

## 工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 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

引用本文:

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 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 的减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 2014–2020.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0221>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 不同镁/磷盐添加剂对蓝藻堆肥的氮素损失控制效果

唐尚柱, 赵晓海, 斯鑫鑫, 王顺永, 李珊珊, 张学胜, 李玉成

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 428–435 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0940>

#### 种子发芽试验在低碳氮比堆肥腐熟度评价方面的适用性

罗渊, 袁京, 李国学, 李恕艳, 江滔, 谭钧, 邢文军

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 179–185 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.024>

#### 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>

#### 磷石膏和石膏对稻壳与油枯堆肥的影响及基质化利用评价

赵兵, 王宇蕴, 陈雪娇, 徐智

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2481–2488 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0558>

#### 改性膨胀蛭石覆盖对沼液贮存氨气和温室气体排放影响

王悦, 刘婧怡, 张佳男, 郭赫, 朱志平, 李新荣, 邹国元

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  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 effects of exogenous additives on reducing  $\text{NH}_3$  and  $\text{H}_2\text{S}$  emissions from pig manure compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 2014–2020.



开放科学 OSID

# 工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 的减排效果

宋修超<sup>1</sup>, 郭德杰<sup>1</sup>, 成卫民<sup>3</sup>, 罗佳<sup>1</sup>, 徐烨红<sup>1</sup>, 王光飞<sup>1</sup>, 刘新红<sup>1</sup>, 马艳<sup>1,2\*</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 3. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

**摘要:** 为了探究工厂化条件下不同添加剂对猪粪秸秆好氧堆肥过程中氮素和硫素转化规律的影响, 掌握其对堆肥过程中  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  气体减排效果, 本文共设置4个处理: 沸石(质量分数10%)、过磷酸钙(质量分数5%)单独添加及二者同时添加, 同时以无添加剂的处理作为对照。结果表明, 不同添加剂对堆肥温度影响差异较小; 与对照处理相比, 单独添加沸石的堆肥产物全氮和全硫含量分别提高17.5%和17.1%, 而单独添加过磷酸钙则分别提高26.1%和40.6%, 二者同时添加保氮效果最佳, 全氮含量提高32.1%, 全硫增加52.8%; 沸石通过吸附作用可以使堆肥过程中  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的排放分别减少8.2%和9.4%。过磷酸钙能够通过提高堆体铵态氮含量, 减少  $\text{NH}_3$  释放, 减排率达37.6%, 但由于过磷酸钙中含有较多的硫, 导致  $\text{H}_2\text{S}$  排放量增加; 两种添加剂同时添加对  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  减排效果与单独过磷酸钙添加处理差异较小。综合考虑堆肥品质和  $\text{NH}_3$  减排效果, 工厂化堆肥过程中添加一定量过磷酸钙可以达到很好的除臭、保氮效果, 过磷酸钙与沸石同时添加并没有协同强化作用, 但过磷酸钙添加应该配合恰当的工艺参数, 否则有增加  $\text{H}_2\text{S}$  释放的风险。

**关键词:** 畜禽粪便; 工厂化; 好氧堆肥; 氮; 硫化氢

中图分类号: S141.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)09-2014-07 doi:10.11654/jaes.2021-0221

## Pilot-scale study on effects of exogenous additives on reducing $\text{NH}_3$ and $\text{H}_2\text{S}$ emissions from pig manure compost

SONG Xiuchao<sup>1</sup>, GUO Dejie<sup>1</sup>, CHENG Weimin<sup>3</sup>, LUO Jia<sup>1</sup>, XU Yehong<sup>1</sup>, WANG Guangfei<sup>1</sup>, LIU Xinhong<sup>1</sup>, MA Yan<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** This study aims to determine how nitrogen and sulfur are transformed into  $\text{NH}_3$  and  $\text{H}_2\text{S}$  while pig manure is composted with different additives under factory conditions, and to understand the effect of reducing  $\text{NH}_3$  and  $\text{H}_2\text{S}$  emissions on composting. Four treatments, in which zeolite(10%) and superphosphate(5%) were added to the manure separately, another in which both were added, and a final treatment without additives that was used as the control(CK), were set up in a pilot study. The results showed that different additives

收稿日期: 2021-02-25 录用日期: 2021-05-19

作者简介: 宋修超(1987—), 男, 山东即墨人, 博士, 助理研究员, 研究方向为农业废弃物肥料化利用。E-mail: xiuchao103@163.com

\*通信作者: 马艳 E-mail: myjaas@sina.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800201); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601264)

**Project supported:** The National Key Research and Development Program of China(2017YFD0800201); The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41601264)

had little effect on the temperature of the compost. Compared with the CK, the addition of zeolite could increase the total nitrogen (TN) and total sulfur (TS) of compost products by 17.5% and 17.1%, respectively, while the addition of calcium superphosphate (CaSSP) increased the TN and TS by 26.1% and 40.6%, respectively. Adding both zeolite and CaSSP had the best effect on nitrogen retention, which increased TN by 32.1% and TS by 52.8%. Zeolite reduced the emissions of NH<sub>3</sub> (by 8.2%) and H<sub>2</sub>S (by 9.4%) through adsorption. CaSSP reduces the release of NH<sub>3</sub> by increasing the ammonium nitrogen content, resulting in a 37.6% reduction in emissions. However, because of the higher content of sulfur in CaSSP, H<sub>2</sub>S emissions increased significantly ( $P < 0.05$ ). The effects of the combination of the two additives on reducing NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S were not different from those of the CaSSP alone. Considering the quality of the compost and NH<sub>3</sub> emissions, adding a certain amount of CaSSP to industrial composting processes can achieve a nutrient retention effect; however, the addition of both the additives had no synergistic effect. Therefore, the addition of CaSSP should be combined with the appropriate process parameters; otherwise, it would increase the risk of H<sub>2</sub>S emissions.

**Keywords:** livestock manure; pilot-scale trial; aerobic composting; NH<sub>3</sub>; H<sub>2</sub>S

近年来,随着我国畜牧业的快速发展,产生的排泄废物与日俱增,据统计,我国每年畜禽粪污产生量高达38亿 t<sup>[1]</sup>。高温好氧堆肥是实现畜禽粪便无害化、资源化的有效途径之一<sup>[2-3]</sup>。然而,畜禽粪便带有大量恶臭气体,且臭气成分复杂,因此,加强堆肥过程中恶臭污染的控制,是科研工作者的一项紧迫任务,也是解决好氧堆肥技术发展的关键<sup>[4]</sup>。畜禽粪便高温好氧堆肥释放的臭气主要是氨(NH<sub>3</sub>)、含硫化合物、胺类和一些低级脂肪酸类等化学物质,其中最关键的是NH<sub>3</sub>和硫化氢(H<sub>2</sub>S)。NH<sub>3</sub>产生量最大,是氮素损失的主要形式,可导致60%以上的氮损失<sup>[5]</sup>。H<sub>2</sub>S嗅阈值较小,有臭鸡蛋气味,虽然好氧发酵过程中浓度较低,但易被闻到,对臭味贡献较大<sup>[6]</sup>。因此,如何有效控制好氧发酵过程NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S的产生和排放,对实现畜禽粪便的资源化利用具有重要意义。

好氧堆肥的臭气控制技术主要包括异位和原位控制技术,但大多数异位处理方法存在一定的局限性,比如二次污染、成本偏高等问题<sup>[7]</sup>。原位控制技术在堆肥臭气控制研究中得到更多推崇。通过添加物理、化学、生物等添加剂可以减少堆肥中氮素损失,降低臭气浓度。常见的物理添加剂包括活性炭、生物炭、沸石、蛭石等,STEINER等<sup>[8]</sup>研究发现猪粪好氧堆肥过程中添加20%生物炭能够使NH<sub>3</sub>浓度降低64%;张地方等<sup>[9]</sup>研究发现,添加木炭可使NH<sub>3</sub>减排3.47%~63.31%,H<sub>2</sub>S减排50.98%~62.76%。化学添加剂包括钙盐、磷酸盐、硫酸盐等无机化合物,史春梅等<sup>[10]</sup>研究发现,同时添加磷酸二氢钙和氯化镁,NH<sub>3</sub>累积挥发量显著减少,保氮效果最佳。生物添加剂主要指脱臭微生物,刘春梅等<sup>[11]</sup>在实验室筛选的假单胞菌属菌剂,可以减少NH<sub>3</sub>释放量71.13%,减少H<sub>2</sub>S释放量86.88%。此外,有文献报道,堆肥过程中添加蔗糖、β环糊精、糖蜜等活性碳源,能够提高NH<sub>3</sub>的同化作用,

将铵态氮转化成有机氮和微生物氮,从而降低NH<sub>3</sub>排放<sup>[12-13]</sup>。值得注意的是,现有研究多是在实验室模拟反应器中开展,在规模、工艺参数等方面与实际生产有较大差异,缺少实际生产条件下添加剂减少堆肥臭气排放方面的数据。

本研究从生产实际出发,在工厂化条垛式好氧堆肥条件下,选择物理添加剂沸石和化学添加剂过磷酸钙,通过设置单独和复合添加试验,研究其在猪粪好氧堆肥过程中减少NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S排放的效果,探讨除臭添加剂应用在堆肥工程实践中的环境效益,从而为工厂化堆肥除臭技术提供科学支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

堆肥原料选择水稻秸秆和新鲜猪粪,均购自江苏省农业科学院六合动物生产基地周边农户和养殖户,秸秆用粉碎机打碎成1~5 cm左右小段,将新鲜猪粪与粉碎的水稻秸秆按照干质量比6:1的比例混匀备用,猪粪、秸秆和混合物的基本理化性质见表1。

外源添加剂选择2种,分别为沸石和过磷酸钙,购买自江苏南京某农资超市。其中沸石过80目筛。

### 1.2 堆肥试验设计

堆肥试验在工厂化条件下进行,采用条垛式好氧堆肥方式,于江苏省农业科学院六合动物生产基地堆

表1 堆肥原料及混合物的基本性质

Table 1 Physical and chemical properties of compost feedstocks

| 原料 Material   | 总碳<br>Total carbon/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 总氮<br>Total nitrogen/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 含水率<br>Moisture/% | C/N  |
|---------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|------|
| 猪粪 Pig manure | 397.1                                        | 22.2                                           | 75.6              | 17.9 |
| 秸秆 Rice straw | 401.3                                        | 4.8                                            | 5.9               | 83.6 |
| 混合物 Mixture   | 397.6                                        | 17.7                                           | 65.4              | 22.5 |

肥生产车间内进行。试验共设置4个处理,处理1(F+P):猪粪+秸秆+沸石+过磷酸钙;处理2(F):猪粪+秸秆+沸石;处理3(P):猪粪+秸秆+过磷酸钙;处理4(CK):猪粪+秸秆。每个处理堆肥基础混合物料干质量为2 t,堆成长×宽×高为12 m×1 m×1 m的条垛。经查阅文献<sup>[14-15]</sup>,选择沸石的添加比例为混合物料的10%(质量分数,以干质量计),过磷酸钙的添加比例为混合物料的5%(质量分数,以干质量计)。试验开始前将两种添加剂按比例平铺至堆体表面,用翻抛机将添加剂与原料翻堆均匀。试验周期为45 d,在第0、7、14、21、28、35、45 d进行机械翻堆。

### 1.3 采样及测试方法

试验中每次翻堆后进行堆肥样品取样。采样时将整个条垛平均分成3段,每段采样从堆肥上层、中层、下层各选取2个点,采集200 g左右样品,混匀,样品一部分鲜样保存,一部分自然风干粉碎过筛,用于理化性质测定。

堆肥温度测定:将堆体平均分成上、中、下3层,按不同高度将水银温度计从堆体四周垂直插入,每日上午10:00和下午15:00记录堆体温度,所得平均值为当日最终堆体温度。新鲜样品的含水率采用105℃烘干称质量法(精宏XMTD-8222电热鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司)。

总氮(Total nitrogen, TN)、总硫(Total sulfur, TS)测定采用元素分析仪(Vario MACRO cube);铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^+\text{-N}$ )采用蒸馏水浸提,固液比为1:10( $m/V$ ,以干质量计),浸提液用流动分析仪(SKALAR San++)测定;硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )采用蒸馏水浸提,离子色谱仪(ThermoFisher ICS1100)测定。

气体测定:气体采样时间为堆肥的第1、3、5、7、

9、11、14、16、19、21、24、27、35、39、45 d,采集时间为当日8:00—10:00和14:00—16:00两个时段, $\text{NH}_3$ 测定采用静态箱法。将静态箱插入堆体内,将20 mL质量分数为2%硼酸放置在100 mL小烧杯中,小烧杯放置在堆体表面,用已知截面积的透明塑料箱体盖住小烧杯,箱体周围用堆肥密封,放置30 min后,使用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸滴定得到 $\text{NH}_3$ 释放速率, $\text{NH}_3$ 累积排放量根据每日 $\text{NH}_3$ 释放速率计算<sup>[16]</sup>。 $\text{H}_2\text{S}$ 采用沼气分析仪(Biogas, Britain, Geotech)原位测定。

### 1.4 数据分析

试验数据经Excel 2010处理后应用SPSS 22.0软件进行统计分析,用Origin 9.0进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆肥温度与水分变化

堆肥温度反映堆肥进程,高温期是堆肥过程中微生物活动最剧烈阶段,温度变化(图1)显示,堆肥前期4个处理均快速升温,在第7 d左右超过55℃,P处理升温效果较好,升温最快,F处理次之,但F+P处理升温较慢。随着堆肥的进行,各处理含水率因蒸发而快速下降,由于F+P处理升温速率相对较慢,其含水率下降幅度也低于其他几个处理,但随着堆体温度的上升,4个处理含水率均迅速下降,至试验结束,含水率均下降至40%左右。

### 2.2 堆体中不同氮素形态动态变化

如图2所示,堆肥前7 d,由于微生物利用,4个处理的总氮含量均略有降低,之后由于干物质损失导致的“浓缩”作用,其含量逐渐增加,至堆肥结束,F+P处理的保氮效果最佳,与CK相比,全氮含量提高32.1%;铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )含量的变化趋势为堆肥前7 d

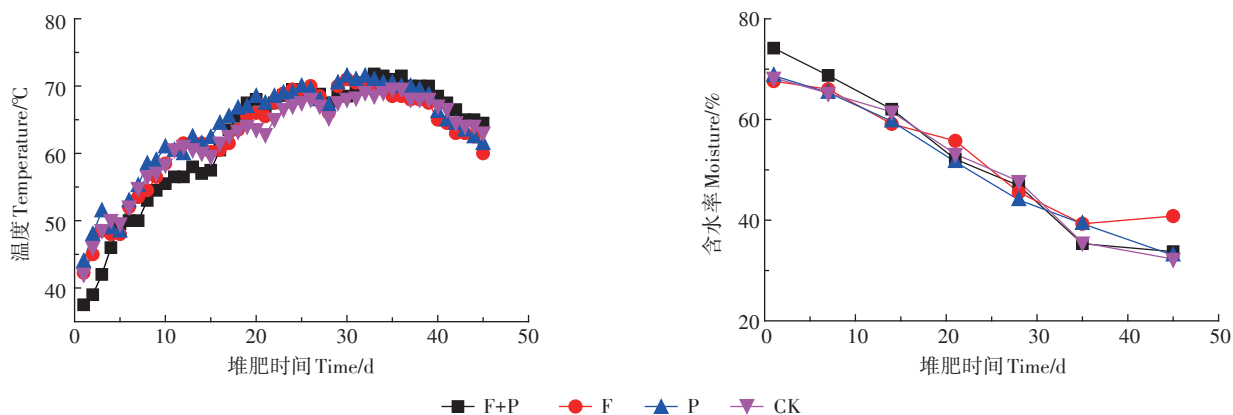


图1 堆肥过程中温度与含水率变化

Figure 1 Temperature and moisture content variation during composting



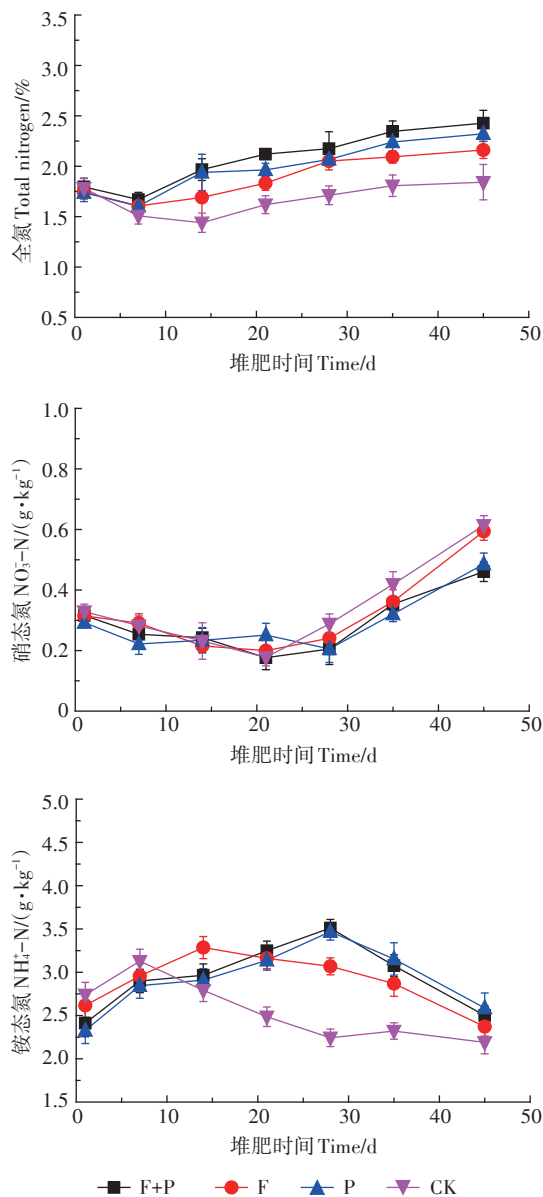


图2 堆体内不同氮素形态变化

Figure 2 Changes of nitrogen formation during composting

略有增加,之后逐渐降低,而3个添加剂处理均能够在堆肥高温期增加其含量,至堆肥结束3个添加剂处理与CK差异不显著。硝态氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )含量的变化趋势与铵态氮相反,堆肥后期各处理均快速增加,其中CK和F处理含量最高。

### 2.3 堆体中不同硫素形态动态变化

如图3所示,堆肥初期总硫与总氮变化趋势相近,先降低后逐渐增加,由于添加过磷酸钙处理带入大量硫元素,至堆肥结束,P处理和F+P处理均显著高于CK,分别提高52.8%和40.8%;单独添加沸石有保硫效果,比CK提高17.1%;同样的,与CK处理相

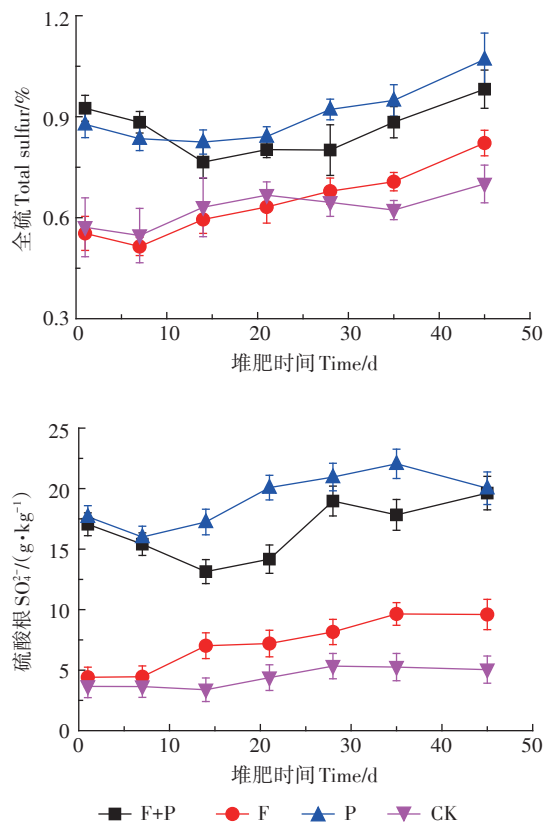


图3 堆体内不同硫素形态变化

Figure 3 Changes of sulfur formation during composting

比,水溶性硫酸根离子( $\text{SO}_4^{2-}$ )含量也是添加过磷酸钙的两个处理最高。

### 2.4 堆肥过程中 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 排放变化

如图4所示,堆肥开始后各处理的 $\text{NH}_3$ 释放由于外源添加剂的不同而呈现出不同的规律。CK处理在堆肥第4 d时 $\text{NH}_3$ 排放速率达到最大。经过翻堆后,氧气得到补充,尚未分解的有机物被转移至氧气充足的区域,添加剂使 $\text{NH}_3$ 的释放高峰期延迟;整个堆肥过程中 $\text{NH}_3$ 的释放主要集中在堆肥的前20 d,累积释放量占总量超过60%以上。至堆肥结束,与CK相比,F处理可以减排8.2%,而P处理与F+P处理降低 $\text{NH}_3$ 释放的作用更大,均可减排35%以上( $P < 0.05$ ),且二者之间差异不显著。

$\text{H}_2\text{S}$ 是有机物厌氧发酵过程中的主要产物,如图5所示,堆肥开始后各处理 $\text{H}_2\text{S}$ 释放较快,其中P和F+P处理由于其带入大量 $\text{SO}_4^{2-}$ ,在还原条件下会增加 $\text{H}_2\text{S}$ 的释放速率( $P < 0.05$ ),但堆肥10 d后4个处理差异较小;从整个堆肥过程看,除F处理,其余3个处理 $\text{H}_2\text{S}$ 在堆肥前10 d内的释放量占总排放量65%以上,说明 $\text{H}_2\text{S}$ 的释放主要集中在堆肥的前10 d;至堆肥结

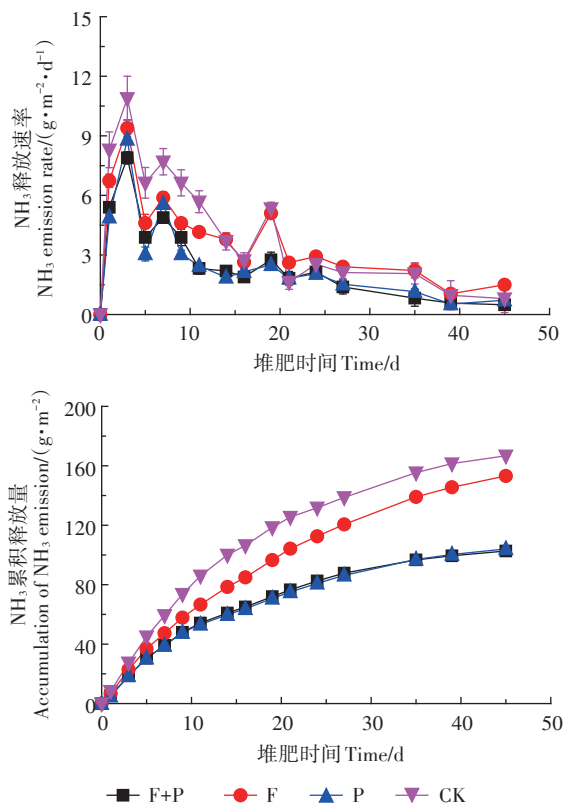


图4 堆肥过程中NH<sub>3</sub>释放规律

Figure 4 Changes of NH<sub>3</sub> emission during composting

束,与CK相比,F处理H<sub>2</sub>S减排率为9.4%( $P<0.05$ ),而P处理与F+P处理能够显著增加H<sub>2</sub>S的释放( $P<0.05$ ),两处理差异较小。

### 3 讨论

本试验结果显示,在工厂化条件下过磷酸钙添加对NH<sub>3</sub>减排效果显著,与已有的室内模拟试验效果相近。过磷酸钙的主要成分是Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>和CaSO<sub>4</sub>·

2H<sub>2</sub>O,它们能够通过铵根离子发生阳离子交换作用转化为稳定的酸性磷酸铵或硫酸铵,从而将氮素固定下来<sup>[17-18]</sup>。此外,过磷酸钙偏酸性,会造成堆体pH值缓慢下降,从而减少NH<sub>3</sub>的释放。沸石作为一种非金属矿物材料,具有大量的孔穴和孔道,比表面积大,其特有的硅酸盐四面体结构对阳离子有较高的吸附性能<sup>[19]</sup>。前人研究结果也表明,添加沸石可以有效减少堆肥过程中的氨挥发损失<sup>[13,20]</sup>,然而,本研究结果显示,工厂化条件下沸石对于减少NH<sub>3</sub>释放有一定效果,但其保氮效果要低于已有报道。郑瑞生等<sup>[14]</sup>报道添加10%沸石的处理氮素损失下降35.53%,远高于本试验结果。这可能是因为其试验在强制通风静态反应器中进行,通风量较大,堆肥过程中通气状况会对NH<sub>3</sub>挥发有强烈影响,对沸石的减排效率有一定放大效果<sup>[4,21-22]</sup>。另外,任云等<sup>[20]</sup>的报道中采用的是磷酸酸化的沸石,而本试验中用的天然沸石是一种碱性铝硅酸盐矿物,能够提高堆体pH,从而削弱了其本身对NH<sub>3</sub>的物理吸附作用。因此,工厂化条件下应用沸石作为除臭剂必须配合一定的工艺参数,比如翻堆工艺、通风方式等,而且沸石自身性质的差异也可能对除臭效果产生较大影响。

堆肥过程中H<sub>2</sub>S主要是在厌氧区域形成,堆体内硫酸盐、亚硫酸盐或有机物中的硫通过还原作用产生S<sub>2</sub>,再通过水解作用最终形成H<sub>2</sub>S<sup>[23]</sup>。本研究中添加过磷酸钙处理由于其含有SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,在厌氧还原条件下会显著增加H<sub>2</sub>S的释放,这与其他人研究结果相左<sup>[24]</sup>,综合分析可能的原因:本试验堆肥前期物料含水率较高(68.4%),堆体较大(12 m×1 m×1 m),且第一次翻抛在第7 d时进行,导致堆体内自由空间少,通气性差,氧气不足,造成局部厌氧状态,而实验室模拟反应

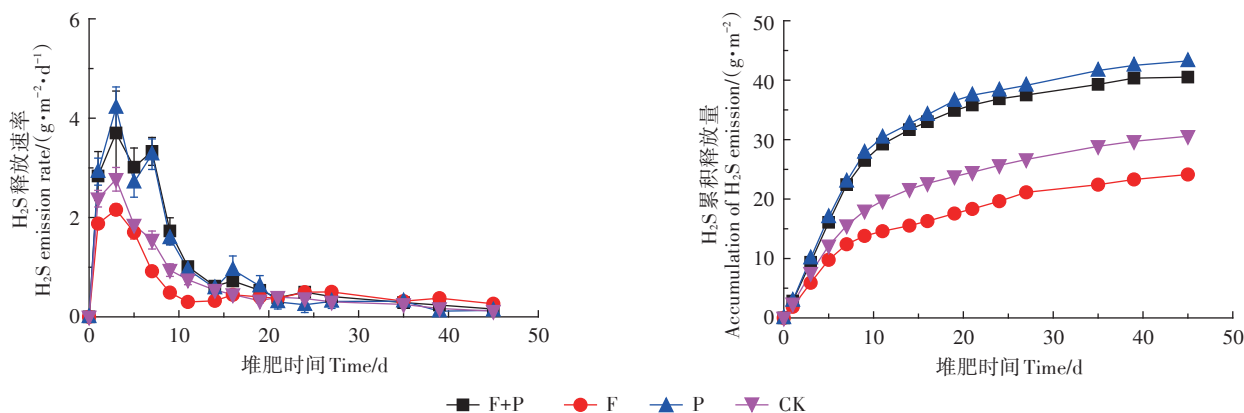


图5 堆肥过程中H<sub>2</sub>S释放规律

Figure 5 Changes of H<sub>2</sub>S emission during composting

器自带通风装置可保证堆体氧气充足,很难形成厌氧状态,不易形成H<sub>2</sub>S;从图5中可以看出,堆肥的前7 d,P和F+P处理与CK和F处理的H<sub>2</sub>S累积释放量差异较小,而之后差异持续增大,这也验证了添加过磷酸钙的处理带入的硫酸盐加剧了H<sub>2</sub>S的释放。此结果对实际生产指导意义在于,应用过磷酸钙控制H<sub>2</sub>S臭气时,必须结合其他堆肥工艺参数,保证氧气充足,尽量避免厌氧环境产生。沸石对H<sub>2</sub>S的控制机理是通过自身较强的吸附和离子交互性能,固定H<sub>2</sub>S,从而减少H<sub>2</sub>S的释放。

值得注意的是,本试验结果显示,F+P处理与P处理对H<sub>2</sub>S与NH<sub>3</sub>的控制效果基本相同,这其中的减排机制尚不明确,但通过本试验与前人研究结果比较发现,除臭添加剂的减排效果与堆肥的工艺参数有关,比如原料粒径、含水率、通风量、翻堆频率等。因此,今后的研究应该充分考虑能直接或间接地影响发酵物料内部环境的工艺参数,进而揭示添加剂影响H<sub>2</sub>S与NH<sub>3</sub>产生与排放机理。

## 4 结论

(1)基于工厂化条垛式好氧堆肥工艺,猪粪秸秆好氧堆肥过程中NH<sub>3</sub>释放集中在堆肥前20 d,H<sub>2</sub>S释放集中于前10 d。

(2)添加过磷酸钙对猪粪秸秆堆肥的保氮效果显著,堆肥产品中全氮含量显著提高26%以上。

(3)沸石添加可以使猪粪秸秆堆肥过程中NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S的排放分别减少8.2%和9.4%。

(4)沸石与过磷酸钙同时添加对H<sub>2</sub>S与NH<sub>3</sub>排放的控制效果与过磷酸钙单独添加相似,但二者的协同减排机理尚不清楚,需进一步探讨。

## 参考文献:

- [1] 刘文杰,张曦,沈玉君,等. 好氧发酵过程中臭气产生和原位控制技术进展[J]. 农学学报, 2020, 10(3): 12-20. LIU W J, ZHANG X, SHEN Y J, et al. Production, emission and *in-situ* control technology of odor from aerobic fermentation: Research progress[J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(3): 12-20.
- [2] 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): 267-276. CAO Y B, ZHANG L, WANG X, et al. Synergistic mitigation of ammonia and greenhouse gas emissions during livestock waste composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 267-276.
- [3] SHAO B, LIU Z, ZHONG H, et al. Effects of rhamnolipids on microorganism characteristics and applications in composting: A review[J]. *Microbiological Research*, 2017, 200: 33-44.
- [4] 沈玉君,张朋月,孟海波,等. 通风方式对猪粪堆肥主要臭气物质控制的影响研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 203-209. SHEN Y J, ZHANG P Y, MENG H B, et al. Effects of ventilation modes on control of main odor substances in pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(7): 203-209.
- [5] YANG Y, ZHANG X, YANG Z, et al. Turnover and loss of nitrogenous compounds during composting of food wastes[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2008, 2(2): 251-256.
- [6] 张红玉,李国学,杨青原. 生活垃圾堆肥过程中恶臭物质分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 192-199. ZHANG H Y, LI G X, YANG Q Y. Odor pollutants analyzing during municipal solid waste (MSW) composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(9): 192-199.
- [7] 夏湘勤,席北斗,黄彩红,等. 畜禽粪便堆肥臭气控制研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6): 649-657. XIA X Q, XI B D, HUANG C H, et al. Review on odor control of livestock and poultry manure composting[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6): 649-657.
- [8] STEINER C, DAS K, MELEAR N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1236-1242.
- [9] 张地方,袁京,王国英,等. 木本泥炭添加比例对猪粪堆肥腐熟度和污染及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 233-240. ZHANG D F, YUAN J, WANG G Y, et al. Effects of woody peat addition on maturity and gaseous emissions during pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 233-240.
- [10] 史春梅,王继红,李国学,等. 不同化学添加剂对猪粪堆肥中氮素损失的控制[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 1001-1006. SHI C M, WANG J H, LI G X, et al. Control of different chemical additives on nitrogen loss during composting of pig manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 1001-1006.
- [11] 刘春梅,徐凤花,曹艳花,等. 除臭菌株对NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S释放及物质转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 585-590. LIU C M, XU F H, CAO Y H, et al. Effect of deodorization microorganisms on release of NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S and matter transformation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 585-590.
- [12] LI Y B, LI W G, LIU B Y, et al. Ammonia emissions and biodegradation of organic carbon during sewage sludge composting with different extra carbon sources[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 85: 624-630.
- [13] MENG L Q, ZHANG S M, GONG H N, et al. Improving sewage sludge composting by addition of spent mushroom substrate and sucrose[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 253: 197-203.
- [14] 郑瑞生,封辉,李延. 沸石在猪粪堆肥过程中保氮效果研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(5): 1017-1022. ZHENG R S, FENG H, LI Y. Nitrogen conservation in swine manure compost with zeolite usage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(5): 1017-1022.
- [15] 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  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emissions during pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22):235-242.
- [16] 李志安, 邹碧, 曹裕松, 等. 地面氧化亚氮排放静态箱测定技术[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4):413-416. LI Z A, ZOU B, CAO Y S, et al. Technique of static chamber in determining nitrous oxide emission from land surface[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4):413-416.
- [17] 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.
- [18] 陈是吏, 袁京, 李国学, 等. 过磷酸钙和双氰胺联用减少污泥堆肥温室气体及  $\text{NH}_3$  排放[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6):199-206. CHEN S L, YUAN J, LI G X, et al. Combination of superphosphate and dicyandiamide decreasing greenhouse gas and  $\text{NH}_3$  emissions during sludge composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6):199-206.
- [19] 张婷, 严红, 王帆. 纳米Y沸石对堆肥中氨气的吸附作用及其机理研究[J]. 环境工程, 2013, 31(增刊1):480-482. ZHANG T, YAN H, WANG F. Adsorption and the mechanism of ammonia in the process of composting with the nanosized Y zeolite[J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(Suppl 1):480-482.
- [20] 任云, 崔春红, 刘奋武, 等. 蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(5):1760-1766. REN Y, CUI C H, LIU F W, et al. Study on composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5):1760-1766.
- [21] 林小凤, 李国学, 贺琪, 等. 堆肥化过程中氮素损失控制材料的添加试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):975-978. LIN X F, LI G X, HE Q, et al. Materials of controlling nitrogen loss during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):975-978.
- [22] 化党领, 刘方, 李国学, 等. 翻堆与覆盖工艺对猪粪秸秆堆肥性质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12):210-216. HUA D L, LIU F, LI G X, et al. Effect of turning and covering techniques on pig manure-straw composting property[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(12):210-216.
- [23] 沈玉君, 陈同斌, 刘洪涛, 等. 堆肥过程中臭气的产生和释放过程研究进展[J]. 中国给水排水, 2011, 27(11):104-108. SHEN Y J, CHEN T B, LIU H T, et al. Research progress in odor production and emission from composting[J]. *China Water & Waste Water*, 2011, 27(11):104-108.
- [24] 张红玉, 李国学, 袁京, 等. 固氮添加剂降低厨余垃圾堆肥中  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  排放[J]. 农业工程学报, 2013, (23):173-178. ZHANG H Y, LI G X, YUAN J, et al. Nitrogen fixation additive reducing emission of  $\text{NH}_3$  and  $\text{H}_2\text{S}$  during composting of kitchen waste and cornstalk [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(23):173-178.