DOI:10.13300/j.cnki.cn42-1648/s.2026.10.031

鸡粪好氧堆肥处理技术研究进展

李昌宗[1],邓泽涛[2],邹建[2],冯杰[2]
1.重庆华牧优鲜农业发展有限公司,重庆 401135;2.重庆市种畜场,重庆 400023

摘要 现代家禽养殖业规模扩大导致鸡粪产量增多,处理不当易造成环境污染,对其妥善处理已成为养殖污染防治的重要环节。好氧堆肥可将鸡粪转化为有机肥,是当前主流的处理方式之一。本文基于近期 Meta 分析与工程案例,综述鸡粪好氧堆肥的关键工艺参数、添加剂减排机制及现代处理工艺。碳氮比、温度、含水率及通风等参数通过影响微生物的活性调控堆肥进程;物理、化学及微生物添加剂分别通过改善通气、调节化学微环境及调控功能菌群削减温室气体排放,其中复合添加剂的协同减排效果优于单一添加剂。传统露天堆肥受环境影响大、调控难,现代家禽养殖业多采用密闭式好氧发酵罐实现连续化、自动化处理。超高温堆肥(可实现 80 ℃以上持续发酵并显著缩短周期)、复合添加剂协同减排及工艺参数智能化精准调控是未来鸡粪高效、低排放资源化利用的重要方向,以推动鸡粪处理高效利用和可持续发展。

关键词 鸡粪;好氧堆肥;添加剂;资源化利用;处理工艺

现代家禽养殖业的规模化发展使鸡粪产生量持续增加,我国蛋鸡年存栏量居世界首位,鸡粪年产量达 6 亿 t[1]。鸡消化道短、饲料消化率低,40%~70%的营养物质随粪便排出,鸡粪富含氮、磷、钾及有机质,可作为优质的有机肥原料[2]。新鲜鸡粪含水率高,且含有病原菌、寄生虫卵、抗生素残留及重金属等有害物质,若未经处理直接施用或随意堆放,易导致土壤板结、作物烧根及氮磷流失、水体富营养化、恶臭与温室气体排放等问题,已成为制约行业可持续发展的重要瓶颈[3]。

目前,鸡粪处理已形成好氧堆肥、厌氧发酵、烘干等多种技术路线,其中好氧堆肥因工艺成熟、经济有效、可将鸡粪转化为优质有机肥而应用最广。近年来,围绕堆肥工艺参数优化、添加剂减排、超高温堆肥及设备升级等方面开展了大量研究[2-4],在加快腐熟、提升产物质量、降低养分损失与气体排放等方面取得明显进展。然而,已有研究多聚焦于单一工艺参数或单一类型添加剂,对多种参数协同调控、复合添加剂协同减排及处理工艺与设备的系统梳理仍显不足[5-7],针对鸡粪的系统性综述较为缺乏。

基于此,本文综述鸡粪好氧堆肥的关键工艺参数、超高温堆肥技术、添加剂类型与减排机制及现代养殖企业的处理工艺与设备,以期为鸡粪高效、低排放、高品质资源化利用提供参考。

1 鸡粪处理方法

1.1 好氧发酵

好氧堆肥是利用好氧微生物在氧气充足的条件下分解有机废弃物,并将其转化为稳定腐殖质的技术。传统堆肥通常存在周期较长、产物质量不稳定、有机物损失较大以及温室气体排放等缺点[5]。因此,目前大多数堆肥工艺通过优化堆肥参数并使用添加剂来提高堆肥效率、改善产物质量并降低温室气体排放。

1.2 厌氧发酵

厌氧发酵是鸡粪能源化利用的核心技术之一,可同时实现污染减量、无害化处理与能源回收的多重效益。在厌氧微生物的降解作用下,鸡粪中的有机质被逐步分解,转化为以 CH_4 和 CO_2 为主的沼气,并伴随产生少量 H_2S 等气体。在此过程中,通过维持特定的发酵温度与充足的物料停留时间,病原微生物和寄生虫卵可被有效灭活。最终,发酵产生的

收稿日期:2026-06-12
作者简介:李昌宗,男,2001 年生,硕士。

沼液和沼渣富含速效氮、磷、钾及稳定有机质，是优质的有机肥资源；沼气经脱硫净化后可用于发电或供热，从而实现鸡粪的高效能源化利用[6]。

1.3　烘干处理

鸡粪烘干处理是通过机械烘干过程实现污染治理与肥料产出。处理过程中鸡粪中的水分被快速蒸发，含水率显著降低，同时高温可有效灭活病原微生物和寄生虫卵。烘干后的干鸡粪性质稳定、体积大幅缩小，便于储存和运输，且富含有机质及氮、磷、钾等营养元素，可直接作为优质有机肥使用或进一步加工成颗粒肥，实现鸡粪的无害化与资源化高效利用[7]。

2　好氧堆肥关键参数

2.1　碳氮比

碳氮比（C/N ratio）是调控好氧堆肥启动和进程的核心参数，通过制约微生物可利用氮源，影响其代谢强度、有机质转化、气体排放和产品腐熟。基于 192 篇文献的 Meta 分析[8]表明，初始 C/N 宜控制在 25～30，该值因不同原料差异具有特异性，猪粪、鸡粪为 20～25，羊粪为 25～30，牛粪为 30～35。Jiang 等[10]研究结果进一步指出，初始 C/N 为 20～30 且 pH 6.5～8.5 为理想启动参数。初始 C/N 偏高时，微生物可利用氮源不足，会限制细胞合成与代谢活性，导致有机质矿化速率下降、堆体升温缓慢及腐熟周期延长；初始 C/N 过低则氮素过剩，多余部分主要以 NH_3 形式挥发损失，同时易形成局部厌氧微环境，使 CH_4 和 N_2O 排放显著增加[10]。

堆肥过程中 C/N 逐步下降，腐熟堆肥最终 C/N 通常≤23，且 C/N 降幅越大、最终 C/N 越低，种子发芽指数（GI）越高。建议成熟堆肥标准为 GI≥70% 且 C/N≤23，高度成熟堆肥则优选 GI≥90% 并满足（最终 C/N）/（初始 C/N）≤0.8。实际生产中，可通过添加碳源、生物炭或镁磷盐等策略来优化成熟度[9]。

2.2　温　度

温度通过影响酶活性和功能基因表达来调控堆肥效率与温室气体排放。好氧堆肥通常经历升温期、高温期、降温期和腐熟期。研究[11]表明，堆体温度高于 55 ℃并持续一定时间可有效灭活大肠杆菌、沙门氏菌等病原微生物与寄生虫卵。GB 7959—2012《粪便无害化卫生要求》规定：堆肥需满足 50 ℃以上持续至少 10 d 或 60 ℃以上持续至少 5 d。鸡粪好氧堆肥高温期温度常在 55～70 ℃，峰值可达 60～72 ℃[12]。温度偏低时微生物活性减弱，有机质分解缓慢，病原灭活不彻底，周期延长；温度过高（＞63 ℃）可能导致嗜热菌死亡、微生物多样性下降，分解速率降低[13]。在实际生产中，需通过翻堆、调节通风与加水等手段协同调控堆温，借助密闭发酵罐的温度实时监测与精准调控，使发酵稳定维持在适宜的高温区间。

2.3　超高温堆肥

超高温堆肥（hyperthermophilic composting，HTC）是近年发展的新型技术，堆体温度可快速升至 80 ℃以上并持续 5～7 d 甚至更长，腐熟周期缩短至 15～25 d，有机质降解和腐殖化程度显著提高[14]。HTC 对初始 C/N 适应性强，可在初始 C/N 低于 10 的条件下顺利启动，适用于鸡粪等低 C/N 原料[15]。超高温可高效灭活病原菌与虫卵，削减抗生素残留与抗性基因丰度，减少氮素损失与 N_2O 排放，且过程几乎无臭、无渗滤液产生，二次污染风险低。研究[16]表明，HTC 在 28 d 内即可使重金属生物有效性降低 65%、抗生素抗性基因丰度降低 74%。

HTC 升温机制包括外源供热预处理与菌剂自加热 2 种互补方式。外源供热预处理将原料加热至 80～90 ℃维持 0.5～4.0 h，以改变微生物群落结构；研究[17]表明，鸡粪经 80 ℃预处理 0.5～2.0 h 后接种 *Bacillus coagulans*，堆体升温更快、峰值温度显著提高。菌剂自加热则接种 *Parageobacillus toebii*、*Geobacillus* 属等超嗜热菌剂，利用生物热自发升温至 80 ℃以上。鸡粪生物可利用性高，尤其利于激活此类菌株；研究[18]显示，接种 *P. toebii* 后鸡粪堆肥最高温度达 78.2 ℃，腐熟效果显著优于猪粪。在实际生产中，常将 2 种方式结合应用。

在鸡粪规模化应用方面，福建省福清市致青生态环保有限公司承建的畜禽粪便资源化利用项目日处理畜禽粪便（含鸡粪等）约 320 t，采用槽式与条垛式工艺，堆体最高温度超过 80 ℃、高温期持续 7～11 d、总周期 20～30 d；堆肥产品含水率约 45%、有机质约 30%、GI 达 107% 以上，符合 NY/T 525—2021《有机肥料标准》，年产功能性有机肥约 5 万 t，运行成本仅 70～80 元/t[19]。HTC 在鸡粪高效无害化与低碳资源化方面潜力突出，但其推广仍受高效超嗜热菌株资源有限、高温维持能耗较高等因素制约，未来有待加强菌株资源挖掘与节能工艺优化，并补充大规模、长期的工程与农田施用验证。

2.4 含水率

水是溶解养分、支撑微生物代谢的必要介质。初始含水率过低时，底物扩散受限，微生物活性与有机质降解减弱，同时高孔隙率会导致堆体过量散热，影响产品稳定性[20]；初始含水率过高时，孔隙被水充填、气体扩散受阻，易形成厌氧微域，促进CH_4和N_2O排放增加，并可能产生渗滤液造成二次污染[21]。鸡粪含水率高、孔隙度低、C/N偏低，氧气供应与有机质降解更易受限，常添加秸秆、稻壳、木屑等膨松剂改善通气，其适宜含水率一般控制在55%～65%[22]；在接种功能菌剂的条件下含水率最适值或更低。Li等[23]研究结果发现，初始含水率为53%时，温度表现、产品腐熟度、总氮含量与GI最佳。

2.5 通 风

强制通风是好氧堆肥氧气供给与温度调控的核心手段。通风速率偏高时堆体散热加剧，高温期缩短，有机质矿化效率受限，且强气流显著促进NH_3挥发损失[24]。通风不足则形成局部厌氧微环境，既增强产甲烷菌代谢导致CH_4排放增加，又促进反硝化过程导致N_2O累积，还会使硫酸盐还原菌活跃而增加H_2S排量。研究[25]表明，与低频间歇曝气（10 min通气/30 min停气）相比，提高曝气频率（10 min通气/10 min停气）可使CH_4和N_2O排放量分别降低9.68%和47.10%。针对鸡粪堆肥，通风速率控制在0.1～0.3 m^3/min效果较理想，但需结合原料和工艺优化调整[4]。

2.6 pH

pH是调控堆肥微生物群落结构与温室气体排放的关键参数，适宜范围一般为5.5～8.5，其中细菌最适pH值为6.0～7.5、真菌最适pH值为5.5～8.0。pH值持续低于6.0时，有机质分解速率下降；pH值超过8.0，则导致NH_4^+转化为NH_3，挥发损失[26]。畜禽粪便中，鸡粪、猪粪堆肥的pH总体低于羊粪、牛粪等草食动物[27]。堆肥各阶段pH呈规律性变化：升温期易降解有机质快速分解，短链有机酸积累，pH下降；高温期有机酸被进一步矿化，含氮有机物氨化，持续释放NH_3，pH升高至8.0～9.0；降温及腐熟阶段，NH_3挥发减缓、硝化作用增强以及腐殖质的逐步合成，pH趋于中性稳定[28]。

3 堆肥添加剂

堆肥添加剂是一类用于优化堆肥过程、提升堆肥效率及产物质量的辅助材料，其核心功能在于加速有机物分解、调节堆体环境参数并减少堆肥过程中的负面影响。

3.1 物理添加剂

物理添加剂是优化堆肥过程参数与气体污染减排的有效调控手段，主要包括有机膨松剂（木屑、作物秸秆等）和多孔矿物及生物炭两类。有机膨松剂主要通过调节堆体孔隙结构改善通气性、防止压实并维持适宜含水率，从而在物理层面保障好氧微生物的活性；生物炭和矿物添加剂凭借其高比表面积、发达的微孔结构和丰富的表面官能团，通过吸附截留、络合和离子交换等途径直接削减气态污染物的逸散。

生物炭的减排效果已获大量研究证实。基于123篇研究的Meta分析[29]表明，添加生物炭可使堆肥CH_4、N_2O和NH_3排放分别平均降低53.7%、49.8%和35.9%：一方面，多孔结构改善堆体通气性，削减厌氧区域，抑制产甲烷菌活性；另一方面，表面官能团吸附截留NH_3，并通过调控氮转化功能基因的表达抑制反硝化过程产生N_2O。生物炭的减排效果随添加量的增加而增强，高施用量（占物料干质量>10%）时CH_4减排可达86.1%。矿物添加剂（黏土、沸石、硅藻土、膨润土等）同样具有显著的减排潜力，以硅藻土为例，添加硅藻土可使NH_3、N_2O和CH_4排放分别降低23.70%、84.16%和30.41%[30]。

3.2 化学添加剂

化学添加剂主要通过调节pH、与铵态氮形成稳定沉淀或氧化还原反应等途径定向削减气态污染。过磷酸钙（SSP）是应用最广的磷基添加剂，其酸性可抑制堆体初期pH上升、减少NH_4^+向NH_3转化，磷酸根还可与铵态氮结合形成磷酸铵盐实现氮素化学固定。研究表明，猪粪堆肥中添加10%～30%的SSP，可使NH_3累积排放降低23.8%～48.1%、温室气体总排放降低20.9%～35.5%，SSP最适添加量14%～26%[31]。镁盐与磷酸盐复合施用可促进鸟粪石（$MgNH_4PO_4·6H_2O$）结晶，将氮以固态保留在堆体中；当与生物炭联用时，对NH_3和含硫恶臭组分的减排效果可分别提升至86.8%和92.8%，协同增效显著[32]。总体而言，化学添加剂对NH_3减排和总氮保留优于物理添加剂，平均使NH_3排放降低51.3%，在低含水率（≤65%）、低碳氮比（≤20）或碱性条件下尤为突出，但其带来的盐分积累与离子平衡问题仍需关注[33]。

3.3　微生物添加剂

微生物接种可跳过堆体微生物自然演替阶段、加速堆肥成熟，并通过调节功能微生物群落在一定程度上调控温室气体排放，但效果因菌剂类型和目标气体而异。嗜热菌剂接种可加速升温、提高峰值温度并延长高温期，从而抑制产甲烷菌和反硝化细菌活性、减少 CH_4 和 N_2O 排放[34]；但部分研究[35]显示，微生物菌剂在降低 CH_4 和 N_2O 排放的同时，可能因促进 *Bacillus* 等氨化菌繁殖而使 NH_3 排放增加 26%～62%，表明不同气体减排目标间存在权衡。将腐熟堆肥接种时，其多孔结构可改善堆体通气性、提高 pH，可使 CH_4 和 N_2O 排放各降低约 20%[36]。

3.4　复合添加剂

复合添加剂将上述 3 种添加剂按一定比例复配，整合多种调控机制，实现结构优化、环境调节与功能微生物强化的协同作用，在温室气体减排与堆肥品质提升上优于单一类型添加剂。其类型多为物理—微生物联用、物理—化学联用。生物炭等多孔结构既能改善堆体孔隙、吸附中间产物，又为外源菌剂提供稳定微环境，保护其活性并促进电子传递；化学组分则通过 pH 调节或竞争抑制进一步优化转化路径，减少 CH_4 和 N_2O 生成。针对鸡粪高氮、易降解有机质的特点，复合体系可同时缓解初期厌氧区形成与反硝化不完全的问题。

应用效果上，鸡粪堆肥中，10% 鸡粪生物炭与 10% 复合微生物菌剂共添加处理，使 NH_3 峰值排放降低 56.9%、CH_4 降低 55.9%、N_2O 峰值降低约 27.4%（累积 N_2O 降低约 9%），优于仅添加复合菌剂或低比例生物炭添加的处理[28]。生物炭与沸石各 10% 复配可使猪粪堆肥 NH_3 和 N_2O 排放分别降低 63.4% 和 78.1%；进一步引入木醋液形成三元添加体系后，CO_2、CH_4 和 N_2O 排放削减幅度分别达到 33.9%～47.0%、50.4%～61.2% 和 79.5%～81.1%，同时缩短高温期并降低氮损失[37]。值得注意的是，复合添加剂并非任意叠加，分配不当时可能因打破功能菌群平衡而出现拮抗，如 MgO 改性生物炭反而使鸡粪堆肥 N_2O 排放升高[38]，故复合添加剂效果仍受配比、原料与工艺条件制约。

产业化方面，复合添加剂针对鸡粪等高氮原料的应用仍以实验室和中小试验为主，大规模商业化产品较少。已有少数产品实现落地，如以糠醛渣为载体复配保氮剂与吸附材料的除臭保氮剂，按干重 3%～5% 投加可降低 H_2S、NH_3 释放 50%～60%、提高全氮 20%～30%[39]。单一或简单复合的微生物菌剂、生物炭产品已在国内部分畜禽粪便处理中实际应用，但面向精准减排的专用复合添加剂仍面临成本控制、鸡粪专用配方优化及长期田间验证等瓶颈，距标准化、规模化应用尚有差距。

4　常见养殖场鸡粪处理工艺

传统好氧堆肥多采用露天条垛或发酵槽，受气温、降水等天气条件影响显著，温湿度与通风难以精确调控，产物腐熟程度与质量不稳定。现代养殖企业多采用密闭式好氧发酵罐处理鸡粪，发酵全过程集中于封闭罐体内，可对温度、湿度、通风与供氧精确调控，在缩短周期、减小占地、控制臭气、降低天气影响的同时实现连续化与自动化，便于规模化、标准化生产[40]。

4.1　处理设备

好氧发酵罐是将高温好氧发酵全过程集中于密闭罐体内完成的一体化智能堆肥设备，利用高温好氧微生物在受控的温度、湿度及供氧条件下分解鸡粪有机质，实现病原灭活与减量化。按结构形式可分为立式、卧式和筒仓式。鸡粪处理多采用立式发酵罐，其罐体为全封闭立式结构，采用碳钢或不锈钢制造，外覆保温材料，单罐容积一般为 5～50 m^3，可根据处理规模定制。罐体主要由进料预混系统、中央搅拌系统、强制曝气系统、排风脱臭系统及 PLC 自动控制系统构成。搅拌系统通过多层搅拌臂翻动物料促进氧气渗透；曝气系统由高压风机经罐底及搅拌轴强制送风供氧（部分机型可回收余热）；排风系统将废气经生物滤池或喷淋处理后达标排放；PLC 根据传感器实时调控搅拌与曝气，使过程稳定可控。立式罐体占地小、土地利用率高，适用于规模化鸡场。但处理高含水率鸡粪时，物料易堆积不均、流动受阻，需通过控制进料含水率和优化搅拌参数缓解[41]。

4.2　工艺流程

鸡粪经发酵罐处理的流程主要包括收集与预处理、配料调质、高温好氧发酵、出料腐熟及后续加工等环节。鸡舍内通过刮板或传送带将新鲜鸡粪收集并输送至预处理区，筛除杂质后，若含水率偏高可经固液分离或与干料混合调节。配料调质阶段，需添加稻壳、秸秆等辅料将碳氮比调节至 25～30，含水率控制在 55%～65%，并接种以芽孢杆菌、放线菌为主的高温好氧复合菌剂。通常首次运行

需接种菌剂，运行后罐内菌群已建立，后续加料一般无需重复添加[41]。物料由罐顶投入后，在搅拌与强制曝气作用下逐渐升温，进入 50～65 ℃的高温期，高温灭活病原菌并促进水分蒸发。经 PLC 实时调控搅拌与曝气，7～15 d 后由罐底出料，再经二次腐熟或造粒加工成有机肥[42]。实际生产中，部分蛋鸡场已在使用纯鸡粪好氧发酵罐进行处理，如重庆市华牧智能化蛋鸡养殖场运行中发现，夏季鸡粪含水率较高时，易出现发酵周转缓慢、物料堆积的问题，影响整体处理效率。针对上述问题，可将超高温堆肥、专用复合菌剂以及智能过程控制技术进一步引入罐式系统，通过优化罐体保温与搅拌性能、开发适应高含水率鸡粪的菌剂配方并强化 PLC 自动调控，实现更稳定高效的发酵过程，降低日常运行管理难度，提升工艺整体可靠性。随着上述研究成果向实际工程的持续转化，罐式好氧发酵有望在蛋鸡粪污资源化利用中发挥更大作用，为规模化养殖的绿色转型提供有力支撑。

5 结语与展望

鸡粪的妥善处理对养殖污染防治及农业可持续发展具有重要意义。好氧堆肥通过工艺参数、添加剂及处理设备的协同优化，可实现鸡粪的高效利用。好氧堆肥本质为微生物驱动的复杂动态过程，单一参数难以独立评估整体状态，温度、含水率、碳氮比等易测指标在生产中主要用于过程判断，仍需结合原料特性、堆体规模和设备条件综合调控。尽管已有多项 meta 分析给出了较为稳定的参数区间和添加剂效果，针对鸡粪、规模化密闭发酵及多参数协同的系统验证仍然不足，部分添加剂的最适配比和长期田间施用效果也有待明确。堆肥过程的精细化、标准化调控仍有较大提升空间。未来可在超高温堆肥技术的应用、复合添加剂与高效菌剂的协同减排、工艺参数的智能化精准调控以及温室气体与氨气的协同减排等方面进行深入研究，以推动鸡粪处理向高效、低排放与高品质资源化方向发展。

参 考 文 献

[1] 侯福银，马萌萌，陈应江，等. 蛋鸡粪发酵腐熟肥对番茄生长性状、产量、品质和土壤的影响[J]. 畜牧与饲料科学，2020，41(6)：56-61.

[2] 王磊，张永东，马斌，等. 鸡粪的资源化利用途径[J]. 畜牧兽医杂志，2016，35(6)：81-82.

[3] 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.

[4] 司孝刚，谯祖勤，彭星运，等. 鸡粪好氧堆肥主要工艺参数研究进展[J]. 现代农业科技，2025(6)：119-124.

[5] Chen Y N，Liu Y，Li Y P，et al. Influence of biochar on heavy metals and microbial community during composting of river sediment with agricultural wastes[J]. Bioresource Technology，2017，243：347-355.

[6] 费椿尧. 规模化鸡场废弃物的无害化处理及资源化利用[J]. 家禽科学，2026，48(3)：142-144.

[7] 田金林，孙庆华. 浅谈规模鸡场中废弃物的无害化处理[J]. 家禽科学，2022，44(2)：24-26.

[8] Shen B，Zheng L L，Zheng X Y，et al. Insights from meta-analysis on carbon to nitrogen ratios in aerobic composting of agricultural residues[J/OL]. Bioresource Technology，2024，413：131416. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131416.

[9] Ji Z Y，Zhang L Y，Liu Y W，et al. Evaluation of composting parameters，technologies and maturity indexes for aerobic manure composting：a meta-analysis[J/OL]. Science of the Total Environment，2023，886：163929. https://doi. org/10.1016/j. scitotenv.2023.163929.

[10] Jiang T，Schuchardt F，Li G X，et al. Effect of C/N ratio，aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting[J]. Journal of Environmental Sciences，2011，23(10)：1754-1760.

[11] Erickson M C，Liao J，Ma L，et al.Inactivation of *Salmonella* spp. in cow manure composts formulated to different initial C：N ratios[J].Bioresource Technology，2009，100(23)：5898-5903.

[12] Wang W W，Zhang P，He H B，et al. Effects of chicken manure combinations on compost maturity and microbial community dynamics in industrial-scale composting[J].Waste and Biomass Valorization，2025，16(12)：6805-6814.

[13] Miyatake F，Iwabuchi K.Effect of high compost temperature on enzymatic activity and species diversity of culturable bacteria in cattle manure compost[J]. Bioresource Technology，2005，96(16)：1821-1825.

[14] 胡军有，李义勇，杜建军. 畜禽粪便超高温堆肥技术研究进展[J]. 中国农学通报，2024，40(29)：131-137.

[15] Yu Z，Tang J，Liao H P，et al.The distinctive microbial community improves composting efficiency in a full-scale hyperthermophilic composting plant[J].Bioresource Technology，2018，265：146-154.

[16] Duan Z X，Kang Z C，Kong X F，et al. Synergistic hyperthermophilic microbial consortia in self-elevating ultra-high temperature composting：mechanism and application investigation for sustainable organic waste upcycling[J/OL].Chemical Engineering Journal，2025，512：162364. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.162364.

[17] Zhan E X，Xu S X，Chen X X，et al.Effects of high temperature pre-

treatment and inoculation of *Bacillus coagulans* on promoting aerobic composting of chicken manure[J]. BioResources, 2023, 18(2): 3089-3100.

[18] Zhang S Q, Fu T, Tang J H, et al.The activation of Parageobacillus toebii in hyperthermophilic composting was depended on the bioavailability of raw materials[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: 123611. https://doi. org/10.1016/j. jenvman.2024.123611.

[19] 邢睿智,艾超凡,王梦怡,等.畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例[J].农业环境科学学报,2021,40(11):2405-2411.

[20] Guo R, Li G X, Jiang T, et al.Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost[J]. Bioresource Technology, 2012, 112: 171-178.

[21] Ermolaev E, Sundberg C, Pell M, et al.Effects of moisture on emissions of methane, nitrous oxide and carbon dioxide from food and garden waste composting[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118165. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118165.

[22] Chang R X, Li Y M, Chen Q, et al. Effects of carbon-based additives and ventilation rate on nitrogen loss and microbial community during chicken manure composting[J/OL]. PLoS One, 2020, 15(9): e0229880. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229880.

[23] Li M X, He X S, Tang J, et al. Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting[J/OL]. Chemosphere, 2021, 264: 128549. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128549.

[24] Zhao Y X, Lou Y C, Qin W Z, et al.Interval aeration improves degradation and humification by enhancing microbial interactions in the composting process[J/OL]. Bioresource Technology, 2022, 358: 127296. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127296.

[25] Ma S S, Xiong J P, Cui R X, et al.Effects of intermittent aeration on greenhouse gas emissions and bacterial community succession during large-scale membrane-covered aerobic composting[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2020, 266: 121551. https://doi. org/10.1016/j.jclepro.2020.121551.

[26] Sun X P, Lu P, Jiang T, et al. Influence of bulking agents on CH_4, N_2O, and NH_3 emissions during rapid composting of pig manure from the Chinese Ganqinfen system[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE B, 2014, 15(4): 353-364.

[27] Wan J X, Wang X F, Yang T J, et al. Livestock manure type affects microbial community composition and assembly during composting [J/OL]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 621126. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.621126.

[28] 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/OL]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 389: 121908. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121908.

[29] Xu J, Xiong Z. Biochar amendments mitigate trace gas emissions in organic waste composting: a meta-analysis[J/OL]. Nitrogen Cycling, 2025, 1(1): e005. https://doi.org/10.48130/nc-0025-0003.

[30] Ren X N, Wang Q, Awasthi M K, et al. Improvement of cleaner composting production by adding Diatomite: from the nitrogen conservation and greenhouse gas emission[J/OL]. Bioresource Technology, 2019, 286: 121377. https://doi. org/10.1016/j.biortech.2019.121377.

[31] Wu J, He S Z, Li G X, et al. Reducing ammonia and greenhouse gas emission with adding high levels of superphosphate fertilizer during composting[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(30): 30921-30929.

[32] Liu Y, Ma R N, Tang R L, et al. Phosphate, magnesium containing additives and biochar regulate compost maturity and synergistically reduce odor emission in chicken manure composting: role of physicochemical, bacterial and fungal dynamics[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2024, 371: 123205. https://doi. org/10.1016/j.jenvman.2024.123205.

[33] Shan G C, Li W G, Gao Y J, et al. Additives for reducing nitrogen loss during composting: a review[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2021, 307: 127308. https://doi. org/10.1016/j.jclepro.2021.127308.

[34] Zhang J, Kong Y L, Yang Y, et al. Effects of thermophilic bacteria inoculation on maturity, gaseous emission and bacterial community succession in hyperthermophilic composting[J/OL]. Science of the Total Environment, 2024, 927: 172304. https://doi. org/10.1016/j.scitotenv.2024.172304.

[35] Wen P, Tang J, Wang Y Q, et al. Hyperthermophilic composting significantly decreases methane emissions: insights into the microbial mechanism[J/OL]. Science of the Total Environment, 2021, 784: 147179.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147179.

[36] Zhang L X, Fan R Z, Li W N, et al. Unravelling biotic and abiotic mechanisms of mature compost to alleviate gaseous emissions in kitchen waste composting by metagenomic analysis[J/OL]. Bioresource Technology, 2025, 419: 132102. https://doi. org/10.1016/j.biortech.2025.132102.

[37] Wang Q, Awasthi M K, Ren X N, et al. Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: the effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation[J]. Waste Management, 2018, 74: 221-230.

[38] Huang Y Y, Yang X, Li J H, et al. Engineered biochar amended co-composting for greenhouse gas mitigation, nitrogen conservation, and eco-efficiency assessment[J/OL]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(5): 118104. https://doi. org/10.1016/j.jece.2025.118104.

[39] 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所.有机肥除臭保氮技术[EB/OL]. (2021-01-29)[2026-06-12]. https://tfs.gsagr.cn/info/1074/1704.htm.

[40] 褚斌,郭大勇,王斌,等.好氧发酵堆肥反应器研究进展与展望[J].农业装备与车辆工程,2026,64(2):1-6.

[41] 叶仙军.鸡场粪便的好氧发酵处理技术[J].今日畜牧兽医,2026,42(2):76-78.

[42] 杜德来.高温好氧发酵罐处理畜禽粪便效果研究[J].新农业,2024(6):43-45.

【责任编辑:胡　敏】