

生物炭对堆肥温室气体和NH₃排放的影响研究进展

李雪龙¹, 刘雪霄¹, 赵淑英², 赵胜楠¹, 崔彦如^{1*}, 刘海燕^{1*}

(1. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心), 长春 130033; 2. 梨树县梨树镇综合服务中心, 吉林 梨树 136500)

摘要:堆肥过程中温室气体和氨气的排放已受到广泛关注。本文系统总结了废弃物堆肥过程中温室气体和氨气的排放机制,从堆肥理化性质(碳氮比、温度、含水率、pH)和调理剂(生物炭)两方面介绍温室气体和氨气的减排机制。研究表明,堆肥过程涉及多种理化参数的相互影响与相互作用,为实现高效堆肥并减少环境污染,需要对这些理化参数进行协同考虑和整体优化,在优化堆肥理化参数的基础上,添加生物炭能够进一步控制堆肥过程中的氮素损失,减少温室气体和氨气的排放,有助于堆肥产品的实际应用及堆肥技术的推广应用。

关键词:堆肥;生物炭;温室气体;氨气

中图分类号:S141.4;X713

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2026)04-0104-06

Research Progress on the Effects of Biochar on Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Composting

LI Xuelong¹, LIU Xuexiao¹, ZHAO Shuying², ZHAO Shengnan¹, CUI Yanru^{1*}, LIU Haiyan^{1*}

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research Center of China), Changchun 130033; 2. Comprehensive Service Center, Lishu 136500, China)

Abstract: The emissions of greenhouse gases and ammonia during the composting process have received widespread attention. This paper systematically summarizes the emission mechanisms of greenhouse gases and ammonia during the composting of organic wastes, and introduces the emission reduction mechanisms from two aspects: the physicochemical properties of compost(carbon-to-nitrogen ratio, temperature, moisture content, and pH) and the application of amendments(biochar). Previous studies have demonstrated that the composting process involves complex interactions among multiple physicochemical parameters. To achieve efficient composting and reduce environmental pollution, these parameters need to be considered in a coordinated way and optimized as a whole. On the basis of optimizing the physicochemical parameters of composting, the addition of biochar can further control nitrogen loss, reduce greenhouse gas and ammonia emissions, and promote the practical utilization of compost products as well as the popularization and application of composting technology.

Key words: Composting; Biochar; Greenhouse gases; Ammonia

生物炭是指生物质在限氧条件下高温热解或裂解后形成的产物,广泛应用于土壤改良、农作物栽培、环境保护等领域^[1],在缓解全球气候变暖、应对全球气候变化方面也受到了广泛关注^[2]。全球气候变暖已成为影响人类健康和社会经济发

展的严峻问题,生物炭作为一种“碳汇”,具有庞大的“固碳”空间,能够有效减少温室气体排放,缓解温室效应^[3]。堆肥是实现农林废弃物资源化利用的有效方式之一,堆肥过程中温室气体和(NH₃)的排放问题受到广泛关注。生物炭通过改善堆体环境来减缓温室气体的排放,其固有的表面结构、元素含量、比表面积等独特的理化性质使其在温室气体减排和全球生物化学循环等领域产生不同的环境效应。在堆肥的各个阶段,生物炭表现出一定的性能差异。在堆制阶段,生物炭的添加量及原料来源备受关注。研究表明,生物炭对加速好氧堆肥具有积极作用,20%的生物炭添加量使CH₄的排放峰值降低54.9%^[4]。生物炭添

收稿日期:2025-09-03

基金项目:吉林省现代农业产业技术体系生态环能舒兰综合试验站项目(JLARS-2025-150305);吉林省农业科技创新工程项目(XGC2025SJ008)

作者简介:李雪龙(1994-),男,助理研究员,硕士,从事农村废弃物处理与利用工作。

通信作者:崔彦如,E-mail: nkycyr@126.com

刘海燕,E-mail: liuhai1276@163.com

加量 10% 以上可以提高堆肥腐殖酸和富里酸的含量,进而促进堆肥进程^[5]。本文系统综述生物炭对堆肥过程温室气体和 NH₃ 的减排分析,总结生物炭对堆肥过程气体排放的影响因素,为进一步阐明生物炭影响堆肥温室气体和 NH₃ 减排机理提供理论参考,也为堆肥产品的实际应用提出思路和建议。

1 堆肥过程中温室气体和 NH₃ 的排放

畜禽粪便堆肥过程中温室气体和 NH₃ 的排放会给大气环境带来温室效应,同时也会降低好氧堆肥技术及堆肥产品的经济效益^[5]。堆肥过程排放的温室气体主要包括 CH₄、N₂O 和 CO₂,减少温室气体的排放能够有效减缓全球变暖进程。

1.1 甲烷(CH₄)

CH₄ 是一种强效温室气体,其全球增温潜势大约是 CO₂ 的 25 倍(百年时间尺度上)^[6]。堆肥前期,堆体中易分解的有机物含量较高,微生物得以快速地生长,消耗大量的氧气,使堆体内部形成厌氧环境^[7],在厌氧条件下,产甲烷菌得以快速生长繁殖并产生 CH₄^[8]。堆肥材料中的有机物,特别是易降解的碳水化合物,是甲烷产生的主要基质。有机物含量越高,甲烷产生的潜力越大。厌氧条件和丰富的有机质环境有利于甲烷菌的生长繁殖,因此可以通过控制氧气含量来降低产甲烷菌的活动,进而降低甲烷排放速率^[9]。控制堆肥过程中的 CH₄ 排放不仅有助于减少温室气体排放,还会减少堆肥的碳素损失^[10],因此,控制堆肥过程的 CH₄ 排放对堆肥碳氮转化和提升堆肥品质具有重要影响。

1.2 氧化亚氮(N₂O)

N₂O 也是一种强效温室气体,其在百年尺度上的增温潜势是 CO₂ 的 296 倍,N₂O 排放到环境中会进入大气平流层,产生对臭氧层具有破坏作用的氮氧化物^[11],进一步加剧全球气候变化。堆肥过程中 N₂O 的产生受硝化作用和反硝化作用的共同影响,反硝化作用对 N₂O 排放的影响更大^[12]。在有氧条件下,NH₃ 或铵态氮通过硝化作用转化为硝酸盐和亚硝酸盐的过程中会产生 N₂O^[13]。在堆肥的缺氧或微氧环境中,硝酸盐和亚硝酸盐可通过反硝化作用被还原为氮气过程中会产生 N₂O^[14]。在亚硝化过程中,氨气或铵态氮首先被氨氧化细菌氧化成亚硝酸盐,氨氧化细菌的代谢会产生 N₂O 作为副产物;在硝化过程中,亚硝酸盐随后被亚硝酸盐氧化细菌氧化成

硝酸盐,在亚硝酸盐积累或氧气供应不足的情况下,也会产生 N₂O。堆肥初期,由于有机物的快速分解,氨的浓度通常较高,这为硝化作用提供了充足底物。因此,通过控制氧气供应、pH 值和其他环境条件,可以减少硝化作用过程中 N₂O 的产生。在反硝化过程中,N₂O 是一个重要的中间产物。在缺氧条件下,硝酸盐还原菌将硝酸盐还原为亚硝酸盐,亚硝酸盐随后被还原为 N₂O,再进一步被还原为氮气。缺氧或微氧条件是反硝化作用发生的前提,因为硝酸盐还原菌在缺氧环境下较为活跃。除此之外,温度和 pH 值也会影响反硝化细菌的活性和代谢途径,进而影响反硝化作用的速率。堆肥过程 N₂O 的释放占初始氮损失的 0.2%~9.9%^[15],这种氮损失会直接影响堆肥产品的品质,因此可通过减少堆肥过程中的氮损失来提高堆肥质量并减少环境污染。

1.3 二氧化碳(CO₂)

CO₂ 是另一种主要温室气体。CO₂ 在大气中的生命周期相对较长,从几年到数百年不等,一旦排放到大气中,会在很长时间内持续对气候产生影响。自工业革命以来,由于人类活动的增加,大气中的 CO₂ 浓度显著上升。目前,CO₂ 的浓度已经超过 400 ppm(百万分率),远高于过去几十万年来的平均水平。堆肥过程中的 CO₂ 排放主要来自有机物的分解,一部分 CO₂ 直接从堆肥材料表面释放到大气中,另一部分 CO₂ 可能溶解在堆肥材料产生的水分,随后通过蒸发作用释放到大气中。虽然 CO₂ 的全球增温潜势低于 CH₄ 和 N₂O,但由于其在大气中的浓度远高于这两种气体,仍然是全球气候变化的主要驱动因素之一,对当前全球温室效应的贡献最大,因此减少 CO₂ 排放是应对气候变化的关键策略。

1.4 氨气(NH₃)

堆肥过程中 NH₃ 的产生受多种过程共同影响^[16],主要来源于有机物的分解过程,包括蛋白质的分解、尿素的分解等,含氮有机物的铵化过程也会产生 NH₃^[17]。NH₃ 的产生与堆肥体系的 pH 值密切相关。当堆体的 pH 值较高(偏碱性)时,铵根离子(NH₄⁺)更容易转化为 NH₃。因此控制堆肥的 pH 值是减少 NH₃ 排放的关键。温度升高会加速微生物的活动,从而加速氮的转化过程,包括 NH₃ 的生成。同时,若堆肥的碳氮比不当(氮含量相对较高),则容易产生较多 NH₃。适宜的碳氮比可以促进微生物的繁殖,减少氨的挥发。

2 堆肥过程中温室气体和 NH_3 排放的影响因素

2.1 碳氮比

碳氮比(C/N)是影响微生物活性的重要因素。适宜的C/N可以促进微生物的生长和代谢,从而加速有机物的分解。C/N比较低时,微生物活性较高,导致有机物的分解速度加快, NH_3 、 CO_2 和 N_2O 的排放量增加^[18]。在厌氧条件下,C/N比较低更容易产生 CH_4 。C/N较高时,微生物分解速率降低,氮素成为限制因素, NH_3 和 CO_2 的排放量会逐渐减少,但可能延长堆肥周期,影响堆肥产品的质量。因此,在堆肥过程中,需要根据堆肥原料和环境目标,调整合适的C/N,以优化温室气体和 NH_3 的控制。在堆肥中加入农作物秸秆、木屑、稻壳等含碳材料,可以调节堆肥体系的碳氮比,控制温室气体和 NH_3 的排放^[19-20]。通常认为,初始碳氮比介于20:1~30:1是较为理想的范围。随着碳氮比的增加, CO_2 的排放量显著增加,而 NH_3 的排放量则明显降低。在碳氮比为25、30、35的处理组中, CO_2 的平均排放量分别为5.47、9.32、19.19 g/(kg·d),而 NH_3 的平均排放量分别为680.03、442.69、193.54 mg/(kg·d),表明在园林废弃物好氧堆肥过程中,碳氮比是影响温室气体和 NH_3 排放的重要因素^[21]。在低碳氮比条件下,猪粪堆肥过程中温室气体和 NH_3 的排放特性有所不同,表明在处理猪粪等养殖场废弃物时,碳氮比的调整对控制温室气体和 NH_3 排放至关重要^[22]。堆肥过程中,不同微生物群落对碳氮比的需求不同,微生物会根据堆肥环境中的碳氮比调整其代谢途径,以适应不同的营养条件。微生物间的共生、竞争等作用,也会受到碳氮比的影响,进而影响堆肥过程。总之,碳和氮是堆肥过程中微生物生长发育的关键元素,通过影响微生物的代谢、生长和相互作用,进而影响堆肥质量和效率。因此,合理调控堆肥过程中的碳氮比,对优化堆肥过程具有重要意义。

2.2 温度

堆肥过程主要依赖微生物的代谢活动,温度在这个过程中具有至关重要的作用,温度的变化可以反映出微生物的活性水平,它是判断堆肥过程中微生物活性的一个重要指标,通常情况下,根据堆肥各阶段的温度特征,将堆肥分为升温期、高温期、降温期和腐熟期4个阶段^[23]。温度的变化会影响微生物群落的组成,在堆肥的各个阶段,不同微生物种群不断发生演替。在堆肥升温

期,硝化细菌的活性增强,导致硝化作用加强,产生 N_2O 作为副产物;随着温度升高,堆体内部的氧气供应不足,反硝化作用进一步增强,也会导致 N_2O 排放量增加。高温期嗜热微生物成为主导,有机质被快速高效分解,消耗堆肥体的氧气并释放大量的 CO_2 ,堆体内部由此形成厌氧环境,进而导致产甲烷菌活性增强,促进 CH_4 的排放^[24],高温期的持续时间越长, CH_4 排放量越大^[25]。在高温条件下,氨化作用进一步增强, NH_3 排放量达到峰值。高温还可以加速 NH_3 的挥发,尤其是在pH值较高的情况下。

2.3 含水率

堆肥过程中,微生物需要水分来进行生命活动和新陈代谢,初始含水率过低会减缓或抑制微生物的代谢活动,导致有机质降解不充分,延长堆肥过程。初始含水率过高则会导致堆体中的空气被水分挤出,导致堆肥体的孔隙率降低,减少氧气在堆肥中的流通,从而影响好氧微生物的生存。当堆肥体中的氧气供应不足时,逐渐形成厌氧环境,厌氧微生物的活动增加,产生 CH_4 。过高的含水率还会导致堆肥温度难以升高,影响高温阶段的持续时间和效果,进而影响 NH_3 挥发,造成氮素损失,降低肥效。根据堆肥材料的不同,适宜的初始含水率通常为50%~70%^[26],具体数值需要根据材料的吸水性和堆肥过程中的通风条件进行调整。驴粪堆肥研究表明,含水率对温室气体排放有显著影响,当堆肥体初始含水率设置为55%时, CH_4 排放量减少24%^[27]。肥物料含水率在60%~70%有助于减少 N_2O 的排放。

2.4 pH值

微生物的生长和代谢对pH值非常敏感,普遍最适宜微生物生长和繁殖的pH值范围在6.7~9.0^[28]。过酸或过碱的环境均会抑制微生物的活性,影响有机物的分解速度和堆肥的腐熟。在碱性条件下, NH_3 的排放量会增加,增加氮的损失。在酸性条件下,可能会促进 CH_4 的产生。

2.5 调理剂

通过合理选择和使用外源添加剂,可以有效控制堆肥过程中的氮素损失,减少温室气体和 NH_3 的排放^[29]。生物炭因具有独特理化性质,成为调控堆肥气体排放的常用材料。生物炭可通过物理吸附、化学作用、微生物调节等机制降低堆肥中的 NH_3 排放。

生物炭具有丰富的微孔、介孔等孔隙结构,这些孔隙提供了巨大的比表面积^[30],能够通过物理

吸附作用将堆肥中产生的NH₃吸附在其孔隙内部,从而减少NH₃的释放;生物炭表面的羟基、羧基等官能团对NH₃也具有吸附作用^[31]。生物炭通过调节堆肥水分、pH值、温度等环境因素强化NH₃的固定,也可以通过离子交换作用将NH₄⁺吸附,降低NH₄⁺向NH₃的转化效率。生物炭能够增强堆肥中硝化细菌的活性,促进NH₄⁺向NH₃的转化,减少NH₃的释放^[32]。生物炭对堆肥中CH₄排放的调控作用至关重要,而这一影响主要通过对产甲烷菌和甲烷氧化菌的作用来实现。堆肥体系中的厌氧环境为产甲烷菌创造适宜的生存条件,产甲烷菌将有机物质转化为CH₄,导致CH₄排放增加。生物炭丰富的孔隙系统可以有效改善堆肥体的通气性,极大地减少厌氧区的形成范围,抑制产甲烷菌的生长环境,进而降低了CH₄产生量。良好的通风和充足的氧气供应对于甲烷氧化菌的生长和代谢活动极为关键,生物炭改善堆体内部氧气环境,使得甲烷氧化菌的活性显著增强,从而更高效地将堆肥过程中产生的CH₄氧化分解。这种氧化作用不仅降低了CH₄向大气中的排放,还在一定程度上促进了堆肥的稳定化进程。在堆肥体系中,NH₄⁺的浓度过高会对甲烷单加氧酶的活性产生抑制作用,将直接降低甲烷氧化菌对CH₄的氧化能力。生物炭通过吸附作用降低堆肥液相中NH₄⁺的浓度,有效减弱NH₄⁺对甲烷单加氧酶的活性抑制。使得甲烷氧化菌能够更好地发挥其氧化CH₄的功能,提高对CH₄的去除效率^[33]。生物炭能够直接吸附N₂O并将其还原为N₂,从而减少N₂O的排放。此外,生物炭可以吸附NH₄⁺和NO₃⁻,减少硝化和反硝化细菌可用的无机氮,进而减缓硝化反应和反硝化反应速率,减少N₂O排放。

3 生物炭理化性质对堆肥温室气体及NH₃排放的影响

研究表明,通过调整生物炭的用量、原料类型和颗粒大小,可以改善堆肥过程中温室气体和NH₃排放。

3.1 生物炭添加量

研究花生壳生物炭用量对猪粪堆肥温室气体排放的影响,发现添加生物炭降低了猪粪堆肥过程中温室气体的排放,3%~9%生物炭处理CH₄和N₂O累积排放量(以CO₂当量计)为55.21~59.37 g/kg,比对照降低6.5%~12.6%,且随着生物炭添加比例的增加,温室气体减排效应越大^[34]。与对照组相比,添加生物炭的处理组NH₃排放量显著降低;生物炭

比例越高,减排效果越好。与对照组相比,生物炭添加量为2%、4%、6%、10%时,累计NH₃排放量分别减少24.2%、37.8%、39.3%和41.4%,添加生物炭提高微生物的摄氧率,促进了微生物的繁殖和代谢活动,对NH₃的释放有一定的抑制作用^[35]。与对照组相比,2%、4%、6%、10%的生物炭添加使CH₄排放量分别减少27.1%、38.2%、47.7%和55.9%;使累积N₂O排放量分别减少21.0%、18.2%、15.2%和9.0%。在牛粪和麦秸中添加了3%的生物炭,发现与对照组相比,N₂O排放量减少54.1%,这是基于生物炭本身的强吸附特性,可以降低堆肥过程中NO₃⁻-N的浓度。同时,生物炭通常呈碱性,可以提高堆肥的pH值,从而抑制N₂O的产生和释放^[36]。

3.2 生物炭原材料

不同原料制备的生物炭具有不同的性质,因此对温室气体和NH₃的减排效果也存在差异。稻壳、玉米秸秆、麦秆等农业废弃物制备的生物炭具有较高的有机碳含量和较好的孔隙结构。木屑、树枝等林业废弃物,这类生物炭具有较大的比表面积和丰富的表面官能团,有利于吸附和固定温室气体;牛粪、鸡粪等动物粪便制备的生物炭含有氮、磷、钾等营养元素,有利于改善土壤肥力;餐厨垃圾、绿化垃圾等城市生活垃圾,这类原料制备的生物炭具有丰富的微生物群落和较高的生物活性,有利于促进土壤微生物的生长。

研究生物炭(来自木屑、玉米秸秆和稻壳)对鸡粪堆肥过程中气体排放的影响。经过生物炭处理的堆肥CH₄、N₂O、NH₃的排放量分别减少18.93%~27.47%、35.74%~52.82%和1.26%~36.38%。总体而言,玉米秸秆生物炭被认为是同时提高堆肥成熟度和减少鸡粪堆肥过程中气体污染物排放的最佳添加剂,研究验证了3种植物源生物炭在堆肥过程中控制污染物气体的机制,从而为促进堆肥技术的可持续发展提供了依据^[37]。鸡粪是一种潜在的未使用肥料,含有大量的氮、磷、钾和微量营养素,生物炭已被证明是NH₃和水溶性NH₄⁺的吸收剂,堆肥试验结果表明,添加20%的生物炭组NH₃浓度降低64%,生物炭可能是堆肥材料的理想添加剂^[38]。添加10%由不同原料制备的生物炭,包括秸秆、竹子、木头、粪便、果壳制作的生物炭,发现所有的生物炭均可减少NH₃和CH₄排放,其中秸秆生物炭具有最佳的减排效果,归因于其更大的比表面积和更丰富的孔隙结构^[39]。玉米秸秆、竹子、牛粪、椰壳等不同原材料制备的生物炭对

N_2O 的减排效果具有一定的差异性,相比之下,玉米秸秆生物炭对 N_2O 的减排效果更好^[40]。针对不同原料制备的生物炭对温室气体减排效果的研究,能够更好地了解生物炭的环境效应,但是在实际应用过程中,应根据具体情况选择合适的原料和制备条件,以实现最佳的温室气体和 NH_3 减排效果。

3.3 生物炭改性

研究发现,通过酸、碱、金属和强氧化剂等手段对生物炭进行改性,提高生物炭的比表面积和孔隙结构,能够提升其在堆肥中的应用效果。添加改性生物炭降低31.74%~58.22%的 NH_3 排放、54.86%~62.79%的 N_2O 排放,其中添加酸改性生物炭对 NH_3 减排效果最佳,添加磁改性生物炭对 N_2O 减排和温室效应降低效果最佳^[41];金属改性生物炭在猪粪堆肥中的应用显示,添加15%的铁盐改性生物炭可降低 NH_3 排放高达91.2%,同时显著钝化重金属毒性,延长堆肥稳定时间^[42];用 H_2O_2 对玉米秸秆生物炭进行改性,改性后的生物炭添加在鸡粪堆肥中 NH_3 排放量减少62%^[43]。尽管改性生物炭在堆肥过程中表现出良好的减排效果,但制备成本较高,稳定性也有待进一步研究。

4 结论

堆肥过程中的碳氮比、温度、含水率和pH值是影响温室气体和氨气排放的关键因素。适宜的碳氮比(20:1~30:1)可以优化微生物的代谢活动,减少 NH_3 和 CO_2 的排放;温度的变化会影响微生物群落的组成和活性,进而影响 CH_4 和 N_2O 的排放;含水率过高或过低均会影响堆肥的通气性和微生物活性,导致温室气体排放增加;pH值的调节可以减少 NH_3 的挥发,尤其是在碱性条件下, NH_3 的排放量会增加。

生物炭通过其独特的理化性质对堆肥过程中产生的温室气体和氨气具有明显的减排效果,且随着生物炭添加比例的增加,温室气体减排效果越明显。生物炭的原材料和改性方式对减排效果有重要影响。

参考文献:

- [1] 袁帅,赵立欣,孟海波,等.生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1402-1417.
YUAN S, ZHAO L X, MENG H B, et al. The main types of bio-char and their properties and expectative researches[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1402-1417. (in Chinese)
- [2] 张伟明.生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D].沈阳:沈阳农业大学,2012.
- [3] 王勤花,曲建升,张志强.气候变化减缓技术:国际现状与发展趋势[J].气候变化研究进展,2007(6):322-327.
WANG Q H, QU J S, ZHANG Z Q. International climate change mitigation technologies: advances and outreaches[J]. Advances in Climate Change Research, 2007(6): 322-327. (in Chinese)
- [4] JIA X Y, WANG M, YUAN W Q, et al. The influence of bio-char addition on chicken manure composting and associated methane and carbon dioxide emissions[J]. BioResources, 2016, 11(2): 5255-5264.
- [5] 王权.添加剂对猪粪好氧堆肥过程的影响及其机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [6] XUE S, ZHOU L, ZHONG M, et al. Bacterial agents affected bacterial community structure to mitigate greenhouse gas emissions during sewage sludge composting[J]. Bioresource Technology, 2021, 337: 125397.
- [7] PEL R, OLDENHUIS R, BRAND W, et al. Stable-isotope analysis of a combined nitrification-denitrification sustained by thermophilic methanotrophs under low-oxygen conditions[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(2): 474-481.
- [8] KEBREAB E, CLARK K, WAGNER R, et al. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review[J]. Canadian Journal of Animal Science, 2006, 86(2): 135-158.
- [9] WANG N Y, HE Y, ZHAO K Q, et al. Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of agricultural waste composting process: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 354: 120337.
- [10] BA S, QU Q, ZHANG K, et al. Meta-analysis of greenhouse gas and ammonia emissions from dairy manure composting[J]. Biosystems Engineering, 2020, 193: 126-137.
- [11] 顾沈怡,戴海洋,郭凡婧,等.微生物和化学添加剂对畜禽粪便堆肥过程活性氮气体的减排研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(8):1010-1018.
GU S Y, DAI H Y, GUO F J, et al. Study on reduction of reactive gaseous nitrogen of compost product by microorganism and chemical additive in composting process of livestock and poultry manure[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(8): 1010-1018. (in Chinese)
- [12] 张悦.硅轻石对猪粪好氧堆肥中温室气体排放和腐殖化的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [13] 吴伟祥,李丽茹,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):1704-1712.
WU W X, LI L J, LYU H H, et al. Mechanisms of nitrous oxide emission during livestock manure aerobic composting[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1704-1712. (in Chinese)
- [14] 杨帆,欧阳喜辉,李国学,等.膨松剂对厨余垃圾堆肥 CH_4 、 N_2O 和 NH_3 排放的影响[J].农业工程学报,2013,29(18):226-233.
YANG F, OUYANG X H, LI G X, et al. Effect of bulking agent on CH_4 , N_2O and NH_3 emissions in kitchen waste composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(18): 226-233.

- 2013, 29(18): 226–233. (in Chinese)
- [15] GU H, GU J, WANG X, et al. Microbial-driven reduction of N₂O and NH₃ emissions during composting: Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 121292.
- [16] 李松蓉, 彭璧辉, 徐少奇, 等. 堆肥过程氨气、硫化氢协同减排研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(2): 431–441.
- LI S R, PENG B H, XU S Q, et al. Research progress on synergistic emission reduction of ammonia and hydrogen sulfide in composting[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 431–441. (in Chinese)
- [17] 王茄灵, 吕青阳, 刘杨, 等. 基于原位控制技术的粪污除臭菌剂研发现状[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(5): 1357–1366.
- WANG Q L, LYU Q Y, LIU Y, et al. Research and development status of fecal microbial deodorant based on in-situ control technology[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(5): 1357–1366. (in Chinese)
- [18] HUANG G F, WONG J W C, WU Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. *Waste Management*, 2004, 24(8): 805–813.
- [19] 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: 626–635.
- [20] TU Z N, REN X N, ZHAO J C, et al. Synergistic effects of biochar/microbial inoculation on the enhancement of pig manure composting[J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 127–137.
- [21] 李霞, 孔祥奕, 张雪茹, 等. 不同碳氮比对园林废弃物堆肥中氨气和温室气体排放的影响[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(7): 196–199.
- LI X, KONG X Y, ZHANG X R, et al. Effects of different carbon-nitrogen ratio on the emission of ammonia and greenhouse gases during the composting of garden waste[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(7): 196–199. (in Chinese)
- [22] 周谈龙, 尚斌, 董红敏, 等. 低碳氮比条件下猪粪堆肥氨气和温室气体排放[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(11): 689–698.
- ZHOU T L, SHANG B, DONG H M, et al. Emission characteristics of ammonia and greenhouse gas during the low c/n ratio swine manure composting[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(11): 689–698. (in Chinese)
- [23] 段亚军, 吴洪生, 李贞伟, 等. 畜禽粪便堆肥过程中CH₄和N₂O减排研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(4): 869–879.
- DUAN Y J, WU H S, LI Z W, et al. Review of progress on CH₄ and N₂O emissions mitigation during livestock and poultry manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(4): 869–879. (in Chinese)
- [24] TANG R L, LIU Y, MA R N, et al. Effect of moisture content, aeration rate, and C/N on maturity and gaseous emissions during kitchen waste rapid composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 326(Pt A): 116662.
- [25] 袁京, 刘燕, 唐若兰, 等. 畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11): 2428–2438, 2590.
- YUAN J, LIU Y, TANG R L, et al. A review of carbon and nitrogen losses and greenhouse gas emissions during livestock manure composting[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2021, 40(11): 2428–2438, 2590. (in Chinese)
- [26] 曹玉博, 张陆, 王选, 等. 畜禽废弃物堆肥氨气与温室气体协同减排研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 923–932.
- CAO Y B, ZHANG L, WANG X, et al. Synergistic mitigation of ammonia and greenhouse gas emissions during livestock waste composting[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2020, 39(4): 923–932. (in Chinese)
- [27] 陈辉, 王巨媛, 田晓飞, 等. 含水率与C/N耦合对驴粪堆肥过程中温室气体排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 341–347.
- CHEN H, WANG J Y, TIAN X F, et al. Effects of different water content and C/N coupling on greenhouse gas emissions during donkey dung composting[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(2): 341–347. (in Chinese)
- [28] BERNAL M, J A A, MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 100(22): 5444–5453.
- [29] 宋修超, 郭德杰, 成卫民, 等. 工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中NH₃和H₂S的减排效果[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(9): 2014–2020.
- SONG X C, GUO D J, CHENG W M, et al. Pilot-scale study on effects of exogenous additives on reducing NH₃ and H₂S emissions from pig manure compost[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2021, 40(9): 2014–2020. (in Chinese)
- [30] 张頔. 聚乙烯亚胺功能化秸秆生物炭对水中Cu²⁺、Pb²⁺、Cd²⁺的吸附性能研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [31] DAMIAN J, MALIŃSKA K, CZEKAŁA W, et al. Biochar to reduce ammonia emissions in gaseous and liquid phase during composting of poultry manure with wheat straw[J]. *Waste Management*, 2017, 66: 36–45.
- [32] YIN Y, LI M, TAO X, et al. Biochar enhanced organic matter transformation during pig manure composting: Roles of the cellulase activity and fungal community[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 333: 117464.
- [33] SANCHEZ-MONEDERO M A, CAYUELA M L, ROIG A, et al. Role of biochar as an additive in organic waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 1155–1164.
- [34] 王义祥, 叶菁, 林怡, 等. 花生壳生物炭用量对猪粪堆肥温室气体和NH₃排放的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(6): 114–125.
- WANG Y X, YE J, LIN Y, et al. Effects of peanut shell biochar on greenhouse gas and NH₃ emissions during swine manure composting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 114–125. (in Chinese)
- [35] 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: 121908.
- [36] LI R H, WANG Q, ZHANG Z Q, et al. Nutrient transformation during aerobic composting of pig manure with biochar prepared at different temperatures[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(5–8): 815–826.

- 发及幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1588-1593.
- MA M Y, MA H Y, LI S Y, et al. Effects of wood vinegar priming on seed germination and seedling growth of *Leymus chinensis* under salt stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(8): 1588-1593. (in Chinese)
- [15] 王琳琳. 松嫩草地羊草种子萌发期对温度、盐、碱胁迫及其协同效应的响应[D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- [16] ZHANG H, YU F, XIE P, et al. A Gγ protein regulates alkaline sensitivity in crops[J]. Science, 2023, 379: 6638.
- [17] GB/T 2930. 4-2017, 草种子检验规程 发芽试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [18] 郑译儒, 赵俊超, 龚束芳, 等. NaHCO_3 和 Na_2CO_3 胁迫对碱茅和披碱草种子萌发、幼苗生长和生理指标的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(2): 228-239.
- ZHENG Y R, ZHAO J C, GONG S F, et al. Effects of NaHCO_3 and Na_2CO_3 stress on seed germination, seedling growth, and physiological indexes of *Puccinellia chinampoensis* and *Elymus dahuricus*[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(2): 228-239. (in Chinese)
- [19] 陈玥, 战莘晔, 叶宁, 等. 水稻盐胁迫耐受机制及氮肥营养调节效应[J]. 东北农业科学, 2025, 50(6): 5-9, 19.
- CHEN Y, ZHAN X Y, YE N, et al. Mechanism of rice tolerance to salt stress and regulatory effect of nitrogen nutrition[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2025, 50(6): 5-9, 19. (in Chinese)
- [20] 朱琨, 刘骅峻, 冯成龙, 等. 盐胁迫对不同苜蓿品种种子萌发的耐盐性综合评价[J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3724-3733.
- ZHU K, LIU H J, FENG C L, et al. Comprehensive evaluation on the salt tolerance of seed germination of different Alfalfa varieties under salt stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(12): 3724-3733. (in Chinese)
- [21] 邵红雨, 孔广超, 岳超, 等. 小黑麦耐盐生理特性的研究[J]. 新疆农业科学, 2007 (S3): 77-81.
- SHAO H Y, KONG G C, YUE C, et al. Study on physiological characteristics of Triticale salt resistance[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2007 (S3): 77-81. (in Chinese)
- [22] 汪茜, 李继婷, 王维中, 等. 不同盐分胁迫对四种牧草种子萌发的影响[J]. 甘肃畜牧兽医, 2023, 53(3): 142-148.
- WANG Q, LI J T, WANG W Z, et al. Effects of different salt stress on seed germination of four forage species[J]. Gansu Animal and Veterinary Sciences, 2023, 53(3): 142-148. (in Chinese)
- [23] 刘文静, 杨志青, 李钰莹, 等. 盐胁迫对‘太行’白羊草生长与生理特性的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(10): 2651-2658.
- LIU W J, YANG Z Q, LI Y Y, et al. Effects of salt stress on the growth of *Bothriochloa ischaemum* and its physiological response[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(10): 2651-2658. (in Chinese)
- [24] 李莉, 张一弓, 贾纳提, 等. 盐碱胁迫下新疆野豌豆种子萌发及幼苗生理响应[J]. 草业学报, 2016, 25(9): 46-53.
- LI L, ZHANG Y G, JIA N T, et al. Seed germination and physiological responses of *Vicia costata* under saline-alkali stress conditions[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(9): 46-53. (in Chinese)
- [25] 王亚娟, 杨洋, 阴法庭, 等. NaCl 胁迫对甘蓝型饲料油菜渗透调节物质及 Na^+ 、 K^+ 含量的影响[J]. 东北农业科学, 2024, 49(3): 58-64.
- WANG Y J, YANG Y, YIN F T, et al. Effects of NaCl stress on osmotic adjustment substances and Na^+ , K^+ contents in *Brassica napus*[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(3): 58-64. (in Chinese)
- [26] 王晓春, 杨天辉, 王川, 等. 复合盐碱胁迫对苜蓿种子萌发的影响及耐盐碱性评价[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2023, 44(3): 112-119.
- WANG X C, YANG T H, WANG C, et al. Effect of complex salt-alkali stress on the seed germination and evaluation of saline-alkaline tolerance of alfalfa[J]. Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition), 2023, 44(3): 112-119. (in Chinese)
- [27] WANG W, ZHANG F, SUN L, et al. Alkaline salt inhibits seed germination and seedling growth of canola more than neutral salt[J]. Front Plant Sci., 2022, 13: 814755.
- [28] LI X, WANG J, LIN J, et al. Rhizomes help the forage grass *Leymus chinensis* to adapt to the salt and alkali stresses[J]. Scientific World Journal, 2014(3): 213401.
- (责任编辑: 范杰英)
-
- (上接第 109 页)
- [37] DANG R, CAI Y, LI J, et al. Biochar reduces gaseous emissions during poultry manure composting: Evidence from the evolution of associated functional genes[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 452: 142060.
- [38] STEINER C, DAS K C, MELEAR N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1236-1242.
- [39] CHEN W, LIAO X D, WU Y B, et al. Effects of different types of biochar on methane and ammonia mitigation during layer manure composting[J]. Waste Management, 2017, 61: 506-515.
- [40] WANG J X, WANG B Y, BIAN R J, et al. Bibliometric analysis of biochar-based organic fertilizers in the past 15 years: focus on ammonia volatilization and greenhouse gas emissions during composting[J]. Environmental Research, 2024, 243: 117853.
- [41] 周颖, 王国英, 朱宗强, 等. 改性生物炭对餐厨垃圾堆肥含氮气体减排影响[J]. 环境科学研究, 2025, 38(6): 1356-1364.
- ZHOU Y, WANG G Y, ZHU Z Q, et al. Impact of modified biochar on mitigation of nitrogenous gas emissions from kitchen waste composting[J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(6): 1356-1364. (in Chinese)
- [42] WANG T, QUAN X, SUN Z, et al. Sustainable biochar synthesis via synergistic H_2O_2 -KOH modification for enhanced CO_2 physisorption[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2025, 15: 100438.
- [43] ZHOU S Z, WEN X, CAO Z, et al. Modified cornstalk biochar can reduce ammonia emissions from compost by increasing the number of ammonia-oxidizing bacteria and decreasing urease activity[J]. Bioresource Technology, 2020, 319: 124120.
- (责任编辑: 王 昱)