

外源物质调控好氧堆肥氮损失研究进展

乔俊莲^{1,2}, 徐仰红^{1,2}, 何莹莹^{1,2}, 向远昆^{1,2}, 姚全福³, 谢丽^{1,2}

(1. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092;

3. 呼和浩特民族学院化学与环境学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 好氧堆肥是处理有机垃圾的常用手段,但在堆肥过程中存在高温、高pH值以及局部厌氧等情况,导致含氮物质以 NH_3 、 N_2O 、 N_2 等形式逸出体系,从而降低了堆肥产品品质并污染了环境。通过改善堆体环境、提高微生物活性、调控堆体氮循环反应,生物炭、磷镁添加剂、微生物菌剂等外源物质显著降低了堆肥氮损失。介绍了好氧堆肥氮循环的基本机理,综述了近年来物理、化学、生物3类添加剂在控制好氧堆肥氮损失方面的研究成果,总结了外源添加剂对堆肥氮素转化代谢过程的影响机制,最后展望了氮循环路径以及添加剂与基质相互作用方面的研究潜力。

关键词: 氮素固持;好氧堆肥;外源添加;代谢路径;微生境
中图分类号: X705 **文献标志码:** A

Research Progress on Effects of Exogenous Substances on Nitrogen Loss During Organic Solid Waste Aerobic Composting

QIAO Junlian^{1,2}, XU Yanghong^{1,2}, HE Yingying^{1,2}, XIANG Yuankun^{1,2}, YAO Quanfu³, XIE Li^{1,2}

(1. Key Laboratory of Yangtze Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Chemistry and Environment, Huhhot Minzu College, Huhhot 010051, China)

Abstract: Aerobic composting is a traditional method for organic solid waste treatment. However, high temperatures, high pH values, and anaerobic conditions during the composting process contributed to severe nitrogen loss in the form of NH_3 , N_2O , N_2 , which exacerbated the pressure of environmental pollution and reduced the quality of compost products. Biochar, phosphorus magnesium additives, microbial inoculants

and other exogenous substances were proved to play a significant role in reducing nitrogen loss in the composting process. It was attributed to nitrogen cycle regulation composting by environment optimization and microbial activity improvement. This paper presents the basic mechanism of nitrogen cycle in aerobic composting. Meanwhile, the recent achievements of physical, chemical and biological additives on controlling nitrogen loss in aerobic composting are summarized. Furthermore, the influence mechanism of exogenous additives on nitrogen transformation and metabolism in composting is elucidated. Finally, the potential in nitrogen cycle path and the interaction between additives and matrix in the future research are prospected.

Keywords: nitrogen fixation; aerobic composting; exogenous addition; metabolic pathway; microbiota

好氧堆肥是一种利用微生物将有机废物转化成腐熟肥料的技术,能够在处理废弃物的同时实现资源化^[1-2]。然而,堆肥过程中存在高温、高pH值以及局部厌氧等情况,导致好氧堆肥面临氮素流失问题,不同类型堆肥的平均氮流失达到40%左右。氮元素主要以 NH_3 (46.8%~77.4%)和 N_2O (0.2%~9.9%)的形式逸出体系,不仅造成产物肥效下降,还会对人体和其他生物造成严重的危害^[3]。此外, N_2O 作为全球温室效应的“加速器”,其增温潜势相当于 CO_2 的298倍, N_2O 等温室气体的排放也将增加固体废物的处置成本。因此,降低堆肥过程中氮素损失是好氧堆肥处置有机固废亟待解决的问题。

研究者通过优化初始C/N、曝气量、堆肥原料配比等工艺参数调控堆肥进程,提高了空气扩散效率,

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1906402)

第一作者: 乔俊莲,副教授,硕士生导师,工学博士,主要研究方向为水体富营养化控制技术。

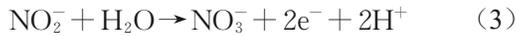
E-mail: qiaoqiao@tongji.edu.cn

通信作者: 谢丽,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为厌氧生物处理技术与理论。

E-mail: sally.xieli@tongji.edu.cn

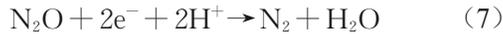
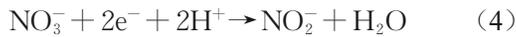


论文
拓展
介绍



1.2.3 反硝化作用

反硝化作用涉及的生化反应过程包括硝酸盐转化为亚硝酸盐、亚硝酸盐转化为一氧化氮、一氧化氮转化为 N_2O 或 N_2 等多个反应过程,具体氧化还原反应式如下所示^[16]:



氨化、硝化、反硝化是影响氮损失的主要路径,也是外源物质调控氮转化的关键。物理添加剂能够为反应提供活性位点,增强电子转移;化学添加剂能够调整pH值,有利于 NH_4^+ 保存,磷镁添加剂还能直接与 NH_4^+ 反应,形成鸟粪石结晶,使 NH_4^+ 以更加稳定的 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 形式存在。

1.2.4 硝酸盐异化还原成铵(DNRA)

DNRA是硝酸盐还原的另一种形式,广泛存在于河口、土壤等各个生态系统中,与反硝化作用不同,DNRA反应的最终产物是 NH_4^+ 。目前对于DNRA反应的研究多集中在污水脱氮领域,在堆肥

方向还需进一步研究。具体氧化还原反应式为^[16]:



1.2.5 厌氧氨氧化

厌氧氨氧化细菌以铵根离子为电子供体、亚硝酸根离子为电子受体发生氧化还原反应,释放 N_2 ,造成堆肥过程中的氮损失。具体氧化还原反应式如下所示^[16]:



1.2.6 固氮作用

堆体中部分微生物含有固氮酶,能够将大气或堆体中产生的 N_2 转化为氨,即生物固氮。生物固氮是堆肥体系与大气进行氮交换的重要过程,也是许多生态系统氮输入的重要来源^[17]。

1.3 微生物响应

氮循环相关生化反应是由微生物分泌的各种酶催化的,生化过程的效率与微生物活性和酶活性密切相关^[18]。各反应相关微生物及驱动反应的酶和功能基因如表1所示。

表1 堆肥氮转化反应相关微生物、酶和功能基因

Tab.1 Microorganisms, enzymes and functional genes related to compost nitrogen conversion

反应类型	发生阶段	主要微生物	酶	参考文献
氨化作用	中温阶段	假单胞菌、乳酸菌		[19]
硝化作用	中温阶段 腐熟阶段	短单胞菌、假单胞菌和奇古菌	氨单加氧酶(AMO)、羟胺氧化还原酶(HAO)、亚硝酸盐氧化还原酶(NXR)	[16,20-22]
反硝化作用	中温阶段 高温阶段	假单胞菌和芽孢杆菌	硝酸盐还原酶、亚硝酸盐还原酶、一氧化氮还原酶、一氧化二氮还原酶	[23-25]
厌氧氨氧化		厌氧氨氧化菌	脒氧化酶、脒合酶(HZS)	[18,26]
DNRA			周质硝酸盐还原酶(NAP)、周质亚硝酸盐还原酶(NRFA)、一氧化氮还原酶(NOR)	[27-28]

堆肥初期,堆体有机物含量丰富,假单胞菌属和乳酸菌属等氨化细菌生命活动旺盛,有机物在水解酶的作用下剧烈分解,产生的小分子物质作为底物发生氨化反应,释放大量热量,堆体温度逐渐上升。同时,堆体中携带 $nasA$ 、 $narB$ 、 $narG$ 、 $narH$ 、 $narI$ 及 $nirA$ 、 $nirB$ 、 $nirD$ 基因的反硝化菌,将 NO_3^- 还原成 NO_2^- ,并在亚硝酸盐还原酶和一氧化氮还原酶的催化下将 NO_2^- 转化为 N_2O ,造成堆肥初期的氮素损失。进入高温期后,大量嗜温微生物死亡或进入休眠状态,大部分病原微生物灭活,堆体中以嗜热菌为主,前期氨化作用产生的一部分 NH_4^+ 在高温和碱性条件下转化为 NH_3 逸出体系。随着有机物减少,矿化作用减弱,温度降低。进入降温期后, $nasA$ 、 $narB$ 、

$napA$ 、 $napB$ 基因增加,促进 NO_3^- 向 NO_2^- 转化,同时携带 $nirK$ 和 $norB$ 、 $norC$ 基因的嗜油脂极小单胞菌、类固醇杆菌和德沃斯氏菌等反硝化菌富集,促进 N_2O 排放。反硝化作用往往发生在体系中氧气不足的区域,研究者通过加入生物炭等多孔物质,改善堆体通气条件,降低反硝化反应强度。在腐熟阶段,硝化细菌大量繁殖,短单胞菌、假单胞菌和奇古菌等逐渐成为优势种,在氨单加氧酶(AMO)、亚硝酸盐氧化还原酶(NXR)驱动下将铵态氮转化为硝态氮^[29]。外源物质的加入能提前确立或加强硝化细菌的优势地位,促进硝化过程。另外,腐熟期 $nosZ$ 基因丰度显著增加,将 N_2O 转化为 N_2 ,降低 N_2O 排放。

2 外源物质的保氮效果研究进展

根据作用类型不同,外源物质可分为物理、化学、生物添加剂,通过直接参与氮转化相关反应或强化相关反应微生物活性影响堆体氮循环过程,达到保氮效果。

2.1 物理添加剂

物理添加剂能够通过物质吸附、改善堆体通风供氧条件等方式影响氮循环,减少好氧堆肥过程中的氮素损失(见表2)。常用的物理添加剂包括沸石、生物炭、膨润土等,其中生物炭以其来源广、保氮性能好的优点在科学研究和实际生产中应用广泛。研究发现:小麦秸秆生物炭的加入能够促进 NH_4^+ 向 NO_3^- 的转化,使堆肥结束时实验组硝态氮含量比对

照组明显提高;生物炭的吸附性降低了堆肥在高温期的氨挥发速率,减少了氨气累积排放量^[30]。玉米秸秆生物炭氧化产生的表面酸基,尤其是羧基,也能有效保留 NH_4^+ ,避免 NH_4^+ 转化为 NH_3 逸出体系,但添加量较少时保氮效果不明显,说明生物炭控氮效果受添加量影响^[31-32]。沼渣生物炭对堆肥氮素循环和平衡影响的研究结果表明,沼渣生物炭本身富含矿物质和其他营养元素,同时其多孔结构增加了堆体通气性,抑制了厌氧菌的活性,从而显著降低了 NH_3 和 N_2O 形式的氮损失量^[33]。此外,草炭和沸石对鸡粪好氧堆肥的对比结果表明,草炭减少堆肥总氮损失效果更好,沸石较差,这可能是由于堆肥中水分和 CO_2 含量较高,沸石吸附和保存 NH_3 的作用未能发挥^[34]。

表2 物理添加剂的保氮效果

Tab.2 Effect of physical additives on nitrogen retention in the composting process

添加剂种类	堆体基质	添加量(干重)	保氮效果	参考文献
生物炭	猪粪	0%、5%、10%、15%	氨挥发累积排放量分别比对照组降低了18.77%、25.35%和26.39%	[30]
	啤酒酒糟	0、5%、10%、15%	添加5%和10%生物炭的组别最终氮损失仅略有减少,添加15%生物炭的最终氮损失从60.76%显著减少到44.32%	[31]
沼渣生物炭	猪粪+枸杞枝屑	0%、2.5%、5.0%、7.5%	以 NH_3 和 N_2O 形式减少的氮分别从总氮的10.78%减少到<5.73%和从0.34%减少到<0.04%	[33]
草炭、沸石	鸡粪+锯末	以C/N 25左右、含水率65%左右为标准进行配比	单加沸石总氮损失相比于对照组减少19.4%,单加草炭减少59.7%	[34]
铁碳颗粒	厨余垃圾	10%	NO_3^- 含量增加了15.9%	[35]
沸石	污水污泥+麦秸	0%、5%、10%、15%	氮损失分别减少了41.12%、43.17%、50.43%	[36]

物理添加剂能有效减少好氧堆肥过程中的氮流失,通过优化堆体环境、调整含水率和C/N、提供反应位点发挥保氮作用,保氮效果受添加剂量的影响。

2.2 化学添加剂

化学添加剂包括有机添加剂和无机添加剂,主要通过调整堆体pH值或直接与含氮物质反应从而达到固氮目的(见表3)。向牛粪和小麦秸秆堆肥体系中加入过磷酸钙后, NH_3 释放量减少,而 N_2O 释放量增加^[37-38]。过磷酸钙处理下较低的pH值抑制了 NH_4^+-N 向 NH_3 转化,减少了 NH_3 挥发,但pH值可能与 N_2O 释放量为负相关关系^[39-40],即微酸性环境下可能产生更多 N_2O 。此外,过磷酸钙可能促进高温期耐高温甲烷氧化菌发生氨氧化反应和硝化作用,导致 NH_4^+ 不完全硝化而产生 N_2O 。也有研究认为,在堆肥开始前体系中已经积累了一定量的 N_2O ,堆肥开始后由于强制气流作用 N_2O 从体系中逸出,从而导致 N_2O 排放^[41]。磷石膏的固氮效果与过磷酸

钙相似,能明显减少 NH_3 释放量但略微增加 N_2O 释放量^[3],两者都能在堆体中促进鸟粪石结晶的形成,有利于氮素稳定化。在添加 FeSO_4 促进氮素固持的研究中,pH值降低和有机质矿化减弱是堆肥氮素损失减少的重要原因,加入 FeSO_4 的对照组氮损失明显减少^[42-43]。除此之外,有机添加剂越来越多地应用在堆肥保氮的研究中。氨三乙酸作为一种有机酸,其水解出的 H^+ 可与 NH_3 结合,使 $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$ 平衡朝向质子化形态移动,进而将 NH_3 以 NH_4^+-N 的形式固定在堆体中^[44]。聚天冬氨酸通过官能团的螯合作用和促腐殖化功能,促使腐熟堆体中总氮含量增幅为对照组的3.91倍,同时可显著促进Cu等重金属向残渣态转化^[45]。代谢调节剂对促进氮循环也有积极作用,能改变参与有机氮转化的功能细菌群落,减少有机氮降解,达到固氮效果^[46]。

与物理添加剂作用方式不同,化学添加剂往往直接参与堆肥中的物质转化,对堆体pH值影响较大,研究结果表明化学添加剂平均将堆体pH值降低

表3 化学添加剂的保氮效果

Tab.3 Effect of chemical additives on nitrogen retention in the composting process

添加剂种类	堆体基质	添加量(干重)/%	保氮效果(% , 相比于对照组)				参考文献
			NH ₃	N ₂ O	TN	氮损失率	
过磷酸钙	牛粪	10	↓19.65	↑20.80			[36]
氨三乙酸	剩余污泥	2.5	↓15.20				[44]
聚天冬氨酸	鸡粪	0.024			↑16		[45]
磷石膏	餐厨垃圾	10	↓23.50	↑3.20			[38]
三磷酸腺苷	园林废弃物	0.1				↓27.99	[46]
丙二酸	园林废弃物	0.5				↓29.10	[46]
FeSO ₄	牛粪	2.5~5.0				↓9.20~15.70	[43]
MgCl ₂	污水污泥	5	↓58.30				[42]
FeSO ₄	污水污泥	5	↓82.90				[42]
磷酸钙镁	猪粪	10	↓42.90				[47]
磷石膏	猪粪		↓59.74	↑8.15			[48]

0.5^[49];化学添加剂还会改变反应平衡,如增强NH₄⁺向NO₃⁻转化。然而,pH值和物质浓度的变化也会大大影响堆肥微生物活性和代谢速率,堆体中的氮循环最终是由微生物驱动的。

2.3 微生物添加剂

微生物添加剂可以由单一菌种构成,也可以由数种不同微生物组成复合菌剂。目前常用于堆肥添加的微生物类群包括芽孢杆菌属(*Bacillus*)、乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、链霉菌属(*Streptomyces*)、曲霉属(*Aspergillus*)、木霉属(*Trichoderma*)以及白腐菌(White-Rot Fungi)等^[50]。

在猪粪堆肥中加入地衣芽孢杆菌、黄孢原毛平革菌配比为1:8的微生物复合菌剂,不仅使总氮和有机氮损失分别减少了17.3%和18.5%,还促进了Cu等重金属钝化过程^[51]。向鸡粪堆肥中添加硫和硫杆菌1904,结果表明硫降低了土壤pH值和NH₃累积释放量,氮素损失降低了44.23%,而氮循环相关基因的表达与对照组相比差异不显著;喷施硫杆菌1904显著增强了成熟期氨单加氧酶A(*amoA*; AOA)和亚硝酸盐氧化还原酶A(*nrrA*)的表达,提高了硝态氮含量,减少了28.2%的氮素损失^[52]。3种微生物菌剂对堆体氮元素动态变化的对比结果表明,添加了霉菌、放线菌和酵母菌混合菌剂的堆体升温快,高温持续时间长,氮素损失率下降了27.7%^[53]。此外,腐熟肥料由于含有大量堆肥相关微生物,也常常作为微生物接种剂添加到堆肥体系中。将腐熟肥料(按湿重计为堆肥原料的10%)混入或覆盖在堆体上,N₂O和NH₃排放分别减少了73.6%和58.0%^[54]。

生物添加剂改善了堆体内部群落结构,通过影响氮循环相关基因的表达调整反应强度,一些菌剂在发挥固氮效果的同时还可以加快堆肥进程、促进抗生

素等有害物质降解^[55]。然而,单一类型添加剂保氮效果受添加量影响,添加量较小保氮效果差,而过量添加容易出现成本过高或二次污染等问题。因此,研究人员从多种添加剂耦合的角度探究堆肥高效保氮方法。

2.4 不同类型添加剂联合使用

目前,针对多种添加剂联合施加调控堆肥过程的研究已取得了丰富成果,不同类型添加剂耦合强化好氧堆肥成效明显,保氮效果受各类型添加剂配比的影响(见表4)。

在不同类型添加剂的组合使用中,物理添加剂和化学添加剂的联用研究较为广泛。在园林废弃物堆肥中,生物炭、乳酸和池塘沉积物3种物质联合施用促进了有机物降解和铵态氮转化,使硝态氮含量相比于对照组提高了119%^[56]。向餐厨垃圾堆肥中加入沸石、镁盐和磷酸,氮损失减少到18%;镁和磷酸盐能促进鸟粪石结晶过程,捕获游离的NH₄⁺;沸石能控制盐度,防止堆肥产品因盐度过高而影响植物生长^[59]。相比于单独添加某一类型外源物质,联合添加的保氮效果明显更好。对竹炭和竹醋驱动猪粪堆肥的系统分析发现,竹炭和竹醋通过改善堆肥环境促进了中温阶段关键硝化细菌(亚硝化单胞菌)对NH₄⁺的转化;在腐熟阶段,复合添加剂抑制了优势反硝化细菌(变形杆菌)的生长,丰度比对照组低38.74%,最大限度地减少了NH₃和N₂O的损失^[58]。单独或联合添加磷石膏和麦饭石对猪粪堆肥的影响亦有明显差异,尤其是对于N₂O减排而言,联合添加后N₂O排放量降低了42.86%,保氮效果显著优于单独添加^[3]。物理添加剂和生物添加剂组合在好氧堆肥氮素固持方面亦有研究。向餐厨垃圾好氧堆肥中加入生物炭和微生物菌剂,结果显示铵态氮含量相较于未添加生物炭和菌剂的对照组下降了39.1%,生物炭改善了堆体曝气条件,增强了硝化过程,微生

表 4 添加剂联合使用的保氮效果

Tab.4 Effect of combined additives on nitrogen retention in the composting process

添加剂种类及用量(干重)	堆体基质	保氮效果/%				参考文献
		NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NH ₃	N ₂ O	
生物炭 5%+乳酸 0.5%+池塘沉积物 20%	园林废弃物	↑119				[56]
生物炭 10%+微生物菌剂	厨余垃圾		↓39.1			[57]
竹炭 3%				↓14.35	↓44.83	[58]
竹醋 0.4%	猪粪			↓17.90	↓55.96	[58]
竹炭 3%+竹醋 0.4%				↓29.83	↓74.53	[58]
沸石 10%+氧化镁 0.05 mol·kg ⁻¹ +磷酸氢钾 0.10 mol·kg ⁻¹	厨余垃圾			↓18.00		[59]
麦饭石 10%				↓25.78	↓19.00	[3]
磷石膏 10%	猪粪			↓59.74	↑8.15	[3]
麦饭石 5%+磷石膏 5%				↓68.37	↓42.86	[3]
生物炭 10%					↓64.91	[60]
生物炭 10%+沸石 10%					↓78.14	[60]
生物炭 10%+沸石 10%+木醋 0.5%	猪粪				↓79.51	[60]
生物炭 10%+沸石 10%+木醋 1.0%					↓80.52	[60]
生物炭 10%+沸石 10%+木醋 2.0%					↓81.10	[60]

物菌剂刺激了类芽孢杆菌生长,促进了固氮作用,与最终产品总氮(TN)较高的结果一致^[57]。在多种添加剂联合添加的基础上,通过设置添加量梯度,探究了添加量对猪粪堆肥保氮效果的影响。结果显示,添加剂的联合使用可减少 64.45%~74.32% 的氨损失和 79.51%~81.10% 的 N₂O 释放量,其中添加 10% 生物炭、10% 沸石和 2.0% 木醋的堆肥组 N₂O 释放量最小^[60]。

相对于单独添加一种类型保氮剂,耦合添加明显增强了保氮效果,但添加剂的组合类型及配比对氮素固持效果具有显著影响,应进一步了解添加剂对堆肥氮素转化代谢过程的影响机制,以便有针对性地调控不同堆肥底物的氮素循环。

3 外源物质对堆肥氮素转化代谢过程影响机制

好氧堆肥依赖于微生物的代谢活动。外源物质基于自身特性调整堆体环境参数,驱动微生物发出响应,包括群落演替、酶活性变化和和相关基因丰度变化等(见图 2)。在群落演替层面,外源物质的引入调整了主导相应生化反应路径的微生物丰度,从而影响各反应速率,进一步改变物质转化的效率和方向;在酶活性和基因丰度层面,外源物质激活或抑制相关基因的表达和酶活性,改变了酶的催化效率,从而调控物质转化。群落演替、酶活性和基因丰度都是微生物代谢机制的重要表征,外源物质从介导微观

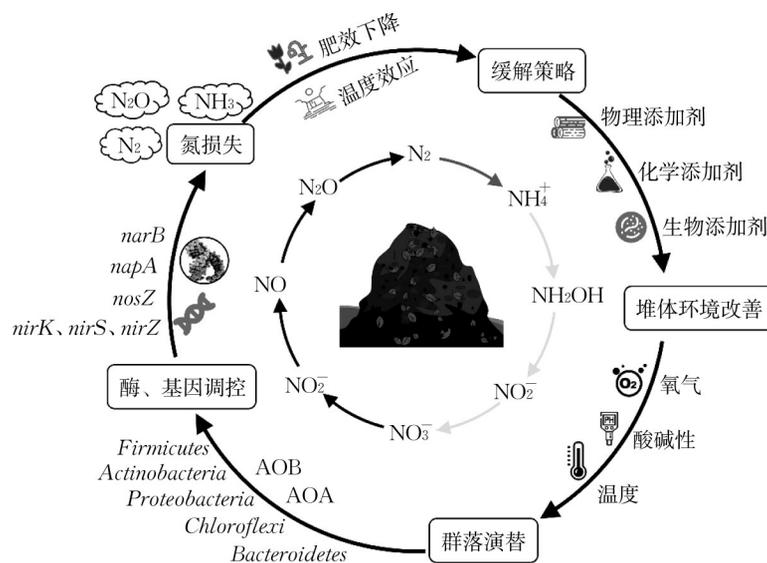


图 2 外源物质调控堆肥氮循环示意图

Fig.2 Schematic diagram of regulated compost nitrogen cycle by exogenous substances

的代谢机制入手,以调控生化反应为路径,达到减少 NH_3 、 N_2O 等含氮物质释放的宏观效果。

厚壁菌门(*Firmicutes*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)等堆肥微生物主要门与氮含量(NH_3 、 NH_4^+ -N、 N_2O 和 NO_3^- -N)之间存在显著相关关系,绿弯菌门、拟杆菌门、芽单胞菌门、变形菌门与 NO_3^- -N为极显著正相关,厚壁菌门与 NH_3 、 NH_4^+ -N为正相关^[3]。菌群与氮含量的相关关系也说明了微生物与含氮物质的转化路径密切相关。施用添加剂后,菌群生存条件改变,其丰度和代谢强度受到影响,微生物主导的固氮过程加强、反硝化过程减弱,达到减少氮损失的目的。亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)和亚硝化螺菌属(*Nitrosospira*)是主要的硝化菌群,藤黄单胞菌属(*Luteimonas*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、施氏假单胞菌(*Pseudomonas stutzeri*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、无色杆菌属(*Achromobacter*)、副球菌属(*Paracoccus*)、嗜油脂极小单胞菌属(*Pusillimonas*)、卡斯特兰尼氏菌(*Castellaniella*)是常见的反硝化菌群,梭菌属(*Clostridium*)、高温双歧菌属(*Thermobifida*)和优杆菌属(*Eubacterium*)为固氮菌^[18,61-62]。外源添加剂通过提高硝化菌和固氮菌丰度、降低反硝化菌丰度来调控氮素转化反应强度,促进氮素保留。此外,外源添加剂提高了芽孢杆菌(*Bacillus*)、链霉菌(*Streptomyces*)和糖单孢菌(*Saccharomonospora*)的丰度,增强了木质纤维素等有机质的降解,为固氮菌提供更加丰富的碳源,从而促进固氮过程,减少氮素损失^[63]。在猪粪堆肥研究中,添加磷石膏和麦饭石的堆肥组卡斯特兰尼氏菌丰度明显降低,从而抑制了反硝化过程,减少了 N_2O 排放量^[3]。

就酶促机制和功能基因丰度而言,参与氮循环的酶主要有 amoA 介导的氨单加氧酶、 nxr 介导的亚硝酸盐氧化还原酶、 narG 和 napA 介导的硝酸还原酶、 nirS 和 nirK 介导的亚硝酸盐还原酶、 nosZ 介导的氧化亚氮还原酶、 hzo 介导的脒氧化酶和 nifH 介导的固氮酶等。外源物质通过改变堆体温度和pH值,或直接作为激活剂/抑制剂作用于酶,影响酶活性。磺胺甲噁唑和诺氟沙星等抗生素能降低细菌 amoA 和 nxrA 的相对丰度, amoA 的下降增加了 NH_3 排放, nxrA 下降则增强了堆肥初期 N_2O 排放^[64]。粉末竹炭能降低亚硝酸盐还原酶的活性和 nirS 、 nirK 等反硝化基因丰度,抑制 $\text{NO}_2^- + \text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$

反应,从而降低 N_2O 排放^[65]。磷酸缓冲液可以抑制硝酸盐还原酶活性,降低 $\text{NO}_3^- + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$ 反应速率,磷酸缓冲液还能抑制脲酶活性,阻碍氨化作用的发生,抑制 NH_3 释放,达到保氮效果^[66]。

随着技术的不断发展和进步,基于分子生物理论的检测和分析手段广泛应用于好氧堆肥中,研究者利用高通量测序技术分析堆肥微生物群落组成和演替,并基于宏基因组学技术从基因角度深入探究堆肥过程中的物质循环转化代谢通路,从而进一步揭示外源物质促进氮素保留的调控机制。总体而言,外源物质添加改善了堆体环境,目标类群微生物丰度增加,代谢活动增强,相关基因表达增加,酶活性进一步增强,达到调节物质转化的目的,即减少氮损失过程、增强氮固定过程。

4 总结和展望

外源添加剂通过对堆体环境及微生物生命活动的调控减少堆肥过程中的氮损失,物理、化学、生物添加剂均被广泛应用于好氧堆肥的氮素保留研究中。基于16S rRNA高通量测序、宏基因组学等手段,堆肥过程中的氮代谢通路不断清晰,外源物质添加后的微生物响应机理也更加明确。

尽管外源物质调控堆肥氮转化的效果十分显著,但是仍然面临着诸多问题,值得进一步探究:①硝酸盐异化还原成铵反应在堆肥中研究较少,原理尚需明确;②外源添加剂控制氮素损失机理已取得了较为丰富的研究成果,在此基础上利用添加剂实现含氮物质定向调控将是未来的研究热点;③外源物质保氮效果受堆肥基质影响,外源物质与堆体基质的相互作用还需进一步研究。

基于目前存在的问题,外源物质调控堆肥氮素损失研究可以从硝酸盐异化还原成铵入手,对其发生机理、影响因素及添加剂作用机制进行系统剖析,完善堆肥氮素循环网络。基于此,筛选定向调控氮转化过程的添加剂,以适应不同需求堆肥产品的标准。在外源物质与堆体基质相互作用方面,明确添加剂对堆体理化性质、生化反应位点、微生物的影响,为研发高效堆肥固氮添加剂建立基础。

作者贡献声明:

乔俊莲:论文写作及图表绘制。

徐仰红:论文写作。

何莹莹:论文及图表修改。

向远昆:论文修改。

姚全福:图表修改。

谢 丽:资助项目获取,论文修改及质量控制。

参考文献:

- [1] ROS M, RODRIGUEZ I, GARCIA C, *et al.* Bacterial community in semiarid hydrocarbon contaminated soils treated by aeration and organic amendments [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 94: 200.
- [2] FERREIRA DE ARAUJO A S, DE MELO W J, SINGH R P. Municipal solid waste compost amendment in agricultural soil: changes in soil microbial biomass [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2010, 9(1): 41.
- [3] LEI L, GU J, WANG X, *et al.* Effects of phosphogypsum and medical stone on nitrogen transformation, nitrogen functional genes, and bacterial community during aerobic composting [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 141746.
- [4] SHAN G, LI W, GAO Y, *et al.* Additives for reducing nitrogen loss during composting: a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307: 127308.
- [5] CUI H, OU Y, WANG L, *et al.* Tetracycline hydrochloride-stressed succession in microbial communities during aerobic composting: insights into bacterial and fungal structures [J]. *Chemosphere*, 2022, 289: 133159.
- [6] 李思敏,张义竞,唐锋兵,等. 生物炭对污泥-菌渣堆肥腐殖化与重金属钝化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(7): 1565.
- LI Simin, ZHANG Yijing, TANG Fengbing, *et al.* Effects of biochar on humification and heavy metal passivation of sludge-fungus residue compost [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1565.
- [7] SAGDEEVA O A, KRUSIR G V, TSIKALO A L, *et al.* Composting of organic waste with the use of mineral additives [J]. *Journal of Food Science and Technology: Ukraine*, 2018, 12(1): 43.
- [8] ABDELLAH Y A Y, SHI Z, LUO Y, *et al.* Effects of different additives and aerobic composting factors on heavy metal bioavailability reduction and compost parameters: a meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 307: 119549.
- [9] 高云航,勾长龙,王雨琼,等. 低温复合菌剂对牛粪堆肥发酵影响的研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(12): 3166.
- GAO Yunhang, GOU Changlong, WANG Yuqiong, *et al.* Effects of the cold-adapted complex microbial agents on cattle manure composting [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(12): 3166.
- [10] CAO Y, WANG X, BAI Z, *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.
- [11] 钱清华. 畜禽粪便堆肥高效固氮添加剂研究[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(1): 134.
- QIAN Jinghua. Study on high efficiency nitrogen fixation composting additive for livestock manure [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(1): 134.
- [12] TANIKAWA D, NAKAMURA Y, TOKUZAWA H, *et al.* Effluent treatment in an aquaponics-based closed aquaculture system with single-stage nitrification denitrification using a down-flow hanging sponge reactor [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 132: 268.
- [13] LYCUS P, SORIANO-LAGUNA M J, KJOS M, *et al.* A bet-hedging strategy for denitrifying bacteria curtails their release of N₂O [J]. *PNAS*, 2018, 115(46): 11820.
- [14] 李思雨. 市政污泥好氧堆肥氮素转化及氨气控制研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- LI Siyu. Study on nitrogen transformation and ammonia control of municipal sludge aerobic composting [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [15] PROSSER J I. Autotrophic nitrification in bacteria [J]. *Advances in Microbial Physiology*, 1989, 30: 125.
- [16] SHI M, ZHAO Y, ZHU L, *et al.* Denitrification during composting: biochemistry, implication and perspective [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 153: 105043.
- [17] YIN Y, GU J, WANG X, *et al.* Impact of copper on the diazotroph abundance and community composition during swine manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 255: 257.
- [18] ZHONG X, ZENG Y, WANG S, *et al.* Insight into the microbiology of nitrogen cycle in the dairy manure composting process revealed by combining high-throughput sequencing and quantitative PCR [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122760.
- [19] LIU N, HOU T, YIN H, *et al.* Effects of amoxicillin on nitrogen transformation and bacterial community succession during aerobic composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362: 258.
- [20] ZHANG Y, ZHAO Y, CHEN Y, *et al.* A regulating method for reducing nitrogen loss based on enriched ammonia-oxidizing bacteria during composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 221: 276.
- [21] PEPE O, VENTORINO V, BLAIOTTA G. Dynamic of functional microbial groups during mesophilic composting of agro-industrial wastes and free-living (N₂)-fixing bacteria application [J]. *Waste Management*, 2013, 33(7): 1616.
- [22] TANG J, LI X, CUI P, *et al.* Nitrification plays a key role in N₂O emission in electric-field assisted aerobic composting [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122470.
- [23] WANG K, WU Y, LI W, *et al.* Insight into effects of mature compost recycling on N₂O emission and denitrification genes in sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 251: 320.
- [24] LIU T, AWASTHI M K, AWASTHI S K, *et al.* Effects of clay on nitrogen cycle related functional genes abundance during

- chicken manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 291: 121886
- [25] YANG Y, AWASTHI M K, WU L, *et al.* Microbial driving mechanism of biochar and bean dregs on NH_3 and N_2O emissions during composting [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 315: 123829.
- [26] RAHMAN M M, SHAN J, YANG P, *et al.* Effects of long-term pig manure application on antibiotics, abundance of antibiotic resistance genes (ARGs), anammox and denitrification rates in paddy soils[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 368.
- [27] KUYPERS M M M, MARCHANT H K, KARTAL B. The microbial nitrogen-cycling network [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(5): 263.
- [28] 赵彬洁. 汉江流域金水河与淇河氮循环过程及微生物驱动机制[D]. 武汉: 中国科学院武汉植物园, 2021.
- ZHAO Binjie. Nitrogen cycling and microbial driven mechanism of Jinshui River and Qi River in the Han River, China [D]. Wuhan: Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Science, 2021.
- [29] 任秀娜. 矿物材料对畜禽粪便好氧堆肥碳氮转化的影响机制研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- REN Xiuna. Effect and mechanisms of mineral amendment on carbon and nitrogen transformation during livestock manure composting[D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2022.
- [30] 李太魁, 王小非, 郭战玲, 等. 添加生物炭对猪粪好氧堆肥过程氮素转化与氨挥发的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(4): 874.
- LI Taikui, WANG Xiaofei, GUO Zhanling, *et al.* Effects of biochar on nitrogen transformation and ammonia emissions during pig manure composting [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(4): 874.
- [31] WANG X, ZHAO Y, WANG H, *et al.* Reducing nitrogen loss and phytotoxicity during beer vinasse composting with biochar addition[J]. *Waste Management*, 2017, 61: 150.
- [32] 刘立, 张朝升, 赵美花. 生物炭对好氧堆肥化处理影响的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(9): 170.
- LIU Li, ZHANG Chaosheng, ZHAO Meihua. Impacts of biochar on aerobic composting: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(9): 170.
- [33] WANG J, PAN J, MA X, *et al.* Solid digestate biochar amendment on pig manure composting: nitrogen cycle and balance[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 349: 126848.
- [34] 黄懿梅, 曲东, 李国学. 调理剂对鸡粪锯末堆肥中的保氮效果[J]. *环境科学*, 2003(2): 156.
- HUANG Yimei, QU Dong, LI Guoxue. Effect of adding amendments on preserving nitrogen during chicken manure and saw composting[J]. *Environmental Science*, 2003(2): 156.
- [35] HE Y, HUANG X, ZHANG H, *et al.* Insights into the effect of iron-carbon particle amendment on food waste composting: physicochemical properties and the microbial community [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 351: 126939.
- [36] AWASTHI M K, WANG Q, HUANG H, *et al.* Influence of zeolite and lime as additives on greenhouse gas emissions and maturity evolution during sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 172.
- [37] 李云, 邱慧珍, 张建斌, 等. 添加过磷酸钙和糠醛渣对好氧堆肥过程中氨气排放和氮素转化的影响[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(12): 3992.
- LI Yun, QIU Huizhen, ZHANG Jianbin, *et al.* Effects of superphosphate and furfural residue addition on NH_3 emissions and nitrogen conversion during the aerobic composting [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(12): 3992.
- [38] YANG F, LI G, SHI H, *et al.* Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting [J]. *Waste Management*, 2015, 36: 70.
- [39] 吴伟祥, 李丽劼, 吕豪豪, 等. 畜禽粪便好氧堆肥过程氧化亚氮排放机制[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1704.
- WU Weixiang, LI Lijie, LÜ Haohao, *et al.* Mechanisms of nitrous oxide emission during livestock manure aerobic composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1704.
- [40] HAO X Y, LARNEY F J, CHANG C, *et al.* The effect of phosphogypsum on greenhouse gas emissions during cattle manure composting [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(3): 774.
- [41] EL KADER N A, ROBIN P, PAILLAT J, *et al.* Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14): 2619.
- [42] LI Y B, LIU T T, SONG J L, *et al.* Effects of chemical additives on emissions of ammonia and greenhouse gas during sewage sludge composting [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 143: 129.
- [43] MEI J, JI K, SU L, *et al.* Effects of FeSO_4 dosage on nitrogen loss and humification during the composting of cow dung and corn straw[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 341: 125867.
- [44] CHENG F, HE Q, SONG M, *et al.* Effect of nitrilotriacetic acid on nitrogen conservation during aerobic composting [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(2): 699.
- [45] 徐荣, 朱凌云, 王守红, 等. 添加剂对好氧堆肥过程氮素固持和重金属钝化过程的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(3): 308.
- XU Rong, ZHU Lingyu, WANG Shouhong, *et al.* Effects of additives on nitrogen fixation and heavy metal passivation processes in aerobic composting[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3): 308.
- [46] WANG L, ZHAO L, ZHANG Y, *et al.* The active role of metabolic regulators in nitrogen loss reduction and organic nitrogen transformation during different materials composting [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 345: 131134.

- [47] LIU Y, MA R, LI D, *et al.* Effects of calcium magnesium phosphate fertilizer, biochar and spent mushroom substrate on compost maturity and gaseous emissions during pig manure composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 267: 110649.
- [48] LEI L, GU J, WANG X, *et al.* Effects of phosphogypsum and medical stone on nitrogen transformation, nitrogen functional genes, and bacterial community during aerobic composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 141746.
- [49] BOUCHER V D, REVEL J C, GUIRESSE M, *et al.* Reducing ammonia losses by adding FeCl_3 during composting of sewage sludge[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1999, 112(3/4): 229.
- [50] ZHAO B, SUN X, HUANG J, *et al.* Application and effects of microbial additives in aerobic composting of organic solid wastes: a review[J]. *Microbiology China*, 2021, 48(1): 223.
- [51] 刘艳婷, 郑莉, 宁寻安, 等. 微生物菌剂对畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属钝化与氮转化的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(6): 2157.
- LIU Yanting, ZHENG Li, NING Xun'an, *et al.* Effects of microbial agents on heavy metal passivation and nitrogen transformation in aerobic composting of livestock manure [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(6): 2157.
- [52] LU Y, GU W, XU P, *et al.* Effects of sulphur and *Thiobacillus thioparus* 1904 on nitrogen cycle genes during chicken manure aerobic composting [J]. *Waste Management*, 2018, 80: 10.
- [53] 刘微, 张津, 李博文, 等. 不同微生物菌剂对番茄秸秆好氧堆肥中氮磷钾元素的转化规律的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(3): 88.
- LIU Wei, ZHANG Jin, LI Bowen, *et al.* Effect of microorganism agents on tomato straw compost and changes of the NPK element forms [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(3): 88.
- [54] YANG F, LI Y, HAN Y, *et al.* Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 262.
- [55] ZHAO H, LI S, JIANG Y, *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.
- [56] FENG X, ZHANG L. Combined addition of biochar, lactic acid, and pond sediment improves green waste composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158326.
- [57] HUANG X, HE Y, ZHANG Y, *et al.* Independent and combined effects of biochar and microbial agents on physicochemical parameters and microbial community succession during food waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 366: 128023.
- [58] GUO H, GU J, WANG X, *et al.* Microbial driven reduction of N_2O and NH_3 emissions during composting: effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 121292.
- [59] CHAN M T, SELVAM A, WONG J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 838.
- [60] WANG Q, AWASTHI M K, REN X, *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.
- [61] 陆晓林, 朱为静, 王经邦, 等. 超高温堆肥促进氮素减损的微生物机制研究进展[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(7): 2805.
- LU Xiaolin, ZHU Weijing, WANG Jingbang, *et al.* Progress in the microbial mechanism for the promotion of nitrogen loss reduction by hyperthermophilic composting [J]. *Microbiology China*, 2022, 49(7): 2805.
- [62] MEI J, LI B, SU L, *et al.* Effects of potassium persulfate on nitrogen loss and microbial community during cow manure and corn straw composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127919.
- [63] HE Y, ZHANG Y, HUANG X, *et al.* Deciphering the internal driving mechanism of microbial community for carbon conversion and nitrogen fixation during food waste composting with multifunctional microbial inoculation [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 360: 127623.
- [64] CHEN Z, WU Y, WEN Q, *et al.* Insight into the effects of sulfamethoxazole and norfloxacin on nitrogen transformation functional genes during swine manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122463.
- [65] HE X, YIN H, FANG C, *et al.* Metagenomic and q-PCR analysis reveals the effect of powder bamboo biochar on nitrous oxide and ammonia emissions during aerobic composting [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 323: 124567.
- [66] 成庆利, 张龙龙, 王大伟. 污泥-麦秸秆混合物料好氧堆肥中磷酸缓冲液强化保氮效果及机理[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(10): 1225.
- CHENG Qingli, ZHANG Longlong, WANG Dawei. Effect and mechanisms of strengthening nitrogen preservation by phosphate buffer during the aerobic composting of sewage sludge and straw mixture [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(10): 1225.