

赵华轩, 李尚民, 蒲俊华, 等. 鸡粪筒仓式反应器堆肥产品质量评估和经济效益分析[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(5): 1159-1168.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.05.008

鸡粪筒仓式反应器堆肥产品质量评估和经济效益分析

赵华轩, 李尚民, 蒲俊华, 王丹萍, 王洪志, 窦新红
(江苏省家禽科学研究所, 江苏 扬州 225003)

摘要: 为评估筒仓式反应器堆肥产品质量, 利用大型筒仓式反应器开展鸡粪堆肥试验, 探究堆肥原料组成、曝气强度和发酵菌剂对反应器堆肥产品的腐熟状况、氮素含量、总养分含量等的影响, 并分析反应器堆肥处理鸡粪的经济效益。结果显示, 添加菌渣和发酵菌剂、维持适中的曝气强度可以提高堆肥温度, 降低堆肥 pH 值。添加菌渣和发酵菌剂、增大曝气强度可以降低堆肥含水率。添加菌渣、降低曝气强度可以抑制总有机碳和腐殖质的降解, 添加发酵菌剂可以促进总有机碳降解, 但对腐殖质的影响较小。原料组成对腐熟堆肥的种子发芽指数的影响较小, 增大曝气强度和添加发酵菌剂可以提高堆肥的种子发芽指数。反应器处理鸡粪堆肥产品的铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 含量为 100~150 mg/kg, 硝态氮 ($\text{NO}_3^+\text{-N}$) 含量较低且差别较小。反应器处理后的腐熟堆肥的总养分含量为 5.58%~7.44%, 达到国家有机肥料标准要求; 总有机质含量为 26.44%~48.12%, 含水率为 25.00%~35.00%, pH 值为 9.40, 腐熟堆肥的种子发芽指数为 19.33%~59.50%, 均未达到国家标准要求, 需要进行二次腐熟处理。该堆肥反应器每年可生产鸡粪有机肥约 657 t, 1 t 鸡粪有机肥的生产成本为 473 元, 每年可获得经济效益 8.34×10^4 元。堆肥反应器购置费用占养殖场鸡粪处理设施设备总投资的 70%, 建议加大对养殖场堆肥反应器购置的专项补贴力度。

关键词: 筒仓式反应器; 堆肥; 腐熟状况; 质量评估; 经济效益

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)05-1159-10

Quality assessment and economic benefit analysis of chicken manure compost products by silo reactor

ZHAO Hua-xuan, LI Shang-min, PU Jun-hua, WANG Dan-ping, WANG Hong-zhi, DOU Xin-hong
(*Jiangsu Institute of Poultry Sciences, Yangzhou 225003, China*)

Abstract: To evaluate the quality of chicken manure compost products by silo reactor, a large-sized silo reactor was used to do composting experiment by using chicken manure as material, so as to explore the effects of raw material composition, aeration intensity and microbial fermentation agent on the decomposing condition, nitrogen content and total nutrient content of compost products, and to analyze the economic benefits of silo reactor in composting chicken manure. The results showed that, adding mushroom residues and microbial agent, maintaining medium aeration intensity could increase the compost temperature and reduce the pH value. Moisture contents of the chicken manure composts could be reduced by adding mushroom residues and microbial fermentation agent, as well as increasing aeration intensity. Degradations of total

organic carbon and humus could be inhibited by adding mushroom residues and decreasing aeration intensity, and the degradation of total organic carbon could be accelerated by adding microbial fermentation agent, but the humus was slightly influenced. The raw material composition showed little influences on germination indexes of seeds in matured composts, while increasing aeration intensity and adding microbial fermentation agent could increase the germination

收稿日期: 2022-08-22

基金项目: 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目 (NJ2020-31);
江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(20)2012]

作者简介: 赵华轩 (1994-), 男, 江苏连云港人, 硕士, 研究实习员, 从事家禽养殖环境控制及废弃物处理研究。(E-mail)
lyghzzhx@163.com

通讯作者: 李尚民, (E-mail) 372317312@qq.com

index of seeds in composts. The $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents of chicken manure compost products by silo reactor during the silo reactor composting were 100–150 mg/kg, while the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents in the compost products were low and showed little difference. The total nutrient contents of matured composts treated by silo reactor were 5.58%–7.44%, which met the requirements of the national standard for commercial organic fertilizer. The total organic matter contents were 26.44%–48.12%, the moisture contents were 25.00%–35.00%, the pH value was 9.40 and the germination indexes of seeds in mature composts were 19.33%–59.50%. All of the indexes didn't meet the requirements of the national standard and need secondary decomposing treatment. The silo reactor could produce about 657 t chicken manure organic fertilizer per year and the unit production cost was 473 RMB/t, which could obtain economic benefit of 8.34×10^4 RMB per year. The purchase cost of the silo reactor accounted for 70% of the total investment of the facilities and equipment for chicken manure processing in the livestock farm. It is suggested to increase special subsidy for purchasing composting reactors by livestock and poultry farms.

Key words: silo reactor; compost; maturity condition; quality assessment; economic benefit

随着中国畜牧业的快速发展,畜禽粪污处理与资源化利用成为畜牧业发展的关键制约因素,影响着中国养殖业的集约化进程^[1-2]。当前,中国每年的畜禽粪污产生量约为 3.8×10^9 t,好氧堆肥能够将畜禽粪便转化为稳定的有机肥,还田利用可以改善土壤质量,成为实现农牧循环、种养结合的桥梁,同时降低了不能妥善处理的畜禽粪便对环境造成的污染风险^[3-4]。在中国,超过 76% 的畜禽粪便是通过堆肥处理的,由此形成的有机肥生产产业,具有重要的经济效益和社会效益^[3,5]。

目前中国常用的好氧堆肥工艺主要有条垛式堆肥、槽式堆肥、反应器堆肥等^[6]。露天条垛式堆肥和槽式堆肥操作简单,设备投资成本低^[5],但占地面积大,堆肥过程中会向大气排放大量臭气^[7-8],同时,冬季低温会抑制条垛式和槽式堆肥的堆肥效率^[9]。反应器堆肥是指利用集进出料、曝气、搅拌和除臭为一体的密闭式反应器进行好氧发酵的一种堆肥工艺,具有发酵周期短、占地面积小、保温节能效果好、自动化程度高、臭气易处理等优点^[10]。但堆肥反应器的购置成本较高,限制了其应用规模^[11]。随着没有农田配套的集约化养殖场的迅速发展以及民众对空气质量的日益关注,人们倾向于使用更先进的技术手段来解决堆肥效率低、臭气排放和土地有限的问题^[12]。筒仓式堆肥反应器是一种常见的堆肥设备,物料从仓顶加入,从仓底出料,利用高压涡轮风机强制通风供氧,发酵周期为 7~10 d。目前对反应器堆肥的研究主要集中在实验室规模^[13-14],对商业规模的大型筒仓式反应器堆肥的现场研究较少^[10,15],缺乏对筒仓式反应器堆肥过程中物料的腐熟状况、养分含量、经济效益等方面的评估。

本研究立足于堆肥生产实际,利用大型筒仓式

反应器开展堆肥试验,探究堆肥原料组成、曝气强度和发酵菌剂对堆肥产品腐熟状况、养分含量等的影响,同时评估筒仓式反应器堆肥的经济效益,为反应器堆肥工艺的实际应用提供参考,促进畜禽粪便无害化处理和资源化利用。

1 材料与方法

1.1 堆肥原料和设备

本试验的堆肥原料为鸡粪和菌渣,试验地点为扬州市某蛋鸡养殖场堆肥作业区。该养殖场存栏蛋鸡为 6.5×10^4 只,每 2 d 清理 1 次鸡舍,粪便产生量约为 15 m³。菌渣由养殖场自行从市场上购买。鸡粪和菌渣的基本理化性质见表 1。发酵菌剂购自河南九邦生物科技有限公司,主要成分为嗜热细菌、放线菌、真菌及辅料,有效活菌数 $\geq 1.0 \times 10^{10}$ CFU/g。

该养殖场购置的筒仓式堆肥反应器容积为 130 m³,处理能力为 15~18 m³/d。反应器配备 3 台曝气风机,风机功率为 12.5 kW,内部设有搅拌轴和搅拌叶片,搅拌叶片上布设曝气管道,通过风机将新鲜空气引入反应器中,维持好氧堆肥过程。

表 1 堆肥原料基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of compost raw materials

原料	含水率 (%)	总有机碳含量 (%)	总氮含量 (%)	碳氮比	pH 值
鸡粪	75.47	24.72	1.34	18.45	7.21
菌渣	54.50	22.27	0.39	57.10	5.45

1.2 堆肥试验设计

筒仓式反应器正常运行时,反应器容积处于饱和状态。将堆肥物料(鸡粪和菌渣)混匀后,通过铲

车运送至反应器上料斗中。每次进料前,先通过传送带将反应器底部发酵过的堆肥从出料口排出,每次出料约为 $5\sim 6\text{ m}^3$ 。出料结束后,待处理的物料通过上料斗被提升至反应器上部进料口进料,每次进料体积约为 $15\sim 18\text{ m}^3$ 。在反应器中部设有温度探头,可以测定反应器中部堆肥核心区的温度。反应器排出的腐熟堆肥需要放置在通风棚中进行二次腐熟处理。

筒仓式反应器稳定运行的堆肥出料情况表明,连续4次进出料大体可以将反应器内的物料置换1遍。因此,根据蛋鸡场清粪周期,本试验中堆肥反应器处理周期设置为8 d,每2 d进出料1次,形成连续进出料堆肥处理模式。设计堆肥试验,探究堆肥原料组成、曝气强度、发酵菌剂对筒仓式反应器处理鸡粪的影响。堆肥试验分为6组处理,使用同一个筒仓式反应器依次进行堆肥试验。堆肥试验处理分别为,T1:堆肥原料为 15.0 m^3 鸡粪、 3.0 m^3 菌渣,开启3台风机连续运行;T2:堆肥原料为 15.0 m^3 鸡粪、 1.5 m^3 菌渣,开启3台风机连续运行;T3:堆肥原料为 15.0 m^3 鸡粪、无菌渣,开启3台风机连续运行;T4:堆肥原料为 15.0 m^3 鸡粪、无菌渣,开启2台风机连续运行;T5:堆肥原料为 15.0 m^3 鸡粪、无菌渣,开启1台风机连续运行;T6:堆肥原料为 15.0 m^3 鸡粪、无菌渣,添加2 kg发酵菌剂,开启1台风机连续运行。

1.3 样品采集与测定

筒仓式堆肥反应器在15:00开始进出料,进出料总时长约为2 h。每天8:00和17:00记录堆肥反应器中部核心区温度。每组试验待反应器运行8 d时,出料前用垂直取样器在反应器内堆体的0.3 m、0.8 m、1.2 m处分别采集1个样品,随后出料,在放出堆肥的表层和底层各采集1个样品,采样量均为500 g,这5个样品可以反映筒仓式堆肥反应器内从上至下不同深度的堆肥腐熟情况。同时采集二次腐熟处理约2个月的堆肥产品的样品。采集的样品分为2部分,一部分自然风干,粉碎后过60目筛,用于测定总有机碳(TOC)含量、总氮(TN)含量、总磷(TP)含量和总钾(TK)含量;另一部分在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冷冻保存,用于测定pH值、含水率、腐殖质(HS)含量、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量、种子发芽指数(GI)。

用pH计测定堆肥样品的pH值^[16]。将物料在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干后测定含水率^[17]。总有机碳含量采

用有机碳分析仪测定^[18]。用 0.1 mol/L 的 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7\text{-NaOH}$ 溶液提取物料的腐殖质后,采用有机碳分析仪测定总有机碳含量^[18-19]。总氮含量、总磷含量、总钾含量参照NY/T 525-2021《有机肥料》中的标准方法测定^[20]。新鲜样品经 2 mol/L 的KCl溶液浸提,振荡6 h,过滤后采用流动分析仪测定铵态氮和硝态氮的含量^[21]。参照Li等^[22]的方法计算堆肥样品的种子发芽指数,具体方法为:称取10 g新鲜样品置于锥形瓶中,按固液比1:10(g/ml)加入100 ml去离子水,于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下180 r/min振荡浸提1.0 h,静置0.5 h后,用滤纸过滤,收集浸提液;在9 cm培养皿中放置1张定性滤纸,其上均匀放入10粒大小基本一致、饱满的樱桃萝卜种子,加入10 ml浸提液,盖上培养皿盖,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的培养箱中避光培养48 h,统计发芽种子粒数,并逐一测量主根长。种子发芽指数按公式(1)计算:

$$GI = \frac{A_1 \times A_2}{B_1 \times B_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中, A_1 为堆肥样品的浸提液培养的种子中发芽粒数占放入种子总粒数的百分比; A_2 为堆肥样品的浸提液培养的全部种子的平均根长; B_1 为水培的种子中发芽粒数占放入种子总粒数的百分比; B_2 为水培的全部种子的平均根长。所有测定均进行3次重复。

1.4 经济效益分析

根据养殖场对鸡粪处理的实际投入,评估筒仓式反应器堆肥的经济效益。使用公式(2)计算每吨堆肥产品的生产成本。

$$C_{\text{ton}} = (C_{\text{dc}} + C_{\text{year}} + C_{\text{int}}) / W \quad (2)$$

式中, C_{ton} 为每吨堆肥的成本; C_{dc} 为所有基础设施设备投资每年的折旧成本; C_{year} 为每年的运营管理成本; C_{int} 为基础设施设备投资的利率差; W 为每年生产的堆肥产品质量。

$$C_{\text{dc}} = I_{\text{inf}} / L_{\text{inf}} + I_{\text{eq}} / L_{\text{eq}} \quad (3)$$

式中, I_{inf} 为堆肥作业区基础建设投资; L_{inf} 为堆肥作业区基础建设的使用寿命; I_{eq} 为堆肥设备的投资; L_{eq} 为堆肥设备的使用寿命。

$$C_{\text{year}} = C_{\text{ene}} + C_{\text{mat}} + C_{\text{lab}} \quad (4)$$

式中, C_{ene} 为每年消耗的能源费用,包括电费和柴油费; C_{mat} 为每年消耗的原料费用; C_{lab} 为每年的员工薪酬。

1.5 数据分析

采用 Office Excel 2013 对试验数据进行整理和方差计算,采用 SPSS Statistics 22 对数据进行显著性分析,采用 Origin 9.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理条件下堆肥的腐熟状况

温度是表征堆肥腐熟的重要指标。图 1A 反映的是各处理反应器中部核心区 8 d 的温度变化。总体上说,各处理反应器核心区温度随着进出料出现周期性升温 and 降温。T1~T3 处理的堆体温度整体依次降低,表明添加菌渣提高了堆体温度。比较 T3~T5 处理的温度发现,随着风机开启数目从 1 台增加到 2 台,堆体温度也随之增高,但当风机开启数量继续增加到 3 台,在堆肥第 5 d、第 8 d 时堆体温度出现降低趋势,表明曝气强度较低时,增加曝气强度可以提高堆体温度,但高曝气强度反而降低堆体温度。比较 T5、T6 处理的温度发现,在较低的曝气强度下,添加发酵菌剂明显提高了堆体温度,尤其是在反应器运行 6~8 d 时。以上结果表明,添加适量菌渣,维持适中的曝气强度,添加发酵菌剂均可以促进反应器堆肥温度升高,进而促进堆肥腐熟。

图 1B 反映了筒仓式反应器堆肥过程中不同处理条件对堆肥含水率的影响。堆肥过程中,堆体温度升高,堆体内水分以水蒸气状态存在,当风机强制曝气时,堆体内的水分随空气流动挥发,从而降低堆肥含水率。T1~T3 处理的菌渣含量依次降低,反应器内堆体 0.3 m 处堆肥和放出的表层堆肥的含水率逐渐升高($P<0.05$); T3~T5 处理的风机开启数目依次减少,即曝气强度逐渐降低,反应器内堆体 0.3 m、1.2 m 处堆肥和放出的表层堆肥的含水率逐渐升高($P<0.05$),反应器内堆体 0.8 m 处堆肥含水率基本保持一致。反应器正常运行时,反应器放出堆肥的含水率为 25%~35%。与 T5 处理相比,T6 处理反应器内堆体 0.3 m、1.2 m 处堆肥和放出堆肥的含水率均显著降低($P<0.05$),表明添加发酵菌剂会降低堆肥含水率,这主要是因为添加发酵菌剂增加了反应器堆肥中微生物的数量和活性,促进了堆肥腐熟^[23]。因此,添加菌渣、增大曝气强度和添加发酵菌剂均降低堆肥含水率。

不同处理条件对堆肥 pH 值的影响见图 1C。总体来看,反应器内从上层到下层的堆肥 pH 值逐渐

升高。反应器内堆体 0.3 m 处为较新鲜物料,发酵时间较短,pH 值相对偏低;反应器内堆体 0.8 m、1.2 m 处堆肥物料处于高温发酵期,随着有机酸等的分解和大量氨气的产生,pH 值逐渐升高^[24]。放出的腐熟堆肥已经过了高温发酵阶段,堆肥 pH 值基本稳定在 9.4 左右。T1~T3 处理中,随着菌渣含量依次降低,反应器内堆体 1.2 m 处堆肥和放出堆肥的 pH 值逐渐升高($P<0.05$),表明添加菌渣会降低堆肥 pH 值。T3~T5 处理中,随着风机开启数量减少,曝气强度降低,放出堆肥的 pH 值先降低后升高($P<0.05$),表明曝气强度过高、过低均会提高堆肥的 pH 值。与 T5 处理相比,T6 处理中添加的发酵菌剂降低了反应器堆肥的 pH 值($P<0.05$)。综上,添加菌渣和添加发酵菌剂均会降低堆肥 pH 值,维持适中的曝气强度也会降低堆肥 pH 值。

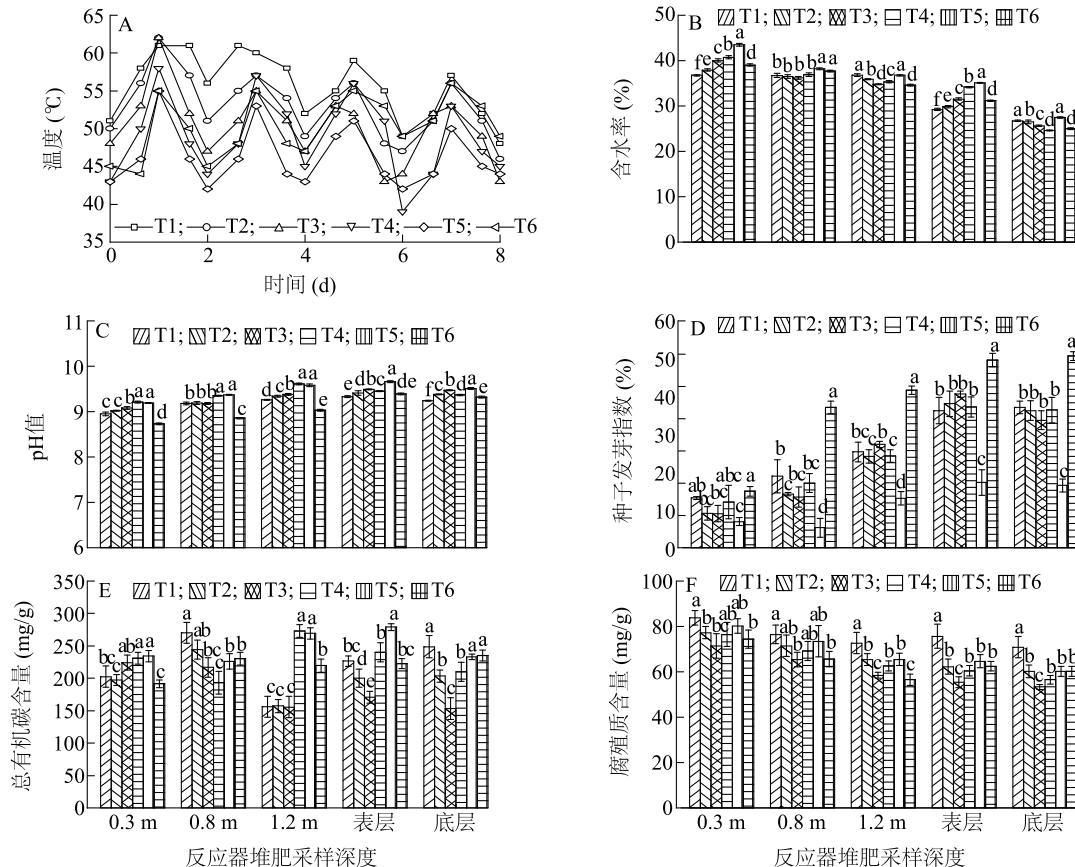
不同处理条件对堆肥种子发芽指数的影响见图 1D。总体上看,反应器中堆肥的种子发芽指数随堆肥深度增加有增大的趋势。T1~T3 处理中,放出堆肥的种子发芽指数基本一致,表明在较高的曝气强度下,反应器堆肥的原料组成对堆肥的种子发芽指数的影响不显著。T1~T3 处理放出堆肥的种子发芽指数可达 39.54%~47.69%。与 T3、T4 处理相比,T5 处理中,放出的表层和底层堆肥的种子发芽指数显著降低($P<0.05$),这可能是由于 T5 处理曝气强度较低,堆肥发酵不完全,有害物质含量高。徐鹏翔^[24]在研究曝气量、含水率、温度等对筒仓式反应器堆肥的影响时,发现反应器底层堆肥的种子发芽指数全部大于 80%,远高于本研究的结果。T6 处理各堆层堆肥的种子发芽指数均显著高于 T5 处理($P<0.05$),这可能是由于发酵菌剂可以促进堆肥腐熟,从而提高了堆肥的种子发芽指数。但所有处理堆肥的种子发芽指数均小于 70%,未达到国家标准的无害化处理要求,需要转移到通风棚进行二次腐熟处理。

有机质是微生物生长繁殖和新陈代谢的主要营养物质,有机碳含量变化可反映微生物活性及有机质降解情况。不同处理条件对堆肥中有机碳含量的影响见图 1E。T1~T3 处理中,随着菌渣含量逐渐降低,放出堆肥的有机碳含量依次降低($P<0.05$); T3~T5 处理中,随着曝气强度降低,放出堆肥的有机碳含量依次升高($P<0.05$),表明添加菌渣和降低曝气强度均增加了反应器堆肥的有机碳含量。与

T5 处理相比,T6 处理中反应器内堆体 0.3 m、1.2 m 处堆肥和放出的表层堆肥的有机碳含量显著降低 ($P<0.05$),表明添加菌剂可以增强堆肥微生物活性,降低有机碳含量并促进整个反应器内堆肥的腐熟进程。

腐殖质含量是评价堆肥腐熟和堆肥肥效的重要指标,与堆肥进程密切相关。不同处理条件对堆肥腐殖质含量的影响见图 1F。随着堆肥进行,反应器堆肥的腐殖质含量总体上随堆肥深度增加而降低。在各处理堆肥中,放出的表层堆肥腐殖质含量分别为 75.63 mg/g、62.25 mg/g、55.46 mg/g、60.50 mg/g、64.66 mg/g、62.42 mg/g。T1~T3 处理中,随着菌渣含量降低,反应器内 1.2 m 处堆肥和放出堆肥的腐殖质含量显著降低 ($P<0.05$),表明添加菌渣

可以提高堆肥腐殖质含量。T3 处理的反应器内堆体 1.2 m 处堆肥和放出堆肥的腐殖质含量显著低于 T4、T5 处理 ($P<0.05$),表明增大曝气强度会降低堆肥腐殖质含量。除反应器内堆体 1.2 m 处堆肥外,T6 处理各堆层堆肥的腐殖质含量与 T5 处理没有显著差异,表明添加发酵菌剂对反应器堆肥腐殖质含量影响不显著。Qiu 等^[25]发现添加 EM 发酵菌剂能提高鸡粪堆肥中腐殖质的含量,但 Zhao 等^[26]的研究结果则表明发酵菌剂对堆肥过程中腐殖质的抑制率达 36.63%。以上结果表明,反应器堆肥的腐殖质含量由上至下递减,添加菌渣、降低曝气强度提高了堆肥腐殖质含量,添加发酵菌剂对堆肥腐殖质含量的影响不显著。



A:不同处理条件下堆肥温度;B:不同处理条件下堆肥含水率;C:不同处理条件下堆肥 pH 值;D:不同处理条件下堆肥的种子发芽指数;E:不同处理条件下堆肥总有机碳含量;F:不同处理条件下堆肥腐殖质含量。T1:堆肥原料为 15.0 m³ 鸡粪、3.0 m³ 菌渣,开启 3 台风机连续运行;T2:堆肥原料为 15.0 m³ 鸡粪、1.5 m³ 菌渣,开启 3 台风机连续运行;T3:堆肥原料为 15.0 m³ 鸡粪、无菌渣,开启 3 台风机连续运行;T4:堆肥原料为 15.0 m³ 鸡粪、无菌渣,开启 2 台风机连续运行;T5:堆肥原料为 15.0 m³ 鸡粪、无菌渣,开启 1 台风机连续运行;T6:堆肥原料为 15.0 m³ 鸡粪、无菌渣,添加 2 kg 发酵菌剂,开启 1 台风机连续运行。不同小写字母表示在同一采样深度下,不同处理在 0.05 水平差异显著。

图 1 不同处理条件对筒仓式反应器堆肥腐熟的影响

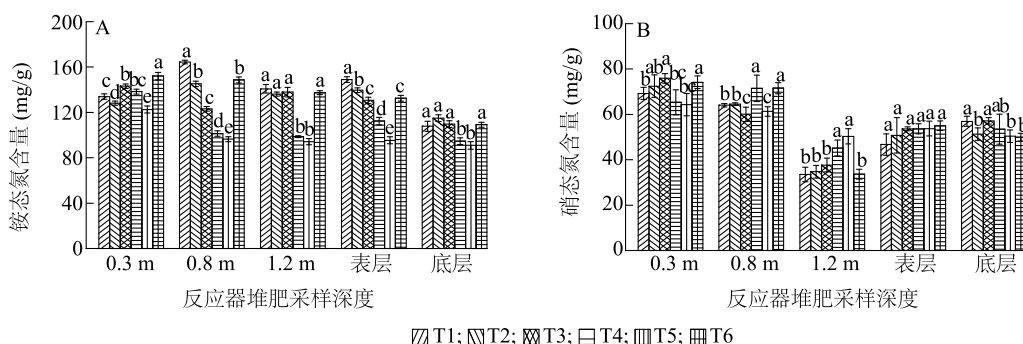
Fig.1 Effects of different treatment conditions on compost maturity in silo reactor

2.2 不同处理条件下堆肥氮素含量的变化

堆肥中的铵态氮和硝态氮是植物可以直接吸收利用的氮素形态。筒仓式反应器堆肥过程中,不同处理条件对堆肥铵态氮含量的影响见图 2A。T1~T3 处理中,反应器内 0.8 m 处堆肥和放出的表层堆肥的铵态氮含量逐渐降低 ($P<0.05$),表明添加菌渣增加了堆肥铵态氮含量。T3~T5 处理的曝气强度逐渐降低,反应器内堆体 0.8 m 处和放出的表层堆肥的铵态氮含量也逐渐降低 ($P<0.05$),表明降低曝气强度减少了堆肥铵态氮含量。这主要是因为降低曝气强度,反应器内堆肥发酵不完全,有机氮降解不充分,铵态氮含量降低。与 T5 处理相比,T6 处理增加了反应器内各堆层铵态氮含量 ($P<0.05$),这主要是由于添加发酵菌剂促进了堆肥有机氮的分解转化,进而增加铵态氮含量。堆肥结束时,各处理中反

应器放出堆肥的铵态氮含量均在 100~150 mg/kg,添加菌渣、增大曝气强度、添加发酵菌剂增加了堆肥铵态氮含量。

由图 2B 可知,硝态氮含量随着反应器内堆肥深度增加呈现先降低后增加趋势,这可能是因为反应器内中上层堆肥中微生物生长繁殖消耗大量硝态氮,同时提高了堆体温度,抑制硝化细菌生长,导致反应器内堆肥的硝态氮含量随高度下降迅速降低^[27]。而放出堆肥则处于堆肥反应器的下部,此时堆肥温度逐渐降低,硝化细菌开始生长,硝态氮含量又逐渐增加。但总体上说,反应器堆肥过程中,各处理放出堆肥的硝态氮含量较低,且差别较小。为了提高堆肥的硝态氮含量,需要对发酵堆肥进行二次腐熟处理,在较低温度下促进硝化细菌生长并合成硝态氮。



A:不同处理条件下堆肥铵态氮含量;B:不同处理条件下堆肥硝态氮含量。T1、T2、T3、T4、T5、T6 见图 1 注;不同小写字母表示在同一采样深度下,不同处理在 0.05 水平差异显著。

图 2 筒仓式反应器堆肥过程中氮素含量变化

Fig.2 Variations of nitrogen contents during composting in silo reactor

2.3 不同处理条件下堆肥总养分含量变化

总养分含量是衡量有机肥质量的重要指标。筒仓式反应器堆肥过程中,不同处理条件对总氮含量的影响见图 3A。总氮含量随着反应器内堆肥深度增加呈增加趋势,这主要是由于随着堆肥物料从反应器上层转移至下层,堆肥时间延长,有机质发生矿化以 CO_2 形式损失,加上水分挥发造成堆肥物料出现“浓缩效应”,导致总氮含量在反应器内下层堆肥中较高。T1~T3 处理的菌渣含量逐渐降低,T3 处理的反应器内堆体 1.2 m 处堆肥和放出的底层堆肥的总氮含量显著高于 T1 处理 ($P<0.05$),表明添加菌渣降低了堆肥总氮含量。T3~T5 处理的曝气强度逐渐降低,T3 处理的反应器内堆体 1.2 m 处和放出堆肥的总氮含量显著高于 T4、T5 处理 ($P<0.05$),表

明增大曝气强度可以增加堆肥总氮含量。与 T5 处理相比,添加发酵菌剂增加了反应器内堆体 0.8 m、1.2 m 处堆肥和放出堆肥的总氮含量 ($P<0.05$)。堆肥结束时,各处理反应器放出堆肥的总氮含量为 1.32%~1.89%。综上,添加菌渣会降低堆肥总氮含量,增大曝气强度和添加发酵菌剂可以增加堆肥总氮含量。

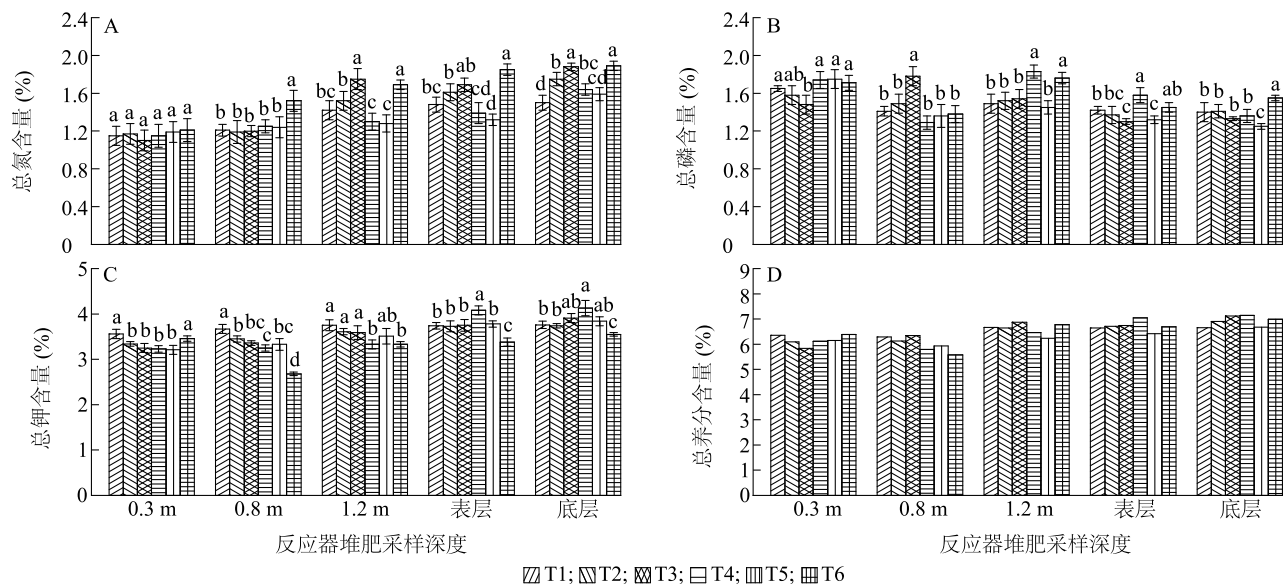
不同处理条件对堆肥总磷含量的影响见图 3B。T1~T3 处理中,T3 处理的反应器内堆体 0.3 m 处堆肥和放出的表层堆肥的总磷含量显著低于 T1 处理 ($P<0.05$),T3 处理的反应器内堆体 0.8 m 处堆肥的总磷含量显著高于 T1、T2 处理 ($P<0.05$),反应器内堆体 1.2 m 处堆肥和放出的底层堆肥的总磷含量基本一致。T3~T5 处理中,T3 处理的反应器内堆体

0.3 m 处堆肥的总磷含量显著低于 T4、T5 处理 ($P < 0.05$), T3 处理的反应器内堆体 0.8 m 处堆肥的总磷含量显著高于 T4、T5 处理 ($P < 0.05$), T4 处理的反应器内堆体 1.2 m 处堆肥和放出的表层堆肥的总磷含量显著高于 T3、T5 处理 ($P < 0.05$)。以上结果表明,随着菌渣含量和曝气强度降低,各堆层堆肥的总磷含量变化趋势不同。这可能是由于反应器内不同堆层的微生物种类和活性不同,对有机质和磷素的降解速率不同,导致不同堆层的总磷含量发生波动。T6 处理中,反应器内堆体 1.2 m 处堆肥和放出堆肥的总磷含量显著高于 T5 处理 ($P < 0.05$),表明添加发酵菌剂可以提高堆肥总磷含量。各处理反应器放出堆肥的总磷含量为 1.25%~1.58%。

堆肥过程中总钾含量变化如图 3C 所示。反应器内堆肥的总钾含量随着堆肥深度增加呈上升趋势。这主要是由于堆肥过程中钾素不易损失,而随

着堆体水分挥发和有机质降解,堆体质量下降,总钾含量相对提高。各处理反应器放出堆肥的总钾含量为 3.38%~4.13%。T1~T3 处理中,反应器内 1.2 m 处堆肥和放出堆肥的总钾含量差别不大,表明堆肥原料组成对堆肥总钾含量影响较小。T3~T5 处理中, T4 处理放出的表层堆肥的总钾含量显著高于 T3、T5 处理 ($P < 0.05$),表明曝气强度过高或过低都不利于反应器堆肥中总钾的留存。与 T5 处理相比, T6 处理的反应器内 0.8 m 处堆肥的总钾含量显著降低 ($P < 0.05$),这可能是 T6 处理添加的发酵菌剂,在反应器内中层核心区(0.8 m)剧烈生长,对钾素消耗较大,导致反应器内中层总钾含量降低。

不同处理条件对堆肥的总养分含量的影响如图 3D 所示。各处理放出堆肥的总养分含量为 5.58%~7.44%,达到了国家标准中对有机肥的养分要求(总养分含量 $\geq 5.00\%$)。



A:不同处理条件下堆肥总氮含量;B:不同处理条件下堆肥总磷含量;C:不同处理条件下堆肥总钾含量;D:不同处理条件下堆肥总养分含量。T1、T2、T3、T4、T5、T6 见图 1 注;不同小写字母表示在同一采样深度下,不同处理在 0.05 水平差异显著。

图 3 不同处理条件下堆肥养分含量变化

Fig.3 Changes of nutrient contents during composting under different treatments

2.4 筒仓式反应器堆肥产品质量分析

筒仓式反应器堆肥产品各指标与有机肥料标准 (NY/T 525-2021) 的比较见表 2。筒仓式反应器堆肥产品的总养分含量为 5.58%~7.44%,达到国家商品有机肥标准要求。总有机质含量按照有机碳含量换算,为 26.44%~48.12%,含水率为 25.00%~35.00%,pH 值在 9.40 左右,堆肥产品的种子发芽

指数为 19.33%~59.50%,均未达到国家商品有机肥标准要求。因此,筒仓式反应器堆肥产品不能直接售卖,需要转移到通风棚中进行二次腐熟处理。

一般而言,堆肥产品二次腐熟时间约为 2 个月。采集二次腐熟堆肥进行理化指标测定,由表 2 可知,二次腐熟产品的总养分含量为 8.63%,总有机质含量为 58.82%,含水率为 20.67%,pH 为 8.30,种子发芽

指数为 116.00%,达到国家商品有机肥的标准。

表 2 堆肥产品质量分析

Table 2 Quality analysis of compost products

堆肥指标	有机肥料标准 (NY/T 525-2021)	反应器 堆肥产品	二次 腐熟产品
总有机质含量(%)	≥30.00	26.44~48.12	58.82
含水率(%)	≤30.00	25.00~35.00	20.67
pH 值	5.50~8.50	9.40	8.30
总氮含量(%)		1.32~1.89	2.36
总磷含量(%)		1.25~1.58	2.81
总钾含量(%)		3.38~4.13	3.46
总养分含量(%)	≥4.00	5.58~7.44	8.63
种子发芽指数(%)	≥70.00	19.33~59.50	116.00

2.5 鸡粪筒仓式反应器堆肥产品经济效益分析

本试验在扬州市某养殖场的堆肥作业区进行。

表 3 设施设备投资成本

Table 3 Investment costs of facilities and equipment

类别	项目	单价	面积/数量	合计成本(×10 ⁴ 元)
基础设施建设成本	混凝土地面	100(元,1 m ²)	630 m ²	6.30
	混凝土道路	100(元,1 m ²)	70 m ²	0.70
	顶棚	100(元,1 m ²)	630 m ²	6.30
	围墙	200(元,1 m ²)	77 m	1.54
设备购置成本	铲车	20(×10 ⁴ 元,1 台)	1 台	20.00
	筒仓式反应器	80(×10 ⁴ 元,1 套)	1 套	80.00
合计				114.84

2.5.2 折旧成本和利率差 折旧成本包括基础设施建设和堆肥设备的折旧费用。本研究中所有基础设施的使用寿命为 20 a,铲车和筒仓式反应器的使用寿命为 10 a,则基础设施建设的折旧费用为 1 a 0.74×10⁴元,堆肥设备的折旧费用为 1 a 10×10⁴元,设施设备折旧成本合计为 1 a 10.74×10⁴元。年利率按投资成本的 3.5%计算,则设施设备投资成本的利率差为 1 a 4.02×10⁴元。

2.5.3 运营管理成本 运营管理成本主要包括生产能源消耗、员工薪酬、堆肥原料成本等。堆肥设备能源消耗为铲车和筒仓式反应器的耗能。本研究中柴油和电力单价参照 2022 年初的市场平均价,其中柴油价格为 1 L 8 元,工商业用电价格为 1 kW·h 0.4 元。铲车主要用于从鸡舍传送带接收鸡粪,将

为了评估该养殖场鸡粪反应器堆肥处理工艺的经济效益,对堆肥处理环节的设施设备投资成本、运营管理成本和堆肥收益等进行分析。

2.5.1 设施设备投资成本 该养殖场堆肥作业区的设施设备投资成本(未计入土地使用费)见表 3,主要包括基础设施建设成本和设备购置成本。设施建设成本为地面硬化、修建道路、架设顶棚、修建四周围墙等的投入。堆肥作业区长 35 m,宽 18 m,配套建有一条宽 2 m 的道路供车辆通行,地面全部采用混凝土硬化,堆肥作业区上部覆盖顶棚,四周除部分开口处,建有高 1.8 m 的混凝土围墙,围墙总长度为 77 m。设备购置成本包括 1 套筒仓式堆肥反应器和 1 台铲车的费用。由表 3 可知,该养殖场堆肥作业区一次性设施设备投资成本为 1.148 4×10⁶元,其中筒仓式反应器购置费用一项占设施设备投资成本的 70%。

鸡粪和菌渣运送至堆肥反应器上料斗,将出料运至通风棚中二次腐熟,此外用于堆肥工作区必要的物料整理工作。铲车柴油平均能耗为 10 L/h,平均每天工作 1 h。堆肥反应器的电力消耗为曝气风机用电。风机单台功率为 12.5 kW,平均每天运行 23 h,共 3 台风机,其中半年开启 2 台风机,另外半年开启 3 台风机。经计算可知,每年铲车柴油能耗为 2.92×10⁴元,筒仓式反应器电力能耗为 10.44×10⁴元,堆肥设备能源消耗成本合计为 13.36×10⁴元。

堆肥作业需要 1 名员工每天工作 2~3 h,其余时间该员工从事其他养殖活动,则该员工在堆肥作业上的时间投入约为总工作时间的 1/3。按照目前扬州市养殖业一般职工的月工资标准,该员工的月工资为 5 000 元,则堆肥作业员工每年的薪酬为 2×

10⁴元。

堆肥原料成本包括辅料和发酵菌剂费用。为了筒仓式反应器全年稳定运行,有半年时间需要添加菌渣作为辅料,1 t 菌渣 65 元,约为 2 m³,按每次进料添加 3 m³ 菌渣计算,则每年菌渣费用为 8.9×10³ 元。此外,为了促进发酵,平均每年需添加发酵菌剂 12 包,每包 50 元,则每年菌剂费用为 0.6×10³ 元。鸡粪为养殖场自产,不计入费用。每年堆肥原料成本为 9.5×10³ 元。综上,该养殖场堆肥反应器的运营管理成本合计为 1.63×10⁵ 元。

2.5.4 有机肥生产成本和收益 筒仓式反应器每 2 d 可以生产有机肥 6 m³,密度为 0.6 t/m³,每年共生产鸡粪有机肥约 657 t。每年设施设备折旧成本为 1.07×10⁴ 元,利率差为 4.02×10⁴ 元,运营管理成本为 1.63×10⁵ 元,则 1 t 有机肥单位生产成本为 473 元。Liu 等^[5,28] 估算的条垛式、槽式和反应器堆肥工艺对 1 t 畜禽粪便的处理成本分别为 45.43 元、71.45 元、70.44 元,这些堆肥工艺的有机肥生产成本分别约为 1 t 467.3 元、381.6 元和 354.5 元,估算的反应器堆肥工艺的有机肥生产成本低于本研究的结果。这主要是因为本研究中计算的有机肥生产成本包括养殖场整个堆肥作业区的实际投资运营成本和利率差,且筒仓式反应器并没有全负荷运转。目前 1 t 鸡粪有机肥出售价格为 600 元,假定鸡粪有机肥能全部售出,则生产销售鸡粪有机肥可获得收益 8.34×10⁴ 元。由于筒仓式反应器购置费用占养殖场粪污处理设施设备总投资成本的 70%,因此建议加大对畜禽养殖场购置堆肥反应器的专项补贴力度,以降低养殖场的资金投入,提高养殖场使用堆肥反应器处理粪便的积极性。

3 结论

在筒仓式反应器处理鸡粪的过程中,添加菌渣、维持适中的曝气强度、添加发酵菌剂均可以提高堆肥温度,降低 pH 值;添加菌渣、增大曝气强度、添加发酵菌剂均可以降低堆肥含水率;添加菌渣、降低曝气强度均可以提高总有机碳和腐殖质含量,添加发酵菌剂可以降低总有机碳含量,对腐殖质含量影响较小;添加菌渣、增大曝气强度、添加发酵菌剂可以增加堆肥氨态氮的含量,对硝态氮含量的影响较小。除总养分含量外,反应器堆肥产品的总有机质含量、含水率、pH 值、种子发芽指数等均未达到国家标准

要求,需要进行二次腐熟处理。堆肥反应器每年可生产鸡粪有机肥约 657 t,1 t 有机肥生产成本为 473 元,建议对畜禽养殖场配套的堆肥反应器实施农机专项补贴。

参考文献:

- [1] BAI Z H, MA W Q, MA L, et al. China's livestock transition: driving forces, impacts, and consequences [J]. *Science Advances*, 2018, 4(7): 8534.
- [2] 王 飞,邱 凌,沈玉君,等. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 261-267.
- [3] CHADWICK D, JIA W, TONG Y A, et al. Improving manure nutrient management towards sustainable agricultural intensification in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 34-46.
- [4] MORAL R, PAREDES C, BUSTAMANTE M A, et al. Utilization of manure composts by high-value crops: safety and environmental challenges [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5454-5460.
- [5] LIU Z L, WANG X, WANG F H, et al. The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: benefits and limitations [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122328.
- [6] 中华人民共和国农业农村部. 粪便好氧堆肥技术指南[M]. 北京:中国农业出版社,2017.
- [7] JIANG T, LI G X, TANG Q, et al. Effects of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions during composting of pig feces in pilot scale [J]. *Journal of Environmental Science*, 2015, 31: 124-132.
- [8] CAO Y B, WANG X, BAI Z H, et al. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: a meta-analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 626-635.
- [9] JIANG T, SCHUCHARDT F, LI G X. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 212-217.
- [10] 侯 超,李永彬,徐鹏翔,等. 筒仓式堆肥反应器不同通风量对堆肥效果的影响 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(8): 4737-4744.
- [11] IYENGAR S R, BHAVE P P. In-vessel composting of household wastes [J]. *Waste Management*, 2006, 26(10): 1070-1080.
- [12] 冯 康,孟海波,周海宾,等. 一体化好氧发酵设备研究现状与展望 [J]. *中国农业科技导刊*, 2018, 20(6): 63-69.
- [13] ROSIMARA Z, DA S C P, ELOISE D C, et al. Composting of smuggled cigarettes tobacco and industrial sewage sludge in reactors: physicochemical, phytotoxic and spectroscopic study [J]. *Waste Management*, 2018, 79: 537-544.
- [14] YANG Y L, TAO X, LIN E S, et al. Enhanced nitrogen removal

- with spent mushroom compost in a sequencing batch reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244: 897-904.
- [15] 徐鹏翔,沈玉君,周海宾,等. 原料含水率对筒仓式反应器堆肥氮素转化的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(11): 180-188.
- [16] GOU C, WANG Y, ZHANG X, et al. Inoculation with a psychrotrophic-thermophilic complex microbial agent accelerates onset and promotes maturity of dairy manure-rice straw composting under cold climate conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 339-346.
- [17] JIA X J, QIN X M, TIAN X P, et al. Inoculating with the microbial agents to start up the aerobic composting of mushroom residue and wood chips at low temperature[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(10): 105294.
- [18] YE Z M, DING H, YIN Z L, et al. Evaluation of humic acid conversion during composting under amoxicillin stress; emphasizes the driving role of core microbial communities[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337: 125438.
- [19] 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.
- [20] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY/T 525-2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [21] GUO H H, GU J, WANG X J, et al. Beneficial effects of bacterial agent/bentonite on nitrogen transformation and microbial community dynamics during aerobic composting of pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 298: 122384.
- [22] LI H H, ZHANG T, TSANG D C W, et al. Effects of external additives: biochar, bentonite, phosphate, on co-composting for swine manure and corn straw[J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 125927.
- [23] WANG M H, LIU Y, WANG S Q, et al. Development of a compound microbial agent beneficial to the composting of Chinese medicinal herbal residues[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 330: 124948.
- [24] 徐鹏翔. 反应器堆肥过程中氮素的转化特征及工艺优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [25] QIU Z P, LI M X, SONG L Y, et al. Study on nitrogen-retaining microbial agent to reduce nitrogen loss during chicken manure composting and nitrogen transformation mechanism[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 285: 124813.
- [26] ZHAO H X, LI S M, JIANG Y X, et al. Independent and combined effects of antibiotic stress and EM microbial agent on the nitrogen and humus transformation and bacterial community successions during the chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 354: 127237.
- [27] 李旺旺,刘燕,李国学,等. 菌剂和含磷添加剂联合添加对污泥堆肥污染气体排放及堆肥品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(4): 878-887.
- [28] LIU Z L, WANG X, LI S, et al. Advanced composting technologies promotes environmental benefits and eco-efficiency: a life cycle assessment[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126576.

(责任编辑:陈海霞)