

好氧堆肥氮转化过程研究

万 亿, 马腾龙

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年12月11日; 录用日期: 2025年1月6日; 发布日期: 2025年1月16日

摘 要

好氧堆肥技术是有机固废资源化处理的关键技术, 而堆肥产物氮素含量是衡量产物品质的标准, 为了了解堆肥过程中氮素的转化方式, 本文概括了好氧堆肥的基本过程, 总结了好氧堆肥过程中氮素转化主要的生化反应, 探究氮素转化过程中参与的主要微生物与功能基因, 系统地分析了影响氮素转化的主要影响因素。研究主要结论有: 好氧堆肥过程中发生的氮素反应主要有氨化反应, 氨的亚硝化及硝化反应, 反硝化反应, 氨的同化反应和微生物固氮作用; 参与氮素转化的微生物主要包括 β -变形菌、 γ -变形菌、亚硝化单胞菌属、亚硝化螺菌属、*Pusillimonas*、芽孢杆菌属、施氏假单胞菌、藤黄单胞菌属、粪产碱杆菌、脱亚硫酸菌属、红球菌属、卡斯特兰尼氏菌属、蛭弧菌属、温双歧菌属、优杆菌属和毛螺菌科; 影响堆肥过程氮素转化效率的影响因素主要包括原料C/N、水分含量、温度、pH以及氧气供应。

关键词

好氧堆肥, 氮素转化, 微生物, 功能基因

Study on the Nitrogen Conversion Process of Aerobic Composting

Yi Wan, Tenglong Ma

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Dec. 11th, 2024; accepted: Jan. 6th, 2025; published: Jan. 16th, 2025

Abstract

Aerobic composting technology is the key technology of organic solid waste resource treatment, and the nitrogen content of compost products is an important criterion to measure the quality of the product, in order to understand the transformation mode of nitrogen in the composting process, this paper summarizes the basic process of aerobic composting, summarizes the main biochemical reactions of nitrogen conversion in the process of aerobic composting, explores the main micro-

organisms and functional genes involved in the nitrogen conversion process, and systematically analyzes the main influencing factors of nitrogen conversion. The main conclusions of the study are as follows: the nitrogen reactions in the process of aerobic composting mainly include ammoniation reaction, ammonia nitrosation and nitrification reaction, denitrification reaction, ammonia assimilation reaction and microbial nitrogen fixation. Microorganisms involved in nitrogen transformation include *β-Proteobacteria*, *γ-Proteobacteria*, *Nitrosomonas*, *Nitrospirona*, *Pusillimonas*, *Bacillus*, *Pseudomonas stutzeri*, *Pseudomonas stutzeri*, *Luteimonas*, *Alcaligenes faecalis*, *Desulfitobacterium*, *Rhodococcus*, *Castellaniella*, *Bdellovibrio*, *Thermobifida*, *Eubacterium* and *Lachnospiraceae*. The influencing factors of nitrogen conversion efficiency in the composting process mainly include raw material C/N, moisture content, temperature, pH and oxygen supply.

Keywords

Aerobic Composting, Nitrogen Conversion, Microbe, Functional Genes

Copyright © 2025 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/>



Open Access

1. 引言

好氧堆肥技术是一种利用好氧微生物降解有机物质的生物化学过程,能够高效地处理大量的有机固体废弃物,将其转化为可供利用的产物,降低废弃物对大气、土壤以及水环境的风险。通过堆肥过程中一系列的生物化学反应,有机固体废弃物中的可溶性小分子有机物质被各种微生物吸收利用,而不溶性大分子有机物则被胞外酶分解,最终转化为新的细胞物质和无机物,从而实现有机物的稳定化和无害化[1]。堆肥后的腐熟产物可以作为农业有机肥料,能够为作物提供必需的营养元素,优化土壤的生物化学特性,增加土壤中的有机物含量,并提升土壤中生物的活性,可以有效地增加作物的产出量,确保作物能够持续稳定地高产。好氧堆肥技术通过高温(60℃以上)能有效杀死病原菌及杂草种子,减少废弃物对环境的污染。好氧堆肥技术通过对固体废弃物无害化和资源化处理,既可防止其污染环境,同时又可以促进固体废弃物的回收循环利用,符合绿色发展理念,是极具发展潜力的固废处置技术[2]。

氮素是农作物重要的营养来源之一,堆肥中的氮素含量是评判堆肥品质优劣的一个重要标准[3]。通过深入分析好氧堆肥过程中氮素的转化过程,我们可以掌握氮素转化的关键生化途径。这样,通过人为的技术干预,比如调整堆肥条件、添加微生物菌剂等手段,可以有效地提高堆肥中氮素的保留率,使其更多地转化为农作物可以直接吸收利用的氮素形式,从而提升堆肥质量。农业生产中不合理的氮肥施用会导致环境污染和食品安全问题,利用好氧堆肥生产有机肥部分替代化学氮肥,在农业生产中不仅能节能环保、增产增效,还能够减少化学氮肥的使用,对环境保护和农业可持续发展具有重要作用[4]。好氧堆肥过程中的氮素转化还涉及微生物和功能基因的相互作用,研究这一过程有助于深入理解氮转化过程中微生物的参与机制,为创建人工高效生物固氮体系及其在农业中的应用提供理论基础和技术支持。

本文旨在系统综述好氧堆肥的基本过程、氮素转化以及氮转化过程的影响因素。

2. 好氧堆肥的基本过程

好氧堆肥的过程按温度要求可以分为四个阶段:升温阶段、高温阶段、降温阶段和腐熟阶段[5]。在每个阶段中,参与氮素转化的微生物活动和影响氮素转化的影响因素各不相同。

2.1. 升温阶段

在堆肥的初始阶段，堆肥原料经预处理(风干、破碎等)后被投入到堆体中，堆体温度从常温升至 45℃ [6]。此时，微生物(细菌、真菌、古菌等)开始分解堆肥原料中可溶解的有机物，同时产生热量，在这个过程中，嗜温微生物快速增长，加速了有机物的分解。这一阶段，氮的主要形式是蛋白质、氨基酸等有机氮化合物[7]。

2.2. 高温阶段

随着有机质的不断降解以及热量的大量释放，堆体快速升温超过 50℃，高温抑制了嗜温微生物的生长和活动，使其大量休眠或死亡，同时，嗜热微生物迅速繁殖并成为优势微生物种，导致纤维素、半纤维素、蛋白质等物质快速降解[8]。当堆体温度升高到 70℃ 以上时，许多微生物因高温而大量死亡，导致有机物的分解过程暂停，堆体温度开始下降。同时，在高温条件下，许多有机氮化合物会被微生物降解为氨(NH₃)和铵离子(NH₄⁺)，这一过程被称为氮的矿化作用[9]。

2.3. 降温阶段

随着温度的降低，堆肥进入较为成熟的阶段，嗜温微生物重新激活，主导微生物为放线菌、真菌等，微生物开始分解难以分解的大分子物质，其活性随之降低，产物营养物质含量稳步上升，水分含量逐渐减少，堆体逐步腐熟化。这一阶段，氮的同化和再矿化为主导作用，使得堆肥中氨和铵的浓度降低，形成有机氮等更为稳定的氮化合物[10]。

2.4. 腐熟阶段

在腐熟阶段，堆肥中的有机物质逐渐降解，成为与土壤相容的有机肥料。此阶段的氮元素主要以有机形式存在，能够缓慢释放，供植物吸收[11]。

3. 氮的转化过程

3.1. 堆肥过程中主要氮素反应

好氧堆肥过程中，氮素的转化时刻发生[12]，在堆肥过程中，微生物通过一系列氧化还原反应，对堆体内的有机氮和氨氮进行转化。这些反应主要包括氨化反应，将有机氮转化为氨氮；亚硝化和硝化反应，将氨氮进一步氧化为亚硝酸盐和硝酸盐；反硝化反应，将硝酸盐还原回气态氮；氮的同化反应，即微生物将氨氮转化为自身细胞成分；以及微生物固氮作用，将大气中的氮气转化为氨氮。这些过程在堆肥的不同阶段同时发生，共同促进堆肥的腐熟化。

在堆肥过程中，有机氮通常被微生物分解，经历氨化作用转化为氨。这一过程普遍存在于多种微生物中，它们通过分解有机物来获取能量，同时满足自身生长和繁殖所需的碳和氮。对于蛋白质氨化来说，氨化作用是微生物在酶的催化作用下将蛋白质水解为较小分子量的氨基酸及多肽等[13]，接下来在酶的作用下发生脱氨基作用，脱除下来的氨基转化为铵根[14]。而氨化反应产生的氨氮在高温和碱性条件下容易转化为氨气(NH₃)逸出体系，导致氮素损失；这种损失不仅降低了堆肥产品的农用价值，还可能对环境造成污染。为了减少氮素的散失，可以通过调节 C/N 比、添加化学添加剂、微生物菌剂等方法控制氨气的挥发。同时，会发生铵态氮向硝态氮转化的硝化反应。硝化反应的两个步骤是亚硝化与硝化[15]：亚硝化功能的微生物通过氧化反应将 NH₄⁺ 转化为 NO₂⁻，硝化微生物将 NO₂⁻ 转化为 NO₃⁻，两步反应均依赖于微生物及酶的作用，在适宜的条件下才会大量生成 NO₂⁻ 与 NO₃⁻ [16]，硝化作用产生的 NO₃⁻ 易于随水流失，导致氮素损失，影响堆肥品质，通过添加硝化抑制剂，优化堆肥工艺等手段可以有效减少 N₂O

和 NH_3 排放。

而堆肥过程中发生的反硝化反应一般是反硝化细菌将 NO_3^- 转化为 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 NO 、 NO_2 、 N_2 等[17], 而同化硝酸盐还原菌则会将形成的 NH_4^+ 同化为有机氮。此时, 可进行硝化反应将 NO_2^- 氧化为 NO_3^- 。此外, 氨的同化与有机氮氨化, 氨的硝化与反硝化互相依存[18]。各种反应在任一个自然环境中均不会孤立发生, 几种作用通常同时发生, 而在某一适宜的环境下将会有一种或几种氮转化途径占优势[19]。

氨的硝化反应可将易挥发的氨转化为较稳定的硝态氮, 此过程中氮的损失较少, 利于堆肥氮素控制; 而最有利于氮素控制的是微生物氨同化作用[20], 若将大量的氨转化为稳定的有机氮储存于堆体内, 在有机肥施用过程中, 有机氮在微生物的作用下缓慢释放出氮素, 将能提供稳定长效的氮素释放, 为植物生长提供长效的氮营养[21]。

3.2. 堆肥各阶段氮转化路径

在堆肥的升温阶段, 堆体中的非水溶性有机氮通过微生物分泌的水解酶的作用被转化为铵态氮和水溶性有机氮。在堆肥的高温阶段, 堆料中积累的铵态氮在高温和高 pH 值的条件下, 会通过一系列微生物作用下的转化过程, 包括氨化反应、不完全硝化作用以及挥发作用, 导致氮素以氨气和氧化亚氮的形式散失; 同时, 这一阶段堆体中的氮素转化主要是在氨氧化细菌、古菌和硝化细菌的作用下, 将铵态氮转化为硝态氮和水溶性氮。在堆肥的嗜热阶段, 堆体中的含氮化合物在微生物的作用下参与梅拉德反应, 形成非水溶性的氮。而在堆肥的降温和腐熟阶段, 堆料中的铵态氮和硝态氮通过硝化作用以及固氮和固持作用转化为硝态氮和水溶性有机氮。

3.3. 堆肥氮转化过程功能基因及微生物参与机制

堆肥过程中含氮化合物的排放与有机物的微生物降解密切相关[22]。生物固氮(BNF)是指某些特定微生物通过其固氮酶的作用, 将大气中的氮气(N_2)转化为氨(NH_3)的过程。氨(NH_3)或铵(NH_4^+)向羟胺(NH_2OH)的转化过程主要是由氨氧化细菌(AOB)或古菌(AOA)通过其代谢活动中产生的氨单加氧酶(AMO, 由 *amoA* 基因编码)所催化的。亚硝酸盐(NO_2^-)向硝酸盐(NO_3^-)的转化则是由亚硝酸盐氧化细菌、光能利用菌(不产生氧的菌属)以及厌氧氨氧化细菌通过其代谢活动中的亚硝酸盐氧化还原酶(NXR)来完成的。大多数氨化细菌属于 β -变形菌和 γ -变形菌两类, 这些细菌能够将 NH_4^+ 氧化成 NO_2^- , 属于化能自养生物。氧化亚氮(N_2O)向氮气(N_2)的转化则受到氧化亚氮还原酶(NOS, 由 *nosZ* 基因编码)的催化, 在多种细菌(如变形菌门、拟杆菌门和绿菌门)和古菌(如泉古菌门和嗜盐菌门)中均有发现。

目前对于传统堆肥过程中氮转化微生物的种类已探明, 参与硝化反应的典型硝化细菌主要为亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)和亚硝化螺菌属(*Nitrosospira*); 而参与反硝化反应的微生物种类较多, 其中 *Pseudomonas*、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、施氏假单胞菌(*Pseudomonas stutzeri*)、藤黄单胞菌属(*Luteimonas*)、粪产碱杆菌(*Alcaligenes faecalis*)、脱亚硫酸菌属(*Desulfitobacterium*)、红球菌属(*Rhodococcus*)、卡斯特兰尼氏菌属(*Castellaniella*)及蛭弧菌属(*Bdellovibrio*)为主要的反硝化细菌; 参与微生物固氮作用的主要包括温双歧菌属(*Thermobifida*)、优杆菌属(*Eubacterium*)和毛螺菌科(*Lachnospiraceae*)。在堆体嗜热阶段的优势菌群大多分布于高温放线菌科(*Thermoactinomycetaceae*)、土壤芽孢杆菌属(*Solibacillus*)和动球菌科(*Unclassified planococcaceae*), 它们主导着堆体有机物质的水解代谢[23]。玉米秸秆发酵过程中链霉菌和芽孢杆菌能够加速有机物的降解, 增加堆肥产品的腐殖质含量。真菌在粪便、秸秆好氧堆肥过程中对木质纤维素的分解起着至关重要的作用。现有研究对参与氮素转化过程的微生物种类已有较为丰富的研究基础, 在此基础上, 应继续深入研究各微生物的生物活性以期达到调控微生物类群提高堆肥品质的目的。

同时, 研究发现氮含量的变化与功能基因的表达密切相关, 也影响微生物群落演替和堆肥产品的质

量。高温堆肥中，高度富集的 3 种功能基因分别是；NADH 脱氢酶 - 泛醌 - 黄素蛋白、细胞色素 c 氧化酶 *cbb3* 型亚基和 *ndhI* [7]。而常温堆肥中，高度富集的 3 种功能基因分别是 *nuoH*、*nuoM* 和 *nuoN* [24]。研究发现，由 *amoA* 基因表达引起的好氧氨氧化是硝化过程的第一步[25]。氨化过程的关键酶是氨基辅酶 M 还原酶 MCR。*nirK* 和 *nirS* 基因可以通过编码亚硝酸盐还原酶将 NO_2^- 转化为 NO [26]。*nosZ* 基因通过编码氧化亚氮还原酶将 N_2O 还原为无害的 N_2 [27]。尽管已有研究对氮素转化部分过程中功能基因进行了研究，但对堆肥整体过程中功能基因的参与研究还不够全面，且现有研究还未在实际生产中进行应用，仍处于基础研究阶段，后续应强化基因检测技术，加大研究广度与深度，以期达到研究成果应用到实处的目的。基于以上研究绘制了好氧堆肥氮素转化过程及参与氮素转化的微生物与功能基因图(图 1)。

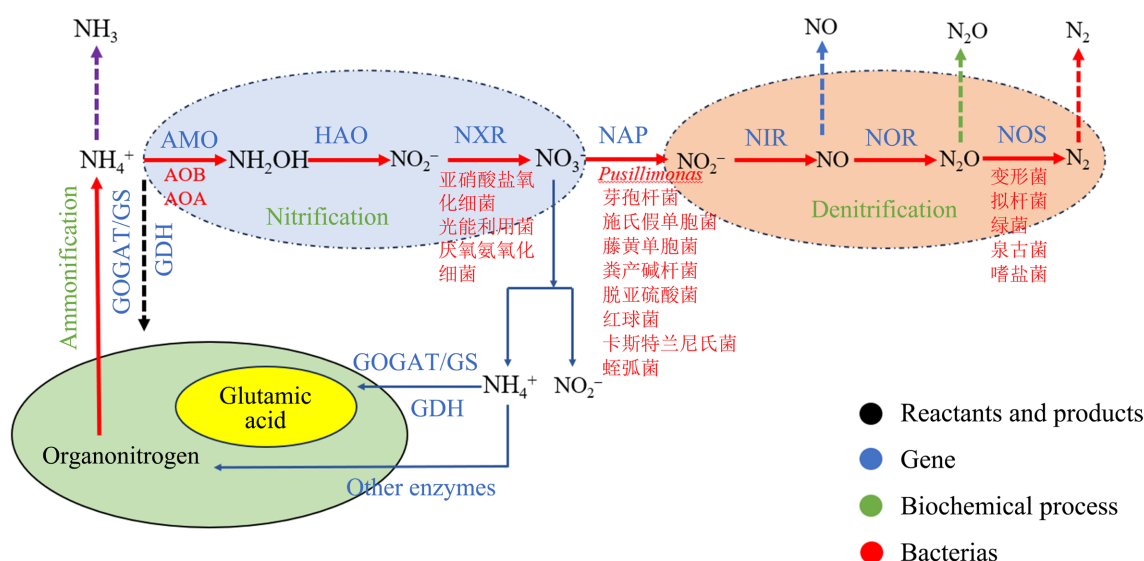


Figure 1. Nitrogen conversion process of aerobic composting and the microorganisms and functional genes involved in nitrogen conversion

图 1. 好氧堆肥氮素转化过程及参与氮素转化的微生物与功能基因

4. 氮转化过程的影响因素

氮的转化不仅与微生物活性密切相关,同时也与堆肥原料的性质、堆肥条件等因素相互作用。

4.1. 堆肥原料的 C/N 比

堆肥原料中的碳氮比(C/N 比)是决定氮素转化效率的关键因素。微生物生长需要碳和氮两种基本元素,其中碳源为微生物提供能量,而氮源则是构成核酸、氨基酸、酶和蛋白质等生物大分子的关键成分。普遍认为,C/N 比保持在 25 到 30 之间是最理想的,这样的比例能够促进微生物活跃生长,进而实现氮素的最佳转化。而当 C/N 比过高时,微生物将消耗更多的氮来分解碳源,导致氮的利用效率下降;相反,当 C/N 比过低时,则容易造成氮的挥发损失[28]。根据现有报道,初始 C/N 比为 25~30 是好氧发酵过程的合理区间[29],其中也有例外,如郭荣等人的研究表明,在猪粪和玉米秸秆混合好氧发酵过程中应用相对较低的 C/N 比(约 15~20)最终可以达到更好的腐熟效果[30]。

4.2. 水分含量

好氧发酵原料的水分含量为微生物代谢所需的营养物质提供运输介质。较低的水分含量会导致堆肥过程中微生物脱水[31], 而较高的水分含量可能导致堆中由于水涝而出现厌氧条件, 使微生物活性降低。

研究表明，对于畜禽粪便发酵，初始最佳水分含量应在 60%至 70%之间[32]。初始水分含量还可以通过影响微生物的氧气利用来影响有机物降解。Kim 等人研究发现在牛粪发酵过程中，当初始水分含量设置为 57%时，氧气消耗率会更高[33]。

4.3. 温度

在高温堆肥条件下，无机氮中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 会受热蒸发。而在 35℃的中温条件下，粪便中原有无机氮和有机氮分解、转化，气态 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放总量大且历时较长[34]。高温环境中，氨化菌的活性可能会受到抑制，这会减少氮的氨化作用，有助于氮素在堆体中的保持。而 35℃环境中，氨化菌的活性较高，这可能会导致更多的总氮被转化为氨态氮。在高温环境中，硝化细菌和反硝化细菌的活性同样会受到影响，这可能会改变堆肥中硝态氮和铵态氮的含量。

4.4. pH 值

堆体的 pH 值对氨气释放和氮素转化有显著影响。在堆肥初期，由于微生物分解有机质过程中产生大量铵氮，而硝化细菌活性受温度和 pH 的影响偏低，无法及时将铵氮转化为硝氮，从而使堆体中 pH 不断升高，进而加速了氨气的挥发速率[35]。通过合理调控堆肥初始 pH 值为 6.5 至 7.0 的适宜范围，可以为微生物提供一个良好的生存环境，从而促进硝化细菌的硝化作用，有效减少氨气的挥发损失，保持氮素含量。高 pH 和高温共同作用使得氨气不溶于水，会导致氮素以氨气形式释放；pH 过低，微生物降解有机质缓慢，堆肥时间延长[36]。

4.5. 氧气供应

好氧堆肥过程要求充足的氧气供应，氧气不仅支持有氧微生物的生长，还能促进氮的同化和矿化。同时，氧气的缺乏会导致厌氧条件下的脱氮现象，加速氮的损失。堆体最佳氧含量在 5%~15%之间，氧含量过低容易引起厌氧发酵，氧含量过高会导致热量损失过大，降低堆体温度，从而难以杀灭杂草种子、病原菌等有害物质。

5. 结论

1) 好氧堆肥过程中发生的氮素反应主要有氨化反应，氨的亚硝化及硝化反应，反硝化反应，氨的同化反应和微生物固氮作用。其中，升温阶段主要的氮素反应为有机氮的矿化分解和氨化作用；升温阶段主要的氮素反应为不完全硝化作用和氨化反应；降温阶段的主要氮素反应包括硝化反应和固氮作用。

2) 参与氨化反应的主要细菌属于 β -变形菌和 γ -变形菌两类，此外，MCR 基因通过编码氨基辅酶 M 还原酶参与氨化过程；参与硝化反应的典型细菌为亚硝化单胞菌属和亚硝化螺菌属，而 amoA 基因表达引起的好氧氨氧化也是硝化反应的重要步骤；参与反硝化反应的主要细菌为 *Pusillimonas*、芽孢杆菌属、施氏假单胞菌、藤黄单胞菌属、粪产碱杆菌、脱亚硫酸菌属、红球菌属、卡斯特兰尼氏菌属及蛭弧菌属，而 nirK 和 nirS 基因通过编码亚硝酸盐还原酶，nosZ 基因通过编码氧化亚氮还原酶参与反硝化过程；而参与固氮反应的细菌包括温双歧菌属、优杆菌属和毛螺菌科。

3) 影响堆肥过程氮素转化效率的影响因素主要包括原料 C/N、水分含量、温度、pH 以及氧气供应。

参考文献

- [1] 曹铭芮, 刘围, 吴畏, 等. 厨余垃圾好氧堆肥技术研究进展[J]. 生物加工过程, 2024, 22(4): 395-402, 411.
- [2] 焦敏娜, 任秀娜, 何熠锋, 等. 畜禽粪污清洁堆肥——机遇与挑战[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2361-2371.

- [3] 范如芹, 罗佳, 严少华, 等. 农作物秸秆基质化利用技术研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 410-416.
- [4] 燕永亮, 田长富, 杨建国, 等. 人工高效生物固氮体系创建及其农业应用[J]. 生命科学, 2021, 33(12): 1532-1543.
- [5] Fourti, O. (2013) The Maturity Tests during the Composting of Municipal Solid Wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, **72**, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.001>
- [6] 张嘉伟, 王蓓, 王东升, 等. 不同原料配比对尾菜气流膜堆肥效率和品质的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(12): 1613-1620.
- [7] 薛文涛, 孙昊, 孙钦平, 张玲, 吴荣, 田野, 陈益山, 邹国元, 刘善江. 有机酸添加剂对低碳氮比条件堆肥氮素损失控制效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 1086-1096.
- [8] 马闯, 扈斌, 刘福勇, 张宏忠, 魏明宝, 赵继红. 有机废弃物好氧堆肥过程中微生物及酶活性变化状况综述[J]. 环境工程, 2019, 37(9): 159-164, 187.
- [9] Liu, N., Liu, Z., Wang, K., Zhao, J., Fang, J., Liu, G., et al. (2024) Comparison Analysis of Microbial Agent and Different Compost Material on Microbial Community and Nitrogen Transformation Genes Dynamic Changes during Pig Manure Compost. *Bioresource Technology*, **395**, Article ID: 130359. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130359>
- [10] 段曼莉, 徐洪波, 覃振伦, 等. 磁化水复合保氮剂对堆肥过程中氮素损失和微生物群落的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 202-212.
- [11] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 郭瑞英. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2013, 21(5): 526-535.
- [12] Liang, Y., Leonard, J.J., Feddes, J.J. and McGill, W.B. (2004) A Simulation Model of Ammonia Volatilization in Composting. *Transactions of the ASAE*, **47**, 1667-1680. <https://doi.org/10.13031/2013.17609>
- [13] 李丹阳, 李恕艳, 李国学, 等. 添加剂对猪粪秸秆堆肥的氮素损失控制效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 260-267.
- [14] 李云蓓, 李伟光. 不同类型的外加碳源对污泥堆肥过程氮素损失的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 104-109.
- [15] Meng, L., Li, W., Zhang, S., Wu, C., Jiang, W. and Sha, C. (2016) Effect of Different Extra Carbon Sources on Nitrogen Loss Control and the Change of Bacterial Populations in Sewage Sludge Composting. *Ecological Engineering*, **94**, 238-243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.013>
- [16] Dalmaso, A., Fontanella, E., Piatti, P., Civera, T., Rosati, S. and Bottero, M.T. (2004) A Multiplex PCR Assay for the Identification of Animal Species in Feedstuffs. *Molecular and Cellular Probes*, **18**, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.mcp.2003.09.006>
- [17] Jiang, J., Liu, X., Huang, Y. and Huang, H. (2015) Inoculation with Nitrogen Turnover Bacterial Agent Appropriately Increasing Nitrogen and Promoting Maturity in Pig Manure Composting. *Waste Management*, **39**, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.025>
- [18] Cegarra, J., Albuquerque, J.A., González, J., Tortosa, G. and Chaw, D. (2006) Effects of the Forced Ventilation on Composting of a Solid Olive-Mill By-Product ("Alperujo") Managed by Mechanical Turning. *Waste Management*, **26**, 1377-1383. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.11.021>
- [19] Ren, G., Xu, X., Qu, J., Zhu, L. and Wang, T. (2016) Evaluation of Microbial Population Dynamics in the Co-Composting of Cow Manure and Rice Straw Using High Throughput Sequencing Analysis. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **32**, Article No. 101. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2059-7>
- [20] Ozsvath, D.L. (2008) Fluoride and Environmental Health: A Review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **8**, 59-79. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9136-9>
- [21] 曹丽娜, 王岩, 王跃, 等. 添加麦秸对鸡粪堆肥过程中氮素减排及细菌群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2560-2569.
- [22] Ye, S., Zeng, G., Wu, H., Liang, J., Zhang, C., Dai, J., et al. (2019) The Effects of Activated Biochar Addition on Remediation Efficiency of Co-Composting with Contaminated Wetland Soil. *Resources, Conservation and Recycling*, **140**, 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.004>
- [23] Zhang, L., Ma, H., Zhang, H., Xun, L., Chen, G. and Wang, L. (2015) *Thermomyces lanuginosus* Is the Dominant Fungus in Maize Straw Composts. *Bioresource Technology*, **197**, 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.089>
- [24] Lam, P., Jensen, M.M., Lavik, G., McGinnis, D.F., Müller, B., Schubert, C.J., et al. (2007) Linking Crenarchaeal and Bacterial Nitrification to Anammox in the Black Sea. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 7104-7109. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611081104>
- [25] 张明霞, 李安章, 陈猛, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌脱氮相关酶系及其编码基因的研究进展[J]. 生物技术进展, 2020, 10(1): 40-45.

- [26] Li, W., Wu, C., Wang, K., Meng, L. and Lv, L. (2017) Nitrogen Loss Reduction by Adding Sucrose and Beet Pulp in Sewage Sludge Composting. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **124**, 297-303.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.03.013>
- [27] De Gannes, V., Eudoxie, G. and Hickey, W.J. (2013) Insights into Fungal Communities in Composts Revealed by 454-Pyrosequencing: Implications for Human Health and Safety. *Frontiers in Microbiology*, **4**, Article 164.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00164>
- [28] 马若男, 李丹阳, 亓传仁, 等. 碳氮比对鸡粪堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 194-202.
- [29] Goyal, S., Dhull, S. and Kapoor, K. (2005) Chemical and Biological Changes during Composting of Different Organic Wastes and Assessment of Compost Maturity. *Bioresource Technology*, **96**, 1584-1591.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.012>
- [30] Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., et al. (2012) Effect of Aeration Rate, C/N Ratio and Moisture Content on the Stability and Maturity of Compost. *Bioresource Technology*, **112**, 171-178.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.099>
- [31] Lin, C., Cheruiyot, N.K., Bui, X. and Ngo, H.H. (2022) Composting and Its Application in Bioremediation of Organic Contaminants. *Bioengineered*, **13**, 1073-1089. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2017624>
- [32] Zang, B., Li, S., Michel, F., Li, G., Luo, Y., Zhang, D., et al. (2016) Effects of Mix Ratio, Moisture Content and Aeration Rate on Sulfur Odor Emissions during Pig Manure Composting. *Waste Management*, **56**, 498-505.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.026>
- [33] Kim, E., Lee, D., Won, S. and Ahn, H. (2015) Evaluation of Optimum Moisture Content for Composting of Beef Manure and Bedding Material Mixtures Using Oxygen Uptake Measurement. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, **29**, 753-758. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0875>
- [34] Shi, D., Zhang, Z., Li, G., et al. (2010) Effect of Stacking Height on Maturity during Composting of Municipal Solid Waste under 0-15mm Sieved. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **26**, 324-329.
- [35] 秦维, 蒋心茹, 刘明刚, 等. 辅料配比及通风速率对污泥气流膜堆肥过程氮素迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1357-1367.
- [36] 常远, 李若琪, 李珺, 等. 好氧堆肥腐殖酸形成机制及促腐调控技术概述[J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5291-5302.