

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 Guangyin, DONG Jinzhu, WU Pei, et al. Effect of different storage methods on physic-chemical properties of pig slurry[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(4): 38-46.

# 不同贮存方式对猪粪水理化特性的影响

陈广银<sup>1,2</sup>, 董金竹<sup>2</sup>, 吴佩<sup>2</sup>, 曹海南<sup>2</sup>, 孟菁<sup>1,2</sup>, 杨耿<sup>1,2</sup>, 王恩慧<sup>2</sup>, 方彩霞<sup>1,2</sup>

(1 安徽省水土污染治理与修复工程实验室, 安徽 芜湖 241002; 2 安徽师范大学 生态与环境学院, 安徽 芜湖 241002)

**摘要:**【目的】针对猪粪水贮存过程中氮素大量损失的问题, 比较秋季和冬季条件下敞口和密封贮存对猪粪水贮存过程中理化特性的影响, 以便为猪粪水贮存还田提供理论参考。【方法】在实验室条件下, 比较了秋季和冬季敞口与密封贮存对猪粪水贮存过程中物质转化、氮素损失及无害化的影响, 分析了猪粪水 pH、电导率 (Electrical conductivity,  $\kappa$ )、化学需氧量 (Chemical oxygen demand, COD)、种子发芽率及  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、总氮 (Total nitrogen, TN) 和重金属 (As、Zn、Cu、Pb 和 Cd) 含量的变化。【结果】猪粪水贮存过程中, pH 先增加后保持相对稳定,  $\kappa$ 、COD 及 TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和重金属含量均逐渐降低,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量先增加后降低, 种子发芽率逐渐增加; 贮存后猪粪水中无机氮占比明显增加 (冬季敞口贮存除外), 除 Cu 和 Zn 含量未达到《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021) 要求外, As、Pb 和 Cd 含量均达到无害化和稳定化要求; 贮存造成氮素损失严重, 秋季和冬季敞口贮存猪粪水的氮素损失率分别为 79.44% 和 52.60%。与敞口相比, 密封贮存降低了猪粪水 pH, 显著减少了贮存过程中氮素损失, 降低了 Zn 含量, 特别是显著减少了  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  损失, 秋季和冬季贮存后猪粪水氮素损失率较敞口贮存分别减少 36.14 和 21.30 个百分点; 贮存后猪粪水  $\kappa$  显著高于敞口贮存, 种子发芽率略低, 对其他重金属 (As、Cu、Pb 和 Cd) 含量无显著影响。【结论】尽管敞口贮存简单方便, 但氮素损失严重, 降低了贮存后猪粪水的肥料价值, 故在有条件的地区应鼓励养殖场进行猪粪水密封贮存。

**关键词:** 贮存方式; 猪粪水; 理化特性; 氮损失; 敞口贮存; 密封贮存

中图分类号: S879.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2022)04-0038-09

## Effect of different storage methods on physic-chemical properties of pig slurry

CHEN Guangyin<sup>1,2</sup>, DONG Jinzhu<sup>2</sup>, WU Pei<sup>2</sup>, CAO Hainan<sup>2</sup>, MENG Jing<sup>1,2</sup>, YANG Geng<sup>1,2</sup>, WANG Enhui<sup>2</sup>, FANG Caixia<sup>1,2</sup>

(1 Anhui Provincial Engineering Laboratory of Soil and Water Pollution Control and Remediation, Wuhu 241002, China;

2 School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

**Abstract:**【Objective】Aiming at the great loss of nitrogen during swine slurry storage process, effects of open and sealed storage on the physic-chemical properties of swine slurry during the storage process were compared in autumn and winter to provide a theoretical reference for swine slurry storage and return to the field.

【Method】The effects of open and sealed storage on material transformation, nitrogen loss and harmlessness of pig slurry storage were compared in autumn and winter under laboratory condition. The changes of pH value, electrical conductivity ( $\kappa$ ), chemical oxygen demand (COD),  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  content,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content, total nitrogen (TN) content, seed germination rate and heavy metal (As, Zn, Cu, Pb and Cd) contents were analyzed.

收稿日期: 2021-09-26 网络首发时间: 2022-04-24 10:16:29

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20220422.1810.002.html>

作者简介: 陈广银, 副研究员, 博士, 主要从事生物能源和畜禽粪污治理研究, E-mail: [xzcf2004@163.com](mailto:xzcf2004@163.com)

基金项目: 安徽省重点研发项目 (201904a06020044); 安徽高校协同创新项目 (GXXT-2019-010)

**【Result】**The pH value first increased and then remained relatively stable,  $\kappa$ , COD, the contents of TN,  $\text{NO}_3^-$ -N and heavy metals gradually decreased,  $\text{NH}_4^+$ -N content first increased and then decreased gradually, and the seed germination rate gradually increased during the storage of pig slurry. After storage, the proportion of inorganic nitrogen in pig slurry increased significantly (Except for winter open storage). Except Cu and Zn did not meet the requirements of “Water Quality Standard for Farmland Irrigation” (GB 5084—2021), As, Pb and Cd met the requirements of harmlessness and stabilization. However storage also caused serious nitrogen loss, with the nitrogen loss rates of 79.44% and 52.60% respectively in autumn and winter under open storage. Compared with open storage, sealed storage reduced the pH value of pig slurry, significantly reduced the nitrogen loss and Zn content during storage, especially the  $\text{NH}_4^+$ -N loss. The nitrogen loss rate of pig slurry after storage in autumn and winter decreased by 36.14 and 21.30 percentage points respectively compared with open storage. However, after storage, the  $\kappa$  of pig slurry was significantly higher than that of open storage, seed germination rate was slightly lower, and there was no significant effect on the contents of other heavy metals (As, Cu, Pb and Cd).

**【Conclusion】**Although open storage is simple and convenient, but the nitrogen loss is serious, which reduces the fertilizer value of pig slurry after storage. Therefore, farms should be encouraged to store pig slurry in sealed condition.

**Key words:** Storage method; Pig slurry; Physicochemical characterization; Nitrogen loss; Open storage; Sealed storage

2020年,全国生猪年底存栏量40 650.42万头,年猪肉产量4 113.33万t(按每头猪100 kg、出肉率0.7计算,年出栏生猪58 761.86万头),占当年畜禽肉类总产量的53.09%<sup>[1]</sup>。生猪养殖在为居民提供肉产品的同时,也产生了大量养殖废弃物,包括粪便、尿液、污水、废垫料(部分猪场)、臭气等。据估计,规模化猪场1头猪从断奶仔猪到出栏共产生粪污量约0.70 m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>,则2020年我国生猪养殖排放粪污量达4.11亿t,猪场粪污处理压力巨大。

针对畜禽养殖粪污问题,2017年6月12日国务院办公厅印发了《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(国办发〔2017〕48号)<sup>[3]</sup>;2017年7月7日农业部制定了《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)》<sup>[4]</sup>,提出了畜禽粪污农田利用是畜禽粪污资源化的主要方向。2017年12月7日,全国畜牧总站首次将粪水贮存还田作为畜禽粪污资源化利用主推技术模式<sup>[5]</sup>。为达到无害化效果,欧洲国家大多要求养殖粪污贮存4~6个月后才能还田<sup>[6]</sup>,长时间的贮存在保证无害化效果的同时,也造成了氮素养分的大量损失。粪水中的氮素包括有机氮和无机氮( $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N等),在粪水贮存过程中通过氨化、氨挥发、硝化、反硝化<sup>[7]</sup>等过程,造成贮存后粪水氮素大量损失。马艳茹等<sup>[8]</sup>研究发现,猪粪水贮存60 d后总氮含量降低了44.77%;Mansyur等<sup>[9]</sup>研究发现,猪粪水贮存60 d

后,粪水总氮、 $\text{NH}_4^+$ -N含量和水溶性化学需氧量(Soluble chemical oxygen demand, SCOD)分别降低了33.33%、19.26%和31.82%;姜晨润等<sup>[10]</sup>研究发现,猪粪水贮存180 d后,总氮、总磷、总钾含量分别降低了58.38%、84.19%和47.69%;丁京涛等<sup>[11]</sup>研究发现,猪粪水敞口贮存180 d后, $\text{NH}_4^+$ -N损失率达68%~80%。可以看出,尽管猪粪水自然敞口贮存简单方便,贮存成本低,但造成氮素的大量损失,降低了贮存后粪水的肥料价值,同时增加了温室气体排放,不符合我国“碳达峰、碳减排”的要求。为减少猪粪水贮存过程中的氮素损失和温室气体排放,研究人员开发了表层覆盖<sup>[12-14]</sup>及添加酸化剂<sup>[8, 15-17]</sup>、沸石<sup>[18]</sup>、菌剂<sup>[19]</sup>等方式,这些方式在减少氮素损失和温室气体排放方面表现出较好的效果,但也增加了粪水贮存成本。然而,靳红梅等<sup>[20]</sup>研究发现,在连续运行了130 d的全混合厌氧反应器(Continuous stirred tank reactor, CSTR)装置中,猪粪和牛粪氮素损失率分别为12.2%和11.5%,远低于文献报道的猪、牛粪敞口贮存的氮素损失率。此外,随着我国生猪养殖规模化程度不断提高,2020年我国生猪养殖规模化率达53%,规模化猪场粪污处理设施覆盖率达93%,很多猪场建设了沼气工程设施,这也为猪粪污密封贮存提供了条件。在猪粪水贮存过程中,氮的损失途径主要包括氨挥发和反硝化作用,反硝化作用需要有厌氧、好氧条件,

氨挥发需要碱性和敞口条件<sup>[7]</sup>, 而密封条件大幅降低了硝化、反硝化和氨挥发速率。尽管密封条件下少量氨气随厌氧产气排出, 但氨挥发量远小于敞口贮存, 故密封贮存理论上具有较好的保氮效果。然而, 文献调研发现, 系统比较猪粪水敞口和密闭贮存的研究还鲜有报道。本研究以猪粪水为研究对象, 通过在秋季和冬季进行猪粪水贮存试验, 比较了敞口和密封条件对猪粪水贮存过程中物质转化、氮素损失和无害化的影响, 分析了猪粪水 pH、电导率 (Electrical conductivity,  $\kappa$ )、化学需氧量 (Chemical oxygen demand, COD) 及铵态氮 ( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ )、硝态氮 ( $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )、总氮 (Total nitrogen, TN)、重金属 (As、Zn、Cu、Pb 和 Cd) 含量和种子发芽率的变化, 以期为猪场粪污还田工作提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

猪粪水取自安徽省芜湖市某规模养猪场, 年存栏生猪 1 000 头。猪场采用尿泡粪工艺, 收集粪污过 5 目筛后的污水用于本试验。

### 1.2 试验方法

分别于 2020 年 9 月和 12 月进行秋季和冬季试验, 反映不同贮存温度对猪粪水贮存过程的影响。试验设置敞口贮存和密封贮存 2 种方式, 除瓶口是否密封外, 其他操作相同。试验在总容积 1 L 的玻璃容器内进行, 加入猪粪水 800 mL, 敞口处理用纱布覆盖瓶口, 并用橡皮筋固定, 避免杂物掉入; 密封处理在瓶口用橡胶塞塞紧, 在橡胶塞中间位置打孔穿入玻璃管, 玻璃管另一侧通过硅胶管接入集气瓶, 于室外常温下 (避雨但不避光) 进行试验。每个处理 3 个平行, 取平均值进行分析。秋季试验分别于试验第 0、2、6、14、25、60、90、111 和 180 天取样, 冬季试验分别于试验第 0、2、6、14、25、60、90、120、150 和 180 天取样, 记录每次取样量。取样后立刻测定猪粪水 pH 和  $\kappa$ , TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和 COD 在取样 24 h 内测完, 种子发芽率和重金属含量在试验最后一次取样后集中测定。

### 1.3 测定指标及方法

猪粪水 pH 采用上海大普 pHS-3C 型 pH 计测定;  $\kappa$  采用台湾衡欣 AZ8303 电导率仪测定; TN 采用硫酸-过氧化氢消解凯氏定氮法测定;  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  采用紫外分光光度法测定;  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  采用纳氏试剂法测定; COD 采用重铬酸钾容量法测定。

种子发芽率测定: 在直径 9 cm 的培养皿中铺

入 2 层滤纸, 放入 10 粒小麦种子, 每个培养皿中加入 5 mL 猪粪水, 于人工气候箱 (光强度 5 000 lx, 湿度 70%) 中培养 4 d, 每天补充约 2 mL 猪粪水, 记录种子发芽数 ( $A$ ), 计算种子发芽率 ( $\delta$ ):

$$\delta = \frac{A}{B} \times 100\%, \quad (1)$$

式中,  $B$  为供试种子数量。

猪粪水氮素损失率 ( $\omega$ ) 计算: 猪粪水贮存后的  $\omega$  计算公式如下:

$$\omega = \left( 1 - \frac{C_n V_n + \sum_{i=1}^n C_i V_i}{C_0 V_0} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $C_i$  和  $C_n$  分别为第  $i$  次和最后一次取样时猪粪水中总氮的质量浓度, mg/L;  $V_i$  为第  $i$  次取样的猪粪水体积, L;  $V_n$  为最后一次取样剩下的猪粪水体积, L;  $n$  为总取样次数, 本试验中秋季  $n=9$ , 冬季  $n=10$ ;  $C_0$  为试验初始猪粪水总氮的质量浓度, mg/L;  $V_0$  为试验初始猪粪水总体积, L。

### 1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2016 处理, 采用 Origin 2017 绘图, 采用 SPSS 24.0 对试验数据进行统计分析, 并使用 Duncan's 新复极差法检验差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同贮存方式对猪粪水理化特性的影响

2.1.1 猪粪水贮存过程中 pH 的变化 试验过程中猪粪水 pH 的测定结果见图 1。各处理猪粪水 pH 均在试验启动后逐渐增加, 但秋季的增加速度明显快于冬季, 秋季的猪粪水 pH 在 60 d 时已基本稳定, 而冬季的猪粪水 pH 在试验结束时仍缓慢增加, 表明贮存温度对猪粪水有机物分解速度影响较

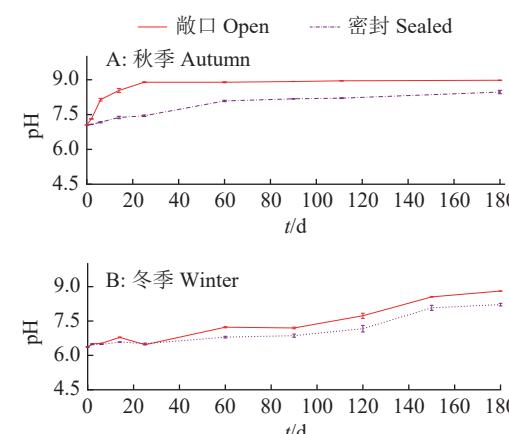


图 1 试验过程中猪粪水 pH 的变化

Fig. 1 Change of pH value of pig slurry during the experiment

大,表现为pH增加速度上的差异。贮存方式对猪粪水pH有较大影响,在秋季,敞口贮存的猪粪水pH始终高于密封贮存的,且在试验启动后迅速增加,在试验25 d时已达到基本稳定,而密封处理在60 d时才达到基本稳定;在冬季,试验的前25 d敞口和密封贮存的猪粪水pH非常接近,二者间无明显差异,但25 d后差距逐渐拉大,到试验结束时,敞口和密封贮存猪粪水pH分别为8.81和8.22,表明密封贮存可以降低猪粪水pH,这可能与密封条件下产生的二氧化碳大量溶于猪粪水有关,而这对减少氨挥发是有利的。根据《农田灌溉水质标准(GB 5084—2021)<sup>[21]</sup>》的要求,农田灌溉水pH为5.5~8.5,而猪粪水敞口贮存后高于该标准,但密封贮存后pH在标准范围内。

**2.1.2 猪粪水贮存过程中电导率的变化** 电导率可间接反映猪粪水中盐分的多少,电导率过高对猪粪水还田是不利的。试验过程中各处理猪粪水电导率的测定结果见图2。试验过程中各处理猪粪水电导率基本呈下降趋势,但秋季的下降速度和幅度均快于冬季,密封贮存的猪粪水电导率远高于敞口处理的。贮存温度对猪粪水贮存过程中电导率的变化有较大影响,秋季试验启动后,敞口贮存的电导率在短暂升高后快速下降,到试验60 d后缓慢增加,而密封贮存在试验启动后迅速增加,6 d后缓慢增加,25 d后达到最大值,之后缓慢降低,试验结束时敞口和密封贮存的电导率分别为4.48和6.11 mS/cm,二者间差异极显著( $P < 0.01$ );冬季试验启动后,敞口贮存的电导率在试验前25 d略有增加,之后逐渐降低,而密封贮存在试验启动后保持基本稳定略有上升,到120 d后逐渐下降,

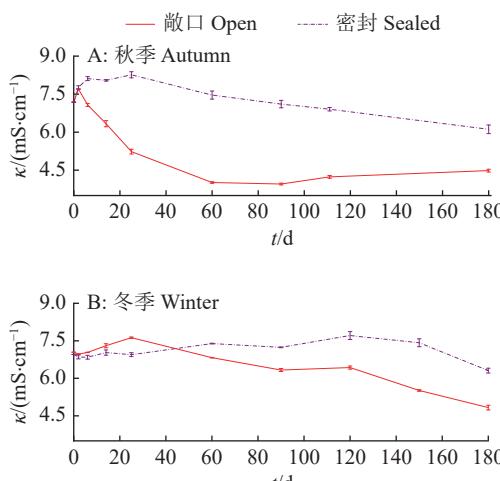


图2 试验过程中猪粪水电导率( $\kappa$ )的变化

Fig. 2 Change of electrical conductivity ( $\kappa$ ) of pig slurry during the experiment

试验结束时敞口和密封贮存猪粪水电导率分别为4.83和6.31 mS/cm,二者间差异极显著( $P < 0.01$ )。以上结果表明,贮存方式及贮存温度对猪粪水电导率变化均有较大影响,贮存温度和贮存方式均会影响电导率的下降速度,其本质是影响猪粪水中有害物质分解速度。

**2.1.3 猪粪水贮存过程中化学需氧量(COD)的变化** 猪粪水贮存过程中,有机物被微生物分解,其变化可间接反映猪粪水是否达到稳定化。试验过程中各处理的COD变化见图3。由图3可以看出,在试验过程中各处理猪粪水COD总体均为逐渐下降趋势;试验结束时,秋季敞口和密封贮存的猪粪水COD分别为645和765 mg/L,冬季敞口和密封贮存的猪粪水COD分别为7 683和6 816 mg/L,敞口与密封贮存对猪粪水COD无显著差异( $P > 0.05$ ),表明贮存方式对贮存过程中猪粪水有机物去除并无显著影响。但不同季节猪粪水COD存在较大差异,冬季的猪粪水COD明显高于秋季,这与冬季猪舍用水量较少有关,贮存后冬季猪粪水COD亦远高于秋季,这对贮存后的猪粪水还田有一定影响,即贮存后猪粪水还田时的稀释倍数不同。

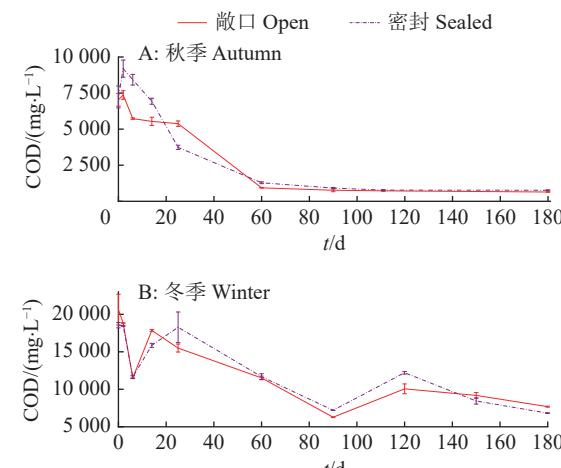


图3 试验过程中猪粪水化学需氧量(COD)的变化

Fig. 3 Change of chemical oxygen demand (COD) of pig slurry during the experiment

## 2.2 猪粪水贮存过程中氮素的转化及损失

**2.2.1  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量变化** 试验过程中猪粪水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量的变化见图4。由图4可以看出,各处理 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量的变化趋势总体相似,均为先增加后逐渐降低。秋季试验启动后,猪粪水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量快速增加,敞口和密封贮存分别在试验第6和25天 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量达到最高,之后逐渐下降,敞口贮存 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 下降速度明显高于密封贮存,到试验结束时,敞口和密封贮存 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度分别为

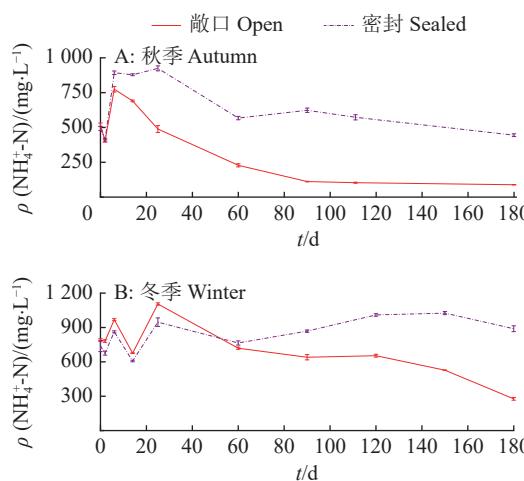
图 4 试验过程中猪粪水  $\text{NH}_4^+$ -N 含量的变化

Fig. 4 Change of ammonium N content of pig slurry during the experiment

88.77 和 444.62 mg/L, 较试验启动时分别下降了 82.90% 和 9.74%, 二者间差异极显著 ( $P < 0.01$ ); 在冬季试验启动后的前 60 d, 敞口贮存的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量始终高于密封贮存的, 但 60 d 后刚好相反, 这可能与该阶段气温逐步升高, 加之较高的 pH 导致氨挥发加剧有关。试验结束时, 敞口和密封贮存的  $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度分别为 277.09 和 889.28 mg/L, 较试验启动时分别下降了 64.88% 和 -20.42%, 二者间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。由此可以看出, 密封贮存对减少猪粪水贮存过程中氨挥发损失效果显著, 但贮存温度对猪粪水  $\text{NH}_4^+$ -N 含量变化也有一定影响, 气温升高加剧了氨挥发损失。

**2.2.2  $\text{NO}_3^-$ -N 含量变化** 试验过程中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的变化见图 5。由图 5 可以看出, 各处理  $\text{NO}_3^-$ -N 含量变化趋势相似, 总体均为逐渐下降趋势, 且

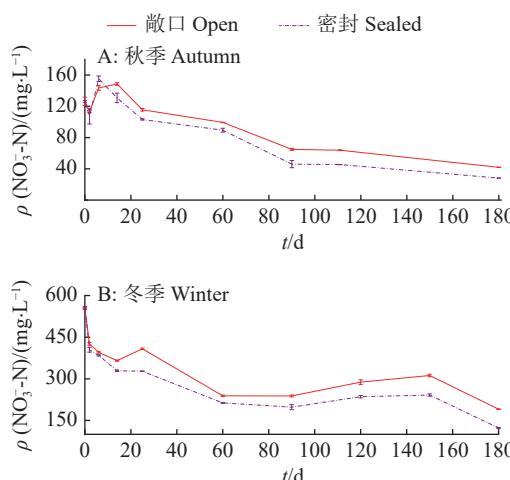
图 5 试验过程中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的变化

Fig. 5 Change of nitrate N content of pig slurry during the experiment

敞口贮存的  $\text{NO}_3^-$ -N 含量高于密封贮存的。试验结束时, 秋季敞口和密封贮存的  $\text{NO}_3^-$ -N 含量分别为 41.90、28.13 mg/L, 冬季敞口和密封贮存的  $\text{NO}_3^-$ -N 含量分别为 190.62、122.81 mg/L, 敞口贮存显著高于密封贮存 ( $P < 0.05$ ), 这可能是敞口条件下部分  $\text{NH}_4^+$ -N 在氧气存在下经硝化作用转化为  $\text{NO}_3^-$ -N, 减少了  $\text{NO}_3^-$ -N 的降低幅度, 但这方面的效果有限。

**2.2.3 总氮含量变化** 试验过程中猪粪水总氮含量的测定结果见图 6。由图 6 可以看出, 各处理总氮含量的变化趋势相似, 总体上均为逐渐降低的趋势, 但降低速度和幅度存在差别, 且试验结束时均为密封贮存的猪粪水总氮含量高于敞口贮存的。秋季试验启动后, 密封贮存的总氮含量始终高于敞口贮存, 敞口和密封贮存总氮质量浓度分别从试验开始时的 1 189.72 和 1 194.62 mg/L 降低为试验第 180 天的 139.52 和 585.15 mg/L, 降幅分别达 88.27% 和 51.02%; 冬季贮存试验启动后的前 60 d, 敞口和密封贮存的总氮含量间并无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但试验 60 d 后密封贮存的总氮含量始终高于敞口贮存, 敞口和密封贮存总氮质量浓度分别从试验开始时的 1 848.03 和 1 904.03 mg/L 降低为试验第 180 天的 722.62 和 1 160.14 mg/L, 降幅分别达 60.90% 和 39.07%。由此可以看出, 经 180 d 贮存后, 猪粪水总氮含量均大幅降低, 密封贮存显著减少了氮素损失, 冬季贮存较秋季贮存减少了氮素损失, 这可能与贮存温度有关, 建议采用地下池密封贮存的方式, 以减少猪粪水贮存中的氮素损失。

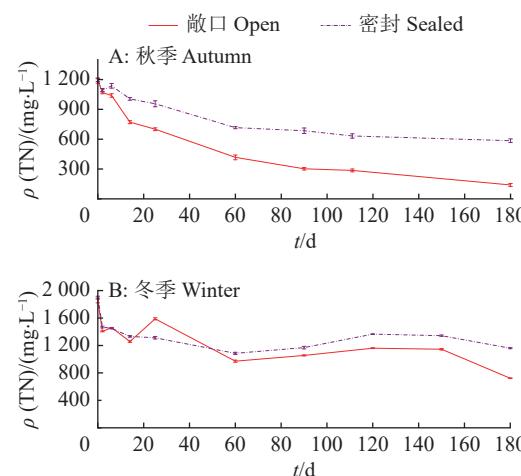


图 6 试验过程中总氮 (TN) 含量的变化

Fig. 6 Change of total nitrogen (TN) content of pig slurry during the experiment

将猪粪水贮存前后  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 占总氮的百分比和氮素损失率汇总见表 1。由表 1 可以看

表1 贮存前后猪粪水中氮素形态占比变化<sup>1)</sup>

Table 1 Changes of nitrogen form percentage in pig slurry obtained before and after storage

季节 Season	处理 Treatment	贮存前占比/%			贮存后占比/%			氮素损失率/% Nitrogen loss rate	
		Percentage before storage			Percentage after storage				
		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N		
秋季 Autumn	敞口 Open	43.64±1.50	10.62±0.57	54.26±1.29b	63.63±2.21	30.03±1.25	93.66±1.99a	79.44±2.19a	
	密封 Sealed	41.23±1.88	10.57±0.29	51.80±1.56b	75.98±2.91	4.81±0.28	80.79±2.10c	43.30±2.66c	
冬季 Winter	敞口 Open	42.70±2.05	30.05±1.34	72.75±1.82a	38.34±0.91	26.38±0.84	64.72±0.89d	52.60±2.91b	
	密封 Sealed	38.78±2.05	29.17±0.66	67.95±1.16a	76.65±0.95	10.59±0.44	87.24±0.85b	31.30±1.48d	
	密封 Sealed								

1) 表中数据为平均值±标准误, n=3; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ , Duncan's法)

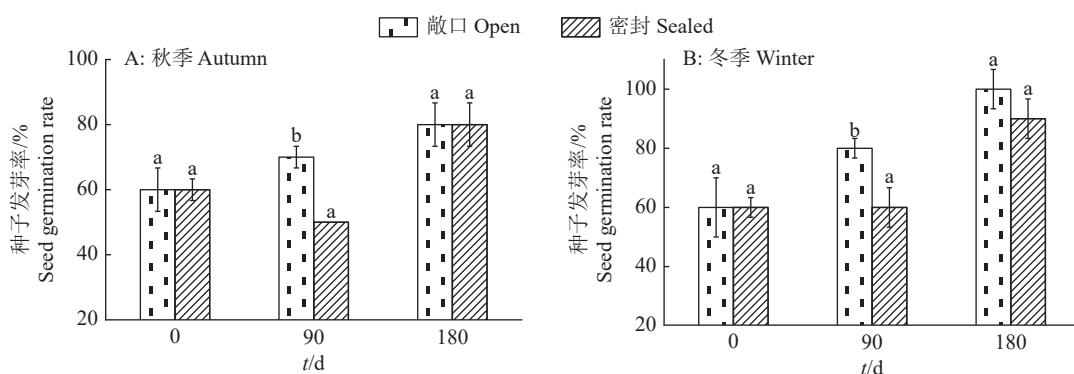
1) Data in table are means ±SE, n=3; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ , Duncan's method)

出, 经贮存后, 除冬季敞口贮存的处理外, 其他处理NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N占比均明显增加, 尤其是密封贮存的增加幅度最大, 表明密封贮存可以减少氨挥发损失; 密封贮存后的猪粪水中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N占比较贮存前明显降低, 而敞口贮存秋季为明显增加, 冬季为略有降低; 经180 d贮存后, 除冬季敞口贮存的处理外, 其他处理NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N之和占总氮的百分比均明显增加, 表明贮存提高了猪粪水中无机氮(速效态氮)的比例, 这对猪粪水作为叶面喷施肥还田是有利的。考虑到取样、水分蒸发(敞口贮存的处理在试验过程中水分蒸发损失明显)等影响, 将试验过程中取样带走的氮素考虑在内, 得到秋季敞口、密封和冬季敞口、密封贮存猪粪水总氮损失率分别为79.44%、43.30%和52.60%、31.30%, 密封贮存对减少氮素损失有显著效果, 秋季贮存的氮素损失率

均高于冬季。

### 2.3 贮存方式对猪粪水无害化效果的影响

2.3.1 对种子发芽率的影响 种子发芽率可作为评价猪粪水生物毒性的重要指标。试验过程中各处理种子发芽率见图7。由图7可以看出, 试验过程中猪粪水各处理的种子发芽率总体为随贮存时间增加而逐渐增加的趋势, 但贮存方式及贮存温度对种子发芽率有一定影响。在秋季, 敞口贮存的种子发芽率随贮存时间稳步增加, 从试验开始时的60%增加至180 d时的80%, 而密封处理在90 d时种子发芽率下降至50%, 到试验结束时增加至80%; 在冬季, 敞口猪粪水的种子发芽率稳步增加, 从试验开始时的60%增加至180 d时的100%, 而密封处理在90 d时种子发芽率仅为60%, 试验结束时增加至90%, 说明密封贮存过程中有机物厌氧分



各图中, 相同时间柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ , Duncan's法)

In each figure, different lowercase letters on the bars of the same time indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ , Duncan's method)

图7 猪粪水贮存过程对种子发芽率的影响

Fig. 7 Effect of storage process of pig slurry on seed germination rate

解可能产生一些对种子发芽有抑制作用的物质,但随着贮存时间延长这些物质被进一步分解,而敞口贮存不存在该问题。贮存后种子发芽率冬季优于秋季,这可能与冬季贮存后期气温升高促进了猪粪水中抑制性物质的分解有关。

**2.3.2 对重金属含量的影响** 猪饲料添加剂中的重金属大多随猪粪和尿液排出体外,其中很大部分进入猪粪水中。猪粪水还田时,其重金属含量需达到《农田灌溉水质标准(GB 5084—2021)》<sup>[2]</sup>的要求,或者经适当稀释后还田。本研究测定了猪粪水贮存过程中As、Zn、Cu、Pb和Cd的含量,结果见

**表2**。从表2可以看出,猪粪水中As和Pb含量较低,开始时其含量就低于《农田灌溉水质标准(GB 5084—2021)》要求;猪粪水中Cu、Zn和Cd含量较高,经180 d贮存后Cd含量以及冬季密封贮存的Cu含量达到《农田灌溉水质标准(GB 5084—2021)》要求,但Zn含量、秋季Cu含量以及冬季敞口贮存Cu含量仍高于《农田灌溉水质标准(GB 5084—2021)》要求。密封贮存可以降低猪粪水中Zn含量,但对其他重金属含量的影响无明显规律。冬季的猪粪水中Zn含量均显著高于秋季,秋季猪粪水中As和Cd含量略高于冬季。

**表2 猪粪水贮存过程中重金属含量变化<sup>1)</sup>**  
**Table 2 Changes of heavy metal contents during the storage process of pig slurry**

$\rho/(mg\cdot L^{-1})$

季节	处理	As				GB 5084— 2021	Zn				GB 5084— 2021	
		Season	Treatment	0 d	60 d		120 d	180 d	0 d	60 d		
秋季	敞开	0.05±0.00a	0.03±0.00ab	0.04±0.00a	0.04±0.00a	≤0.05	12.58±0.81c	6.68±0.25c	5.53±0.12c	3.28±0.16c	≤2.00	
	Autumn Open	0.03±0.00b	0.04±0.00a	0.04±0.00a	—		14.28±0.66b	4.58±0.08d	2.58±0.03d	2.53±0.11d		
	密封 Sealed	—	—	—	—		—	—	—	—		
冬季	敞开	0.03±0.00c	0.02±0.00c	0.02±0.00c	0.01±0.00c		52.93±4.47a	48.53±3.37a	16.83±1.01a	10.93±0.62a		
	Winter Open	0.03±0.00c	0.03±0.00b	0.03±0.00b	0.02±0.00b		48.63±2.90a	23.73±1.66b	8.93±0.34b	6.03±0.23b		
	密封 Sealed	—	—	—	—		—	—	—	—		
季节	处理	Cu				GB 5084— 2021	Pb				GB 5084— 2021	
		Season	Treatment	0 d	120 d		0 d	120 d	GB 5084— 2021	0 d		
秋季	敞开	2.76±0.19bc	2.01±0.02a	0.56±0.02c	≤0.50	≤0.50	0.11±0.01a	—	≤0.20	0.05±0.00	—	≤0.01
	Autumn Open	2.42±0.21c	1.93±0.13ab	0.63±0.01b	—	—	0.11±0.03a	—	—	0.04±0.00	—	—
	密封 Sealed	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
冬季	敞开	3.03±0.07b	1.68±0.11b	1.04±0.11a	—	—	0.08±0.00b	—	—	—	—	—
	Winter Open	3.61±0.16a	0.58±0.01c	0.39±0.01d	—	—	0.10±0.01 a	0.02±0.00	—	—	—	—
	密封 Sealed	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1)表中数据为平均值±标准误,  $n=3$ ; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ , Duncan's法); “—”表示未检测到

1) Data in table are means ±SE,  $n=3$ ; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ , Duncan's method); “—” indicates not detected

### 3 讨论与结论

#### 3.1 猪粪水敞口贮存条件下的氮素转化

猪粪水中的氮包括有机氮和无机氮,无机氮包括 $NH_4^+$ -N、 $NO_3^-$ -N和少量 $NO_2^-$ -N,以 $NH_4^+$ -N为主<sup>[11]</sup>。在猪粪水贮存过程中,有机氮在微生物作用下转化为 $NH_4^+$ -N,部分 $NH_4^+$ -N在碱性条件下以氨气的形式挥发损失,部分在有氧条件下经硝化微生

物作用转化为 $NO_3^-$ -N, $NO_3^-$ -N经反硝化作用转化为 $N_2$ 损失。在猪粪水敞口贮存时,同时满足氨挥发和硝化、反硝化的有氧、无氧条件,造成贮存过程中猪粪水氮素大量损失,降低了贮存后猪粪水的肥料价值,影响了农民对猪粪水还田的接受度,也增加了猪粪水还田工作的难度。在本研究中,猪粪水经180 d贮存后,冬季敞口贮存的氮素损失率为52.60%,略低于姜晨润等<sup>[10]</sup>研究结果,但秋季敞口贮存的氮素

损失率高达 79.44%, 远高于其结果, 这可能与贮存温度有关。猪粪水在敞口贮存 180 d 后, 秋季和冬季的  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  损失率分别为 82.90% 和 64.88%, 与丁京涛等<sup>[1]</sup>研究结果相当。猪粪水敞口贮存尽管具有操作简单方便、贮存成本低等优点, 但贮存过程中环境卫生条件差(臭气、蚊蝇等), 且造成氮素大量损失, 不利于猪粪水还田, 故建议该方式仅在少部分偏远地区的中小猪场应用。

### 3.2 密封对猪粪水贮存的影响

将猪粪水在密封条件下贮存, 类似于猪粪水常温沼气发酵, 不同点在于未人为加入甲烷菌, 故猪粪水密封贮存产生的甲烷量远低于同等条件下的沼气发酵, 且产气成分主要为  $\text{CO}_2$ 。密封隔绝了外界氧气进入, 猪粪水贮存过程中硝化作用被阻断, 加之原猪粪水中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量和比例均较低, 故密封贮存从源头避免了硝化、反硝化途径的氮素损失; 另外, 在密封容器中, 气体流动和扩散速度主要受猪粪水中有有机物分解产气速率的影响, 而敞口贮存条件下气体流动和扩散速度受敞口大小、风速、气压等多因素影响, 气体流动和扩散速度远高于密封贮存。从本试验结果看, 秋季和冬季密封贮存后猪粪水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量分别降低了 9.74% 和 -20.42%, 而对应的敞口贮存猪粪水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量分别降低了 82.90% 和 64.88%, 表明密封贮存对减少氨挥发损失有极显著的效果。但是, 密封贮存仅仅是减少氨挥发, 并不能阻断氨挥发过程, 故密封贮存后猪粪水氮素损失率仍高达 43.30%(秋季) 和 31.30%(冬季)。因此, 仅采用密封贮存方式并不能从根本上解决氨挥发问题, 需结合添加酸化剂或其他添加剂的方式协同作用, 提高保氮效果。

此外, 本试验中所有处理的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量均呈逐渐下降趋势, 这可能与猪粪水中化学需氧量较高, 不利于硝化作用进行, 而  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  部分被微生物利用, 部分经反硝化作用转化为  $\text{N}_2$  有关, 具体原因还需进一步研究。从种子发芽率的结果来看, 猪粪水密封贮存过程中可能产生了对种子发芽有抑制作用的物质, 但延长贮存时间可以缓解或解除这种抑制, 故与敞口贮存相比, 密封贮存需要的贮存时间需相应延长。

### 3.3 季节对猪粪水贮存的影响

猪粪水贮存的本质是利用微生物将猪粪水中的物质分解, 转化为低生物降解性、低生物毒性物质的生物化学过程。既然是微生物作用的生物化学过程, 温度就是重要的影响因素之一<sup>[22]</sup>。生猪养殖没有季节限制, 猪粪水每天产生, 不同时间产生的

猪粪水贮存时其物质转化、氮素损失等均受贮存温度影响。从本研究结果看, 秋季和冬季产生的猪粪水理化特性存在较大差别, 冬季的猪粪水化学需氧量及氮素和 Zn 含量均明显高于秋季, 这可能与冬季猪饮水量和猪舍冲洗用水量均大幅减少有关。冬季贮存的猪粪水电导率及总氮、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量降低速度均低于秋季贮存, 这与贮存初期冬季的温度远低于秋季有关。从氮素损失率来看, 贮存温度对氮素损失影响较大, 秋季和冬季敞口贮存的猪粪水氮素损失率分别为 79.44% 和 52.60%, 秋季明显高于冬季; 秋季和冬季密封贮存的猪粪水氮素损失率分别为 43.30% 和 31.30%, 秋季较冬季仍高出 12 个百分点。此外, 由于本试验贮存期长达 180 d, 1 个贮存周期横跨 2~3 个季节, 如 9 月份贮存的猪粪水到 3 月份才贮存结束, 贮存期内的外界环境温度波动较大, 造成不同季节同种指标间的规律性不强, 如冬季贮存猪粪水种子发芽率上升速度快于秋季贮存, 但化学需氧量降低速度却相反。

综上所述, 在经济条件允许的情况下, 鼓励猪场进行猪粪水密封贮存; 在经济条件较差地区, 可通过增加贮存设施的深度、提高贮存猪粪水厌氧部分的比例、尽可能降低贮存温度的方式来减少贮存过程中的氮素损失。

### 3.4 结论

猪粪水直接贮存 180 d 后, 种子发芽率达到 80% 以上, 重金属除 Cu 和 Zn 外, As、Pb 和 Cd 含量均达到《农田灌溉水质标准 (GB 5084—2021)》<sup>[21]</sup>要求, 但氮素损失严重, 秋季和冬季敞口贮存后猪粪水氮素损失率分别为 79.44% 和 52.60%。

与敞口贮存相比, 密封贮存降低了猪粪水 pH, 显著减少了贮存过程中的氮素损失, 秋季和冬季贮存后猪粪水氮素损失率分别减少 36.14 和 21.30 个百分点, 但贮存后猪粪水电导率明显高于敞口贮存, 种子发芽率略低。

贮存季节(温度)对猪粪水贮存过程中物质转化速度有较大影响, 秋季贮存猪粪水中化学需氧量及总氮、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  降低速度均高于冬季。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴: 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 徐鹏翔, 沈玉君, 丁京涛, 等. 规模化养猪场粪污全量收集及贮存工艺设计[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 255-262.
- [3] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见: 国办发〔2017〕48号 [A/OL]. (2017-05-12)[2021-08-13]. <https://huanbao.bjx.com.cn>.

- com.cn/news/20170613/830752.shtml.
- [4] 农业部. 农业部关于印发《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)》的通知[A/OL]. (2017-07-07) [2021-08-13]. [http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dbq/201801/t20180103\\_6134011.htm](http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dbq/201801/t20180103_6134011.htm).
- [5] 全国畜牧总站,中国饲料工业协会,国家畜禽养殖废弃物资源化利用科技创新联盟. 畜禽养殖废弃物资源化利用主推技术模式[N]. 农民日报, 2017-12-6(6).
- [6] 孔凡克, 鞠鑫鑫, 杨守军, 等. 种养结合技术在畜禽粪水处理与资源化利用中的应用[J]. 猪业科学, 2017, 34(8): 106-107.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] MANSYUR M, CHOI H L. Changes of physico-chemical properties of pig slurry during storage[J]. Media Peternakan, 2011, 34(3): 179-183.
- [10] 姜晨润, 孙靖博, 李华, 等. 规模化养猪场粪便贮存方式及土壤承载力[J]. 农业工程, 2019, 9(1): 35-37.
- [11] 丁京涛, 张朋月, 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.
- [12] 朱海生, 董红敏, 栾冬梅, 等. 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势的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 937-943.
- [13] XUE S K, CHEN S, HERMANSON R E. Wheat straw cover for reducing ammonia and hydrogen sulfide emissions from dairy manure storage[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(4): 1095-1102.
- [14] VANDERZAAG A C, GORDON R J, GLASS V M, et al. Floating covers to reduce gas emissions from liquid manure storages: A review[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(5): 657-671.
- [15] PAIN B F, MISSELBROOK T H, REES Y J. Effects of nitrification inhibitor and acid addition to cattle slurry on nitrogen losses and herbage yields[J]. Grass and Forage Science, 1994, 49(2): 209-215.
- [16] SIMS J T, LUCA-MCCAFFERTY N J. On-farm evaluation of aluminum sulfate (alum) as a poultry litter amendment: Effect on litter properties[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(6): 2066-2073.
- [17] SØRENSEN P, ERIKSEN J. Effects of slurry acidification with sulphuric acid combined with aeration on the turnover and plant availability of nitrogen[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 131(3/4): 240-246.
- [18] PEREIRA J L S, FIGUEIREDO V, PINTO A F M A P, et al. Effects of biochar and clinoptilolite on composition and gaseous emissions during the storage of separated liquid fraction of pig slurry[J/OL]. Applied Sciences, 2020, 10(16): 5652. [2021-09-20]. <https://doi.org/10.3390/app10165652>
- [19] 刘美玲. 生物炭与菌剂对猪粪氨气、甲烷和氧化亚氮排放的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
- [20] 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.
- [21] 生态环境部. 国家市场监督管理总局. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 生态环境部, 2021.
- [22] POPOVIC O, JENSEN L S. Storage temperature affects distribution of carbon, VFA, ammonia, phosphorus, copper and zinc in raw pig slurry and its separated liquid fraction[J]. Water Research, 2012, 46(12): 3849-3858.

【责任编辑 李晓卉】