

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2017.11.001

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

低碳氮比条件下猪粪堆肥氨气和温室气体排放^{*}

周谈龙, 尚斌, 董红敏^{**}, 朱志平, 陶秀萍, 张万钦

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对养殖场粪便产生量大、外加碳源物质成本高, 堆肥需要添加大量的碳源物质, 并且猪粪堆肥实际生产过程中氨气(NH_3)和温室气体(GHG)排放数据缺乏的问题, 开展了低碳氮比(C/N)条件下的猪粪堆肥试验。试验采用箱式堆肥法, 使用 Innova 1312 对氨气(NH_3)、氧化亚氮(N_2O)、甲烷(CH_4)和二氧化碳(CO_2)气体进行 24h 在线连续监测。结果表明: 堆肥箱体内日平均温度超过 50°C 的持续天数均超过 10d, 满足国家相关标准的无害化要求; 经过 31d 的好氧发酵, 每千克初始原料鲜重的 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 的累计排放分别为 2.27、0.07、0.24、135.72g, NH_3 的排放主要集中在堆肥第 1 周和翻堆后 10d, 分别占总排放的 31.09% 和 36.15%, GHG 排放主要集中在第 4 周, 占总排放的 30.9%; 在不考虑 CO_2 时, N_2O 是 GHG 的主要贡献气体, 贡献率为 72.02%。堆肥过程中物料气体(NH_3 、 N_2O 、 CH_4 和 CO_2)累计排放量均与 pH 值呈现良好的正相关($P < 0.01$)、与含水率和 C/N 呈现良好的负相关($P < 0.01$)。建议对猪粪堆肥过程中 NH_3 的控制应集中在堆肥第 1 周和翻堆后, GHG 减排应重点关注堆肥后期 N_2O 的排放。

关键词: 粪便; 堆肥; 氨气; 温室气体; 碳氮比

Emission Characteristics of Ammonia and Greenhouse Gas during the Low C/N Ratio Swine Manure Composting

ZHOU Tan-long, SHANG Bin, DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, TAO Xiu-ping, ZHANG Wan-qin

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, MOA, Beijing 100081, China)

Abstract: The animal farms produce large amount of manure, and the composting process of animal manure needs to supply external carbon source material, which adds the treatment cost. In addition, the available data about the gas emission during low C/N composting of pig manure are lack. Hence, the emission of NH_3 (ammonia), N_2O (nitrous oxide), CO_2 (carbon dioxide) and CH_4 (methane) during the composting of pig manure was monitored continuously using an Innova 1312 monitor. The results showed that the daily average temperature inside composing bin over 50°C was more than 10 days, which could secure pathogen inactivation and meet the non-hazardous requirement of national standards. After 31d composting, cumulative emissions of NH_3 , N_2O , CO_2 and CH_4 per kg initial matter were 2.27, 0.07, 135.72 and 0.24g, respectively. The NH_3 emissions occurred mainly in the first week and 10 days after turning, which account for 30.02% and 36.15% of the total NH_3 emission, respectively. Nevertheless, GHG (greenhouse gases) emissions focused on the fourth week, accounting for 30.9% of the total emissions. If CO_2 was not considered, N_2O was the main contributor to GHG, with a contribution rate of 72.02%. There was a positive correlation ($P < 0.01$) between the accumulated amount of gas emission (NH_3 , N_2O , CH_4 and CO_2) and the pH value during composting, and a good negative correlation with water content and C/N ratio ($P < 0.01$). Therefore, the

^{*} 收稿日期: 2017-02-17^{**} 通讯作者。E-mail: donghongmin@caas.cn

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-36-10B); 公益性行业(农业)科研专项项目(201303091)

作者简介: 周谈龙(1991-), 硕士生, 从事农业废弃物处理和资源化利用研究。E-mail: zhoutanlong@163.com

control of NH_3 during the composting of pig manure should be focused on the first week and after turning of the composting process, while GHG emission reduction should focus on the N_2O emission during the later period of composting (the fifth week).

Key words: Manure; Composting; Ammonia; Greenhouse gas; C/N ratio

堆肥作为畜禽粪便资源化利用的关键技术已经得到广泛应用^[1-3], 但粪便堆肥过程中排放的 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 等气体, 不仅会造成氮等营养元素的流失, 还会产生二次污染, 并直接影响堆肥技术的推广与应用^[4]。

目前, 国内外针对畜禽粪便^[5-9]、城市固体废弃物^[10-12]等堆肥过程中 NH_3 和 GHG 排放开展了一定研究, 且物料特性^[13-14]、堆肥参数^[15-17]及堆肥规模^[18]对氨气和温室气体排放都具有较大影响。但关于猪粪堆肥过程中 NH_3 和 GHG 的排放研究大多集中在实验室条件下, 且以往研究推荐的最佳碳氮比 (C/N) 为 25~30^[19]。本研究以猪粪和秸秆为原料, 通过减少秸秆等碳源添加物, 达到低 C/N 水平, 在相同条件下处理更多的猪粪, 以减少养殖场对秸秆等外加碳源物质的经济投入, 研究低 C/N 条件下堆肥过程中 NH_3 和 GHG 的排放规律, 为猪粪堆肥中气体减排提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验原料

堆肥试验于 2015 年 10 月 18 日~11 月 21 日在北京市大兴区某猪场进行, 原料包括猪粪和玉米秸秆, 猪粪为猪场内产生的鲜猪粪; 玉米秸秆来自养殖场附近的村庄, 秸秆经过粉碎机切割成 2~5cm 长。玉米秸秆与猪粪混合体积比为 2:1, 混合物容重约为 $630\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, C/N 为 13.2, 秸秆和猪粪具体特性如表 1 所示。

1.2 试验装置和运行参数

试验采用密闭式强制通风好氧箱式发酵, 共设

置 3 个堆肥箱, 堆肥箱体有效体积为 0.95m^3 , 尺寸为 $1\text{m}\times 1\text{m}\times 1\text{m}$, 主体结构采用 1cm 厚聚氯乙烯 (PVC) 板, 采用 5cm 聚乙烯作为保温层 (图 1), 间歇式通风, 每通风 10min 停止 30min, 通风率为 $60\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[20-22], 进气通过筛板进入箱体并实现均匀布气, 发酵周期为 31d, 仅在第 21 天进行了翻堆, 在试验第 18 天出现连续 26h 停电, 造成风机和检测装置 Innoval312 停止运行。

1.3 采样与分析

1.3.1 气体排放通量

使用 Innoval312 实时监测 3 个箱体排放的混合气体中 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 的浓度。Innoval312 使用前采用标准气体 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 (中国计量科学研究院提供) 进行标定, 每个采样点每隔 2min 采 1 次样, 重复测定 5 次, 取最后 1 次读数进行计算, 24h 连续测定。

根据进气口和出气口浓度、通风量和堆体的初始质量, 计算单位初始物料的气体排放通量, 计算式为

$$\text{ER}_j = \frac{(C_{o,j} - C_{i,j}) \times Q_{\text{air}}}{m} \quad (1)$$

式中, ER_j 表示单位质量 (湿重) 初始物料排放第 j 种气体的排放速率 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), $j=1, 2, 3, 4$, 分别表示 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 , $C_{o,j}$ 和 $C_{i,j}$ 分别表示堆肥箱排气口和进气口处所测第 j 种气体的浓度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), Q_{air} 表示堆肥箱的通风率 ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$), m 表示堆体原料的质量 (kg)。

表 1 堆肥原料特性 (平均值±标准差)

Table 1 Characteristics of composting raw materials (mean±SD)

原料 Materials	pH	含水率 Water content (%)	总碳 Total carbon d.b. (%)	总氮 Total nitrogen d.b. (%)
猪粪 Swine manure	7.40±0.10	78.20±1.50	33.50±1.60	3.40±0.60
玉米秸秆 Corn stalk	—	14.60±1.70	39.20±1.60	1.80±0.50
堆肥原料混合物 Compost mixture	7.13±0.06	69.47±0.87	33.83±0.67	2.57±0.06

注: d.b.代表干基。

Note: d.b. represents dry basis.

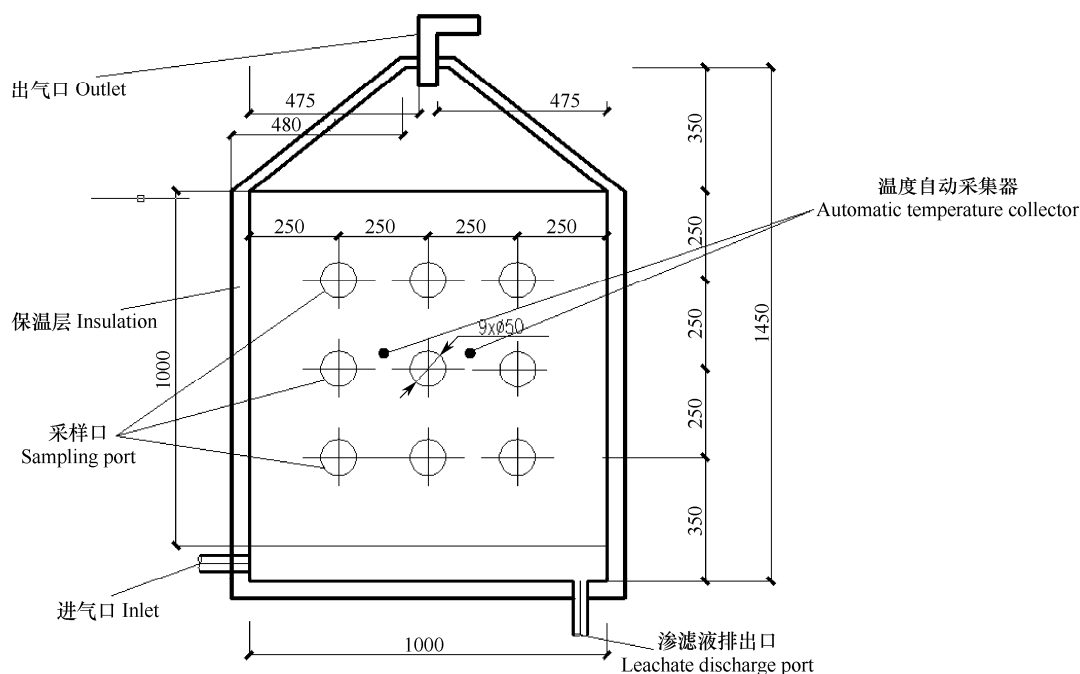


图 1 堆肥箱示意图 (mm)

Fig. 1 Sketch diagram of composting bin (mm)

1.3.2 日平均温度

堆肥箱内和环境温度采用温度自动采集器 (HOBO Pro V2 U23-003) 进行测定, 温度探头放在堆肥箱体中轴处 50cm 左右的深度, 记录间隔为 1h, 日平均温度为 24h 的平均值。

1.3.3 堆肥物料特性

分别在堆肥第 1、5、9、12、15、20、22、26、31 天时, 从堆肥箱体上、中、下 3 层取等量样品, 均匀混合后送农业部畜禽环境设施设备质检中心进行检测, 测定含水率、pH、总碳和总氮等指标。含水率采用烘箱干燥法测定; pH 采用便携式 pH 计法; 总氮采用杜马斯燃烧法。

1.3.4 C、N 损失

$$\mu_{C,i} = \frac{m_{C,i}}{M_{TC}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, 碳损失 ($\mu_{C,i}$) 为不同形式碳损失相对于物料初始总碳质量分数所占的比例, $\mu_{C,i}$ 表示堆肥过程中第 i 种气体排放的 C 损失率, $i=1$ 和 2, 分别表示 CH_4 和 CO_2 ; $m_{C,i}$ 表示每千克初始原料第 i 种气体累计排放的 C 量 ($g \cdot kg^{-1}$); M_{TC} 表示每千克初始原料中总 C 含量 ($g \cdot kg^{-1}$)。

$$\mu_{N,i} = \frac{m_{N,i}}{M_{TN}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, 氮损失 ($\mu_{N,i}$) 为不同形式氮损失相对于物料初始总氮质量分数所占的比例, $\mu_{N,i}$ 表示堆肥过程中第 i 种气体排放的 N 损失率, $i=1$ 和 2, 分别表示 NH_3 和 N_2O ; $m_{N,i}$ 表示每千克初始原料第 i 种气体累计排放的 N 含量 ($g \cdot kg^{-1}$); M_{TN} 表示每千克初始原料中总 N 含量 ($g \cdot kg^{-1}$)。

1.4 数据处理与分析

数据统计和分析利用 SPSS statistics 20 和 Excel 2016, 绘图利用 Sigma Plot 12.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 猪粪堆肥过程中温度的变化

由图 2 可见, 试验期间 (2015 年 10 月 18 日-11 月 21 日) 堆肥箱外环境气温在 $10^\circ C$ 上下, 最高 $13.76^\circ C$, 最低 $3.74^\circ C$ 。箱体内日平均温度从第 1 天开始就远高于箱外, 达 $30.93^\circ C$; 随后大幅升高, 至第 4 天已超过 $50^\circ C$, 并保持高温较长时间; 第 21 天翻堆时温度略有下降, 随后继续升高, 最高时达到 $70^\circ C$ 。在整个堆肥 31d 过程中, 温度持续超过 $50^\circ C$ 的天数达 18d, 符合粪便无害化卫生要求 (GB 7959-2012) 中人工堆肥 $\geq 50^\circ C$ 至少持续 10d^[23] 和畜禽粪便无害化处理技术规范 (NY/T1168-2006) 中密闭式堆肥保持发酵温度 $\geq 50^\circ C$ 不少于 7d^[24] 的要求。

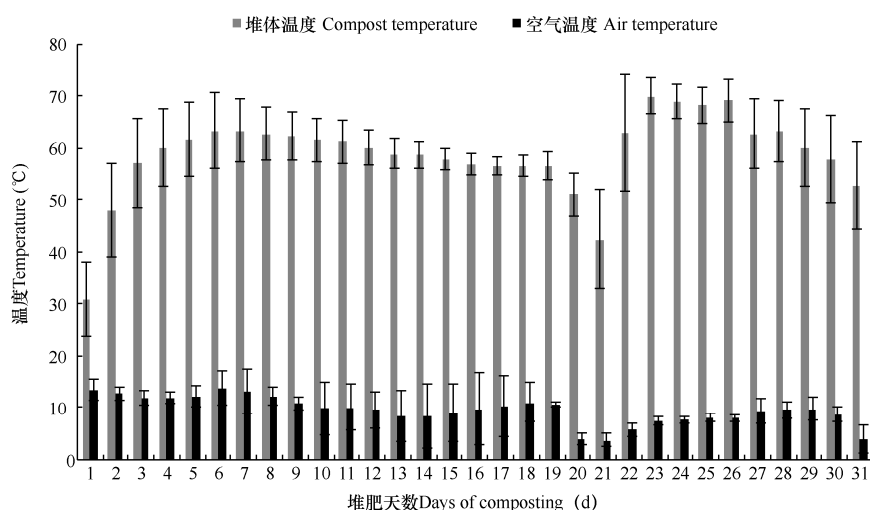


图 2 试验期间箱外环境空气温度和堆体温度逐日变化过程 (平均值 \pm 均方差)

Fig. 2 Variation of daily air temperature outside and daily temperature inside materials of composting bins (mean \pm SD)

注: 短线表示均方差

Note: The bar is standard deviation

2.2 猪粪堆肥过程中物料特性的变化

由图 3a 可见, 试验过程中堆体 pH 整体呈现增长的趋势, 从堆肥开始的 7.1 左右, 经过 31d 的好氧发酵达到 8.0 左右, 满足《有机肥料》(NY 525-2012) 标准中 pH 应在 5.5~8.5 的要求。堆肥物料 pH 在 6.7~9.0 范围内, 堆肥过程中的微生物具有较高的活性^[25], 但相关研究表明, pH 不是影响堆肥微生物

活性的主要因素, 几乎所有物料的 pH 都在这个范围内^[25]。堆体含水率变化如图 3b 所示, 水分是堆肥内微生物生长繁殖的环境条件, 又是物质交换的媒介^[26], 在堆肥过程中具有重要的作用, 在整个堆肥过程中呈现下降趋势, 但在未补充水分的条件下, 试验结束时堆肥物料的含水率仍在 52% 左右, 在微生物生长适宜的含水率 (50%~60%) 范围内。

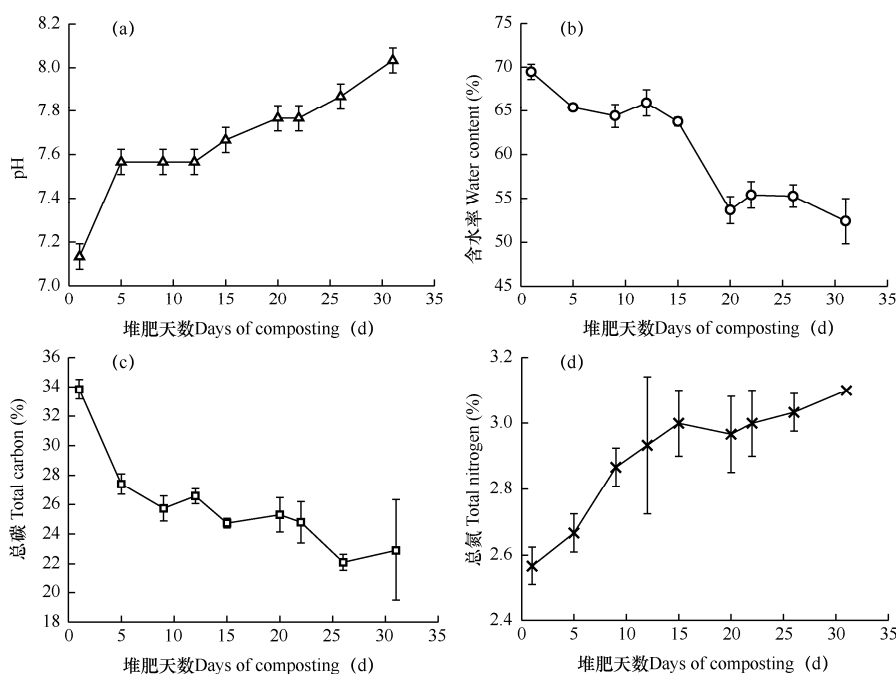


图 3 堆肥 pH 值、含水率、TC 和 TN 动态变化曲线

Fig. 3 Change curves of pH value, water content, TC and TN during composting

TC 在整个堆肥过程中呈现下降趋势, 试验结束时堆肥物料的 TC 比初始值下降了 10.9%, 有机物的降解产生的挥发性含碳气体是造成碳损失的主要原因。堆肥过程中虽然 NH_3 和 N_2O 等气体的挥发造成氮含量的损失, 但 TN 量出现了升高的趋势, 堆肥结束时, TN 含量达 3.1%, 与尚斌等的研究^[22,26-27]具有相似的结论, 主要是由于干物质下降的幅度超过 TN 下降的幅度, 造成 TN 相对含量出现增加 (如图 3c、d)。

2.3 猪粪堆肥过程中气体排放规律

2.3.1 NH_3 排放

NH_3 是好氧发酵过程中主要挥发性物质之一, NH_3

排放不仅造成环境污染, 还会造成氮流失。由图 4 可见, 试验期间 NH_3 的日均排放量在 $16.8 \sim 164.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (排放浓度在 $116.5 \sim 1137 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 排放主要集中在堆肥第 1 周和翻堆后。在堆肥第 2 天 NH_3 排放迅速升高, 随后缓慢下降; 在翻堆前, NH_3 浓度出现缓慢下降, 是由于底部堆肥产生的 NH_3 受到抑制, 直到在翻堆作用下物料的重新分配^[28]。 NH_3 排放峰值出现在第 21 天翻堆后, 达到 $1137 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 远远超过《恶臭污染物排放标准》(GB 14554-93)^[20]三级排放标准中 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的要求, 高达其 227 倍。在整个堆肥过程中, 每千克初始堆肥混合料的 NH_3 排放为 2265.48 mg。

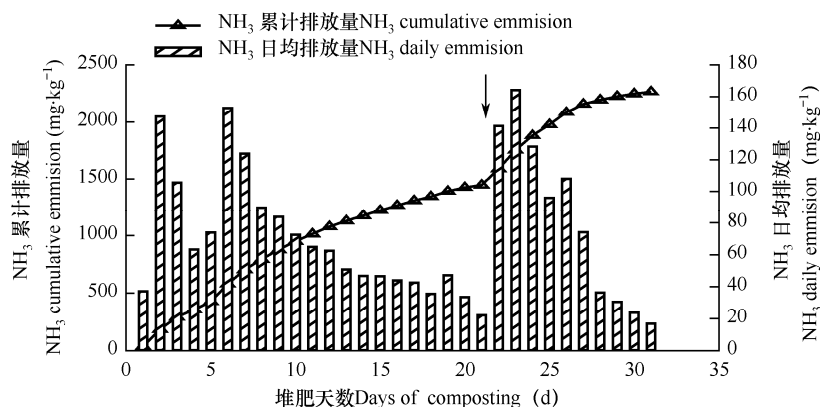


图 4 堆体 NH_3 日排放量与累计排放量的变化

Fig. 4 Change of NH_3 daily emission and cumulative emission

注: 箭头代表在第 21 天翻堆。下同

Note: Vertical arrows indicate remixing of the compost piles on the 21st day. The same as below

2.3.2 N_2O 排放

堆肥过程中铵态氮的硝化与硝态氮的反硝化过程均有可能产生 N_2O , 图 5 为 N_2O 日均排放量和累计排放量, 由图可见, 堆肥前期 N_2O 的排放相对稳定, 后期出现较大的波动。 N_2O 日均排放浓度范围在 $8.7 \sim 33.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 并且排放峰值出现在翻堆后, 达 $33.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 随后迅速下降, 翻堆后 N_2O 达到峰值可能是由于有氧条件下产生的硝酸盐, 进入厌氧区域或微氧环境后, 通过反硝化作用产生 N_2O , 翻堆能够显著增加 N_2O 的释放, 本试验 N_2O 排放在第 18 天时出现了短暂的上升, 并保持 2d 较高的排放浓度, 随后恢复到之前水平, 可能与堆肥第 18 天时出现的连续 26h 停电有关, 但其出现短暂上升的机理需要进一步深入研究。 N_2O 的累计排放量如图 5 所示, 在整个堆肥过程中, 每千克初始堆肥混合料的 N_2O 排放为 66.83 mg。

2.3.3 CH_4 排放

堆肥过程中 CH_4 排放变化规律如图 6 所示, 由图可见, 堆肥初期 CH_4 排放浓度较高, 中后期较低。 CH_4 排放的高浓度出现在堆肥后的前 2d, 随后迅速下降, CH_4 浓度保持 $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右持续 10d, 但在堆肥的第 18 天时, 主要是由于出现超过 26h 的停电, 氧气供应不足, 造成 CH_4 排放增加, 浓度达到 $110 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。第 21 天翻堆后 CH_4 浓度出现了小幅增长, 主要是由于翻堆作用下, 堆体内的 CH_4 得以释放。堆肥后期几乎不产生 CH_4 , 主要是由于有机物的大量减少, 且随着堆肥物料含水量的下降, 厌氧区域减少。图 6 表明, 在整个堆肥过程中, 每千克初始堆肥混合料的 CH_4 累计排放量为 237.36 mg。

2.3.4 CO_2 排放

CO_2 排放主要集中在堆肥的开始阶段和翻堆后,

CO₂ 的释放速度表征了有机物的降解率和微生物活性^[14], CO₂ 排放规律与温度具有相似的变化规律。在试验过程中, CO₂ 的排放浓度为 15.58~46.83 mg·m⁻³。CO₂ 排放峰值在堆肥翻堆后, 浓度高达 46.83 g·m⁻³,

随后迅速下降, 翻堆能够显著促进 CO₂ 的排放, 与 Zhu 等^[28,30-31]具有相似的结论。CO₂ 的累计排放量如图 7 所示, 在整个堆肥过程中, 每千克初始堆肥混合料的 CO₂ 的累计排放量为 135.72 g。

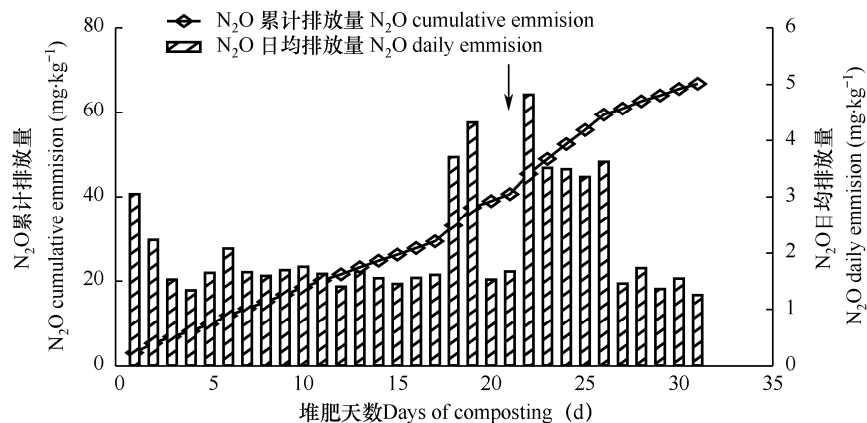


图 5 N₂O 日排放量与累计排放量的变化

Fig. 5 Change of N₂O daily emission and cumulative emission

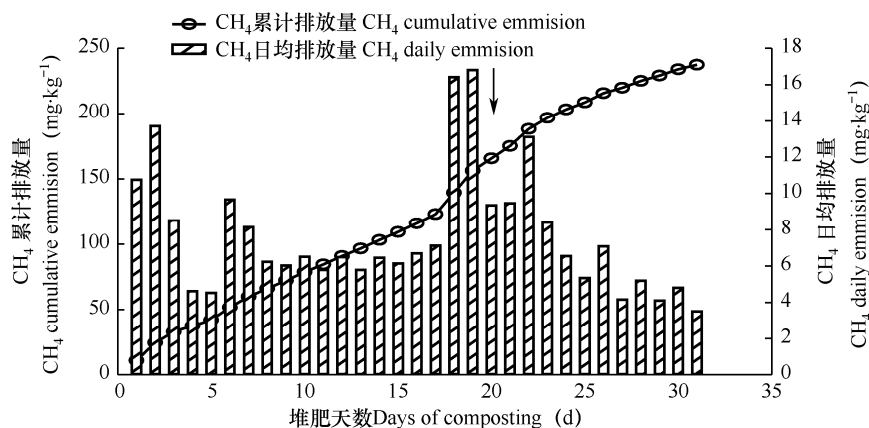


图 6 CH₄ 日排放量与累计排放量的变化

Fig. 6 Change of CH₄ daily emission and cumulative emission

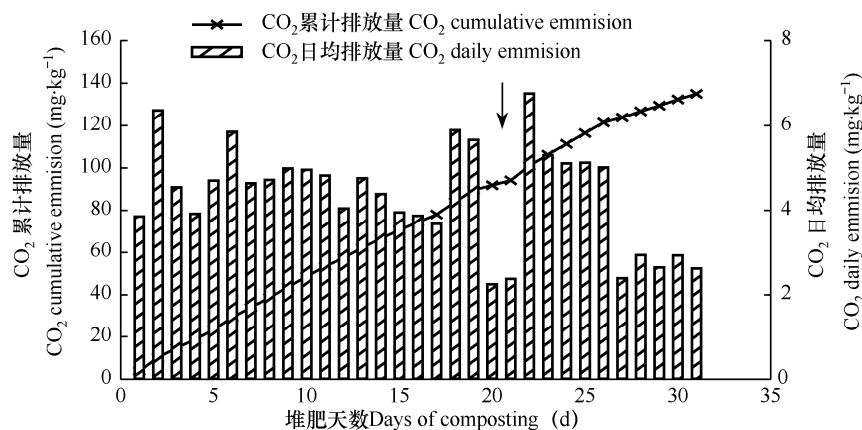


图 7 CO₂ 日排放量与累计排放量的变化

Fig. 7 Change of CO₂ daily emission and cumulative emission

根据 IPCC 第五次评估报告^[32]，按 100a 尺度计算，CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势（GWP）分别是 28 和 256，将 CH₄ 和 N₂O 转化成二氧化碳当量（CO₂-eq），计算出堆肥过程中温室气体排放如表 2 和表 3 所示，考虑和不考虑 CO₂ 排放时的每千克初始原料的温室气体（CO₂-eq）排放总量分别为 159.48 和 23.75g。考虑 CO₂ 时，CO₂、CH₄ 和 N₂O 累计排放分别占温室气体（CO₂-eq）排放的 85.10%、4.17% 和 10.73%。如果不考虑 CO₂，温室气体的排放以 N₂O 为主，N₂O 和 CH₄ 的贡献率分别为 72.02% 和 27.98%。NH₃ 的排放主要集中在第 1 周和翻堆后，分别占总排放的 31.09% 和 36.15%，NH₃ 挥发的氮素损失分别占初始 TN 的 7.40% 和 8.61%；堆肥后期 N₂O 排放占总

排放的 39.14%，以 N₂O 形式挥发的氮素占初始总氮的 0.21%；CH₄ 排放各个阶段差异性不大，第 3 周排放最高，占总排放的 30.32%，占初始总碳的 0.05%。可见，在本试验中 NH₃-N 是主要的氮损失来源，占初始 TN 的 23.81%，CO₂-C 是主要的碳损失来源，占初始 TC 的 35.83%。

气体累计排放量变化规律与物料特性相关性分析如表 4 所示。由表可见，物料 pH 值与气体累计排放呈现良好的正相关（P<0.01），相关系数都在 0.9 以上；含水率与气体累计排放量呈现良好的负相关（P<0.01），除了对 NH₃ 的相关系数小于 0.9，其余均在 0.9 以上；C/N 与气体排放呈现良好的负相关（P<0.01），相关系数均在 0.9 以上。

表 2 堆肥过程中碳氮损失和温室效应分析
Table 2 Loss of carbon and nitrogen and total greenhouse gas emissions

时段 Period	N 损失 N loss(%)		C 损失 C loss(%)		GHG 排放当量 GHG emission equivalent (gCO ₂ -eq,kg)				
	NH ₃ -N	N ₂ O-N	CH ₄ -C	CO ₂ -C	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	总排放（含 CO ₂ ）	总排放（不含 CO ₂ ）
								Total emissions (with CO ₂)	Total emissions (without CO ₂)
1~7d	7.40	0.11	0.04	9.11	1.68	34.52	3.47	39.67	5.14
8~14d	4.95	0.09	0.03	8.63	1.21	32.68	2.89	36.78	4.10
15~21d	2.85	0.13	0.05	7.31	2.02	27.68	4.06	33.76	6.07
22~31d	8.61	0.21	0.05	10.78	1.74	40.83	6.70	49.27	8.44
总计 Total	23.81	0.54	0.17	35.83	6.65	135.72	17.11	159.48	23.75

注：按损失量占初始总碳、总氮的百分比计算碳、氮损失。
Note: Loss of carbon and nitrogen (%) is the carbon and nitrogen loss as a percentage of initial carbon and nitrogen.

表 3 猪粪堆肥过程中 GHG 和 NH₃ 排放
Table 3 GHG and NH₃ emissions from manure composting bins

时段 Period	占总排放量 Percentages of total emissions (%)					
	NH ₃	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	GHG(CO ₂ -eq) (with CO ₂)	GHG(CO ₂ -eq) (without CO ₂)
1~7d	31.09	20.26	25.44	25.25	24.87	21.65
8~14d	20.79	16.89	24.08	18.22	23.06	17.26
15~21d	11.97	23.72	20.40	30.32	21.17	25.56
22~31d	36.15	39.14	30.09	26.21	30.90	35.52

表 4 堆肥过程中温室气体（GHG）累计排放量与 pH、含水率和 C/N 的相关性分析

Table 4 Correlation coefficient between the greenhouse gas emissions and pH value, water content and C/N ratio during composting period					
		NH ₃	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
pH		0.938**	0.950**	0.970**	0.951**
含水率 Water content		-0.848**	-0.901**	-0.904**	-0.932**
C/N		-0.958**	-0.934**	-0.908**	-0.903**

注：**表示 P<0.01。
Note: ** is P<0.01.

3 结论与讨论

本试验以猪粪和秸秆为发酵原料, 经过 31d 好氧发酵, 堆肥发酵温度超过 50℃ 的持续天数均在 10d 以上, 满足现行相关标准的无害化卫生要求; NH_3 排放浓度与温度变化规律具有一定的相似性, NH_3 排放主要集中在堆肥高温期(堆肥第 1 周和翻堆后), 这与 Zhu 等^[28,32]研究具有相似的结论; N_2O 排放主要集中在堆肥后期, 翻堆后 N_2O 达到峰值可能是由于有氧条件下产生的硝酸盐, 进入厌氧区域或微氧环境后, 通过反硝化作用产生 N_2O , 翻堆能够显著增加 N_2O 的释放, 与 Ahn 等^[30,33]具有相似的结论。Ahn 等^[30]认为牛粪堆肥翻堆 N_2O 排放是不翻堆处理的 3.5 倍, 但是 Zhu 等^[28]认为 N_2O 排放集中在堆肥早期, 翻堆不会对 N_2O 浓度造成影响, 江滔等^[17]也认为 N_2O 排放与温度变化趋势相同, 在堆肥的初期达到高峰, 翻堆对 N_2O 排放影响出现不同的研究结论, 可能是由于试验原料、运行控制条件和堆肥方式等对气体的产生和排放的影响。本研究 CH_4 的排放主要集中在第 3 周, 可能是由于第 18 天出现了超过 26h 的停电造成的, 由于氧气不足造成 CH_4 排放增加, 但后期几乎不产生 CH_4 , 主要是由于有机物的大量减少, 且随着堆肥物料含水量的下降, 厌氧区域减少。 CH_4 产生于厌氧条件下, 在厌氧区域减至消失时, 标志着堆肥的成熟^[34]。

在整个堆肥过程中, 每千克初始原料的 NH_3 、 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 的累计排放分别为 2.27、0.07、135.72、0.24g, 并且堆肥过程中气体累计排放量与物料 pH 呈现良好的正相关 ($P < 0.01$), 与含水率和 C/N 呈负相关 ($P < 0.01$)。其中 NH_3 和 N_2O 损失的氮占初始原料 TN 的 23.81% 和 0.54%, CH_4 和 CO_2 形式损失的碳占初始原料 TC 的 0.17% 和 35.83%。整个堆肥过程中以 NH_3 形式损失与 Osada 等^[35]在猪粪堆肥过程中初始原料中 10%~25% 的氮是以 NH_3 的排放而损失具有相似的结论; Beck-Friis 等^[36]认为, 生活垃圾和麦秆堆肥过程中大于 98% 的氮损失是以 NH_3 的形式释放, 可以通过调节 C/N, 以减少 NH_3 的排放, 或减少翻堆的频率和添加覆盖材料均可较好地实现减少 NH_3 的释放^[19]; Boucher 等^[37]通过添加 FeCl_3 降低污泥堆肥过程中 NH_3 的排放。本研究以 CH_4 形式损失的碳占原料总碳低于 Hao 等^[31]牛粪堆肥过程中的 CH_4 形式损失的 2%~3%, 主要是由于原料的 C/N 不同和堆肥工艺的差异性。相关研究表

明, 增加孔隙率和曝气量可以减少 CH_4 的排放^[13], 对于 CH_4 的控制应集中在堆肥前期^[16,38]。

综上所述, 在本研究工艺条件下, 经过 31d 好氧发酵, 满足现行相关标准的无害化卫生要求, 在整个堆肥过程中, 每千克初始原料的 NH_3 、考虑和不考虑 CO_2 的温室气体 ($\text{CO}_2\text{-eq}$) 的累计排放分别为 2.27、159.48 和 23.75g。建议对猪粪堆肥过程中 NH_3 排放的控制集中在堆肥第 1 周和翻堆后, GHG 减排应重点关注堆肥后期 N_2O 的排放。

参考文献 References

- [1] Dong H M, Zhu Z P, Zhou Z K, et al. Greenhouse gas emissions from swine manure stored at different stack heights[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166: 557-561.
- [2] Lim S L, Lee L H, Wu T Y. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 111: 262-278.
- [3] Zhong J, Wei Y S, Wan H F, et al. Greenhouse gas emission from the total process of swine manure composting and land application of compost[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 348-355.
- [4] 江滔, 李国学, 唐琼, 等. 腐熟堆肥筛上粗颗粒对堆肥化过程中温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(7): 1363-1370.
Jiang T, Li G X, Tang Q, et al. Effect of adding coarse materials from matured compost on greenhouse gas emissions from organic wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1363-1370. (in Chinese)
- [5] 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 windrow composting[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 533-540. (in Chinese)
- [6] Hao X Y, Larney F J, Chang C, et al. The effect of phosphogypsum on greenhouse gas emissions during cattle manure composting[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(3): 774-781.
- [7] Hao X, Chang C, Larney F J, et al. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting[J]. *Journal of*

- Environmental Quality, 2001, 30(2): 376-386.
- [8] 谢军飞, 李玉娥. 不同堆肥处理猪粪温室气体排放与影响因素初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 56-59.
- Xie J F, Li Y E. Release of greenhouse gases from composting treatments on piggery excreta[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(1): 56-59. (in Chinese)
- [9] Ge J Y, Huang G Q, Huang J, et al. Particle-Scale modeling of methane emission during pig manure/wheat straw aerobic composting[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(8): 4374-4383.
- [10] Nginkam E, Tanawa E, Rousseaux P, et al. Evaluation of the potentialities to reduce greenhouse gases (GHG) emissions resulting from various treatments of municipal solid wastes (MSW) in moist tropical climates: application to Yaoundé [J]. Waste Management & Research, 2002, 20(6): 501-513.
- [11] Friedrich E, Trois C. GHG emission factors developed for the recycling and composting of municipal waste in South African municipalities[J]. Waste Management, 2013, 33(11): 2520-2531.
- [12] 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 CSAE, 2013, 29(18): 226-233. (in Chinese)
- [13] Wang J Z, Hu Z Y, Xu X K, et al. Emissions of ammonia and greenhouse gases during combined pre-composting and vermicomposting of duck manure[J]. Waste Management, 2014, 34(8): 1546-1552.
- [14] Awasthi M K, Wang Q, Huang H, et al. Influence of zeolite and lime as additives on greenhouse gas emissions and maturity evolution during sewage sludge composting[J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 172-181.
- [15] 陈是吏, 李国学, 袁京, 等. 过磷酸钙和双氰胺联用减少污泥堆肥温室气体及 NH_3 排放[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 199-206.
- Chen S L, Li G X, Yuan J, et al. Combination of superphosphate and dicyandiamide decreasing greenhouse gas and NH_3 emissions during sludge composting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 199-206. (in Chinese)
- [16] 钟佳, 魏源送, 赵振风, 等. 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4186-4194.
- Zhong J, Wei Y S, Zhao Z F, et al. Emission of greenhouse gas and ammonia from the full process of sewage sludge composting and land application of compost[J]. Environmental Science, 2013, 34(11): 4186-4194. (in Chinese)
- [17] 江滔, Frank Schuchardt, 李国学. 冬季堆肥中翻堆和覆盖对温室气体和氨气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 212-217.
- Jiang T, Frank S, Li G X. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 212-217. (in Chinese)
- [18] Yasuyuki F, Takashi O, Dai H, et al. Patterns and quantities of NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale[J]. Bioresource Technology, 2003, 89(2): 109-114.
- [19] Huang G F, Wong J W, Wu Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. Waste Management, 2004, 24(8): 805-813.
- [20] 郭东坡, 陶秀萍, 尚斌, 等. 死猪堆肥处理的通风率选择探讨[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 187-193.
- Guo D P, Tao X P, Shang B, et al. Selection of ventilation rates on dead pig composting[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 187-193. (in Chinese)
- [21] 陶秀萍, 郭东坡, 董红敏, 等. 冬季死猪与猪粪同步堆肥运行效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 218-224.
- Tao X P, Guo D P, Dong H M, et al. Operation effects of dead pigs composted with swine manure in winter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 218-224. (in Chinese)
- [22] 尚斌, 陶秀萍, 董红敏, 等. 死猪堆肥处理通风率的优化试验[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 2047-2052.
- Shang B, Tao X P, Dong H M, et al. Optimum ventilation rates for pig carcass composting[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(10): 2047-2052. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国卫生部. GB7959-2012 粪便无害化卫生要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Ministry of Health of the PRC. GB7959-2012 Hygienic requirements for harmless disposal of night soil[S]. Beijing: China Standards Press, 2012. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国农业部. NY/T1168-2006 畜禽粪便无害化处理技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Ministry of Agriculture of the PRC. NY/T1168-2006 Technical requirement for non-hazardous treatment of animal

- manure[S].Beijing:China Standards Press,2006.(in Chinese)
- [25]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.
- [26]徐卫平.染疫动物生物安全静态堆肥法的建立与评价[D].大连:大连理工大学,2010.
- Xu W P.Development and evaluation of biorescue static composting systems for disposal of infectious livestock mortalities[D].Dalian:Dalian University of Technology,2010. (in Chinese)
- [27]高凌飞.垫料、菌渣联合堆肥过程中碳氮转化与温室气体排放研究[D].福州:福建农林大学,2015.
- Gao L F.Study on transformation of carbon and nitrogen as well as greenhouse gas emission during pig breeding litter combine with mushroom residue composting [D].Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2015.(in Chinese)
- [28]Zhu Z P,Dong H M,Xi J L,et al.Ammonia and greenhouse gas emissions from co-composting of dead hens with manure as affected by forced aeration rate[J].Transactions of the ASABE,2014,57(1): 211-217.
- [29]国家环境保护局,国家技术监督局.GB 14554-93 恶臭污染物排放标准[S].北京:中国标准出版社,1993.
- State Bureau of Environmental Protection,State Bureau of Technical Supervision.GB 14554-93 Emission standards for odor pollutants[S].Beijing:China Standards Press,1993.(in Chinese)
- [30]Ahn H K,Mulbry W,White J W,et al.Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting of dairy manure[J].Bioresource Technology,2011,102(3):2904-2909.
- [31]Hao X Y,Stanford K,Mc Allister T A,et al.Greenhouse gas emissions and final compost properties from co-composting bovine specified risk material and mortalities with manure[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2009,83(3): 289-299.
- [32]IPCC.Climate change 2013:the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. New York,NY,USA:Cambridge University Press,2013.
- [33]Fukumoto Y,Osada T,Hanajima D,et al.Patterns and quantities of NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale[J]. Bioresource Technology,2003,89(2): 109-114.
- [34]Haga K.Animal waste problems and their solution from the technological point of view in Japan[J].Japan Agricultural Research Quarterly,1998,32(3):203-210.
- [35]Osada T,Kuroda K,Yonaga M.Determination of nitrous oxide, methane, and ammonia emissions from a swine waste composting process[J].Journal of Material Cycles and Waste Management,2000,2(1):51-56.
- [36]Beck-Friis B,Smars S,Jönsson H,et al.Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes[J].Journal of Agricultural Engineering Research,2001,78(4):423-430.
- [37]Boucher V D,Revel J C,Guiesse M,et al.Reducing ammonia losses by adding FeCl_3 during composting of sewage sludge[J]. Water,Air,and Soil Pollution,1999,112(3-4):229- 239.
- [38]Kuroda K,Osada T,Yonaga M,et al.Emissions of malodorous compounds and greenhouse gases from composting swine feces[J].Bioresource Technology,1996, 56(2): 265-271.