

连续式好氧发酵智能装备设计与试验

罗娟^{1,2} 张沛祯^{1,2} 冯晶^{1,2} 朱本海^{1,2} 赵立欣^{1,2} 邢广青³
张宇^{1,2} 郭文杰³

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;
2. 农业农村部华北平原农业绿色低碳重点实验室, 北京 100081;
3. 北京市昌平区农业机械化技术推广站, 北京 102299)

摘要: 针对农业园区、种养基地等蔬菜尾菜、畜禽粪污等农业废弃物处理不及时、发酵效率低的问题,设计了一种高效连续式好氧发酵智能装备,由自动上料、破碎脱水、轴向推流搅拌、分层可控曝气、渗滤液回流、尾气净化及智能温控等组成,核心发酵仓采用多仓室串联结构,有效容积为 1.67 m³,日处理能力不小于 110 kg/d。通过特制桨式搅拌机实现物料混匀、破碎与轴向推进,依次完成升温、高温与腐熟 3 阶段的连续发酵。装备集成分层独立可控曝气、底部电加热保温、菌剂喷洒与渗滤液回流喷淋装置,并通过基于 PLC 智能控制系统对温度、湿度、氧浓度等参数进行实时监测与联动反馈控制,保障发酵过程稳定高效。以蔬菜尾菜、小麦秸秆和牛粪为原料开展连续运行试验,结果表明装备可实现物料的梯级发酵与连续进出料,运行性能稳定;发酵过程堆体温度快速升至 50℃ 以上,最高达 64.23℃;发酵产物含水率降至 35%~40%,有机质降解率最高达 45.10%,种子发芽指数稳定 80% 以上,电导率降至 1.54~1.96 mS/cm。研究结果表明,该装备能高效降解有机物、去除植物毒性,达到腐熟标准,且自动化与智能化水平显著优于传统批式发酵装备,适应连续生产场景。

关键词: 农业废弃物;连续式好氧发酵;智能装备;梯级发酵

中图分类号: S141.4; X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0361-08 OSID: 

Design and Test on Intelligent Equipment of Continuous Aerobic Composting

Luo Juan^{1,2} Zhang Peizhen^{1,2} Feng Jing^{1,2} Zhu Benhai^{1,2} Zhao Lixin^{1,2} Xing Guangqing³
Zhang Yu^{1,2} Guo Wenjie³

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
2. Key Laboratory of Green and Low-carbon Agriculture in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China
3. Beijing Changping Agricultural Mechanization Technology Extension Station, Beijing 102299, China)

Abstract: In response to issues such as untimely treatment and low fermentation efficiency of agricultural wastes such as vegetable residues and livestock manure generated in agricultural parks and farming bases, a high-efficiency intelligent equipment of continuous aerobic composting was designed. The equipment comprised systems for automatic feeding, crushing and dewatering, axial-flow mixing, layered controllable aeration, leachate recirculation, exhaust gas purification and intelligent temperature control. The core composting chamber adopted a multi-compartment series structure with an effective volume of 1.67 m³ and a designed daily processing capacity of more than 110 kg/d. A specially designed paddle mixer ensured uniform mixing, crushing and axial propulsion of the materials, facilitating continuous composting through three periods: heating period, thermophilic period and cooling period. The equipment integrated independently controllable layered aeration, bottom electric heating and insulation, microbial agent spraying, and leachate recirculation sprinkling devices. Real-time monitoring and coordinated feedback control of parameters such as temperature, humidity, and oxygen concentration were implemented through a PLC-based intelligent control system, ensuring stable and efficient operation.

收稿日期: 2026-01-30 修回日期: 2026-02-28
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002100)和现代农业产业技术体系北京市创新团队项目(BAIC08-2026)
作者简介: 罗娟(1986—),女,高级工程师,博士,主要从事农业废弃物资源化利用技术装备研究,E-mail: luojuan@caas.cn
通信作者: 赵立欣(1967—),女,研究员,博士,主要从事农业废弃物资源化利用研究,E-mail: zhaolixin@caas.cn

Continuous operation tests using vegetable residues, wheat straw and cattle manure as raw materials demonstrated that the equipment achieved graded fermentation and continuous feeding/discharging with stable performance. During composting, the pile temperature rapidly rose above 50℃, reaching a maximum of 64.23℃. The final product achieved the moisture content of 35% ~ 40%, the organic matter degradation rate reached up to 45.10%, the seed germination index remained stable above 80%, and the electrical conductivity dropped below 1.54 ~ 1.96 mS/cm. The results indicated that the equipment effectively degraded organic matter, removed phytotoxicity, met maturation standards, and exhibited significantly higher levels of automation and intelligence compared with traditional batch composting equipment, making it suitable for continuous production scenarios.

Key words: agricultural waste; continuous aerobic composting; intelligent equipment; graded fermentation

0 引言

近年来,随着我国农业种植、畜禽养殖规模化集约化发展,蔬菜尾菜、秸秆、畜禽粪污等农业废弃物产生量持续增加,每年蔬菜尾菜产生量超过 $4.3 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$, 秸秆产生量超过 $8.5 \times 10^8 \text{ t}^{[2]}$, 畜禽粪污产生量约 $3.05 \times 10^9 \text{ t}^{[3]}$, 因此资源利用已成为推动农业绿色发展的关键环节。好氧发酵是实现有机废弃物稳定化、无害化与资源化的关键技术,在农业废弃物处理领域应用广泛^[4-6]。目前,国内外学者围绕好氧发酵工艺优化^[7-8]、微生物群落调控^[9-10]、反应器结构设计^[11-13]等方面开展了较多研究,并取得一系列进展。姚玉梅等^[14]设计了层式好氧发酵装备,物料从顶部进料,采用偏心翻转下料机构,堆肥 28 h 温度可达 50℃;李骅等^[12]对滚筒式堆肥反应器的通风搅拌系统进行优化设计,堆体最高温度可达 69.56℃。总体看,好氧发酵装备在实际工程中应用已较为成熟^[15],根据处理原料特点及规模不同,主要分为筒仓式、槽式、滚筒式、螺旋输送式等类型。然而,传统好氧发酵装备在实际生产中仍存在生产效率低、过程控制粗放、产品质量不稳定等问题,现有装备多以批次发酵为主,采用“同进同出”的作业模式,且装备自动化与智能化水平有限,对温度、氧气浓度、相对湿度等关键参数的精准在线监测与闭环控制不足,难以适应农业园区、养殖场等场景下废弃物连续产生、及时处理的现实需求,制约了该技术在现代农业生产中规模化、高效化应用。

连续式好氧发酵技术具有处理效率高、占地小、过程可控性强、产物质量高等优势,正成为农业废弃物资源化利用的重要发展方向。基于此,为满足农业园区种植养殖废弃物连续产生、亟需高效发酵处理的现状需求,以提升连续式好氧发酵装备的运行稳定性、处理效率与全过程自动化水平为核心目标,本文通过优化设计轴向推流搅拌结构,研发供风与加热一体化的可控温曝气系统,集成菌剂精准喷洒

与渗滤液回流喷淋装置,并配套开发基于多参数反馈的智能过程调控系统,研制一套多仓室串联、功能集成的连续好氧发酵智能装备。装备具备自动上料、粉碎脱水、机械强化搅拌、可控调温、分层曝气等多重功能。通过实际物料发酵试验,验证装备运行的稳定性、可靠性与物料发酵效果,以期为推动好氧发酵装备技术升级、促进农业废弃物高质量循环利用提供技术支撑。

1 发酵装备设计与工作原理

1.1 整体结构设计

连续式好氧发酵智能装备主要由自动上料、破碎脱水、发酵仓、搅拌、强制曝气、可控调温等装置组成,并配有菌剂喷洒与渗滤液回流喷淋、尾气净化和控制系统,如图 1 所示。装备长为 3.51 m,宽为 3.35 m,高为 1.68 m,主体框架结构由碳钢焊接组成并采用防腐工艺,破碎脱水装置、发酵仓等与物料直接接触的部件采用 304 不锈钢,发酵仓外敷硅酸铝保温板,设备外层罩壳采用碳钢喷塑工艺。智能装备的发酵仓通过隔板分隔为 3 个串联仓室,上部连通,当物料达到预设高度时,在搅拌装置推动下翻越隔板依次进入下个仓室。为保障低温条件下发酵效率,装备配套可控加热系统,于发酵仓底部安装电加热管(主要布置于进料仓),外壁设置保温层;通过控制系统实时监控各仓温度并可独立设定,发酵中后期可根据需要启动加热,以补偿因除臭、曝气等造成的热量损失。同时,为强化发酵效果,提高传热传质效率,设计分层曝气系统,于发酵仓侧面不同高度设置分组曝气孔,各仓室具备独立曝气功能,曝气管道设节流阀以调节进气量;曝气风机采用变频控制,功率 0.75 kW,流量 40 ~ 70 m³/h,安装于物料粉碎脱水电机上方,通过高压气管连接曝气室。发酵智能装备还配置了光氧除臭装置,发酵后尾气经引风机强制通入,经净化处理后排出。

连续式好氧发酵智能装备处理工艺流程如图 2

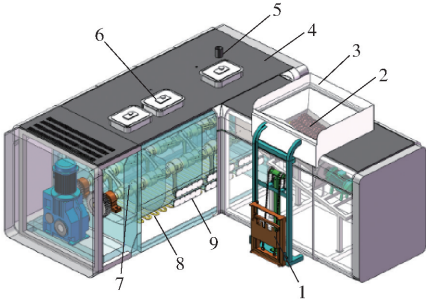


图 1 连续式好氧发酵装备整体结构

Fig. 1 Structure of intelligent equipment of continuous aerobic composting

1. 自动上料装置 2. 破碎脱水装置 3. 料斗 4. 发酵仓 5. 排风口
6. 观察窗 7. 搅拌装置 8. 可控调温装置 9. 强制曝气装置

所示,主要环节包括:①蔬菜尾菜、秸秆等农业废弃物清塑除杂后,投入收集桶,运输至处理区。②上料桶经上料装置提升至装备顶端的进料口,进入破碎系统。③破碎后物料进行螺旋挤压脱水,废水进入储液罐,部分用于物料发酵过程含水率调节,其余进入酸化罐经酸化处理后制备液肥。④脱水的固态物料输送至好氧发酵仓内,经微生物发酵腐熟,控制系统根据发酵温度智能控制曝气、搅拌、喷淋;冬季或必要时启动加热,维持发酵所需温度。⑤腐熟后物料打开出料仓门即可自动出料,可用于农业种植、园区绿化等。⑥启动时每天连续进料,达到满负荷运行后每天进料的同时出料。智能装备负压运行,发酵尾气经处理后达标排放。该装备可大幅度提高处理效率,缩短发酵周期,发酵参数更易于控制和稳定,提高发酵产物品质。

连续式好氧发酵智能装备的发酵仓有效容积计算式为

$$V_0 = kV \tag{1}$$

式中 V_0 ——发酵仓有效容积, m^3
 k ——发酵仓容积率
 V ——发酵仓总容积, m^3

连续式好氧发酵智能装备的发酵仓尺寸为长 2.00 m、宽 1.08 m、高 1.13 m,计算得发酵仓截面积为 1.19 m^2 ,总容积约为 2.38 m^3 ,考虑到搅拌装置安装以及通风需求等因素,发酵仓容积率 k 取 0.7,计算得发酵仓有效容积约为 1.67 m^3 。

连续式好氧发酵智能装备日处理量计算式为

$$M_d = \frac{V_0 \rho}{T(1-f)} \tag{2}$$

式中 M_d ——日处理量, kg/d
 ρ ——物料堆积密度,取 600 kg/m^3
 T ——发酵停留时间,d
 f ——设备脱水率,取 25%

根据发酵仓有效容积,计算得装备日处理量为 111.33 kg/d ,能满足农业园区农业废弃物的日常处理需求。

1.2 工作原理

连续式好氧发酵智能装备通过“分区连续发酵、动态梯级传质、智能反馈调控”的协同作用,实现多元农业废弃物的高效稳定转化。主体发酵仓由隔板分隔为 3 个串联的仓室,构成连续的动态发酵空间。物料经破碎和脱水等预处理后进入 I 仓(进料仓),仓内设置横推流搅拌装置,在对物料混合搅拌的同时产生轴向推力,推动物料翻越隔板依次进入 II 仓(主发酵仓)、III 仓(腐熟仓),最终腐熟产物由出料口排出。分层曝气系统根据各仓室发酵阶段精准调节通风量与位置,确保氧气供给均匀与充足;渗滤液回流喷淋与菌剂喷洒装置调控物料含水率和微生物活性。可控加热系统在装备启动初期或环境温度较低时,可快速提升物料温度;3 个仓室上部连通设计与由底部向顶部强制通风,形成自下而上的热气流通道,预热新加入物料,促使物料从升温期快速进入高温期,缩短好氧发酵启动时间,实现热量的高效利用,显著降低能耗。智能控制系统通过传感器联动控制曝气、搅拌、喷淋、加热等单元,使工艺参

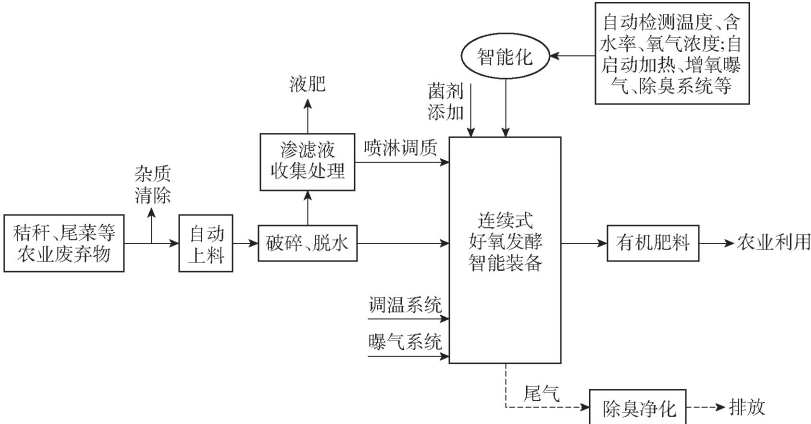


图 2 连续式好氧发酵工艺流程

Fig. 2 Process flowchart of intelligent equipment of continuous aerobic composting

数维持在最佳区间。

1.3 搅拌装置设计

连续式好氧发酵智能装备的核心部件之一为搅拌装置,具有混匀物料、传质传热和推动物料轴向流动等作用。搅拌装置常见型式有旋桨式、涡轮式、桨式和锚框式等类型,经比选后采用桨式搅拌器。如图 3 所示,搅拌桨叶与中心轴通过抱箍和键装配固定,便于拆装和维护;桨叶与水平面呈 5°~10°倾角,兼具搅拌与物料横向推送功能;通过变频调控和正反转控制,实现物料充分搅拌,提升发酵效率。桨叶沿中心轴圆周方向成 120°均匀布置,在对物料充分搅拌的同时,降低轴向转矩,提高工作可靠性。考虑智能装备为连续进料,好氧发酵初期载荷大,物料黏度较高、流动性差且易出现板结,搅拌桨叶作为直接接触部件易发生应力集中。采用 Solidworks 软件的 Simulation 插件对桨叶进行静应力仿真分析,分析桨叶长度、材料厚度等关键设计参数对强度和变形情况的影响,并结合实际情况评估搅拌桨叶的性能和可靠性,结果如图3所示。搅拌桨叶受到最大

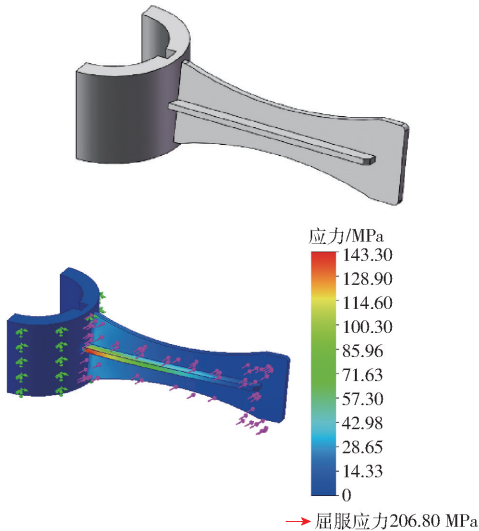


图 3 搅拌桨叶结构及强度分析

Fig.3 Structural and strength analysis of stirring propeller blade

弯曲应力为 143.30 MPa,校核得桨叶屈服应力为 206.80 MPa,应力集中于桨叶根部与抱箍连接处,所受应力小于屈服应力,物料搅拌过程桨叶受力在安全范围内,最小安全系数大于 1.4,结构设计合理可靠。

1.4 控制系统设计

连续式好氧发酵智能装备控制系统可实现一元及多元反馈控制。图 4 为智能装备控制系统主界面,可实时监测各工艺流程状态,获取堆体温度、湿度、氧浓度等。控制系统采用 PLC 全自动控制和手动控制备用模式,其中,PLC 系统具备自动判断设备常规故障和报警提示的功能,并在互联网覆盖区域内实现计算机和智能手机的远程监控及操作。

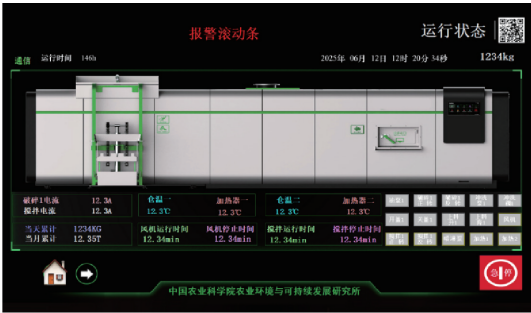


图 4 控制系统主界面

Fig.4 Main interface of control system

2 性能试验

2.1 试验设计

采用自主设计研发的连续式好氧发酵智能装备开展性能试验。试验原料为北京市昌平区辛庄村农业园区产生的蔬菜尾菜,小麦秸秆购自潍坊优顺环保科技有限公司,牛粪取自北京市顺义区某养牛场,以及自行复配的微生物菌剂(添加量 0.02%)。好氧发酵时,首先将蔬菜尾菜经装备粉碎挤压后含水率降至 60%~65%,按质量比为 4:1:1 添加秸秆和牛粪,使混合物料碳氮比为 (20~25):1。发酵原料基本理化特性如表 1 所示。

表 1 发酵原料基本理化特性

Tab.1 Basic physicochemical properties of raw materials

原料	含水率/%	有机质含量/(g·kg ⁻¹)	总氮含量/(g·kg ⁻¹)	总碳含量/(g·kg ⁻¹)	碳氮比
蔬菜尾菜	83.14±0.20	80.24±0.54	20.32±0.21	394.12±0.12	19.40
小麦秸秆	9.87±0.05	89.05±0.32	7.45±0.13	401.46±0.26	53.89
牛粪	62.49±0.14	72.16±0.47	20.12±0.26	349.05±0.52	17.35

混合物料经上料系统输送至发酵仓内进行好氧发酵,通过智能控制系统自动调控搅拌和曝气。发酵装备从空仓开始运行,每日连续进料 100 kg,约第 9 天达到满负荷,然后保持稳定运行,每天 14:00 进

料并同步出料,总共连续运行 30 d。使用装备配备的温度传感器实时采集各仓内物料的温度。好氧发酵装备运行后,每 2 d 取样 1 次,分别从 I 仓、II 仓和 III 仓的上、中、下 3 点取出固体样品,混匀作为代

表性样本,储藏于温度 -20°C 冰箱中用于理化指标测定。

总氮参照 NY/T 525—2021《有机肥料》采用凯氏定氮法测定^[16],总有机碳采用马弗炉灼烧法测定有机碳含量^[17],铵态氮、硝态氮参照 NY/T 1116—2014《肥料 硝态氮、铵态氮、酰胺态氮含量的测定》测定^[18],pH 值、EC 采用 pH/EC 测量仪 (PHS-25 型,上海雷磁仪器有限公司,中国)进行测定。种子发芽指数 (GI) 测定和计算方法参照 NY/T 525—2021《有机肥料》^[16],取待测液 5 mL 于铺有滤纸的培养皿中,均匀放置 10 粒小白菜种子,在培养箱中,于 $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 恒温黑暗条件下培养 48 h,共设置 3 个重复。

2.2 结果与讨论

试验数据采用平均值和标准差表示,利用 Excel 2016 软件对原始数据进行统计分析。

2.2.1 好氧发酵过程温度、含水率和 pH 值变化

(1) 温度

温度是反映微生物活动和堆肥进程的核心指标^[19]。如图 5a 所示,智能装备 3 个发酵仓室的堆体温度差异较大,分别对应升温期、高温期和降温期 3 个阶段^[20]。好氧发酵启动后,Ⅰ仓温度迅速升高,在 4 d 内达到 50°C 以上,随后在 $45 \sim 55^{\circ}\text{C}$ 范围内波动;Ⅱ仓物料温度最高,在 $55 \sim 65^{\circ}\text{C}$ 范围内波动,最高达 64.23°C ,该阶段嗜热微生物活性最强,有利于纤维素、半纤维素等难降解有机物的分解^[21],同

时,高温期产生的热量会杀死有害病原体和杂草种子等。Ⅲ仓温度降至 $36 \sim 46^{\circ}\text{C}$,表明有机物降解基本完成,堆体进入腐熟稳定期。各仓温度稳定且边界清晰,证明装备的分区设计和温控系统有效实现了物料的梯级发酵。

(2) 含水率

含水率直接影响好氧发酵过程的传质传热效率和微生物活性^[22]。如图 5b 所示,随着发酵进程推进,物料含水率从Ⅰ仓的 $62\% \sim 68\%$ 逐渐降至Ⅲ仓的 $35\% \sim 40\%$ 。Ⅰ仓含水率较高易导致物料结块,通过搅拌曝气系统有效避免厌氧区域形成;Ⅱ仓含水率 ($52\% \sim 58\%$) 处于微生物最适范围,配合高温条件显著提升降解效率;Ⅲ仓低含水率 ($<40\%$) 表明水分蒸发和有机质降解充分,符合腐熟标准。各仓含水率的稳定控制体现了装备在降低物料含水率方面的优势。

(3) pH 值

pH 值影响微生物对营养物质的吸收,可反映堆肥环境^[23]。如图 5c 所示,整个好氧发酵过程 pH 值维持 $6.5 \sim 8.5$ 理想范围。Ⅰ仓 pH 值较低 ($6.5 \sim 7.0$) 与有机酸积累有关;Ⅱ仓 pH 值升至 $7.5 \sim 8.2$,主要是由于含氮物质的氨化作用^[24];Ⅲ仓 pH 值略微回落 ($7.2 \sim 7.8$),与铵态氮的挥发和硝化作用相关。各仓 pH 值稳定且呈梯度变化,说明装备通过调控发酵环境促进了微生物群落的有序演替。

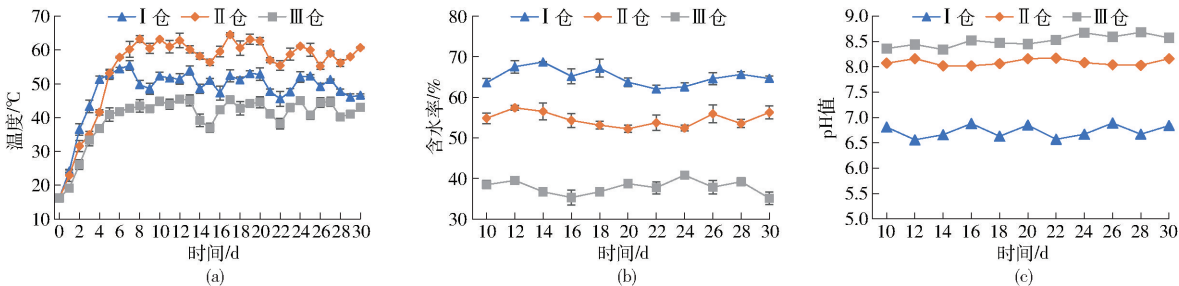


图 5 发酵过程温度、含水率和 pH 值变化

Fig.5 Changes of temperature, moisture content, and pH during composting process

2.2.2 堆体有机质和氮素转化

有机质降解率可直接反映好氧发酵效果^[25]。由图 6a 可知,物料的有机质含量从Ⅰ仓的 $75\% \sim 81\%$ 显著降至Ⅲ仓的 $48\% \sim 52\%$,总降解率达 45.10% 。降解主要发生在Ⅰ仓和Ⅱ仓(占总降解量的 82.3%),与高温期微生物活性增强密切相关。Ⅲ仓有机质趋于稳定,表明难降解组分(如木质素)的分解基本完成。这种降解规律与陈海滨等^[26]研究的堆肥特征一致,说明装备在促进有机物分解方面具有高效性。

氮素作为堆肥重要的营养元素,也是评价堆肥

效果的重要指标。图 6b、6c 为铵态氮 (NH_4^+-N) 和硝态氮 (NO_3^--N) 含量变化,总体看,不同发酵仓内 NH_4^+-N 含量呈先上升后下降趋势, NO_3^--N 呈不断上升趋势。在好氧发酵前期,由于温度较高且微生物活动较强,大量含氮物质在氨化菌作用下转化为铵态氮,Ⅰ仓和Ⅱ仓的 NH_4^+-N 含量升高,最高达 $1\,168.05\text{ mg/kg}$;随着发酵进行,由于含氮物质减少及硝化细菌的硝化作用,将 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N ,Ⅲ仓的 NH_4^+-N 含量降低至 $855 \sim 876\text{ mg/kg}$,同时 NO_3^--N 含量增加至 $364 \sim 393\text{ mg/kg}$ 。这种转化趋势与文献^[27-28]研究结果相符,验证了装备具有较

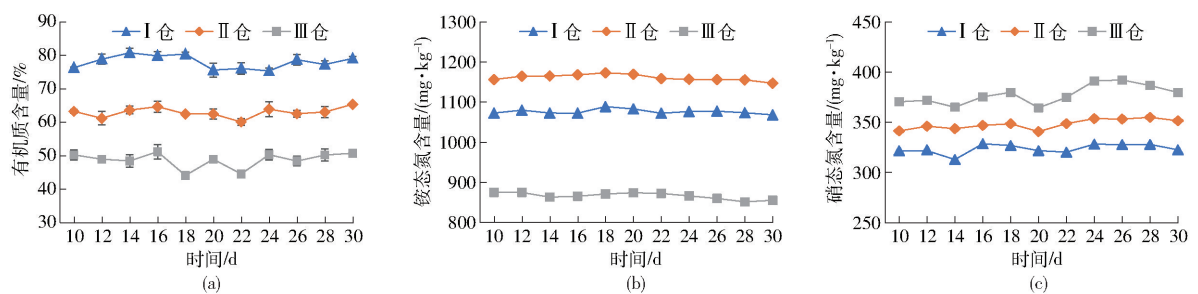


图6 发酵过程有机质和氨氮变化

Fig. 6 Changes of organic matter and ammonia nitrogen during composting process

好的氮素保持优势。

2.2.3 植物毒性指标

(1)电导率

电导率(Electrical conductivity, EC)是堆体盐度的指标,通常认为 EC 小于 4 mS/cm 满足堆肥无害化需求^[29]。由图 7a 可知,好氧发酵过程 EC 大致呈先上升后下降趋势。随着物料中有机质的快速分解、大量水溶性矿物质和微分子有机酸的释放,堆体 EC 不断上升,Ⅱ仓 EC 达到 3.34 ~ 3.68 mS/cm。进入腐熟期后,在氨的挥发与硝化、盐分的生物固定与沉淀等作用下,EC 逐渐下降,Ⅲ仓物料 EC 降至 1.54 ~ 1.96 mS/cm,表明发酵过程通过氨挥发和微生物固定等作用实现了盐分调控,满足农用标准。

(2)种子发芽指数

种子发芽指数(Germination index, GI)是评估堆肥生物毒性、腐熟度与无害化程度的重要生物学指标^[30]。根据有机肥料标准要求^[16],当 GI ≥ 70% 时,即可认定堆肥已充分腐熟且无植物毒性。如图 7b 所示,随着好氧发酵进行,物料 GI 值不断升高,从Ⅰ仓的 27.25% ~ 37.24% 显著提升至Ⅲ仓的 82.10% ~ 88.04%,稳定 80% 以上,Ⅰ仓因有机酸等抑制物质含量较高,对种子萌发抑制作用强,GI 处于最低水平;进入Ⅱ仓后,随着有机酸降解及植物毒性物质总量减少,GI 显著升高;至Ⅲ仓出料时,GI 已稳定大于 80%,表明有机酸、氨等植物毒性物质被有效去除,装备发酵后物料已经达到腐熟且无植物毒性。

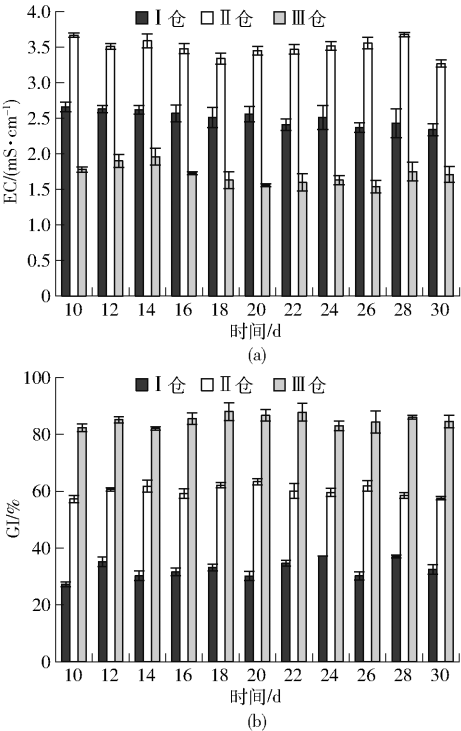


图7 好氧发酵过程 EC 和 GI 变化

Fig. 7 Changes of EC and GI during composting process

3 结论

(1)设计了一种连续式好氧发酵智能装备,采用“三仓串联-卧式搅拌-梯级传质”的主体结构,通过轴向推流搅拌装置实现物料的混合、破碎与推进,依次完成升温、高温与腐熟 3 阶段连续发酵。装备集成分层可控曝气、电加热保温、菌剂定量喷洒与渗滤液回流喷淋系统,并配备基于 PLC 的智能控制系统,实现温度、相对湿度、氧气浓度等关键参数的实时监测与联动控制,保障了发酵过程的高效与稳定。

(2)试验结果表明,对蔬菜尾菜、秸秆等多元农业废弃物的处理效果良好。发酵产物最终含水率降至 35% ~ 40%,有机质降解率最高达 45.10%,GI 稳定 80% 以上,EC 降至 1.54 ~ 1.96 mS/cm,符合有机肥料行业标准的腐熟度要求。装备运行稳定,可实现连续进出料,适应规模化处理需求。

(3)装备具有自动化程度高、能耗较低、操作简便等特点,尤其适用于农业园区、种植基地等持续产生有机废弃物的场景,为提升农业废弃物资源化利用的智能化与工程化水平提供了技术装备支撑。

参 考 文 献

[1] 罗娟,赵立欣,于佳动,等.我国蔬菜废弃物利用研究进展[J].中国瓜菜,2024,37(3):1-8.
Luo Juan, Zhao Lixin, Yu Jiadong, et al. Advances on utilization of vegetable waste in China[J]. China Cucurbits and

- Vegetables, 2024, 37(3):1–8. (in Chinese)
- [2] 霍丽丽,姚宗路,赵立欣,等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1):349–359.
Huo Lili, Yao Zonglu, Zhao Lixin, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):349–359. (in Chinese)
- [3] 刘东旭,陈国双,鲁新蕊,等. 不同粪源好氧堆肥过程中养分变化及温室气体排放特征[J]. 北方园艺, 2024(11):70–78.
Liu Dongxu, Chen Guoshuang, Lu Xinrui, et al. Greenhouse gases emissions and nutrient changes during aerobic composting with different manure sources[J]. Northern Horticulture, 2024(11):70–78. (in Chinese)
- [4] 张宇,姚宗路,冯晶,等. 农业废弃物堆肥对微塑料降解效果的研究进展[J/OL]. 高校化学工程学报, 2026–01–16.
<https://link.cnki.net/urlid/33.1141.TQ.20260116.1111.003>.
- [5] 徐晓峰,田燕娇. 堆肥替代化肥对冬小麦产量、农学及环境效益的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2025, 46(1):80–87.
Xu Xiaofeng, Tian Yanjiao. Effects of compost replacing chemical fertilizers on yield, agronomic and environmental benefits of winter wheat[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 46(1):80–87. (in Chinese)
- [6] 陈咄咄,张珂宇,申锋. 农村多源有机固体废弃物协同好氧堆肥技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(4):841–855.
Chen Peizhen, Zhang Keyu, Shen Feng. Advances in aerobic co-composting of multi-source organic solid wastes in rural areas[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2026, 45(4):841–855. (in Chinese)
- [7] 赵世溦,程琼仪,孟海波. 不同通风工艺对猪粪好氧堆肥腐熟效果的影响[J]. 环境工程, 2023, 41(增刊2):1242–1246.
Zhao Shihao, Cheng Qiongyi, Meng Haibo. Effects of different ventilation techniques on the decomposition effect of aerobic composting of pig manure[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2):1242–1246. (in Chinese)
- [8] 霍凯丽,常瑞雪,李彦明,等. 辣椒秸秆快速高温好氧堆肥工艺研究[J]. 中国蔬菜, 2019(2):58–62.
Huo Kaili, Chang Ruixue, Li Yanming, et al. Studies on rapid high temperature aerobic compost technology of pepper stalk[J]. China Vegetables, 2019(2):58–62. (in Chinese)
- [9] Wang S P, Gao Y, Sun Z Y, et al. Thermophilic semi-continuous composting of kitchen waste: performance evaluation and microbial community characteristics[J]. Bioresource Technology, 2022, 363:127952.
- [10] Wang Haichao, Zheng Xiaowei, Guo Dong, et al. Extended thermophilic phase promotes fungal-bacterial collaboration to facilitate humification in batch-fed composting[J]. Environmental Research, 2025, 284:122281.
- [11] 王涛,姚爱萍,徐锦大,等. 小型多层塔式堆肥反应器的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(8):68–73.
Wang Tao, Yao Aiping, Xu Jinda, et al. Design and test of small multilayer tower composting reactor[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(8):68–73. (in Chinese)
- [12] 李骅,朱振明,王居飞,等. 滚筒式堆肥反应器通风搅拌系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5):395–404.
Li Hua, Zhu Zhenming, Wang Jufei, et al. Design and test of aeration and mixing system for rotary composting reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5):395–404. (in Chinese)
- [13] 石博,程琼仪,沈玉君,等. 风管加设导流板对牛粪堆肥效果和微生物群落的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12):240–249.
Shi Bo, Cheng Qiongyi, Shen Yujun, et al. Effects of ventilation pipe deflectors on cattle manure composting efficiency and microbial community dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(12):240–249. (in Chinese)
- [14] 姚玉梅,张琦峰,曾庆臻,等. 集约化层式好氧发酵智能装备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1):445–452.
Yao Yumei, Zhang Qifeng, Zeng Qingzhen, et al. Design and test on intelligent equipment of intensive layered aerobic composting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1):445–452. (in Chinese)
- [15] 袁兴茂,范国昌,陈林,等. 畜禽粪便高温快速发酵装备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊1):413–418.
Yuan Xingmao, Fan Guochang, Chen Lin, et al. Design and experiment of high temperature and rapid fermentation equipment for livestock and poultry excrement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1):413–418. (in Chinese)
- [16] NY/T 525—2021 有机肥料[S].
- [17] Mei J, Li B, Su L, et al. Effects of potassium persulfate on nitrogen loss and microbial community during cow manure and corn straw composting[J]. Bioresource Technology, 2022, 363:127919.
- [18] NY/T1116—2014 肥料 硝态氮、铵态氮、酰胺态氮含量的测定[S].
- [19] Ebrahimi M, Gholipour S, Mostafaii G, et al. Biochar-amended food waste compost: a review of properties[J]. Results in Engineering, 2024, 24:103118.
- [20] Morales A B, Bustamante M A, Marhuenda F C, et al. Agri-food sludge management using different co-composting strategies: study of the added value of the composts obtained[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 121:186–197.
- [21] Ajmal M, Shi A, Awais M, et al. Ultra-high temperature aerobic fermentation pretreatment composting: parameters optimization mechanisms and compost quality assessment[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4):

105453.

[22] Zhu L, Zhao Y, Chen S, et al. Alternating ventilation accelerates the mineralization and humification of food waste by optimizing the temperature-oxygen-moisture distribution in the static composting reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 393: 130050.

[23] 张曦, 孟海波, 刘文杰, 等. 蔬菜废弃物与畜禽粪便联合好氧发酵挥发性有机物排放特征[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 193 – 199.

Zhang Xi, Meng Haibo, Liu Wenjie, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds during vegetable residues and livestock manure combined aerobic fermentation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(22): 193 – 199. (in Chinese)

[24] 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 CSAE*, 2022, 38(19): 190 – 201. (in Chinese)

[25] Sun S, Guo C, Wang J, et al. Effect of initial moisture content, resulting from different ratios of vegetable waste to maize straw, on compost was mediated by composting temperatures and microbial communities at low temperatures[J]. *Chemosphere*, 2024, 357: 141808.

[26] 陈海滨, 谢宗汉, 肖可可, 等. 农村易腐垃圾静态堆肥初步研究: 以福建省明溪县胡坊镇为例[J]. *环境卫生工程*, 2022, 30(5): 45 – 50.

Chen Haibin, Xie Zonghan, Xiao Keke, et al. A preliminary study of static aerobic composting of rural perishable waste: a case study in Hufang Town, Mingxi County, Fujian Province[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2022, 30(5): 45 – 50. (in Chinese)

[27] Sun S S, Guo C, Wang J Y, et al. Effect of initial moisture content, resulting from different ratios of vegetable waste to maize straw, on compost was mediated by composting temperatures and microbial communities at low temperatures[J]. *Chemosphere*, 2024, 357: 141808.

[28] 韩冰, 霍丽丽, 赵立欣, 等. 麦秸猪粪添加对蔬菜废弃物堆肥过程的影响研究[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(7): 172 – 181.

Han Bing, Huo Lili, Zhao Lixin, et al. Effects on the composting process of vegetable waste with adding wheat straw and pig manure[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2025, 38(7): 172 – 181. (in Chinese)

[29] Santos C, Goufo P, Fonseca J, et al. Effect of lignocellulosic and phenolic compounds on ammonia, nitric oxide and greenhouse gas emissions during composting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 548 – 556.

[30] 黄光群, 黄晶, 张阳, 等. 沼渣好氧堆肥种子发芽指数快速预测可行性分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 177 – 182.

Huang Guangqun, Huang Jing, Zhang Yang, et al. Feasibility analysis of rapid prediction of seed germination index during digestate aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 177 – 182. (in Chinese)