢活动中，一部分有机物被吸收后会经过异化作用（氧化还原过程）分解为简单的无机物，释放能量，为生物的生长和活动提供充足的底物；另一部分有机物则通过同化作用（生物合成过程）转化为新的细胞物质，用于微生物的生长繁殖，以产生更多的生物体。图1简要地说明了这一过程。

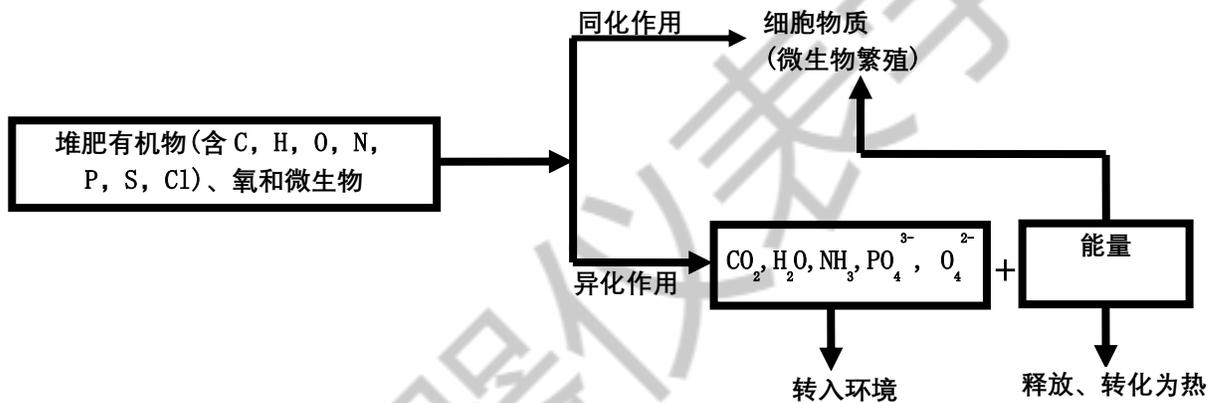
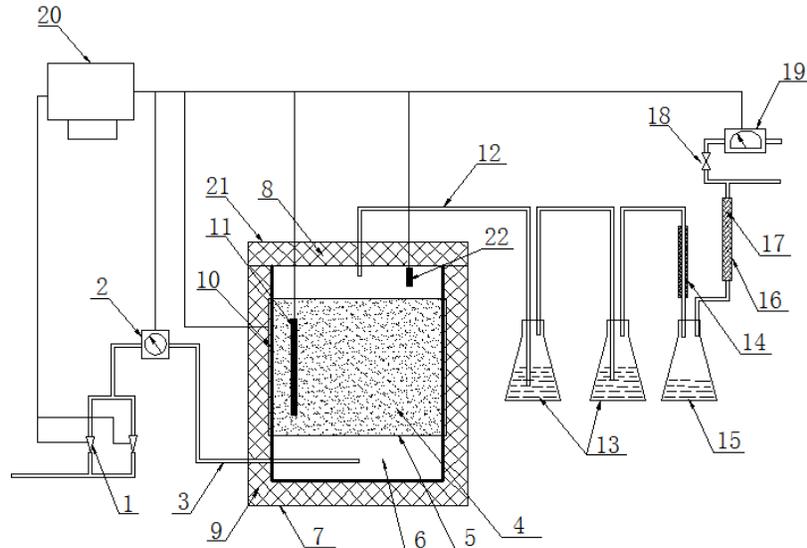


图1 堆肥有机物好氧分解示意图

2 小型好氧堆肥系统主要结构及工作原理

实验室小型堆肥化系统示意图如图2所示，主要包括（1）反应器主体；（2）强制通风系统；（3）温度控制系统；（4）尾气处理及检测系统。



1电磁阀；2气体流量计；3进气管道；4堆肥仓；5支撑（多孔）底板；6腔体；7壳体；8壳盖；9保温泡沫；10加热带；11温度传感器；12出气管道；13吸收瓶；14冷却管；15冷凝水收集瓶；16干燥管；17干燥硅胶；18球阀；19 CO₂检测器；20控制器；21保温壳

图2 实验装置示意图

反应器的主体（实物图如图3（a）所示）是一个直径约为300mm、高度约为400mm、体积约为28L的圆柱形玻璃容器，其顶部盖子可移动。电加热带有序而紧密地缠绕在玻璃反应器外壁上，通过微型计算机控制加热温度，并在反应器最外层包裹上聚苯乙烯泡沫，以减少热量损失（如图3（b）所示）。在反应器顶盖上设置了三个开孔，两侧的开孔各插入一根温度传感器，用于实时监测反应器内堆体中部和下部的温度。中心的开孔与排气管道连接，以实现通气。在距离堆肥反应器底端50mm的高度处设置了一层多孔聚氯乙烯（PVC）板，用以支撑反应器内部的堆肥原料并使空气均匀分布，避免厌氧环境的产生。在堆肥过程中，设定堆体的温度以0.5℃/h的速率从室温升至60℃的高温。如果堆体的温度上升速率低于设定的升温速率，电加热带将自动补热；如果堆体温度上升速率高于设定的升温速率，电加热带将自动停止加热。在维持60℃高温3天后，加热系统关闭，电加热带停止加热，堆体温度自然下降至中温35℃。在此温度下，加热系统控制以保持稳定，直到堆肥结束。需要注意的是，升温速率、高温温度、维持时间以及中温温度均可根据需要进行修改。反应器排出的气体通过2%硫酸溶液（w/v）吸收，以去除氨气。随后，经过干燥硅胶去除水蒸气，气体进入红外分析仪检测产出气体中的二氧化碳含量（如图3（c）所示）。在堆肥全过程中，空气压缩机以恒定的速率向反应器输送气体。温度传感器和红外分析仪均连接到微电脑，使其能够自动检测和记录堆肥过程中堆体温度、环境温度以及二氧化碳产生量，并将这些数据保存至系统中（如图3（d）所示）。



(a) 反应器主体

(b) 反应器主体内部



(c) 尾气处理及监测系统

(d) 系统控制器面板

图3 实验装置实物图

3 实验设计与数据分析

3.1 实验设计

本实验选取水稻秸秆作为主要原料，与高氮辅料餐厨垃圾按 3:1 的添加比例（按干重比）混合，进行为期 51 天的混合共堆肥。在混合物料中，含水率被调节至约 60%，随后添加总质量的 10% 成熟堆肥，作为此次好氧堆肥的微生物来源。实验总共取 3 kg 混合均匀的物料放入堆肥反应装置中。堆肥过程中，前 4 次翻堆每隔 4 天进行一次，16 天之后改为每 7 天翻堆一次。空气压缩机以恒定的速率（ $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ -干重）向反应装置内供给空气。设定堆体的温度从室温以 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速率逐渐升温至 60°C ，并在 60°C 维持 3 天。之后，加热系统自动关闭，堆体温度降至 33°C 并维持在该温度，直至堆肥结束。

3.2 数据分析

温度是决定堆肥系统微生物活性和堆肥进程的关键因素^[8]。图 4 展示了堆肥过程中堆体温度（R1）的变化情况。在堆肥的初始升温阶段，堆体的升温速率为 $0.80^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ ，高于反应器设定的升温速率 $0.50 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ ，表明温度的上升主要是由堆体自身有机物质降解产生的热量引起的。

高温期 ($\geq 60^{\circ}\text{C}$) 持续 107 小时, 超过了 72 小时, 符合 Zhang & He^[9]对高温期 ($>55^{\circ}\text{C}$) 需达到不少于 72 小时以杀灭其中病原菌的要求, 同时也满足有机肥无害化卫生标准。

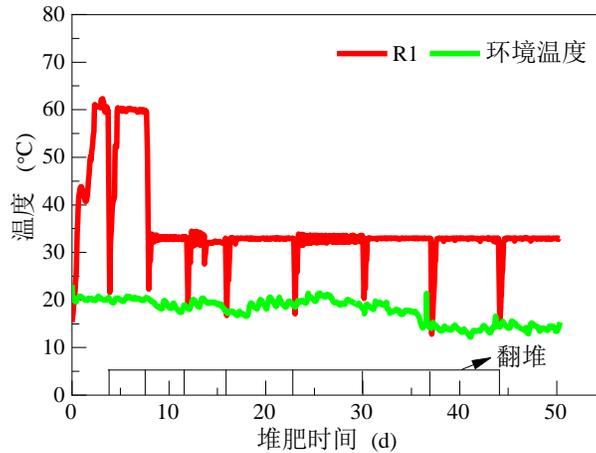
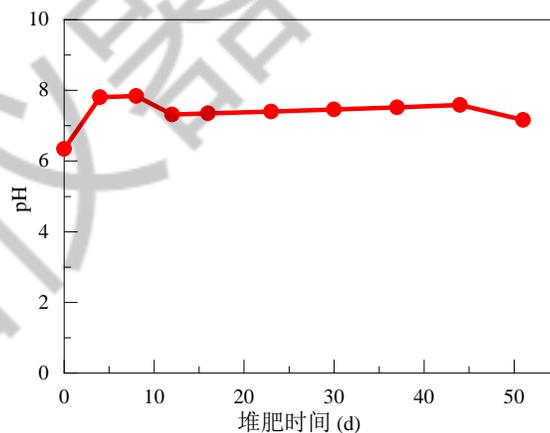


图4 水稻秸秆堆肥过程中堆肥温度的变化

在堆肥过程中, pH 值在前 4 天显示出明显的增加趋势, 在经过 8 天后逐渐降低, 并在随后保持稳定 (图 5)。前期 pH 的快速增加可能与易降解的有机酸等酸性物质降解, 以及含氮有机物降解产生 NH_4^+ 有关^[10]。随着 NH_3 的释放, 堆肥体系的 pH 逐渐降低, 并最终稳定在中性范围内, 符合无害化处理的要求^[11]。

堆肥过程中电导率 (EC) 的变化如图 6 所示。电导率是评价堆肥产品施用于土壤安全性的重要参数之一。如图所示, 电导率在堆肥过程中基本保持不变, 最终产品的电导率为 $1.71\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。电导率的变化可能与 NO_3^- 和 NH_4^+ 的浓度变化有关, 一般认为电导率在 $4.0\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下即可满足施用于土壤的要求^[12]。



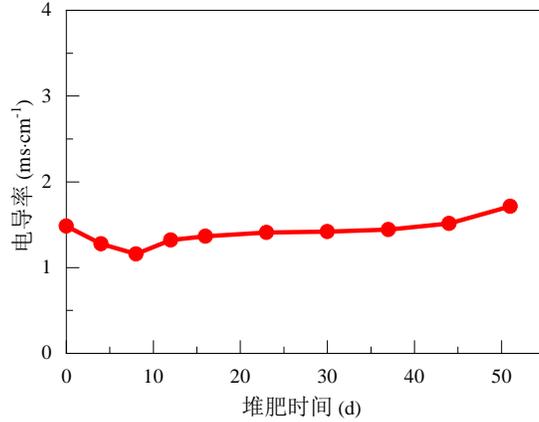
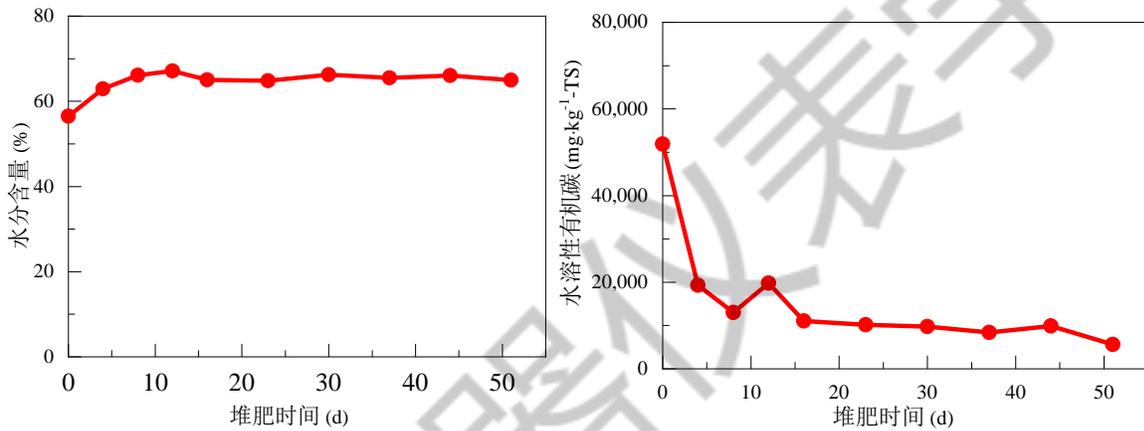


图 5 水稻秸秆堆肥过程中 pH 的变化

图 6 水稻秸秆堆肥过程中 EC 的变化

在堆肥过程中，整体含水率保持在 60%左右（图 7），处于相对适宜的条件，能够满足堆肥所需的湿度。水溶性有机碳（S-TOC）在堆肥的高温期间迅速减少，随后缓慢降至 5,598.21mg·kg⁻¹-TS（图 8）。堆肥原料中的餐厨垃圾含有大量小分子可溶性有机物，导致 S-TOC 较高，但由于这些物质易于降解，在堆肥开始后迅速被消耗，导致 S-TOC 的快速降低。



7 水稻秸秆堆肥过程中含水率的变化

图 8 水稻秸秆堆肥过程中水溶性有机碳的变化

在经过 51 天的堆置后，最终有机物降解率为 55.54%（图 9）。如图所示，堆肥前期有机物降解率的增长速度较快，到后期降解基本停滞。这与 Wang^[13]的研究结果基本相似，主要是在堆肥前期，物料中富含易降解的蛋白质、脂肪酸等有机物，被微生物迅速利用和降解。而到了堆肥后期，物料中剩余的有机物主要是难降解的木质素类物质，因此导致降解率的增长速度减缓。

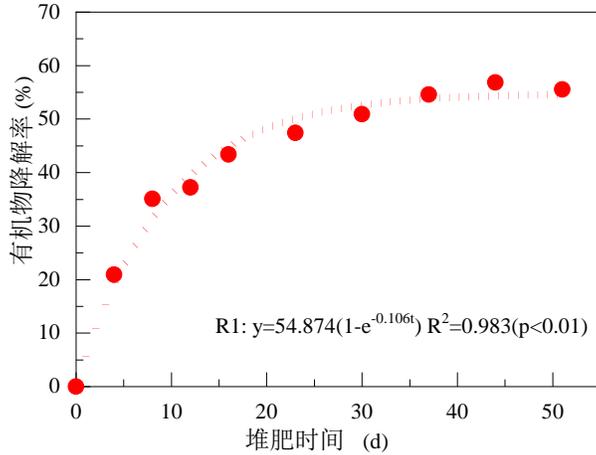


图9 水稻秸秆堆肥过程中有机物降解率的变化

本实验还监测了堆肥过程中种子发芽指数（GI）的变化，如图 10。GI 呈现先增加后降低再增加的趋势。由于餐厨垃圾中含有大量易降解的毒性物质（如多酚和有机酸），初始物料的 GI 为 0%。随着堆肥过程的进行，初始物料中的毒性物质逐渐被降解，GI 不断增加。然而，随后的降低是由于有机物的降解产生了大量毒性中间产物^[14]。最终，GI 指数达到 96.54%，满足 Zucconi 等^[15]提出的堆肥无生物毒性和完全腐熟标准（GI>80%）。

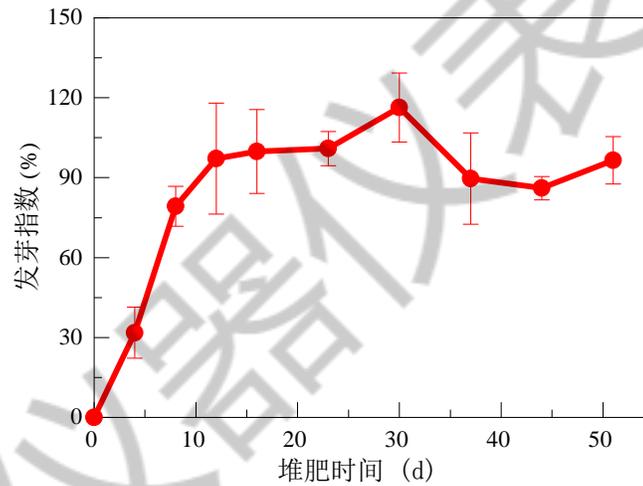


图 10 水稻秸秆堆肥过程中种子发芽指数的变化

4 结语

该小型好氧堆肥系统具有诸多优势：规模小，原料容易获取和制备（3-5kg）；实验开始后，只需简单的开盖、关盖和一键启动控制系统，操作安全且简便；温度、通气量以及尾气中 CO₂ 浓度等关键过程数据能够自动监测和记录，使用户能够实时观察、记录并判断堆肥过程是否正常进行；通过对生活垃圾、畜禽粪污、脱水污泥等进行堆肥实验，发现该系统具有卓越的重复性，且性能稳定、成本低。

参考文献:

- [1] Bernal M P, Alburquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100: 5444–5453.
- [2] Maulini-Duran C, Artola A, Font X, et al. Gaseous emissions in municipal wastes composting: effect of the bulking agent [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 172: 260–268.
- [3] Sundberg C, Yu D, Franke-Whittle I, et al. Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting [J]. *Waste Manage*, 2013, 33: 204–211.
- [4] Zhang J, Zeng G, Chen Y, et al. Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 2950–2956.
- [5] Baptista M, Silveira A, Antunes F. Theoretical analysis of the kinetic performance of laboratory- and full-scale composting systems [J]. *Waste Management*, 2012, 30: 700–707.
- [6] Chowdhury M A, Neergaard A D, Jensen L S. Prediction of changes in important physical parameters during composting of separated animal slurry solid fractions [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35: 220–231.
- [7] 赵由才,牛冬杰,柴晓利,等. 固体废物处理与资源化[M].北京:化学工业出版社,2019:147-148.
- [8] Suler D J, Finstein M S. Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, Continuously Thermophilic Composting of Solid Waste[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1977, 33(2): 345-350.
- [9] Zhang Y, He Y. Co-composting solid swine manure with pine sawdust as organic substrate[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(16): 2024-2031.
- [10] Gao M, Liang F, Yu A, et al. Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(5): 614-619.
- [11] 江娟,詹爱平,冯斌.调节渗沥液 pH 回灌对厌氧填埋的影响[J].*环境科学*,2010,31(10):2500-2506.
- [12] Sharma A, Sharma R, Arora A, et al. Insights into rapid composting of paddy straw augmented with efficient microorganism consortium[J]. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2014, 3(2): 54-280.
- [13] Wang S P, Zhong X Z, Wang T T, et al. Aerobic composting of distilled grain waste eluted from a Chinese spirit-making process: The effects of initial pH adjustment[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 778-785.
- [14]. Yang L, Zhang S, Chen Z, et al. Maturity and security assessment of pilot-scale aerobic co-composting of penicillin fermentation dregs (PFDs) with sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 204: 185-191.
- [15]. Zucconi F, Forte M, Monaco A, et al. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981,

22(4): 27-29.

中国文物学会