



鸡粪好氧堆肥技术研究进展

王鑫源, 程国伟, 朱晓波, 刘焕良, 刘 萌, 肖 磊, 张世威, 刘 辉

(河北玖兴农牧发展有限公司, 河北保定 072650)

摘要:我国养鸡业正在向规模化、集约化、工业化蓬勃发展,其副产品鸡粪作为粪肥的重要原材料之一,成为新能源中生物质能开发和利用的研究热点。好氧堆肥是粪污肥料化最常用,最经济有效的处理方式之一,但传统好氧堆肥存在起爆慢、周期长、碳氮损失大、产物品质差、臭气排放多、抗生素残留、重金属超标等弊端,阻碍了粪污资源循环和安全利用的发展。本文综述了内源参数和外源添加剂对鸡粪好氧堆肥影响以及鸡粪好氧堆肥对抗生素消减和重金属钝化影响的研究进展,旨在为鸡粪资源开发利用、促进农业绿色、可持续发展提供参考。

关键词:鸡粪;好氧堆肥;内源参数;外源添加剂;抗生素;重金属

[中图分类号] S879.9 [文献标志码] A [文章编号] 1004-6704(2024)-04-0022-07

Research Progress on Aerobic Composting Technology of Chicken Manure

WANG Xinyuan, CHENG Guowei, ZHU Xiaobo, LIU Huanliang,

LIU Meng, XIAO Lei, ZHANG Shiwei, LIU Hui

(Hebei Jiuxing Agriculture and Animal Husbandry Development Co., Ltd., Baoding, Hebei 072650, China)

Abstract: China's chicken industry is developing towards large-scale, intensive and industrialization. As one of the important raw materials of manure, its by-product chicken manure has become a research hotspot in the development and utilization of biomass energy in new energy. Aerobic composting is one of the most commonly used and most economical and effective treatment methods for manure fertilization. However, traditional aerobic composting has the disadvantages of slow initiation, long cycle, large carbon and nitrogen loss, poor product quality, more odor emissions, antibiotic residues, and excessive heavy metals, which hinder the development of the safe utilization of manure resources. In this paper, the effects of endogenous parameters and exogenous additives on chicken manure aerobic composting and the effects of chicken manure aerobic composting on antibiotic reduction and heavy metal passivation were reviewed, aiming to provide reference for the development and utilization of chicken manure resources and the promotion of green and sustainable development of agriculture.

Key words: chicken manure; aerobic composting; endogenous parameters; exogenous additives; antibiotic; heavy metal

鸡消化道短、饲料消化率低,致使鸡粪中营养物质丰富,其中鸡粪中氮含量居畜禽粪便首位。鸡粪未腐熟或过量施用会导致土壤板结,进入水中会导致水体富营养化或地表水污染,释放的含碳、氮、硫等元素的废气会导致恶臭、雾霾、温室效应、酸雨等大气污染^[1],残存的病原菌、药物、重金属也在时刻威胁环境和人类健康。因此,鸡粪能否被科学处理

会直接影响养禽业的可持续发展。

近年来,国家绿色农业政策陆续出台。农牧发[2021]37号《“十四五”全国畜牧兽医行业发展规划》以及环土壤[2022]8号《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021—2025年)》均明确规定:推行畜禽粪肥还田,推进种养结合。国标委联[2023]36号《国家标准委 农业农村部 生态环境部关于推进畜禽粪污资源化利用标准体系建设的指导意见》中强调:加快畜禽粪污资源化利用,防治畜禽养殖污染,提升畜牧业绿色发展水平。

[收稿日期] 2024-04-24

[第一作者] 王鑫源(1998-),男,硕士,主要从事家禽养殖生产工作。E-mail:1773023604@qq.com

鸡粪资源利用技术包括:烘干处理、好氧堆肥、厌氧发酵、热化学转化技术等,其中,好氧堆肥是粪污肥料化最常用,最经济有效的处理方式之一。好氧堆肥是在有氧环境中,微生物将不稳定、可降解的有机物转化为稳定腐殖质的生物转化过程,使农业废弃物达到农用标准,无害化、资源化。好氧堆肥可杀灭病原菌、虫卵和草籽、钝化重金属、降解抗生素、消减抗生素抗性基因(Antibiotics resistance genes, ARGs)等。本文针对内源参数和外源添加剂对鸡粪好氧堆肥的影响以及鸡粪好氧堆肥对抗生素消减和重金属钝化的影响进行了综述,以期对鸡粪好氧堆肥技术研发和实际应用提供参考。

1 内源参数对鸡粪好氧堆肥的影响

微生物是好氧堆肥的核心决定因素,调节内源参数是为了通过改善堆肥环境来增强堆肥中微生物的生长、代谢、繁殖活动,促进堆肥腐熟^[2]。堆肥内源参数主要包括:碳氮比(C/N)、温度、含氧量、含水量、pH值。调控单一内源参数较简单,但在实际堆肥中因各个参数相互影响而需要整体协调优化。

1.1 碳氮比

在好氧堆肥过程中微生物损耗大量碳水化合物,碳含量减少,氮含量相对提高,C/N先持续降低后基本稳定。碳为微生物提供能量,氮参与组成微生物细胞。堆肥初C/N高则氮缺乏,导致微生物难以快速生长,堆肥周期延长^[3];C/N低则氮过多,NH₃挥发随之增多,导致堆肥品质下降^[4]。鸡粪中C/N低,一般利用木质素、纤维素含量高的农林废弃物作为辅料来提高鸡粪堆肥的C/N。但当企业堆肥被辅料的成本或季节性供应不足所限制时,也可选择尝试不添加辅料以低C/N进行生产。周毅杰等^[5]用低C/N($9.2 \leq C/N \leq 10.2$)的纯鸡粪(鲜鸡粪、干鸡粪质量比2:1)进行堆肥,研究发现,在堆肥中添加10%凹凸棒可促进腐熟,增强氮、磷、钾等固持,但添加过多($\geq 15\%$)凹凸棒则会对堆肥腐熟及品质有不利影响。

1.2 温度

好氧堆肥时,除外界环境温度外,堆肥温度变化主要依赖于微生物降解有机物所释放的热量,而堆肥温度也可直接影响微生物的活性变化、群落组成以及堆肥的进程、状态和品质。根据《GB 7959—2012 粪便无害化卫生要求》,好氧发酵(高温堆肥)要求堆温 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至少持续10 d;堆温 $\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至少持续5 d^[6]。高温期温度一般控制在45~60 $^{\circ}\text{C}$,纤维素、木质素主要在高温期被降解,温度过高则会导

致微生物失活并且NH₃、VOCs、H₂S等废气排放增多导致堆肥品质降低以及环境污染加剧,在实际生产中,可使用提高通风量和翻堆来降低堆肥温度。温度过低则堆肥难以腐熟或堆肥周期延长^[7]。

1.3 含氧量

当堆体氧含量低于8%或局部缺氧时,有机物被厌氧发酵产生CH₄、H₂S、NO等导致环境恶臭的气体,堆肥总养分含量减少,品质下降。空气的自然渗透无法给堆肥提供足够的氧气,可采用人工、机械翻堆或强制曝气来使物料与氧气充分接触提高供氧效果。供氧效果由强到弱依次为强制曝气、机械翻堆、人工翻堆。分阶段通气比常规通气更能保障堆肥对通气量的需求。牛明芬等^[8]在C/N为30的玉米秸秆+鸡粪的堆肥中,通过预试验确定升温期、高温期、降温期的呼吸需氧量,试验采用分阶段通气策略。研究表明,分阶段通气可减少堆肥干物质损失,提高富里酸、胡敏酸含量,推进腐殖化进程。堆肥时通风量越大,NH₃排放量越大,因此需合理控制通风量与废气排速^[9]。

1.4 含水量

堆肥时初含水量低导致微生物缺水,可溶性营养物质难以溶解;初含水量高会造成堆肥基质压缩、孔隙阻塞、含氧量不足,从而产生局部厌氧,恶臭气体排放增加。初含水量过高或过低均会影响微生物的生长、代谢、繁殖和活性,从而延长堆肥的腐熟周期、降低堆肥品质。堆肥过程中水分变化主要是因有机物氧化分解提高含水量、通风和蒸发降低含水量。在水分蒸发时还会降低热量,调整堆肥温度。

1.5 pH值

中性或偏碱性的堆肥更适合微生物的生长代谢。堆肥时pH不是一成不变的,堆肥初期有机物大量分解产生有机酸使pH降低;到高温期有机酸分解以及氨化作用增强,使pH提高,NH₃挥发增多,肥效降低;堆肥后期因温度降低、翻堆使硝化作用增强,pH再次降低至平稳^[10-11]。当 $5 \leq \text{pH} \leq 12$ 时,堆肥可进行;当 $6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$ 时,微生物活性最强,堆肥效果最佳^[12]。

2 外源添加剂对鸡粪好氧堆肥的影响

2.1 生物添加剂—微生物菌剂

微生物的活性和群落组成在鸡粪好氧堆肥发酵中起决定性作用。微生物发酵释放生物热,提高堆体温度,促进堆肥腐熟。微生物发酵会产生由NH₃、H₂S、氮氧化物、挥发性有机物等一百多种物质构成的导致环境恶臭的臭气^[13]。好氧堆肥时接

种外源微生物菌剂可改善微生物的活性和群落组成,促进起爆,提高高温期温度和产品品质,延长高温期,缩短堆肥周期,减排臭气,节本增收。张玉凤等^[14]研究表明,接种曲霉菌、酵母菌等混合菌种或接种暹罗芽孢杆菌均可缩短 10 d 的发酵时间。于静等^[15]在以鸡粪+小麦秸秆为材料的堆肥中接种 Tx、Tc 菌剂,研究表明两种菌剂均可促进堆肥腐熟、抑制 NH₃ 排放、提高产物中全氮质量分数、改变微生物群落结构。不同种类菌剂的应用效果存在差异,需针对堆肥底物筛选优势微生物菌剂。张智等^[16]在鸡粪、谷糠(按鲜重 3:1 混合)混合物中分别添加 0.5% 的人元生物菌、晟康生物菌和自制生物菌。结果表明,堆肥均达到腐熟状态,升温快、高温期延长, NH₃、SO₂ 和脂肪胺类气体的排放减少,其中人元生物菌效果最佳。为提升菌剂的应用效果,往往将具备协同作用的菌进行复配组合。刘艳薇等^[17]研究表明,假单胞菌与施氏假单胞菌组成的复合菌在以鸡粪、糠醛渣为物料的堆肥中,可降低氨气排放量、提高总养分含量,加速堆肥腐熟和除氮的效果。

研究认为^[18],堆肥底物主要在高温期被降解,嗜热菌促腐熟效果优于嗜温菌。范建华等^[19]从鸡粪中筛选出的发酵菌 Y₁ 株、F₁ 株、J₂ 株可耐 55 °C 高温并抑制 NH₃、H₂S 的臭气排放,将 0.1% 复合菌剂(Y₁、F₁、J₂ 按体积 1:1:1 复合)添加到以稻壳、锯木屑、鸡粪为原料的发酵池,推进腐熟进程、嗜热除臭以及固氮的效果显著。钱玉婷等^[7]在 80 °C 恒温烘箱中进行以鸡粪、麦秸秆和梧桐叶为原料的超高温堆肥试验。结果表明,复合嗜热菌接种量越大,养分转化速率越高,综合考虑 5% 为最佳接种量,并证实堆肥直接步入高温期可促进底物降解。但是我国北方冬季寒冷,大多数菌剂难以在低温环境中启动发酵,为此,杨明珠等^[20]用 3 种嗜冷菌株复配了 IM 菌剂,研究发现,在低温环境中 IM 菌剂可促进堆肥起爆,减少腐熟周期,可用于冬季低温堆肥。

2.2 物理添加剂

好氧堆肥中常用的物理添加剂通常为吸附剂,因多孔多羟基结构、热稳定性好、表面积大、吸附能力强,对其在好氧堆肥中的研究更多聚焦在对温室气体、臭气的减排和降低养分损失方面^[21]。李新荣等^[22]研究表明,在以鸡粪、玉米秸秆、菌糠(重量比 10:5:1)为原料的堆肥中,沸石对 NH₃、VOCs 协同减排成效最佳。王旭杰等^[23]研究表明,在鸡粪、玉米秸秆组成的堆肥中添加凹凸棒可抑制碳氮代谢,

减少碳氮损失。

在物理添加剂中,生物炭因来源于农业废弃物,应用于农业废弃物堆肥,并施用于土壤,可推动“碳中和”进程,从而成为近年研究热点。生物炭由生物质热解产生,其原料来源广泛、成本低廉。生物炭中的碳元素非常稳定,对堆体 C/N 几乎无影响。因其比表面积大、孔隙率高,可降低堆体密度、维持好氧环境、提高含水率,有利于微生物的附着及生长繁殖从而释放热量,其富含表面官能团可刺激微生物活性。添加生物炭可改善堆肥的理化性质、促进腐熟、提高堆肥品质、减少温室气体排放。吴晓东等^[24]研究表明,在以鸡粪、小麦秸秆(质量比 1:1)为原料堆肥时,添加柠条生物炭有利于堆体保温、保水,促进有机质降解,增强对氨气的吸附,降低氮素损失,9%~12% 为保氮最佳添加量。张海滨等^[25]研究发现,在用鸡粪沼渣堆肥时添加果木生物炭,可减少细菌数量、提高真菌数量和腐殖质含量,2% 生物炭促腐熟效果最佳,添加量过多反而对堆肥有负面影响。荣荣等^[26]用鸡粪、玉米叶(质量比 1:2)共堆肥时分别添加小麦秸秆或稻壳制成的生物炭,均可降低堆体 C/N,抑制 NH₃ 排放;添加量不同,排放效果也不同,均为 15% > 10% > 5%;其中稻壳生物炭因表面积更大,在相同添加量下保氮效果均更佳。

2.3 化学添加剂

化学添加剂主要通过自身特性来改善好氧堆肥,例如酸性添加剂中的 H⁺ 可固定游离的氨氮,磷酸盐添加剂能与氮素结合形成沉淀。在好氧堆肥时添加化学添加剂可减少温室气体和臭气排放,减少 C、N、S 损失,保持堆肥养分,促进腐熟。李慧杰等^[27]研究发现,在以蛋鸡粪和米糠(鲜质量比 4:1)为材料的条垛堆体中分别添加 5% 过磷酸钙,可有效抑制 CH₄ 排放,提高堆体透气性,减少产甲烷古菌数量。李宁等^[28]在 C/N 20、含水率 60% 的基料添加 1.4% 自制的复合铜盐(CCS),堆肥总氮损失率仅为 6.36%。刘媛媛等^[29]研究表明,在鸡粪、玉米秸秆为材料的堆体中添加 10% 磷石膏可延长 2 d 高温期,推动堆肥腐殖化进程,改善腐殖质品质。

李新荣等^[22]研究表明,对于含硫有机挥发气体的减排,有机酸类化学添加剂效果优于吸附类物理添加剂。并且据研究发现,在生物、物理、化学三类添加剂中,化学添加剂固氮减氮效果最好,其中以酸性盐类为代表;而物理添加剂对温室气体 N₂O、CH₄ 的减排成效更好^[30-31]。化学添加剂因效果好、

用量少、适用性强从而受到人们青睐,但化学添加剂通常成本高、副作用大、易造成土壤盐渍化或重金属污染,需严格筛选、精简用量。

3 鸡粪好氧堆肥对抗生素消减及重金属钝化的影响

3.1 对抗生素消减的影响

抗生素不能被鸡全部吸收,大量抗生素会伴随排泄物主要以原药形态直接排放到环境中,诱导形成抗性基因、耐药菌^[32]。若鸡粪直接还田,抗生素不仅会被土壤吸附,还会在环境中迁移。其中大环内酯类、四环素类和磺胺类甚至能够在土壤中残留8个月以上^[33]。好氧堆肥可显著消减鸡粪中的残留抗生素。Wang等^[34]研究表明,好氧堆肥35d后,肉鸡粪便中的多西环素可降解80%以上,加替沙星可完全降解。据研究表明,堆肥的温度、含水量、容重、时间等堆肥内源参数以及抗生素种类、初始浓度等均会对堆肥过程中抗生素的消减产生影响。温度为最主要影响因素,温度越高,抗生素降解率越大,可能是因为高温破坏了抗生素结构^[35]。朱为静等^[36]研究发现,在鸡粪堆肥中,残留的磺胺-6-甲氧嘧啶和强力霉素的降解与堆肥的含水率、容重均为负相关关系,可能是因为含水量和容重会对微生物新陈代谢产生影响进而改变堆肥温度;并且大多数抗生素的降解半衰期都是35d之内,因此为有效降解抗生素可适量增加堆肥时间。天然的四环素类容易降解,人工合成的磺胺类、氟喹诺酮类较难降解^[37]。孟磊等^[38]研究表明,氟喹诺酮类抗生素的降解速率与鸡粪中其初始浓度为正相关关系,但可能因抗生素初始浓度过高抑制了外源添加菌剂的活性而未能实现抗生素的高效去除。

鸡粪好氧堆肥时抗生素降解易受各种因素影响,致使残留抗生素实难完全高效去除,对其降解机制尚不明确,仍需继续探究。以期早日实现好氧堆肥的绿色、无害、无抗。

3.2 对重金属钝化的影响

在畜禽饲料中,添加金属元素可促进生长、代谢,强化骨骼,提高免疫调节和肠道屏障功能,增强抗菌水平,但只有大约5%能被吸收,余者皆会暂存粪便排至体外,造成粪便重金属超标而导致重金属污染。好氧堆肥可通过腐殖化浓缩重金属,利用微生物的静电吸附、络合作用以及有机质氧化分解产生的官能团来吸附重金属,降低重金属生体可用率^[39]。鸡粪中的重金属无法被微生物降解,也无法完全清除,经好氧堆肥后总量不变,仅能向稳定、毒

性弱、生体可用率低的形态转化,从而被钝化^[40]。

在好氧堆肥时添加物理、化学或生物钝化剂可产生离子交换、沉淀、吸附、络合等反应以提高重金属钝化效率、增强稳定性。Hao等^[41]研究表明,在鸡粪堆肥时分别添加10%生物炭、10%蒙脱石均可显著调整微生物群落组成来降低Cu、Zn的生体可用率。朱延邈等^[42]研究表明,进行鸡粪好氧堆肥时,不同添加时间、添加比例均会影响乙硫氮对Cu、Zn钝化效果,第21天添加优于第0、3、12天添加;添加0.20%、0.25%优于添加0.10%、0.15%。杨航波^[43]在鸡粪好氧堆肥时添加5%以枯草芽孢杆菌、哈茨木霉为主的复合微生物菌剂,研究表明,菌剂可明显减弱Cu、Zn活性。好氧堆肥时所添加的物理、化学和生物钝化剂除自身特性外,还可利用对堆肥物理、化学指标的改变间接钝化重金属。

4 总结和展望

鸡粪好氧堆肥技术的推广应用积极响应“粪肥还田、种养结合”政策,可推动鸡粪资源商业化、工业化、安全化发展,节本增效,实现可持续发展、循环经济与绿色农业齐驱并进。但鸡粪好氧堆肥技术在实际应用中还有诸多难题亟待解决,如内源参数互相影响难以整体协调;堆肥发酵时养分及有机质严重损失;产生的含氮、含硫废气对生态环境的污染;经好氧堆肥后,鸡粪中残留抗生素仍会部分残留,而重金属总量不变仅被钝化等。今后应继续深入研究微生物群落组成、演替与堆肥物质降解代谢、能量转化的关系,筛选高效促腐熟的优势菌剂,分阶段调控堆肥环境,推进堆肥工艺科学化。内源参数是好氧堆肥的基石,确保各个参数协同完善优化,在此基础上加大对外源添加剂的筛选、研发,还可考虑将生物、物理和化学添加剂联合应用。规范使用药用抗生素,研发替抗药品,源头把控;探求好氧堆肥时抗生素降解机理,实现抗生素高效降解。鸡粪好氧堆肥时还需降低重金属活性,提高重金属钝化效率及钝化产物的稳定性,并以钝化后的回收处理至完全去除为最终目标。目前关于鸡粪好氧堆肥的很多研究仍处于实验水平,需进一步探索与农业生产相结合,并拓展至实际应用中。

参考文献:

- [1] PARK J, KANG T, HEO Y, et al. Evaluation of short-term exposure levels on ammonia and hydrogen sulfide during manure-handling processes at livestock farms [J]. Safety and Health at Work, 2020, 11(1): 109-117.
- [2] WANG M M, WU Y C, ZHAO J Y, et al. Comparison

- of composting factors, heavy metal immobilization, and microbial activity after biochar or lime application in straw-manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127-872.
- [3] TUOMELA M. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72(2): 169-183.
- [4] ONWOSI C O, IGBOKWE V C, ODIMBA J N, et al. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190: 140-157.
- [5] 周毅杰, 朱高玄, 张国言, 等. 低碳氮比条件下凹凸棒添加对鸡粪发酵进程和氮固持的影响 [J]. *中国家禽*, 2023, 45(11): 60-67.
- ZHOU Y J, ZHU G X, ZHANG G Y, et al. Effects of attapulgit addition on fermentation process and nitrogen retention of chicken manure composting under low carbon nitrogen ratio [J]. *China Poultry*, 2023, 45(11): 60-67.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 粪便无害化卫生要求: GB 7959—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [7] 钱玉婷, 杜静, 曹云, 等. 接种嗜热菌促进鸡粪超高温堆肥处理的效果 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(23): 321-325.
- QIAN Y T, DU J, CAO Y, et al. Impact of inoculating thermophilic bacteria on promotion of hyperthermia composting of chicken manure [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(23): 321-325.
- [8] 牛明芬, 胡丹丹, 吴天木, 等. 通气策略对不同有机物料腐殖化进程和微生物群落结构的影响 [J]. *生态学杂志*, 2023: 1-14. (2023-09-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230922.0819.002.html>.
- NIU M F, HU D D, WU T M, et al. Effects of ventilation strategies on humification process and microbial community structure of different organic materials [J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023: 1-14. (2023-09-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230922.0819.002.html>.
- [9] SHEN Y J, REN L M, LI G X, et al. Influence of aeration on CH₄, N₂O and NH₃ emissions during aerobic composting of a chicken manure and high C/N waste mixture [J]. *Waste Management*, 2011, 31(1): 33-38.
- [10] 赵程鹏, 王继红. 二丁与连翘药渣联合堆肥腐熟度评价 [J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(2): 178-182.
- ZHAO CH P, WANG J H. Evaluation of composting maturity of erding and forsythia residue [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44(2): 178-182.
- [11] CHEN H Y, AWASTHI S K, LIU T, et al. Effects of microbial culture and chicken manure biochar on compost maturity and greenhouse gas emissions during chicken manure composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121-908.
- [12] 刘歆, 陈群, 邱玉朗, 等. 鸡粪堆肥含氮和含硫废气产生机制及控制技术研究进展 [J]. *中国畜牧兽医*, 2023, 50(5): 2166-2174.
- LIU X, CHEN Q, QIU Y L, et al. Research Progress on the production mechanism and control technology of chicken manure composting nitrogen-containing and Sulfur-containing waste gases [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2023, 50(5): 2166-2174.
- [13] 沈玉君, 陈同斌, 刘洪涛, 等. 堆肥过程中臭气的产生和释放过程研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(11): 104-108.
- SHEN Y J, CHEN T B, LIU H T, et al. Research progress in odor production and emission from composting [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(11): 104-108.
- [14] 张玉凤, 田慎重, 岳寿松, 等. 发酵菌剂对鸡粪好氧发酵过程的影响 [J]. *山东农业科学*, 2022, 54(2): 115-122.
- ZHANG Y F, TIAN SH ZH, YUE SH S, et al. Effect of microbial agents on aerobic fermentation of chicken manure [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(2): 115-122.
- [15] 于静, 谷洁, 王小娟, 等. 微生物菌剂对鸡粪堆肥过程中氨气排放和微生物群落的影响 [J]. *西北农业学报*, 2019, 28(11): 1861-1870.
- YU J, GU J, WANG X J, et al. Effects of microbial agents on ammonia emission and microbial community during chicken manure composting [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(11): 1861-1870.
- [16] 张智, 乔艳, 陈云峰, 等. 不同菌剂对鸡粪堆肥过程中有害气体排放的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(12): 145-150.
- ZHANG ZH, QIAO Y, CHEN Y F, et al. Effects of three microbial agents on harmful gas emission during

- chicken manure composting[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(12):145-150.
- [17] 刘艳薇,顾欣,惠悦然,等. 除氨菌复配对鸡粪堆肥除臭和腐熟效果的影响[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(11):75-83.
- LIU Y W, GU X, HUI Y R, et al. Impact of combined ammonia-removal bacteria on chicken manure compost deodorization and decomposing effect [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(11):75-83.
- [18] TANG J C, SHIBATA A, ZHOU Q X, et al. Effect of temperature on reaction rate and microbial community in composting of cattle manure with rice straw [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2007, 104(4):321-328.
- [19] 范建华,李尚民,吴兆林,等. 嗜热除臭型发酵菌剂筛选及其在鸡粪堆肥发酵中的应用[J]. *中国家禽*, 2018, 40(18):36-39.
- FAN J H, LI SH M, WU ZH L, et al. Selection of heat resistant and deodorant fermentation agents and its application in composting of chicken manure [J]. *China Poultry*, 2018, 40(18):36-39.
- [20] 杨明珠,许欢欢,郭传旭,等. 堆肥低温启动菌剂的研制与效果评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(1):138-146.
- YANG M ZH, XU H H, GUO CH X, et al. Development of the low-temperature composting initiating bacterial agent and the efficiency evaluation [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(1):138-146.
- [21] INYANG M, DICKENSON E. The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review [J]. *Chemosphere*, 2015, 134:232-240.
- [22] 李新荣,田壮,杨金凤,等. 添加剂对堆肥过程中挥发性有机物(VOCs)的减排效果[J/OL]. *农业环境科学学报*, 2023:1-18. (2023-10-10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20231009.0933.002.html>.
- LI X R, TIAN ZH, YANG J F, et al. Emission reduction of volatile organic compounds(VOCs) in composting using additives [J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023:1-18. (2023-10-10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20231009.0933.002.html>.
- [23] 王旭杰,张文明,常馨怡,等. 堆肥添加剂降低碳氮损失的微生物学机制研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(10):4116-4127.
- WANG X J, ZHANG W M, CHANG X Y, et al. Microbiological mechanism of reducing carbon and nitrogen loss by composting additives [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10):4116-4127.
- [24] 吴晓东,邢泽炳,何远灵,等. 添加生物炭对鸡粪好氧堆肥过程中养分转化的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(5):141-146.
- WU X D, XING Z B, HE Y L, et al. Nutrient transformation during chicken manure composting with biochar under aerobic conditions [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(5):141-146.
- [25] 张海滨,孟海波,沈玉君,等. 生物炭对沼渣堆肥理化性状及微生物种群变化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(2):245-253.
- ZHANG H B, MENG H B, SHEN Y J, et al. Effect of biochar addition on physicochemical properties and microbial population of biogas residue compost [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(2):245-253.
- [26] 荣荣,郑育声,杨林生,等. 生物炭对鸡粪堆肥过程中氨气排放的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(3):236-240.
- RONG R, ZHENG Y SH, YANG L SH, et al. Effects of biochar on ammonia emission during chicken manure composting [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(3):236-240.
- [27] 李慧杰,王一明,林先贵,等. 沸石和过磷酸钙对鸡粪条垛堆肥甲烷排放的影响及其机制[J]. *土壤*, 2017, 49(1):63-69.
- LI H J, WANG Y M, LIN X G, et al. Effects of adding zeolite and superphosphate on greenhouse gas emission and methanogens during chicken manure composting [J]. *Soils*, 2017, 49(1):63-69.
- [28] 李宁,张晓岸,熊晓莉,等. 复合铜盐对有机废弃物高温好氧堆肥的保氮效果[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(6):2462-2467.
- LI N, ZHANG X A, XIONG X L, et al. Effects of composite copper salts on nitrogen conservation in thermophilic aerobic composting of organic waste [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6):2462-2467.
- [29] 刘媛媛,徐智,陈卓君,等. 外源添加磷石膏对堆肥碳组分及腐殖质品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11):2483-2490.

- LIU Y Y, XU ZH, CHEN ZH J, et al. Effects of phosphogypsum addition on carbon fractions and humus quality during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2 483-2 490.
- [30] WANG X, BAI Z H, YAO Y, et al. Composting with negative pressure aeration for the mitigation of ammonia emissions and global warming potential[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 448-457.
- [31] 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.
- [32] ZHOU X, WANG J, LU C, et al. Antibiotics in animal manure and manure-based fertilizers: Occurrence and ecological risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2020, 255: 127 006.
- [33] 刘 伟, 王 慧, 陈小军, 等. 抗生素在环境中降解的研究进展[J]. *动物医学进展*, 2009, 30(3): 89-94.
- LIU W, WANG H, CHEN X J, et al. Progress on degradation of antibiotics in environment[J]. *Progress in Veterinary Medicine*, 2009, 30(3): 89-94.
- [34] WANG Y C, CHU L, MA J, et al. Effects of multiple antibiotics residues in broiler manure on composting process[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 817: 152 808.
- [35] 娄路平. 微生物强化堆肥对鸡粪中抗生素消减的研究[D]. 河北邯郸: 河北工程大学, 2022.
- [36] 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 等. 4 种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性[J]. *环境科学*, 2020, 41(2): 1 005-1 012.
- ZHU W J, ZHU F X, WANG W P, et al. Degradation characteristics of antibiotics during composting of four types of feces[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 1 005-1 012.
- [37] 华冠林, 丁京涛, 孟海波, 等. 好氧堆肥降解抗生素的研究进展[J]. *环境工程*, 2019, 37(5): 184-190.
- HUA G L, DING J T, MENG H B, et al. Research progress of antibiotics degradation in aerobic composting [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(5): 184-190.
- [38] 孟 磊, 杨 兵, 薛南冬, 等. 高温堆肥对鸡粪中氟喹诺酮类抗生素的去除[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2): 377-383.
- MENG L, YANG B, XUE N D, et al. Effect of high temperature composting on removal of fluoroquinolones in chicken manures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 377-383.
- [39] 鲍艳宇, 娄翼来, 颜 丽, 等. 不同畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属 Pb Cd Cu Zn 的变化特征及其影响因素分析[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(9): 1 820-1 826.
- BAO Y Y, LOU Y L, YAN L, et al. Dynamic change characteristic of heavy metals Pb, Cd, Cu and Zn during aerobic composting of different manure and the analysis of effect factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1 820-1 826.
- [40] WEI Y Q, ZHAO Y, ZHAO X Y, et al. Roles of different humin and heavy-metal resistant bacteria from composting on heavy metal removal[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 296: 122 375.
- [41] HAO J K, WEI Z M, WEI D, et al. Roles of adding biochar and montmorillonite alone on reducing the bio-availability of heavy metals during chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122 199.
- [42] 朱延邈, 李明刚, 成卫民, 等. 乙硫氮对鸡粪堆肥理化性质及铜锌钝化效果的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2024, 46(1): 123-130.
- ZHU Y M, LI M G, CHENG W M, et al. Effects of ethyl sulfide nitrogen on physicochemical properties and copper and zinc passivation effect of chicken manure compost[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2024, 46(1): 123-130.
- [43] 杨航波. 添加剂对鸡粪好氧堆肥 Cu、Zn 的钝化作用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.