



袁军委, 王羿, 林思远, 汪泉庆, 侯俊, 张鑫, 徐霄, 杨文稼, 张卫峰. 好氧堆肥企业碳减排潜力及碳足迹核算方法[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 99-110.
YUAN Junwei, WANG Yi, LIN Siyuan, WANG Quanqing, HOU Jun, ZHANG Xin, XU Xiao, YANG Wenjia, ZHANG Weifeng. Study on carbon emission mitigation potential and the carbon footprint accounting method of aerobic composting enterprises[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 99-110.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.09

好氧堆肥企业碳减排潜力及碳足迹核算方法

袁军委¹ 王羿¹ 林思远¹ 汪泉庆² 侯俊^{1*} 张鑫³ 徐霄³
杨文稼¹ 张卫峰⁴

- (1. 长江大学 农学院/农业农村部长江中游作物绿色高效生产重点实验室(部省共建), 湖北 荆州 434025;
2. 开化县农牛科技有限公司, 浙江 开化 324300;
3. 衢州市农业农村局, 浙江 衢州 324000;
4. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘要 为研究综合减排措施对堆肥温室气体排放的影响,以牛粪为堆肥原料,进行槽式好氧堆肥试验,对照组(CK)不作处理,综合减排组(OPT)根据牛粪鲜重添加草木煤灰(20%)、过磷酸钙(5%)、硫酸亚铁(3%)、柠檬酸(1%),且每次翻堆后在堆体表面喷洒浓度为0.5%的柠檬酸溶液(1 L/m²),分析综合减排措施对堆肥基本理化性质、NH₃挥发和温室气体排放的影响,同时采用全生命周期评价核算堆肥企业的碳足迹。结果表明:1)堆肥结束时,与CK相比,OPT总氮含量、总磷含量、有机质含量和种子发芽指数分别显著增加了28.27%、17.21%、37.73%和4.45%($P<0.05$),且水分流失加快;2)堆肥结束时,与CK相比,OPT的NH₃、CH₄和N₂O累积排放量及全球增温潜势分别显著减少了13.90%、61.46%、71.30%和54.82%($P<0.05$),但CO₂累积排放量显著增加了15.39%($P<0.05$);3)通过全生命周期评价发现CK与OPT生产每吨有机肥的碳排放量分别为113.72和-16.51 kg,2个处理的碳排放主要产生于运行阶段,CK和OPT在运行阶段产生的碳排放分别占各自总净排放量的96.25%和92.98%。综上,综合减排措施能有效提高堆肥腐熟度,减少堆肥过程中有效养分的损失及NH₃和温室气体的排放,显著降低堆肥过程中的全球增温潜势,达到“协同减排”的效果;全生命周期碳足迹核算方法能系统核算好氧堆肥企业的环境代价,运行阶段减排是堆肥企业减排的关键环节。

关键词 好氧堆肥; 槽式发酵; 碳减排; 碳足迹; 生命周期评价

中图分类号 X705 文章编号 1007-4333(2024)12-0099-12 文献标志码 A

Study on carbon emission mitigation potential and the carbon footprint accounting method of aerobic composting enterprises

YUAN Junwei¹, WANG Yi¹, LIN Siyuan¹, WANG Quanqing², HOU Jun^{1*}, ZHANG Xin³,
XU Xiao³, YANG Wenjia¹, ZHANG Weifeng⁴

- (1. College of Agriculture/MARA Key Laboratory of Sustainable Crop Production in the Middle Reaches of the Yangtze River
(Co-construction by Ministry and Province), Yangtze University, Jingzhou 434025, China;
2. Kaihua counties Nongniu Science and Technology Limited Company, Kaihua 324300, China;
3. Quzhou Agriculture and Rural Bureau, Quzhou 324000, China;
4. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

收稿日期: 2024-01-24

基金项目: 衢州市碳账户核算及减排固碳技术研究项目(衢农合 2022-31); 农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室项目(KLFAW202201); 湖北省重点研发计划项目(2023BBB082)

第一作者: 袁军委(ORCID: 0009-0005-2466-9408), 硕士研究生, E-mail: 503518265@qq.com

通讯作者: 侯俊(ORCID: 0000-0002-5800-2944), 副教授, 主要从事农业废弃物处理及新型肥料研发等研究, E-mail: houjungoodluck1@163.com

Abstract To investigate the impact of integrated emission reduction measures on greenhouse gas emissions from composting, a trench aerobic composting experiment was conducted using cattle manure as the composting material. The control group (CK) received no treatment, while the integrated emission reduction measures group (OPT) was added grass charcoal ash (20%), calcium superphosphate (5%), ferrous sulfate (3%), and citrate (1%) based on the fresh weight of cattle manure, and 0.5% citric acid solution was sprayed on the surface of the pile (1 L/m^2) after each turning. The effects of integrated emission reduction measures on the basic physicochemical properties of compost, NH_3 volatilization, and greenhouse gas emissions were analyzed. Additionally, life cycle assessment was applied to calculate the carbon footprint of composting enterprises. The results showed that: 1) At the end of composting, compared with CK, the total nitrogen content, total phosphorus content, organic matter content and seed germination index of OPT significantly increased by 28.27%, 17.21%, 37.73% and 4.45%, respectively ($P < 0.05$), and the moisture loss was accelerated; 2) At the end of composting, compared with CK, the cumulative emissions of NH_3 , CH_4 and N_2O , as well as global warming potential of OPT were significantly reduced by 13.90%, 61.46%, 71.30% and 54.82%, respectively ($P < 0.05$), but the cumulative CO_2 emissions of OPT was significantly increased by 15.39% ($P < 0.05$); 3) The results of life cycle assessment revealed that the carbon emissions of CK and OPT in the production one ton of organic fertilizer were 113.72 kg and -16.51 kg , respectively. The carbon emissions of both treatments were mainly generated during the operational phase, accounting for 96.25% and 92.98% of their total net emissions, respectively. In conclusion, the integrated emission reduction measures can effectively improve the compost maturity, reduce the loss of effective nutrients and the emission of NH_3 and greenhouse gases during composting, and significantly reduce the global warming potential during composting, thus achieving the ‘coordinated emission reduction’ effect. The carbon footprint calculation method can systematically calculate the environmental costs of aerobic composting enterprises, and emission reduction during the operational phase is the key step in reducing emissions for composting enterprises.

Keywords aerobic composting; tank fermentation; carbon emission reduction; carbon footprint; life cycle assessment

近年来,随着畜禽养殖业的发展产生了大量的畜禽粪便,我国每年畜禽粪便总量约为38亿t,但其利用率不足60%^[1]。畜禽粪便通过好氧堆肥可转化为农业所需的优质有机肥,实现农业废弃物的资源化利用^[2]。但堆肥过程中随着微生物分解各类有机物质,会排放出硫化氢(H_2S)、氨气(NH_3)等恶臭气体和二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)等温室气体,不仅会造成环境污染、增强全球温室效应^[3-4],同时伴随大量的堆肥养分损失^[5]。如何有效提高堆肥产品的稳定性、降低堆肥过程中养分损失、减少恶臭气体和温室气体排放是当前亟待解决的科学问题,其不仅有助于我国实现“碳达峰碳中和”战略,而且对实现农业高质量发展和资源循环利用具有实践意义。

关于堆肥减排策略已有诸多研究。现有的策略主要有:1)调节物料碳氮比。通常认为,堆肥碳氮比越低, NH_3 挥发越高。Liang等^[6]研究表明堆肥时加入秸秆等高碳物质,可以提高物料碳氮比,促

进微生物对 NH_4^+ 的同化,降低本底 NH_4^+ 含量,有效减少 NH_3 挥发;Bernal等^[7]研究表明在堆肥中添加可利用碳含量低的高碳物质有助于 CH_4 减排。2)调节物料含水率。El Kader等^[8]研究表明将物料含水率从45%提高至66%时, NH_3 挥发量减少30%~70%,同时 N_2O 排放量减少49%~60%;陈辉等^[9]通过比较物料初始含水率对堆肥过程 CH_4 排放的影响,表明与含水率60%相比,55%的含水率可使 CH_4 排放量减少24%,因为当物料含水率过高时,堆体氧气供应受到限制,导致 CH_4 排放量增加。3)添加物理或化学添加剂。Chowdhury等^[10]研究发现在鸡粪堆肥中添加生物炭可使 NH_3 挥发量减少11%~21%;付祥峰等^[11]研究表明在猪粪堆肥中添加生物炭可减少16.3%~23.5%的 CH_4 排放和降低50%~60%的 N_2O 排放;Cao等^[12]研究发现堆肥时加入沸石可减少堆肥过程中70.2%的全球增温潜势(GWP);Cao等^[13]研究表明使用酸化剂将粪便pH调节为6可减少堆肥过程中21.3%的 NH_3 挥发

和 9.6% 的温室气体排放；陈是吏^[14]等在堆肥中将过磷酸钙和双氰胺联用使温室气体排放总量减少了 65.6%~74.8%。然而，各减排措施联用可能会出现不协同的现象^[5]，因此，有必要研究综合减排措施的减排效果，从而为有机肥企业提供可实现的碳减排策略。

自 2020 年 9 月以来，我国明确提出 2030 年“碳达峰”和 2060 年“碳中和”目标。我国“双碳”目标任务重、时间紧，需要各个行业进行碳排放核算，继而制定相应的减排措施^[15]。然而，目前有机肥企业尚未建立统一的碳排放核算标准。有机肥行业碳减排是一项系统且长期持续的工程，需要从多个层次长期考量。生命周期评价 (Life cycle assessment, LCA) 是对一个系统在其整个生命周期中使用的所有原材料与能源输入、输出进行量化评估的有效方法，其在废弃物处理中也广泛应用^[16]。如杨森^[17]、丁旻^[18]、杨嘉威^[19]等利用 LCA 分别评价了牛粪与玉米秸秆沼渣混合堆肥、猪粪好氧堆肥、蔬菜废弃物堆肥对环境及经济效益的影响。但目前对好氧堆肥企业碳足迹进行全方位综合评价的研究尚为缺乏。

综上，本研究拟采用工厂化槽式堆肥模式，以牛粪为原料，研究草木煤灰、过磷酸钙、硫酸亚铁和柠檬酸同时添加对堆肥 NH_3 挥发和温室气体排放的影响；同时，应用 LCA 来探究堆肥企业的碳排放核算方法，并对优化减排进行实证分析，以期有机肥生产的碳减排提供核算方法，同时为有机肥企业碳减排优化措施提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2023 年 6 月 30 日—7 月 30 日在浙江省衢州市开化县农牛科技有限公司 (118.27°E, 29.13°N) 进行，试验阶段当地平均温度约 35℃。试验工厂于 2020 年建成，总投资 1 200 万元，主要以牛粪为原料，利用槽式好氧堆肥工艺生产商品有机肥。工厂共有原料、堆肥和分装 3 个车间，车间总占地面积约 6 100 m²。堆肥车间所用翻抛机功率为 75 kW，每次翻抛需不间断工作 9 h。分装车间所用分装设备功率为 5 kW，每小时可分装 1 t 商品有机肥。工厂使用的装载机型号为 30G，功率为 85 kW。

1.2 试验设计

试验以鲜牛粪为堆肥原料，设置对照组 (CK) 和综合减排组 (OPT) 2 个处理，每个处理 3 个重复。CK 组不作处理，翻堆频率为 7 d/次；OPT 组在试验前根据牛粪鲜重添加草木煤灰 (20%)、过磷酸钙 (5%)、硫酸亚铁 (3%) 和柠檬酸 (1%) 与牛粪混匀，翻堆频率为 3 d/次，且每次翻堆后在堆体表面喷洒浓度为 0.5% 的柠檬酸溶液，喷洒量为 1 L/m²。试验利用槽式好氧堆肥进行发酵，堆体长 20.0 m、宽 10.0 m、高 1.5 m。

1.3 指标测定及方法

1.3.1 堆肥样本理化性质

堆肥样本分别在试验开始和结束时采集，采用 5 点取样法混合作为 1 个样本，每个堆体采集 3 个样本，并分析其理化性质。其中，有机质 (OM)、总氮 (TN)、总钾 (TK)、总磷 (TP) 和种子发芽指数 (GI) 按照有机肥料行业标准 NY/T 525—2021^[20] 中的方法进行测定，含水率 (MC) 利用烘干称重法进行测定。

1.3.2 NH_3 、 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 排放量

NH_3 采用海绵吸收法采集，装置为上下无底的 PVC 塑料圆筒，内径 15 cm，高 20 cm。采集时将两块厚度 2 cm、直径 16 cm 的海绵充分吸收 15 mL 磷酸甘油溶液后，置于塑料圆筒中，下层海绵距管底 10 cm，上层海绵与管顶部相平。分别于堆肥后第 1、3、5、7、9、11、13、15、19、23、27、31 天上午 8:00—11:00 进行采集，采集的样品用靛酚蓝比色法测定 NH_4^+ -N 含量。

N_2O 、 CO_2 和 CH_4 采用静态气体采集箱-气相色谱法测定，采集步骤及计算公式参考丁紫娟等^[21] 的研究，采集时间与 NH_3 一致。温室气体排放通量 F 计算公式如下：

$$F = \frac{H \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{P}{P_0} \times \rho \times \frac{dc}{dt}}{\frac{M}{S}} \quad (1)$$

式中： H 为采样顶箱高度，cm； T 为采样顶箱内温度，℃； P 为采样地区的大气压，Pa； P_0 为标准状况下的大气压，Pa； ρ 为被测气体的密度，g/cm³； dc 为气体浓度差，μL/L； dt 为采样时间间隔，h； M 为堆体质量，t； S 为堆体表面积，m²。排放通量为正表示排放，反之为吸收。使用式 (1) 计算 3 种气体的排放通量，通过内插累加法分别计算堆肥全过程中 CH_4 、

CO₂和N₂O排放总量。

全球增温潜势GWP^[22]用于衡量对于CO₂的辐射指数。GWP计算方法如下:

$$GWP=f(\text{CO}_2)+28f(\text{CH}_4)+265f(\text{N}_2\text{O}) \quad (2)$$

式中:GWP为全球增温潜势,g/kg; $f(\text{CO}_2)$ 、 $f(\text{CH}_4)$ 和 $f(\text{N}_2\text{O})$ 分别为CO₂、CH₄和N₂O的排放量,g/kg;28和265分别为CH₄和N₂O在100年内的温室效应对应的CO₂质量^[22]。

1.4 有机肥企业碳排放核算

基于有机肥企业的碳排放过程划定研究边界并确定碳足迹LCA评价模型,然后分步骤进行碳足迹核算。

1.4.1 核算边界和碳排放模型

有机肥厂的核算边界包括建设阶段、运行阶段和拆除阶段。建设阶段包括全厂区建设消耗的建材(如水泥、砖头、钢材)和建设过程中消耗的化石能源产生的碳排放,施工废物填埋暂不考虑;运行阶段包括物料收集(废弃物运输)和发酵前处理(装

载机拌料)消耗的化石能源,翻抛机和分装机运行消耗的电能以及发酵期间物料直接排放的气体(CH₄、N₂O、CO₂和NH₃)产生的碳排放;拆除阶段主要考虑拆除厂区设施所消耗的化石能源产生的碳排放,运输能源和材料回收暂不考虑。化肥减量替代是LCA的产出部分,即有机肥产品的养分含量相比生产等量的N、P、K化肥而减少的碳排放。办公区域的碳排放未在核算范围内。该企业每年可生产10 000 t有机肥,设备及建筑损耗年限拟定为20年,以此核算至生产每吨有机肥的碳排放量(以CO₂当量计)。

LCA碳足迹模型如图1所示,主要包括有机肥厂建设阶段、运行阶段和拆除阶段三部分,以3个阶段排放之和计算最终碳排放。每部分以“农场门”的概念计算投入(原材料、能源和化学投入品等的上游碳排放量)和产出(包括直接或间接的气体排放量,例如CH₄、N₂O、CO₂和NH₃;有机肥产品对化肥替代的减排量)。

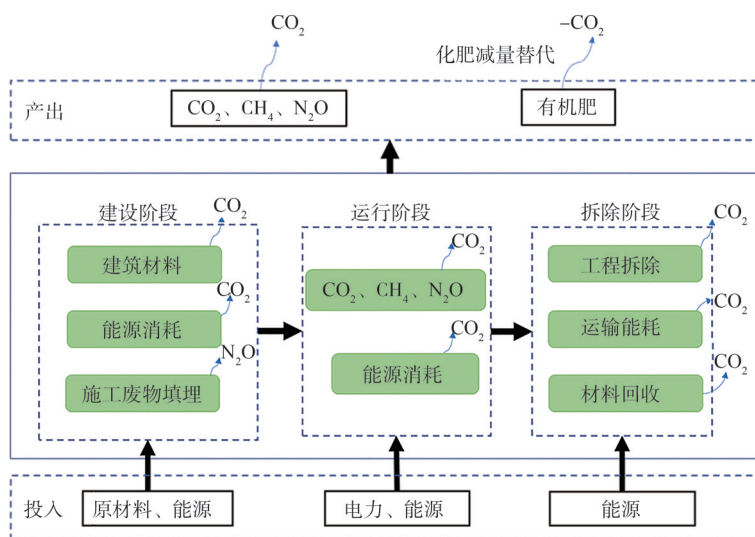


图1 碳足迹的全周期评价模型

Fig.1 Life cycle assessment evaluation model of carbon footprint

1.4.2 核算方法

1)有机肥厂建设阶段产生的碳排放量计算方法如下:

$$CE_i=Mc+Ec_i \quad (3)$$

式中:CE_i为有机肥厂建设阶段产生的碳排放量,kg;Mc为建设阶段消耗建材的碳排放量,kg;Ec_i为建设阶段消耗能源的碳排放量,kg。其中,Mc和Ec_i计算方法分别如下:

$$Mc=\sum Mf_i \times Md_i \quad (4)$$

$$Ec_i=\sum En_i \times Ed_i \quad (5)$$

式中:Mf_i为第*i*种材料的排放因子,kg/kg,本研究涉及的水泥、砖头和钢材的排放因子来自参考文献[23-25];Md_i为第*i*种材料的使用量,kg;En_i为第*i*种能源的排放因子,kg/kg或kW/kg,本研究涉及的柴油和电能的排放因子来源于参考文献[26-27];Ed_i为第*i*种能源的使用量,kg或kW。

2)有机肥厂运行阶段产生的碳排放量计算方法如下：

$$CE_r=Ec_r+Gc \tag{6}$$

式中： CE_r 为有机肥厂运行阶段产生的碳排放量，kg； Ec_r 为运行阶段消耗能源产生的碳排放量，kg，计算方法同式(5)； Gc 为运行阶段堆肥排放的温室气体产生的碳排放量，kg，计算方法同式(2)。

3)有机肥厂区拆除阶段产生的碳排放量 CE_c 为拆除阶段消耗能源产生的碳排放量，kg，计算方法同式(5)。

4)有机肥对化肥减量替代产生的碳减排量 CE_t 计算方法如下：

$$CE_t=\sum Tm_i\times Tf_i \tag{7}$$

式中： Tm_i 为*i*养分的含量，g/kg； Tf_i 为*i*养分的排放因子，kg/kg，生产N、P、K化肥的排放因子参考侯俊^[27]的研究。

5)基于厂区实际对整个生命周期碳排放计算公式如下：

$$CE_a=(CE_f+CE_r+CE_c)-CE_t \tag{8}$$

式中： CE_a 为有机肥厂整个生命周期的碳排放量，kg； CE_f 、 CE_r 和 CE_c 分别为有机肥厂建设阶段、运行阶段和拆除阶段产生的碳排放量，kg； CE_t 为生产出的有机肥对化肥减量替代产生的碳减排量，kg。

1.5 数据统计

采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析(One-way ANOVA, Dunnett's t-test(2-sided)), 采用 LSD 法检验处理组间的均值差异显著性。应用 Excel 365 和 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 OPT对堆肥的影响

2.1.1 OPT对堆肥物料理化性质的影响

如表 1 所示：堆肥初始时，OPT 的 TP 含量显著高于 CK ($P<0.05$)，但 TK 含量显著低于 CK ($P<0.05$)，TN 含量、OM 含量、MC 和 GI 在 2 个处理间无显著性差异 ($P>0.05$)；堆肥结束时，2 个处理的物料理化性质均存在显著性差异 ($P<0.05$)，其中，与 CK 相比，OPT 中 TN、TP 和 OM 分别增加了 28.27%、17.21% 和 37.73%，TK 和 MC 分别减少了 13.69% 和 7.03%；GI 反映了堆肥腐熟度，堆肥结束时，CK 和 OPT 的 GI 分别从初始的 40.04% 和 40.45% 提高到 66.13% 和 70.58%，其中，OPT 处理 GI>70%，满足 NY 525—2021《有机肥料》^[20]的要求。综上，综合减排措施能使堆肥保留更多的氮素和有机质，促进堆肥进程，提高堆肥腐熟度。

表 1 堆肥初始和结束时物料理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of materials at the initial and end of composting

时期	处理	总氮/(g/kg)	总磷/(g/kg)	总钾/(g/kg)	有机质/(g/kg)	含水率/%	种子发芽指数/%
Period	Treatment	TN	TP	TK	OM	MC	GI
初始 Initial	CK	15.60±0.36a	6.11±0.17c	20.63±0.61a	401.69±8.32a	67.50±0.98a	40.45±0.75c
	OPT	15.13±0.47a	7.23±0.15a	18.27±0.49b	410.72±4.24a	65.06±0.91a	40.05±0.29c
结束 End	CK	11.39±1.02b	5.81±0.21c	20.38±0.03a	320.09±10.93c	56.33±0.14b	66.13±0.13b
	OPT	14.61±0.65a	6.81±0.19b	17.69±0.16b	357.82±9.41b	52.37±1.03c	70.58±0.25a

注：CK 代表对照组，OPT 代表综合减排组；同列相同小写字母表示无显著性差异，不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: CK represents the control group, and OPT represents the integrated emission reduction measures group; The same lowercase letter within the same column indicates no significant difference, while different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.1.2 OPT对堆体温度、NH₃挥发和温室气体排放的影响

由图 2 可知，在整个堆肥过程中 OPT 的堆体温度均≥CK(第 1 天除外)。2 个处理的堆体温度均在堆肥第 9 天达到峰值(CK 为 54℃，OPT 为

55℃)，第 13 天降低到 50℃以下，并保持在 37~46℃直到堆肥结束。2 个处理堆体温度均在≥50℃保持 7 d(第 5~11 天)，达到了腐熟的卫生安全标准^[7]。

堆肥过程中 2 个处理的 NH₃挥发通量变化如

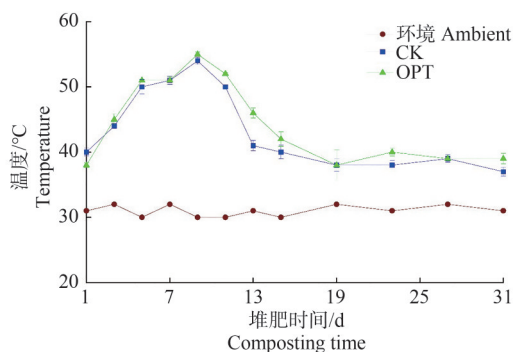


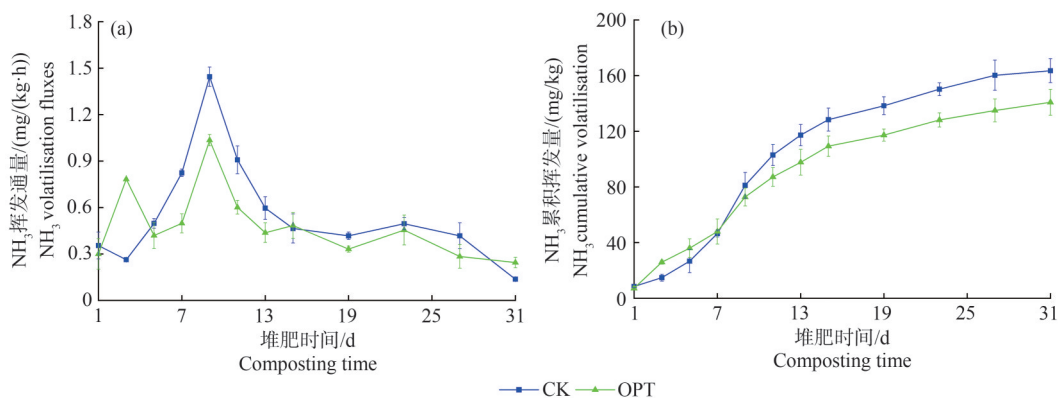
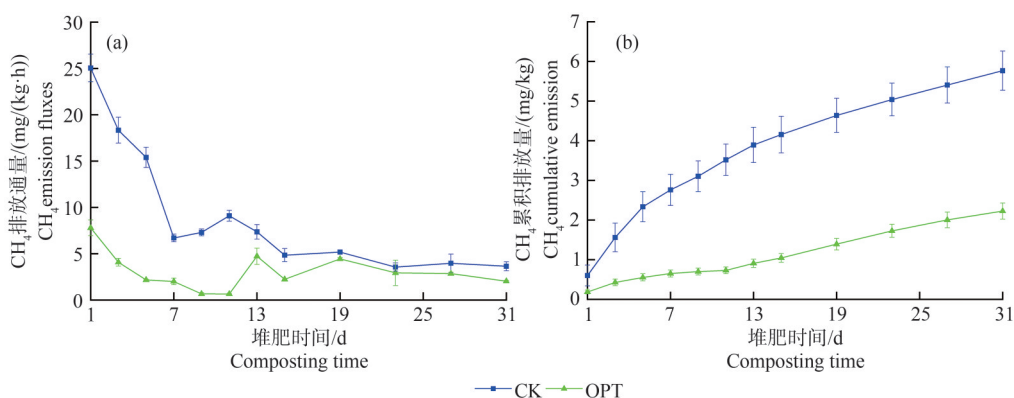
图2 堆肥过程中堆体温度变化

Fig. 2 Temperature changes in the composting process

图3(a)所示。CK和OPT的变化趋势基本相同,均在堆肥高温期(第9天)达到峰值(分别为1.44和1.03 mg/(kg·h)),随后呈波动下降趋势。CK的NH₃挥发通量除第3、15和31天低于OPT外,其他

时间均高于OPT,且第3天2个处理差异显著($P < 0.05$)。堆肥过程中NH₃累积挥发量变化如图3(b)所示。在堆肥第1~13天,2个处理的NH₃累积挥发量快速增加,占整个堆肥过程的69.38%~71.68%,第15~31天则占28.32%~30.61%,这表明堆肥过程中NH₃挥发主要集中在前中期。整个堆肥过程中OPT的NH₃累积挥发量相比CK减少了13.90%。

由图4(a)可知,CK和OPT的CH₄排放通量峰值分别为25.04和7.79 mg/(kg·h),均出现在堆肥第1天且差异显著($P < 0.05$);OPT在整个堆肥过程中CH₄排放通量均低于CK,且第1~11天差异显著($P < 0.05$)。整个堆肥期间OPT的CH₄累积排放量与CK相比显著减少了61.46% ($P < 0.05$) (图4(b))。

图3 堆肥过程中NH₃挥发通量(a)和累积挥发量(b)变化Fig. 3 Changes in NH₃ volatilization fluxes (a) and cumulative volatilization (b) during composting图4 堆肥过程中CH₄排放通量(a)和累积排放量(b)变化Fig. 4 Changes in CH₄ emission fluxes (a) and cumulative emission (a) during composting

由图5(a)可知,堆肥过程中CK和OPT的CO₂排放通量变化规律相似,均为第1天排放量最高(分

别为60.99和63.86 mg/(kg·h)),随后呈波动下降趋势;CK的CO₂排放通量除第11、15和31天高于

OPT 外,其他时间均低于 OPT。在 CO_2 累积排放量方面,整个堆肥期间 OPT 相比 CK 显著增加了 15.39% ($P < 0.05$) (图 5(b))。

堆肥期间 2 个处理的 N_2O 排放通量变化趋势见图 6(a), CK 基本呈先上升后下降的趋势, OPT 的 N_2O 排放通量除第 1、3、27 和 31 天高于 CK 外,

其他时间均低于 CK; CK 和 OPT 的 N_2O 排放峰值分别出现在第 9 天和第 11 天,排放通量分别为 11.43 和 $2.44 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,且 OPT 显著低于 CK ($P < 0.05$)。堆肥结束时,OPT 的 N_2O 累积排放量与 CK 相比显著降低了 71.30% ($P < 0.05$) (图 6(b))。

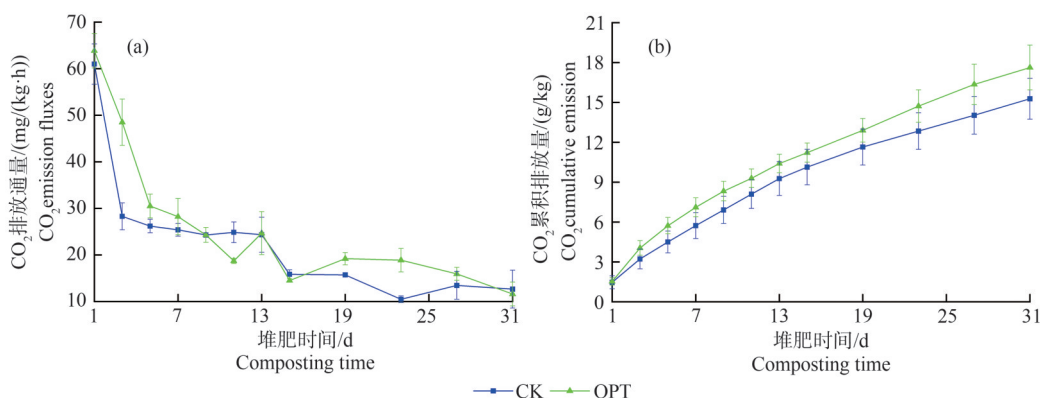


图 5 堆肥过程中 CO_2 排放通量(a)和累积排放量(b)变化

Fig. 5 Changes in CO_2 emission fluxes (a) and cumulative emission (b) during composting

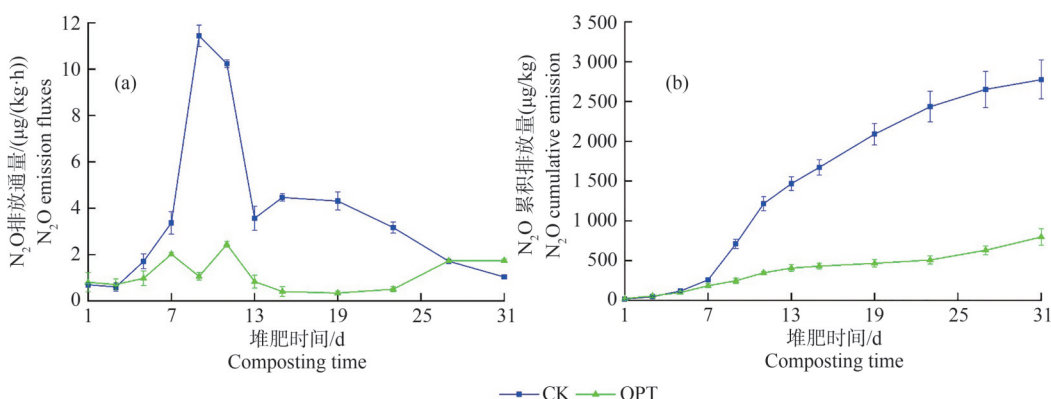


图 6 堆肥过程中 N_2O 排放通量(a)和累积排放量(b)变化

Fig. 6 Changes in N_2O emission fluxes (a) and cumulative emission (b) during composting

2.1.3 OPT 的全球增温潜势

由表 2 可知,CK 和 OPT 中 CH_4 和 CO_2 的累积排放量分别贡献了 99.59% 和 99.73% 的 GWP, N_2O 对 GWP 的贡献率相对较低。与 CK 相比,OPT 的 GWP 显著降低了 54.82% ($P < 0.05$)。

2.2 有机肥企业的 LCA 碳足迹核算

有机肥企业全生命周期内的碳排放核算结果如图 7 所示。CK 与 OPT 生产每吨有机肥产生的净碳排放量分别为 224.06 和 119.86 kg。CK 与 OPT 生产每吨有机肥在运行阶段产生的碳排放量分别

为 215.65 和 111.45 kg,占各自生命周期的 96.25% 和 92.98%,与 CK 相比,OPT 在此阶段的碳排放量减少了 48.32%。建设阶段和拆除阶段产生的碳排放量相对较少。养分替代是有机肥生产中的减排部分,CK 与 OPT 生产每吨有机肥产生的碳减排量分别为 110.34 和 136.37 kg,在此阶段 OPT 的碳减排量相比 CK 增加了 23.59%。综上,CK 与 OPT 生产每吨有机肥产生的碳排放量分别为 113.72 和 -16.51 kg,综合减排措施能够使有机肥实现绿色生产。

表2 堆肥温室气体的全球增温潜势
Table 2 GWP of greenhouse gases from composting

处理 Treatment	温室气体排放量/(g/kg) Greenhouse gases emissions			GWP/(g/kg)	减排率/% Mitigation rate
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
CK	15.27±1.54b	161.46±13.84a	0.74±0.07a	177.47±15.45a	—
OPT	17.62±1.68a	62.38±5.72b	0.21±0.03b	82.21±7.43b	54.82±0.26

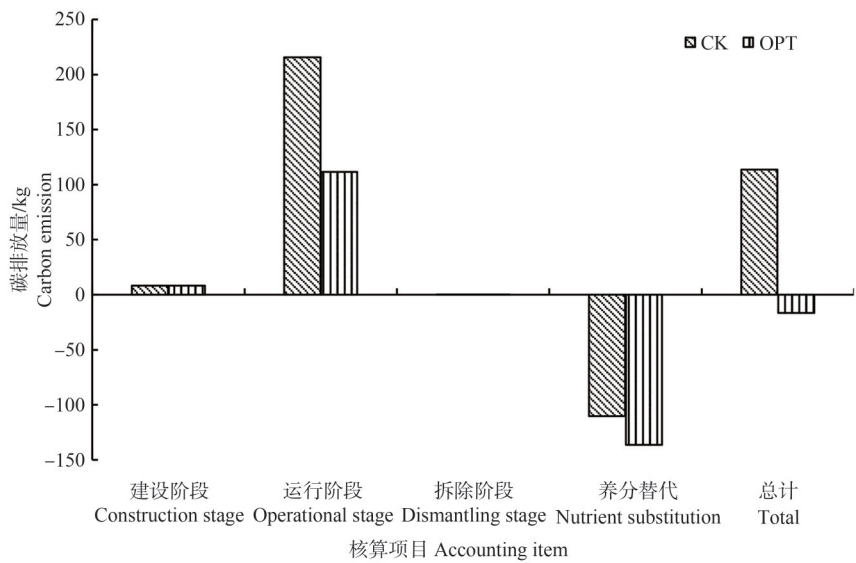


图7 生产每吨有机肥的全生命周期碳排放量

Fig. 7 Carbon emissions in full life cycle of product per ton of organic fertilizer

3 讨论

3.1 综合减排措施下有机肥企业碳排放潜力

NH₃是堆肥过程中排放的恶臭气体,也是堆肥氮损失的主要途径^[28]。本研究中NH₃挥发通量峰值主要出现在高温期以及翻堆之后,这主要是因为高温促进了氨化作用,使有机氮分解为NH₄⁺-N,加快了NH₃的产生;在翻堆后大量的NH₃逃逸到空气中,导致NH₃挥发通量增加,这与前人研究结果一致^[29-30]。在整个堆肥期间,OPT的NH₃挥发累积量比CK减少了13.90%,这是表明综合减排措施对NH₃挥发有抑制作用。吕丹丹等^[31]认为,过磷酸钙对NH₃的化学饱和吸附可达12.15%;Torkashvand等^[32]发现,堆肥时添加磷酸根离子会促使部分NH₄⁺-N与堆肥物料中的Mg²⁺、Ca²⁺等其他离子结合,形成NH₄MgPO₄·6H₂O结晶及NH₄CaPO₄等复合体,导致NH₄⁺-N不易向NH₃转化;草木煤灰可通过

吸附挥发的NH₃和降低NH₄⁺-N含量进而降低NH₃累积挥发量^[33];堆肥物料中添加硫酸亚铁和柠檬酸可以降低物料的pH。顾沈怡等^[29]研究表明,降低堆肥物料的pH能有效抑制堆肥过程中的NH₃挥发。因此,虽然OPT的翻堆频率更高,可能使NH₃挥发增加,但添加剂的联合使用减少了OPT中NH₄⁺-N向NH₃的转化,从而降低了堆肥过程中的NH₃挥发。

CH₄、CO₂和N₂O等温室气体是堆肥过程不可避免的排放产物^[34]。CH₄排放主要集中在堆肥前中期(第1~11天),其中,CK的CH₄排放通量在第7天最低,这可能是因为翻堆后堆体氧气浓度增加,使堆体厌氧区域减少,破坏了产甲烷菌的生存环境,从而导致CH₄排放量减少^[35]。与CK相比,OPT的CH₄累积排放量显著减少了61.46%,这可能是由于草木煤灰的添加使OPT堆体的含水率降低、孔隙度增加,提升了氧气浓度^[36],从而导致CH₄排放减少;

且 CH_4 产生的最佳 pH 范围是 7.2~8.0^[37], 过磷酸钙、硫酸亚铁和柠檬酸等酸性物质的添加使 OPT 堆体 pH 较 CK 降低, 研究表明堆体呈酸性时, CH_4 排放也会随之下降^[38], 因此 OPT 的 CH_4 排放低于 CK。整个堆肥过程中 OPT 的 CO_2 累积排放量相比 CK 增加了 15.39%, 这可能是由于 OPT 中添加了草木煤灰且翻堆频率加快, 致使堆体的透气性和氧气浓度增加, 堆肥好氧微生物的活性增加, 从而促进了微生物对有机物料的分解, 导致 CO_2 排放量增加^[30,39]。

堆肥过程中 N_2O 的排放与氨化作用、硝化和反硝化作用密切相关^[3]。在堆肥时使用添加剂可通过改变堆体温度、酸碱度、碳氮比和孔隙度来影响与 N_2O 相关的功能微生物, 进而调控堆肥过程中 N_2O 的排放。本研究表明 CK 的 N_2O 排放主要出现在高温期(第 7~13 天), 这与陈是吏^[14]和 Mulbry 等^[40]人的研究相悖, 可能是因为在第 7 天翻堆后, 堆体内部的 NO_x^- 被翻到堆体上部, 经反硝化作用后产生 N_2O , 从而导致 N_2O 排放增加^[41-42]。而 OPT 的 N_2O 累积排放量在整个堆肥过程中均低于 CK, 可能是由于 OPT 中草木煤灰的添加影响了堆体中 *hao*、*nosZ*/*nirK* 等功能基因的活性和 NO_2^- 的浓度^[33], 提高了堆体孔隙度导致氧气增加, 抑制堆体反硝化; 且 OPT 中过磷酸钙、硫酸亚铁和柠檬酸等酸性物质的添加, 降低了堆体 pH, 这也会抑制堆体的硝化和反硝化作用^[43-44], 从而减少 N_2O 的排放。

堆肥过程中的 GWP 主要由 CH_4 和 CO_2 贡献, 与 CK 相比, OPT 的 GWP 显著减少了 54.82%, 表明综合减排措施, 可以使好氧堆肥做到协同减排^[5], 进一步证明好氧堆肥企业的碳减排仍然具备较大潜力。

由于本研究企业位于浙江省开化县, 年平均气温为 14℃~23℃, 采用槽式堆肥工艺, 以当地农业生产的废弃物(牛粪、猪粪为主)为发酵原料, 研究结果可供相似企业参考应用, 以减少有机肥生产带来的碳排放, 推动有机肥行业碳减排的发展。但在整个有机肥行业, 由于工艺、物料的差异, 气候、农业生产环境的不确定性, 可能会导致减排效果出现不同的差异。

3.2 有机肥企业碳足迹核算分析

本研究采用 LCA 方法, 测算有机肥企业全生

命周期内的碳排放。杨森等^[17]采用 LCA 核算堆肥过程中的碳足迹以及对环境的影响, 但其研究的侧重点在堆肥发酵时产生的气体排放(NH_3 、GHG、 NO_x 和 SO_2 等)对全球变暖潜势、酸化效应和富营养化效应的影响, 对工厂建设产生的碳排放以及具体核算方式尚未提及。本研究从投入(原材料、能源和化学投入品等的上游排放)和产出(包括直接或间接的气体排放, 例如 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 和 NH_3 , 有机肥产品对化肥替代的减排)进行了核算分析。结果表明, CK 和 OPT 生产每吨有机肥产生的碳排放量分别为 113.72 和 -16.51 kg, 其中 OPT 实现了负碳生产。这主要是由于 OPT 在堆肥中添加了减排措施, 导致运行阶段实现低碳排放, 同时增加了有机肥的总养分, 使养分替代部分的碳减排超过了全生命周期产生的净碳排放量。丁旻等^[18]发现猪粪和秸秆堆肥后可实现负碳排放, 虽然生产每吨有机肥的净排放量为 1.85 t(以 CO_2 当量计), 但其主要减排部分在有机肥施用后的土壤固碳量上, 施用每吨有机肥土壤固碳量为 5.27 t(以 CO_2 当量计), 然而, 在其生命周期模型中并未将建设阶段以及原料运输阶段产生的碳排放考虑在内。本研究中, 尽管有机肥已经可以实现负碳生产, 但还可进一步优化。如在建设阶段优化施工工艺, 减少建筑单位面积内的材料消耗量, 同时使用节能环保型材料; 在运行阶段, 优化原材料运输路径, 避免路线重复, 减少行驶里程, 并定期维护设备降低老旧磨损带来的功率能耗, 以降低工程全生命周期的能耗与碳排放。

4 结 论

本研究通过槽式好氧堆肥探究综合减排措施对堆肥温室气体排放的影响, 同时应用全生命周期评价对有机肥生产企业的碳排放核算进行实证研究, 得出如下结论:

1) 使用减排措施后 OPT 处理堆体温度更高、水分蒸发更快, 促进了堆肥腐熟, 堆体的 TN、TP 和 OM 分别增加了 28.27%、17.21% 和 37.73%, 堆肥养分损失降低。

2) 堆肥结束时, OPT 处理相比 CK NH_3 、 CH_4 和 N_2O 累积排放量分别显著减少了 13.90%、61.46% 和 71.30%, CO_2 累积排放量显著增加了 15.39%, GWP 减少了 54.82%。

3)在全生命周期中,CK与OPT生产每吨有机肥产生的碳排放量分别为113.72和-16.51 kg。

参考文献 References

- [1] He X Q, Han L J, Huang G Q. Analysis of regulative variables on greenhouse gas emissions and spatial pore gas concentrations with modeling during large-scale trough composting [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 124066
- [2] Bong C P C, Lim L Y, Ho W S, Lim J, Klemes J J, Towprayoon S, Ho C S, Lee C T. A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 146: 149-157
- [3] 袁京, 刘燕, 唐若兰, 马若男, 李国学. 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, Ma R N, Li G X. 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)
- [4] 刘明辉, 沈红, 张世早, 胡素柳, 胡春华, 肖香, 唐子君, 方平. 畜禽粪便堆肥大气污染物排放及其控制研究进展[J]. 农业工程, 2022, 12(5): 36-44
Liu M H, Shen H, Zhang S Z, Hu S L, Hu C H, Xiao X, Tang Z J, Fang P. Research progress on air pollutant emission and control of livestock manure compost [J]. *Agricultural Engineering*, 2022, 12(5): 36-44 (in Chinese)
- [5] 曹玉博, 张陆, 王选, 马林. 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, Ma L. 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)
- [6] Liang Y, Leonard J J, Feddes J J R, McGill W B. Influence of carbon and buffer amendment on ammonia volatilization in composting [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(5): 748-761
- [7] Bernal M P, Sommer S G, Chadwick D, Chen Q, Li G X, Michel F C. Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits[J]. *Advances in Agronomy*, 2017, 144: 143-233
- [8] El Kader N A, Robin P, Paillat J M, Leterme P. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(14): 2619-2628
- [9] 陈辉, 王巨媛, 田晓飞, 王倩, 徐欣, 刘晓, 邓莹莹, 冯文丽, 翟胜. 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, Wang Q, Xu X, Liu X, Deng Y Y, Feng W L, Zhai S. 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)
- [10] Chowdhury M A, Deneergaard 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
- [11] 付祥峰, 刘琪琪, 李恋卿, 潘根兴, 郑金伟, 张旭辉, 程琨. 生物炭对猪粪堆肥过程中氮素转化及温室气体排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1893-1900
Fu X F, Liu Q Q, Li L Q, Pan G X, Zheng J W, Zhang X H, Cheng K. Effects of biochar on nitrogen transformation and greenhouse gas emissions during swine manure composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1893-1900 (in Chinese)
- [12] Cao Y B, Wang X, Bai Z H, Chadwick D, Misselbrook T, Sommer S G, Qin W, Ma L. 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
- [13] Cao Y B, Wang X, Liu L, Velthof G L, Misselbrook T, Bai Z H, Ma L. Acidification of manure reduces gaseous emissions and nutrient losses from subsequent composting process [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264: 110454
- [14] 陈是吏, 袁京, 李国学, 何胜洲, 张邦喜. 过磷酸钙和双氰胺联用减少污泥堆肥温室气体及NH₃排放[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 199-206
Chen S L, Yuan J, Li G X, He S Z, Zhang B X. Combination of superphosphate and dicyandiamide decreasing greenhouse gas and NH₃ emissions during sludge composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 199-206 (in Chinese)
- [15] 景侨楠, 侯慧敏, 白宏涛, 徐鹤. 自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 420-427
Jing Q N, Hou H M, Bai H T, Xu H. A top-bottom estimation method for city-level energy-related CO₂ emissions [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(1): 420-427 (in Chinese)
- [16] 李傲群. 农业废弃物循环利用的“有机肥-沼气”联产碳排放与经济效益核算[D]. 北京: 中央财经大学, 2022
Li A Q. Research on carbon emission and economic benefit of 'organic fertilizer-biogas' co-production in agricultural waste recycling [D]. Beijing: Central University of Finance and Economics, 2022 (in Chinese)
- [17] 杨森, 佟敏, 崔亚茹, 王体朋, 史昌明. 牛粪与玉米秸秆沼渣混合堆肥及其对环境的影响研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(12): 168-173
Yang S, Tong M, Cui Y R, Wang T P, Shi C M. Study on mixed compost of cow dung and corn stalk biogas residue and its impact on environment [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(12): 168-173 (in Chinese)
- [18] 丁旻, 龚静阳, 徐名汉, 王飞跃, 边远, 闫飞, 赵明杰, 李辉. 猪粪好氧堆肥碳排放分析[J]. 农业工程, 2023, 13(9): 61-65
Ding M, Gong J Y, Xu M H, Wang F Y, Bian Y, Yan F, Zhao M J, Li H. Carbon emission analysis of manure aerobic composting [J]. *Agricultural Engineering*, 2023, 13(9): 61-65 (in Chinese)
- [19] 杨嘉威. 蔬菜废弃物规模化处理利用系统生命周期评价研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023
Yang J W. Study on life cycle assessment of large-scale vegetable waste treatment system [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023 (in Chinese)
- [20] NY/T 525—2021. 有机肥料[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021
NY/T 525—2021. Organic fertilizer [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese)
- [21] 丁紫娟, 徐洲, 田应兵, 刘凯文, 张丁月, 朱建强, 侯俊. 再生稻干湿交替灌溉与根区分层施氮减少温室气体排放[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 51-58
Ding Z J, Xu Z, Tian Y B, Liu K W, Zhang D Y, Zhu J Q, Hou J. Reducing gas emissions from ratooning rice field using controlled nitrogen

- fertilization and alternate wetting-drying irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(7):51-58 (in Chinese)
- [22] IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [23] 龚志起, 张智慧. 水泥生命周期中物化环境状况的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 86-91
Gong Z Q, Zhang Z H. A study on embodied environmental profile during the life cycle of cement [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(5): 86-91 (in Chinese)
- [24] 罗楠. 中国烧砖制造过程环境负荷研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009
Luo N. Study on environmental load of sintered brick manufacturing process in China [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009 (in Chinese)
- [25] 李庆伟, 岳清瑞, 金红伟, 冯鹏. 双碳背景下钢结构碳排放研究进展[J]. 建筑结构, 2023, 53(17): 1-7, 36
Li Q W, Yue Q R, Jin H W, Feng P. Research progress on carbon emission of steel structure buildings based on carbon peak and carbon neutral [J]. *Building Structure*, 2023, 53(17): 1-7, 36 (in Chinese)
- [26] Nanaki E A, Koroneos C J. Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 20(1): 14-19
- [27] 侯俊. 种养一体化中养分高效的制约因素研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017
Hou J. Key constraints to improve nutrient use efficiency in livestock-crop system-case study in Luannan [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [28] Wang X, Selvam A, Wong J W C. Influence of lime on struvite formation and nitrogen conservation during food waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 227-232
- [29] 顾沈怡, 钱锟, 詹永冰, 申卫收, 林先贵. 不同添加剂对鸡粪堆肥中氨气和温室气体排放的影响[J]. 环境生态学, 2023, 5(2): 51-60
Gu S Y, Qian K, Zhan Y B, Shen W S, Lin X G. Effects of different additives on ammonia and greenhouse gas emissions from composting process of chicken manure [J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(2): 51-60 (in Chinese)
- [30] 巴士迪, 张克强, 杨增军, 李仲瀚, 渠清博. 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, Li Z H, Qu Q B. 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 (in Chinese)
- [31] 吕丹丹, 种云霄, 吴启堂, 吴根义, 贺德春, 丘锦荣, 许振成. 过磷酸钙对氨气的吸附解吸特性研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2506-2510
Lv D D, Chong Y X, Wu Q T, Wu G Y, He D C, Qiu J R, Xu Z C. Adsorption and desorption of calcium superphosphate to ammonia gas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2506-2510 (in Chinese)
- [32] Torkashvand A M. Improvement of compost quality by addition of some amendment [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2010, 4(4): 252-257.
- [33] 武一奇. 猪粪堆肥过程氮素转化与抗性基因转移机制及调控技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022
Wu Y Q. Mechanism and regulation technology concerning nitrogen transformation and antibiotic resistance genes transfer during swine manure composting [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022 (in Chinese)
- [34] 王海候, 吕志伟, 金梅娟, 沈园, 陶玥玥, 周新伟, 施林林, 李茹, 陆长婴. 不同热解温度稻壳生物炭对羊粪堆肥腐熟度及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 696-703
Wang H H, Lv Z W, Jin M J, Shen Y, Tao Y Y, Zhou X W, Shi L L, Li R, Lu C Y. Effects of rice husk biochar pyrolyzed at different temperatures on compost maturity and greenhouse gas emissions of sheep manure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 696-703 (in Chinese)
- [35] 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
- [36] Awasthi M K, Wang M J, Chen H Y, Wang Q, Zhao J C, Ren X N, Li D S, Awasthi S K, Shen F, Li R H, Zhang Z Q. 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
- [37] Siddique M N I, Wahid Z A. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 194: 359-371
- [38] Im S, Mostafa A, Kim D H. Use of citric acid for reducing CH₄ and H₂S emissions during storage of pig slurry and increasing biogas production: Lab- and pilot-scale test, and assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 142082
- [39] 刘龙, 孔德国, 周岭, 付雪寒, 卢胜男, 王龙杰, 张红美. 生物炭粒径对猪粪好氧堆肥中养分影响[J]. 节水灌溉, 2023(12): 34-40, 50
Liu L, Kong D G, Zhou L, Fu X H, Lu S N, Wang L J, Zhang H M. Effect of biochar particle size on nutrient in aerobic composting of pig manure [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(12): 34-40, 50 (in Chinese)
- [40] 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
- [41] Maeda K, Toyoda S, Philippot L, Hattori S, Nakajima K, Ito Y, Yoshida N. Relative contribution of nirK- and nirS- bacterial denitrifiers as well as fungal denitrifiers to nitrous oxide production from dairy manure compost [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(24): 14083-14091
- [42] Maeda K, Toyoda S, Shimojima R, Osada T, Hanajima D, Morioka R, Yoshida N. 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
- [43] 苏锡南. 环境微生物学[M]. 第2版. 北京: 中国环境科学出版社, 2015
Su X N. *Environmental Microbiology* [M]. 2nd ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2015 (in Chinese)
- [44] 闵航. 微生物学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2011
Min H. *Microbiology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011 (in Chinese)

责任编辑: 申青苗



第一作者简介:袁军委,硕士研究生。曾获得硕士二等学业奖学金。参与湖北省重点研发项目、衢州市碳账户核算及减排固碳技术研究与农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室项目等项目研究。



通讯作者简介:侯俊,副教授,博士生导师,主要从事农业废弃物处理及新型肥料的研发等研究,主讲课程有《肥料生产与加工》和《植物营养学》。主持参与国家自然科学基金、湖北省重点研发项目及农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室开放课题等研究项目。近5年以第一或者通讯作者在国内外刊物公开发表学术论文20余篇,其中 *Field Crops Research*、*Energies* *Journal of Plant Nutrition*、*Environmental Pollution* 等SCI期刊收录10篇,《植物营养与肥料学报》《水土保持学报》和《中国农业科学》等中文核心期刊10篇;授权或公开新型肥料的发明专利/实用新型专利8项。担任 *Journal of Cleaner Production*、*Science of The Total Environment* 和 *Plant and Soil* 等多家SCI源期刊的通讯审稿人。