

鸡粪好氧堆肥过程氨气与温室气体排放特征及协同减排机制

湛卓越, 贺德春, 姜珊, 李想, 胡嘉梧, 毛小云, 柳王荣, 吴根义

引用本文:

湛卓越, 贺德春, 姜珊, 李想, 胡嘉梧, 毛小云, 柳王荣, 吴根义. 鸡粪好氧堆肥过程氨气与温室气体排放特征及协同减排机制[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2582–2594.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1296>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述

袁京, 刘燕, 唐若兰, 马若男, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2428–2438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0986>

双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响

杨燕, 尹子铭, 袁京, 罗一鸣, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2439–2447 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0955>

改性膨胀蛭石覆盖对沼液贮存氨气和温室气体排放影响

王悦, 刘婧怡, 张佳男, 郭赫, 朱志平, 李新荣, 邹国元

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 902–912 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1073>

工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中 NH_3 和 H_2S 的减排效果

宋修超, 郭德杰, 成卫民, 罗佳, 徐烨红, 王光飞, 刘新红, 马艳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2014–2020 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0221>

不同改良剂对旱地苹果园温室气体排放的影响

李钊, 刘帅, 丁艳宏, 孙文浩, 高晓东, 赵西宁

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 227–236 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0846>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

湛卓越, 贺德春, 姜珊, 等. 鸡粪好氧堆肥过程氨气与温室气体排放特征及协同减排机制[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2582–2594.

ZHAN Z Y, HE D C, JIANG S, et al. Emission characteristics and the mechanism of synergistic emission reduction for NH_3 and greenhouse gases during the aerobic composting of chicken manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(11): 2582–2594.

鸡粪好氧堆肥过程氨气与温室气体排放特征及协同减排机制

湛卓越¹, 贺德春², 姜珊², 李想², 胡嘉梧², 毛小云^{3,4}, 柳王荣^{2*}, 吴根义^{1*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 生态环境部华南环境科学研究所广东省畜禽养殖污染系统控制工程技术研究中心, 广州 510655; 3. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 4. 广东省农业农村污染治理与环境安全重点实验室, 广州 510642)

摘要:为研究畜禽粪便好氧堆肥过程氨气(NH_3)与温室气体的排放特征及协同减排机制,以鸡粪与蘑菇渣为原料,设置9组不同条件的好氧堆肥正交实验,并进行为期45 d的跟踪监测,了解好氧堆肥过程基本理化参数变化,分析 NH_3 和温室气体的排放规律及最佳减排条件,探究微生物群落与环境因子、气体排放通量之间的相关性。结果表明:含水率与碳氮比(C/N)变化影响整个堆肥进程,经45 d堆肥后,大多数处理组的堆肥均已经完全腐熟,且添加一定比例的椰壳生物炭与钙镁磷肥可以提高堆肥腐熟度。 NH_3 和4种温室气体(CH_4 、 N_2O 、 CO 、 CO_2)在堆肥前期(1~22 d)排放通量较高,人工翻堆会增加气体排放通量。 NH_3 和温室气体排放的影响因子和最佳减排条件各不相同,存在“此消彼长”的关系。对 NH_3 、 CH_4 、 N_2O 排放影响较大的因子是椰壳生物炭占比、钙镁磷肥占比和通风速率,有利于这3种气体协同减排的条件为含水率60%、椰壳生物炭0或5%、钙镁磷肥0或5%或10%、通风速率 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中含水率60%、椰壳生物炭占比5%、通风速率 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是 NH_3 和 CH_4 协同减排的最佳条件。整个堆肥过程中,门水平与属水平的微生物群落相对丰度均发生明显变化,C/N和温度是微生物群落变化的主要驱动因素;堆肥前期(22 d前),门水平的优势菌为Firmicutes、Actinobacteria、Bacteroidetes和Proteobacteria,其中Firmicutes对 NH_3 与温室气体的排放具有显著影响。研究表明,鸡粪好氧堆肥过程中影响 NH_3 和温室气体排放的因子很多,通风条件下进行调理剂种类及配比优选有望实现 NH_3 、 CH_4 和 N_2O 的协同排放。

关键词:好氧堆肥; NH_3 ;温室气体;协同减排;微生物群落

中图分类号:S141.4;X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)11-2582-13 doi:10.11654/jaes.2022-1296

Emission characteristics and the mechanism of synergistic emission reduction for NH_3 and greenhouse gases during the aerobic composting of chicken manure

ZHAN Zhuoyue¹, HE Dechun², JIANG Shan², LI Xiang², HU Jiawu², MAO Xiaoyun^{3,4}, LIU Wangrong^{2*}, WU Genyi^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Guangdong Engineering & Technology Research Center for System Control of Livestock and Poultry Breeding Pollution, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural & Rural Pollution Abatement and Environmental Safety, Guangzhou 510642, China)

收稿日期:2022-12-23 录用日期:2023-05-05

作者简介:湛卓越(1998—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,从事畜禽养殖过程氨气与温室气体排放规律与控制技术研究。E-mail:806529044@qq.com

*通信作者:柳王荣 E-mail:lwr179@126.com;吴根义 E-mail:wugenyi99@163.com

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(PM-zx097-202104-121);广州市科技计划项目(202206010163)

Project supported: The Fundamental Research Funds for the Central Public Welfare Research Institutes (PM-zx097-202104-121); Science and Technology Planning Project of Guangzhou (202206010163)

Abstract: To study the emission characteristics of NH_3 and greenhouse gases and the mechanism of synergistic emission reduction during the aerobic composting of livestock and poultry manure, nine groups of orthogonal experiments for aerobic composting were performed with a mixed feedstock of chicken manure and mushroom residue under different conditions, and 45 d of tracking and monitoring were performed to understand the changes in the basic physicochemical parameters, analyze the emission rules and optimal emission reduction conditions of NH_3 and greenhouse gases during the process of composting, and explore the correlation between the microbial community and environmental factors, the gas emission flux. The results showed that the changes in the moisture content and C/N affected the whole composting process. The composts of most treatment groups were completely decomposed after 45 d, and the addition of coconut shell biochar and calcium magnesium phosphate fertilizer (suitable proportion) improved the maturity of the composts. NH_3 and four greenhouse gases (CH_4 , N_2O , CO , and CO_2) both had high emission fluxes during the early stage of composting (1–22 d), and manual heap turning increased their emission fluxes. NH_3 and greenhouse gas emissions had different impact factors and optimal emission reduction conditions, and different gases showed no evident consistency with one another. The major factors affecting the NH_3 , CH_4 , and N_2O emissions were the proportions of coconut shell biochar and calcium magnesium phosphate fertilizer, and the aeration rate. The synergistic conditions that were beneficial for reducing the emissions of three gases were a water content of 60%, coconut shell biochar addition at 0 or 5%, calcium magnesium phosphate fertilizer addition at 0, 5%, or 10%, and an aeration rate of $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; among them, a water content of 60%, coconut shell biochar addition of 5%, and aeration rate of $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ were the best conditions for the synergistic reduction in the NH_3 and CH_4 emissions. Throughout the composting process, the relative abundance of the microbial community at the phylum and genus levels changed obviously, and the C/N and temperature were the main driving factors of the changes in the microbial community. During the early stage of composting (22 d before), the dominant bacteria at the phylum level were Firmicutes, Actinobacteria, Bacteroidetes, and Proteobacteria, among which Firmicutes had a significant effect on the emissions of NH_3 and greenhouse gases. Many factors could affect NH_3 and greenhouse gas emissions during the aerobic composting of chicken manure, and the optimal selection of conditioner types and ratios under aeration conditions is expected to achieve synergistic emissions reduction of NH_3 , CH_4 , and N_2O .

Keywords: aerobic composting; NH_3 ; greenhouse gas; synergistic emission reduction; microflora

固体废物如何安全高效地进行资源化利用已成为当今社会面临的主要挑战之一。据统计,到2025年全球固体废物的日产生量将超过600万 $\text{t}^{[1]}$,其中有46%的固体垃圾为有机固体垃圾,包括畜禽粪便、农作物秸秆、农业副产品等 $^{[2]}$ 。大量的固体废弃物排放都归因于全球人口数量、粮食产量的不断增长,以及随之而来的养殖业、种植业和食品加工业的规模化和集约化发展 $^{[3]}$ 。随着规模化禽类养殖的快速发展,我国畜禽粪便的年产生量大约为38亿 t ,其中16.3%为鸡粪 $^{[4]}$ 。对于集约化畜禽养殖业而言,大量的畜禽粪便若处置不当将会造成土壤和水体污染,但若妥善处置,其即可成为绿色高效的有机肥料。

目前,好氧堆肥已经成为常见的粪便处理方式,堆肥产品可作为改良土壤的有机肥料 $^{[5]}$;同时有效的好氧堆肥过程可杀灭粪便中大多数病原菌 $^{[6]}$,降解大部分抗生素和雌激素等新污染物 $^{[7-8]}$ 。然而,堆肥体系高温、高pH以及好氧/厌氧微域共存的特性,会造成氨气(NH_3)和温室气体(N_2O 、 CH_4 、 CO 、 CO_2)排放量较高 $^{[9]}$ 。堆肥过程中, NH_3 挥发是氮损失的主要途径,通过 NH_3 挥发损失的氮占初始总氮的16.1%~22.6%; CH_4 和 N_2O 排放也是重要的碳氮损失途径,其中通过

CH_4 排放损失的碳占初始总碳的0.2%~3.2%,通过 N_2O 排放损失的氮占初始总氮的0.1%~4.2% $^{[10]}$ 。粪便在堆肥过程中排放大量的 NH_3 和温室气体,不仅造成养分流失、降低有机肥农用价值,还可能导致全球变暖、土壤酸化以及雾霾等一系列二次污染问题 $^{[1-3]}$ 。

畜禽粪便好氧堆肥过程中 NH_3 与温室气体的排放与控制一直是备受关注的热点问题。大量学者研究了好氧堆肥过程 NH_3 与温室气体排放的影响因素,其中有关堆肥调理剂的研究较多。在鸡粪堆肥中添加10%的生物炭可有效减少 NH_3 和 CH_4 的排放 $^{[11]}$,在猪粪堆肥中联合添加双氰胺和磷酸镁盐对 NH_3 和 N_2O 的减排比例分别为45%~53%和76%~78% $^{[12]}$,在牛粪堆肥中添加10%的过磷酸钙对 NH_3 减排的比例为19.65% $^{[9]}$,以上说明添加合适的调理剂对堆肥过程固氮减排具有明显效果。但曹玉博等 $^{[13]}$ 的分析表明,常见的堆肥调控策略会导致 NH_3 与多种温室气体排放“此消彼长”,难以实现协同减排。目前已开展的相关研究大多只关注1~2种气体,而同时关注多种气体的相关研究较少,所以 NH_3 与温室气体在同一堆体、多因素调控措施下的排放规律与减排效应尚未明确。另外,椰壳生物炭和钙镁磷肥同时添加对 NH_3 与温室

气体排放影响的研究也非常少,二者对NH₃与温室气体协同减排的最佳条件有待筛选优化。

本研究基于大体积好氧堆肥体系,设计了多因素、多水平的鸡粪好氧堆肥正交实验,系统探究不同的鸡粪好氧堆肥条件(含水率、椰壳生物炭与钙镁磷肥占比及通风速率)下NH₃与4种温室气体(N₂O、CH₄、CO、CO₂)的排放特征,分析NH₃与温室气体协同减排的影响机制及最佳堆肥条件,旨在为畜禽粪便好氧堆肥过程NH₃与温室气体的协同控制提供理论指导和技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验方法

从广州市某养鸡场采集新鲜鸡粪用于好氧堆肥实验。对鸡粪进行适当晾晒,使含水率低于65%,以蘑菇渣作为主要调理剂,根据实验设计添加椰壳生物炭或钙镁磷肥与鸡粪进行混合堆肥。各种堆肥原料的基本理化特性见表1。

1.2 实验设计

将蘑菇渣与鸡粪按一定比例混合均匀作为基质物料,初始C/N为18:1,控制每个堆体基质物料的总质量为108 kg(鲜质量);按5%或10%的质量比加入调理剂(椰壳生物炭或钙镁磷肥),使用去离子水调节堆料的初始含水率为50%、60%或65%,混合均匀,装入配有曝气装置的400 L堆肥反应器中进行好氧堆肥实验。反应器外部采用保温材料保温,在上、中、下部分别插入一个温度探头以监测堆体温度变化(设置每10 min测定一次),通风速率设为0.20、0.12、0.08 L·min⁻¹·kg⁻¹(以干质量计)。每组堆体均在第5天和第12天手动翻堆一次,堆肥周期为45 d。堆肥时间为2021年12月至2022年2月,共设置了9组处理(T1~T9),各处理组具体实验条件设置见表2。

1.3 堆肥样品采集

采样时间为第0、2、5、8、12、16、22、30、45天(共9次),按照上、中、下多点采样原则采集堆肥样品(至少

表2 不同处理组的好氧堆肥实验条件设置

Table 2 Experimental conditions of aerobic composting in different treatment groups

处理组 Treatment group	含水率 Moisture content/%	椰壳生物炭占比 Ratio for coconut shell biochar/%	钙镁磷肥占比 Ratio for calcium magnesium phosphate fertilizer/%		通风速率 Aeration rate/ (L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)
T1	65	5	0		0.12
T2	60	0	5		0.12
T3	50	5	5		0.08
T4	50	10	10		0.12
T5	60	5	10		0.20
T6	65	10	5		0.20
T7	50	0	0		0.20
T8	60	10	0		0.08
T9	65	0	10		0.08

6个点),各点样品混合均匀后分为3份:第一份约1 kg(鲜质量,下同),直接冷藏于-20℃冰箱,用于pH、电导率、含水率等堆肥常规指标分析;第二份约1 kg,及时采用冷冻干燥机进行冷冻干燥(不能及时冻干的,存于-20℃冰箱),然后研磨过20目筛,存于-20℃冰箱,用于分析总碳(TC)、总氮(TN);第三份约0.5 kg,直接储存于-80℃冰箱,用于生物学指标(16S rRNA)分析。

1.4 指标测定

NH₃和温室气体测定:测定时间为第1、2、3、4、5、6、7、8、11、12、14、16、18、22、24、30、40天(共17次),测定前在反应器上端加设容积为400 L的集气箱(设监测孔),采用便携式气体检测仪对集气箱中NH₃、CH₄、N₂O、CO、CO₂的排放浓度进行检测,每日上午和下午各测定一次,数据处理时取两次测定的平均值。

16S rRNA 基因测序:根据堆体温度及NH₃与温室气体变化情况,每个处理均挑选了第0、5、12、22天的堆肥样品,委托明科生物技术(杭州)有限公司进行基因测定并完成数据处理。

表1 堆肥原材料的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of compost materials

原材料 Raw material	含水率 Moisture content/%	pH	总碳 TC/%	总氮 TN/%	C/N	来源(生产商) Source(producer)
鸡粪	32.60	5.90	41.75	2.64	15.81	广州市某养鸡场
蘑菇渣	53.62	7.80	49.12	0.94	52.26	广东润田肥业
椰壳生物炭	6.40	11.20	24.59	0.77	31.94	广州美固环保
钙镁磷肥	6.41	8.10	—	—	—	广东大众农科

堆体温度(T):通过温度计在线实时监测,设定每10 min测定一次温度数据,据此求得日平均温度。

含水率(MC):称取5 g新鲜样品在105 ℃条件下烘干24 h,在干燥皿中冷却至室温后称质量,根据样品烘干前后质量计算含水率。

pH与电导率(EC):堆肥鲜样与超纯水按1 g:10 mL混合浸提,200 r·min⁻¹水平振荡2 h,离心后取上清液,采用雷磁便携式pH计和电导仪测定。

TC和TN:根据堆体温度及NH₃与温室气体变化情况,每个处理均挑选了第0、5、12、22天的堆肥鲜样,委托中科检测技术服务(东莞)有限公司,采用元素分析仪进行测定。

NH₄⁺-N和NO₃⁻-N:将堆肥鲜样与1 mol·L⁻¹ KCl溶液按照1:10($m:V$)混合,振荡30 min,静置过滤,上清液经稀释后采用流动分析仪进行测定。

种子发芽指数(GI):将堆肥鲜样与去离子水按1 g:10 mL的配比混合浸提,200 r·min⁻¹水平振荡2 h后离心,抽取3 mL上清液至垫有滤纸且洁净的培养皿中,均匀放置10颗白菜种子,同时用去离子水作空白对照。在培养箱中25 ℃、相对湿度为80%的常温常湿条件下培育48 h,分别测定实验组和对照组的萌芽种子数,并测量根长度,根据种子发芽率指数公式计算种子发芽指数。

1.5 数据处理与分析

参考赵晨阳等^[14]的文章中报道的方法,计算堆肥过程中NH₃和温室气体排放通量和累计排放量。其中,气体排放通量的计算公式如下:

$$f_i = V \times (\Delta c / \Delta t) \times 60 / m_0$$

式中: f_i 为第 i 次采样时的气体排放通量,mg·kg⁻¹·h⁻¹; V 为堆体上方集气空间的总体积,m³; $\Delta c / \Delta t$ 是采样箱内温室气体浓度随时间的变化率,mg·m⁻³·min⁻¹; m_0

为堆体基质物料的总质量,108 kg(鲜质量)。

基于上述气体排放通量,可以进一步计算其累计排放量,具体计算公式如下:

$$Q = \sum \Delta f_i t_i$$

$$\Delta f_i = (f_{i-1} + f_i) / 2$$

式中: Q 为气体累积排放量,mg·kg⁻¹(鲜质量,下同); Δf_i 为第 $i-1$ 次至第 i 次采样期间的平均排放通量,mg·kg⁻¹·h⁻¹; f_i 为第 i 次采样时的气体排放通量,mg·kg⁻¹·h⁻¹; f_0 取0; t_i 为第 $i-1$ 次至第 i 次采样间隔时间(t_0 代表建堆当日),h。

另外,堆体中的微生物能够有效推动堆肥过程持续进行,但其群落结构变化情况受环境因素影响较大^[15]。因此,通过冗余分析(RDA)探讨堆肥过程基本理化指标、气体排放通量、微生物丰度三者之间的相关性,以期揭示影响堆肥过程NH₃和温室气体排放的主要微生物。

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中基本指标的变化

2.1.1 温度的变化

在好氧堆肥前期,堆体中大量微生物分解堆体中的纤维素等有机物质,并释放大热量^[16],9组处理的堆体温度迅速升到高温阶段(>40 ℃)。由图1可见,T4和T7堆体的平均温度在第0天就分别达到48.5 ℃和50.1 ℃,T3堆体的平均温度为37.4 ℃,而含水率为65%的3组处理较其他处理进入升温阶段慢。除了T5和T9温度从未达到55 ℃,其他7组处理连续6 d以上温度超过55 ℃,能够有效灭活堆体中病原体,达到堆肥腐熟的卫生安全标准(堆体温度达到55 ℃以上或持续4 d以上达到50 ℃)^[17]。在第20天以后,微生物活动和有机质分解速度减慢,9个处理的温度逐渐

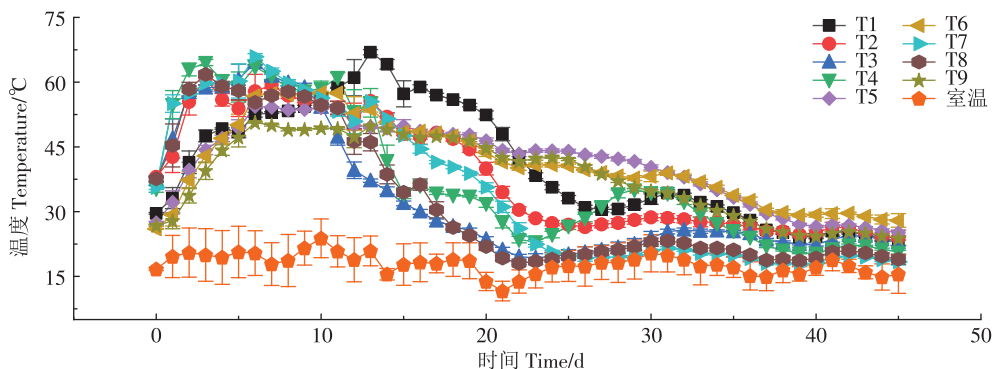


图1 堆肥过程中堆体的日平均温度变化曲线

Figure 1 Daily mean temperature curve of the heap during composting

下降,但均保持在环境温度以上。

2.1.2 其他理化参数的变化

在堆肥过程中pH呈现先升后降趋势(图2a)。堆肥初期,有机氮的氨化作用产生大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,导致pH上升;在堆肥第15天后, NH_3 大量挥发,导致pH下降^[18],堆肥结束时,各处理的pH均在最佳pH(6.7~9.0)范围内^[13,19]。电导率反映堆体的盐度,可据此判断其盐分含量是否对植物造成不利影响^[14]。整个堆肥过程中,各处理的电导率呈现先逐渐上升后趋于稳定的趋势(图2b)。随着堆肥过程的进行,9个处理组含水率呈下降的趋势(图2c),这与其他研究结果一

致^[20-21]。在整个堆肥过程中,C/N总体呈下降趋势(图2d)。研究表明最终C/N与初始C/N的比值在0.5~0.7之间就可认定为堆肥已经腐熟^[22],据此判断除了T8处理组外,其他处理均达到腐熟。经过堆肥高温期后,堆肥中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量开始明显增加(图2e),这可能是堆肥前30 d,高浓度的 NH_3 积累和高温抑制了硝化反应^[23]。低含水率的T3、T4在堆肥后期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较高,达3.07、4.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (鲜质量),说明含水率通过影响堆体温度进而影响 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化。类似地,堆肥前期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量迅速增加,各组在5~22 d达到峰值后开始下降(图2f),这可能是由于微生物活动加

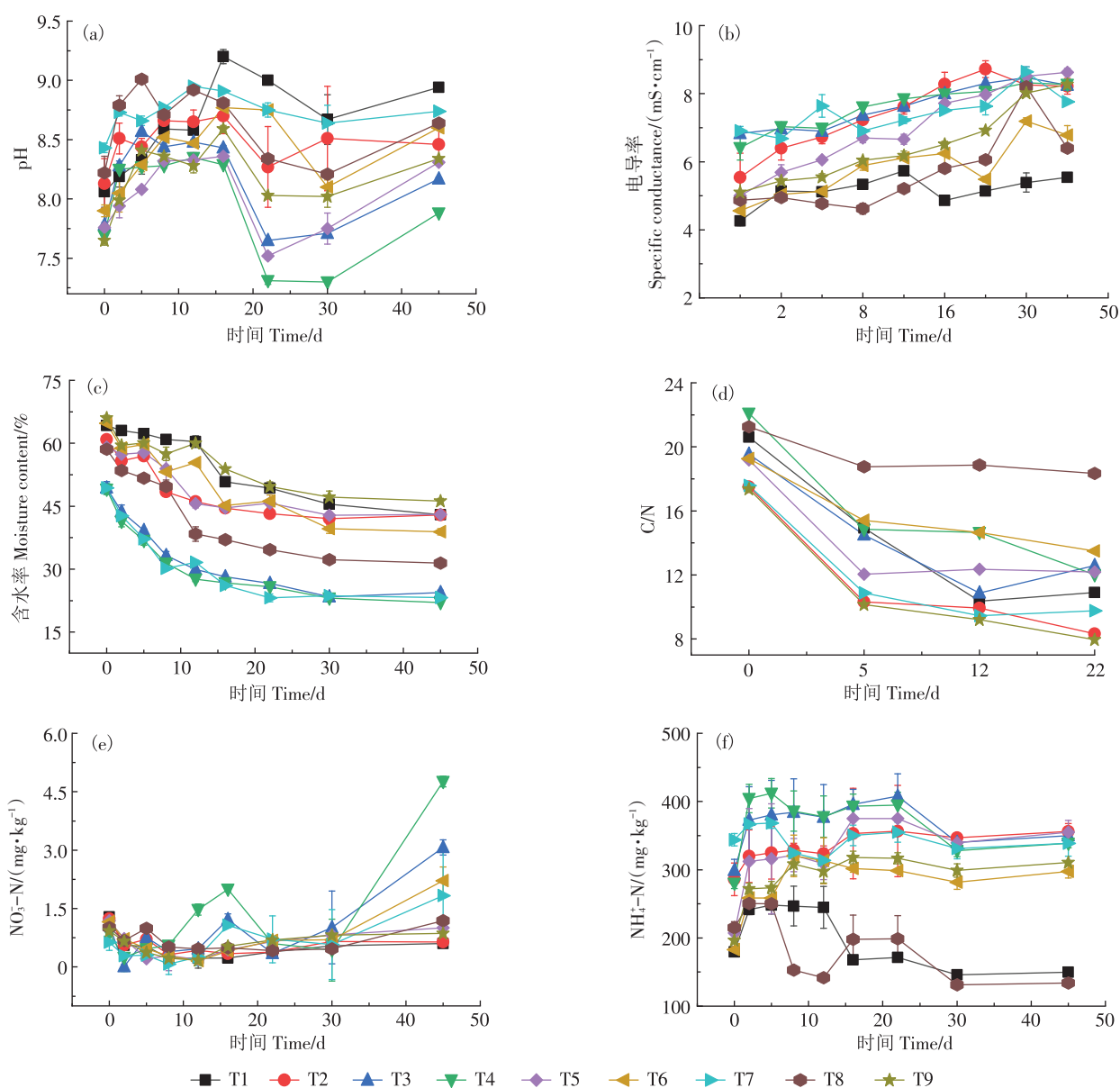


图2 堆肥过程中pH、电导率、含水率、C/N、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化趋势

Figure 2 Changes of pH, electrical conductivity, moisture content, C/N, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ during composting

刷了有机氮的分解,从而产生大量的 $\text{NH}_4^+-\text{N}^{[24]}$ 。

2.1.3 种子发芽指数

种子发芽指数可表征植物毒性特征、评估堆肥产品腐熟度。9组处理经堆肥发酵45 d后的种子发芽指数如表3所示。初始含水率为50%的3组处理(T3、T4、T7)经过45 d堆肥发酵后的种子发芽指数均低于70%,而分别添加了5%和10%的椰壳生物炭与钙镁磷肥的T3和T4的种子发芽指数明显高于T7,说明在初始含水率为50%的堆肥体系中,添加一定比例的椰壳生物炭与钙镁磷肥在一定程度上提高了堆肥腐熟度。总体来看,除低含水率(50%)处理组外,其余处理组堆肥45 d的种子发芽指数均满足《有机肥料》(NY 525—2021)的要求($\text{GI}>70\%$)。

2.2 NH_3 排放特征

2.2.1 排放通量

鸡粪堆肥过程中各处理组 NH_3 排放通量的变化如图3 a所示。各处理组之间 NH_3 排放通量变化情况存在明显差异,如T6、T8两组的 NH_3 排放通量总体高于其他组,T6组第12天和第14天时的 NH_3 排放通量较高,分别为 $5.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $3.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$;T8组第2天和第5天时的 NH_3 排放通量较高,分别为 $4.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $5.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。总体来看,T6、T8排放通量最高,这可能是含水率与通风速率的变化影响了高含量生物炭对 NH_3 的减排效果;在堆肥前期

(1~22 d) NH_3 排放通量都较高,其中第5天和第12天手动翻堆后, NH_3 排放通量出现迅速升高的趋势;22 d以后, NH_3 排放通量都低于 $1.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,基本趋于平衡。可见畜禽粪便堆肥过程中 NH_3 的排放主要集中在堆肥前期(22 d前),而且人工翻堆加快了 NH_3 的排放^[7]。

2.2.2 累积排放量

鸡粪堆肥过程中各监测时间段 NH_3 累积排放量的变化情况如图3b所示。堆肥前期(1~21 d),不同处理组的 NH_3 累积排放量升幅较大,均值升幅范围为 $39.81\sim 694.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而堆肥后期(22~45 d)累积排放量升幅较小,均值升幅范围为 $720.37\sim 973.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这些数据再次印证了整个堆肥过程中 NH_3 的排放主要集中在堆肥前期(1~22 d)。不同处理组之间 NH_3 累积排放量变化情况存在一定差异,其中最终累积排放量最低的组别为T5,数值为 $775.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明9个处理组相比较,T5的实验条件有利于 NH_3 减排。

2.3 鸡粪堆肥过程中温室气体的排放特征

2.3.1 排放通量

鸡粪堆肥过程中各处理组4种温室气体(CH_4 、 N_2O 、 CO 、 CO_2)的排放通量呈动态波动,而且不同温室气体之间、不同处理组之间的排放通量存在明显差异(图4)。 CH_4 的集中排放期是1~15 d(图4a),这是由于堆肥前期含水率较高造成局部厌氧,产甲烷菌快速

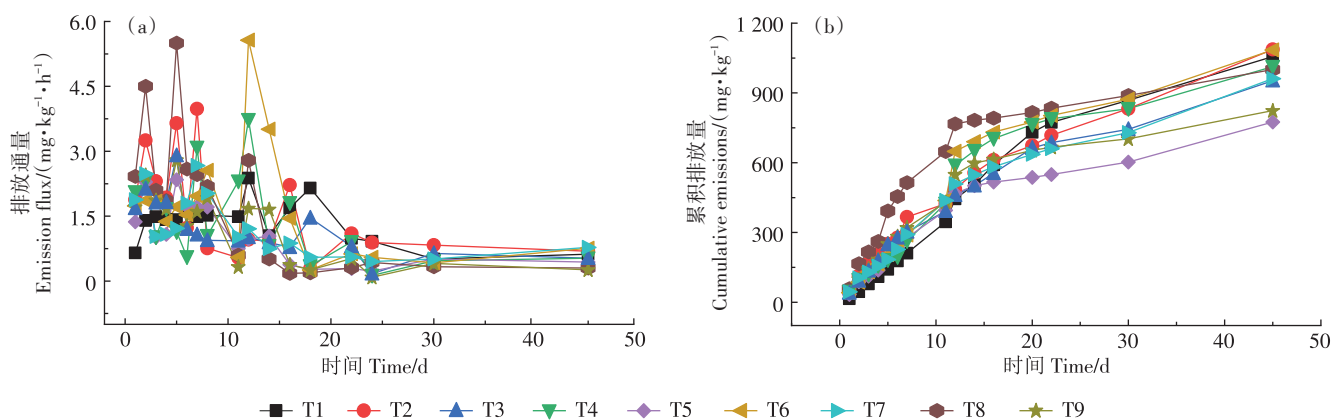


图3 鸡粪堆肥过程中 NH_3 排放通量及其累积排放量的变化情况

Figure 3 Changes of NH_3 emission flux and cumulative emission during chicken manure composting

表3 各处理组堆肥前后的种子发芽指数(%)

Table 3 Seed germination index of each treatment group before and after composting (%)

处理组 Treatment group	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
堆肥前	24.58±1.10	13.12±0.86	10.11±0.53	25.08±1.07	12.77±0.85	23.55±1.49	7.62±0.35	25.09±1.15	27.15±1.91
堆肥 45 d	79.36±1.56	95.34±4.79	55.95±2.37	57.36±2.37	72.04±5.68	106.68±4.83	31.79±1.56	196.42±9.34	137.05±9.96

增殖导致 CH_4 集中产生^[25]。其中 T9 在第 5 天翻堆时 CH_4 排放通量达到峰值,为 $15.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,这可能与 T9 含水率高且未添加生物炭有关。已有研究表明,初始含水率高会使 CH_4 排放量上升^[26];而生物炭添加量越高, CH_4 减排效果越好^[27]。1~20 d 是 N_2O 的集中排放期(图 4b),其中第 12 天翻堆后排放通量较高,数值较大的两组为 T1、T4,分别为 $6.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $5.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在堆肥的高温期,高温会抑制硝化细菌的活性^[28],使得 N_2O 排放通量减少,翻堆后出现排放峰值是由于堆体内部 NO_3^- 被翻至表面,其经反硝化作用形成 N_2O ,从而导致 N_2O 排放通量增加^[29-30],这与赵晨阳等^[14]研究发现的排放规律一致。1~18 d CO 的排放通量较高(T4 例外,为 1~24 d),其中 0~6 d 是集中排放期(图 4c),第 5 天翻堆后排放通量最高的是 T4 组,第 12 天翻堆后排放通量有所升高,但升幅不大。1~24 d 是 CO_2 的集中排放期(图 4d),其中翻堆(第 5 天和第 12 天)后排放通量有明显升高趋势。T8 处理组总体排放通量明显高于其他组,尤其是翻堆以后,这可能是由于翻堆进一步改善了堆体(添加 10% 椰壳生物炭)的透气性,促进了微生物对堆料的分解作用^[31]。总体来看,4 种温室气体

的排放主要集中在堆肥前期(1~22 d),22 d 后 4 种温室气体的排放通量明显降低且基本趋于平衡,人工翻堆同时对 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的排放通量产生较大影响。

2.3.2 累积排放量

鸡粪堆肥过程中各处理组 4 种温室气体(CH_4 、 N_2O 、 CO 、 CO_2)累积排放量的变化情况如图 5 所示。堆肥前期(1~21 d)不同处理组 CH_4 、 N_2O 、 CO 、 CO_2 的累积排放量升幅较大,而堆肥后期(22~45 d)升幅较小,说明整个堆肥过程中温室气体的排放主要集中在堆肥前期。不同温室气体、不同处理组之间,温室气体累积排放量变化情况存在明显差异,其中 CO_2 的组间差异相对较小,而其他气体差异较大,尤其是 CO ,这可能是由于 CO 累积排放量数值较低,从而导致差异放大。从纵坐标数值大小来看,4 种温室气体的累积排放量大小排序为 $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2\text{O} > \text{CO}$ 。堆肥至第 45 天时,不同处理组 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 CO 的累积排放量分别为 $171\ 876.85 \sim 263\ 783.33$ 、 $612.04 \sim 1\ 337.96$ 、 $525.93 \sim 1\ 215.74$ 、 $69.44 \sim 250.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对于 CH_4 来说,最终累积排放量最低的组为 T1,而对于 CO_2 、 N_2O 和 CO ,最终累积排放量最低的组均为 T7,表明 CH_4 和其他 3 种气体的减排条件有所差异,T7 的实验条件有利于

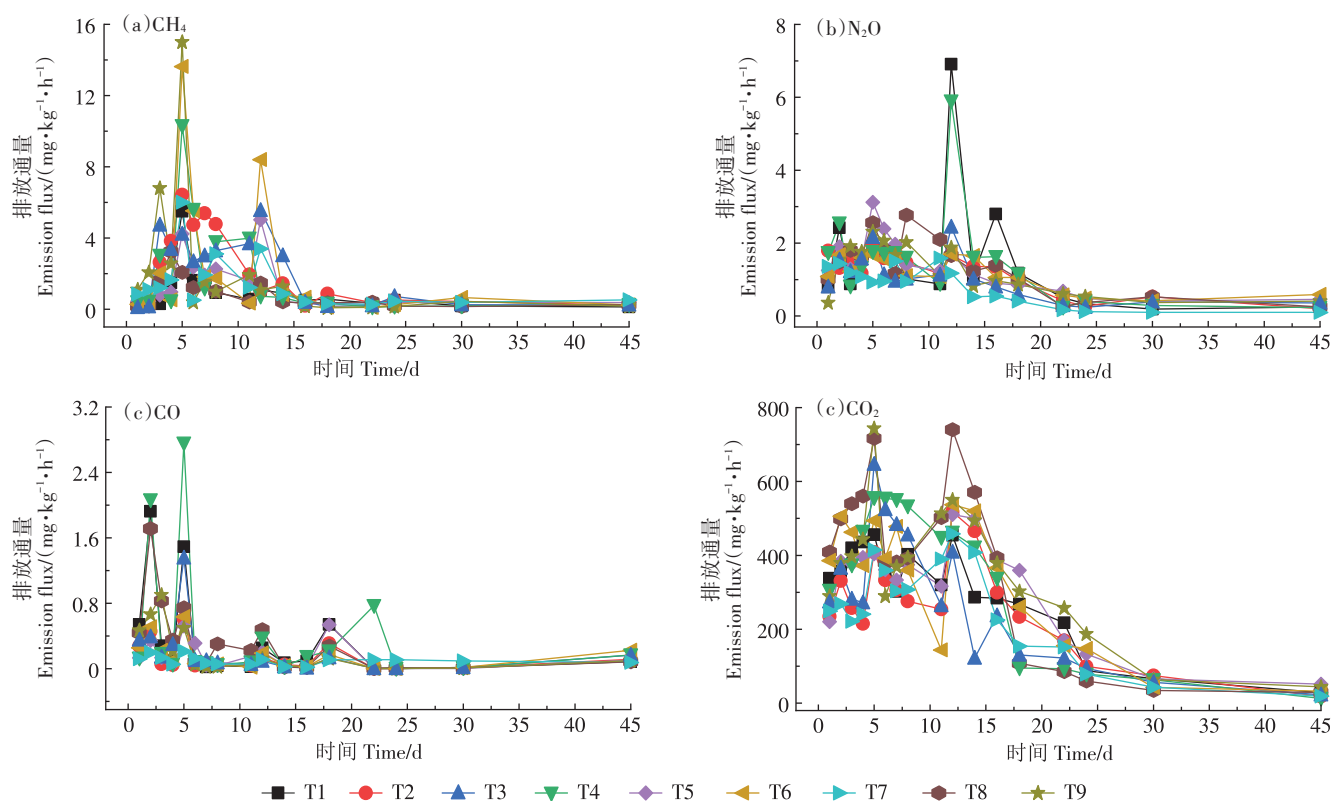


图4 鸡粪堆肥过程中温室气体排放通量的变化情况

Figure 4 Changes of emission fluxes for greenhouse gases during chicken manure composting

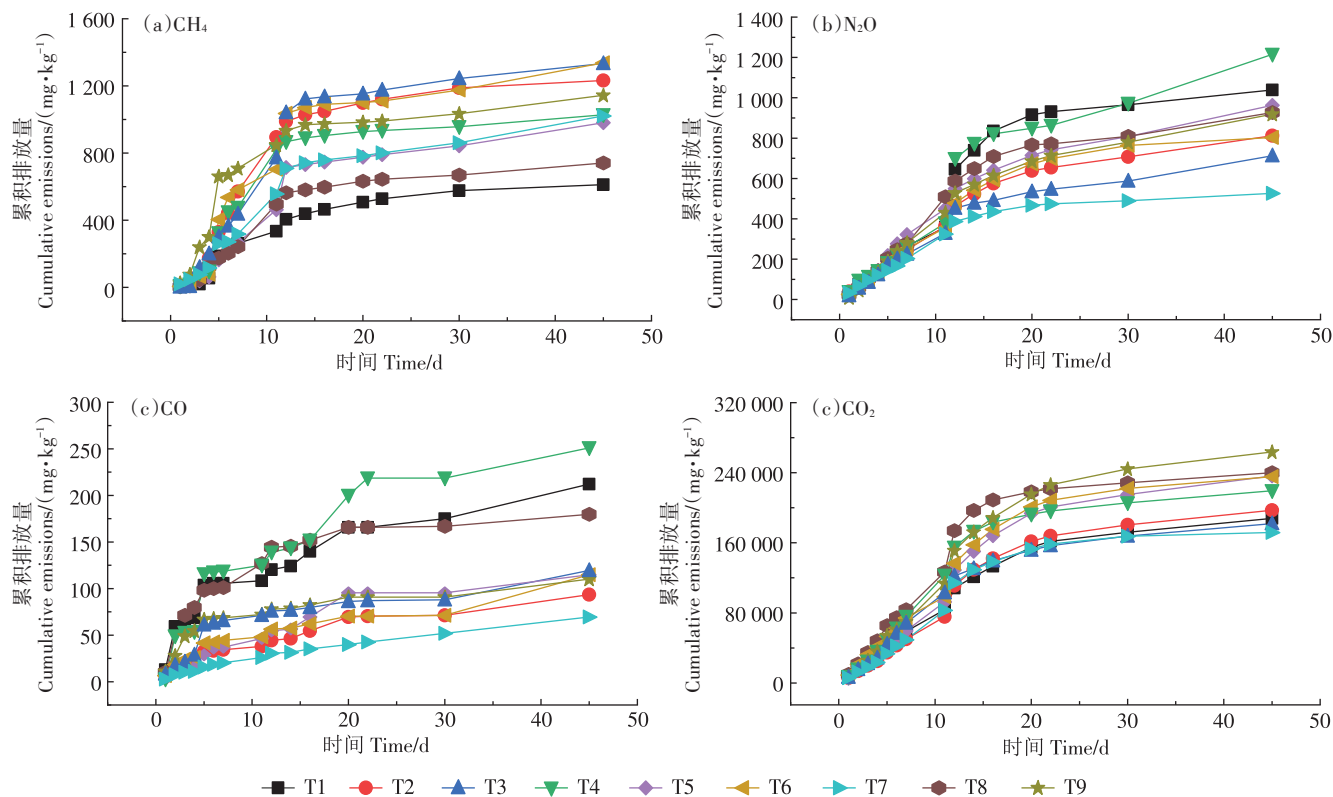


图5 整个堆肥周期温室气体累积排放量的变化情况

Figure 5 Changes of cumulative emissions for greenhouse gases during the whole composting period

CO₂、N₂O 和 CO 减排。

2.4 鸡粪堆肥过程中 NH₃ 和温室气体减排条件分析

2.4.1 NH₃ 减排的最佳条件

根据 9 组正交实验结果,以整个堆肥周期(45 d)内不同处理组 NH₃ 最终累积排放量(Q , mg·kg⁻¹)为参考,采用多因子正交实验分析方法结果分析表逐一筛选出平均 Q 值(即 k_1 或 k_2 或 k_3)最小时对应的因子水平,这些因子水平组合起来即为有利于 NH₃ 减排的最佳堆肥条件。分析结果表明,有利于 NH₃ 减排的最佳堆肥条件为:含水率 60%、添加 5% 椰壳生物炭、添加 10% 钙镁磷肥、通风速率为 0.08 L·min⁻¹·kg⁻¹(表 4)。

2.4.2 温室气体减排的最佳条件

采用与 NH₃ 一样的多因子正交实验结果分析表,首先筛选出有利于 CH₄ 减排的最佳堆肥条件组合为:含水率 60%、添加 5% 椰壳生物炭、不添加钙镁磷肥、通风速率为 0.12 L·min⁻¹·kg⁻¹(表 4)。然后采用同样的分析方法,分别筛选出有利于 N₂O、CO、CO₂ 减排的最佳堆肥条件组合。分析发现,4 种温室气体的最佳减排条件组合均不同,但各因子间有相似之处,最有利于 4 种温室气体减排的因子水平集中为 2 个水平:含水率为 50% 或 60%,椰壳生物炭和钙镁磷肥添加比

例均为 0 或 5%,通风速率为 0.12 L·min⁻¹·kg⁻¹ 或 0.20 L·min⁻¹·kg⁻¹。

2.4.3 NH₃ 和温室气体协同减排条件

总体看来,鸡粪堆肥过程中 NH₃ 和 4 种温室气体(CH₄、N₂O、CO、CO₂)的最佳减排条件都各不相同,存在“此消彼长”的关系^[13]。考虑到大气本底值 CO₂ 含量非常高且会被植物光合作用吸收固定,同时鸡粪堆肥 CO 累积排放量较低,因此本研究主要考虑 NH₃、CH₄ 和 N₂O 三者的协同减排。根据不同因子影响下平均累积排放量最大值与最小值的差值大小判断,对 NH₃、CH₄ 和 N₂O 排放影响较大的因子是椰壳生物炭占比、钙镁磷肥占比和通风速率(表 4),有利于这 3 种气体协同减排的条件为含水率 60%、椰壳生物炭 0 或 5%、钙镁磷肥 0 或 5% 或 10%、通风速率 0.12 L·min⁻¹·kg⁻¹,其中含水率 60%、椰壳生物炭 5% 和通风速率 0.12 L·min⁻¹·kg⁻¹ 是 NH₃ 和 CH₄ 协同减排的最佳条件。研究表明:物料含水率在 60%~70% 有利于 N₂O 减排^[32],含水率在 50%~60% 时有助于 CH₄ 减排,高含水率有助于 NH₃ 减排^[13],考虑到含水率 60% 利于堆肥原料升温腐熟,故 NH₃、CH₄、N₂O 协同减排的含水率推荐 60%;同时考虑到通风时节约生产成本,故这 3 种

表4 NH₃、CH₄、N₂O协同减排条件分析

Table 4 Analysis of optimal conditions for synergistic emission reduction of NH₃, CH₄ and N₂O

类别 Category	温室气体 Greenhouse gas	含水率 Moisture content	椰壳生物炭占比 Ratio for coconut shell biochar	钙镁磷肥占比 Ratio for calcium magnesium phosphate fertilizer	通风速率 Aeration rate
平均累积排放量最大与最小差值(mg·kg ⁻¹)	NH ₃	34.3	104.9	171.0	126.3
	CH ₄	142.9	157.4	509.8	155.9
	N ₂ O	101.9	229.6	256.5	258.3
减排最佳条件	NH ₃	60%	5%	10%	0.08 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹
	CH ₄	60%	5%	0	0.12 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹
	N ₂ O	50%	0	5%	0.20 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹
协同减排条件		60%	0或5%	0或5%或10%	0.12 L·min ⁻¹ ·kg ⁻¹

气体协同减排的通风速率推荐0.12 L·min⁻¹·kg⁻¹。添加生物炭能显著减少NH₃与CH₄排放,而对于N₂O减排效果并不显著^[33],这也与本研究分析得出的结论吻合。另外,钙镁磷肥含量不同对NH₃、CH₄、N₂O三者的减排效果也不同,本研究中不同处理组之间影响因素差异较大,可能导致钙镁磷肥添加对这3种气体排放的影响无法准确体现。综上,椰壳生物炭和钙镁磷肥配比明显影响鸡粪堆肥过程中NH₃、CH₄和N₂O的协同减排效果,后续有必要对椰壳生物炭和钙镁磷肥的添加情况进一步优化。

2.5 鸡粪堆肥过程中典型样品的微生物群落结构分析

2.5.1 微生物丰度和多样性

根据第0、5、12、22天样品16S rRNA测序结果,进行Alpha多样性分析(包括OUT个数、Chao 1指数、Coverage指数和Shannon指数),评估9组堆肥样品中微生物群落的丰度和多样性。分析结果表明,各样本

的OUT个数范围为247~595个,且每个样品的Coverage指数均在0.990以上,表明样品中的大部分微生物群落能被检测到,足以反映堆体中微生物群落多样性的变化情况^[34]。

2.5.2 门水平细菌群落结构分析

9组堆肥典型样品中门水平的细菌群落变化情况如图6所示。总体看来,9组样品在门水平的优势菌为Firmicutes(7.33%~84.91%)、Actinobacteria(5.15%~36.78%)、Bacteroidetes(0.12%~46.89%)和Proteobacteria(0.43%~37.17%)。堆肥前期(12 d以前),所有样本中Firmicutes都是相对丰度最高的优势菌门,这可能是蘑菇渣菌棒中木屑含有的大量木质素有利于Firmicutes中的菌类生存繁殖^[35],而到堆肥中后期(第22天),其含量明显降低,这可能是因为堆体内的木质素和C、N等元素大量消耗。总体而言,Firmicutes是堆肥前期丰度最高的优势菌门,Bacteroidetes是堆肥

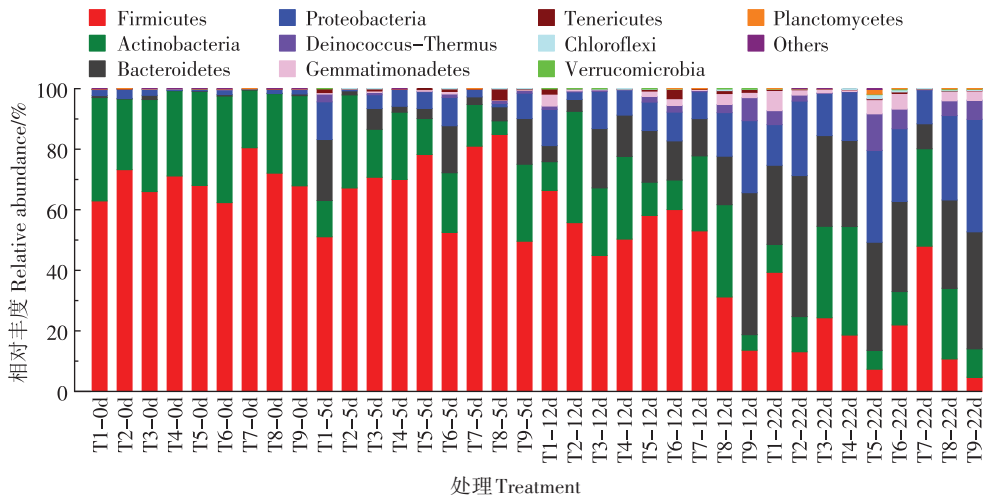


图6 各处理组细菌群落门水平相对丰度及其变化情况

Figure 6 Relative abundance and changes of bacterial community at phylum level in each treatment group

中后期相对丰度明显上升的优势菌门。有关研究表明 Firmicutes 与 CO_2 、 NH_3 、 CH_4 的排放量变化呈正相关,而 Bacteroidetes 与 N_2O 的排放量上升有关^[36]。

2.5.3 属水平细菌群落结构分析

9组堆肥典型样品中属水平细菌群落变化情况如图7所示。总体看来,9组处理不同堆肥样本中相

对丰度居于前5位的优势菌为 *Corynebacterium_1*、*Staphylococcus*、*Atopostipes*、*Nosocomiicoccus*、*Bacillus*, 其中前4个菌属在堆肥前期的相对丰度远高于中后期;*Bacillus* 在整个堆肥周期中相对丰度基本保持稳定,这是因为 *Bacillus* 能形成较厚的孢子壁以抵抗高温、辐射等不良影响,在碳水化合物代谢中起到重要

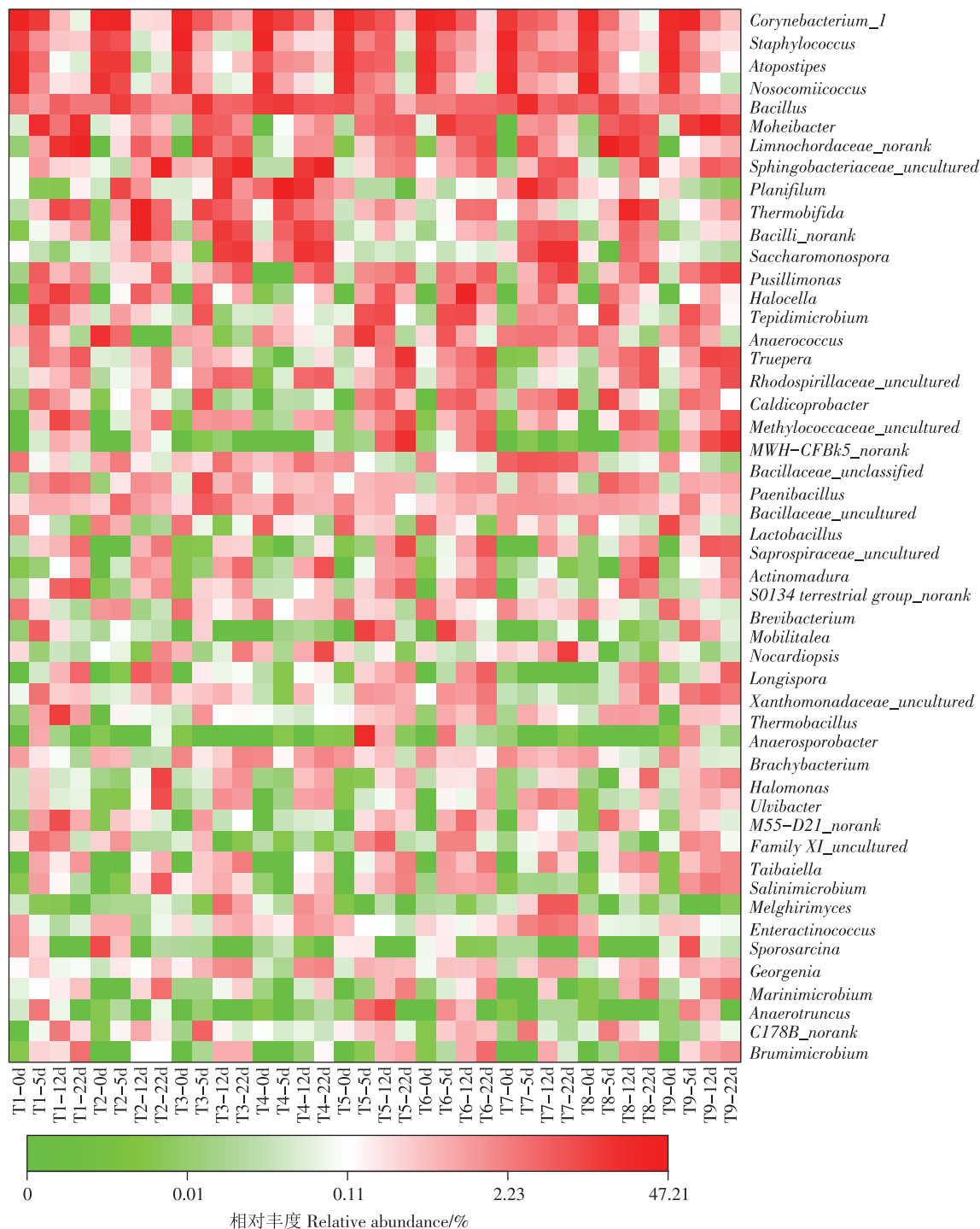


图7 各处理组细菌群落属水平丰度及其变化情况

Figure 7 Relative abundance and changes of bacterial community at genus level in each treatment group

作用^[37]。有研究表明 *Bacillus* 与 CH_4 排放量呈正相关, 与 N_2O 、 CO_2 排放量呈显著正相关^[38]。

2.6 环境因子、微生物群落及气体排放通量相关性分析

2.6.1 微生物群落与环境因子之间的相关性

堆肥典型样品中微生物(门水平)群落与环境因子之间的相关性分析如图8a所示。不同处理组堆肥样品之间的分散分布,表明环境因子变化导致了细菌群落相对丰度的差异。所选环境因子对微生物群落相对丰度的解释量一共为47.8% ($P<0.05$)。环境因子对细菌群落结构及丰度影响的相关性排序为 $\text{C/N}>\text{温度}>\text{电导率}>\text{含水率}>\text{NO}_3^--\text{N}>\text{pH}>\text{NH}_4^+-\text{N}$, 其中 C/N 和温度的影响最为显著 ($P<0.05$), 其对解释量的贡献分别为44.0%和39.4%, 这表明微生物群落增长繁殖对 C/N 和温度的变化比较敏感, 这与前期鲁伦慧^[39]的研究结论基本一致。温室气体相关优势菌 *Firmicutes* 与 C/N 和温度呈正相关, *Bacteroidetes* 与 C/N 和温度呈负相关。

2.6.2 微生物群落与气体排放通量之间的相关性

微生物(门水平)群落与气体排放通量之间的相关性见图8b。堆肥样品中测出的主要细菌群落对 NH_3 和温室气体排放通量的解释量一共为43.4% ($P<0.05$), 它们对 NH_3 和温室气体排放通量变化影响的相关性排序为 *Firmicutes*>*Tenericutes*>*Bacteroidetes*>*Planctomycetes*>*Gemmatimonadetes*>*Proteobacteria*>*Actinobacteria*, 其中 *Firmicutes* 和 *Tenericutes* 是影响 NH_3

和温室气体排放的主要优势菌群 ($P<0.01$), 其对解释量的贡献分别为43.2%和22.2%。具体来说, *Firmicutes*、*Tenericutes* 与 NH_3 、 CH_4 、 N_2O 、 CO 、 CO_2 的排放通量均呈正相关 ($P<0.01$)。其中 *Firmicutes* 在大多数堆肥样品中的相对丰度均最高, 而 *Tenericutes* 的相对丰度则整体较低, 所以可以推测堆肥过程中 NH_3 、 CH_4 、 N_2O 、 CO 、 CO_2 排放通量的变化主要由 *Firmicutes* 活动造成^[33]。

3 结论

(1) 鸡粪经45 d的好氧堆肥后, 温度、pH、含水率、种子发芽指数等指标表明大多数处理组的堆肥都已经完全腐熟, 且添加一定比例的椰壳生物炭与钙镁磷肥可以提高堆肥腐熟度。

(2) 不同条件的鸡粪好氧堆肥过程中, NH_3 和4种温室气体 (CH_4 、 N_2O 、 CO 、 CO_2) 的排放特征具有明显差异, 堆肥前期(1~22 d) NH_3 和温室气体的排放通量较高、累积排放量升幅较大, 且人工翻堆会增加气体排放通量。

(3) 鸡粪好氧堆肥过程中, NH_3 和4种温室气体 (CH_4 、 N_2O 、 CO 、 CO_2) 的协同减排难以实现。有利于 NH_3 、 CH_4 、 N_2O 协同减排的条件为含水率60%、椰壳生物炭0或5%、钙镁磷肥0或5%或10%、通风速率 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; NH_3 和 CH_4 协同减排的最佳条件为含水率60%、椰壳生物炭5%、通风速率 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

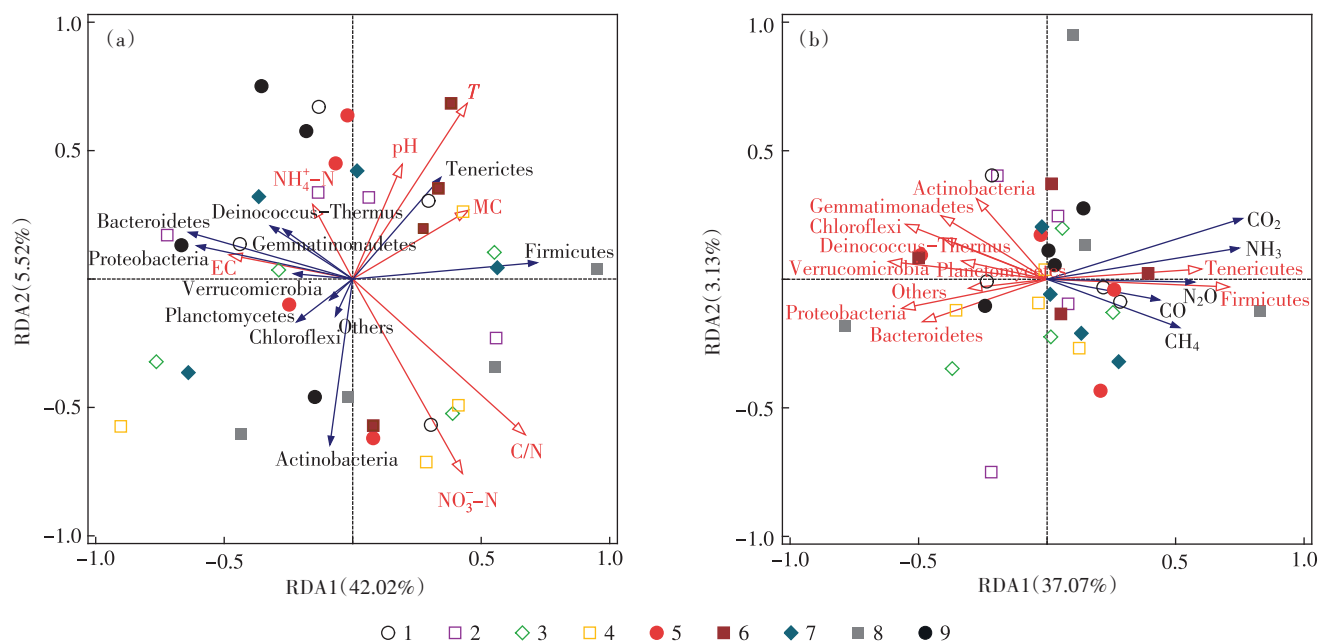


图8 环境因子、气体排放通量与微生物群落的相关性分析

Figure 8 Correlation analysis between environmental factors/gases emission flux and microbial community

(4)冗余分析表明:堆肥体系中的微生物群落与C/N与温度的变化有相关性,其中Firmicutes与C/N和温度呈正相关,且Firmicutes对NH₃与温室气体的排放具有显著影响。

参考文献:

- [1] ZHAO S, SCHMIDT S, QIN W, et al. Towards the circular nitrogen economy: a global Meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704:135–401.
- [2] 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.
- [3] ZHANG Z, LIU D, QIAO Y, et al. Mitigation of carbon and nitrogen losses during pig manure composting: a Meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 783:147–103.
- [4] 王秀红, 史向远, 张纪涛, 等. 鸡粪好氧堆肥腐熟度、重金属残留及微生物菌群分析[J]. 山西农业科学, 2021, 49(9): 1094–1099. WANG X H, SHI X Y, ZHANG J T, et al. Analysis of maturity, heavy metal residues and microbial flora of chicken manure aerobic compost [J]. *Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(9): 1094–1099.
- [5] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 鸡粪堆肥过程中各种氮化合物的变化及腐熟度评价指标[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1532–1537. BAO Y Y, ZHOU Q X, YAN L, et al. Changes of various nitrogen-containing compounds in composting of chicken manure and indexes of maturity evaluation[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2007, 26(4): 1532–1537.
- [6] 李明章, 李彦明, 王珏, 等. 好氧堆肥去除畜禽粪便病原体的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 864–872. LI M Z, LI Y M, WANG J, et al. Research progress on aerobic composting for removing pathogens from livestock manure[J]. *Journal of Agricultural Resources and the Environment*, 2023, 40(4): 864–872.
- [7] 袁学华. 畜禽粪便好氧堆肥和厌氧发酵过程中典型抗生素消减研究进展[J]. 池州学院学报, 2021, 35(6): 32–36. YUAN X H. Research progress of subtracting typical antibiotics in aerobic composting and anaerobic fermentation of livestock and poultry manure[J]. *Chizhou College Journal*, 2021, 35(6): 32–36.
- [8] 王真, 张洪昌, 沈根祥, 等. 结合态雌激素在堆肥过程中的降解与转化研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2860–2870. WANG Z, ZHANG H C, SHEN G X, et al. Degradation and transformation of conjugated estrogens during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2860–2870.
- [9] 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): 3992–4000. LI Y, QIU H Z, ZHANG J B, et al. Effects of superphosphate and furfural residue addition on NH₃ emissions and nitrogen conversion during the aerobic composting[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(12): 3992–4000.
- [10] TONG B, WANG X, WANG S, et al. Transformation of nitrogen and carbon during composting of manure litter with different methods[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293:122046.
- [11] CHEN W, LIAO X, WU Y, et al. Effects of different types of biochar on methane and ammonia mitigation during layer manure composting [J]. *Waste Management*, 2017, 61: 506–515.
- [12] JIANG T, MA X, TANG Q, et al. Combined use of nitrification inhibitor and struvite crystallization to reduce the NH₃ and N₂O emissions during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 210–218.
- [13] 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.
- [14] 赵晨阳, 李洪枚, 魏源送, 等. 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 533–540. ZHAO C Y, LI H M, WEI Y S, et al. Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure wind-row composting[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 533–540.
- [15] WANG X Q, CUI H Y, SHI J H, et al. Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 198: 395–402.
- [16] GAO M, LI B, YU A, et al. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 1899–1903.
- [17] BERNAL M P, SOMMER S G, CHADWICK D, et al. Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits[J]. *Advances in Agronomy*, 2017, 144: 143–233.
- [18] 杨燕, 尹子铭, 袁京, 等. 双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2439–2447. YANG Y, YIN Z M, YUAN J, et al. Effects of dicyandiamide and hydroquinone on greenhouse gas emissions during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2439–2447.
- [19] BERNAL M P, ALBURQUERQUE J A, MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5444–5453.
- [20] GE M, ZHOU H, SHEN Y, et al. Effect of aeration rates on enzymatic activity and bacterial community succession during cattle manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 304: 122928.
- [21] LIU H, WANG L, LEI M. Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 273: 25–33.
- [22] 孟庆欣. 牛粪玉米秸秆堆肥中微生物群落演替及互作关系研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020. MENG Q X. Communities in cow manure and corn stalk composting[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [23] 王成. 堆肥过程N₂O减排控制与木质纤维素降解微生物学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. WANG C. Nitrous oxide mitigation and lignocellulose degradation in manure composting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [24] 邵淼, 杨淑英, 张增强, 等. 不同处理对高含水率奶牛粪便好氧堆

- 肥的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):982-989. SHAO M, YANG S Y, ZHANG Z Q, et al. Effect of different treatments on composting of high moisture content dairy manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):982-989.
- [25] WOLTER M, PRAYITNO S, SCHUCHARDT F. Greenhouse gas emission during storage of pig manure on a pilot scale[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3):235-244.
- [26] 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 moisture content and C/N coupling on greenhouse gas emissions during donkey dung composting[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(2):341-347.
- [27] AWASTHI M K, WANG M, CHEN H, et al. Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224:428-438.
- [28] MULBRY W, AHN H. Greenhouse gas emissions during composting of dairy manure: influence of the timing of pile mixing on total emissions[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 126:117-122.
- [29] MAEDA K, TOYODA S, PHILIPPOT L, et al. Relative contribution of nir K- and nir S- bacterial denitrifiers as well as fungal denitrifiers to nitrous oxide production from dairy manure compost[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(24):14083-14091.
- [30] MAEDA K, TOYODA S, SHIMOJIMA R, et al. Source of nitrous oxide emissions during the cow manure composting process as revealed by isotopomer analysis of and *amoA* abundance in betaproteobacterial ammonia-oxidizing bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(5):1555-1562.
- [31] 巴士迪, 张克强, 杨增军, 等. 奶牛粪便翻堆式与槽式堆肥过程气体排放规律及养分损失原位监测[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2):420-429. BA S D, ZHANG K Q, YANG Z J, et al. The *in-situ* monitoring of gas emissions and nutrient losses from turning and trough composting of dairy manure[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(2):420-429.
- [32] 吴伟祥, 李丽劫, 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, LÜ 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.
- [33] 张岷, 李龙威, 王鑫, 等. 生物炭对畜禽粪便好氧堆肥的影响研究进展[J]. 玉米科学, 2022, 30(6):138-148. ZHANG D, LI L W, WANG X, et al. Biochar research progress on the influence of the aerobic compost of animal manure[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(6):138-148.
- [34] LI Y, LIU Y, YONG X, et al. Odor emission and microbial community succession during biogas residue composting covered with a molecular membrane[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297:122518.
- [35] BLANC M, MARILLEY L, BEFFA T, et al. Thermophilic bacterial communities in hot composts as revealed by mostprobable number counts and molecular (16S rDNA) methods[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1999, 28(2):141-149.
- [36] 贺仕磊, 周倩倩, 弓亚方, 等. 基于麦饭石与添加剂不同联用方式对猪粪堆肥过程的调控[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7):2417-2426. HE S L, ZHOU Q Q, GONG Y F, et al. Regulation of the pig manure composting process based on the different combined methods of medical stone and additives[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(7):2417-2426.
- [37] ANTUNES L P, MARTINS L F, PEREIRA R V, et al. Microbial community structure and dynamics in thermophilic composting viewed through metagenomics and metatranscriptomics[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:38915.
- [38] 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.
- [39] 鲁伦慧. 农业废物堆肥中木质素降解功能微生物群落结构研究[D]. 长沙:湖南大学, 2014. LU L H. Researches on the ligninolytic functional microbial communities constructions during agricultural waste composting[D]. Changsha:Hunan University, 2014.

(责任编辑:李丹)