

## 不同贮存方式对农村旱厕粪污肥料化利用特性和主要致臭气体排放的影响

金志帅, 沈玉君, 丁京涛, 王惠惠, 贾懿曼, 周亚文, 李丹阳, 吴佳璇, 郭占斌

### 引用本文:

金志帅, 沈玉君, 丁京涛, 王惠惠, 贾懿曼, 周亚文, 李丹阳, 吴佳璇, 郭占斌. 不同贮存方式对农村旱厕粪污肥料化利用特性和主要致臭气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(5): 1180–1189.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0320>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 水冲和节水农村公厕粪便资源化利用风险评估

蔡佳盛, 施教忠, 叶志隆, 李叶楠, UZMAShaheen, 陈少华

*农业环境科学学报*. 2021, 40(10): 2226–2235 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0340>

#### Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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>

#### 贮存高度和锯末覆盖厚度对猪粪NH<sub>3</sub>和温室气体排放量及其增温潜能的影响

朱海生, 董红敏, 栾冬梅, 蒲德伦, 袁丰

*农业环境科学学报*. 2019, 38(4): 937–943 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0728>

#### 钒胁迫对紫花苜蓿生长及钒积累与转移的影响

武振中, 杨金燕, 张有贤

*农业环境科学学报*. 2021, 40(6): 1198–1207 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1165>

#### 生物质炭施用对不同深度稻田土壤有机碳矿化的影响

王佳盟, 刘伟, 刘志伟, 刘秀霞, 吴秀兰, 卞荣军, 郑聚锋, 李恋卿, 潘根兴

*农业环境科学学报*. 2020, 39(9): 2081–2088 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0335>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

金志帅, 沈玉君, 丁京涛, 等. 不同贮存方式对农村旱厕粪污肥料化利用特性和主要致臭气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1180-1189.

JIN Z S, SHEN Y J, DING J T, et al. Effects of different storage methods on manure utilization characteristics and main odorous gas emission of rural dry latrine[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 1180-1189.



开放科学 OSID

# 不同贮存方式对农村旱厕粪污肥料化利用特性和主要致臭气体排放的影响

金志帅<sup>1,2</sup>, 沈玉君<sup>2</sup>, 丁京涛<sup>2</sup>, 王惠惠<sup>2,3\*</sup>, 贾懿曼<sup>2,3</sup>, 周亚文<sup>2,3</sup>, 李丹阳<sup>2,3</sup>, 吴佳璇<sup>1,2</sup>, 郭占斌<sup>1\*</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125; 3. 农业农村部农村厕所与污水治理技术重点实验室, 北京 100125)

**摘要:**为了探究不同贮存方式对农村旱厕粪污肥料化利用特性和主要致臭气体排放的影响,本文针对此类旱厕进行试验,通过研究在自然(敞口)贮存和密闭贮存方式下旱厕粪污理化性质和臭气排放变化,探明改厕对旱厕粪污的农用潜力以及对主要致臭气体排放的影响。结果表明:与自然贮存相比,密闭贮存具有更好的减少氮素损失的效果,总氮损失降低20.24%,氨态氮含量提高22.34%;总碳含量损失降低4.61%;电导率下降0.02;pH值上升0.9。试验周期内,两种贮存方式下粪大肠菌群数从43 MPN·g<sup>-1</sup>降至3 MPN·g<sup>-1</sup>以下,种子发芽指数均为0,说明尽管旱厕粪污贮存半年可以达到卫生学的无害化,但作为肥料直接利用仍对作物有毒性作用,建议添加覆盖料或填料提高粪污的腐熟度,从而达到农业利用的要求。半年试验周期内,密闭贮存处理中氨气浓度显著高于自然贮存,最高为279.29 mg·m<sup>-3</sup>,平均为129.75 mg·m<sup>-3</sup>,硫化氢浓度平均为10.68 mg·m<sup>-3</sup>,略高于自然贮存,说明改厕后密闭式的贮粪池内臭气排放主要以氨气为主,缓慢且持续,并且与温度有显著的正相关性,因此卫生旱厕设置排气管是必要的,需要科学设置排气管的高度和内径,将臭气高效排出,避免影响如厕环境。

**关键词:**旱厕;旱厕粪污;气味控制;农学特性;臭气排放

中图分类号:S141;X799.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)05-1180-10 doi:10.11654/jaes.2023-0320

## Effects of different storage methods on manure utilization characteristics and main odorous gas emission of rural dry latrine

JIN Zhishuai<sup>1,2</sup>, SHEN Yujun<sup>2</sup>, DING Jingtao<sup>2</sup>, WANG Huihui<sup>2,3\*</sup>, JIA Yiman<sup>2,3</sup>, ZHOU Yawen<sup>2,3</sup>, LI Danyang<sup>2,3</sup>, WU Jiakuan<sup>1,2</sup>, GUO Zhanbin<sup>1\*</sup>  
(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Institute of Rural Energy and Environmental Protection, Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 3. Key Laboratory of Rural Toilet and Sewage Treatment Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

**Abstract:** In order to explore the impact of different storage methods on the manure utilization characteristics and main odor-causing gas emissions of rural dry latrines, in this paper, we conducted experiments on this kind of dry sanitary toilet. By researching the dynamic changes in the physicochemical properties and odor emission of human feces in dry toilets under natural (open) storage and closed storage,

收稿日期:2023-04-24 录用日期:2023-10-11

作者简介:金志帅(1996—),男,黑龙江巴彦人,硕士研究生,从事农业废弃物资源化利用技术研究。E-mail:936789308@qq.com

\*通信作者:郭占斌 E-mail:329984136@qq.com; 王惠惠 E-mail:whh9876@163.com

基金项目:青海省重点研发与转化计划项目:高寒地区生态厕所关键技术研究与应用(2022-SF-144-04)

Project supported: Key Research and Development and Transformation Plan Project in Qinghai Province of Research and Application of Key Technologies for Ecological Toilets in Alpine Regions(2022-SF-144-04)

we explored the effect of renovation of dry sanitary toilets on the agricultural potential and the emission of main odor. The results showed that compared with natural storage, closed storage had better nitrogen loss reduction with a decrease of total nitrogen loss by 20.24% and an increase of ammonia nitrogen content by 22.34%, while the loss of total carbon content and electrical conductivity diminished by 4.61% and 0.02, respectively, as well as a lower pH by 0.9. Throughout the experiment, the number of fecal coliforms decreased from 43 MPN·g<sup>-1</sup> to less than 3 MPN·g<sup>-1</sup> under the two storage methods, and the seed germination index value was 0, indicating that although the storage of human feces in dry toilet for half a year could achieve hygienically harmless, nevertheless, that still had toxic effects on crops when used as fertilizer directly. It was suggested that the addition of mulching material or filler into human feces was necessary to improve the maturity of manure to meet the agricultural utilization requirements. During the six-month experiment period, the ammonia concentration in closed storage was significantly higher than that in natural storage, with the highest being 279.29 mg·m<sup>-3</sup> and the average being 129.75 mg·m<sup>-3</sup>. The average hydrogen sulfide concentration was 10.68 mg·m<sup>-3</sup>, which was slightly greater than that in natural storage, illustrating that the odor emitted in a closed septic tank after replacing them with dry sanitary toilets was mainly ammonia, which was slow and continuous, and there was a significant positive correlation with temperature. Therefore, in order to solve the odor problem in dry sanitary toilets, an exhaust pipe must be installed, and its height and inner diameter must be precisely configured to discharge the odor efficiently.

**Keywords:** dry toilet; dry toilet feces; odor control; agronomic characteristic; odor emission

据报道,全球有40多亿人缺乏安全的卫生设施,未经有效处理的厕所粪污存在污染地下水和传播病原体的风险<sup>[1]</sup>。我国农村地区80%的传染疾病,如儿童腹泻、血吸虫病等,都与厕所粪污和不安全用水有关<sup>[2]</sup>。近年来,为改善农村人居环境,提升农村居民疾病防控能力,我国大力推进农村厕所革命,农村如厕环境大幅改善,与此同时,粪污处理及资源化利用问题日益凸显。

目前,我国农村改厕的主要类型有水冲式厕所(三格化粪池式、三联通沼气池式、双瓮漏斗式、完整下水道式)和卫生厕所(粪尿分集式、双坑交替式),其中三格化粪池式、双瓮漏斗式、三联通沼气池式和双坑交替式厕所均采用密闭贮存方式,通过厌氧发酵过程实现粪污无害化<sup>[3-4]</sup>。与传统厕所相比,密闭贮存可以避免粪污暴露,提高粪污无害化效率,减少蚊蝇滋生。但厌氧发酵易产生一种有臭鸡蛋气味的易燃有毒气体硫化氢,同时伴有氨挥发,这两种气体都是有毒气体且气味难闻<sup>[5-6]</sup>。因此,密闭贮存会增加臭气产生风险,严重的还会危害人体健康。

在农村,旱厕粪污资源化利用途径主要为农业利用,因其氮含量较多,磷、钾含量较少,通常作为速效氮肥使用<sup>[7]</sup>。旱厕粪污须经1~6个月密闭贮存实现无害化后才可以农用<sup>[8]</sup>。粪污经过长时间贮存会造成

大量氮损失,马艳茹等<sup>[9]</sup>发现猪粪水贮存60 d后总氮含量较初始时降低了44.77%,丁京涛等<sup>[10]</sup>发现养殖场粪水自然贮存6个月后氨态氮损失高达68%~80%。陈广银等<sup>[11]</sup>的研究表明密闭贮存可显著减少猪粪水贮存过程中的氮损失。然而,旱厕粪污经贮存后,其农学利用特性和氮损失情况尚不明确。

因此,为了探明不同贮存方式对旱厕粪污贮存过程中肥料化利用特性和主要致臭气体排放的影响,本研究以旱厕粪污为研究对象,按照《农村户厕卫生规范》(GB 19379—2012)中的粪污贮存时间要求,开展旱厕粪污在自然和密闭贮存条件下粪污养分变化、腐熟度和臭气排放等特性的研究,以期对旱厕粪污的资源化利用和贮存方式选择提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与装置

试验于2022年4月至10月在农业农村部规划设计研究院(双桥院区)开展,试验周期182 d。旱厕粪污取自北京市顺义区某农家旱厕,其理化性质如表1所示。实验装置为有效容积5 L的塑料桶,敞口处理桶口处采用纱布覆盖,并用橡皮筋固定,防止杂物落入;密封处理采用盖子密封,桶盖中间位置设有通气孔用于气体检测,气体检测完毕后用

表1 旱厕粪污基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of human excrement

含水率 Moisture content/%	pH	电导率 Electrical conductivity/(mS·cm <sup>-1</sup> )	总碳 Total carbon/%	总氮 Total nitrogen/%	粪大肠菌 Fecal coliform/(MPN·g <sup>-1</sup> )
86.13±0.27	7.30±0.06	3.05±0.17	43.33±0.60	4.55±0.70	43

胶带密封。

## 1.2 试验方法

试验设置敞口贮存(CK)与密闭贮存(MK)两个处理组,每个处理组3个重复,除桶是否密封外,其他设置均相同,每个处理均加入5 L早厕粪污,于室内常温下(避雨但不避光)进行试验。在试验开始的第0、7、14、21、28、35、70、84、98、126、182天的上午测定温度、氨气(NH<sub>3</sub>)、硫化氢(H<sub>2</sub>S),下午进行取样,样品一部分在4℃冰箱中保存,用于测定含水率、pH值、电导率(EC)、种子发芽指数(GI)、氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、总碳(TC)、总氮(TN)等指标,另一部分在-80℃超低温冰箱保存用于粪大肠菌群数检测。

## 1.3 测定指标及方法

温度由温度传感器(SBWZ-2460,上海虹天)测定;NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S由便携式气体检测仪测定(TionNH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>S300G,深圳纽福斯),待机器数值稳定后记录(约5 min),敞口处理检测气体时需将桶密闭10 min后检测;含水率采用烘干法测定;pH、EC、GI是将新鲜样品和去离子水按固液比(*m*:*V*)1:10混合,在振荡机上振荡90 min,设置振荡频率为200 r·min<sup>-1</sup>,振荡完毕后使用离心机离心30 min,设置离心频率为4 000 r·min<sup>-1</sup>,离心完毕后取上清液进行过滤,使用pH计(SX-610,上海三信)测定滤液的pH,使用电导率仪(DDS-307A,上海精科雷磁)测定EC,将10 mL上清液和10颗萝卜种子放到带有2层滤纸的培养皿中,25℃黑暗条件下于恒温培养箱(HWS型培养箱)培养48 h后记录种子发芽数和根长,计算GI<sup>[12]</sup>。粪大肠菌群数委托华测检测认证集团北京有限公司检测,根据《肥料中粪大肠菌群的测定》(GB/T 19524.1—2004)测定,使用设备为生化培养箱ATTEHLBJ00138、隔水式培养箱TTE20152145、生物显微镜ATTEHLBJ00110。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用靛酚蓝比色法,使用紫外-可见分光光度计(I7,济南海能)比色测定<sup>[13]</sup>。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N采用紫外分光光度法测定。TC、TN是将样品风干后粉碎过100目筛,使用元素分析仪(PE2400,美国PerkinElmer)测定。

## 1.4 数据分析

采用Excel 2016、SPSS 26对试验数据进行统计分析,采用Origin 2022绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同贮存方式对早厕粪污农学特性的影响

#### 2.1.1 早厕粪污贮存过程中含水率的变化

含水率会影响物料中氧气含量,进而影响微生物

种类和活性,过高的含水率会导致物料内部氧气扩散受限,空气无法流通,发生厌氧反应<sup>[14]</sup>。试验过程中不同处理组早厕粪污含水率的变化如图1所示。CK处理组早厕粪污含水率呈波动下降趋势,MK处理组早厕粪污含水率呈缓慢且波动上升趋势,MK处理组早厕粪污含水率整体高于CK处理组。试验开始时,早厕粪污含水率较高,孔隙度较小,早厕粪污内氧气浓度较低,导致CK处理组底部发生厌氧反应<sup>[15]</sup>,造成CK处理组和MK处理组的含水率变化差异较小。随着环境温度的升高,水分蒸发量加大<sup>[16]</sup>。CK处理组在试验中期含水率快速下降,试验结束时,两个处理组早厕粪污含水率存在显著差异( $P<0.05$ ),CK处理组早厕粪污含水率由初始的86.19%下降到20.37%,MK处理组的含水率由初始的86.19%上升到92.21%,这可能是由于有机物的水解使干物质逐渐减少同时产生H<sub>2</sub>O,此外,在试验过程中观测到桶盖上存在大量水珠,冷凝水回滴也是造成含水率升高的原因之一。

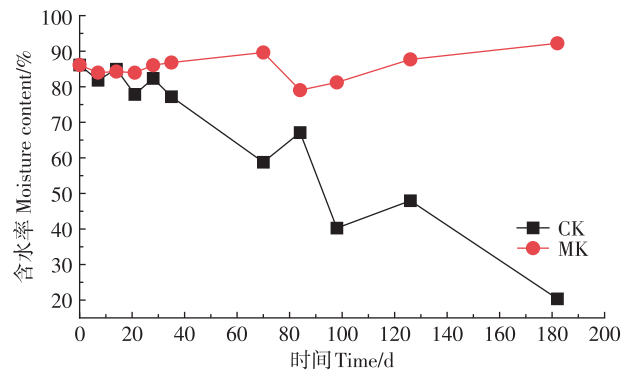


图1 不同贮存方式下早厕粪污含水率的变化

Figure 1 Variation of moisture content of human excrement in different storage methods

#### 2.1.2 早厕粪污贮存过程中pH的变化

pH也是影响微生物活性的重要因素之一,适宜的pH可以有效促进微生物的作用。pH范围在6.7~9.0之间最适宜微生物生长繁殖,当pH≤5.0时,物料降解基本停止,而当pH≥9.0时,物料降解速率也大幅降低并伴有NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的严重损失<sup>[17]</sup>。试验过程中不同处理组早厕粪污pH的变化如图2所示。试验第0~126天,CK处理组pH呈先下降后上升最后趋于稳定的趋势,MK处理组pH呈先升高后趋于稳定的趋势。试验初期易分解的有机物质较多,有机物分解产生有机酸导致了CK处理组pH下降。含氮有机物降解产生NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N使pH升高<sup>[18]</sup>,MK处理组pH的升高可能是

由于含氮有机物降解产生 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的速率高于含碳有机物降解产生有机酸的速率<sup>[19]</sup>,这表明密闭贮存可增强反应初期含氮有机物的降解。在试验后期,由于硝化作用增强,两个处理组pH均呈现出不同程度的下降趋势。整个贮存过程中,MK处理组pH均高于CK处理组,试验结束时,两个处理组的pH分别为9.1和8.2,二者差异极显著( $P<0.01$ ),以上结果表明,粪污经半年的贮存后都呈弱碱性,密闭贮存会显著提高粪污pH。

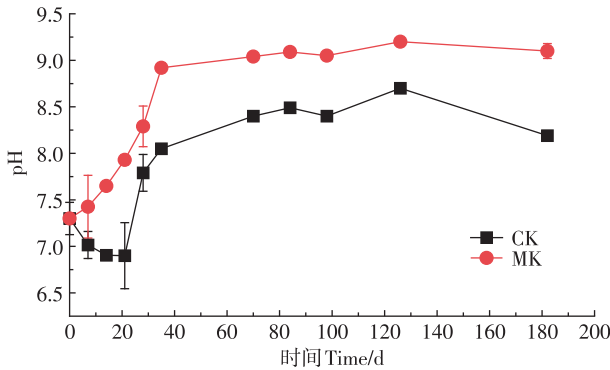


图2 不同贮存方式下旱厕粪污pH的变化

Figure 2 Variation of pH value of human excrement in different storage methods

### 2.1.3 旱厕粪污贮存过程中EC的变化

EC可间接反映旱厕粪污中盐分含量,其与样品浸提液中离子总浓度呈正相关<sup>[20]</sup>。试验过程中不同处理组旱厕粪污EC的变化如图3所示。CK处理组EC呈先升高后降低的趋势,这是由于微生物分解有机物产生的磷酸盐、铵离子等水溶性盐<sup>[21]</sup>使EC逐渐升高,随着 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 挥发,EC逐渐降低。MK处理组试验前期的EC在 $3\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右波动,这可能是由于水溶性盐的产生和 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 的挥发在密闭贮存前期

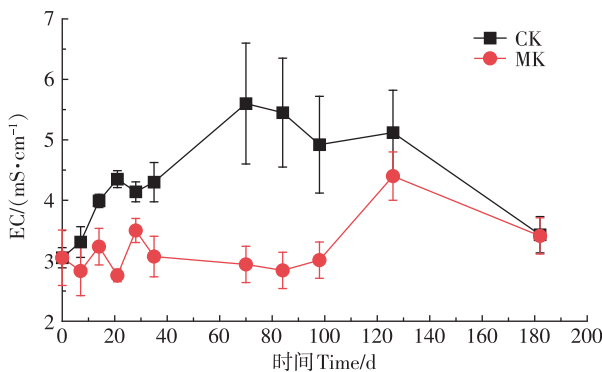


图3 不同贮存方式下旱厕粪污EC的变化

Figure 3 Variation of EC of human excrement in different storage methods

处于动态平衡状态。由于密闭条件, $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 很难逸散到空气中,部分 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 重新溶于物料,导致从第84天开始MK处理组EC逐渐升高,到试验后期,随着有机物的减少,有机物分解产生的水溶性盐作为微生物生命活动的营养物质被消耗<sup>[22]</sup>,EC呈现下降趋势。试验结束时,CK处理组和MK处理组的EC基本相同,分别为 $3.43\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $3.41\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,二者差异不显著( $P>0.05$ ),说明经过182 d的贮存,贮存方式对旱厕粪污最终的EC影响较小。

### 2.1.4 旱厕粪污贮存过程中TC的含量变化

试验过程中不同处理组旱厕粪污TC的变化如图4所示。各处理组TC含量变化趋势相似,总体呈先下降后平稳的趋势,这可能是 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 的释放造成了碳的损失<sup>[23]</sup>,但CK处理组TC含量降低速度和幅度均高于MK处理组,这是由于CK处理组氧气充足,有氧环境导致其产生 $\text{CO}_2$ 的速率较快,且充足的氧气会抑制 $\text{CH}_4$ 的产生<sup>[23]</sup>,导致了碳的损失较大。试验结束时,CK处理组和MK处理组的TC含量从试验开始的 $433.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别降低到 $255.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $275.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,减少幅度分别为40.92%和36.31%,二者差异极显著( $P<0.01$ ),这表明密闭贮存在一定程度上可以减少碳的损失。

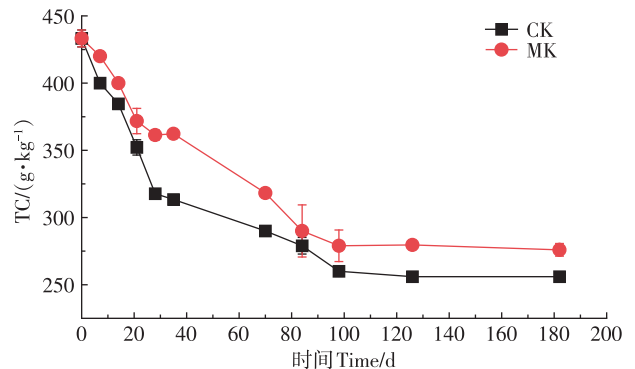


图4 不同贮存方式下旱厕粪污TC含量的变化

Figure 4 Variation of TC of human excrement in different storage methods

### 2.1.5 旱厕粪污贮存过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN的含量变化

试验过程中不同处理组旱厕粪污 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化如图5所示。各处理组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化趋势总体相似,均为先增加后逐渐降低。在微生物的氨化作用下,有机氮转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,因此两个处理组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量都有所增加。CK处理组和MK处理组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均在试验第70天达到最高值,分别为 $16.19670$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $8\ 615.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在此之后,随着有机物的减少,氨化作用逐渐减弱,同时,微生物的硝化作用、反硝化作用和固氮作用都会消耗  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,从而导致两个处理组的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量逐渐下降<sup>[24]</sup>。贮存试验启动后的前 84 d,CK 处理组  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量始终高于 MK 处理组,但 98 d 后刚好相反,且在 84~98 d 内 CK 处理组  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量下降速度明显高于 MK 处理组,这可能与该阶段气温逐步升高使氨挥发加剧有关。试验结束时 CK 处理组的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量为  $118.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,较试验启动时下降了 96.75%,MK 处理组的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量为  $4\ 330.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,较试验启动时上升了 19.09%,二者差异极显著 ( $P < 0.01$ ),表明密闭贮存有助于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的保存,这与畜禽粪污厌氧发酵过程中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的变化趋势相似<sup>[25]</sup>。

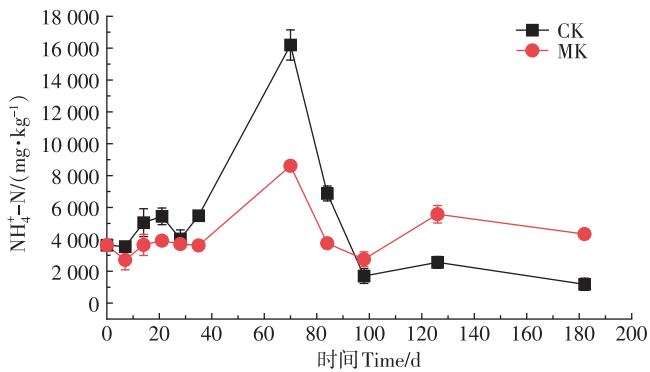


图5 不同贮存方式下旱厕粪污  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量的变化

Figure 5 Variation of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  content of human excrement in different storage methods

粪水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的转化主要与粪污中溶解氧含量和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  总量相关<sup>[26]</sup>。试验过程中不同处理组旱厕粪污  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量的变化如图 6 所示。CK 处理组  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量呈先上升后下降最后趋于稳定的趋势, MK 处理组呈波动下降最后趋于稳定的趋势,这表明在贮存初期,敞口贮存有助于增强微生物的硝化作用,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量的下降主要是由于微生物的吸收利用、反硝化作用和厌氧氨氧化作用<sup>[27-28]</sup>。整个贮存过程中,CK 处理组  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量始终高于 MK 处理组,这可能是敞口条件下  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在氧气的作用下经硝化作用转化为  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,降低了  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的下降幅度<sup>[29]</sup>。试验结束时,CK 处理组和 MK 处理组的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量分别为  $166.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $27.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,较试验开始时分别下降了 38.63% 和 89.98%,二者差异显著 ( $P < 0.05$ )。

试验过程中不同处理组旱厕粪污 TN 含量的变化如图 7 所示。各处理组 TN 含量变化趋势相似,

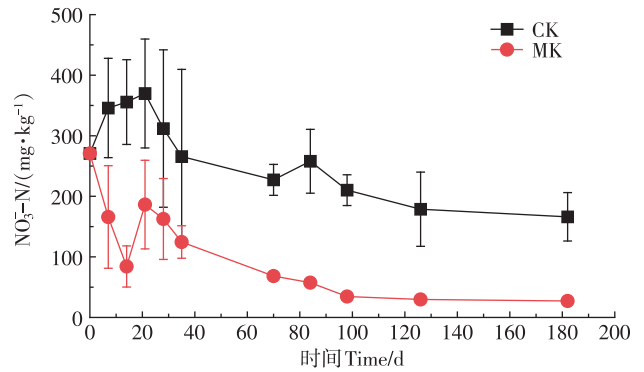


图6 不同贮存方式下旱厕粪污  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量的变化

Figure 6 Variation of  $\text{NO}_3^--\text{N}$  content of human excrement in different storage methods

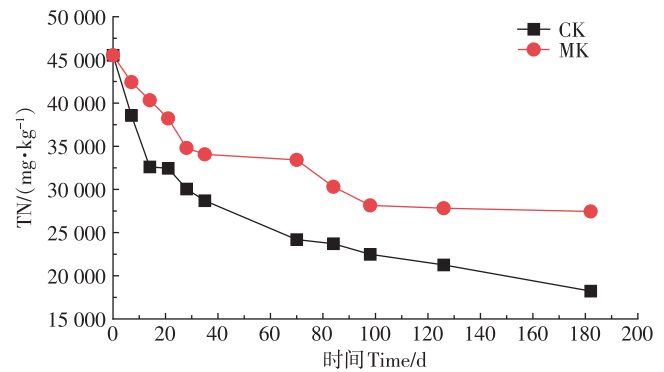


图7 不同贮存方式下旱厕粪污 TN 含量的变化

Figure 7 Variation of TN content of human excrement in different storage methods

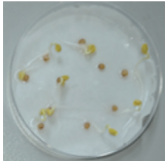
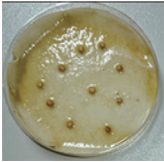
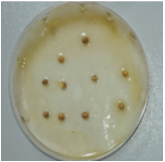
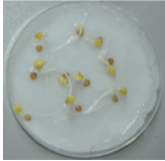
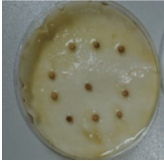
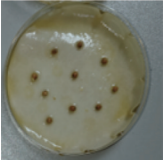
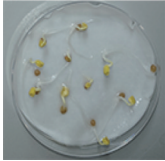
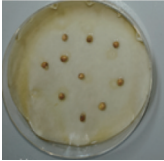
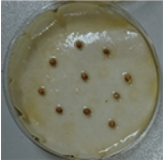
总体均为逐渐下降趋势,这可能是由于有机氮矿化、 $\text{NH}_3$  挥发和硝酸盐氮反硝化而损失了氮<sup>[30]</sup>,但 CK 处理组 TN 含量降低速度和幅度均高于 MK 处理组,这是由于 CK 处理组与大气存在气体交换,游离氨形成的  $\text{NH}_3$  和反硝化作用产生的氮氧化物容易逸散到空气中,从而造成了贮存后旱厕粪污氮素大量损失。CK 处理组和 MK 处理组的 TN 含量从试验开始的  $45\ 540.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  分别降低到  $18\ 233.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $27\ 453.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,减少幅度分别为 59.96% 和 39.72%,二者差异极显著 ( $P < 0.01$ ),这表明密闭贮存具有较好的保氮效果。

#### 2.1.6 旱厕粪污贮存过程中种子发芽率的变化

GI 是反映物料植物毒性的关键指标<sup>[31]</sup>。试验过程中不同处理组旱厕粪污种子发芽情况如表 2 所示。一般认为 GI 大于 80% 时为没有毒性<sup>[32]</sup>。整个试验过程中,CK 处理组和 MK 处理组的种子均未发芽,GI 为 0,表明无论是敞口还是密闭贮存,均无法确保在 6 个

表2 不同贮存方式下旱厕粪污种子发芽情况的变化

Table 2 Variation of seed germination of human excrement in different storage methods

时间 Time	纯水 Pure water	CK	MK
第0天 Day 0			
第98天 Day 98			
第182天 Day 182			

月内实现旱厕粪污腐熟,如果将其施用到土壤中,则会对作物产生不利影响<sup>[33]</sup>。因此需要添加填料或覆盖料,调节旱厕粪污的碳氮比,提高腐熟程度,达到农业利用要求。

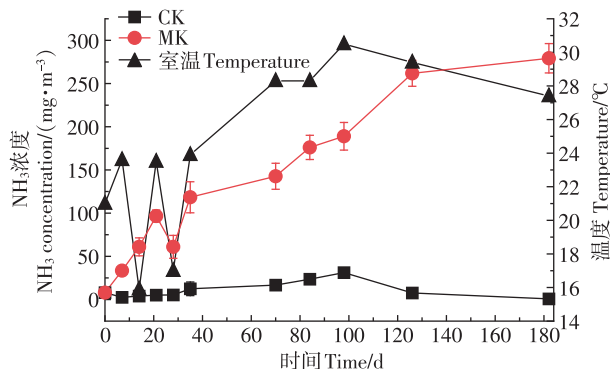
### 2.1.7 旱厕粪污贮存过程中粪大肠菌群的变化

旱厕粪污贮存过程中粪大肠菌群的数值经权威机构检测所得报告可知,旱厕粪污经过敞口贮存和密闭贮存的粪大肠菌群检测数值均小于 $3 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$ ,达到了《有机肥料》(NY/T 525—2021)标准,说明两种贮存方式均可以杀死粪污中的致病菌,实现粪污的无害化。

## 2.2 不同贮存方式对旱厕粪污臭气排放的影响

### 2.2.1 旱厕粪污贮存过程中 $\text{NH}_3$ 浓度的变化

$\text{NH}_3$ 具有强烈的刺激性气味,大量排放会导致环境污染,危害人体健康,旱厕粪污在贮存过程中会产生大量的 $\text{NH}_3$ ,导致旱厕粪污中的氮素大量损失,降低农业利用价值<sup>[34]</sup>。贮存过程中不同处理组粪污上部 $\text{NH}_3$ 浓度变化如图8所示。两个处理组在试验开始的第0~98天 $\text{NH}_3$ 浓度整体上呈上升趋势,这是由于微生物的矿化作用使有机质降解产生大量的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 在高温和高pH条件下迅速转化为 $\text{NH}_3$ <sup>[35-36]</sup>,导致 $\text{NH}_3$ 浓度呈上升趋势。第98~182天MK处理组的 $\text{NH}_3$ 浓度继续上升可能是由于MK处理组的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量较高,CK处理组的 $\text{NH}_3$ 浓度降低可能是由于敞

图8 不同贮存方式下旱厕粪污 $\text{NH}_3$ 浓度的变化Figure 8 Variation of  $\text{NH}_3$  concentration of human excrement in different storage methods

口使旱厕粪污含水率下降较快,干物质含量升高,导致结壳现象发生,而结壳现象会导致 $\text{NH}_3$ 排放减少<sup>[37]</sup>。试验结束时,CK处理组和MK处理组的 $\text{NH}_3$ 浓度分别是 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $279.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。整体而言,CK处理组粪污上部 $\text{NH}_3$ 浓度显著低于MK处理组( $P < 0.05$ ),这可能是由于CK处理组是敞口状态, $\text{NH}_3$ 会很快逸散到空气中,测得的数据仅是测定前10 min物料中产生的 $\text{NH}_3$ ,而MK处理处于密闭状态, $\text{NH}_3$ 很难逸散,其数据约为一个采样周期内物料产生 $\text{NH}_3$ 的累积值。如表3所示,CK处理组 $\text{NH}_3$ 浓度与粪污pH、环境温度呈中度正相关关系,MK处理组 $\text{NH}_3$ 浓度与粪污pH、环境温度呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),说明适当的降低pH与温度可以减少旱厕粪污贮存过程中 $\text{NH}_3$ 的排放。

表3  $\text{NH}_3$ 浓度与pH、温度的相关性分析Table 3 Correlation analysis among  $\text{NH}_3$  concentration, pH and temperature

贮存方式 Storage method	性状 Trait	$\text{NH}_3$ 浓度 $\text{NH}_3$ concentration	pH	温度 Temperature
CK	$\text{NH}_3$ 浓度 $\text{NH}_3$ concentration	1	0.572	0.574
	pH		1	0.744**
	温度 Temperature			1
MK	$\text{NH}_3$ 浓度 $\text{NH}_3$ concentration	1	0.870**	0.753**
	pH		1	0.734*
	温度 Temperature			1

注:\*\*.在0.01级别(双尾)相关性显著。\*.在0.05级别(双尾)相关性显著。下同。

Note: \*\*. At level 0.01 (two-tailed), the correlation is significant. \*. At level 0.05 (two-tailed), the correlation is significant. The same below.

### 2.2.2 旱厕粪污贮存过程中H<sub>2</sub>S浓度的变化

粪污贮存过程中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>,S<sub>2</sub>再通过水解作用最终形成H<sub>2</sub>S<sup>[38]</sup>。H<sub>2</sub>S具有刺激性的臭鸡蛋气味,在臭气中占比不大,但臭味呈现力强,是强烈的神经毒素,严重影响周围人居环境和身体健康<sup>[39]</sup>。试验过程中不同处理组粪污上部H<sub>2</sub>S的浓度变化如图9所示。两组处理H<sub>2</sub>S浓度均呈先下降后平稳的趋势,初始时CK处理组和MK处理组的H<sub>2</sub>S浓度分别为87.00 mg·m<sup>-3</sup>和91.33 mg·m<sup>-3</sup>,H<sub>2</sub>S是有机物厌氧发酵过程中的主要副产物<sup>[40]</sup>,该浓度说明旱厕粪污在转运过程中已经发生了厌氧反应。在第7天时,CK处理组和MK处理组的H<sub>2</sub>S浓度分别下降到52.59 mg·m<sup>-3</sup>和20.34 mg·m<sup>-3</sup>,这可能是由于H<sub>2</sub>S在碱性环境中会通过中和作用消失一部分<sup>[41]</sup>,MK处理组的pH高于CK处理组,导致CK处理组的H<sub>2</sub>S浓度较高。在贮存试验第21~182天,两个处理组的H<sub>2</sub>S浓度较初始时大幅降低,这是由于在贮存过程中,粪污表面形成一层粪皮,导致H<sub>2</sub>S挥发量降低,此外,随着时间的推移,有机物质逐渐减少,H<sub>2</sub>S产生量逐渐降低。在此期间,MK处理组的H<sub>2</sub>S浓度高于CK处理组,这是由于此时H<sub>2</sub>S的排放量已处于较低状态,且CK处理组与外界存在气体交换,导致CK处理组的H<sub>2</sub>S浓度很低。试验结束时,两个处理组的H<sub>2</sub>S浓度为0~0.46 mg·m<sup>-3</sup>。如表4所示,CK处理组H<sub>2</sub>S浓度与粪污pH、环境温度呈低度负相关关系,MK处理组NH<sub>3</sub>浓度与粪污pH呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),与环境温度呈低度负相关关系,说明适当的提高粪污pH可以减少旱厕粪污贮存中H<sub>2</sub>S的排放。

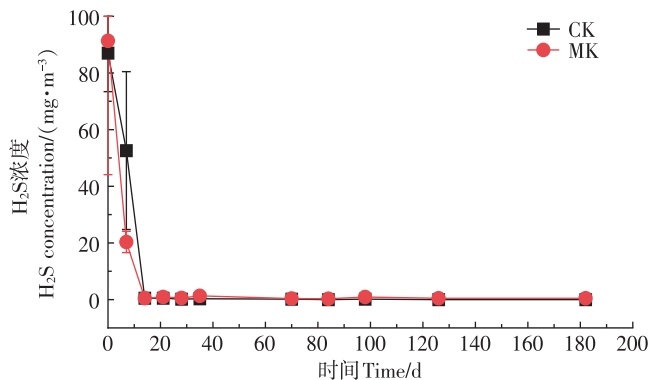


图9 试验过程中旱厕粪污H<sub>2</sub>S浓度的变化

Figure 9 Variation of H<sub>2</sub>S concentration of human excrement in different storage methods

表4 H<sub>2</sub>S浓度与pH、温度的相关性分析

Table 4 Correlation analysis among H<sub>2</sub>S concentration, pH and temperature

贮存方式 Storage method	性状 Trait	H <sub>2</sub> S浓度 H <sub>2</sub> S concentration	pH	温度 Temperature
CK	H <sub>2</sub> S浓度 H <sub>2</sub> S concentration	1	-0.449	-0.242
	pH		1	0.744**
	温度Temperature			1
MK	H <sub>2</sub> S浓度 H <sub>2</sub> S concentration	1	-0.609*	-0.244
	pH		1	0.734*
	温度Temperature			1

## 3 讨论

贮存方式通过影响含水率、氧气含量等改变了旱厕粪污中微生物的活动环境。敞口贮存条件下,微生物发生好氧和兼氧反应,有机物在细菌、放线菌和真菌等微生物的作用下被分解成CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、磷酸盐和铵离子等水溶性盐<sup>[42]</sup>。密闭贮存条件下,微生物发生厌氧反应,功能微生物将有机物分解成小分子有机物,再经过水解、酸化、产氢产乙酸、产甲烷4个阶段,最后形成CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等物质<sup>[43]</sup>。因此,贮存方式不同对旱厕粪污中养分含量、无害化程度、臭气排放等的影响均存在差异。

### 3.1 贮存方式对旱厕粪污养分保留情况的影响

在贮存过程中,粪污中的有机氮在微生物作用下发生氨化、硝化以及反硝化等反应后分解为无机氮,主要包括NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和少量NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,其中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N占比最高。旱厕粪污敞口贮存时,同时产生好氧反应与兼氧反应,微生物利用有机氮化合物作为能源,主要由产氨菌通过氨基酸代谢释放氨氮,当温度、pH升高达到适宜条件时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N与NH<sub>3</sub>间进行转化,部分NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N以NH<sub>3</sub>的形式挥发损失,在有氧条件下一部分NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N经氮硝化细菌和硝化细菌等微生物作用,发生硝化反应转化为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,反硝化则是通过反硝化细菌将NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N还原为NH<sub>3</sub>损失,从而造成贮存过程中粪污氮素大量损失,粪污肥料价值降低。敞口贮存与密闭贮存的TN损失率分别为59.96%和39.72%,这表明密闭贮存通过调控环境条件减缓了微生物的氨化和硝化反应,具有较好的保氮效果。

### 3.2 贮存方式对旱厕粪污臭气控制的影响

旱厕粪污臭味主要源于挥发性脂肪酸、含氮类化



合物、含硫类化合物3类恶臭物质,在持续使用的旱厕上部空间测得的恶臭组分中 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 占据主要位置<sup>[44]</sup>。因此,通过研究旱厕粪污 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 的排放,比较两种贮存方式对臭气控制的影响发现,相比于密闭贮存,旱厕粪污在敞口贮存条件下,氮素损失总量更多, $\text{NH}_3$ 挥发通量更大,但由于有较高的空气扰动和较大的扩散速度,导致在 $\text{NH}_3$ 检测时,敞口贮存的 $\text{NH}_3$ 浓度显著低于密封贮存。因此,密封贮存尽管检测出的 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 浓度高,但排放通量低于敞口贮存,可以有效减少旱厕粪中 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 等臭源气体向大气中的排放,臭气控制效果更优。

## 4 结论

(1)与自然贮存相比,密闭贮存可以更好地减少氮损失,总氮损失降低20.24%,氨态氮含量提高22.34%,总碳含量损失降低4.61%,电导率下降0.02,pH上升0.9,从农用价值考虑,建议在旱厕粪污贮存时采用密闭贮存的方式。

(2)旱厕粪污经过敞口贮存和密闭贮存的粪大肠菌群数达到了《有机肥料》(NY/T 525—2021)标准,但两个处理组的种子发芽指数均未达到标准,对植物生长有一定的毒性,无法直接农业利用,建议后续应通过添加有机物料实现粪污的腐熟,并开展相关研究明确添加参数和条件需求。

(3)旱厕粪污贮存过程中,密闭贮存粪污上部 $\text{NH}_3$ 浓度显著高于敞口贮存,但 $\text{NH}_3$ 排放通量低于敞口贮存, $\text{H}_2\text{S}$ 浓度略高于敞口贮存,因此,采用密闭贮存更有利于旱厕粪污臭气的减排,但密闭贮存池必须安装排气管,且排气管高度应高于人类常规活动高度。

### 参考文献:

[1] 邱海峰. 截至去年底全国农村卫生厕所普及率近七成:全面提升农村人居环境质量[N]. 人民日报海外版, 2021-12-07(8版). QIU H F. By the end of last year, nearly 70% of rural residents had access to sanitary latrines: comprehensively improving the quality of rural living environment[N]. People's Daily Overseas Edition, 2021-12-07 (8th Edition).

[2] ORGANIZATION W H. Progress on drinking water sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines[R]. Geneva: World Health Organization, 2017.

[3] 王永生, 刘彦随, 龙花楼. 我国农村厕所改造的区域特征及路径探析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 553-560. WANG Y S, LIU Y S, LONG H L. Regional characteristics and pathway optimization of China's rural toilet improvement[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 553-560.

[4] 张宇航, 沈玉君, 王惠惠, 等. 农村厕所粪污无害化处理技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 230-238. ZHANG Y H, SHEN Y J, WANG H H, et al. A study on the harmless treatment technology of night soil in rural toilets[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(2): 230-238.

[5] 侯金丽. 不同环境因素对餐厨垃圾中硫化氢的产生的影响[J]. 清洗世界, 2023, 39(2): 31-34. HOU J L. Effects of different environmental factors on the production of hydrogen sulfide in kitchen waste[J]. *Cleaning World*, 2023, 39(2): 31-34.

[6] 张羽鑫, 刘闯, 黄殿男, 等. 超高温菌好氧堆肥技术对人粪便的处理效果[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(4): 179-185. ZHANG Y X, LIU C, HUANG D N, et al. Treatment effect of ultra-high temperature bacteria aerobic composting technology on human feces[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(4): 179-185.

[7] 李政伟, 张金良, 马军, 等. 人粪尿资源化技术研究进展[C]//中国环境科学学会2021年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集. 北京:《环境工程》编辑部, 2021. LI Z W, ZHANG J L, MA J, et al. Research progress on resourceful utilization of night soil [C]//Proceedings of 2021 Science and Technology Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences: Innovation and Application of Environmental Engineering Technology. Beijing: Editorial Department of *Environmental Engineering*, 2021.

[8] 马灿明, 毛云峰, 张健, 等. 我国农村厕所革命相关技术标准规范和实施进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(20): 215-221. MA C M, MAO Y F, ZHANG J, et al. Related regulations and specifications for China's rural toilet revolution and their implementation progress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(20): 215-221.

[9] 马艳茹, 孟海波, 沈玉君, 等. 粪水酸化储存还田应用效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 245-251. MA Y R, MENG H B, SHEN Y J, et al. Application effect of the acidification storage of animal slurry returning to field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 245-251.

[10] 丁京涛, 张明月, 赵立欣, 等. 养殖粪水长期贮存过程理化特性变化规律[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 220-225. DING J T, ZHANG P Y, ZHAO L X, et al. Change rule of physical and chemical properties of slurry in the process of long-term storage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14): 220-225.

[11] 陈广银, 董金竹, 吴佩, 等. 不同贮存方式对猪粪水理化特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(4): 38-46. CHEN G Y, DONG J Z, WU P, et al. Effect of different storage methods on physico-chemical properties of pig slurry[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2022, 43(4): 38-46.

[12] 王国英, 袁京, 孔艺霖, 等. 堆肥种子发芽指数测定方法与敏感性种子筛选[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 220-227. WANG G Y, YUAN J, KONG Y L, et al. Determination of seed germination index and selection of sensitive seeds for phytotoxicity evaluation of composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 220-227.

[13] GE M, ZHOU H, SHEN Y, et al. Effect of aeration rates on enzymatic activity and bacterial community succession during cattle manure

- composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 304: 122928.
- [14] 叶牧, 孔祥平, 叶小梅, 等. 餐厨垃圾含水率和碳氮比对黑水虻幼虫养殖过程中气体释放的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(4): 220-225. YE M, KONG X P, YE X M, et al. Influences of food waste moisture content and C/N ratio on gas release during breeding of black soldier fly larvae[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(4): 220-225.
- [15] 麦旭东, 谭军利, 王西娜, 等. 辅料及工艺参数对干旱地区污泥堆肥物理指标动态变化的影响[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(8): 2682-2690. MAI X D, TAN J L, WANG X N, et al. Effects of auxiliary materials and pile-turning technique on the dynamical changes of some physical index of sludge composite in northwest arid region [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(8): 2682-2690.
- [16] 徐鹏翔, 沈玉君, 周海宾, 等. 原料含水率对筒仓式反应器堆肥氮素转化的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(11): 180-188. XU P X, SHEN Y J, ZHOU H B, et al. Effects of the moisture content of raw material on nitrogen transformation during composting in silo reactor[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(11): 180-188.
- [17] CAMMACK J A, JEFFERY K, KERRY W, et al. The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Insects*, 2017, 8(2): 56.
- [18] 赵兵, 王宇蕴, 陈雪娇, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2481-2488. ZHAO B, WANG Y Y, CHEN X J, et al. Effect of phosphogypsum and gypsum as conditioners on rice husk and oilcake composting process and evaluation of their physicochemical character as a substrate[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2481-2488.
- [19] 王怀中, 李开荣, 朱荣生, 等. 畜禽粪污好氧堆肥发酵参数探讨[J]. *山东畜牧兽医*, 2020, 41(3): 37-39. WANG H Z, LI K R, ZHU R S, et al. Fermentation parameters of livestock and poultry manure aerobic compost[J]. *Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2020, 41(3): 37-39.
- [20] LI J B, LIU X, LI L Y, et al. Performance exploration and microbial dynamics of urine diverting composting toilets in rural China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115964.
- [21] 王良梅, 黄松杉, 王良桂, 等. 菌渣好氧堆肥过程中腐熟度指标及红外光谱的动态变化[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2416-2424. WANG G M, HUANG S S, WANG L G, et al. Dynamics of maturity indexes and fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy during mushroom residue composting[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(12): 2416-2424.
- [22] 马俊怡, 潘君廷, 郜天磊, 等. 膨润土对鸡粪序批式厌氧消化特性的影响[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(3): 442-448. MA J Y, PAN J T, GAO T L, et al. Enhanced anaerobic digestion of chicken manure by bentonite addition[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(3): 442-448.
- [23] 石建新. 畜禽粪便堆肥温室气体排放及其控制研究进展[J]. *农业与技术*, 2023, 43(3): 30-33. SHI J X. Research progress on greenhouse gas emissions and control of livestock manure composting[J]. *Agriculture and Technology*, 2023, 43(3): 30-33.
- [24] 刘艳军, 张月强, 于成鹏, 等. 畜禽粪便厌氧发酵产气特性研究[J]. *现代农业科技*, 2021(18): 174-176. LIU Y J, ZHANG Y Q, YU C P, et al. Gas production characteristics of livestock and poultry manure by anaerobic fermentation[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021(18): 174-176.
- [25] 靳红梅, 付广青, 常志州, 等. 猪、牛粪厌氧发酵中氮素形态转化及其在沼液和沼渣中的分布[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 208-214. JIN H M, FU G Q, CHANG Z Z, et al. Distribution of nitrogen in liquid and solid fraction of pig and dairy manure in anaerobic digestion reactor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(21): 208-214.
- [26] 李丹阳, 马若男, 亓传仁, 等. 含水率对羊粪堆肥腐熟度及污染气体排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(20): 254-262. LI D Y, MA R N, QI C R, et al. Effects of moisture content on maturity and pollution gas emissions during sheep manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20): 254-262.
- [27] 高伟, 郑国砥, 高定, 等. 堆肥处理过程中猪粪有机物的动态变化特征[J]. *环境科学*, 2006, 27(5): 986-990. GAO W, ZHENG G D, GAO D, et al. Transformation of organic matter during thermophilic composting of pig manure[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(5): 986-990.
- [28] GUO H H, GU J, WANG X J, et al. Beneficial effects of bacterial agent/bentonite on nitrogen transformation and microbial community dynamics during aerobic composting of pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 298: 122384.
- [29] 张惠, 段亚军, 王小敏, 等. 腐熟菌剂和辅料组合对蔬菜废弃物堆肥进程和腐熟度的影响[J]. *中国蔬菜*, 2021(9): 69-77. ZHANG H, DUAN Y J, WANG X M, et al. Effects of microorganism agents and amendment on composting process and maturity of vegetable wastes [J]. *China Vegetables*, 2021(9): 69-77.
- [30] AWASTHI M K, WANG Q, AWASTHI S K, et al. Influence of medical stone amendment on gaseous emissions, microbial biomass and abundance of ammonia oxidizing bacteria genes during biosolids composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 970-979.
- [31] 中华人民共和国农业农村部. 畜禽粪便堆肥技术规范: NY/T 3442—2019[S]. 北京: 中国农业出版社, 2019. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical specification for composting livestock and poultry manure: NY/T 3442—2019[S]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2019.
- [32] 郭秋月, 常瑞雪, 孙霞, 等. 初始物料水溶性有机碳含量对番茄秧堆肥进程的影响[J]. *中国蔬菜*, 2018(5): 42-47. GUO Q Y, CHANG R X, SUN X, et al. Effect of water-soluble organic carbon content of initial mixture on composting process for tomato stalk[J]. *China Vegetables*, 2018(5): 42-47.
- [33] 张兰霞, 杜巍, 王岩, 等. 不同碳源农林废弃物与厨余垃圾协同堆肥对腐熟度和臭气排放的影响[J]. *环境工程*, 2022, 40(11): 105-112. ZHANG L X, DU W, WANG Y, et al. Maturity and odor gas

- emissions during co-composting of kitchen waste and agricultural and forestry wastes with different carbon sources[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(11):105-112.
- [34] CALVET S, HUNT J H, MISSELBROOK T. Low frequency aeration of pig slurry affects slurry characteristics and emissions of greenhouse gases and ammonia[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 159:121-132.
- [35] 张朋月, 丁京涛, 孟海波, 等. 牛粪水酸化贮存过程中氮形态转化的特性研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8):212-218. ZHANG P Y, DING J T, MENG H B, et al. Characteristics of nitrogen transformation in the process of acidification and storage of cow slurry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8):212-218.
- [36] WANG X, SELVAM A, CHAN M T, et al. Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 147:17-22.
- [37] SMITH K, CUMBY T, LAPWORTH J, et al. Natural crusting of slurry storage as an abatement measure for ammonia emissions on dairy farms[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97:464-471.
- [38] ZANG B, LI S Y, MICHEL F C, 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.
- [39] ZANG B, LI S Y, 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.
- [40] 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<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>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 NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S emissions from pig manure compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9):2014-2020.
- [41] 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.
- [42] 许蕊蕊. 丙酸产甲烷菌群对低温批式厌氧发酵的生物强化作用研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2022. XU X R. Study on bioenhancement effect of propionic acid methanogenic bacteria on low-temperature batch anaerobic fermentation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
- [43] 石德智, 马靖元, 张涵博, 等. 厕所恶臭物质组分及检测分析技术的研究进展[J]. 环境卫生工程, 2021, 29(3):44-51. SHI D Z, MA J Y, ZHANG H B, et al. Research progress on components and detection and analysis techniques of toilet odors[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(3):44-51.

(责任编辑:李丹)