

含硫添加剂对猪粪堆肥过程甲烷与臭气排放的影响

闫召伟, 杨菲宇, 高兴祖, 陈杰, 李施雨, 李国学, 罗文海

引用本文:

闫召伟, 杨菲宇, 高兴祖, 等. 含硫添加剂对猪粪堆肥过程甲烷与臭气排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2448–2455.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0980>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Fe_2O_3 对鸡粪堆肥过程中含硫臭气排放的影响

陈文旭, 李国学, 马若男, 刘燕, 袁京

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2465–2471 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0857>

腐熟堆肥回流对猪粪堆肥含硫臭气排放的影响

杨佳, 李国学, 马若男, 王国英, 袁京

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2456–2464 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0859>

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>

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>

堆肥中不同氮素原位固定剂的综合比较研究

江滔, 常佳丽, 马旭光, 李国学

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 369–375 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0996>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

闫召伟, 杨菲宇, 高兴祖, 等. 含硫添加剂对猪粪堆肥过程甲烷与臭气排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2448–2455.

YAN Z W, YANG F Y, GAO X Z, et al. Effect of sulfur-containing additives on methane and odor emissions during pig manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2448–2455.



开放科学 OSID

含硫添加剂对猪粪堆肥过程甲烷与臭气排放的影响

闫召伟, 杨菲宇, 高兴祖, 陈杰, 李施雨, 李国学, 罗文海*

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

摘要:为探寻合适的含硫添加剂,有效控制堆肥过程中甲烷和臭气的排放,以磷石膏(PG)、过磷酸钙(SP)、硫酸钠(NS)为添加剂,采用强制通风曝气的60 L桶状发酵罐,探究不同含硫添加剂对于猪粪堆肥过程中气体排放的影响。结果表明:添加堆肥原始物料鲜质量2%的PG、2%的SP、1.2%的NS处理分别能减少50.8%、43.3%、46.6%的甲烷排放;PG和SP处理能减少40.6%和37.2%的氨气挥发,NS处理减少了20.0%的氨气挥发;PG与SP处理对硫化氢气体没有产生明显的抑制作用,而NS处理的硫化氢排放量为对照(无添加剂)处理的3.8倍,且NS处理堆肥结束后种子发芽率仅为41.3%。研究表明,1.2%的NS处理不适合臭气减排,而添加2%的PG以及2%的SP等低硫添加剂较为适宜。

关键词:堆肥;猪粪;含硫添加剂;甲烷排放;臭气排放

中图分类号:S141.4;X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)11-2448-08 doi:10.11654/jaes.2021-0980

Effect of sulfur-containing additives on methane and odor emissions during pig manure composting

YAN ZhaoWei, YANG FeiYu, GAO XingZu, CHEN Jie, LI ShiYu, LI GuoXue, LUO WenHai*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: This study aimed to identify suitable sulfur-containing additives for the effective control of methane and odor emissions from composting processes. In this study, we used phosphogypsum (PG), calcium superphosphate (SP), and sodium sulfate (NS) as additives in a 60 L barrel fermenter with forced ventilation and aeration to investigate the effects of different sulfur-containing additives on gas emissions during the composting of pig manure. The results showed that the addition of 2% PG, 2% SP, and 1.2% NS to the compost raw material reduced methane emissions by 50.8%, 43.3%, and 46.6%, respectively. PG and SP treatments reduced ammonia volatilization by 40.6% and 37.2%, respectively, and NS treatment reduced ammonia volatilization by 20.0%. PG and SP treatments did not have a substantial inhibitory effect on hydrogen sulfide gas emissions; hydrogen sulfide emission from NS treatment was 3.8 times higher than that of the control treatment, and the seed germination rate at the end of composting in the NS treatment was only 41.3%. In summary, the addition of 1.2% NS treatment is not suitable as an odor reduction strategy, but the addition of 2% PG and 2% SP and other low-sulfur additives is more appropriate.

Keywords: compost; pig manure; sulfur additive; methane emission; gas emission

收稿日期:2021-08-29 录用日期:2021-09-18

作者简介:闫召伟(1997—),男,河北邢台人,硕士研究生,从事有机废弃物好氧发酵研究。E-mail:yanzw97@163.com

*通信作者:罗文海 E-mail:luowenhai@cau.edu.cn

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目“反刍动物粪污循环利用关键技术与示范”(2021GG0316)

Project supported: The Project for Science and Technology of Inner Mongolia Autonomous Region “Key Technology Research and Demonstration of Ruminant Faeces Recycling”(2021GG0316)

随着我国经济的迅速发展以及人民生活水平的逐步提高,我国畜禽养殖规模逐渐扩大。已有统计表明,我国2020年的生猪出栏数达40 650.42万头,以猪的产污系数进行核算,粪尿年产生量已达84 128万t^[1]。畜禽粪尿如果不能被合理地处理与资源化利用,则会对环境造成巨大污染,以及严重的资源浪费。好氧发酵技术可以实现畜禽粪便的资源化利用,充分腐熟后的畜禽粪便可作为优质的有机肥料施用于土壤,其不仅可以提高土壤有机质含量,而且可以提供大量的缓效养分^[2],促进植物的生长。但猪粪中存在的大量的氮、硫等元素会导致堆肥过程中产生大量温室气体和臭气,从而对地球环境以及人居环境造成不同程度的污染。

堆肥过程中无法做到物料间的完全疏松多孔,常会出现局部厌氧的情况,造成CH₄和臭气的排放。CH₄作为温室气体的重要来源,其增温潜势约是CO₂的28倍^[3],如对其排放不加以控制则会加剧全球气候变暖;同时,堆肥过程也会有大量臭气排放,由于臭气中含有大量氮、硫等元素,当其以气体形式挥发散失时则会降低堆肥产品的营养成分含量,并且臭气的嗅阈值极低^[4],在大规模堆肥情况下,刺鼻的气味会对周围人居环境产生极大的影响,“邻避效应”严峻。

为了减少堆肥过程中污染气体的排放,国内外学者提出了众多减排方案,如改善工艺参数和添加外源材料等。其中工艺参数主要包括通风量、通风方式、翻堆频率、pH及含水率等。例如,江滔等^[5]的研究表明,在堆肥过程中控制翻堆频率和覆盖可使温室气体减排10.9%~24.1%。JIANG等^[6]的研究表明,适当减少通风量有利于降低猪粪和秸秆混合堆肥过程中的NH₃挥发量。为了进一步抑制堆肥过程中污染气体的排放,不同性质的外源添加材料已被广泛用于堆肥过程中。李丹阳等^[7]的研究表明,添加过磷酸钙和氢氧化镁能有效减少41.78%的NH₃排放,从而减少了13.27%的总氮损失。CHEN等^[8]通过添加生物炭使鸡粪堆肥的CH₄、N₂O、NH₃排放量分别降低了19.0%~27.4%、9.3%~55.9%和24.2%~56.9%。一些研究表明,特别是在污水处理领域,含硫试剂可以控制厌氧过程中CH₄的产生,过量的硫酸盐会对厌氧微生物产生严重的抑制作用,其作用机理主要是硫酸盐的还原产物以及金属硫化物对细菌的抑制作用^[9],同时硫酸盐还原菌与产甲烷菌存在竞争抑制,硫酸盐还原反应释放的能量比产甲烷反应的高,反应更容易发生^[10]。近年来,一些含硫试剂也被作为添加剂用以控制堆肥

过程污染气体的排放。例如,李慧杰等^[11]在鸡粪堆肥中添加典型含硫添加剂过磷酸钙降低了56.20%的CH₄排放总量。然而,目前聚焦含硫添加剂对堆肥过程气体排放的研究依然较少,是否有合适的含硫添加剂,既能够减少CH₄排放又不会造成大量含硫臭气产生,并且可提高堆肥的产品品质仍需要进一步探索。

因此,本研究以猪粪和玉米秸秆为原料,研究不同类型含硫化合物对猪粪堆肥过程中CH₄、NH₃、H₂S等污染气体排放的影响,并确定适宜的含硫添加剂种类及其添加量,以期进一步提高畜禽粪便堆肥过程的环境效益。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验主料猪粪取自北京市某养猪场;辅料玉米秸秆取自中国农业大学上庄试验站,秸秆经粉碎机粉碎至3 cm左右。各原料基本性状如表1所示,其中总有机碳、总氮和氨氮含量均以堆肥干基计算。

表1 堆肥初始物料的基本性状

Table 1 Basic characteristics of composting materials

项目 Item	总有机碳 TOC/ (g·kg ⁻¹)	总氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	氨氮 Ammonia N/ (g·kg ⁻¹)	含水率 Moisture content/%	碳氮比 C/N
猪粪	365.65	27.76	5.83	77.14	13.17
玉米秸秆	413.77	9.58	—	4.82	43.18
混合	380.75	21.98	4.30	65.53	17.32

试验所选添加剂为磷石膏(PG)、过磷酸钙(SP)和硫酸钠(NS)。堆肥在体积60 L的发酵罐中进行,该发酵罐由不锈钢制成圆筒形状,底面直径46 cm,高70 cm,壁厚5 cm,双层结构保证其保温效果,罐体底部设置通风口与渗滤液接口,顶部设置出气口。发酵罐由软件C-LGX系统控制,该系统可以测量温度并记录,而且可调节通风速率。

1.2 试验设计

试验共设置4个处理,其中,PG处理添加初始物料鲜质量2%的磷石膏(约800 g),SP处理添加初始物料质量2%的过磷酸钙(约800 g),NS处理添加初始物料鲜质量1.2%的硫酸钠。物料混合后,CK、PG、SP、NS处理的总硫含量(以干质量计)分别为6.7、13.7、11.9、13.6 g·kg⁻¹。

1.3 采样与测定方法

试验开始第0、3、7 d进行翻堆并取样,此后每7 d

进行1次翻堆并取样,直到40 d堆肥结束。堆肥温度由自动控制系统进行测量并记录其变化。堆肥的前中期,每日从罐体的出气口取气,测定 CH_4 、 H_2S 、 NH_3 、 O_2 等气体排放数据,堆肥后期每2 d进行一次取气测定。

气体测定: CH_4 与 N_2O 采用气相色谱仪进行测定(北分,3420A,中国)。 NH_3 采用硼酸吸收法进行测定。 H_2S 采用便携式沼气分析仪进行测定(Biogass 5000, Geotech, 英国)。总氮、总硫、总磷采用元素分析仪(vario MACRO cube, 德国)进行测定。 NH_4^+-N 与 NO_3^--N :经 $\text{KCl}(2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})$ 浸提稀释后采用流动分析仪(Auto Analyzer3, seal, 德国)进行测定。

2 结果与讨论

2.1 温度与电导率

试验各处理均呈现典型堆肥温度变化趋势(图1),即升温、高温、降温、腐熟4个过程。堆肥初期,各处理温度快速上升,并在第2 d达到 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 进入高温期。此后,各处理温度有所下降,但在翻堆后温度重新上升,这是由于翻堆后有机质被重新分配并且与 O_2 充分接触。在第33 d后,所有处理温度下降至室温,再次翻堆后也不再出现升温现象,表明可被分解的有机物已经消耗殆尽。在整个堆肥过程中,各处理高于 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度均持续了10 d以上,符合堆肥无害化要求。

电导率(EC)表示溶液导电性的大小,常用来表示堆肥浸提液中总离子浓度的大小,离子浓度越大,则EC值越高,对种子发芽的胁迫作用越强。堆肥开始时,各处理的EC值在 $2.2\sim 3.7\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。PG和SP处理组堆肥的初始EC值在 $2.7\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右,与CK组的EC值基本相同。NS处理的初始EC值约为 $3.7\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,明显高于CK处理,其原因是添加剂中含有的大量的 Na^+ 、 SO_4^{2-} 等无机盐离子大幅提升了堆肥初始的EC值。随着堆肥反应的进行,由于离子沉降、渗滤液淋溶、腐殖质整合等原因,各处理的EC值均有不同程度的降低,最终各处理的EC值为 $1.8\sim 3.0\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

2.2 气体排放

2.2.1 CH_4 排放

各处理的 CH_4 排放主要发生在堆肥高温期(图2)。在堆肥温度较高的前14 d,各处理的 CH_4 累积排放量占整个堆肥过程中总排放量的 $50.4\%\sim 86.1\%$ 。这主要是因为堆肥开始后,微生物分解有机物,消耗

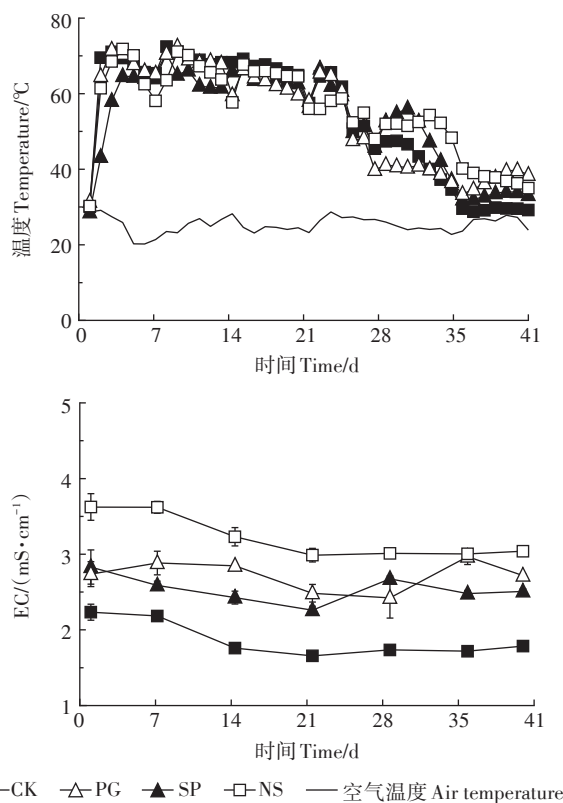


图1 不同处理温度与EC值变化

Figure 1 Changes of temperature and EC value in different treatments

大量的 O_2 ,导致堆肥内部产生局部的厌氧反应,为厌氧微生物代谢产 CH_4 提供了适宜的生境^[12]。其中, CH_4 (每千克干物质DM)排放峰值达 $8.67\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ (文中排放速率与累计排放量均指每千克干物质所产生)。远高于含添加剂处理组。随后,微生物作用减缓,通风改善了堆体内的厌氧环境,导致各处理的 CH_4 排放量逐渐降低^[13]。堆肥中期,每次翻堆后 CH_4 排放均出现波动,因为翻堆促进了微生物对有机物的充分降解, O_2 浓度下降,再次引起了 CH_4 排放的增加。到堆肥后期,随着可降解有机物的耗尽,堆肥反应停滞, O_2 浓度接近空气,各处理的 CH_4 排放量逐渐为0。

从累积排放量可以得出,添加含硫添加剂的处理 CH_4 累积排放量明显低于CK处理,说明含硫添加剂对 CH_4 具有良好的减排作用,其中PG处理 CH_4 排放量累积比CK处理下降了50.8%。这与HAO等^[14]的研究结果相似,其在牛粪堆肥中加入磷石膏后减少了80%的 CH_4 排放。SP处理与CK相比,其 CH_4 减排约43.3%。在ZHANG等^[15]的研究中,在猪粪堆肥中添加10%的过磷酸钙(干质量)后 CH_4 排放量下降了35.5%,这与本研究结果基本相符。在40 d的堆肥过

程中,NS处理相较CK处理 CH_4 减排量达42.9%。以上含硫添加剂对 CH_4 排放均产生了明显的抑制作用,主要原因可能是:(1)添加剂中的硫酸根抑制了产甲烷微生物的活性^[14,16-17],并且随添加浓度增加,抑制作用增强;(2)硫化物在细菌表面过量积累会对其产酸、产 CH_4 过程造成抑制作用^[18];(3)甲烷氧化古菌以硫酸根为电子受体,将 CH_4 氧化为 CO_2 或者碳酸盐^[19]。然而,在TS含量相同的PG与NS处理中,NS的 CH_4 累积排放量高于PG,这主要是由于磷石膏的弱酸性促进了甲烷氧化菌的氧化作用,从而减少了 CH_4 的排放量^[20]。

2.2.2 H_2S 排放

此前诸多研究表明,堆肥中 H_2S 气体主要是微生物对硫酸盐或以含硫有机物为底物分解所产生的^[21]。生物作用产生 H_2S 的途径主要有两种:一是硫酸盐或亚硫酸盐在硫酸盐还原菌特别是脱硫弧菌作用下被还原成 H_2S ;二是含硫有机物(如含硫氨基酸、磺氨酸等)在硫酸盐还原菌作用下降解产生 H_2S ^[21-23]。各处理 H_2S 的产排规律基本一致,主要发生在高温期(图3)。这是因为高温阶段好氧微生物的活动旺盛,消耗大量 O_2 ,造成局部厌氧环境,从而使与产 H_2S 有关的微生物

活性增强。

由图3可以看出,整个堆肥过程中,NS处理的 H_2S -S累积排放量为 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为CK处理的3.8倍,而PG和SP处理的排放量与CK处理之间的差异不明显。这与ZHANG等^[15]的研究结果不同,其在添加过磷酸钙后 H_2S 出现了明显的减排现象。在总硫添加量相同条件下,NS处理的 H_2S -S累积排放量远高于PG处理的 0.18 g ,其主要原因可能是磷石膏的弱酸性不利于 H_2S 的产生,硫酸钠在厌氧环境下更易被脱硫功能菌还原^[24],同时钠离子抑制了其他厌氧微生物的活性,有利于硫酸盐还原菌的还原作用。

2.2.3 NH_3 排放

如图4所示,在堆肥高温期各处理的 NH_3 排放量较大。堆肥前20 d,各处理的 NH_3 累积排放量为 $12.1\sim 33.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,占整个堆肥过程 NH_3 总排放量的65.1%~88.2%。其主要原因是在堆肥高温期,由于微生物的矿化作用,大量有机物被降解产生 NH_4^+-N ,而 NH_4^+-N 易挥发损失,从而造成了 NH_3 的大量排放。翻堆后各处理的 NH_3 排放量明显增加,这主要是因为翻堆使得未被降解的有机物转移至 O_2 充足的区域,促进了有机氮向无机氮的转化,同时翻堆使得堆肥物料

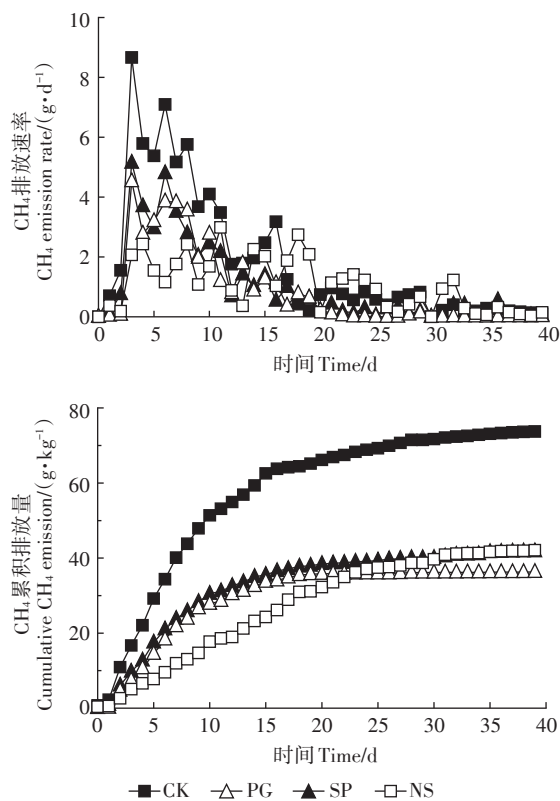


图2 CH_4 排放速率及累积排放量变化

Figure 2 CH_4 emission rates and cumulative emissions changes

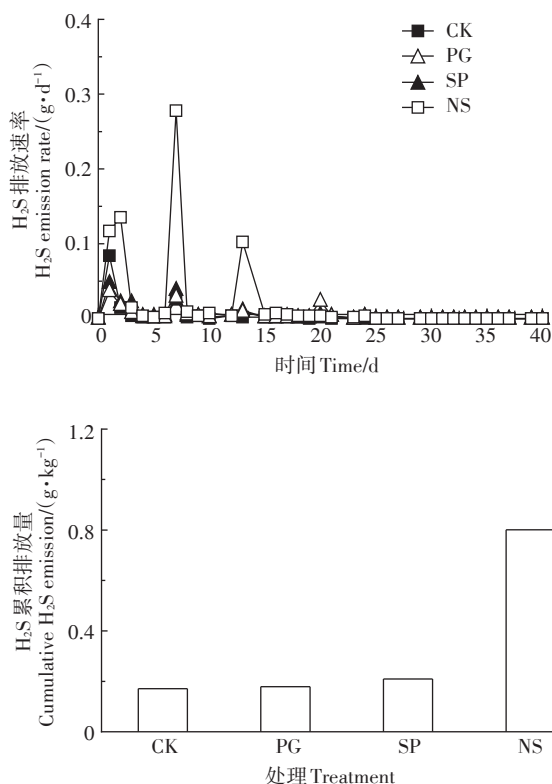


图3 H_2S 排放速率变化及累积排放量

Figure 3 H_2S emission rate and cumulative emissions changes

疏松,有利于 NH_3 的挥发损失^[5]。堆肥后期,由于堆体内可降解物质的耗尽, NH_3 不再产生。

含硫添加剂能明显减少堆肥过程中 NH_3 的挥发损失。堆肥的第7 d,CK处理的 NH_3 排放峰值为 $5.9 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,远高于其他处理的 $0.5 \sim 3.6 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ (图4)。而在整个堆肥过程中,与CK处理相比,PG处理能减少40.6%的 NH_3 挥发损失,其主要原因是添加磷石膏降低了堆肥初始的pH值,而pH值的降低会显著减少 NH_3 的挥发^[25]。SP处理的 NH_3 累积排放量比CK处理减少了37.2%,宋修超等^[26]通过添加5%过磷酸钙同样达到了 NH_3 减排35%以上的效果。这主要是因为过磷酸钙中的 H_2PO_4^- 有利于部分铵根离子与其他离子(如 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等)结合,形成的 $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 结晶及 NH_4MgPO_4 复合体等抑制了 NH_4^+-N 向 NH_3 的转化^[17]。同时过磷酸钙呈弱酸性,也能降低堆肥的初始pH值,减少 NH_3 挥发。添加中性的硫酸钠也能减少堆肥过程中 NH_3 的排放,NS处理较CK处理能减少20.0%的 NH_3 损失,其原因是硫酸钠可以将 NH_4^+-N 转化为比较稳定的硫酸铵,从而减少其以 NH_3 的形式挥发损失。

2.3 铵态氮和硝态氮

各处理的 NH_4^+-N 含量均呈先上升后下降的趋势

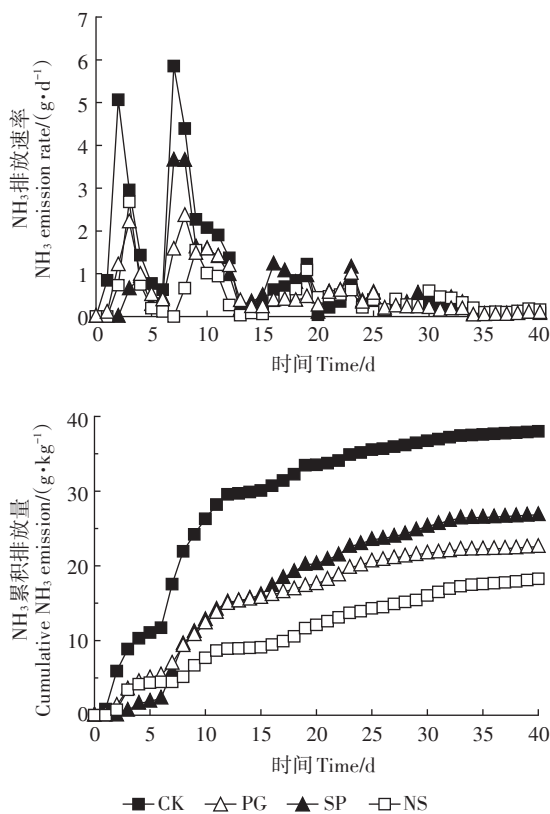


图4 NH_3 排放速率及累积排放量变化

Figure 4 NH_3 emission rate and cumulative emission changes

(图5)。堆肥开始后,由于微生物的矿化作用,大量的有机氮转化为无机氮,增加了堆体中 NH_4^+-N 的含量。随后,堆体进入高温阶段,大量 NH_4^+-N 主要以 NH_3 的形式挥发损失,导致各处理的 NH_4^+-N 含量迅速降低。堆肥后期,堆体的温度降低, NH_3 的挥发减缓,而部分 NH_4^+-N 在硝化细菌作用下转化为 NO_3^--N 和 NO_2^--N 以及有机氮,故堆肥后期各处理的 NH_4^+-N 含量仍持续降低。堆肥结束时,各处理的 NH_4^+-N 含量均明显高于CK处理,其主要原因是含硫添加剂中含有 SO_4^{2-} 、 H_2PO_4^- 及游离酸等成分,在降低堆肥初始pH值的同时,将猪粪中的 NH_4^+ 转化为比较稳定的硫酸铵、磷酸铵以及鸟粪石等含氮复合物,减少以 NH_3 形式挥发的损失^[27]。

在整个堆肥过程中,各处理的 NO_3^--N 含量逐渐增加(图5)。堆肥的前2周,各处理的 NO_3^--N 含量增加相对缓慢。主要原因是在这一阶段,堆肥的温度较高, O_2 含量较低,而大多数硝化细菌不嗜热,并且在 O_2 含量较高的环境下活跃^[28],因此高温期会一定程度上抑制硝化细菌的活性,不利于硝化反应的进行。堆肥后期,随着堆肥温度降低,硝化反应明显,大量的 NH_4^+-N 以及有机氮转化为 NO_3^--N 。SP处理 NO_3^--N 含量明显高于其他处理,这与该处理的 NH_3 减排规律相呼应: NH_4^+-N 转化为 NH_3 的数量少,随即被氧化为 NO_3^--N 的数量增多。同时,与其他添加剂相比,过磷酸钙较强的酸性对反硝化作用有所抑制^[29],有利于 NO_3^--N 的形成与积累。

2.4 物料腐熟度与物料平衡

2.4.1 腐熟度指标

堆肥腐熟度是评价堆肥产品质量的重要指标。目前,公认的堆肥腐熟度评价指标主要包括物理、化学及生物学评价指标,如堆肥的表现特征、有机质变化、 NH_4^+-N 、EC值、腐殖化指标、有机酸、C/N、种子发芽指数(GI)等。堆肥结束时各腐熟度指标如表2所示。各处理的pH为8.0~8.6、EC值为 $1.8 \sim 3.0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、C/N为11.6~14.0,均符合《有机肥料》(NY/T 525—2021)的标准。CK、SP及PG处理的GI值均超过了100%,表明堆肥已完全腐熟。而NS处理的GI值在堆肥结束后仅为41.3%,低于堆肥GI值无害标准(50%),其主要原因是 Na^+ 的累积会影响种子的渗透势而产生胁迫,还会抑制淀粉酶活性等抑制种子的萌发^[30]。但从其他腐熟度评价指标来看,硫酸钠基本不影响堆肥的腐熟化进程。从腐熟度各指标综合分析可得,PG和SP处理不会对堆肥产品质量造成不利影响。

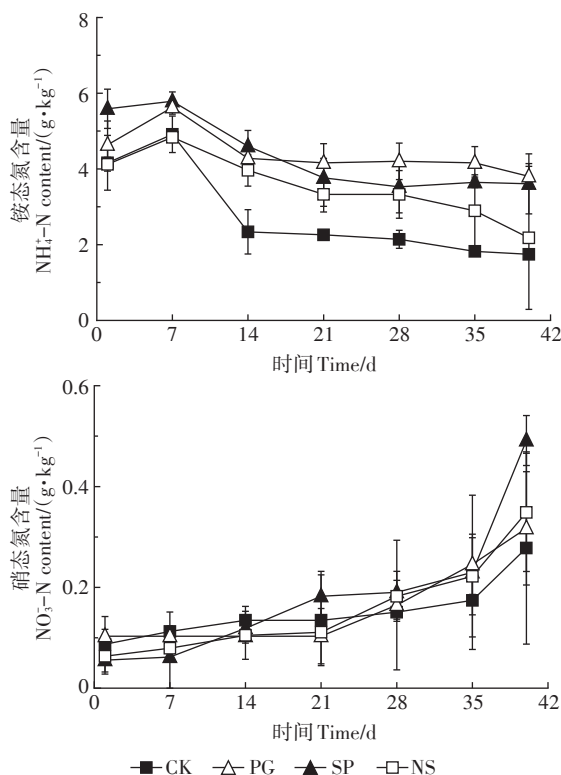


图5 铵态氮与硝态氮含量的变化

Figure 5 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content

2.4.2 物料与元素平衡

各处理堆肥过程的物料平衡如表3所示。碳素平衡中, $\text{CO}_2\text{-C}$ 是堆肥总碳损失的主要形式,约占堆肥物料初始总碳质量分数的40.66%~44.67%;而各处理以 $\text{CH}_4\text{-C}$ 形式损失的碳素仅占堆肥物料初始总碳质量分数的0.80%~1.63%,且主要发生在堆肥的高温期。与CK处理相比,含硫添加剂明显减少了 CH_4 的排放,这是含硫添加剂抑制 CH_4 的产生和提高 CH_4 氧化的综合结果。

从氮素平衡来看,各处理以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发损失的氮素占堆肥物料初始总氮质量分数的15.83%~26.66%,是堆肥过程中氮素损失的主要形式。PG处理的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发比CK处理降低10.83个百分点,使

表2 堆肥腐熟度评价指标

Table 2 Maturity indices of final compost

处理 Treatment	pH	GI/%	EC/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+\text{-N}/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^-\text{-N}/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	C/N
CK	8.0	127.2	1.8	1.7	0.3	14.0
PG	8.0	132.3	2.7	3.8	0.3	12.4
SP	8.0	145.6	2.5	3.6	0.5	11.6
NS	8.6	41.3	3.0	2.2	0.3	13.9

堆肥总氮损失降低了7.68个百分点;SP处理与CK组相比 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发降低9.93个百分点,堆肥总氮损失降低9.41个百分点。从氮素损失结果来看,磷石膏和过磷酸钙具有良好的固氮作用,这与吴娟等^[31]在以过磷酸钙为添加剂的猪粪堆肥研究的结果一致。与CK组相比,NS处理对总氮损失的影响较小。

各处理的总硫损失约为堆肥初始总硫的8.36%~20.92%,主要以渗滤液淋溶、离子沉降、生物同化等形式损失,而以 $\text{H}_2\text{S-S}$ 的形式排放的较少,约占堆肥初始总硫质量分数的0.10%~0.54%。

3 结论

(1)在强制通风静态好氧堆肥过程中,含硫添加剂能有效减少 CH_4 的排放,磷石膏和过磷酸钙处理分别能减少50.8%和43.3%的 CH_4 排放;硫酸钠处理能减少42.9%的 CH_4 排放,但会增加 H_2S 气体的排放。硫酸钠和磷石膏处理初始总硫含量相同,但硫酸钠处理的减排效果较弱。

(2)含硫添加剂能减少堆肥过程中 NH_3 的挥发,具有一定的固氮效果。磷石膏和过磷酸钙处理能减少40.6%和37.2%的 NH_3 挥发;而硫酸钠处理也能减少20%的 NH_3 挥发。

(3)磷石膏和过磷酸钙处理的堆肥腐熟度明显优于硫酸钠处理。综上所述结合臭气减排效果,硫酸钠处理并不适合作为臭气减排方案,而磷石膏以及过磷酸钙处理较为适宜。

表3 堆肥物料平衡

Table 3 The mass balance during the whole process

处理 Treatment	碳素平衡 Carbon balance/%			氮素平衡 Nitrogen balance/%			硫素平衡 Sulfur balance/%	
	$\text{CO}_2\text{-C}$	$\text{CH}_4\text{-C}$	总C损失 TC loss	$\text{NH}_3\text{-N}$	其他N Other N	总N损失 TN loss	$\text{H}_2\text{S-S}$	总S损失 TS loss
CK	44.67	1.63	47.68	26.66	7.35	34.01	0.21	8.36
PG	40.66	0.80	48.47	15.83	10.50	26.33	0.10	20.92
SP	43.16	0.92	50.48	16.73	7.87	24.60	0.13	18.04
NS	44.46	0.93	47.85	21.36	12.16	33.52	0.54	16.04

参考文献:

- [1] 庄犁, 周慧平, 张龙江. 我国畜禽养殖业产排污系数研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 633-639. ZHUANG L, ZHOU H P, ZHANG L J. Advancement in research on pollutants producing and discharging coefficients of livestock and poultry breeding industry in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5): 633-639.
- [2] 董文, 张青, 罗涛, 等. 不同有机肥连续施用对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(28): 106-110. DONG W, ZHANG Q, LUO T, et al. Effects of continuous application of different organic fertilizers on soil quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(28): 106-110.
- [3] BONG C P C, LIM L Y, HO W S, et al. A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 146: 149-157.
- [4] 李伟芳, 耿静, 翟增秀, 等. 恶臭物质的嗅觉阈值与致臭机理研究概况与展望[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(3): 327-330. LI W F, GENG J, ZHAI Z X, et al. Research advances and prospects on the olfactory threshold of odor substance and its formation mechanism[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(3): 327-330.
- [5] 江滔, SCHUCHARDT F, 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, SCHUCHARDT F, LI G X. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 212-217.
- [6] 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*, 2011, 23(10): 1754-1760.
- [7] 李丹阳, 李恕艳, 李国学, 等. 添加剂对猪粪秸秆堆肥的氮素损失控制效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 260-267. LI D Y, LI S Y, LI G X, et al. Effects of additive on nitrogen loss during composting of pig manure and corn straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl2): 260-267.
- [8] CHEN H, AWASTHI S K, LIU T, et al. Effects of microbial culture and chicken manure biochar on compost maturity and greenhouse gas emissions during chicken manure composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121908.
- [9] PENDER S, TOOMEY M, CARTON M, et al. Long-term effects of operating temperature and sulphate addition on the methanogenic community structure of anaerobic hybrid reactors[J]. *Water Research*, 2004, 38(3): 619-630.
- [10] LIN C, CHANG F, CHANG C. Toxic effect of sulfur compounds on anaerobic biogranule[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 87(1): 11-21.
- [11] 李慧杰, 王一鸣, 林先贵, 等. 沸石和过磷酸钙对鸡粪条垛堆肥甲烷排放的影响及其机制[J]. 土壤, 2017, 49(1): 63-69. LI H J, WANG Y M, LIN X G, et al. Effects of adding zeolite and superphosphate on greenhouse gas emission and methanogens during chicken manure composting[J]. *Soils*, 2017, 49(1): 63-69.
- [12] SANTOS A, BUSTAMANTE M A, TORTOSA G, et al. Gaseous emissions and process development during composting of pig slurry: The influence of the proportion of cotton gin waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 81-90.
- [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-Environmental Science*, 2020, 39(4): 923-932.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 罗一鸣, 李国学, FRANK S, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 235-242. LUO Y M, LI G X, FRANK S, et al. Effects of additive superphosphate on NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 235-242.
- [17] TORKASHVAND A M. Improvement of compost quality by addition of some amendments[J]. *AJCS*, 2010, 4: 252-257.
- [18] LIU Y, FANG H H P. Precipitates in anaerobic granules treating sulphate-bearing wastewater[J]. *Water Research*, 1998, 32(9): 2627-2632.
- [19] 翟俊, 李媛媛, 何孟狄, 等. 淡水系统中甲烷厌氧氧化古菌的研究进展[J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1009-1020. ZHAI J, LI Y Y, HE M D, et al. Review on the research progress of archaeal anaerobic methanotrophs in freshwater system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(5): 1009-1020.
- [20] 艾佳, 吕杨, 李彦澄, 等. 特殊环境中甲烷氧化菌的研究进展[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1509-1517. AI J, LÜ Y, LI Y C, et al. Methanotrophs bacteria in special environment: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1509-1517.
- [21] ZANG B, LI S, MICHEL F, et al. Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting[J]. *Waste Management*, 2016, 56: 498-505.
- [22] ZANG B, LI S, MICHEL F C, et al. Control of dimethyl sulfide and dimethyl disulfide odors during pig manure composting using nitrogen amendment[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 419-427.
- [23] 翁焕新, 高彩霞, 刘瓚, 等. 污泥硫酸盐还原菌(SRB)与硫化氢释放[J]. 环境科学学报, 2009, 29(10): 2094-2102. WENG H X, GAO C X, LIU Z, et al. Sulfate-reducing bacteria (SRB) in sewage sludge and release of H_2S [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(10): 2094-2102.
- [24] 肖雷, 于紫荆, 周秋龙, 等. 脱硫菌在自然界硫循环中的作用与意义[J]. 化学教育(中英文), 2019, 40(22): 11-14. XIAO L, YU Z J, ZHOU Q L, et al. The role and significance of desulfurization bacteria in the natural sulfur cycle[J]. *Chemical Education (Chinese and Eng-*

- lish), 2019, 40(22):11-14.
- [25] 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.
- [26] 宋修超, 郭德杰, 成卫民, 等. 工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中 NH_3 和 H_2S 的减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9):2014-2020. SONG X C, GUO D J, CHENG W M, et al. Pilot-scale study on the effect of exogenous additives on reducing NH_3 and H_2S emissions from pig manure compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9):2014-2020.
- [27] 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.
- [28] 陈月茹, 曾敏静, 程媛媛, 等. 温度对好氧颗粒污泥硝化-反硝化耦合脱氮性能影响[J]. 环境科技, 2021, 34(3):7-12. CHEN Y R, ZENG M J, CHENG Y Y, et al. Effect of temperature on coupling nitrification and denitrification performance of aerobic granular sludge [J]. *Environmental Technology*, 2021, 34(3):7-12.
- [29] 吕振, 李燕. pH和C:N对厌氧氨氧化耦合短程反硝化脱氮性能的影响[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(10):1106-1111. LÜ Z, LI Y. Effects of pH and C/N on nitrogen removal by coupling ANAMMOX with partial denitrification[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, 40(10):1106-1111.
- [30] 李惠英, 陈良. 盐胁迫对草坪草萌发生长及代谢的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(11):2584-2592. LI H Y, CHEN L. Effect of salt stress on turfgrass growth and metabolism[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(11):2584-2592.
- [31] 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 super phosphate addition during pig manure composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017, 48(5):304-312.