

# 农村庭院厨余垃圾好氧发酵设备设计与试验

于淼, 周海宾, 丁京涛, 沈玉君\*, 程红胜, 徐鹏翔, 王健,  
程琼仪, 张冬丽, 张朋月, 马双双, 张芸

(1. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125;  
2. 农业农村部资源循环利用技术与模式重点实验室, 北京 100125)

**摘要:** 针对农村庭院厨余垃圾处理设备缺乏、就地就近利用率低等问题, 该研究按照分段发酵-精准控制-一体化集成的思路, 研制了一种供农村联户或单户家庭庭院使用的厨余垃圾好氧发酵设备, 设备设置多级分仓结构, 将不同阶段物料分隔发酵和延长物料停留时间, 并集成了控制单元、渗滤液收集单元和除臭单元。以厨余垃圾为原料、以木屑为辅料, 开展了为期 20 d 的好氧发酵试验, 试验结果表明: 堆肥高温期 (55 °C) 达到 5 d, 连续发酵 20 d 后, 粪大肠杆菌检测为不大于 3.0 个/g, 蛔虫卵死亡率为 100%, 种子发芽指数为 73%, 均满足好氧发酵无害化和资源化的要求。该设备具有发酵品质高、人机交互性好、无污染气体排放等优点, 可为农村地区厨余垃圾就地就近的资源化、无害化处理及肥料利用提供技术参考。

**关键词:** 厨余垃圾; 设备; 好氧发酵; 设计与试验

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403148

中图分类号: S216

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0220-08

于淼, 周海宾, 丁京涛, 等. 农村庭院厨余垃圾好氧发酵设备设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 220-227. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403148 <http://www.tcsae.org>

YU Miao, ZHOU Haibin, DING Jingtao, et al. Aerobic fermentation equipment for kitchen wastes in rural courtyard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 220-227. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403148 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

目前, 中国农村地区生活垃圾产生量为 3 亿 t/a, 厨余垃圾占生活垃圾的 40% 以上<sup>[1-5]</sup>。由于厨余垃圾具有易酸败、臭气产生量大等特点, 不当处置会污染水体、滋生细菌, 对农村人居环境造成污染<sup>[6-7]</sup>。近年来, 国家高度重视城乡生活垃圾处理, 提出构建城乡垃圾统一收运、集中处理的垃圾处置体系, 对于偏远或交通不便的农村地区, 因地制宜的建设小型化、分散化就地就近处理设施<sup>[8]</sup>。截至 2020 年底, 城市生活垃圾收运处置体系基本全覆盖, 农村生活垃圾收运处置体系覆盖全国 90% 以上的行政村, 形成了村收集—乡转运—县处理等模式<sup>[9-10]</sup>, 处理设施主要采用规模化堆肥场或一体化反应器。随着中国城乡生活垃圾分类收集和处理的不断推进, 将逐步在农村地区推行厨余垃圾等有机废弃物源头分类处理和就近利用<sup>[11]</sup>, 亟需开发小型厨余垃圾处置设备, 为高效处理和就近还田利用提供支撑。

目前, 针对农村使用的小型厨余垃圾设备研究较少,

多是规模化处理设备。如同济大学邵立明等<sup>[12]</sup>为了解决农村地区生活垃圾处置问题, 在浙江省象山县建设一批 (机械+阳光房) 处置设施, 通过集成机械预处理耦合强化自然通风装置+阳光堆肥房, 成功解决了传统堆肥房堆体供氧不充分、升温慢等问题。但该设备存在占地面积大, 发酵周期长等问题, 主要适用于规模化堆肥。为实现厨余垃圾在农村庭院中就地处理利用, 余培斌等<sup>[13]</sup>研制了一种家用小型太阳能堆肥箱, 箱体有效容积 200 L, 包括太阳能集热、好氧发酵仓、通风、尾气处理等模块, 设备可放置在菜园中, 轻便易于移动, 能将渗滤液和臭气收集后排放。为提高发酵效率, SAKARIKA 等<sup>[14]</sup>设计一种家庭餐厨垃圾就地处理的新型滚筒堆肥装置, 通过优化内栏式刮板结构, 提高了搅拌效率, 实现餐厨垃圾减量 60% 以上。尽管这些设备均能实现农村生活垃圾就地资源化利用的目的, 但多数连续式进料的设备均为单一发酵仓结构, 不能有效分离生料和熟料, 发酵物料腐熟程度不均, 影响发酵产物质量。

针对这些问题, 本研究根据农村庭院厨余垃圾产生特点和利用需求, 按照分段发酵-精准控制-一体化集成的思路, 开展农村庭院厨余垃圾好氧发酵设备设计研究, 通过设计多级分仓结构和控制系统, 集成原料预处理、好氧发酵、渗滤液收集、臭气处理后排放等功能, 实现提高厨余垃圾腐熟效果, 达到堆肥无害化、减量化和资源化的目的, 以期为我国农村人居环境整治提供技术装备支撑。

收稿日期: 2024-03-22 修订日期: 2024-05-22

基金项目: 现代农业产业技术体系北京市创新团队 (BAIC08-2022-FQ03);

农业农村部规划设计研究院自主研发项目 (CXTD-2021-11)

作者简介: 于淼, 研究方向为农业农村废弃物资源化利用。

Email: ym10946@163.com

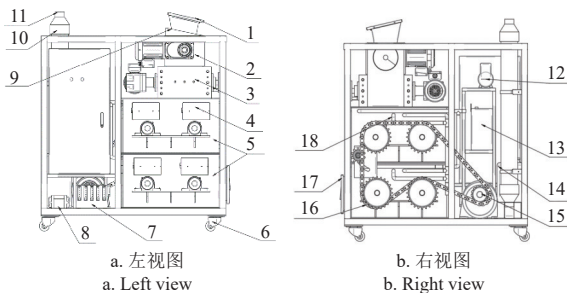
\*通信作者: 沈玉君, 研究员, 研究方向为农业农村废弃物资源化

利用。Email: shenyj09b@163.com

## 1 整体结构和工作原理

### 1.1 整体结构

农村庭院厨余垃圾好氧发酵设备整体结构如图 1 所示, 主要由箱体、预处理单元、好氧发酵单元、增温保温单元、曝气单元、渗滤液处理单元、除臭单元和控制单元组成。其中预处理单元包括脱水机、粉碎机; 好氧发酵单元包括发酵仓、减速电机、搅拌设备、投卸料口等; 增温保温单元包括保温棉、加热毯、密封盖; 曝气单元包括鼓风机、曝气管道和气体流量计; 渗滤液处理单元包括排水管、冷凝换热器、渗滤液收集罐; 除臭单元包括除臭罐、臭气收集管道; 控制单元包括 PLC 控制柜、数字显示屏。设备底部安装有导向轮, 以便于安装和移动。设备主要技术参数见表 1。



1.投料口 2.脱水机 3.粉碎机 4.观察取样口 5.发酵仓 6.导向轮 7.气体流量计 8.鼓风机 9.数字显示屏 10.除臭罐 11.排气口 12.引风机 13.冷凝换热器 14.渗滤液收集罐 15.减速电机 16.传动链条 17.卸料口 18.曝气管道  
1. Feeding port 2. Dehydrator 3. Crusher 4. Observation and sampling port 5. Fermentation tank 6. Guide roller 7. Gas flow meter 8. Blower 9. Digital display screen 10. Deodorizer tank 11. Exhaust port 12. Induced draft fan 13. Condensing heat exchanger 14. Leachate collection tank 15. Reduction motor 16. Transmission chain 17. Discharge port 18. Aeration pipe

图 1 设备结构示意图

Fig.1 Structural drawing of equipment

表 1 好氧发酵设备主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of aerobic fermentation equipment

参数 Parameter	数值 Value
处理能力 Processing capacity / (kg·d <sup>-1</sup> )	0~7
最大功率 Maximum power / kW	5.8
搅拌转速 Rotational speed / (r·min <sup>-1</sup> )	5
搅拌时间 Stirring time / min	正转 4 反转 6 停止 240
曝气量 Aeration rate / (L·min <sup>-1</sup> )	10
曝气时间 Aeration time / min	运行 1 停止 10
冷凝换热器运行时间 Operation time of condensing heat exchanger / min	始终运行
加热温度 Heating temperature / °C	第一发酵仓 (T1): 50~55
	第二发酵仓 (T2): 45~55
	第三发酵仓 (T3): 30~50
	第四发酵仓 (T4): 30~50
发酵周期 Fermentation days / d	20

### 1.2 工作原理

根据厨余垃圾产生特点和处理要求, 本设备采用连续式进料的好氧发酵工艺, 工作流程如图 2 所示。为调节厨余垃圾含水率、孔隙度和碳氮比达到适宜堆肥的状态, 参考已有研究, 可选取木屑作为堆肥辅料<sup>[15]</sup>。工作时, 每天可投放总计 7 kg (湿质量) 的厨余垃圾和辅料 (如木屑), 初始物料经过预处理单元粉碎和脱水处理

后, 进入发酵仓中发酵。在搅拌单元、曝气单元、控制单元的协同作用下, 使得发酵仓中物料处于最佳发酵环境, 促使物料快速升温发酵。腐熟物料在搅拌设备的推动作用由卸料口排出, 发酵过程中产生的渗滤液和臭气经除臭单元和渗滤液收集单元无害化处理后排放。

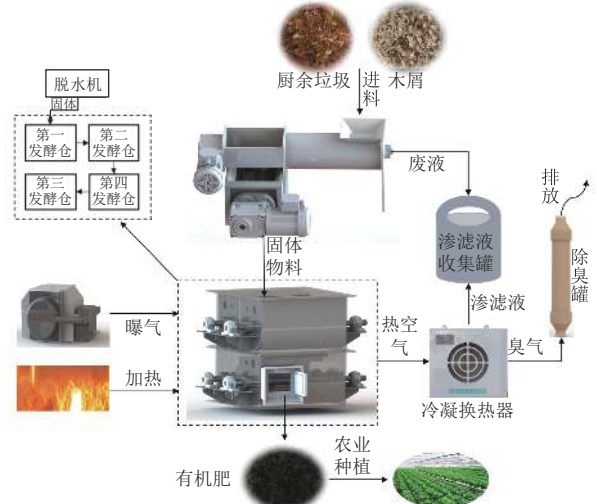


图 2 厨余垃圾好氧发酵设备工作流程图

Fig.2 Schematic diagram of the working process for kitchen waste aerobic fermentation equipment

设备启动时, 首先向发酵仓中填满物料, 每天投放新鲜物料和排出物料, 此时记作第 0 天。本设备一个发酵周期为 20 d, 从第 21 天起, 每天投放新鲜物料并排出腐熟物料。在发酵过程中, 在搅拌设备的控制下, 物料每天被推移固定距离, 逐步从第一发酵仓转送到第四发酵仓中。好氧发酵过程中对各仓物料进行温度监测, 若达不到设置的发酵温度, 启动加热毯对物料进行增温, 确保温度达到发酵要求。随着每天新鲜物料进入发酵仓内, 使得不同发酵阶段的物料在不同仓内分段发酵, 避免了生熟物料混合, 提高了有机肥品质。

## 2 关键部件设计

### 2.1 发酵仓设计

发酵仓是用于发酵、搅拌堆肥物料的主要场所, 具有保温和搅拌的功能。发酵仓上层端盖和下层侧端处分别设有投料口和卸料口, 4 个发酵仓之间设有转仓料口。发酵仓有效容积和总容积的计算分别如式 (1)、式 (2):

$$V_e = \frac{kT}{\rho} \quad (1)$$

式中  $V_e$  为发酵仓有效容积, L;  $k$  为设备每日处理量, kg/d, 为 3.3 kg/d;  $T$  为发酵天数, d, 为 20 d;  $\rho$  为堆肥原料的容重, kg/L, 测定容重为 0.7 kg/L;

$$V = \frac{V_e}{\theta} \quad (2)$$

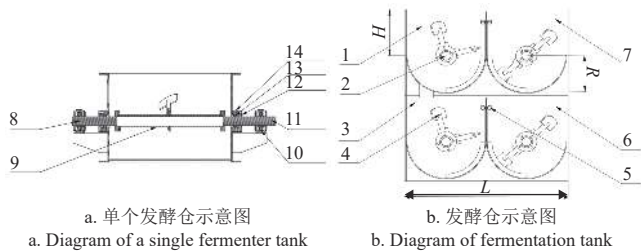
式中  $V$  为发酵仓总容积, L;  $\theta$  为发酵仓填充系数, 取 0.8; 求得  $V=117.9$ , 取发酵仓容积  $V$  为 120 L。

发酵仓设计为“U”型结构, 该结构可有效减小发

酵仓表面积, 较少热量散失, 增强保温效果。发酵仓材料为不锈钢, 为有效维持堆体温度, 发酵仓外壳采用双层结构, 中间均匀填充有 40 mm 橡塑铝箔保温棉保温材料<sup>[16]</sup>。单个发酵仓容积为发酵仓总容积的 1/4, 即:

$$\frac{V}{4} = \frac{\pi R^2 L}{2} + RHL \quad (3)$$

式中  $R$  为发酵仓内径, mm;  $L$  为发酵仓长度, mm;  $H$  为发酵仓高度, mm; 根据《搅拌与混合设备设计选用手册》<sup>[17]</sup>, 计算得单个发酵仓内径为 150 mm, 高度为 124 mm, 长为 600 mm。发酵仓结构如图 3 所示。



1. 第二发酵仓 2. 搅拌轴 3. 第三发酵仓 4. 搅拌浆叶 5. 曝气管道 6. 第四发酵仓 7. 第一发酵仓 8. 齿轮轴 (左) 9. 主轴 10. 轴承座 11. 齿轮轴 (右) 12. 盘根压盖 13. 盘根 14. 盘根座  
1. Second fermentation tank 2. Agitator shaft 3. Third fermentation tank 4. Impeller blades 5. Aeration pipe 6. Fourth fermentation tank 7. First fermentation tank 8. Gear shaft (left) 9. Main shaft 10. Bearing housing 11. Gear shaft (right) 12. Packing flange 13. Packing material 14. Stuffing box  
注:  $H$  为发酵仓高度, m;  $R$  为发酵仓内径, m;  $L$  为发酵仓长度, m。  
Note:  $H$  is the height of the fermentation tank, m;  $R$  is the radius of the fermentation tank, m;  $L$  is the length of the fermentation tank, m.

图 3 发酵仓结构简图

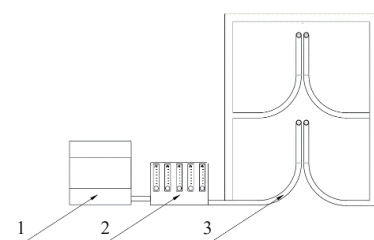
Fig.3 Structure schematic diagram of fermentation tank

## 2.2 曝气单元设计

在好氧发酵堆肥工艺中, 曝气的主要作用是供氧、降温和水分去除, 适当调节曝气量是保证堆肥品质的关键<sup>[18-19]</sup>。本设备曝气单元包括鼓风机、流量计、曝气管道等部分组成 (见图 4)。曝气量计算如式 (4):

$$Q = qM\theta \quad (4)$$

式中  $Q$  为曝气量, L/min;  $q$  为最大通风速率, 取 0.1<sup>[20]</sup>;  $M$  为厨余垃圾物料体积,  $m^3$ , 由式 (3) 可得发酵仓内可容纳的物料体积为 0.128  $m^3$ 。求得  $Q=0.01 m^3/min$ , 曝气量单位换算为 10 L/min, 设置曝气频率为曝气 1 min 间隔 10 min。



1. 鼓风机 2. 流量计 3. 曝气管道  
1. Blower 2. Flow meter 3. Aeration pipe

图 4 曝气系统结构简图

Fig.4 Structure diagram of aeration system

为实现较好的曝气效果, 沿发酵仓轴线方向布置 4 个曝气管并固定在筒体内壁上, 通风管路内径为 15 mm,

曝气孔径为 5 mm。风机运行过程中, 可通过流量计调节 4 个曝气管道通风量。

## 2.3 搅拌设备设计

搅拌的作用是均匀混合物料、提高氧气传输效率、防止物料结块。根据该发酵仓结构、原料规模小、物料流动性差等特点, 本研究采用桨叶式搅拌结构, 轴上加装搅拌叶片, 有利于物料充分混合。具体设计方法参考《搅拌与混合设备设计选用手册》<sup>[17]</sup>, 搅拌轴上设置 3 个搅拌叶片, 其中靠近进料端的两个搅拌叶片与搅拌轴之间安装夹角为 45°, 对物料有搅拌与推移的作用, 靠近出料端的搅拌叶片与搅拌轴之间安装夹角为 90°, 对物料有转仓或出料的作用。

在保证主轴结构强度的同时尽量减小主轴的质量, 主轴采用空心轴, 材料选择不锈钢 (STS304), 按不锈钢管规格选择的标准, 选用内径、外径分别为 38 和 48 mm, 长度为 600 mm。主轴上装有三组搅拌叶片, 按照发酵仓和搅拌叶片之间厨余垃圾的流动性和均匀度, 间距取为 25 mm; 结合搅拌叶片间距离设计的需求, 该搅拌轴的叶片间距取为 180 mm。

## 2.4 其他部件

### 2.4.1 控制系统

控制系统能保证设备的高效运行和精准控制, 提升人机交互体验。本系统采用闭环控制策略, 兼顾一元及多元反馈自动运行模式与手动操控模式, 以满足不同工况下灵活调控的需求。布置多组 PT100 铂电阻温度传感器, 以实现堆体温度的实时、精确捕捉。显示屏选择昆仑通态嵌入式一体化触摸屏 (TPC7022Ni), 通过 RS485 串行通讯接口与 PLC 控制器连接, 确保数据传输的稳定性和准确性。在工作中, 温度传感器不间断地将采集到的堆体温度数据发送给控制系统, 系统根据反馈数据调节通风和搅拌装置运行参数, 确保发酵设备内部环境维持在适宜物料发酵的良好状态, 有利于微生物高效地进行好氧发酵。图 5a 展示了设备参数设置界面, 用户在此界面即可完成运行模式的选择与设定、各类工艺参数的配置以及报警信息查阅; 图 5b 为设备数据监测界面, 用户在此界面完成对各发酵仓温度、能耗情况、各类异常报警信息的监测和温度参数设置。



a. 设备参数设置界面  
a. Equipment parameter setting interface  
b. 设备数据监测界面  
b. Equipment data monitoring interface

图 5 设备控制系统界面

Fig.5 Equipment control system interface

### 2.4.2 脱水设备

由于厨余垃圾含水率较高, 为保证混合发酵物料含水率, 需要对厨余垃圾进行固液分离处理。本设备采用螺旋挤压结构, 该结构能够保证预处理效果, 将物料含

水率降至 70% 以下，同时还可以降低整体设备的复杂程度和用电成本。

### 2.4.3 除臭设备

臭气处理是厨余垃圾好氧发酵处理中的关键，在好氧发酵过程中，臭气均集中在发酵仓内产生。根据《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002) 规定的有害气体限值要求，选用具有吸附功能的除臭设备，该除臭设备内部可填充活性炭、沸石、活性氧化铝等对好氧发酵过程中产生的氨气、硫化氢等恶臭气体进行物理吸附，根据除臭处理需求，确定除臭罐腔体容积为 0.057 m<sup>3</sup>，直径为 0.3 m，高为 0.8 m。

### 2.4.4 冷凝设备

本研究选取冷凝换热器对发酵仓内热空气进行冷凝，冷凝置换出渗滤液和固液分离所得废液一同进入渗滤液收集罐中等待处理。利用冷凝技术不仅能够控制发酵仓内物料的温度、水分，还解决了厨余垃圾在好氧发酵过程中发酵仓底部产生的渗滤液难收集的问题。

## 3 混料性能仿真分析

基于 EDEM 软件对设备混料性能进行仿真，分析发酵仓的设计合理性。以厨余垃圾为主要原料，选择木屑作为辅料，开展仿真试验。厨余垃圾和木屑仿真参数通过物理堆积试验与 EDEM (discrete element method, DEM) 仿真试验结合的方法标定获得，如表 2 和表 3 所示。最后参考变异系数法计算仿真物料均一性，该方法通过变异系数  $C_V$  表示物料的混合程度，计算方法见式 (5)、式 (6)，通过分析仿真网格 (5×5×5) 中颗粒数量的标准差及平均值，从而获取物料混合均匀度，变异系数越小说明物料混合越均匀。

表 2 材料属性参数

Table 2 Material Attribute Parameters

材料 Materials	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量 Shear modulus/MPa	密度 Density/ (kg·m <sup>-3</sup> )	来源 Source
厨余垃圾 Kitchen waste	0.33	5.5	800	标定
木屑 Saw dust	0.5	0.55	400	标定
不锈钢 Stainless steel	0.3	7.9	7800	文献 <sup>[21]</sup>

表 3 接触参数

Table 3 Contact Parameters

相互接触材料 Intercontact material	碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient	静摩擦系数 Static friction coefficient	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	来源 Source
厨余垃圾-厨余垃圾 Kitchen waste-kitchen waste	0.55	0.62	0.11	标定
木屑-木屑 Saw dust-saw dust	0.4	0.6	0.2	标定
厨余垃圾-不锈钢 Kitchen waste-stainless steel	0.6	0.75	0.73	标定
木屑-不锈钢 Saw dust-stainless steel	0.35	0.55	0.01	标定

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}{n}} \quad (5)$$

$$C_V = \frac{S}{X} \times 100\% \quad (6)$$

式中  $S$  为标准差； $X$  为样本均值； $n$  为样本数量； $X_i$  为第  $i$  次取样测得数据； $C_V$  为变异系数。

### 3.1 仿真参数确定

发酵仓三维模型采用 SolidWorks 2020 软件完成，将三维模型另存为 .STL 格式导入 EDEM 软件。在第一发酵仓内添加颗粒工厂并生成物料；待物料落料完成，对四个发酵仓搅拌轴和搅拌桨叶施加线性旋转“Linear Rotation”；设置固定时间步长为“Rayleigh”时间步长的 20%、数据保存间隔 0.1 s、仿真时间为 50 s。

### 3.2 结果与分析

从图 6 中可以看出：在进料完成时，厨余垃圾颗粒和木屑颗粒分层明显，主要分布在第一发酵仓；在混料完成时，两种物料逐渐混匀并分布在不同发酵仓，此时颗粒呈离散分布状态。其中，第一发酵仓和第三发酵仓中物料略多于其他发酵仓，说明物料在经过第一发酵仓和第三发酵仓时会停留更长的时间。

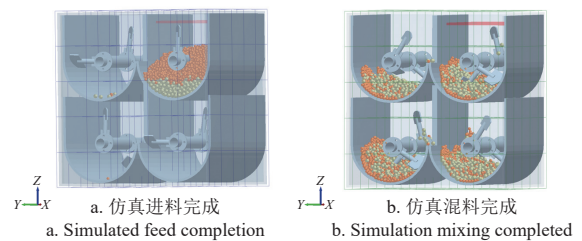


图 6 仿真混料状态前后对比

Fig.6 Simulation mixing state before and after comparison

通过变异系数法对导出数据进行计算分析，得出物料混合均匀度为 94%，物料均一性较好。在搅拌装置作用下，第一发酵仓内物料均匀转移到其余发酵仓中，证明搅拌装置对物料进行较好的推移作用，仿真模拟结果说明，发酵仓内搅拌结构可以满足发酵过程中对物料的搅拌、混合、推移需求。

## 4 性能试验

为验证厨余垃圾好氧发酵设备的发酵性能，在单机调试后，开展为期 25 天的试验。试验于 2023 年 2 月在江苏省宜兴市进行，环境温度为 7~11℃。

### 4.1 试验材料

以厨余垃圾、松木木屑为原料，厨余垃圾取自宜兴市周边村，木屑（松木）采购自江苏省徐州市，测定基本理化性质如表 4 所示。

### 4.2 试验方法

采用自主研发的农村庭院厨余垃圾好氧发酵设备进行堆肥试验（图 7），采用连续进料方式，每天厨余垃圾和木屑按照湿质量比 10:3 的比例投放进发酵仓内，设置曝气频率为每曝气 1 min，停止 10 min，曝气量为 10 L/min。固体样品分别在堆肥第 21、23、25 天取样，

取样点为设备进料端 (P1)、出料端 (P6), 第一至四发酵仓 (P2~P5) 中间端, 共计 6 个点位。采取样品置于  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  储存备用。气体检测选择便携式检测仪 (深圳红福斯科技有限公司-TionNH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>S 300G) 在第一至第四发酵仓 (P2~P5)、除臭罐排气口 (P7) 检测氨气、硫化氢的浓度。

表 4 原料理化特性

原料 Materials	pH 值 pH value	碳氮比 C/N ratio	含水率 Moisture content/%	电导率 Electrical conductivity/ (mS·cm <sup>-1</sup> )
厨余垃圾 Kitchen waste	4.3±0.2	13.7±0.3	78±0.5	1.49±0.1
木屑 Sawdust 混合物料 Mixed material	7.3±0.2	68±2.0	7±0.1	3.65±0.3
	5.7±0.2	24±0.5	62±1.0	1.9±0.1



图 7 厨余垃圾好氧发酵设备样机

Fig.7 Kitchen waste aerobic fermentation equipment prototype

### 4.3 分析与方法

堆肥过程中, 设备内发酵物料温度采用在线监测, 将温度传感器分别安置在 4 个发酵仓发酵物料中心位置, 监测发酵物料中心温度; pH、电导率 (EC 值)、碳氮比 (C/N) 和种子发芽指数 (GI 值) 取样后实验室分析测定, 测定方法参照《堆肥工程实用手册》[22]; 总养分含量 (N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O)、重金属 (如砷 As、汞 Hg、铅 Pb、镉 Cd、铬 Cr) 含量、粪大肠杆菌群数、蛔虫卵死亡率以及氯离子质量分数和杂草种子活性等有机肥腐熟度指标委托谱尼测试集团北京检验认证科学研究院有限公司检测。

### 4.4 结果分析

#### 4.4.1 堆体感官特性

堆肥物料可以用感官进行判断[23]。如图 8 所示, 厨余垃圾和木屑混合物料在发酵前呈黄褐色, 较为黏稠, 有明显臭气。经 20 d 发酵腐熟后, 物料颜色变深呈黑褐色、呈现颗粒状且质地松软, 无明显臭味。用手握后松开堆肥产品无结团现象、无液体渗出。

a. 混合物料发酵前  
a. Mixing materials before fermentation b. 混合物料发酵后  
b. Mixing materials after fermentation

图 8 物料发酵前后状态对比

Fig.8 State comparison of materials before and after fermentation

#### 4.4.2 温度变化

图 9 表明了设备的 4 个发酵仓 T1~T4 物料和室温

的变化曲线, 可以看出, T1 物料温度最高峰值为  $67\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在 20 d 的连续发酵期间, 温度始终保持在  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上, 均高于加热阈值 ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 说明 T1 物料处于发酵的升温期和高温期, 微生物生长活动旺盛[24]; T2 物料温度保持在  $50\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 此时的物料发酵还在进行中, 仅在 14 d 时因外部操作设备的原因使得温度降低, 经过加热和曝气参数调控后, T2 温度次日重新升温到  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上; 随着发酵时间的增加, 物料从 T1 推移到 T4 中, T3、T4 物料温度逐渐降低, 物料温度最后与外部加热最低温度 ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 持平。整体来看, 物料在发酵仓内温度维持在  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上时间达到 5 d, 符合《粪便无害化卫生要求》(GB 7959-2012)。

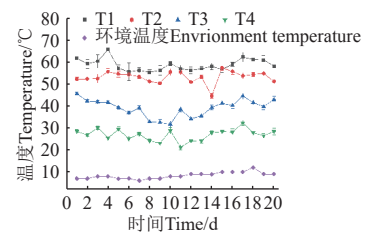


图 9 不同发酵仓内温度及室温变化趋势

Fig.9 Variation trend of temperature and environment temperature in different fermentation silos

#### 4.4.3 pH 值、EC 值变化

pH 值和 EC 值在评估物料发酵过程中起着至关重要的作用。如图 10a 所示, 物料初始的 pH 值为 5.7, 随后在发酵周期呈显著上升趋势, 最终出料端腐熟物料 pH 值稳定维持在 8.3 左右, 这一结果与刘娟等[25] 研究结果相似, 主要原因可能是有机物矿化产生了大量的铵态氮 ( $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ ), 造成 pH 值升高[26-28]。另一方面, 从图 10b 中可以看出, EC 值随着发酵时间呈逐渐上升趋势, 这可能是由于有机物分解产生了铵态氮 ( $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ ) 等含盐离子, 并且伴随着发酵过程中物料水分和质量不断减少发生了“浓缩效应”[29]。经过 20 d 发酵后, 腐熟物料最终 EC 值为  $3.26\text{ mS/cm}$ , 满足小于  $4\text{ mS/cm}$  的标准要求。

#### 4.4.4 种子发芽指数

图 10c 显示了种子发芽指数的变化趋势, 各取样点位的 GI 值整体呈现增加的趋势, 这一增长趋势可能是由于物料发酵过程中有机酸、铵态氮 ( $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ ) 等潜在有毒物质逐渐被降解释放的结果。实验结果表明, 腐熟物料的种子发芽指数为 73%, 满足出料端的腐熟堆肥的 GI 值  $\geq 70\%$  的要求, 但该数值仍低于猪粪、牛粪等其他有机废弃物堆肥产物的平均 GI 值, 可能是由于厨余垃圾原料中含盐率偏大, 对种子发芽产生了胁迫的负面影响[30-31]。

#### 4.4.5 臭气浓度

利用便携式气体检测仪对四个发酵仓内、除臭罐排气口处的有害气体浓度。从图 10d 中可以看出, 4 个发酵仓内和排气口的硫化氢气体浓度均小于  $1\text{ mg/m}^3$ , 可能是由于发酵仓中曝气较充足, 产生的硫化氢在微生物氧化作用下形成了硫酸盐。氨气的产生量在第二发酵仓内达到峰值  $20\text{ mg/m}^3$ , 高于标准值的 5 倍, 随着发酵的进程, 氨气浓度逐渐递减, 符合好氧发酵中氨气的产生

规律。排气口氨气浓度为  $1.5 \text{ mg/m}^3$ , 未检出硫化氢浓度, 满足国家标准《恶臭污染物排放标准》规定的氨气含量小于  $4 \text{ mg/m}^3$ , 硫化氢小于  $0.32 \text{ mg/m}^3$  的要求。

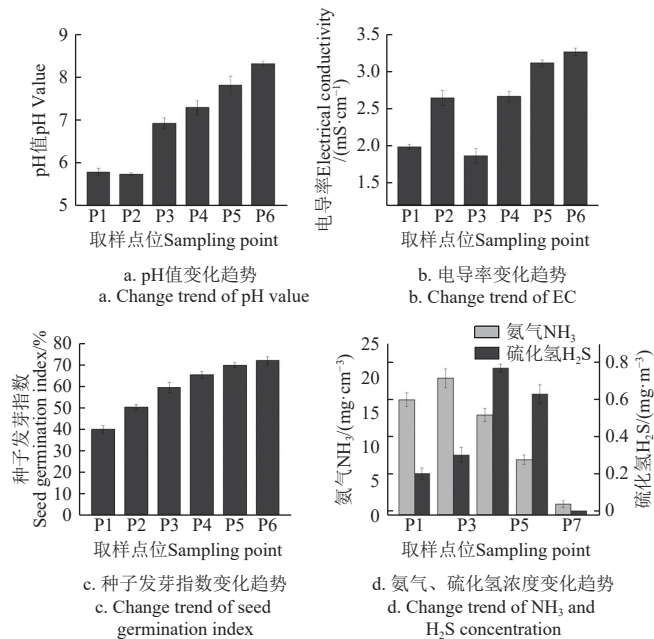


图 10 pH 值、电导率、种子发芽指数、氨气和硫化氢浓度变化趋势

Fig.10 pH value, electrical conductivity, seed germination index, NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S concentration change trend

#### 4.4.6 其余腐熟度指标

本研究参照现行农业行业标准《有机肥料》(NY/T 525-2021), 在评估有机肥的整体品质时, 对除常规腐熟度指标之外的其他参数进行测定。据表 5 可知, 厨余垃圾堆肥产品的各项关键指标均符合农业行业标准《有机肥料》(NY/T 525-2021) 的要求, 包括但不限于其总养分的质量分数、各类重金属含量、粪大肠杆菌群数以及蛔虫卵死亡率等。

表 5 其余腐熟度指标  
Table 5 Other indexes of maturity

检测指标 Detection index	测试值 Test value	标准值 Standard value
总养分质量分数 Total nutrient mass fraction/%	≥6.08	≥4.0
总砷 Total arsenic (As) / (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.3	≤15
总汞 Total mercury (Hg) / (mg·kg <sup>-1</sup> )	0.02	≤2
总铅 Total lead (Pb) / (mg·kg <sup>-1</sup> )	<2.0	≤50
总镉 Total cadmium (Cd) / (mg·kg <sup>-1</sup> )	<0.5	≤3
总铬 Total chromium (Cr) / (mg·kg <sup>-1</sup> )	146.6	≤150
粪大肠杆菌群数 Number of fecal Escherichia coli groups/(个·g <sup>-1</sup> )	≤3.0	≤100
蛔虫卵死亡数 Number of roundworm egg deaths/%	100	≥95
氯离子的质量分数 Mass fraction of chloride ion/%	2.28	—
杂草种子活性 Weed seed activity/(plant·kg <sup>-1</sup> )	0	—

## 5 结 论

1) 按照分段发酵—精准控制—一体化集成的思路, 设计了一种农村庭院厨余垃圾好氧发酵设备, 使生熟物

料分隔发酵, 提高堆肥产品质量, 实现了农村地区厨余垃圾就地处理、就近利用的需求。

2) 该设备容积为 120 L, 设备处理最大能力为 7 kg/d (湿质量), 曝气量为 10 L/min。

3) 混料性能仿真分析结果表明: 物料混合均匀度为 94%, 搅拌结构对物料具有良好的混合和推送作用。

4) 由好氧发酵试验得出, 在好氧发酵 20 d 后, 堆体高温期 (55 °C) 时间达到 5 d, 种子发芽指数 73%、重金属含量以及病原菌群数均满足好氧发酵原料无害化和资源化的要求。

### [参 考 文 献]

- 杨朝元. 添加剂对农村有机废物联合好氧堆肥腐殖化过程的影响 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.  
YANG Chaoyuan. Effects of Additives on Humification Process of Rural Organic Waste Combined Aerobic Compost [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- 李逵, 杨启志, 雷朝亮, 等. 我国利用昆虫转化有机废弃物的发展现状及前景 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(2): 453-9.  
LI Kui, YANG Qizhi, LEI Chaoliang, et al. Current situation and prospect of using insects to transform organic waste in China [J]. Chinese Journal of Environmental Entomology, 2017, 39(2): 453-9. (in Chinese with English abstract)
- 刘雅萍. “三圈理论”视角下农村生活垃圾治理困境及优化路径研究—以浙江省湖溪镇为例 [D]. 无锡: 江南大学, 2023.  
LIU Yanping. The Dilemma of Rural Domestic Waste Management From the Perspective of "Three Circles Theory" and Study on the Optimization Path—take Huxi Town of Zhejiang Province as an Example [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- 强敬雯, 王晚晴, 唐曼玉, 等. 厨余垃圾厌氧消化对沼气微生物及环境的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(6): 159-169.  
QIANG Jingwen, WANG Wanqing, TANG Manyu, et al. Effects of anaerobic digestion of kitchen waste on biogas microorganisms and environment [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(6): 159-169. (in Chinese with English abstract)
- 何莹莹, 闵柏林, 向远昆, 等. 胞外聚合物对电场辅助好氧堆肥有机物转化的影响 [J]. 中国环境科学, 2024, 1-10.  
HE Yingying, MIN Bolin, XIANG Yuankun, et al. Effect of extracellular polymers on organic matter conversion during electric field-assisted aerobic composting [J]. China Environmental Science, 2024, 1-10. (in Chinese with English abstract)
- 施童, 陈杰, 元传仁, 等. 农林废弃物对厨余垃圾堆肥腐殖化的影响与微生物驱动机制 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 191-201.  
SHI Tong, CHEN Jie, YUAN Chuanren, et al. Effects of agricultural and forestry wastes on humification and its microbially driven mechanisms in kitchen waste composting [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(13): 191-201. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈文旭, 刘逸飞, 蒋思楠, 等. 微生物菌剂对厨余垃圾堆肥温室气体减排的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 181-187.  
CHEN Wenxu, LIU Yifei, JIANG Sinan, et al. Mitigation Effects of Microbial Agents on Greenhouse Gas Emissions From Kitchen Waste Composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(23): 181-187. (in Chinese with English abstract)
- [8] 住房和城乡建设部等六部门联合印发《关于进一步加强农村生活垃圾收运处置体系建设管理的通知》[J]. 工程建设标准化, 2022, (6): 13, 7.
- [9] 沈玉君. 探索适宜农业农村特点的生活垃圾处理利用之路[J]. 农村工作通讯, 2021(24): 54.
- [10] 加强农村生活垃圾收运处置体系建设管理持续改善农村人居环境—《关于进一步加强农村生活垃圾收运处置体系建设管理的通知》解读 [EB/OL]. 2022-05-29. [https://www.gov.cn/zhengce/202212/content\\_6715635.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202212/content_6715635.htm).
- [11] MO J, XIN L, ZHAO C, et al. Reducing nitrogen loss during kitchen waste composting using a bioaugmented mechanical process with low pH and enhanced ammonia assimilation[J]. Bioresour Technol, 2023, 372: 200-207.
- [12] 邵立明, 崔广宇, 廖南林, 等. 农村多源易腐垃圾机械预处理-强化自然通风阳光房堆肥技术及示范工程[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(2): 107-109.
- [13] 余培斌, 陈建新, 李彦武. 一种家用小型太阳能堆肥箱的设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 121-125.  
YU Peibin, CHEN Jianxin, LI Yanwu. Design of a Domestic Small Solar Composting Box[J]. Food and Machinery, 2018, 34(9): 121-125. (in Chinese with English abstract)
- [14] SAKARIKA M, SPILLER M, BAETENS R, et al. Proof of concept of high-rate decentralized pre-composting of kitchen waste: Optimizing design and operation of a novel drum reactor [J]. Waste Management, 2019, 91: 20-32.
- [15] 刘英杰, 李琬婷, 王海候, 等. 锯末添加量对餐厨废弃物生物干化效率和细菌群落的影响 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 208-216.  
LIU Yingjie, LI Wanting, WANG Haihou, et al. Effects of sawdust addition on bio-drying efficiency and bacterial community of food waste [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 39(15): 208-216. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙晓曦, 马双双, 韩鲁佳, 等. 智能型膜覆盖好氧堆肥反应器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 240-245.  
SUN Xiaoxi, MA Shuangshuang, HAN Lujia, et al. Design and test on lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 240-245. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈志平. 搅拌与混合设备设计选用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 78-131.
- [18] 侯善策, 沈玉君, 王惠惠, 等. 农村户用厕污堆肥反应器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 237-242.  
HOU Shance, SHEN Yujun, WANG Huihui, et al. Design and experiment of composting reactor for household toilet waste in rural areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 237-242. (in Chinese with English abstract)
- [19] LASHERMES G, BARRIUSO E, VILLIO-POITERNAUD M L, et al. Composting in small laboratory pilots: Performance and reproducibility[J]. Waste Management, 2011, 32(2): 271-277.
- [20] KASINSKI, SLOTA M, MARKIWSKI M, et al. Municipal waste stabilization in a reactor with an integrated active and passive aeration system[J]. Waste Management, 2016, 50(31): 15-16.
- [21] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: Accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129(1): 298-306.
- [22] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 67-90.
- [23] 冯康, 赵立欣, 孟海波, 等. 序批式好氧发酵一体化反应器的研制与验证[J]. 环境工程学报, 2018, 12(8): 395-402.  
FENG Kang, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Development and verification of integrated reactor with sequencing batch aerobic fermentation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(8): 395-402. (in Chinese with English abstract)
- [24] 焦洪超, 张洪芳, 栾炳志, 等. 不同通风量对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 173-177.  
JIAO Hongchao, ZHANG Hongfang, LUAN Bingzhi, et al. Effects of ventilation on aerobic composting of swine feces[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 173-177. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘娟, 沈玉君, 罗文海, 等. 盐含量对餐厨垃圾好氧堆肥腐殖化过程及微生物演变的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 190-201.  
LIU Juan, SHEN Yujun, LUO Wenhai, et al. Effects of salt content on the humification and microbial community succession of food waste aerobic composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(19): 190-201. (in Chinese with English abstract)
- [26] 鲁耀雄, 崔新卫, 龙世平, 等. 有机物料不同配比堆肥过程的差异分析[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(3): 587-593.  
LU Yaoxiong, CUI Xinwei, LONG Shiping, et al. Analysis of different composting processes of organic materials with different proportions[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(3): 587-593. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李世清, 吕丽红, 付会芳, 等. 土壤氮素矿化过程中非交换铵态氮的变化[J]. 中国农业科学, 2003(6): 663-670.  
LI Shiqing, LV Lihong, FU Huifang, et al. Changes of non-exchange ammonium nitrogen during soil nitrogen

- mineralization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003(6): 663-670. (in Chinese with English abstract)
- [28] XU Z, XU W, ZHANG L, et al. Bacterial dynamics and functions driven by bulking agents to mitigate gaseous emissions in kitchen waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332(12): 17-65.
- [29] 朱新梦, 董雯怡, 王洪媛, 等. 堆肥方式对氮素损失和留存的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(16): 97-104.  
ZHU Xinmeng, DONG Winyi, WANG Hongyuan, et al. Effects of composting methods on nitrogen loss and retention[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(16): 97-104. (in Chinese with English abstract)
- [30] 沈伟航, 宋亦心, 曹俊, 等. 厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣中试共堆肥系统效果评估[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(10): 216-223.
- SHEN Weihang, SONG Yixin, CAO Jun, et al. Evaluating co-composting of kitchens, greening wastes, and exhausted tea on a pilot scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(10): 216-223. (in Chinese with English abstract)
- [31] 周海宾, 刘娟, 丁京涛, 等. 采用 EEM-FRI 方法研究黑曲霉对牛粪堆肥腐熟及纤维素降解影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 276-286.  
ZHOU Haibin, LIU Juan, DING Jingtao, et al. Effects of aspergillus niger on maturation and cellulose degradation of cow manure compost by em-fri method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(1): 276-286. (in Chinese with English abstract)

## Aerobic fermentation equipment for kitchen wastes in rural courtyard

YU Miao, ZHOU Haibin, DING Jingtao, SHEN Yujun<sup>\*</sup>, CHENG Hongsheng, XU Pengxiang, WANG Jian, CHENG Qiongyi, ZHANG Dongli, ZHANG Pengyue, MA Shuangshuang, ZHANG Yun

(1. *Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering Planning & Design, Beijing 100125, China*; 2. *Key Laboratory of Technology and Model for Cyclic Utilization from Agricultural Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China*)

**Abstract:** Aerobic composting is one of the primary steps for the resource utilization and harmless treatment of rural kitchen waste. The treatment device of food waste is ever increasingly needed for single or multiple households, as the development of separate waste collection and promotion of on-the-spot organic waste disposal and utilization. In this study, an aerobic composting device was designed to consider segmented fermentation for composting material, precise aeration and turning control, and multi-function integration. According to the four-stage aerobic composting, four chambers of sequential fermentation were utilized to achieve the separate fermentation of materials in different stages for the harmless treatment of the product. This integrated system also incorporated the agitation apparatus, aeration equipment, control devices, leachate collection mechanisms, and odor control systems. Continuous feeding was employed to introduce the kitchen waste and sawdust daily at a wet-to-weight 10:3. The aeration strategy was set at one minute of aeration every 10 min, and an aeration rate of 10L/min. The stirring frequency was positive for 4 min, reverse for 6 min, and stop for 240 min. The mixing performance simulation and composting experiment were conducted using kitchen waste and pine sawdust as the feedstock. In the simulation test: a fermentation tank and material particle model were constructed and calibrated the simulation parameters of kitchen waste and pine sawdust. The mixing state was simulated to explore the effect of kitchen waste and pine sawdust in four fermentation tanks using the discrete element simulation software EDEM. The mixing degree was calculated for the two kinds of materials in the fermentation tank using the coefficient of variation. The working performance of the equipment was verified in the test. In the composting experiment, solid samples were collected on days 21, 23, and 25 of the composting process, termed as the feeding port (P1), discharge port (P6), and the mid-sections of the first to fourth fermentation tanks (P2 to P5). Physical and chemical properties were determined for the maturity indices of the fermented products. The gas samples were analyzed using portable gas detectors to measure the concentrations of ammonia (NH<sub>3</sub>) and hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) within the first, second, third, and fourth fermentation chambers, as well as at the outlet of the deodorization unit (P7). The results show that the mixing uniformity of materials in the fermentation bin was about 94%, which fully met the requirement that the mixing degree of fermentation materials reached 90%. Furthermore, the color of the fermented material was gradually darkened, the unpleasant odor gradually dissipated, and the fermented material was loose and granular after aerobic fermentation. The compost experienced a high-temperature phase exceeding 55 °C reached 5 d, and following 20 d of continuous fermentation. The number of fecal coliforms reached the hygienic safety standard. And egg mortality rate reached 100% for *Ascaris lumbricoides*. The seed germination index was 73%, fully meeting the requirements of the National Standard for Organic Fertilizer (NY/T 525-2021). In summary, continuous composting and independent fermentation control can be expected to effectively enhance the quality of the fermentation product in different stages. This research can also provide technical references for local resource utilization, fertilizer application, and harmless disposal of kitchen waste in rural regions.

**Keywords:** kitchen waste; equipment; aerobic fermentation; design and test