doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.062

卧旋式生物有机肥发酵罐翻堆工艺设计与试验

叶大鹏[1,2]　赵熠威[1,2]　黄德耀[1,2]　林炜域[3]　周蓓蓓[4]　曾阳灿[5]

(1. 福建农林大学机电工程学院, 福州 350002; 2. 福建省农业信息感知技术重点实验室, 福州 350002;
3. 福建农林大学乡村振兴学院, 福州 350002; 4. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;
5. 福建省机械科学研究院, 福州 350005)

摘要: 设计了一款物料可翻堆的卧旋式生物有机肥发酵罐,为获得最优有机肥腐熟品质及效率的翻堆工艺参数,以 Hertz－Mindlin with JKR 作为物料与设备间的离散元接触模型,利用离差系数评价其混合均匀度。试验表明,当发酵罐转罐 2 r 时物料基本混合均匀,故将单次转罐翻堆的频次设置为 2 r,在 4 种分阶段变频次的翻堆模式下,对发酵物料含水率、温度、腐熟度进行分析,结果表明,采用模式 4(升温期不翻堆,高温期每天翻堆 1 次,保温期每天翻堆 1 次,翻堆处理 7 d 后静置陈化至 15 d)得到的最高发酵温度可达 68.4℃,有机肥处理的萝卜种子发芽指数为 107.6%,达到腐熟要求且发酵过程稳定可靠。研究结果可为生物有机肥的制备提供装备及工艺支撑,保证有机肥腐熟品质,有效解决目前发酵工艺不明确的问题。

关键词: 卧旋式生物有机肥发酵罐; 翻堆; 混合均匀度; 离散元; 工艺试验

中图分类号: X713　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0662-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Horizontal Rotating Bioorganic Fertilizer Fermentation Tank Flipping Process

YE Dapeng[1,2]　ZHAO Yiwei[1,2]　HUANG Deyao[1,2]　LIN Weiyu[3]　ZHOU Beibei[4]　ZENG Yangcan[5]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China*
2. *Fujian Key Laboratory of Agricultural Information Sensoring Technology, Fuzhou* 350002, *China*
3. *College of Rural and Revitalization, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China*
4. *Institute of Water Resourses and Hydroelectric Engineering, Xi' an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*
5. *Fujian Academy of Mechanical Sciences, Fuzhou* 350005, *China*)

Abstract: In order to obtain the optimal composting process parameters of organic fertilizer decomposition quality and efficiency, Hertz－Mindlin with JKR was used as the discrete element contact model between the material and the equipment, and according to the simulation results of particle distribution, the material mixing during tank rotation was simulated and calculated by EDEM 2022 R1 software, and the difference of material mixing degree under different tank turns in a single pile turning was determined. The dispersion coefficient was used to evaluate the mixing uniformity. The test showed that when the fermentation tank was transferred to the tank for 2 r, the material was basically mixed evenly, so the frequency of a single turning tank was set to 2 r, the mixture of chicken manure and corn straw was selected as the raw material for the turnover frequency test, the temperature and moisture content of the fermentation material under different turning frequencies were analyzed, and the moisture content, temperature and maturity of the fermentation material were analyzed in four kinds of phased frequency conversion mode, and the results showed that mode 4 (no turning during the heating period, turning the pile once a day during the high temperature period, and turning the pile once a day during the holding period), the highest fermentation temperature was 68.4℃, and the germination index of radish seeds treated with organic fertilizer was 107.6%, which met the requirements of decomposition and the fermentation process was stable and reliable. The research results can provide equipment and process support for the preparation of bio-organic fertilizer, ensure the decomposition quality of organic fertilizer, and effectively solve the problem of unclear fermentation process.

Key words: horizontal rotary bioorganic fertilizer fermentation tank; turn; mixing uniformity; discrete element; technological experiment

收稿日期: 2025－01－13　修回日期: 2025－03－24

基金项目: 西安市科技计划农业技术攻关项目(2023JH－NYCL－0014)

作者简介: 叶大鹏(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境监测与控制研究,E-mail: ydp@fafu.edu.cn

0　引言

畜禽粪污资源化利用和养殖环境的污染防治是推动现代畜牧养殖产业发展需要重点解决的问题[1]。畜禽粪污无序排放，将破坏土壤结构和土壤微生物的平衡，在生产养殖中仍有部分中小型畜禽散养户将利用率低下的畜禽粪污随意排放，造成水体、土壤、空气环境的严重污染[2-3]。但畜禽粪污通过收集加工成有机肥，可以提升地力，改善农作物的品质，提高农作物产量，实现畜禽养殖废弃物循环综合利用，形成良性循环[4]。

好氧发酵是提高畜禽粪便生物稳定性、减少养殖业污染排放的重要手段[5]。好氧发酵中，翻堆不仅可增加通气，还能改善发酵分层情况；不同的原料、翻堆速度和频率会影响发酵过程中物料温度、含水率及发酵产物腐熟度[6-7]。对此，文献[8]以猪粪及玉米秸秆为原料进行不同翻堆频率试验，发现增加翻堆频率有助于物料升温及有机质降解；文献[9]以粪便污泥与木屑进行共同堆肥，发现高周转频率对病原体的灭活更彻底；文献[10]以食物垃圾和梧桐叶为原料，依托滚筒式堆肥反应器进行高效堆肥，采用直板式抄板，滚筒转速取 3 r/min，搅拌频率为 2 次/d，每次转动一圈。文献[11]通过翻堆发酵程度来评估山羊粪复合油茶壳的成熟度并优化翻壳频率，发现油茶壳和羊粪混合堆肥每 7 d 翻一次，可以提高堆肥产品质量。以上文献量化好氧发酵生物有机肥腐熟度的标准，为制备生物有机肥提供科学依据，但未具体研究单次翻堆工艺；文献[12-16]对研究卧式发酵罐翻堆频率和速度提供有力支撑，但未分析堆肥腐熟度。

针对生物有机肥单次翻堆工艺不明且系统化研究较少，同时考虑小型化发酵设备较为缺乏且效率普遍低下的农业基本现状，本文设计一种适用于中小型养殖户的卧旋式生物有机肥发酵罐。以鸡粪与玉米秸秆为原料，通过仿真优选单次翻堆工艺，进行翻堆频次试验，对发酵过程中温湿度变化及腐熟程度进行分析评判，对翻堆频次进行优选，以延长高温发酵时间、提高产品品质并缩短发酵周期，为畜禽粪便资源化利用及设备研发提供参考。

1　总体设计

1.1　生产需求设计

考虑到立式发酵搅拌设备存在混合不均匀、分层发酵等缺点，设计卧旋式生物有机肥发酵罐；根据养殖场日产鸡粪量及项目产地要求，提出了以下主要设计要求及关键技术参数：发酵罐长 3 m、宽 1.5 m、高 2 m，物料含水率 60% ~ 70%，物料密度 650 ~ 750 kg/m^3，单次处理量 3 ~ 4 m^3，罐内发酵周期 6 ~ 8 d，罐外发酵周期 10 ~ 12 d。

发酵罐体作为卧式生物有机肥发酵设备的核心组成部分，对物料进行好氧堆肥发酵起着关键的作用。在设计上，将发酵罐体设计为薄壁圆罐状结构，可以提高发酵效率，有利于生物有机肥的高效生产。确定罐体全容积 V 计算公式为

$$V=\frac{V_N}{\eta} \tag{1}$$

式中　V_N——盛装物料容积，取 3.5 m^3

η——装料填充系数，取 0.7

计算得罐体全容积 V 为 5 m^3，罐长径比为 1.7 ~ 2.5[17]，考虑生物有机肥发酵过程为好氧发酵，物料充分与空气接触同时保证罐体稳定性，取长径比为 2，则计算得罐体内径为 1.47 m，取 1.5 m，罐体长度 L = 3 m。

1.2　关键部件设计

1.2.1　罐体壁厚设计

卧旋式生物有机肥发酵罐壁厚计算公式为

$$\delta=\frac{pD}{2[\sigma]\varphi-p}+c \tag{2}$$

式中　δ——罐壁厚，mm

p——耐受压强，取 1 MPa

D——罐体内径，取 1 500 mm

φ——焊接系数，取 0.8

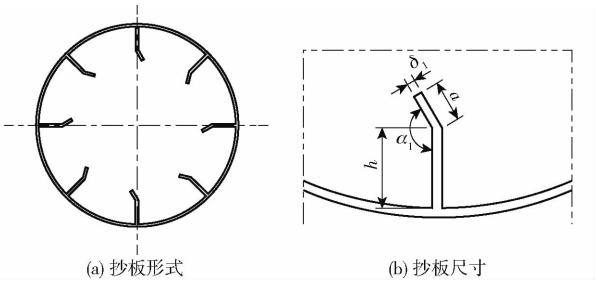
c——腐蚀裕度，当 $\delta-c<10$ mm 时，取 3 mm

$[\sigma]$——材料许用应力，材料选用 Q235，取 155 MPa

计算得 δ 为 9.07 mm，取常用钢板厚度 12 mm。

1.2.2　抄板设计

该发酵罐通过在内壁焊接抄板来保证物料在发酵罐内充分搅拌，主要用于对堆体进行翻转和充氧，使物料内外混合更均匀，增大物料间孔隙率，促进气体在内部的循环，加快发酵过程[18]发酵罐内部抄板如图 1a 所示，抄板数量与罐体内径 D 有关，随着罐体内径 D 的增大而增多，常见选取方式如表 1 所示，采用升举式组合，在圆周上间隔 45°分布，在罐体转动时将物料抄起，转动到一定角度时落下，增加了物料抛翻范围及物料间的碰撞效果，加快物料混合；抄板采用折弯式抄板，折弯式抄板能够很大程度地提高抄板抄起物料的效率，并将其均匀地洒向表层物料，实现物料的纵向循环。如图 1b 所示，抄板直边高度 h 取 150 mm，折边长度 a 取 50 mm，折边角度 α_1 取 120°，抄板厚度 δ_1 取 10 mm。



(a) 抄板形式 (b) 抄板尺寸

图 1 抄板结构设计

Fig. 1 Design of board structure

表 1 抄板数量

Tab. 1 Number of reading boards

罐体内径 D/mm	抄板数量 T
0 ~ 1 000	6
1 000 ~ 1 600	8
1 600 ~ 2 400	12
2 400 ~ 4 000	16 ~ 20

1.2.3 转速与通风量设计

(1)卧式发酵罐转速一般为 0.2 ~ 3.0 r/min[19],若转速过慢导致搅拌效率低下,而转速过快导致堆体丧失大量热量,故设计该发酵罐转速 n 为 1 r/min。

(2)通风量为堆肥需氧量,包括微生物需氧量及除水需氧量[20]。卧旋式发酵罐采用持续通风的方式给氧,通风装置设置在出料侧端盖上方位置,通风口直径为 15 mm。

罐内发酵期间微生物所需的每小时通风量 Q_w 为

$$Q_w = 60q\eta V(1+\gamma) \tag{3}$$

式中 q——堆料所需通风量,取 0.1 $m^3/(min \cdot m^3)$

V——罐体容积,取 5.3 m^3

γ——风机泄漏系数,取 0.2

根据预试验得出,罐内发酵周期约为 7 d,罐内失水量为 940 kg,则罐内发酵期间每天损失水的质量为 134.3 kg,堆肥过程中去除水分所需的每小时通风量 Q_s 为

$$Q_s = \frac{134.3 \times 10^3 (1+\gamma)}{24(\rho_{65}K_{65} - \rho_{20}K_{20})} \tag{4}$$

式中 ρ_{65}——65℃饱和空气密度,取 0.946 kg/m^3

ρ_{20}——20℃饱和空气密度,取 1.195 kg/m^3

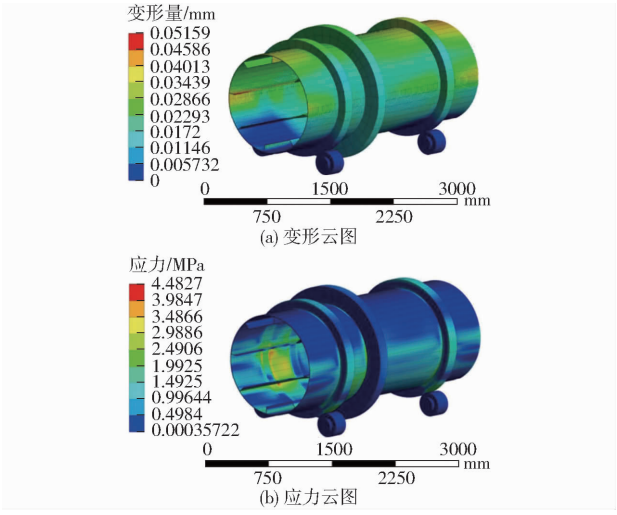
K_{65}——65℃饱和空气含水量,取 204 g/kg

K_{20}——20℃饱和空气含水量,取 14.7 g/kg

计算得,罐内发酵所需通风量为 51.5 m^3/h;为保证腐熟过程中氧气充足,选用 SD125 型吐风机(上海万鑫机电有限公司),调节吐风量为 60 m^3/h。

1.2.4 发酵罐模型有限元仿真

选择 ANSYS Workbench 作为仿真平台,对模型进行简化,罐体及抄板均采用 Q235;网格划分时采用扫掠,单元尺寸设置为 30 mm,共得到 13 627 个单元,74 418 个节点,施加约束与载荷,得出变形云图及应力云图。如图 2a 所示,最大变形位于抄板上,为 0.051 59 mm,变形量非常小,基本可以忽略不计;如图 2b 所示,最大应力为 4.482 7 MPa,远低于许用应力 235 MPa,可以满足使用要求。仿真结果表明,发酵罐结构设计合理,能够满足力学要求。



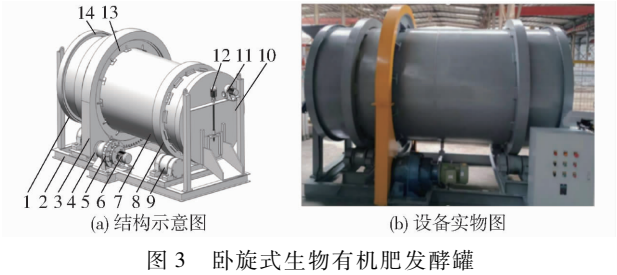
(a) 变形云图 (b) 应力云图

图 2 有限元分析云图

Fig. 2 Finite element analysis cloud chart

1.3 总体结构说明

卧旋式生物有机肥发酵罐总体结构如图 3a 所示,采用工字钢作为基架,基架上安装有两套拖轮座,拖轮座通过轴承与拖轮连接,拖轮与滚圈接触,滚圈与发酵罐体连接,罐体左右为进出料端盖,与机架连接,动力系统设置在两个滚圈之间,动力由 YE2 - 112M - 4 型三相异步电机(上海本速有限公司)提供,经减速器、齿轮、齿圈传递到罐体上,罐体轴向旋转。在抄板的抛翻作用下,物料实现翻堆。按照设计对发酵罐进行了试制,如图 3b 所示。



(a) 结构示意图 (b) 设备实物图

图 3 卧旋式生物有机肥发酵罐

Fig. 3 Horizontal rotating bioorganic fertilizer fermentation tank

1. 入料侧端盖 2. 机架 3. 齿圈套 4. 齿轮 5. 减速器 6. 三相异步电机 7. 发酵罐体 8. 滚圈 9. 托轮 10. 出料侧端盖 11. 风机 12. 推杆电机 13. 齿圈 14. 密封圈

2　翻堆 EDEM 离散元仿真

结合罐体模型，通过离散元仿真分析模拟单次翻堆过程。本文利用 EDEM 2022 R1 软件建立了不同粒径混合下的生物有机肥发酵物料离散元模型，采用 Hertz－Mindlin with JKR 模型作为物料间的接触模型。在误差允许范围内，为突出主要研究问题，减少不必要的仿真；结合生物有机肥的生产特点，在 EDEM 的仿真中做以下假设：发酵过程中发酵物料参数不发生变化；采用一次添加定量的颗粒代替持续进料；发酵物料颗粒均为球形颗粒。

2.1　物料参数标定

为了保证 EDEM 仿真结果趋近真实性，随机多次取 2 kg 均匀混合后的发酵物料进行分筛，得到粒径 d 分布如表 2 所示。

表 2　试验物料粒径分布

Tab. 2　Particle size distribution of test materials

粒径/mm	质量分数/%
[0,60)	13.8
[60,100)	29.1
[100,140)	22.0
[140,180)	23.7
[180,220)	11.4

总颗粒数为 60 000，有机肥颗粒形状近似球形，以粒径 50 mm 为基准，为保证发酵物料真实性，按照表 2 粒径分布质量分数，生成的有机肥颗粒离散元模型如图 4 所示。

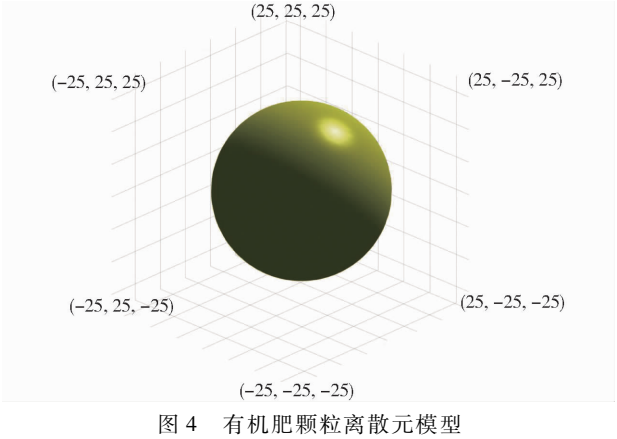


图 4　有机肥颗粒离散元模型

Fig. 4　Discrete element model of organic fertilizer particles

通过改变接触模型的粘结参数调整仿真试验的堆积角，使仿真试验堆积角与物理试验堆积角趋于一致，并结合文献[21－22]，获取生物有机肥发酵物料离散元仿真参数，如表 3 所示。

表 3　离散元仿真参数

Tab. 3　Discrete element simulation parameter

材料	参数	数值
发酵物料	泊松比	0.28
	密度/(kg·m^{-3})	723
	剪切模量/Pa	1×10^{6}
设备	泊松比	0.3
	密度/(kg·m^{-3})	7 900
	剪切模量/Pa	7.94×10^{10}
发酵物料-发酵物料	碰撞恢复系数	0.6
	动摩擦因数	0.65
	静摩擦因数	0.15
发酵物料-设备	碰撞恢复系数	0.6
	动摩擦因数	0.7
	静摩擦因数	0.15

2.2　混合均匀性仿真

为了分析罐体内部物料的混合性能，实现对单次翻堆工艺的精准把握，对翻堆过程中罐体区域进行划分；物料从浅到深分为表层物料、中层物料及底层物料，无物料处为空气层，如图 5a 所示。如图 5b 所示，对底层、中层、表层物料以颗粒数量比 5∶7∶3 进行物料填充，以蓝色、绿色、黄色标记。填充物料后，按转速为 1 r/min 计算，对转罐过程中物料速度进行仿真分析；图 5c 为罐体转速 1 r/min 物料速度分布图，可知，转罐过程中物料以一定的角度动态倾斜堆积；物料表面颗粒运动速度最快，能达到 0.4 m/s，轴心及周围物料速度最慢，仅为 8.22×10^{-4} m/s，存在物料惰区，不同位置速度差异较大。由于中层物料速度相对较慢，且存在一定的物料惰区，故对中层物料的仿真具有更强的代表性，利用 EDEM 划分网格的功能(Grid Bin Group)，将其分成 5×1×1 共计 5 个网格采样层，对中层物料颗粒量(200～700 mm)进行混合均匀性分析。

将混合物料在采样网格中各物料占比均值 K 与最佳混匀度 K_{best} 比值作为评价指标。计算公式为

$$K=\frac{n_i}{N_i} \tag{5}$$

式中　N_i——采样层总颗粒数量

n_i——采样层内单种物料颗粒数量

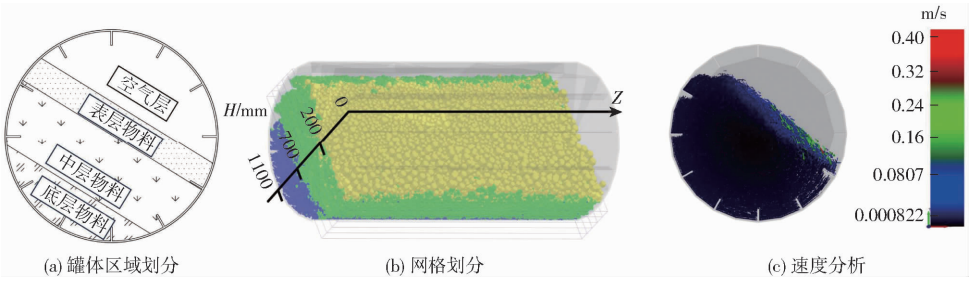
$$K_{best}=\frac{n_t}{N_t} \tag{6}$$

式中　N_t——罐体总颗粒数量

n_t——罐体内单种物料颗粒数量

计算两个比例之间的比值，即每个网格内混合均匀度 μ_i 和所有网格内混合均匀度 $\overline{\mu}$，对各个网格内混合均匀度计算其平均值标准差 σ，μ_i 计算公式为

$$\mu_i=\frac{K}{K_{best}} \tag{7}$$



(a) 罐体区域划分 (b) 网格划分 (c) 速度分析

图 5 物料状态分析

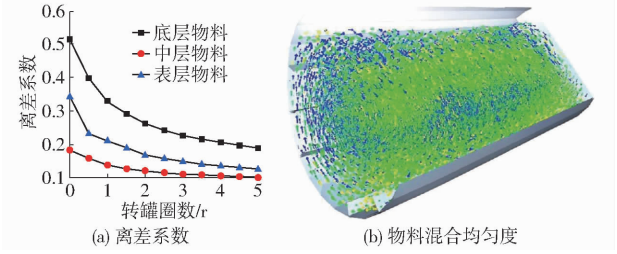
Fig. 5 Material status analysis

评价其混合均匀度指标离差系数 c 为标准差 σ 与所有网格内混合均匀度平均值 $\bar{\mu}$ 比值,计算公式为

$$c = \frac{\sigma}{\bar{\mu}} \tag{8}$$

通过计算混合均匀度评价指标即离差系数,可判断发酵罐翻堆混合均匀度。转罐转动圈数是混合均匀度影响因素之一。设置采样开始时间为罐体开始转动时间,采样周期为 30 s,计算在翻堆混合试验中某种物料的混合度随着时间的变化,每组试验仿真时长均为 300 s。

由图 6a 可以看出,随着转罐圈数的增加,各层物料离差系数逐渐减小,即混合均匀效果逐渐明显。发酵罐以转速 1 r/min 运行 2 min 后,即 0 ~ 2 r 时,离散系数急剧变小:表层、中层、底层物料离差系数分别从 0.34、0.18、0.51 急剧减少至 0.17、0.12、0.26;2 ~ 5 r 时,曲线变化趋势相对缓和,转动对混合均匀度的影响较小。图 6b 为转罐 2 r 的翻堆仿真结果,由图可知,发酵物料转罐 2 r 后表层、中层、底层物料基本混合均匀。考虑到翻堆时易丧失大量热量,为了减少翻堆所造成的热量损失、提高有机肥品质,选取单次转罐 2 r 为卧旋式生物有机肥发酵罐配套的单次翻堆工艺。



(a) 离差系数 (b) 物料混合均匀度

图 6 物料混合均匀性分析

Fig. 6 Analysis of material mixing uniformity

3 翻堆频次优选与试验

对卧旋式生物有机肥发酵罐进行发酵性能测试,同时探讨卧旋式生物有机肥发酵罐好氧发酵过程中的最优翻堆频次,进行翻堆频次试验;不同翻堆频次下的发酵温度曲线、含水率及产物品质作为主要评价指标进行分析评判。

3.1 试验条件与材料

试验开展于 2023 年 3 月 13 日—5 月 26 日,地点为西安鄠邑余姚村鹏宇养殖厂养鸡场后产房(34.1°N,108.6°E),室内温度 17 ~ 25℃。发酵物料为鸡粪与玉米秸秆的混合物,其基本理化性质如表 4 所示。

表 4 发酵物料理化性质

Tab. 4 Physical and chemical properties of fermented materials

原料	总碳质量分数/%	碳氮比	含水率/%	pH 值
鸡粪	30.49 ± 1.03	12.15 ± 1.32	73.1 ± 1.16	8.24 ± 0.03
秸秆	41.63 ± 0.82	49.34 ± 0.75	7.2 ± 0.23	6.81 ± 0.05

3.2 试验工艺设计

由于生物有机肥罐内发酵过程分为 3 个阶段:升温期(20 ~ 50℃)、高温期(50 ~ 75℃)、保温期(温度回落至 50℃),不同发酵阶段的物料对翻堆的需求有较大差异[23-24]。为进一步探究恒定频次翻堆及分阶段变频次翻堆两种翻堆频次的差异,本试验首先以翻堆频率作为试验因素,进行恒定频率翻堆单因素试验。单次进料质量为 2.5 t,将鲜鸡粪与玉米秸秆按质量以 3.5∶1 混合,根据表 4,得混合原料碳氮比为 25,装入罐内至罐体容积约 70%。翻堆频率分别设定为 1、2、3 次/d 进行发酵试验;并在 7 d 内完成罐内发酵时期,出料陈化至 20 d。分阶段变频率翻堆试验则是将罐内发酵时期分为多个阶段,不同阶段设置不同翻堆频率,如表 5 所示,本试验共设置 4 种模式。各试验过程中均由风机送风给氧,保证罐内含氧量充足,通风速率为 1 m^3/min。为评判本研究翻堆频次与传统翻堆频次,试验设置 CK 组作为翻堆频次对照,CK 组翻堆频次为高温期翻堆 1 次,保温期翻堆 1 次,并分析 CK 组翻堆后的物料均匀性,验证上文离散元仿真结果。生物有机肥发酵 20 d 内,在第 0、1、4、7、10、15、20 天采集样品检测,罐内发酵时期取样位置为罐体出料侧、进料侧和罐体中部;罐外发酵时期取样位置为堆体底层、堆体

表 5　4 种分阶段变频次翻堆

Tab. 5　Four types of staged variable frequency stack flipping

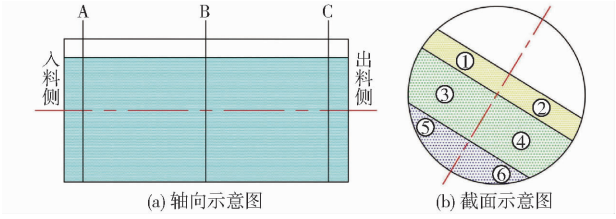
翻堆模式	罐内发酵时期(0～7 d)			罐外发酵时期(8～20 d)
	升温期	高温期	保温期	陈化期
模式 1	Q－24 h	Q－12 h	－	出料静置陈化至 20 d
模式 2	Q－24 h	Q－12 h	Q－24 h	出料静置陈化至 20 d
模式 3	－	Q－12 h	Q－24 h	出料静置陈化至 20 d
模式 4	－	Q－24 h	Q－24 h	出料静置陈化至 20 d

注：Q－24 h 代表每 24 h 翻堆 1 次。模式 1 表示在发酵升温期内每天翻堆 1 次；进入高温期后每天翻堆 2 次，每次间隔时间为 12 h；进入到保温期后到第 7 日结束不翻堆，结束罐内发酵时期；出料，进入罐外发酵时期，静置陈化至 20 d，完成发酵。模式 2～4 表达方式同模式 1。

中层、堆体表层。在各位置取等量样品混匀，再混匀平分为 2 份，1 份保存在冰箱中待用，另 1 份样品风干粉碎，过 1 mm 筛网作为干样待用。

3.3　测定项目与方法

温度及含水率：罐内发酵过程中使用 PT59－LE－K 型温度传感器(沈阳铭恩电子科技有限公司)及 KZWS/SFA 型有机肥含水率传感器(北京昆仑中大传感器技术有限公司)每间隔 12 h 测量数据并记录直至罐内发酵阶段结束。温度及含水率测量位置为罐体的 3 个轴向层面，A 层距离入料侧 0.2 m，B 层位于罐身中部，C 层距离出料侧 0.2 m，如图 7a 所示。每个层面上 6 个测量点，其中测量点 1、2 为表层物料测量位置，测量点 3、4 为中层物料测量位置，测量点 5、6 为底层物料测量位置，如图 7b 所示。温度及含水率参数按各测量点均值计算。



(a) 轴向示意图　(b) 截面示意图

图 7　传感器测量位置示意图

Fig. 7　Schematics of sensor testing location

pH 值、腐殖酸 E4/E6 值(腐殖酸物质在波长 465 nm 与 665 nm 处的吸光度比值)及种子发芽指数(Germination index, GI)的测量方法如下：取 5 g 样本与 50 mL 纯水混合离心过滤得浸提液，静置 1 h 分别用 PHS－3C 型 pH 仪(上海雷磁仪器有限公司)和 T2602 型紫外可见光分光光度仪(上海佑科仪器仪表有限公司)测定。将测定后的浸提液，使用滤纸过滤取 10 mL 至培养皿上，培养皿铺上滤纸，取 10 粒萝卜种子整齐摆放在滤纸上，25℃的培养箱中避光培养 48 h；用纯水作为空白对照进行测定，种子发芽指数计算公式为

$$T_G = \frac{P_s L_s}{P_c L_c} \times 100\% \tag{9}$$

式中　P_s——样品种子发芽率

L_s——样品种子根长

P_c——对照种子发芽率

L_c——对照种子根长

T_G——种子发芽指数(GI)

另取 5 g 样本重复上述测定，得到的两组数据取均值作为结果。利用 SPSS 17.0 方差分析，Duncan's 新复极差法进行多重比较。

3.4　结果分析

3.4.1　发酵物料均匀性验证

为验证离散元仿真结论，确保单次转罐 2 r 可以使物料基本混合均匀，在 CK 组翻堆后(5 d)对罐内物料温度进行温度测量，测量结果如表 6 所示。参照 CDE《口服固体制剂混合均匀度和中控剂量单位均匀度研究技术指导原则(征求意见稿)》标准可知：混合均匀度的接受标准为所有结果的相对标准偏差(RSD)低于 5%，所有单值在均值的 ±10.0% 以内。由测量结果计算得出：测量点温度均值为 68.31℃，相对标准偏差为 4.34% 且所有单值在均值的 ±10.0% 以内，符合混合均匀度接受标准。故单次转罐 2 r 满足混合均匀性要求，可以作为卧旋式生物有机肥发酵罐的单次翻堆工艺。

表 6　CK 组翻堆后温度测量结果

Tab. 6　Temperature test results after overturning of CK group　℃

层号	测量点序号					
	1	2	3	4	5	6
A	66.9	66.3	71.2	71.4	65.2	65.0
B	69.0	68.3	73.6	74.7	67.1	67.3
C	65.5	66.8	70.5	70.4	65.6	65.7

3.4.2　发酵物料含水率

好氧发酵过程中水分不仅参与微生物的代谢，也影响其他理化性质的变化[25]。由图 8 可知，罐内发酵时期含水率随着发酵时间增加逐渐下降，这是由于好氧发酵过程中温度升高导致水分的蒸发，同时翻堆的挤压也会使多余粪水排出。各组含水率变化在升温期均为缓慢下降，而在高温期各组含水率急剧下降。罐内发酵结束后 CK 组、Q－24 h、Q－12 h、Q－8 h、模式 1、模式 2、模式 3 和模式 4 含水率分别为 38.1%、39.3%、41.9%、49.4%、38.2%、36.4%、37% 和 36.9%。除 Q－8 h 含水率为 49.4% 明显较高，其余处理含水率降幅相近，可知不同翻堆频次对含水率影响不大，但频繁翻堆容易导致多余水分无法排出。

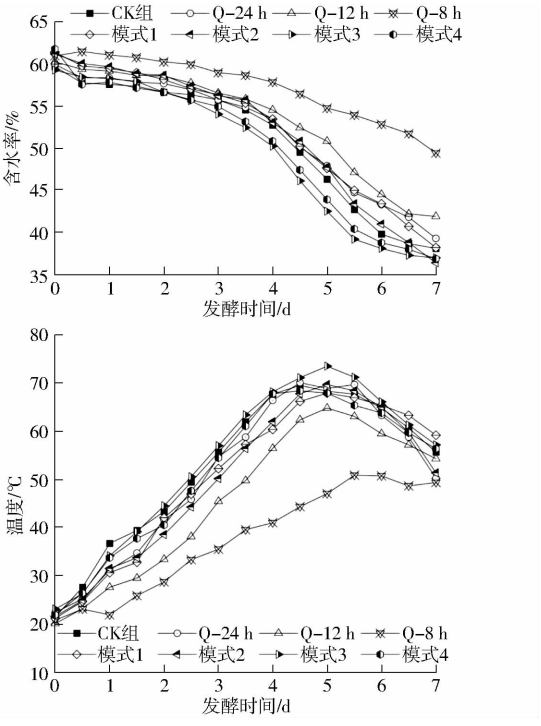


图 8 温度和含水率变化曲线

Fig. 8 Temperature and moisture content change curves

3.4.3 发酵物料温度

生物有机肥好氧发酵过程中,温度是影响微生物活性和有机物质降解的重要因素[26],其变化趋势反映了好氧发酵的进程,也是判断是否达到无害化的重要指标。各组处理罐内发酵过程中温度变化如图 8b 所示。可知,好氧发酵开始后,各组温度迅速升高,在 4 ~5 d 达到最高温度。升温期温度维持在 45℃左右有利于嗜温微生物活动,使大分子有机质充分降解为小分子,促进堆肥的腐熟;高温期持续高温能充分杀灭病虫卵等有害物质。其中,仅 CK 组、模式 3 和模式 4 温度维持 55℃以上超过 5 d,达到 NY/T 3442—2019 要求,其余处理温度维持 55℃以上未达 5 d,不符合 NY/T 3442—2019 要求。可知,翻堆过多易导致热量损失过多,无法满足腐熟的温度要求,对工艺未达到标准的 5 种处理进行剔除。

3.4.4 物料腐熟度参数

物料腐熟度是物料堆肥过程中的有机质经过矿化、腐殖化过程后达到稳定化的程度,它是评判堆肥产品质量的一个重要指标[27]。取发酵过程中的 pH 值、腐殖酸 E4/E6 值和种子发芽指数(GI)作为物料腐熟度的评价指标。由于不同处理试验物料具有差异性,pH 值、腐殖酸 E4/E6 值和种子发芽指数(GI)初始值也存在一定的差异,故仅对 10、15、20 d 的数据进行显著性差异分析。

pH 值是影响好氧发酵过程中微生物生长的重要因素[28]。研究表明,pH 值为 6 ~9 时最适宜微生物的生长繁殖。根据图 9a(图 9a、9b、9c 中不同字母表示相同发酵时间、不同处理模式间差异显著($P<0.05$),图 9d、9e、9f 中不同字母表示相同处理模式、不同发酵时间间差异显著)可知,在堆肥物料发酵初期,各处理 pH 值为 7 ~7.5,呈弱酸性;随着时间增加,物料 pH 值先升高后降低,这是因为鸡粪与玉米秸秆的混合物料中存在的含氮有机物在好氧发酵初期快速分解,产生大量 NH_3,导致各处理的 pH 值不断升高;而在好氧发酵中后期,随着 NH_3 的不断挥发、微生物分解有机物质产生有机酸,pH 值有降低趋势。20 d 时,CK 组、模式 3 和模式 4 发酵产物 pH 值均稳定在 8.6 左右,分别为 8.57、8.705

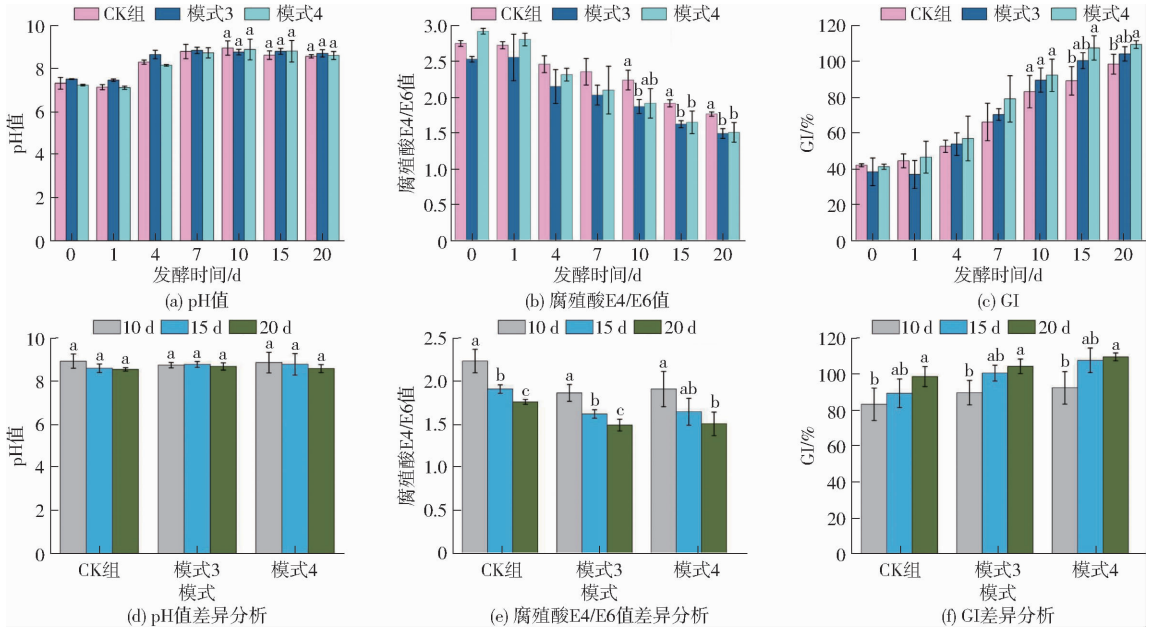


图 9 腐殖化变化分析

Fig. 9 Analysis of humification changes

和 8.605，方差分析显示，各处理的 pH 值无显著性差异（$P>0.05$），可见翻堆频次对 pH 值没有显著影响。由图 9d 可知，各处理 10、15、20 d pH 值无显著性差异（$P>0.05$），可认为 10 d 后的物料腐熟对 pH 值影响不大。

腐殖酸 E4/E6 值反映发酵物料的腐殖化程度[29]。腐殖酸 E4/E6 值越小，腐殖酸的缩合度和芳构化程度越高。由图 9b 可知，随着好氧发酵的进行，各处理腐殖酸 E4/E6 值逐渐降低，这是由于随着温度升高，小分子腐殖酸物质逐渐向大分子腐殖酸转化，物料腐殖化程度升高。15 d 时 CK 组、模式 3 和模式 4 处理腐殖酸 E4/E6 值分别为 1.915、1.625 和 1.65；20 d 时 CK 组、模式 3 和模式 4 处理腐殖酸 E4/E6 值分别为 1.76、1.49 和 1.53。在15 d 和 20 d 时，模式 3 和模式 4 腐殖酸 E4/E6 值明显小于 CK 组（$P<0.05$）且模式 4 腐殖酸 E4/E6 值低于模式 3；故相对于 CK 组，模式 3 和模式 4 腐殖化程度较高，模式 4 腐殖化程度高于模式 3。由图 9e 可知，模式 4 在 15 d 得到的腐殖酸 E4/E6 值与 20 d 得到的腐殖酸 E4/E6 值无显著性差异（$P>0.05$），可认为模式 4 在 15 d 已完全腐熟。

种子发芽指数（GI）是通过测定植物毒性而判断产品腐熟程度的直接而有效的方法，一般认为，GI 达到 50% 以上时，产品基本腐熟种子；GI 超过 80% 则对种子无毒害作用[24]。由图 9c 可知，GI 随着堆肥的进行不断升高，20 d 时 CK 组、模式 3 和模式 4 GI 分别为 98.6%、104.31% 和 109.53%，均符合堆肥腐熟要求。对比可得，模式 4 得到的 GI 最高且显著高于 CK 组（$P<0.05$），模式 3 GI 与 CK 组无明显差异（$P>0.05$）。由图 8f 可知，15 d 模式 4 得到的 GI 为 107.6%，而 20 d 模式 4 得到的 GI 为 109.53%，仅相差 1.93 个百分点，并无显著差异（$P>0.05$），故可认为模式 4 在 15 d 时已完全腐熟。

4　结束语

设计了一种卧旋式生物有机肥发酵罐，通过罐体自身转动及抄板升举实现物料搅拌，使用 ANSYS Workbench 分析验证发酵罐设备的可靠性并研制发酵罐控制系统，对样机进行试制。通过 EDEM 2022 R1 软件对罐体回转时物料混合情况仿真计算，确定物料在单次翻堆中不同转罐圈数下物料混合度的差异情况，优选单次翻堆最适合的转罐圈数为 2 r。选择鸡粪与玉米秸秆的混合物为原料进行翻堆频次试验，对不同翻堆频次下的发酵物料温度及含水率变化进行分析，同时对发酵中物料及发酵产物的 pH 值、腐殖酸 E4/E6 值及 GI 进行检测，得出模式 4（升温期内不翻堆；进入高温期后每天翻堆 1 次；进入保温期后每天翻堆 1 次）发酵腐熟效果最好，15 d 时 GI 达 107.6%，且生物有机肥已完全腐熟并对种子无毒害作用。研究结果可为制备高腐熟品质的生物有机肥提供装备及工艺支撑。

参　考　文　献

[1] 赵希亚. 畜禽粪污资源化利用及养殖污染防治措施探讨[J]. 中国动物保健, 2024, 26(12): 166 – 167.

[2] 陈理, 马艳芳, 张紫嘉, 等. 猪粪水热预处理和厌氧消化条件下的典型抗生素降解性能[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 260 – 269.
CHEN Li, MA Yanfang, ZHANG Zijia, et al. Typical antibiotics degradability of pig manure under hydrothermal pretreatment and anaerobic digestion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 260 – 269. (in Chinese)

[3] 楚天舒, 王柄雄, 孟坦, 等. 基于农田土壤抗生素生态风险值的畜禽粪污农田承载力估算[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(3): 138 – 151.
CHU Tianshu, WANG Bingxiong, MENG Tan, et al. Estimation on farmland carrying capacity for livestock and poultry manure based on farmland soil antibiotics ecological risk values[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(3): 138 – 151. (in Chinese)

[4] 余声春, 康永松. 畜禽粪污资源化利用整县推进项目有机肥厂建设的体会与思考[J]. 猪业科学,2024, 41(12): 77 – 78.

[5] 王颖, 王月, 吴昌永, 等. 西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术综合评价[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 654 – 662.
WANG Ying, WANG Yue, WU Changyong, et al. Comprehensive evaluation research of livestock and poultry waste treatment technologies in the ecological fragile areas of Northwest China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 654 – 662. (in Chinese)

[6] 郜道玉, 崔华威, 周源, 等. 翻堆频次对奶牛粪污异位发酵床中抗生素抗性基因及细菌群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1841 – 1851.
GAO Daoyu, CUI Huawei, ZHOU Yuan, et al. Effects of turning frequency on antibiotic resistance genes and bacterial communities in dairy manure ectopic fermentation bed[J]. Journal of Agro-Environmet Science, 2023, 42(8): 1841 – 1851. (in Chinese)

[7] 崔华威, 龚萍, 郜道玉, 等. 翻堆频次对奶牛粪污异位发酵床中抗生素抗性基因的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(4): 64 – 72.
CUI Huawei, GONG Ping, GAO Daoyu, et al. Effects of stacking frequency on antibiotic resistance genes in ectopic fermentation bed for manure and sewage of dairy cows[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(4): 64 – 72. (in Chinese)

[8] ZHOU J. Effect of turning frequency on co-composting pig manure and fungus residue[J]. Journal of the Air Waste Management Association, 2017, 67(3): 313 – 321.
[9] MUSA M, CHIMDI M, MILLER A C, et al. Effect of turning frequency on the survival of fecal indicator microorganisms during aerobic composting of fecal sludge with sawdust[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(3): 2668.
[10] 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)
[11] ZHANG J, YING Y, LI X, et al. Changes in tannin and saponin components during co-composting of *Camellia oleifera* Abel shell and seed cake[J]. PloS One, 2020, 15(3): 116 – 120.
[12] 李春燕, 张曦, 沈玉君, 等. 翻堆策略对猪粪沼渣好氧发酵特性的影响[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 130 – 135.
LI Chunyan, ZHANG Xi, SHEN Yujun, et al. Effects of turning strategy on aerobic fermentation effects of turning strategy on aerobic fermentation[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(1): 130 – 135. (in Chinese)
[13] 陈娟, 曾杨, 杜津昊, 等. 一种以畜禽粪便为基质的生物有机肥发酵工艺研究[J]. 中国酿造, 2021, 40(11): 194 – 197.
CHEN Juan, ZENG Yang, DU Jinhao, et al. Fermentation technology of bio-organic fertilizer based on livestock manure[J]. China Brewing, 2021, 40(11): 194 – 197. (in Chinese)
[14] 徐鹏翔, 杨军香, 李季. 畜禽粪便堆肥工艺与控制参数[J]. 畜牧业环境, 2018(1): 33 – 37.
[15] 王书婧, 陈国安, 曹斌祥. 卧式滚筒发酵处理设备设计[J]. 农业机械, 2018(11): 102 – 106.
[16] 柳蒙蒙, 刘越, 高志永, 等. 有机废弃物好氧发酵反应器的开发和应用进展[J]. 中国沼气, 2024, 42(1):10 – 18.
LIU Mengmeng, LIU Yue, GAO Zhiyong, et al. Progress on the development and application of aerobic fermentation reactor for organic waste[J]. China Biogas, 2024, 42(1): 10 – 18. (in Chinese)
[17] 何贵生. 有机废弃物好氧发酵设备开发研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2016.
HE Guisheng. The development and research on aerobic fermentation equipment for organic waste[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2016. (in Chinese)
[18] 钱恺, 田晋跃. 农业废弃物堆肥平面翻堆技术的应用[J]. 农机化研究, 2009, 31(3): 189 – 192.
QIAN Kai, TIAN Jinyue. Application of plane-windrow turner technology in agricultural waste composting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(3): 189 – 192. (in Chinese)
[19] 刘宗萌, 邓进超, 李彩斌, 等. 卧式滚筒好氧堆肥和条垛式好氧堆肥技术的比较研究[J]. 家畜生态学报,2023, 44(10): 63 – 70.
LIU Zongmeng, DENG Jinchao, LI Caibin, et al. Comparative study on horizontal drum aerobic composting and windrow composting technology[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2023, 44(10): 63 – 70. (in Chinese)
[20] 刘付君. 污泥和粪污好氧发酵罐式工艺技术的研究与应用[J]. 资源节约与环保, 2024(11): 32 – 38.
[21] 张建路, 王鹏飞. 基于 EDEM 机施有机肥离散元模型参数标定[J]. 农机化研究, 2023, 45(9): 122 – 128.
ZHANG Jianlu, WANG Pengfei. Calibration of discrete element model parameters of organic fertilizer application based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(9): 122 – 128. (in Chinese)
[22] 张秀丽, 刘云鹏, 李连豪, 等. 有机肥生产中的多段式搅龙设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 49 – 56.
ZHANG Xiuli, LIU Yunpeng, LI Lianhao, et al. Design and performance experiment of multi-segment type auger in process of organic fertilizer production[J]. Transactions of the CASE, 2018, 34(3): 49 – 56. (in Chinese)
[23] 李轶, 李磊, 张大雷, 等. 餐厨垃圾和牛粪混合厌氧发酵工艺优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 180 – 185.
LI Yi, LI Lei, ZHANG Dalei, et al. Process optimization of anaerobic fermentation with mixed material of food garbage and cow dung[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 180 – 185. (in Chinese)
[24] 张晶, 孙照勇, 钟小忠, 等. 奶牛粪条垛式模拟堆肥腐熟度及微生物群落结构变化[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(3): 423 – 429.
ZHANG Jing, SUN Zhaoyong, ZHONG Xiaozhong, et al. Maturity and microbial community structure dynamics during simulated windrow composting of solid fraction of dairy manure windrow composting of solid fraction of dairy manure[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(3): 423 – 429. (in Chinese)
[25] SHEN D, YANG Y, HUANG H, et al. Water state changes during the composting of kitchen waste[J]. Waste Management, 2015,38(2): 381 – 387.
[26] 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241 – 1249.
ZHANG Tian, BU Meidong, GENG Wei. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(5): 1241 – 1249. (in Chinese)
[27] 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.
QIN Li, LI Yuchun, LI Guoxue, et al. Maturity indexes and operational parameters during composting municipal solid waste[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 189 – 194. (in Chinese)
[28] 李洋, 席北斗, 赵越, 等. 不同物料堆肥腐熟度评价指标的变化特性[J]. 环境科学研究, 2014, 27(6): 623 – 627.
LI Yang, XI Beidou, ZHAO Yue, et al. Study of maturity parameter characteristics in composting process using different materials[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(6): 623 – 627. (in Chinese)
[29] 刘瑞亮. 园林绿化废弃物堆肥效果研究[D]. 银川:宁夏大学, 2023.
LIU Ruiliang. Study on composting effect of landscaping waste[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023. (in Chinese)