

堆肥腐殖化的调控策略研究进展

郭新颖^{1,2}, 董禹含², 刘欢², 蒋继爽², 孟利强^{2*}

¹东北农业大学生命科学学院, 黑龙江 哈尔滨

²黑龙江省科学院微生物研究所, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年7月20日; 录用日期: 2026年8月20日; 发布日期: 2026年8月27日

摘要

好氧堆肥是实现有机固体废弃物资源化利用的重要途径, 其核心在于微生物驱动下有机碳向腐殖酸的转化。堆肥过程中, 有机碳的转化去向直接决定了其能否以腐殖酸形式得以固定留存。本文围绕堆肥有机碳向腐殖酸转化的碳固定调控策略, 从底物前体供给、微环境条件、外源添加三个维度, 系统梳理了影响腐殖化的关键因子及其调控机制, 并提出了相应的强化策略, 以期提升堆肥腐殖化效率、促进碳固定提供理论依据与实践参考。

关键词

堆肥, 腐殖酸, 碳固定, 调控策略

Research Progress on Regulation Strategies of Compost Humification

Xinying Guo^{1,2}, Yuhan Dong², Huan Liu², Jishuang Jiang², Liqiang Meng^{2*}

¹College of Life Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin Heilongjiang

²Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin Heilongjiang

Received: July 20, 2026; accepted: August 20, 2026; published: August 27, 2026

Abstract

Aerobic composting serves as a vital approach for the resource utilization of organic solid wastes, with its core mechanism lying in the microbially driven transformation of organic carbon into humus. During composting, the transformation pathways of organic carbon directly determine whether carbon can be immobilized and retained in the form of humus. Focusing on carbon immobilization regulation strategies governing the conversion of organic carbon to humus in composting, this paper systematically sorts out key humification-influencing factors and their regulatory

*通讯作者。

文章引用: 郭新颖, 董禹含, 刘欢, 蒋继爽, 孟利强. 堆肥腐殖化的调控策略研究进展[J]. 农业科学, 2026, 16(8): 1364-1370. DOI: 10.12677/hjas.2026.168165

mechanisms from three dimensions: precursor substrate supply, microenvironmental conditions, and exogenous additives. Corresponding enhancement strategies are also proposed, aiming to provide theoretical basis and practical references for improving compost humification efficiency and facilitating carbon sequestration.

Keywords

Composting, Humus, Carbon Sequestration, Regulation Strategies

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着我国城乡有机固体废弃物产量持续攀升，畜禽粪便、农业秸秆、厨余垃圾等固废的高效处置已成为重点难题。传统填埋、焚烧处置方式易造成二次污染与有机碳流失，而好氧堆肥凭借绿色低碳、可资源化回用的优势，成为有机固废无害化与资源化利用的核心途径。堆肥过程中微生物驱动的有机碳向腐殖酸转化与固定，是决定堆肥品质、实现固碳增效的关键核心[1]。腐殖酸作为堆肥重要副产物，可进一步分离为胡敏酸与富里酸两组分，二者的含量及比例是评判堆肥腐殖化进程的重要依据。腐殖酸不仅能够改良土壤结构、提升保水保肥能力，还可吸附、固定重金属及有机污染物，是衡量堆肥产品品质与生态安全性的重要指标[2]。自然堆肥体系稳定性差，普遍存在腐殖化效率低、有机碳矿化损失严重、腐殖酸积累不足等问题，极大限制了堆肥的固碳潜力与工程应用价值。

目前，国内外围绕堆肥腐殖化的调控研究已取得了较为丰富的积累。然而，各维度研究多独立推进，不同调控策略尚未在同一框架下加以比较，难以形成对堆肥腐殖化调控的整体认知。基于此，本文从底物前体供给、微环境条件优化、外源添加剂强化三个维度，系统梳理堆肥腐殖酸形成的调控机制与研究进展，比较各维度策略的作用特征与适用情境，以期对堆肥腐殖化效率的协同提升提供理论参考。

2. 堆肥腐殖化的多维度调控策略

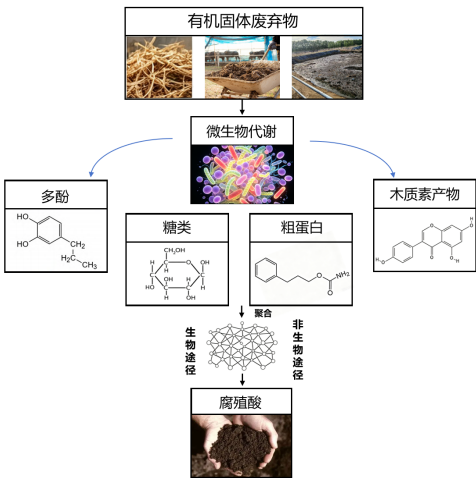


Figure 1. Schematic diagram of humification process during composting
图 1. 堆肥腐殖化过程示意图

堆肥腐殖化的本质是微生物主导的有机碳转化过程。在微生物代谢水解作用下, 有机废弃物的碳骨架逐步分解, 生成多酚、氨基酸、还原糖等腐殖酸前体物质, 再经缩合聚合反应最终形成腐殖质大分子(图 1)。该过程并非单一化学反应, 而是由生物降解、前体转化、化学聚合共同构成的多级级联反应体系, 其转化效率受底物性质、堆体微环境及外源调控措施等多重因素共同制约。基于此, 可从原料特性调控、环境条件优化、外源催化强化三个维度, 系统梳理堆肥腐殖化调控策略的研究进展与作用机制。

2.1. 底物易利用性与前体调控

有机固废的原料组分与结构, 直接影响微生物利用效率, 决定腐殖酸前体供应和碳转化方向。易同化底物可被微生物快速利用产生代谢中间产物, 而木质纤维素等复杂结构物质则需经胞外酶水解后才能被利用, 转化速度较慢, 更倾向于以未分解形态保留于堆肥体系中。Mounissamy 等人[3]发现, 当体系中添加易同化碳源时, 可观察到正向启动效应; 而当添加更高比例的稳定碳组分时, 则观察到负启动效应或未观察到明显的短期启动效应。原料中易同化组分与难降解组分的占比, 是影响腐殖酸前体供应的核心。然而, 启动效应是一把双刃剑, 当体系中易同化底物本就充足时, 微生物会优先消耗这类物质用于呼吸代谢, 造成腐殖酸前体大量损耗, 阻碍腐殖化进程。因此, 并非向堆肥体系中补充任意有机碳源都能促进腐殖化, 过量的易同化底物供应反而会加剧碳损耗。

定向补足限制性前体是基于微生物前体竞争而提出的重要调控思路, 其核心并非增加易同化碳源的总量, 而是针对物料属性适配外源前体可以突破底物供给局限, 调控有机碳向腐殖酸合成方向转化。避免单一原料堆肥体系中前体类型匮乏, 限制性底物缺失制约腐殖化水平。Chen 等人[4]向高蛋白物料鸡粪中添加蔗糖和麦芽糖发现, 糖类的添加使腐殖质含量显著提高。对于木质纤维素类物料, Zhang 等人[5]发现外源施加蛋白类前体可推动有机组分协同转化, 提升土著微生物代谢活性, 并激活腐殖酸形成的非生物途径, 通过生物与非生物协同作用促进腐殖酸累积。以上方式通过解除前体供给限制, 引导有机碳流向腐殖酸合成通路, 最终加快腐殖化进程并提升碳固定潜力。

底物调控策略的核心在于精准识别并解除特定原料体系中的限制性前体, 而非简单地增加易利用碳源总量。当前研究多关注前体添加的短期正向效应, 而对添加前体在堆肥全过程的转化命运、与土著微生物群落的互作关系及其对腐殖酸最终结构的影响缺乏系统追踪。

2.2. 微环境条件优化

堆肥过程中, 温度、通气速率、含水率、pH 值及碳氮比(C/N)等微环境因子通过调控微生物代谢活性与酶促反应效率, 共同驱动腐殖化进程。调控策略主要通过工艺参数优化实现腐殖化效率提升。

温度通过驱动微生物群落演替调控腐殖化进程, 中温菌在升温期启动有机物分解, 嗜热菌在高温期成为优势类群, 分泌水解酶将难降解大分子分解为腐殖酸合成前体; 且过高的温度会灭活部分功能微生物并加剧矿化损失。Zhou 等人[6]将 90℃超高温预处理引入好氧堆肥, 有效提高了腐殖酸/富里酸比值。通气速率与含水率协同调控堆体供氧与物质扩散。含水率 45%~65%、通气适宜时, 好氧微生物活性强, 利于腐殖酸合成; 通气不足将厌氧环境, 通气过量则加速前体消耗。含水率过低限制微生物活动, 过高则阻碍氧气传输。Ding 等人[7]基于学习模型开发了智能曝气策略, 通过实时感知温度、含水率、氧气浓度等多维信息实现曝气量动态调控, 胡敏酸含量提高 1.71 倍。pH 值会影响酶活性与微生物代谢效率, 进而影响腐殖化进程。中性至弱碱性有利于维持酶促反应活性。Xie 等人[8]在共堆肥体系中引入过磷酸钙中和碱性, 调节 pH 至微生物适宜区间, 显著促进腐殖酸前体转化, 有效提升腐殖质含量。碳氮比(C/N)可以把控微生物营养平衡, 25~30:1 为适宜范围。C/N 失衡会抑制微生物活性, 适宜比值可优化功能菌群结构, 促进木质纤维素降解, 推动腐殖物质转化富集。例如, 向低 C/N 厨余垃圾中添加高 C/N 膨松剂可

减少碳氮损失，锯末碳保留最优[9]。上述微环境因子的协同实施可系统改善微生物代谢环境，引导碳流优先向腐殖化方向迁移。值得注意的是，各调控因子通过耦合关系共同决定微生物代谢微环境。Zhu 等人[10]开发的脉冲交替式通风反应器，通过交替通风同时优化了温度 - 氧浓度 - 含水率场态分布，使含水率稳定在 60%左右，高温期持续时间较单向通风组有效延长，腐殖酸含量成倍增长。堆肥工艺优化的核心在于多参数协同调控，需依据堆肥进程的阶段特征实施动态反馈调节，通过维持动态平衡，引导碳代谢流优先向腐殖酸合成方向迁移。然而，当前多数研究仍以腐殖酸总量提升为唯一评价指标，对各微环境因子影响下腐殖酸分子结构(如芳香度、官能团分布、分子量)演化的精细刻画不足，难以实现面向特定功能需求的定向调控。

2.3. 外源添加剂强化

外源添加物是提升腐殖化效率的重要手段。根据材料属性，可分为无机添加剂、有机添加剂与生物添加剂三大类。不同类型外源添加物依托自身理化特性，形成了化学催化与生物代谢耦合的多元增效路径。为便于系统比较各类添加剂的作用特征与适用情境，本文从作用机制、提升效率、适用原料、成本等维度对代表性添加剂进行了归纳(表 1)。

Table 1. Multidimensional comparison of typical exogenous additives for compost humification regulation
表 1. 代表性外源添加剂在堆肥腐殖化调控中的多维度比较

添加剂类别	代表性物质	物料类型	主要作用机制	提升效果	成本
无机添加剂	MnFe ₂ O ₄	鸡粪	催化多酚 - 美拉德反应加速前体聚合；重塑产漆酶/过氧化物酶菌群；提供 Fe、Mn 酶辅助因子[11]	HA 含量提升 15.2%	中高
无机添加剂	Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄	鸡粪与酿酒葡萄渣堆肥	提高 H ₂ O ₂ 和 ·OH 产量；促进芳香族碳形成；增殖关键微生物类群[12]	HA 提升 14.9%	低
无机添加剂	改性蒙脱石	鸡粪	吸附富集前体并促进聚合；协同调控微生物群落[13]	HS 提升 39.3%	低
有机添加剂	生物炭	猪粪 + 厨余 + 玉米秸秆	吸附固定小分子有机物；延长高温期；优化堆体微环境[14]	HA/FA 提升约 67%	中
有机添加剂	Mg 改性生物炭	猪粪	引入活性位点驱动美拉德反应；促进 C-N 键形成；催化中间产物聚合成类胡敏酸[15]	HA 提升 21%	中
有机添加剂	丙二酸	牛粪	抑制 TCA 循环，增强细菌复杂性 with 稳定性；促进多酚合成及其与氨基酸聚合[16] [17]	HS 提升 16.8%	低
生物添加剂	<i>Geobacillus toebii</i>	牛粪 + 秸秆	成功定殖并加速木质纤维素降解，增强生物协同作用[18]	HA 含量提高 87.8%	低
生物添加剂	嗜热地衣芽孢杆菌 SCAU1602	牛粪	促进氨基酸和多酚向腐殖质前体转化[19]	腐殖化率提升 62.98%	低
生物添加剂	复合微生物菌剂	餐厨垃圾	增强细菌/真菌群落互作强度；延长高温期；刺激功能微生物[20]	HA 提升 42%	中
复合添加剂	丙二酸 + 生物炭	鸡粪	碳源调控与微环境优化协同；调控细菌资源利用策略；降低 CO ₂ 排放[21]	碳损失率下降 11.76%	中高
复合添加剂	丙二酸 + Fe ₂ O ₃	市政污泥	增加前体供给与加速缩合协同；功能互补与机制叠加[22]	HA 含量增加 32.5%	中
复合添加剂	过氧化钙 + 复合菌剂	牛粪 + 甘蔗渣	增强高温期木质纤维素降解酶基因丰度；提供更多前体供给[23]	HA 达 74.10 mg/L	中高

无机添加剂主要包括金属氧化物、矿物材料及磷酸盐等,主要作用于加速堆肥中有机物的分解和腐殖化。金属氧化物通过驱动自由基生产、催化前体聚合、重塑微生物群落与增强酶活性等方式,共同推动了堆肥中腐殖质的高效形成。现阶段铁氧化物、锰氧化物、复合氧化物应用较为广泛。例如,Long 等人[11]提出利用 MnFe_2O_4 能通过催化多酚-美拉德反应加速前体物质聚合,并重塑富集产漆酶、过氧化物酶菌群,提供 Fe、Mn 等酶辅助因子,强化了生物催化途径,体现了化学催化与酶促催化的协同效应。Zhang [12]等发现 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 可通过提高 H_2O_2 和 $\cdot\text{OH}$ 产量促进芳香族碳形成及关键微生物类群增殖,胡敏酸产量增加了 14.9%。矿物材料主要通过吸附作用提供局部高浓度及改善堆体微环境重塑微生物群落结构影响腐殖化。Pan [13]等人发现蒙脱石通过吸附富集前体并促进其聚合使腐殖质含量提高 37.2%;经热处理改性后,在增强化学催化的同时协同调控微生物群落,使腐殖质含量进一步提升至 39.3%。

有机添加剂主要包括生物炭、三羧酸(TCA)循环调节剂及膨松剂等。生物炭通过其巨大的比表面积与丰富的孔结构吸附固定小分子有机物、延长高温期并优化堆体微环境,进而调控有机质缩合。赵璐等[14]进一步发现,秸秆炭和厨余炭可通过比表面积与孔结构降低电导率、调控氮转化,使胡敏酸/富里酸分别提高 67.31%和 65.38%。此外,Gu 等[15]研究表明,Mg 改性生物炭通过引入活性位点,可通过腐殖化导向的催化功能使胡敏酸含量提高 21%,驱动美拉德反应促进 C-N 键形成,推动中间产物聚合成稳定的类胡敏酸组分。TCA 循环调节剂能通过强化三羧酸循环代谢通量,增加中间代谢产物供给,促进腐殖酸形成。添加丙二酸后,堆肥腐殖质含量提升了 16.8%[16]。丙二酸通过抑制 TCA 循环,增强了细菌复杂性与稳定性,并通过促进多酚合成及其与氨基酸的聚合来提升腐殖质含量。Zhang 等人[17]在鸡粪堆肥中发现,添加丙二酸可通过改变细菌群落结构,增强群落合成腐殖质的能力,将减少碳损失,同时增加腐殖质的含量和稳定性。

微生物添加剂方面,微生物接种可通过增强微生物活性、加速木质纤维素分解促进腐殖质形成。Zhao 等人[18]通过两阶段接种,使 *Geobacillus toebii* 在高温期成功定殖并加速木质纤维素降解,增强生物协同作用,胡敏酸含量提高 87.8%并增强芳香化程度。Zhao 等人[19]接种嗜热地衣芽孢杆菌 SCAU1602 可促进氨基酸和多酚向腐殖质前体的转化,使腐殖化速率提高 62.98%。Zhu [20]等人添加复合微生物菌剂使高温期延长 33%,胡敏酸含量提高 42%。接种复合菌剂显著提高了定向腐殖化程度与细菌/真菌群落互作强度。菌剂刺激了与腐殖酸形成和有机物降解高度相关的潜在功能微生物(*Thermobifida* 和 *Acremonium*)。

单一添加方式可在一定程度上提升腐殖质产量与稳定性。但堆肥腐殖化过程机制复杂,单一添加剂作用维度有限,难以实现多路径协同增效。近年来研究者开始将目光转向复合添加策略,在鸡粪堆肥中同时添加丙二酸和生物炭,可显著降低 CO_2 排放,并通过调控细菌群落结构及资源利用策略促进有机碳转化与腐殖质合成[21]。Zhang 等人[22]在市政污泥堆肥中联合添加丙二酸和 Fe_2O_3 ,可通过增加前体供给、加速缩合,显著增强腐殖化效果。过氧化钙与木质纤维素复合菌剂联合添加,使木质纤维素降解率提高至 45.39%,HA 含量达 74.10 mg/L,且联合处理增强了高温期木质纤维素降解酶基因的丰度,提供了更多的前体供给[23]。

不同类型外源添加物依托自身理化特性,形成了化学催化与生物代谢耦合的多元增效路径。相较于单一介质的定向调控,多种材料复合施加可实现功能互补与机制叠加,充分匹配腐殖化多阶段、多反应的复杂特征,为精准强化堆肥腐殖进程、实现有机固碳增效提供了可行的技术策略。然而,现有研究对添加剂长期环境归趋和潜在生态风险的关注亟待加以补充。

3. 结论与展望

围绕堆肥有机碳向腐殖酸定向转化的碳固定增效目标,本文从底物前体供给、微环境条件优化及外源添加剂强化三个维度,系统梳理了堆肥腐殖化的调控策略与研究进展。现有研究表明,底物调控可通

过精准识别与补足限制性前体引导碳流向腐殖酸合成通路；微环境优化有赖于多参数的动态协同调控；外源添加剂则凭借化学催化与生物代谢的耦合效应，为腐殖化效率的跨越式提升提供了多元路径，而复合添加策略的多机制协同已成为该领域的重要发展趋势。

尽管上述领域已取得较为丰富的研究积累，当前堆肥腐殖化的调控研究与工程应用仍面临诸多挑战，未来仍需重点关注诸多方面。其一，腐殖酸质与量的协同定向调控。现有策略多围绕腐殖酸含量、胡富比等的指标，而对芳香化程度、分子量分布、官能团组成及环境功能性等层面关注有限。利用高分辨率质谱、核磁共振等技术，建立腐殖酸结构与功能的精细表征方法，进而实现面向特定应用场景(如土壤改良、污染修复)的腐殖酸结构与功能的定向调控，是未来亟待突破的关键科学问题。其二，关键功能微生物与功能基因的精准识别与调控。堆肥腐殖化是微生物群落驱动的复杂过程，但当前对驱动腐殖质芳香化、前体聚合等关键步骤的核心功能微生物及功能基因的认知仍十分有限。借助宏基因组学、宏转录组学、宏代谢组学等多组学联用技术，联合 AI 大模型，精准识别并验证调控腐殖化进程的关键物种与代谢通路网络，为微生物添加剂的理性设计与定向强化提供科学依据，而非依赖经验性的筛选与复配是未来的趋势。

综上，堆肥腐殖化调控研究正从单一因子的定向优化走向多维度、多机制的系统协同。未来需进一步打通各环节的交互壁垒，构建精准化、智能化、低碳化的腐殖化调控技术体系，推动堆肥向高值化、固碳化方向发展，为有机固废资源化利用与农业碳中和目标的协同实现提供科技支撑。

基金项目

黑龙江省重大科技成果转化项目：适用龙江主栽作物新型高值绿色肥料创制及产业化应用(CG23014)。

参考文献

- [1] 黄梅, 黄潇, 钟尧, 等. 生物炭和生物质灰对堆肥过程氨气/温室气体排放的影响[J]. 中国沼气, 2026, 44(3): 42-52.
- [2] 石博, 沈玉君, 程琼仪. 农业废弃物好氧堆肥通风系统研究[J]. 现代化农业, 2026(6): 84-87.
- [3] Mounissamy, V.C., Parla Chandrashekar, D., Adhikari, T., Sarkar, A., Lenka, S., Selladurai, R., *et al.* (2024) Priming Effect of Pigeon Pea and Wood Biochar on Carbon Mineralization of Native Soil Organic Carbon and Applied Municipal Solid Waste Compost. *BioResources*, **19**, 7478-7492. <https://doi.org/10.15376/biores.19.4.7478-7492>
- [4] Chen, A., Han, Z., Xie, X., Song, C., Zhang, X. and Zhao, Y. (2024) Co-Composting Sugar-Containing Waste with Chicken Manure—A New Approach to Carbon Sequestration. *Journal of Environmental Management*, **356**, Article ID: 120609. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120609>
- [5] Zhang, Z., Zhao, Y., Yang, T., Wei, Z., Li, Y., Wei, Y., *et al.* (2019) Effects of Exogenous Protein-Like Precursors on Humification Process during Lignocellulose-Like Biomass Composting: Amino Acids as the Key Linker to Promote Humification Process. *Bioresource Technology*, **291**, Article ID: 121882. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121882>
- [6] Zhou, S., Tang, S., Ke, X., Zhou, H., Zou, S., Xue, Y., *et al.* (2023) Hyperthermophilic Pretreatment Significantly Accelerates Thermophilic Composting Humification through Improving Bacterial Communities and Promoting Microbial Cooperation. *Bioresource Technology*, **385**, Article ID: 129467. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129467>
- [7] Ding, S., Du, S., Zhang, K., Wu, Y., Xu, X., Lou, L., *et al.* (2025) Intelligent Aeration Strategy for Optimizing Food Waste Composting and Enhancing Humification. *Chemical Engineering Journal*, **521**, Article ID: 166668. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.166668>
- [8] Xie, M., Zhang, Y., Wang, D., Zeng, Y. and Feng, D. (2026) Impacts of Magnesium Sulfate and Calcium Superphosphate on Nitrogen Conservation, Humification, and Fertilizer Effectiveness during Corn Starch Residue-Soybean Meal-Oyster Shell Co-Composting. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **14**, Article ID: 120875. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120875>
- [9] Huang, W., Shi, H., Weng, Q., Ding, S. and Lou, L. (2024) Disparities and Mechanisms of Carbon and Nitrogen Conversion during Food Waste Composting with Different Bulking Agents. *Journal of Environmental Management*, **351**, Article ID: 119629. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119629>
- [10] Zhu, L., Zhao, Y., Chen, S., Miao, X., Fang, Z., Yao, X., *et al.* (2024) Alternating Ventilation Accelerates the Mineralization

- and Humification of Food Waste by Optimizing the Temperature-Oxygen-Moisture Distribution in the Static Composting Reactor. *Bioresource Technology*, **393**, Article ID: 130050. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130050>
- [11] Long, Y., Jin, H., Li, H., Zhu, N., Sun, E., Shan, C., *et al.* (2024) Trace MnFe_2O_4 Boosts Polyphenol-Maillard Reaction and Humification Process for Value-Added Composting: Integrated Effect of Chemical and Enzymatic Catalysis. *ACS ES&T Engineering*, **4**, 3067-3079. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.4c00415>
- [12] Zhang, Y., Chang, Q., Gong, X., Ma, J., Chen, T., Wang, R., *et al.* (2026) Insights into FeO , Fe_2O_3 , and Fe_3O_4 -Mediated Humification and Nitrogen Transformation during Composting. *Bioresource Technology*, **444**, Article ID: 134037. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.134037>
- [13] Pan, C., Zhao, Y., Zhao, L., Wu, J., Zhang, X., Xie, X., *et al.* (2021) Modified Montmorillonite and Illite Adjusted the Preference of Biotic and Abiotic Pathways of Humus Formation during Chicken Manure Composting. *Bioresource Technology*, **319**, Article ID: 124121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124121>
- [14] 赵璐, 王佳妮, 殷婕, 等. 不同源生物炭对多元物料协同堆肥腐熟度和腐殖化的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 249-259.
- [15] Gu, X., Li, H., Shi, Y., Sun, C., Li, J. and Li, S. (2025) Magnesium Modified Biochar Facilitates Favorable Nitrogen Conversion to Mitigate Ammonia and Nitrous Oxide Emissions during Pig Manure Composting. *Chemical Engineering Journal*, **504**, Article ID: 159073. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.159073>
- [16] Lu, Q., Jiang, Z., Tang, P., Yu, C., Jiang, F., Huang, J., *et al.* (2023) Identify the Potential Driving Mechanism of Reconstructed Bacterial Community in Reduce CO_2 Emissions and Promote Humus Formation during Cow Manure Composting. *Journal of Environmental Management*, **345**, Article ID: 118896. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118896>
- [17] Zhang, S., Gao, W., Xie, L., Zhang, G., Wei, Z., Li, J., *et al.* (2024) Malonic Acid Shapes Bacterial Community Dynamics in Compost to Promote Carbon Sequestration and Humic Substance Synthesis. *Chemosphere*, **350**, Article ID: 141092. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141092>
- [18] Zhao, C., Yang, L., Zhang, M., Jin, C., Zhang, Q., Yan, S., *et al.* (2026) Effects of Two-Stage Inoculation on Humification during Composting: Microbial Community Shifts and Molecular Transformation Pathways of Humic Acids. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **14**, Article ID: 122035. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.122035>
- [19] Zhao, B., Wang, Y., Liu, Y., Liu, X., Xu, J., Gu, Y., *et al.* (2025) Thermophilic *Bacillus Licheniformis* SCAU1602 Inoculation Reduced Nitrogen Loss and Enhanced Humification during Industrial Composting. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 118565. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118565>
- [20] Zhu, L., Zhao, Y., Yao, X., Zhou, M., Li, W., Liu, Z., *et al.* (2023) Inoculation Enhances Directional Humification by Increasing Microbial Interaction Intensity in Food Waste Composting. *Chemosphere*, **322**, Article ID: 138191. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138191>
- [21] Li, M., Xu, C., Liu, Q., Zhao, Y., Jiang, Z., Tang, P., *et al.* (2025) Bacterial Resource Allocation Strategies to Reduce CO_2 Emission and Enhance Carbon Conversion by Exogenous Additives in Chicken Manure Composting. *Environmental Research*, **287**, Article ID: 123136. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123136>
- [22] Zhang, S., Wang, L., Wan, Y., Wang, Y., Liu, B. and Wang, X. (2026) Combined Effects of Malonic Acid and Iron Oxide on Carbon Dioxide Emission, Humification and Bacterial Community Features during Municipal Sludge Composting. *Biomass and Bioenergy*, **215**, Article ID: 109607. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109607>
- [23] Ding, D., Zhang, Y., Lin, B., Ye, L., Xiang, H., Niu, S., *et al.* (2026) Calcium Peroxide and Composite Microbial Inoculant Synergistically Promote Compost Humification by Enhancing Lignocellulose Degradation and Modulating Microbial Communities. *Environmental Technology & Innovation*, **42**, Article ID: 104912. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2026.104912>