

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

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0986>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

不同形态猪粪储用过程的气态氮损失特征

耿宇聪, 张涛, 王洪媛, 李俊改, 翟丽梅, 杨波, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1818-1828 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0096>

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISSETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039-2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829-1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

生物质炭对城市污泥堆肥温室气体排放的影响

杨雨滢, 易建婷, 任小玉, 蒋越, 陈宏, 张成

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 567-575 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1229>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.
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.



开放科学 OSID

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*

(中国农业大学资源与环境学院 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

摘要:堆肥是畜禽粪便资源化利用的重要技术,但堆肥过程中碳氮损失会降低产品的农用价值并造成温室气体排放。堆肥过程中的污染气体排放受多种因素影响,本文综述了堆肥原料类型、辅料类型、初始C/N、含水率和通风速率对畜禽粪便堆肥过程碳氮损失和温室气体(CH₄、NH₃、N₂O)排放的影响。结果发现:48.7%的C和27.7%的N在堆肥过程中损失,其中CH₄-C损失平均占初始总碳的0.5%,NH₃-N和N₂O-N损失分别占初始总氮的18.9%和1.1%。不同种类粪便堆肥碳氮损失差异明显,猪粪和鸡粪堆肥的温室气体排放量高于牛粪和羊粪。选择富含C的辅料与畜禽粪便联合堆肥均可促进有机物降解,其中以稻草或锯末为辅料时的温室气体排放量较低。初始C/N对堆肥过程N损失影响较大,总氮、NH₃和N₂O的损失均随C/N的增加而降低,其中C/N为20~25时最适宜N素保留。初始含水率显著影响CH₄和N₂O的排放,其排放量随含水率的增加呈显著上升趋势,以含水率为60%~65%最为适宜。通风速率(以堆肥干基计)为0.1~0.2 L·kg⁻¹·min⁻¹时,CH₄排放和总碳损失较低;通风速率为0.1~0.3 L·kg⁻¹·min⁻¹时,N₂O、NH₃和总氮损失较低。因此,为降低畜禽粪便堆肥过程碳氮损失和温室气体排放量,建议采用的工艺参数为:通风速率0.1~0.3 L·kg⁻¹·min⁻¹、含水率60%~65%、C/N为20~25。

关键词: 畜禽粪便;堆肥;碳氮损失;温室气体;影响因素

中图分类号:S141.4;X16 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)11-2428-11 doi:10.11654/jaes.2021-0986

A review of carbon and nitrogen losses and greenhouse gas emissions during livestock manure composting

YUAN Jing, LIU Yan, TANG Ruolan, MA Ruonan, LI Guoxue*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Composting is an important technology for including animal manure in resource utilization. At present, emitted gasses and carbon and nitrogen losses during composting can reduce compost's agricultural value and exacerbate the atmospheric greenhouse effect. The composting process is affected by several factors. This article summarized types of raw materials, auxiliary materials, initial C/N, initial moisture content, ventilation rate of greenhouse gas (CH₄, NH₃, N₂O) emissions, and carbon and nitrogen losses. Nearly half (48.7%) of initial C and one-third (27.7%) of initial N content were lost during composting under current management practices. Average loss of carbon in the form of CH₄ accounted for 0.5% of the initial TC, and loss of nitrogen in NH₃ and N₂O forms accounted for 18.9% and 1.1% of initial TN, respectively. Composting with different raw materials significantly altered these parameters. The greenhouse gas emissions of pig and chicken manure compost were higher than those of cow and sheep manure composts. Choosing C-rich auxiliary materials, and composting with livestock and poultry manure could promote organic matter degradation. Among the potential auxiliary materials, when

收稿日期:2021-08-30 录用日期:2021-10-15

作者简介:袁京(1988—),女,山西吕梁人,副教授,从事废弃物处理与资源化利用研究。E-mail:jingyuan@cau.edu.cn

*通信作者:李国学 E-mail:ligx@cau.edu.cn

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-39);三亚崖州湾科技城管理局资助项目(SYND-2021-09)

Project supported: China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-39); Project of Science and Technology Administration of Sanya Yazhou Bay in China (SYND-2021-09)

straw or sawdust was used, greenhouse gas emissions were lower. The C/N ratio greatly influenced N loss, and overall loss of NH_3 , N_2O , and TN decreased with increasing C/N. C/N ratios between 20 and 25 were most suitable for retention of N. Initial moisture content significantly affected CH_4 and N_2O emissions, with emissions increasing significantly with increasing moisture content. Overall, the most suitable moisture content was 60%~65%. A ventilation rate (based on dry matter) of $0.1\sim 0.2 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ reduced relative CH_4 emissions and TC loss. A ventilation rate of $0.1\sim 0.3 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ reduced relative N_2O , NH_3 and TN losses. Therefore, to reduce carbon and nitrogen losses and greenhouse gas emissions during composting, the recommended process parameters are as follows: ventilation rate $0.1\sim 0.3 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, moisture content of 60%~65%, and C/N ratio of 20~25.

Keywords: livestock manure; composting; carbon and nitrogen losses; greenhouse gas; influencing factor

固体废物的可持续利用已成为当今社会面临的巨大挑战之一。据估计,到2025年,全球固体废物产生量将超过600万 $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[1],其中,有将近一半(46%)的固体垃圾为有机固体垃圾,包括畜禽粪便、农作物秸秆、农业副产品和食物垃圾等^[2]。大量有机垃圾的产生可主要归因于全球粮食需求的不断增长,以及随之而来的养殖业、种植业和食品加工产业的规模化和集约化发展^[3]。好氧堆肥技术是对有机垃圾进行有效处理和利用的重要方式,是符合可持续循环农业经济发展的要求,也是将营养物质循环回土壤的重要措施^[2-3]。尤其对于集约化畜禽养殖业而言,堆肥技术不仅可以减少畜禽粪便量,避免粪便堆积对环境造成直接污染,同时还可形成利于土壤质量提升和作物生长的土壤改良剂或有机肥料,通过有机碳和养分的回收实现资源再利用^[1-4]。目前,粪便好氧堆肥技术已成为备受关注的粪便管理形式,但堆肥过程中有机质降解会伴随着碳素(C)和氮素(N)的损失。微生物快速降解有机质会释放大量的 CO_2 ,这使得 CO_2 气体排放成为C损失的主要途径,研究证实,堆肥期间因 CO_2 释放造成的C损失约占原料总碳(TC)的31.4%~57.9%^[5-8]。 CH_4 排放是造成C损失的另一重要途径,尽管堆肥过程中以 CH_4 排放损失的C一般低于原料TC的10%,但其全球增温潜势却是 CO_2 的25~28倍^[9-11]。堆肥过程中的N损失与矿化、氨化、硝化和反硝化等生化转化过程相关^[1]。N转化过程中 NH_3 的排放难以避免,研究证实,堆肥过程中大部分的N损失皆由 NH_3 排放所致^[12-15]。与 NH_3 相比, N_2O 产生量较低,占原料总氮(TN)的1%~6%,但其全球增温潜势却是 CO_2 的265~298倍^[4-5,9,11]。粪便在堆肥过程中会向大气排放 NH_3 、 CH_4 和 N_2O 气体,这不仅造成养分流失,降低有机肥农用价值,还可能致全球变暖、土壤酸化以及雾霾等一系列二次污染问题^[1-4]。

因此,堆肥过程中 NH_3 、 CH_4 和 N_2O 的产生和排放一直是研究者们关注的热点。多项研究已证实,堆肥过程中的气体排放与堆肥原料性质以及工艺条件相

关,堆肥物料的组成(原料和辅料)、性质(C/N、含水率)以及堆肥通风条件是影响气体排放的重要因素^[7,9,13,16-20]。然而,目前关于堆肥过程温室气体排放的综述大多仅围绕某种单一畜禽粪便(如牛粪或猪粪)进行,研究对象以 NH_3 居多,且主要关注减排效果^[1-4]。本研究中的堆肥原料涵盖了主要的畜禽粪便(猪粪、鸡粪、牛粪和羊粪)和辅料,以温室气体(NH_3 、 CH_4 和 N_2O)为研究对象,分析堆肥过程中不同工艺参数对温室气体排放的影响。本研究共检索到有关畜禽粪便堆肥的中外文文献69篇、试验结果293项,旨在量化畜禽粪便堆肥过程TC和TN损失;量化堆肥过程温室气体(NH_3 、 CH_4 和 N_2O)损失;分析初始物料组成、性质(C/N和含水率)和过程控制(通风速率)对温室气体排放的影响。研究结果可为有效降低温室气体排放技术提供数据支撑。

1 数据来源与分析

1.1 数据来源

本研究利用Web of Science和中国知网(CNKI)数据库,搜索发表时间在2000—2021年间有关畜禽粪便堆肥过程中 NH_3 、 CH_4 和 N_2O 气体排放的研究成果。文献检索的关键词包括堆肥、好氧堆肥、好氧发酵、好氧消化、温室气体、甲烷、一氧化二氮、氨。为了确保检索出版物的可靠性,本研究进一步为文章的选择设定了系列标准,首先根据标题和摘要选择潜在的论文,然后对全文进行检查,最后,根据以下标准选择相关论文:(1)研究的对象应是好氧堆肥;(2)堆肥原料应至少含有畜禽粪便中的一种;(3)研究的结果中应至少包含堆肥过程中 NH_3 -N损失、 CH_4 -C损失和 N_2O -N损失中的一项指标,C、N损失指研究过程中的累积损失,用堆肥初始C、N总量的质量分数(%)表示;(4)研究的材料与方法中应简要描述堆肥的原料特性、过程控制和测定方法等内容;(5)多篇文献中的相同结果,只进行一次筛选;(6)数据获取不是基于模型。

本研究通过以上标准共筛选出69篇文献293组数据,其中关于 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失的有34篇文献146组数据,关于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失的有61篇文献263组数据,关于 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失的有57篇文献237组数据。基于气体排放的研究中,含有TC损失的有30篇文献138组数据,含有TN损失的有60篇文献258组数据。本研究将每篇文献中的详细数据按照堆肥数据库不同板块的内容要求进行提取录入,对于研究结果在图上不能直接获取的数据,本研究通过Origin 2019软件进行挖掘录入。堆肥数据库包括原料组成(原料和辅料)、物料特性(初始C/N和含水率)、过程控制(通风速率)、C素排放($\text{CH}_4\text{-C}$ 和TC损失)和N素排放($\text{NH}_3\text{-N}$ 损失、 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失和TN损失)5个板块。

为分析堆肥过程中物料组成、物料特性和过程控制参数对C素和N素损失的影响,本研究选择了5个影响变量:原料种类、辅料种类、初始C/N、初始含水率和通风速率。其中原料种类分为4种:猪粪、鸡粪、牛粪和羊粪;辅料种类分为8种:玉米秸秆、小麦秸秆、锯末、菌糠、烟末、稻草、其他和无辅料;初始C/N分为6个范围: <10 、 $10\sim 15$ 、 $15\sim 20$ 、 $20\sim 25$ 、 $25\sim 30$ 和 >30 ;含水率分为6个范围: $<50\%$ 、 $50\%\sim 55\%$ 、 $55\%\sim 60\%$ 、 $60\%\sim 65\%$ 、 $65\%\sim 70\%$ 和 $>70\%$;通风速率(以堆肥干基计)分为6个范围: $0\sim 0.1$ 、 $0.1\sim 0.2$ 、 $0.2\sim 0.3$ 、 $0.3\sim 0.4$ 、 $0.4\sim 0.6$ $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 >0.6 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,其中间歇式强制通风速率一律折算为连续式强制通风下的通风速率。

1.2 数据分析

采用Excel 2019软件进行数据整理和分类,Origin 2019软件对分析结果制图。

2 物料组成对碳氮损失的影响

2.1 TC和 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失

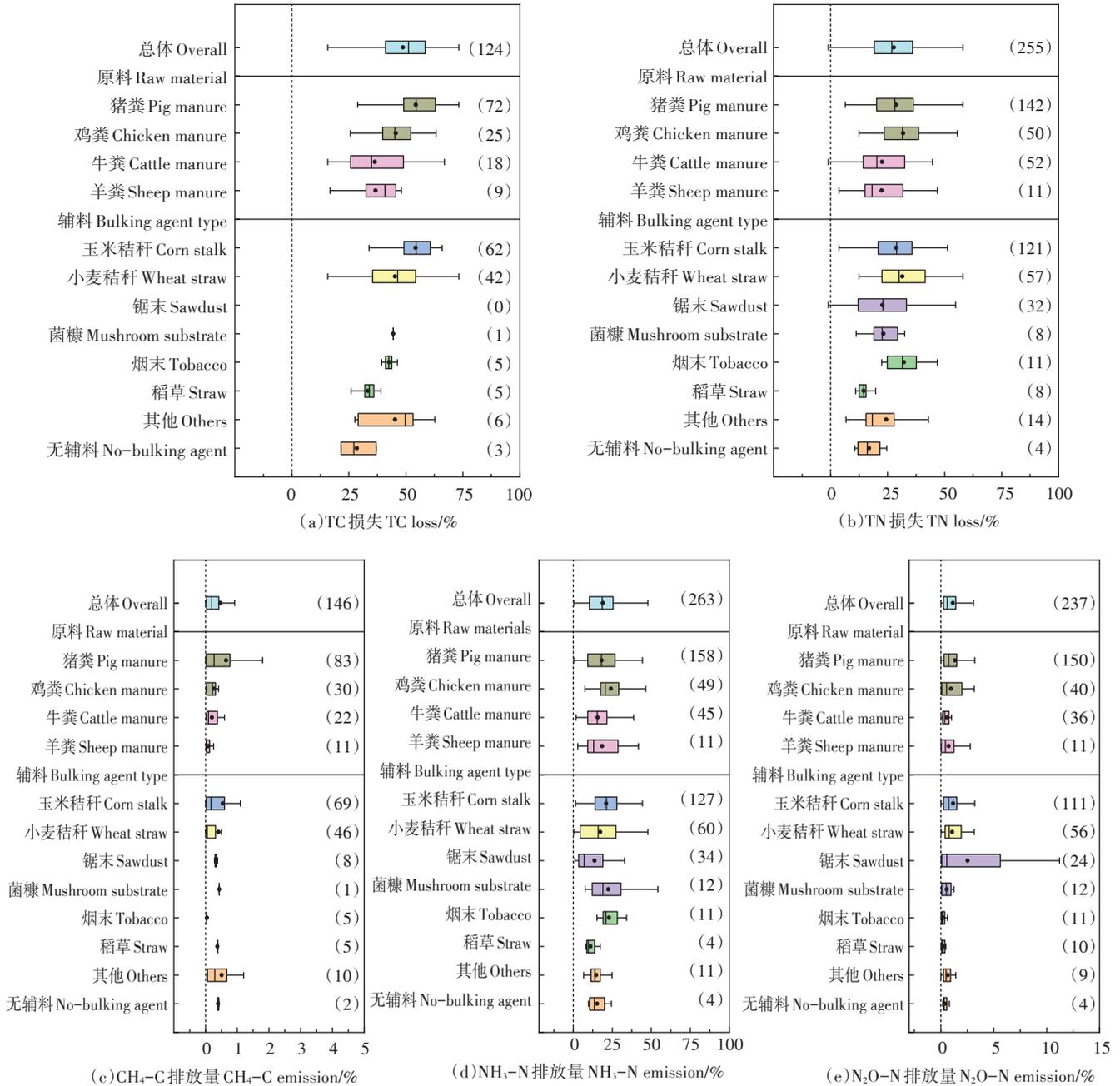
畜禽粪便好氧堆肥过程中平均有近一半(48.7%)的初始TC会损失(图1a)。不同堆肥原料间的TC损失差异较大,其中,猪粪堆肥的TC损失(54.3%)最高,鸡粪堆肥的TC损失(45.6%)次之,两者均显著高于牛粪(36.4%)和羊粪(36.7%)。以猪粪为原料的TC损失率(54.3%)与ZHANG等^[3]的Meta分析结果(48.7%)有一定差异,但差别较小,可能与研究的样本量或过程控制的不同有关。CHEN等^[21]针对猪粪、鸡粪和羊粪堆肥之间的差异进行了试验研究,认为可能是猪粪相对较高的堆积密度促进了有机质的降解,因此猪粪堆肥的TC损失率较高。畜禽粪便通常与辅料联合进行堆肥,以将原料初始C/N、含

水率和堆积密度调整到适宜范围。从图1a可知,不添加辅料的TC损失最低(28.6%),这与其较低的有机质降解有关,一般此种堆肥温度较低,堆肥也较难达到腐熟。辅料的添加会增加TC损失,这主要是由于辅料均富含C,但不同种类辅料之间的TC损失具有明显差异。以玉米秸秆为辅料时TC损失最高(超过50%),添加稻草时TC损失(33.4%)最低,小麦秸秆、烟末和其他辅料(番茄秧、木本泥炭等)之间则差别较小(42.6%~45.3%)。由于样本量较少,锯末、菌糠对TC损失的影响尚不清楚。ZHANG等^[3]和BARRINGTON等^[22]认为不同辅料之间的TC损失差异主要是由C源、颗粒大小和混合比引起的。ZHANG等^[23]则认为,玉米秸秆中含有的纤维素比木本泥炭中的木质素更易降解,因而添加玉米秸秆时TC损失更高。MICHEL等^[24]和HAO等^[25]的研究也显示,与使用木质素含量较低的秸秆堆肥相比,使用富含木质素(木屑和锯末)的辅料时,堆肥基质的生物降解性明显降低。NOLAN等^[26]认为这主要是由于木质素含量高时,秸秆堆肥会对化学和酶促降解作用产生极强的抵抗力。因此,不同辅料之间的TC损失差异可能还与纤维素和木质素的含量密切相关。

在所有研究中,畜禽粪便好氧堆肥过程通过 CH_4 损失的C占初始TC的0.5%,占堆肥过程TC损失的1.0%。不同堆肥原料之间的 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失存在差异(图1c),具体为猪粪(0.7%)>鸡粪(0.3%)>牛粪(0.2%)>羊粪(0.1%)。堆肥过程中 CH_4 主要由产甲烷菌在局部厌氧环境中产生,因此, $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失与堆肥原料的堆积密度密切相关。CHEN等^[21]还认为,猪粪和鸡粪中的N含量高于羊粪,高N含量可以提高产甲烷菌的C底物利用率,因此也可增加 CH_4 排放。从辅料来看,添加玉米秸秆的 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失(0.5%)与其他辅料(番茄秧、木本泥炭等,0.5%)相近,均略高于小麦秸秆(0.4%),而以锯末为辅料时 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失(0.3%)最低。由于样本量较少,菌糠、烟末、稻草和无辅料时的 CH_4 排放情况尚未可知。SUN等^[27]研究了堆肥过程中添加玉米秸秆和锯末的差异,认为导致锯末 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失较低的原因有3点:一是锯末较高的木质素含量降低了堆肥物料的生物降解性;二是锯末具有较大的比表面积和吸附性;三是与锯末较小的填充颗粒有关,其可在物料内部形成均匀的多孔结构而成为真正有效的氧气扩散器。

2.2 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失

如图1b所示,好氧堆肥过程中的TN损失平均为



括号中的数值代表观察到的实验数量。圆圈代表平均值;方框的左右边界分别代表25%和75%的四分位数;方框中的线代表中值;左、右胡须帽分别代表第10个和第90个百分位数。下同

The values in parentheses represent the numbers of experimental observations. The circles represent the average value; the left and right boundaries of box represent the 25% and 75% quartiles, respectively; the lines in box represent the median value; the left and right whisker caps represent the 10th and 90th percentiles, respectively. The same below

图1 畜禽粪便好氧堆肥不同原料及辅料条件下的TC、TN、CH₄-C、NH₃-N和N₂O-N损失

Figure 1 TC, TN, CH₄-C, NH₃-N and N₂O-N losses under different raw materials and auxiliary materials during livestock manure composting

27.7%。不同堆肥原料之间的TN损失存在差异,其中,鸡粪堆肥的TN损失(31.8%)最高,这与PARDO等^[28]的Meta分析结果(35.8%)相差较小,主要是由于鸡粪原料中较高的N含量所致。猪粪堆肥的TN损失

(28.6%)次之,在ZHANG等^[3]的Meta分析中也得到了非常相近的结果(27.5%)。牛粪和羊粪的TN损失相对较低且差异较小(22.4%~22.6%),但与PARDO等^[28]的研究中牛粪堆肥的TN损失(27.4%)有一定差别,

这可能与研究的样本量或过程控制的不同有关。从辅料来看,烟末(32.2%)、小麦秸秆(31.5%)和玉米秸秆(28.7%)的TN损失相对较高,无辅料(16.8%)和稻草(14.5%)的TN损失最低,而菌糠(23.2%)、锯末(22.8%)和其他辅料(番茄秧、木本泥炭等,24.4%)的TN损失没有显著差别。辅料中可利用性C的差异会影响N的固定和转化,成为影响N损失的原因之一^[31]。

如图1d所示,好氧堆肥过程中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失平均为18.9%,占TN损失的68.2%, NH_3 排放是N损失的主要途径。从原料来看,与TN损失相似,鸡粪堆肥的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失(24.2%)最高,牛粪堆肥的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失(15.7%)最低,而羊粪(18.6%)和猪粪(18.2%)堆肥没有显著差异。在堆肥初期,微生物降解大量易降解有机化合物引发 NH_3 的释放,因此, $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失与原料本身的有机氮含量以及有机质的降解密切相关^[27]。鸡粪的有机氮含量和有机质降解率(图1a)均显著高于牛粪,因此,鸡粪堆肥过程 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失和TN损失更高^[29]。从辅料来看, $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失同样与TN损失相似,烟末(22.9%)、玉米秸秆(21.1%)和小麦秸秆(17.3%)的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失相对较高,稻草为辅料时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失(11.1%)最低,而无辅料(15.3%)、其他辅料(番茄秧、木本泥炭等,14.7%)和锯末(13.7%)的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失差异较小。以菌糠为辅料的TN损失平均为23.2%,而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失却高达22.5%,这主要是由于样本数量较少($n=12$)所致。根据相关研究结果发现,添加不同辅料造成的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失和TN损失差异与辅料的颗粒大小、酸碱性、吸附性、C物质含量以及纤维素和木质素等的含量有关^[18,17,27]。

本研究中,好氧堆肥过程中的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失平均为1.1%,占TN损失的4.0%。好氧堆肥的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失占比虽小,但确是重要的温室气体排放源。如图1e所示,不同堆肥原料的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失有一定差异,具体为猪粪(1.3%)>鸡粪(1.0%)>羊粪(0.7%)>牛粪(0.6%)。羊粪和牛粪堆肥的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失显著低于猪粪和鸡粪,如上所述,这与猪粪和鸡粪较高的堆积密度和N含量有关^[21]。本研究中以猪粪为原料的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失平均为1.3%,略低于WANG等^[30]的Meta分析结果(1.7%),远低于PARDO等^[28]的Meta分析结果(2.7%)。这主要是由于研究样本差异造成的,PARDO等^[28]的研究样本不仅包含好氧堆肥,还包括了传统堆沤等其他堆肥方式。从辅料来看,添加玉米秸秆(1.2%)和小麦秸秆(1.1%)的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失没有显著差异,均显著低于锯末(2.5%),但锯末的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失样

本间差异较大(0.02%~11.2%)。烟末(0.21%)和稻草(0.21%)为辅料的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失率最低。其他辅料(番茄秧、木本泥炭等,0.7%)、菌糠(0.6%)和无辅料(0.4%)的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失差异较小。

3 初始C/N对碳氮损失的影响

3.1 TC和 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失

初始C/N分为6个范围:<10、10~15、15~20、20~25、25~30^[1,3],不同范围下的TC损失具有明显差异(图2a)。其中,由于样本数量较少($n=6$),C/N<10的TC损失尚无法确定,但C/N过低势必会影响有机物的降解。当C/N介于10~15或20~25时,TC损失相对较低(39.1%~41.7%)。而当C/N介于15~20或C/N>25时,TC损失较高(52.0%~53.3%),其中C/N为15~20时的TC损失最高。马若男等^[31]针对C/N影响的研究显示,C/N为14和22时的TC损失率明显低于C/N为18时的,主要是由于C/N为18时具有更高的有效累积积温,这预示着有机物降解率最高,因此TC损失率最高,同时C/N为14的有机碳含量过低,会影响有机质降解和堆肥腐熟,这在JIANG等^[7]的研究中也得到了证实。但也有研究显示,最有利于有机物降解的初始C/N应为25甚至在30左右^[19,32]。更普遍的观点认为,C/N对有机物降解的影响受含水率、通风速率以及外源添加剂等其他因素的影响^[7,33]。

不同C/N条件下的 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失平均为0.48%($n=129$)。如图2c所示,当C/N介于10~30时, $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失随C/N比值的增加呈先上升后下降的趋势。即C/N为15~20时的 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失(0.76%)最高,C/N为20~25时(0.42%)次之,C/N为10~15或25~30时相对较低(0.34%~0.35%)。相关研究显示, CH_4 的产生与高温期持续时间一致,即高温期越长,产生的 CH_4 量越多^[9]。而高温期通常伴随着有机物的快速降解,如上所述,C/N为15~20时的TC损失最高,与在此条件下 $\text{CH}_4\text{-C}$ 损失最高一致。由于C/N为10~15时可能会影响堆肥腐熟进程^[31],因此从 CH_4 的产生情况来看,以C/N为20~30较为适宜。

3.2 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{N}_2\text{O-N}$ 损失

不同C/N时的TN损失平均为28.3%($n=234$)。如图2b所示,当C/N>10时,TN损失率介于22.1%~33.3%,且TN损失整体随C/N比值的增加而呈递减趋势。即 $10<C/N<20$ 时,TN损失率较高(30.6%~33.3%),这主要是由于此时的N含量相对于微生物的需要而言供过于求^[1]。C/N>30(22.1%)和C/N介于

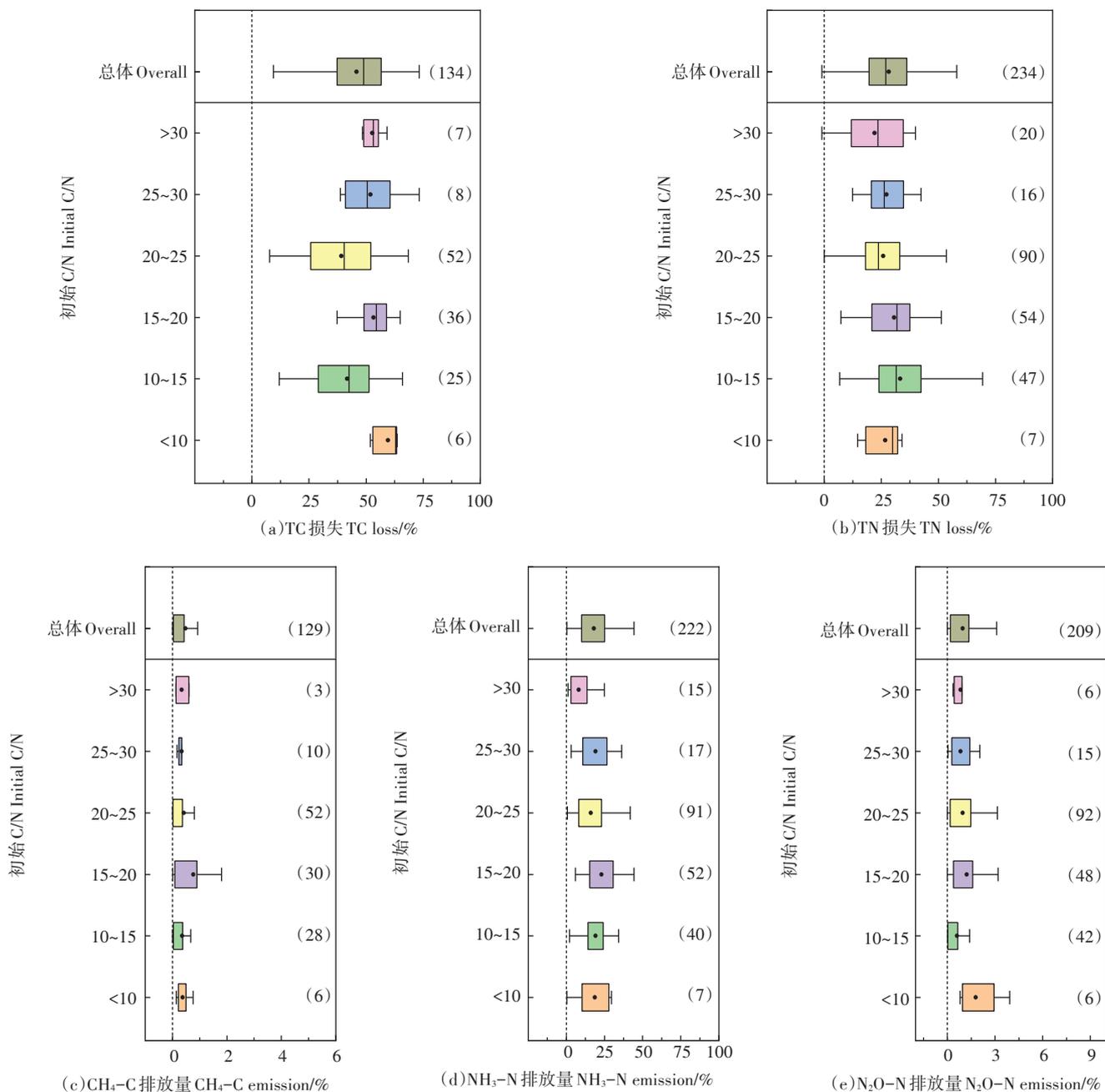


图2 畜禽粪便好氧堆肥不同初始C/N比条件下的TC、TN、CH₄-C、NH₃-N和N₂O-N损失

Figure 2 TC, TN, CH₄-C, NH₃-N and N₂O-N loss under different initial C/N ratio conditions during livestock manure composting

20~25(25.9%)时的TN损失相对较低。但C/N过高时易造成C供过于求,因此C/N比值为20~25时最适合保留TN,这与ZHOU等^[34]和ZHAO等^[1]推荐的初始C/N一致。如图2d所示,不同初始C/N时的NH₃-N损失平均为18.1%(n=222)。NH₃-N损失与TN损失变化趋势相似又略有不同。当C/N<15时,NH₃-N损失介于18.7%~23.0%,且随C/N比值的增加而递增,这主要是由于C源的补充提高了微生物的活性,促进了有

机物的降解。而当C/N>15时,NH₃-N损失则随C/N比值的增加而递减,这与以往的研究结果相似^[1,7,31]。因此,当C/N为15~20时,NH₃-N损失率较高(23.0%),此范围在TN损失率较高的C/N范围(10~20)之内。C/N>30时的NH₃-N损失最低(8.2%),C/N为20~25时(16.1%)次之。但C/N过高时易造成C供过于求,因此20~25的C/N范围最适合保留NH₃-N。

如图2e所示,不同初始C/N时的N₂O-N损失平

均为 1.0% ($n=209$)。N₂O-N 损失与 TN 损失的变化趋势相似,整体随 C/N 的增加呈下降趋势,当 C/N<10 时 N₂O-N 损失率较高(1.8%),C/N 为 15~20 时(1.2%)次之。C/N 为 10~15 时的 N₂O-N 损失(0.6%)明显低于其他值,这与 ZHAO 等^[1]的研究结果一致,可能是由于相对较高的 NH₃ 含量抑制了硝化作用造成的。综合来看,C/N 比值的增加可以减少含 N 气体排放以及 TN 损失,其中,C/N 为 20~25 时最适宜 N 素的保留。

4 初始含水率对碳氮损失的影响

4.1 TC 和 CH₄-C 损失

畜禽粪便好氧堆肥在不同初始含水率条件下的 TC 损失平均为 45.8% ($n=138$),与不同 C/N 条件下统计的 TC 损失结果一致。将初始含水率分为 6 个范围^[1,3],不同初始含水率对 TC 损失的影响显著。如图 3a 所示,当含水率小于 70% 时,TC 损失介于 35.2%~53.6%,且随着含水率的增加呈现明显的上升趋势。这主要是因为水分含量的上升增加了可溶性营养物质的分布且提高了微生物的活性^[3]。而当含水率超过 70% 时,TC 损失(36.7%)呈快速下降趋势,这主要是因为含水率过高时会影响堆体 O₂ 的扩散,从而抑制有机物的降解。含水率对 TC 损失的影响规律与 ZHANG 等^[3]Meta 分析中的结果一致,其研究显示,初始含水率与 TC 损失之间存在显著二次关系。李丹阳等^[20]的研究也得到了相似的结论。

不同初始含水率条件下的 CH₄-C 损失(图 3c)平均为 0.51% ($n=146$)。当初始含水率大于 50% 时,初始含水率对 CH₄-C 损失的影响显著,这与吴娟等^[33]的研究结果一致。CH₄-C 损失介于 0.1%~3.0% 之间,且随着含水率的增加呈现明显的上升趋势,这与 ZHANG 等^[3]Meta 分析中的结果一致。CH₄ 是由 CO₂/H 和乙酸在厌氧条件下通过产甲烷菌脱氧形成的,产甲烷菌的 CH₄ 产生条件仅限于严格的厌氧环境中,而水分含量的增加会导致缺氧并形成更多的厌氧区,从而导致大量 CH₄ 的排放^[7,15]。因此,CH₄-C 损失与含水率呈显著正相关关系。考虑到有机物的降解和 CH₄ 的排放,初始含水率应控制在 70% 以内。

4.2 TN、NH₃-N 和 N₂O-N 损失

如图 3b 所示,不同初始含水率条件下的 TN 损失介于 25.1%~30.9% 之间($n=258$),各范围间差异较小。随着含水率的增加 TN 损失呈波动变化,初始含水率对 TN 损失没有显著影响。其中,含水率小于 50% 和

含水率为 65%~70% 时 TN 损失相对较低(25.1%~25.6%)。而初始含水率介于 60%~65% 时,TN 损失(30.9%)相对较高。考虑含水率<50% 或>70% 时,可能会影响微生物的生长代谢活动及堆体腐熟^[20],因此含水率应控制在 50%~70% 之间。不同初始含水率条件下的 NH₃-N 损失平均为 18.6% ($n=256$)。与 TN 损失稍有不同,当含水率小于 50% 时,NH₃-N 损失(11.4%)明显降低(图 3d),这可能是因为较低的含水率影响了微生物的活性,从而减缓了有机物的降解率。而当含水率大于 50% 时,NH₃-N 损失(16.1%~20.5%)变幅较小,但随含水率升高而略有下降,这可能是因为水分的增加溶解了更多的 NH₃^[3],也可能与 pH 值、温度或者曝气率等其他因素的影响有关^[7]。总之,含水率为 50%~55% 时 NH₃-N 损失最高(20.5%),含水率为 60%~65% 时 NH₃-N 损失较低(17.3%)。

如图 3e 所示,不同初始含水率条件下的 N₂O-N 损失平均为 1.0% ($n=234$)。由于堆肥过程中铵态氮硝化与硝态氮反硝化作用均会导致 N₂O 的产生^[35],因此有研究认为,初始含水率不会对 N₂O-N 损失产生显著影响^[3,7]。但本研究中,N₂O-N 损失的变化规律却与 CH₄-C 损失相似,也与含水率之间具有显著的正相关关系,且当含水率>65% 时,N₂O-N 损失迅速增加,这与 ZHAO 等^[1]和 DANNENMANN 等^[36]的分析结果一致。N₂O-N 损失整体介于 0.4%~2.2% 之间,而当初始含水率介于 50%~65% 时,N₂O-N 损失相对较低且没有显著差异(0.79%~0.84%)。因此,为了控制 N₂O 排放,堆肥过程中的初始含水率应介于 50%~65%。综合来看,初始含水率为 60%~65% 可降低堆肥过程 TN、NH₃ 和 N₂O 损失^[36]。

5 通风速率对碳氮损失的影响

5.1 TC 和 CH₄-C 损失

不同通风速率(以堆肥干基计)下的 TC 损失介于 48.1%~53.1%,差异较小,且呈波动变化(图 4a)。其中,通风速率为 0.2~0.3 L·kg⁻¹·min⁻¹ 时,TC 损失相对较高(53.1%);通风速率为 0.3~0.4 L·kg⁻¹·min⁻¹ 时,TC 损失较低(48.1%)。不同通风速率条件下的 CH₄-C 损失平均为 0.53% ($n=115$),通风速率对 CH₄-C 排放影响显著(图 4c)。由于样本数量较少($n=5$),通风速率为 0.4~0.6 L·kg⁻¹·min⁻¹ 时的 CH₄-C 损失尚不清楚。其他通风速率下的 CH₄-C 损失具体为 0.2~0.3 L·kg⁻¹·min⁻¹ (0.78%)>超过 0.6 L·kg⁻¹·min⁻¹ (0.55%)>0.3~0.4 L·kg⁻¹·min⁻¹ (0.37%)>0~0.1 L·kg⁻¹·min⁻¹ (0.35%)>

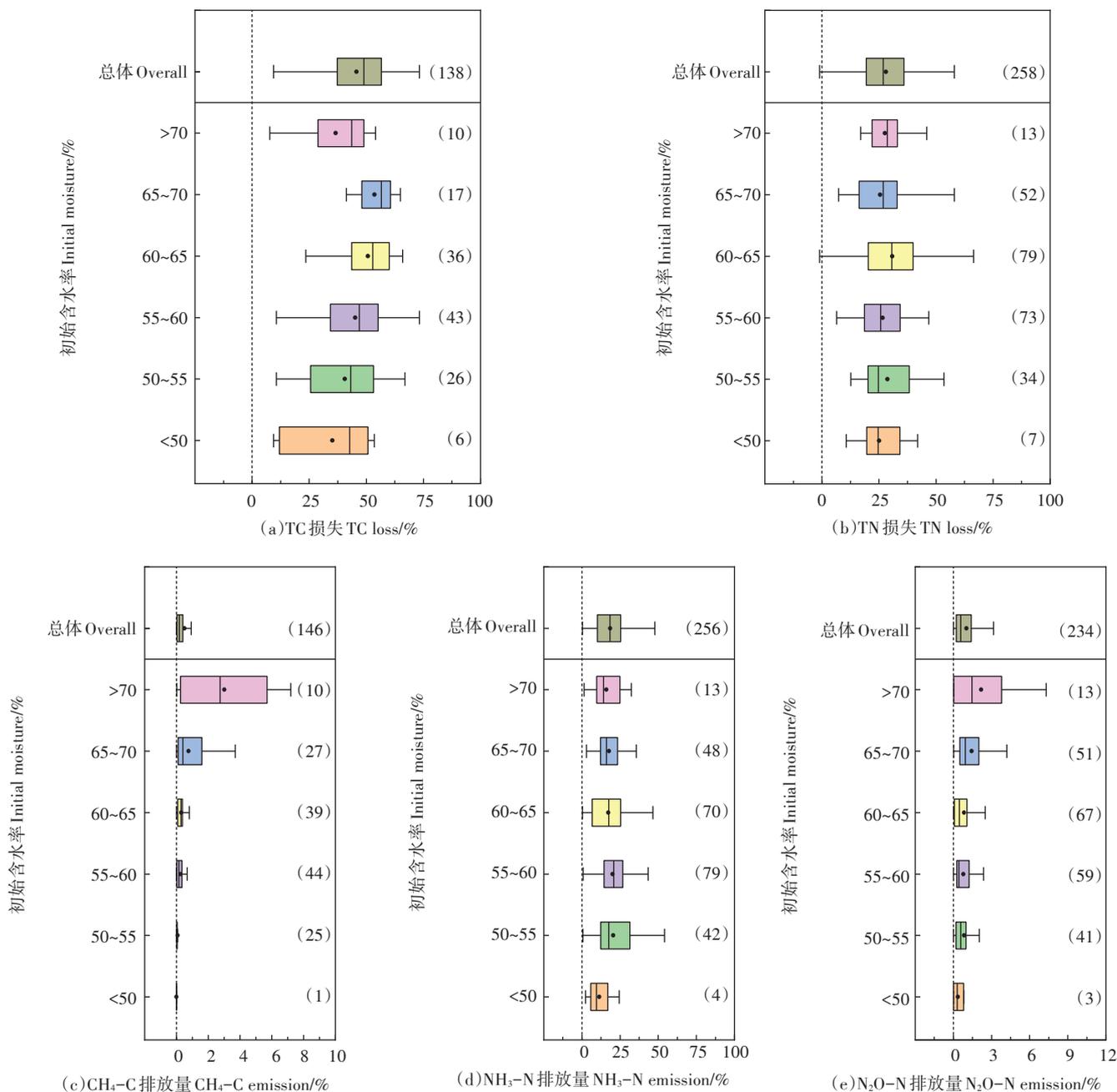


图3 畜禽粪便好氧堆肥不同初始含水率条件下的TC、TN、CH₄-C、NH₃-N和N₂O-N损失

Figure 3 TC, TN, CH₄-C, NH₃-N and N₂O-N loss under different initial moisture content conditions during livestock manure composting

0.1~0.2 L·kg⁻¹·min⁻¹(0.09%)。综合来看,通风速率为0.2~0.3 L·kg⁻¹·min⁻¹时,会造成较高的CH₄-C损失和TC损失。

5.2 TN、NH₃-N和N₂O-N损失

好氧堆肥在不同通风速率条件下的TN损失平均为27.4%(n=198)。如图4b所示,当通风速率<0.3 L·kg⁻¹·min⁻¹时,TN损失为23.9%~28.3%,且随通风速率的增加呈下降趋势。这主要是因为与中通风速率相

比,低通风速率具有更高的排放率和更长的排放周期^[7]。当通风速率介于0.3~0.6 L·kg⁻¹·min⁻¹时,TN损失介于29.4%~32.6%,且随通风速率的增加呈上升趋势。这与以往的研究结果相一致,是由于高通风速率导致充足的O₂供应,从而加速了有机物降解过程并导致NH₄⁺-N含量增加,同时高通风速率也能够及时带走产生的含N气体,降低堆体吸收量^[17,37-38]。而当通风速率>0.6 L·kg⁻¹·min⁻¹时,过高的通风速率会降

低堆体温度,影响堆肥高温期,降低有机物的降解率,使TN损失再次降低。总体而言,较低通风和较高通风条件下,TN损失都较低,中等通风条件更有利于有机质降解和TN损失。如图4d所示,不同通风速率条件下NH₃-N损失平均为19.0%(n=205)。NH₃-N损失与TN损失变化趋势相似,其中,通风速率>0.6 L·kg⁻¹·min⁻¹时的NH₃-N损失最低(15.1%)。当通风速率<0.6 L·kg⁻¹·min⁻¹时,TN损失介于16.1%~26.6%,且

随通风速率增强而呈先下降后上升的趋势。通风速率为0.4~0.6 L·kg⁻¹·min⁻¹时的NH₃-N损失最高,通风速率为0.2~0.3 L·kg⁻¹·min⁻¹时的NH₃-N损失最低。

不同通风速率条件下的N₂O-N损失平均为1.2%(n=182)。如图4e所示,不同通风速率条件下的N₂O-N损失介于0.5%~2.8%,随着通风速率的增加,N₂O-N损失整体呈先下降后上升的趋势。但与TN损失或NH₃-N损失的变化趋势不同的是,当通风速率>0.1

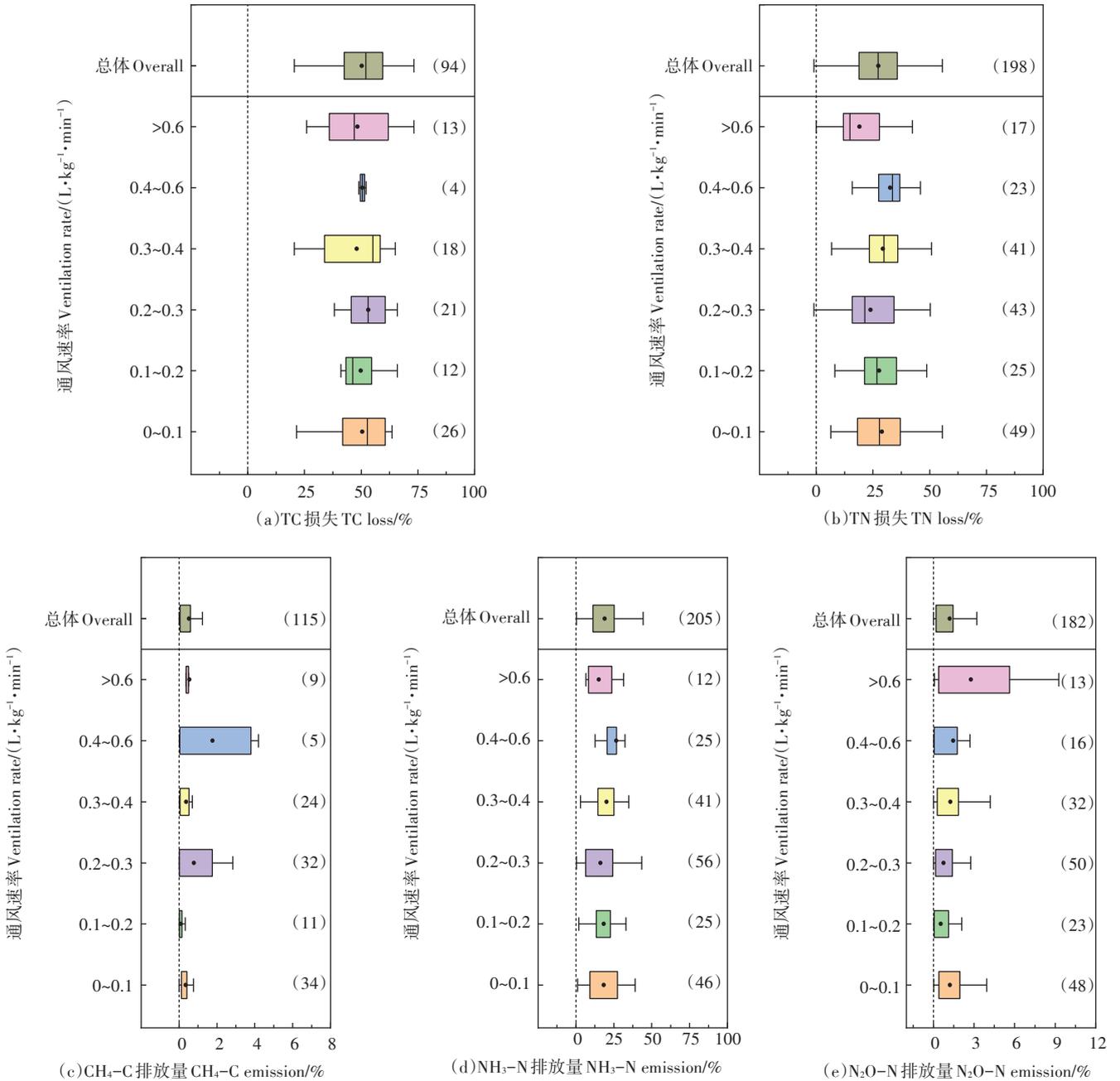


图4 畜禽粪便好氧堆肥不同通风速率(以堆肥干基计)条件下的TC、TN、CH₄-C、NH₃-N和N₂O-N损失

Figure 4 TC, TN, CH₄-C, NH₃-N and N₂O-N loss under different ventilation rate(based on dry matter) conditions during livestock manure composting

$\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 损失即不断上升。且当通风速率超过 $0.6\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 损失达到最大值,这是因为较高的通风速率会促进硝化反应,从而导致较多的 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 产生。通风速率对 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 损失的影响远高于对 NH_3-N 损失和TN损失的影响。 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 损失的最低值出现在通风速率为 $0.1\sim 0.2\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下。综合来看,通风速率介于 $0.1\sim 0.3\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 可降低TN和 NH_3 、 N_2O 等含N气体的损失。

6 结论

(1)猪粪和鸡粪堆肥的温室气体排放量高于牛粪和羊粪。选择富含C的辅料与畜禽粪便联合堆肥,均可促进有机物降解,稻草或锯末作为辅料添加有利于减少温室气体排放。

(2)C/N对 CH_4 的排放没有显著影响。随着C/N的增加, NH_3 和 N_2O 的排放以及TN损失整体呈下降趋势。整体来看,以C/N为20~25时最适宜N素的保留。

(3)初始含水率显著影响 CH_4 和 N_2O 的排放。随着含水率的增加, CH_4 和 N_2O 的排放量呈明显的上升趋势。整体来看,以含水率为60%~65%最为适宜。

(4)通风速率(以堆肥干基计)为 $0.1\sim 0.2\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, CH_4 排放和TC损失相对较低;通风速率为 $0.1\sim 0.3\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, N_2O 、 NH_3 和TN损失较低。

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: 135401.
- [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: 147103.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] AWASTHI M K, DUAN Y, AWASTHI S K, et al. Effect of biochar and bacterial inoculum additions on cow dung composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122407.
- [7] JIANG T, SCHUCHARDT F, LI G, et al. Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting[J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2011, 23(10): 1754-1760.
- [8] YUAN J, ZHANG D, DU L, et al. Effect of woody peat as an additive on maturity and gaseous emissions during pig manure composting[J]. *Compost Science & Utilization*, 2019, 27(2): 69-80.
- [9] WANG Y, LIU S, XUE W, et al. The characteristics of carbon, nitrogen and sulfur transformation during cattle manure composting: Based on different aeration strategies[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): 3930.
- [10] AGYARKO-MINTAH E, COWIE A, SINGH B P, et al. Biochar increases nitrogen retention and lowers greenhouse gas emissions when added to composting poultry litter[J]. *Waste Management*, 2017, 61: 138-149.
- [11] LUO Y, LI G, LUO W, et al. Effect of phosphogypsum and dicyandiamide as additives on NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during composting [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2013, 25(7): 1338-1345.
- [12] YANG Y, KUMAR AWASTHI M, DU W, et al. Compost supplementation with nitrogen loss and greenhouse gas emissions during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122435.
- [13] WANG X, BAI Z, YAO Y, et al. Composting with negative pressure aeration for the mitigation of ammonia emissions and global warming potential[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 448-457.
- [14] JIANG T, MA X, YANG J, et al. Effect of different struvite crystallization methods on gaseous emission and the comprehensive comparison during the composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 219-226.
- [15] CHEN J, HOU D, PANG W, et al. Effect of moisture content on greenhouse gas and NH_3 emissions from pig manure converted by black soldier fly[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 133840.
- [16] ZENG J, YIN H, SHEN X, et al. Effect of aeration interval on oxygen consumption and GHG emission during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 214-220.
- [17] LI S, LI D, LI J, et al. Effect of spent mushroom substrate as a bulking agent on gaseous emissions and compost quality during pig manure composting[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(13): 12398-12406.
- [18] WANG X, ZHENG W, MA Y, et al. Gasification filter cake reduces the emissions of ammonia and enriches the concentration of phosphorous in *Caragana microphylla* residue compost[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 315: 123832.
- [19] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同C/N堆肥碳素物质变化规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1388-1393. QIN L, SHEN Y J, LI G X, et al. C matter change of composting with different C/N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1388-1393.
- [20] 李丹阳, 马若男, 元传仁, 等. 含水率对羊粪堆肥腐熟度及污染气体排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(20): 254-262. LI D Y, MA R N, QI C R, et al. Effects of moisture content on maturity and

- pollution gas emissions during sheep manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20):254-262.
- [21] CHEN M, HUANG Y, LIU H, et al. Impact of different nitrogen source on the compost quality and greenhouse gas emissions during composting of garden waste[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 124:326-335.
- [22] BARRINGTON S, CHOINIERE D, TRIGUI M, et al. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83(3):189-194.
- [23] ZHANG D, LUO W, YUAN J, et al. Effects of woody peat and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during pig manure composting[J]. *Waste Management*, 2017, 68:56-63.
- [24] MICHEL F C, PECCHIA J A, RIGOT J, et al. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw[J]. *Compost Science & Utilization*, 2004, 12(4):323-334.
- [25] HAO X, CHANG C, LARNEY F J. Carbon, nitrogen balances and greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(1):37-44.
- [26] NOLAN T, TROY S M, HEALY M G, et al. Characterization of compost produced from separated pig manure and a variety of bulking agents at low initial C/N ratios[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(14):7131-7138.
- [27] SUN X, LU P, JIANG T, et al. Influence of bulking agents on CH₄, N₂O, and NH₃ emissions during rapid composting of pig manure from the Chinese Ganqinfen system[J]. *Journal of Zhejiang University Science*, 2014, 15(4):353-364.
- [28] PARDO G, MORAL R, AGUILERA E, et al. Gaseous emissions from management of solid waste: A systematic review[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3):1313-1327.
- [29] CHOWDHURY M A, DE NEERGAARD A, JENSEN L S. Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting[J]. *Chemosphere*, 2014, 97:16-25.
- [30] WANG Y, DONG H, ZHU Z, et al. Mitigating greenhouse gas and ammonia emissions from swine manure management: A system analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(8):4503-4511.
- [31] 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. MA R N, LI D Y, QI C R, et al. Effects of C/N ratio on maturity and odor emissions during chicken manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(24):194-202.
- [32] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同C/N比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2668-2673. QIN L, SHEN Y J, LI G X, et al. The impact of composting with different C/N on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2668-2673.
- [33] 吴娟, 何胜洲, 李国学, 等. 添加过磷酸钙的猪粪堆肥污染气体减排工艺优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5):304-312. WU J, HE S Z, LI G X, et al. Process optimization of pollutant gases emission reduction with superphosphate addition during pig manure composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017, 48(5):304-312.
- [34] ZHOU J M. The effect of different C/N ratios on the composting of pig manure and edible fungus residue with rice bran[J]. *Compost Science & Utilization*, 2017, 25(2):120-129.
- [35] YANG F, LI G X, YANG Q Y, et al. Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(7):1393-1399.
- [36] DANNENMANN M, BUTTERBACH-BAHL K, GASCHER R, et al. Dinitrogen emissions and the N₂:N₂O emission ratio of a Rendzic Leptosol as influenced by pH and forest thinning[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9):2317-2323.
- [37] JIANG T, LI G, TANG Q, et al. Effects of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions during composting of pig feces in pilot scale[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 31:124-132.
- [38] DE GUARDIA A, PETIOT C, ROGEAUD, et al. Influence of aeration rate on nitrogen dynamics during composting[J]. *Waste Management*, 2008, 28(3):575-587.