农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

乳酸菌对沼液贮存过程气体排放的影响及应用

刘玉洁, 赵会成, 李梅华, 张琳琦

引用本文:
刘玉洁, 赵会成, 李梅华, 等. 乳酸菌对沼液贮存过程气体排放的影响及应用[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3262-3269.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0028

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

双氰胺减少铵态氮肥施用后潮土N_2O排放的机制

马兰, 李晓波, 马舒坦

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2801-2808 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0459

添加生物炭对海南燥红壤N_2O和CO_2排放的影响

刘丽君, 朱启林, 李凯凯, 李淼, 孟磊, 伍延正, 汤水荣, 何秋香

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2049-2056 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0187

水氮耦合对设施土壤N_2O和NO排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366-1376 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘玉洁, 赵会成, 李梅华, 等. 乳酸菌对沼液贮存过程气体排放的影响及应用[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3262-3269.
LIU Y J, ZHAO H C, LI M H, et al. The impact of lactic acid bacteria on gas emissions during the storage of slurry and applications[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3262-3269.

开放科学OSID

乳酸菌对沼液贮存过程气体排放的影响及应用

刘玉洁[1,2], 赵会成[1], 李梅华[1,2], 张琳琦[1*]

(1.中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心农业水资源重点实验室, 石家庄 050022; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘　要:本研究探究了添加乳酸菌剂对沼液贮存过程中NH_3、CO_2和N_2O排放的影响,并评估了处理后沼液的资源化利用潜力。试验设置乳酸菌剂处理沼液组(FS,添加乳酸菌剂后密封贮存)和新鲜沼液对照组(FD,仅密封贮存),比较了两组在11 d贮存期内NH_3、CO_2和N_2O的排放特征。贮存结束后,将两组沼液进行资源化利用(分别记为FSP和FDP),并分析其对玉米生长指标的影响。结果表明:FS组NH_3减排效果显著,其11 d贮存期内NH_3累积排放量为2.5 g·L^{-1},较FD组(3.4 g·L^{-1})降低26.5%,其中NH_3日减排率最高可达35%(P<0.05)。两组CO_2和N_2O排放通量无显著差异,且N_2O排放通量极低,可忽略不计。贮存末期,FS组pH值下降0.81个pH单位,而氨氮含量增加23.9%,表明pH值下降是NH_3减排的主要原因。此外,FSP组玉米的生长指标显著优于FDP组,其中根长、株高、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量和总鲜质量分别提高36.5%、25.7%、59.0%、22.4%、68.4%和45.6%(P<0.05)。研究表明,乳酸菌剂处理沼液在贮存过程中具有显著的NH_3减排效果,且不会增加温室气体排放,同时能促进作物生长。该方法具有安全性高、成本低、环境友好等优势,具有良好的应用前景。

关键词:沼液;氨气;减排;乳酸菌剂;玉米

中图分类号:S216.4　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2025)12-3262-08　　doi:10.11654/jaes.2025-0028

The impact of lactic acid bacteria on gas emissions during the storage of slurry and applications

LIU Yujie[1,2], ZHAO Huicheng[1], LI Meihua[1,2], ZHANG Linqi[1*]

(1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study investigated the effects of lactic acid bacteria (LAB) addition on NH_3, CO_2, and N_2O emissions during slurry storage and evaluated the resource utilization potential of the treated slurry. The experiment included two groups: a LAB-treated slurry group (FS, sealed storage after LAB addition) and a fresh slurry control group (FD, sealed storage only). The emission characteristics of NH_3, CO_2, and N_2O were compared over an 11-day storage period. After storage, both slurries were used as fertilizers (denoted as FSP and FDP, respectively), and their effects on maize growth parameters (root length, plant height, total fresh weight, aboveground fresh weight, underground fresh weight, aboveground dry weight, underground dry weight, and root-to-shoot ratio) were analyzed. The results showed that the FS group achieved significant NH_3 reduction, with a cumulative emission of 2.5 g·L^{-1} over 11 days, representing a 26.5% reduction compared to the FD group (3.4 g·L^{-1}). The maximum daily NH_3 reduction rate reached 35% (P<0.05). No significant differences were observed in CO_2 and N_2O emissions between the two groups, and N_2O emissions were negligible. By the end of storage, the pH of the FS group decreased by 0.81 pH unit, while the total ammonia nitrogen content increased by 23.9%, indicating that pH reduction was the primary cause of NH_3 mitigation. Furthermore, maize growth in the FSP group was significantly better than in the FDP group, with increases

收稿日期:2025-01-09　　**录用日期:**2025-04-24
作者简介:刘玉洁(2001—),女,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为微生物生态学。E-mail:13296438913@163.com
***通信作者:**张琳琦　E-mail:lqzhang@ms.sjziam.ac.cn
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2023YFC3707405)
Project supported: National Key Research and Development Program of China(2023YFC3707405)

of 36.5% in root length, 25.7% in plant height, 59.0% in aboveground fresh weight, 22.4% in underground fresh weight, 68.4% in aboveground dry weight, and 45.6% in total fresh weight ($P<0.05$). In conclusion, LAB treatment of slurry significantly reduces NH_3 emissions during storage without increasing greenhouse gas emissions and promotes crop growth. This method offers advantages such as high safety, low cost, and environmental friendliness, demonstrating strong potential for practical application.

Keywords: animal slurry; ammonia; mitigation; lactic acid bacteria; maize

沼液作为沼气工程厌氧消化后的主要液相产物[1]，富含氮、磷、钾等植物所需的营养元素，是一种具有较高利用价值的有机资源。在农业生产中，沼液已广泛应用于土壤改良[2]、病虫害防治[3]等领域，并展现出良好的生态效益。然而，受限于较高的运输成本、季节性还田约束以及贮存过程中氨挥发损失等问题[4]，大量沼液未能得到及时有效的资源化利用，这不仅造成了资源浪费，还可能对环境造成潜在污染风险。沼液在贮存过程中，大约25%~35%的氮素会以氨气（NH_3）的形式损失[5-6]，损失的NH_3在大气中参与化学反应会形成$PM_{2.5}$的一些关键前体物质[7]，如硫酸铵等。此外，在沼液贮存期间会由于有机物的分解作用而产生N_2O和CO_2这两种温室气体[8]。因此，降低沼液贮存期间的NH_3和温室气体排放具有重要意义。

目前，减少沼液贮存阶段气体排放的主要方法有覆盖、酸化等。覆盖即使用园林废物、玉米秸秆、锯末、油及蛭石等覆盖沼液的方法降低在贮存过程中的NH_3排放[9-11]。改性蛭石覆盖技术在84 d的贮存期内达到64%的NH_3减排效率[12]，但成本相对较高。酸化即在沼液中加入浓硫酸、氯化铁、醋酸、磷酸等化学酸化剂，降低沼液的pH以减少NH_3的排放[13-14]。目前工业上常用的酸化剂是硫酸，硫酸酸化沼液可实现NH_3减排80%以上，但是硫酸使用过程中伴随着高硫输入、腐蚀性，且会形成硫化氢和气溶胶颗粒，对动物、农民和环境健康有一定危害[15]。

微生物菌剂作为一种高效能、低成本、生态环保的新型农用产品，在减少沼液臭气排放方面得到了广泛的应用。常用的除臭菌剂大多采用乳酸菌、木霉、酵母菌等菌种[16]。Liu等[17]构建了乳酸菌的合成菌群，通过多次添加葡萄糖实现对畜禽粪便的持续酸化，减少了95.5% NH_3排放。但是目前大多关于微生物菌剂酸化沼液的研究只关注了NH_3排放，对N_2O排放的研究较少。

将处理过的沼液进行资源化利用是沼液贮存的最终目的，我国对于沼液的主要利用途径之一是还田。目前关于沼液在农田中应用的研究主要集中在其对作物生长、土壤养分、温室气体排放及土壤生化过程的影响等方面[18-19]。大多数研究表明，适量施用沼液能够提高土壤氮磷等养分含量、改善土壤理化性质，从而提高作物产量[20]。Du等[21]的研究发现，在农田中长期施加沼液，能够有效提高土壤全氮和有机质含量，进而显著促进作物生长，作物产量增加了15.46%~23.47%。陈理等[22]通过Meta分析的方法分析了沼液对作物产量的影响，发现我国东北地区、华北地区、西北地区和南方地区施用沼肥后作物产量均有提高，约增产5.6%~19.7%。氮是植物生长的重要元素[23]，基于沼液应用于农业生产时所起的作用，在沼液贮存期间减排的同时，保氮是非常重要的。

本研究拟采用高效产乳酸的乳酸菌 *Weissella viridescens* WJ39制作乳酸菌剂，将菌剂接入沼液中，一方面乳酸菌可以产生乳酸降低沼液的pH，减少沼液在贮存过程中的NH_3排放；另一方面探究接种菌剂对N_2O和CO_2排放的影响。最后，将贮存后的沼液作为肥料应用于玉米种植，探究乳酸菌剂处理后沼液对玉米生长的影响。

1 材料与方法

1.1 沼液

本试验所用的沼液来自河北省张家口市某奶牛场，新鲜沼液的化学需氧量（COD）为20 600 mg·L^{-1}，总氮（TN）含量为2 150 mg·L^{-1}，总氨氮（TAN）含量为1 767.5 mg·L^{-1}，挥发性固体（VS）含量为1.4%，总固体（TS）含量为2.5%。

1.2 乳酸菌菌剂制备

试验中所用的沸石来自邢台经济开发区，已过100目筛。试验中所用菌株为团队前期在食物废弃物中分离的乳酸菌菌株 *Weissella viridescens* WJ39，乳酸产量高达17.56 g·L^{-1}·d^{-1}[24]。在装有2.5 L MRS液体培养基的5 L锥形瓶内，接入2 mL OD_{600}为0.5的菌株，然后置于28 ℃、180 r·min^{-1}的恒温摇床中培养。当菌液的OD_{600}值达到1时结束培养，获得WJ39菌液，随后将菌液与沸石按照4∶1的比例混匀，置于恒温摇床28 ℃、180 r·min^{-1}培养4 h，培养结束后所得混合液即为乳酸菌菌剂。

1.3 气体减排试验

本试验设置了两个试验组，分别为新鲜沼液（FD）和加乳酸菌剂的新鲜沼液（FS），每个试验组设置了4个重复。试验所用的贮存盒长0.25 m、宽0.20 m、高0.15 m，实际容积为7.5 L。在试验中，每个贮存盒盛放1.5 L新鲜沼液。在FS试验组中添加2%（*m*/*m*）的乳酸菌剂。贮存试验共用到8个贮存盒。在试验过程中用动态箱法监测沼液贮存过程中的气体排放。为了及时将沼液表面产生的NH_3等气体从出气口排出，将空气压缩泵与贮存盒进气口连接起来，将室内空气通入动态箱。其中，空气压缩泵的通气速率维持在6 L·min^{-1}左右。试验系统见图1。试验时间为2024年7月30日—8月10日，存储时长11 d，试验期间平均气温（32.0±1.5）℃。

1.4 样品的采集与分析

1.4.1 NH_3的采集与分析

在贮存过程中采用硼酸吸收法监测NH_3的产生速率，在洗气瓶中盛放50 mL指示剂为甲基红/溴甲酚绿的2%硼酸溶液，利用空气压缩泵使动态箱中沼液表面产生的NH_3随气流通过洗气瓶并被吸收液吸收，期间记录洗气瓶内吸收液由红色变为蓝色所需要的时间，收集吸收液后使用0.02 mol·L^{-1}的稀硫酸将溶液由蓝色滴定为红色并记录滴定期间所需的稀硫酸体积。最后计算得到沼液NH_3日排放通量（公式1）和NH_3累积挥发量（公式2）：

$$F_{NH_3}=V\times10^{-3}\times c\times M\times t/1.5 \quad (1)$$

式中：F_{NH_3}为NH_3日排放通量，g·L^{-1}·d^{-1}；10^{-3}为mL换算为L的转换系数；V表示滴定时所需要的稀硫酸体积，mL；c表示滴定时所需要的稀硫酸浓度，0.02 mol·L^{-1}；M表示氮原子的原子质量，14 g·mol^{-1}；t表示NH_3吸收时间，d；1.5为沼液体积，L。

NH_3累积挥发量计算公式如下：

$$E_{NH_3}=F_1+F_2+F_3+\cdots+F_i \quad (2)$$

式中：E_{NH_3}表示NH_3的累积挥发量，g·L^{-1}；F_i为第i天的NH_3日排放通量，g·L^{-1}·d^{-1}。

1.4.2 N_2O和CO_2的采集与分析

在试验开始前5 d，由于沼液内有机物质丰富，内部反应剧烈，每天9:00—9:30、13:00—13:30、17:00—17:30 3个时间段采集气体样品，检测后取气体数值平均值。第5天后，由于沼液内部的化学反应已经相对稳定，每隔2 d在箱体采集样品。在每次采集气样之前，先采集箱外周围环境的大气样品作为本底样本，每隔10 min通过箱体三通阀采集气体样品，每次取样每箱取4次气样，并且在取样结束后立即转移至

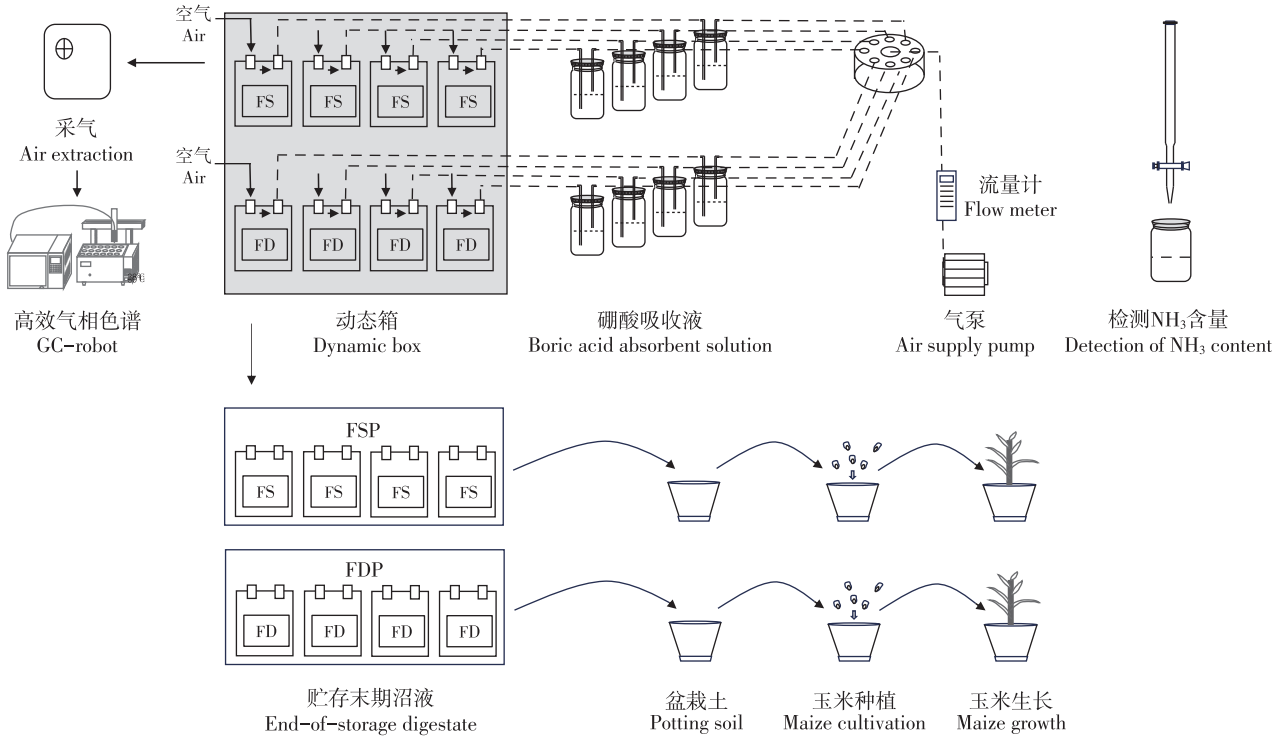


图1 试验系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of the experimental system

已抽真空的气袋。样品及时运回实验室，通过自动采样装置和蠕动泵（Gilson Minipuls 3，leBel，法国）传到气相色谱仪（GC，Agilent 7890B），测定铝箔采气袋中的N_2O、CO_2的浓度。

气体排放通量计算方法见公式（3）：

$$F=dc/dt\times M/V_0\times 273/(273+T)\times P/P_0/V_1\times 10^3 \quad (3)$$

式中：F为排放通量，$mg\cdot L^{-1}\cdot d^{-1}$；$dc/dt$为贮存盒内目标气体浓度随时间的变化率；其中$M$是待测气体的相对分子质量，$N_2O$是44 $g\cdot mol^{-1}$，CO_2是44 $g\cdot mol^{-1}$；V_0是理想气体的体积，22.41 $g\cdot mol^{-1}$；V_1为贮存盒内沼液体积，L；T是贮存盒内平均温度，℃；P是采样点的气压，Pa；P_0是标准大气压，Pa；10^3为g转换为mg的转换系数。

1.4.3 沼液样品的采集与分析

采集贮存试验初始阶段的新鲜沼液样品及试验结束后的沼液样品。测定各沼液样品的COD、VS、TS、TN、TAN含量。试验过程中，每天用便携式pH计（PHS-3C，INESA，上海）测定沼液的pH。COD、TAN和TN含量采用Hach试剂盒结合DRB200消解仪（美国Hach公司）进行测试。根据HACH测试操作指导手册，COD采用消解法（HACH Method 8000，20~1 500 $mg\cdot L^{-1}$）测定；TN含量采用过硫酸盐消解法（HACH Method 10072，2~150 $mg\cdot L^{-1}$）测定；TAN含量采用水杨酸法（HACH Method 10031，0.4~50 $mg\cdot L^{-1}$）测定；TS和VS采用恒质量的方法测定，所用仪器为马弗炉、烘箱等[12]。

1.5 盆栽试验设计

试验土壤为河北省张家口市塞北管理区的长期施加沼液的农田土壤，土样过2 mm筛后分装于8 cm×8 cm×8 cm的盆中，用无菌蒸馏水将土壤浇透后种植玉米。玉米种子选择“安早10”品种，种子需完整且无病害。随后将筛选出的玉米种子在75%乙醇中浸泡3 min，接着转移到5%（V/V）次氯酸钠溶液中浸泡3 min，最后用无菌蒸馏水将玉米种子冲洗3次后完成种子的表面消毒灭菌。将灭菌后的种子置于无菌培养皿中，使玉米种子完全浸泡在无菌蒸馏水中，使其打破休眠状态。分别将静置11 d的沼液（FD）和经加乳酸菌剂处理过11 d的沼液（FS）各50 mL浇灌至盆中，两个处理分别记为FDP和FSP，随后将10颗玉米种子均匀种植在盆中，待出苗较整齐后进行间苗。各处理每3 d浇一次水，以确保玉米的正常生长。培养20 d后，测量及分析各试验组玉米的根长、株高、总鲜质量、地下部鲜质量与地上部鲜质量，在对玉米杀青和烘干处理后，测量植物的地下部干质量和地上部干质量，并据此计算植株根冠比。

2 结果与讨论

2.1 添加乳酸菌剂对沼液理化特性的影响

沼液的理化特性是影响其在贮存过程中气体排放的关键因素。试验组试验前后的各项指标变化见表1。

沼液的pH是影响沼液NH_3排放的关键因素[25]。FD试验组贮存末期沼液pH为8.74，FS试验组贮存末期沼液pH为7.93（表1），较FD试验组下降了0.81个pH单位。贮存前4 d，FS试验组贮存末期的pH相较于贮存初期显著降低（图2），且显著低于FD试验组（$P<0.05$），产生这种现象的原因可能是由于乳酸菌可以产生乳酸，进而降低了沼液整体的pH[17]。在贮存4 d后，FS试验组的pH开始缓慢上升。这种pH的变化情况与之前研究中沼液pH变化的规律相符[26]。从化学平衡的角度来看，沼液中存在以下反应：$CO_3^{2-}+H^+\rightleftharpoons HCO_3^-$，$HCO_3^-+H^+\rightleftharpoons CO_2(aq)+H_2O$，$CO_2(aq)\rightleftharpoons CO_2(g)$，说明在贮存过程中，由于$CO_2$的释放，上述反应向正向进行，导致沼液中的$H^+$浓度降低，进而使pH逐渐升高[27]。

COD能够反映沼液中的可溶性有机物的含量，是评估沼液中有机污染物含量的一个重要指标。FD试验组贮存末期沼液COD浓度为30 250 $mg\cdot L^{-1}$，FS试验组贮存末期沼液COD浓度为23 600 $mg\cdot L^{-1}$（表1），较FD试验组降低了22.0%。贮存结束后，FS试验组贮存末期的COD含量相较于贮存初期显著降低，且显著低于FD试验组（$P<0.05$）。与贮存初期相比，FD中COD降解率只有4.4%，而FS试验组的COD降解率达到25.4%。这种现象的出现可归因于酸化作用对沼液化学性质的多方面影响。酸化过程改变了沼液中无机成分的组成、颗粒物的粒径大小以及溶解性物质的含量[28-29]。此外，酸化还促进了沼液中难溶性有机物向可溶性有机物的转化。由于可溶性有机物更易于被微生物分解利用，这可能会进一步导致FS试验组中COD的降低[30]。

TAN对于沼液NH_3的排放有重要的影响。FD试验组贮存末期沼液TAN浓度为1 100 $mg\cdot L^{-1}$，FS试验组贮存末期沼液TAN浓度为1 363 $mg\cdot L^{-1}$（表1）。贮存结束后，FS试验组的TAN浓度相较于贮存初期显著降低（$P<0.05$），且显著高于FD试验组（$P<0.05$），增加了23.9%。与贮存试验初期相比，FD试验组中TAN含量降低27.1%，而FS试验组的TAN含量降低

了9.6%。这可能是由于乳酸菌WJ39在培养过程中降低了沼液的pH，随着NH_3挥发的发生，沼液TAN含量降低[14]。

表1 不同处理下沼液贮存初期和末期的理化特性

Table 1 Water quality indicators at the beginning and end of biogas slurry storage in FS treatment and FD treatment

类别	贮存初期	贮存末期	
		FD	FS
化学需氧量COD/(mg·L⁻¹)	31 650±354a	30 250±1 626a	23 600±283b
总氮TN/(mg·L⁻¹)	2 825±106a	1 850±71b	2 025±35b
总氨氮TAN/(mg·L⁻¹)	1 508±46a	1 100±4c	1 363±3.53b
总固体TS/%	3.83±0.07c	5.33±0.09b	8.04±0.06a
挥发性固体VS/%	2.42±0.07a	2.46±0.06a	2.40±0.01a
pH	8.80±0.06a	8.74±0.02a	7.93±0.06b

注：不同小写字母表示处理之间差异显著（$P<0.05$）。

Note: Different lowercase letters indicate significance differences among treatments at 0.05 level.

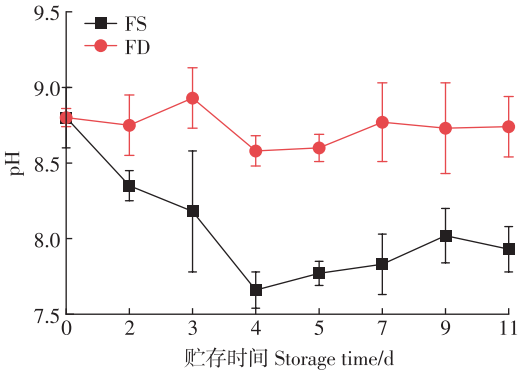


图2 沼液贮存过程中pH的变化

Figure 2 Changes of pH value during biogas storage process

2.2 添加乳酸菌剂对沼液气体排放特征的影响

2.2.1 NH_3排放

在11 d的沼液贮存过程中，FD的NH_3排放通量在第2天达到1 115.0 mg·L⁻¹·d⁻¹的峰值（图3a），第11天降至49.8 mg·L⁻¹·d⁻¹，NH_3累积排放量为3.4 g·L⁻¹（图3b）；FS的排放通量在第2天达到800.0 mg·L⁻¹·d⁻¹的峰值，第11天降至59.9 mg·L⁻¹·d⁻¹，NH_3累积排放量为2.5 g·L⁻¹。Zilio等[31]研究中的NH_3排放规律表明，由于NH_3排放通量和TAN浓度呈现显著正相关性，故贮存前3 d NH_3的排放量较大。FS组相较于FD组累积排放量减少26.2%。第1天FS组的NH_3减排率达到35%以上（图3c），并持续为正，直到第9天。这可能是由于FS试验组的pH相较于FD试验组低，H^+浓度的增加使NH_3的产生减少[32]，这可以有效地维持沼液中的TAN含量，进而减少在沼液贮存过程中的氮损失。Liu等[17]通过在沼液中接种不同比例（1∶2、1∶1、2∶1）的乳酸菌合成菌群，发现可以降低9.0%~55.3%的NH_3排放。

2.2.2 CO_2排放

添加乳酸菌剂的FS组CO_2排放通量在前4 d高于FD组（图4a），产生这样的情况可能是由于在沼液中存在高浓度的CO_3^{2-}/HCO_3^{2-}[14]，这是一种缓冲物质，其与H^+结合可产生大量的CO_2，FS试验组CO_2最高排放通量达到295.4 mg·L⁻¹·d⁻¹。随着贮存时间的延长，沼液CO_2的排放通量逐渐趋于平缓，FD试验组高于FS试验组。贮存结束后，FD试验组和FS试验组的CO_2

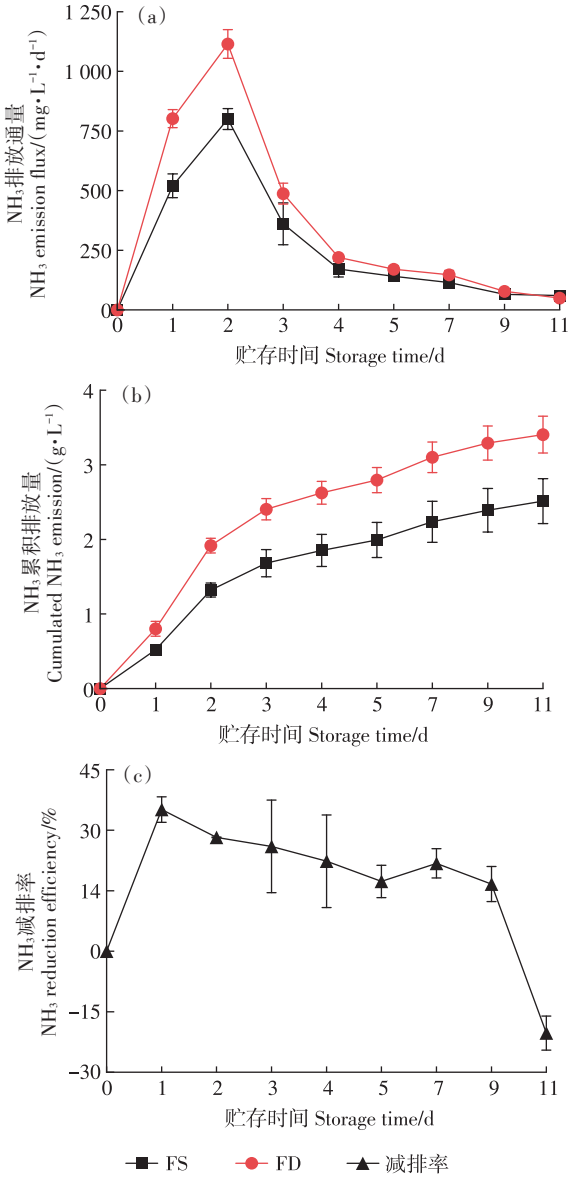


图3 不同处理对沼液NH_3排放的影响

Figure 3 Effects of different treatments on NH_3 emissions from biogas

累积排放量分别为2.0 g·L^{-1}和1.9 g·L^{-1}，差异不显著（P>0.05）。

2.2.3 N_2O排放

两个试验组N_2O的排放通量均很低（图4b），且无差异，这可能是由于两个试验组的沼液pH均为碱性，有文献报道pH为8左右的沼液连续贮存75 d内基本不会产生N_2O[14]。这是由于在碱性条件下，N_2O还原酶的活性相较于酸性条件更强，N_2O排放通量也更低[33-34]。

2.3 沼液对玉米生长的影响

如图5所示，测定了FSP及FDP试验组玉米苗期的8个性状指标。与FDP试验组相比，FSP试验组根长、株高、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量和总鲜质量均显著增加（P<0.05）。分别上升36.5%、25.7%、59.0%、22.4%、68.4%和45.6%。以上结果表明，施加乳酸菌剂的沼液在贮存11 d后对玉米生长具有较强的促进作用。造成这种现象的原因一方面可能是由于FSP试验组TAN含量较高，氨氮是植物生长最需要的无机氮之一，在植物生长中容易被吸收利用[35]；另一方面可能是由于乳酸菌的促生作用，有研究发现乳酸菌通过生产细菌素、有机酸和其他化合物，可在植物生产中充当生物肥料、生物防治和生物刺激剂，促进植物生长[36]。

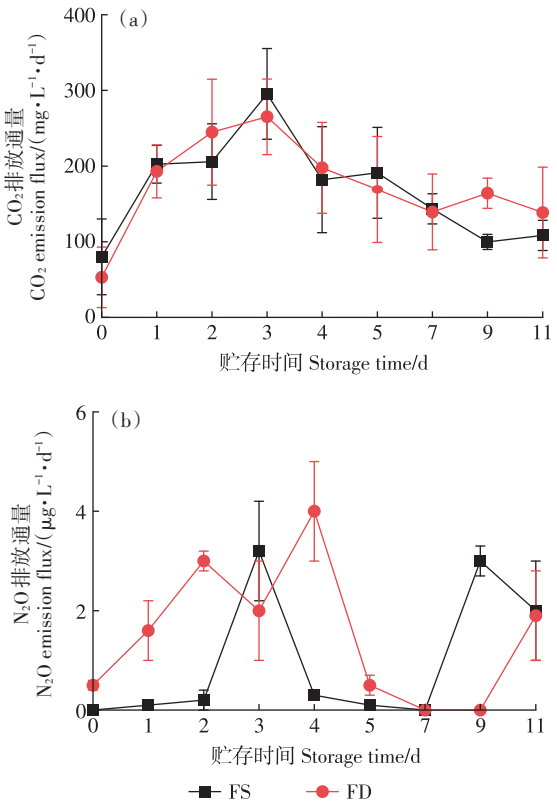


图4 贮存过程中CO_2和N_2O排放通量

Figure 4 Emission fluxes of CO_2 and N_2O during storage

3 结论

（1）接种乳酸菌剂可以显著降低沼液贮存过程中26.2%的NH_3累积排放量，但不影响贮存过程中CO_2的排放，且基本无N_2O排放。

（2）接种乳酸菌剂可以增加沼液中23.9%的TAN含量、降低沼液中22.0%的COD含量。

（3）将乳酸菌剂处理过的沼液作为肥料种植玉米，显著提高了玉米植物的株高（25.7%）、根长（36.5%）、地上部鲜质量（59.0%）、地下部鲜质量（22.4%）、总鲜质量（45.6%）和地上部干质量（68.4%）。

参考文献：

[1] 曹汝坤，陈灏，赵玉柱. 沼液资源化利用现状与新技术展望[J]. 中国沼气，2015，33（2）：42－50. CAO R K, CHEN H, ZHAO Y Z. Resource utilization of biogas slurry：current status and future prospects [J]. *China Biogas*, 2015, 33(2)：42-50.

[2] 石吕，刘建，魏亚凤，等. 沼液在农业领域的资源化利用现状[J]. 中国农学通报，2019，35（35）：109-117. SHI L, LIU J, WEI Y F, et al. Current status of resource utilization of biogas slurry in agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(35)：109-117.

[3] 曾永新，鲁志文，何莉，等. 沼液+农药组合对元胡产量和病害的影响[J]. 浙江农业科学，2020，61（2）：286-287. ZENG Y X, LU Z W, HE L, et al. Effects of composition of biogas slurry and pesticide on yield and diseases of *Corydalis turtschaninovii*[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(2)：286-287.

[4] O'SHEA R, LIN R C, WALL D M, et al. A comparison of digestate management options at a large anaerobic digestion plant[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317：115312.

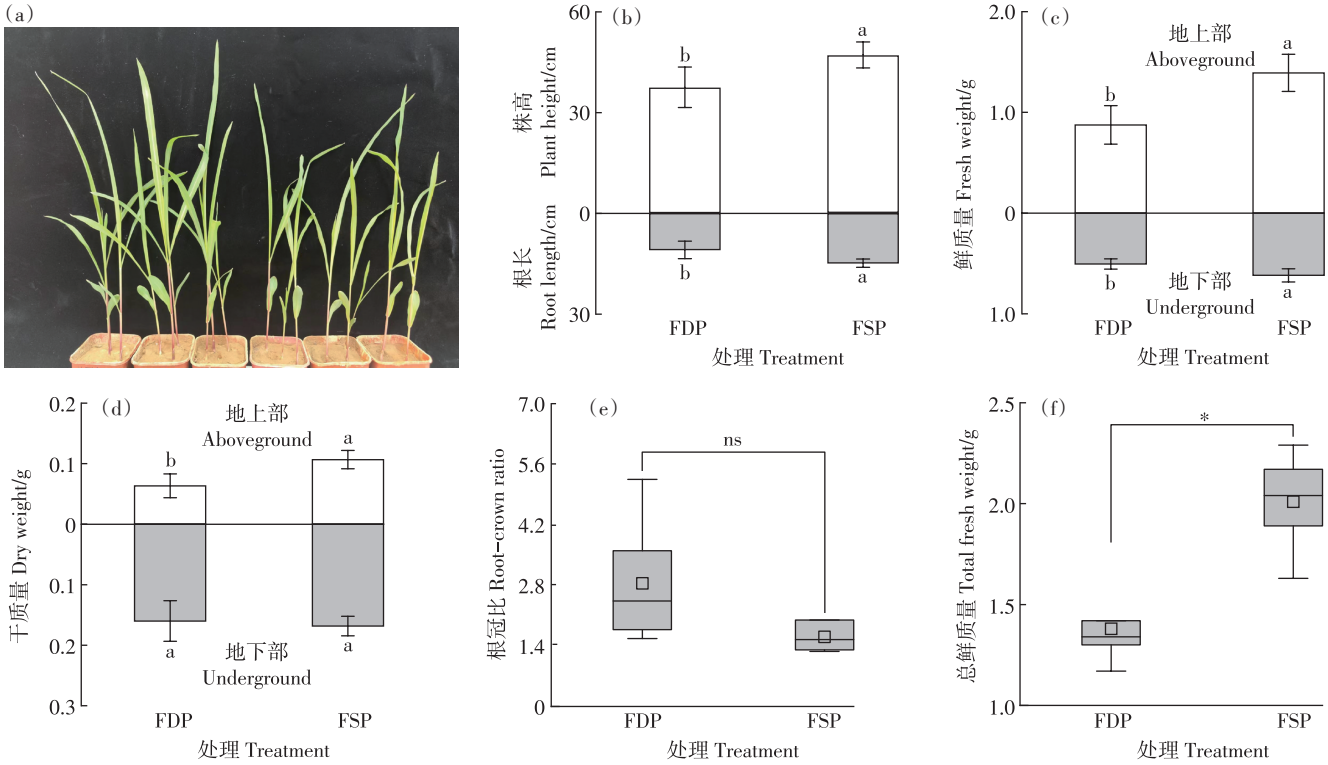
[5] COVALI P, RAAVE H, ESCUER-GATIUS J, et al. The effect of untreated and acidified biochar on NH_3-N emissions from slurry digestate[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2)：837.

[6] WANG Y, DONG H M, ZHU Z P, et al. CH_4, NH_3, N_2O and NO emissions from stored biogas digester effluent of pig manure at different temperatures[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 217：1-12.

[7] LAN Z R, LIN W L, ZHAO G. Sources, variations, and effects on air quality of atmospheric ammonia[J]. *Current Pollution Reports*, 2024, 10(1)：40-53.

[8] HE G, LÖFFLER F E. Nitrogen-hungry bacteria added to farm soil curb greenhouse-gas emissions[J]. *Nature*, 2024, 630(8016)：310-311.

[9] 魏佳欣，亓传仁，刘婉岑，等. 生物质覆盖对沼液污染气体排放的影响及机制[J]. 中国环境科学，2023，43（4）：1744-1756. WEI J X, QI C R, LIU W C, et al. Effects of biomass-covering materials on gaseous emissions and mechanism during biogas slurry storage[J].



图中不同小写字母表示处理之间差异显著(P<0.05),*表示处理间差异显著(P<0.05)。
Different lowercase letters in the figure indicate the significance differences between treatments at 0.05 level,
* indicate the significance differences between treatments at 0.05 level.

图5 沼液对玉米生长发育的影响

Figure 5 Effects of slurry on the growth of maize

China Environmental Science, 2023, 43(4):1744-1756.

[10] BICOKU A, PROVOLO G, RIVA E, et al. Assessments of mitigation techniques on ammonia emissions from animal slurries and digestate during storage[J]. *Albanian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 17(1):84-90.

[11] 王悦, 刘婧怡, 张佳男, 等. 改性膨胀蛭石覆盖对沼液贮存氨气和温室气体排放影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4):902-913. WANG Y, LIU J Y, ZHANG J N, et al. Ammonia and greenhouse gas mitigation from biogas slurry storage using a modified expanded vermiculite cover[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4):902-913.

[12] WANG Y, WANG S L, NI J Q, et al. The influence of using different types of modified vermiculite cover on ammonia mitigation from animal slurry storage: the role of sulfuric acid[J]. *Waste Management*, 2024, 178:311-320.

[13] KAVANAGH I, BURCHILL W, HEALY M G, et al. Mitigation of ammonia and greenhouse gas emissions from stored cattle slurry using acidifiers and chemical amendments[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237:117822.

[14] 李路路, 董红敏, 朱志平, 等. 酸化处理对猪场原水和沼液存储过程中气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):774-784. LI L L, DONG H M, ZHU Z P, et al. Effects of acidification on gas emissions from raw pig slurry and biogas liquid during storage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):774-784.

[15] LEHTIPALO K, YAN C, DADA L, et al. Multicomponent new particle formation from sulfuric acid, ammonia, and biogenic vapors[J]. *Science Advances*, 2018, 4(12):eaau5363.

[16] 李国光, 郜晋楠, 任静, 等. 复合菌剂的构建及其在沼液废水处理中的应用[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(2):74-78. LI G G, GAO J N, REN J, et al. Construction of mixed microbial agents and its application in biogas slurry wastewater treatment[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2024, 50(2):74-78.

[17] LIU J, LI X, XU Y L, et al. Highly efficient reduction of ammonia emissions from livestock waste by the synergy of novel manure acidification and inhibition of ureolytic bacteria[J]. *Environment International*, 2023, 172:107768.

[18] LIU C J, MI X J, ZHANG X X, et al. Impacts of slurry application methods and inhibitors on gaseous emissions and N_2O pathways in meadow-cinnamon soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318:115560.

[19] LIAO X L, MAO S X, CHEN Y J, et al. Combined effects of biochar and biogas slurry on soil nitrogen transformation rates and N_2O emission in a subtropical poplar plantation[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 848:157766.

[20] 陈志龙, 陈广银, 李敬宜. 沼液在我国农业生产中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8):1-6. CHEN Z L, CHEN G Y, LI J

Y. Research progress on application of biogas slurry in China's agricultural production[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(8):1-6.

[21] DU Z J, XIAO Y T, QI X B, et al. Peanut-shell biochar and biogas slurry improve soil properties in the North China Plain: a four-year field study[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):13724.

[22] 陈理, 赵凯, 周宇光, 等. 我国沼肥施用对作物产量效应的Meta分析[J]. 中国沼气, 2021, 39(6):55-61. CHEN L, ZHAO K, ZHOU Y G, et al. Meta-analysis of biogas fertilizer effect on crop yield in China[J]. *China Biogas*, 2021, 39(6):55-61.

[23] YE J Y, TIAN W H, JIN C W. Nitrogen in plants: from nutrition to the modulation of abiotic stress adaptation[J]. *Stress Biology*, 2022, 2(1):4.

[24] UWAMAHORO H P, LI F Y, TIMILSINA A, et al. An assessment of the lactic acid-producing potential of bacterial strains isolated from food waste[J]. *Microbiology Research*, 2022, 13(2):278-291.

[25] WANG Y, XU W Q, CONG Q X, et al. Responses of CH_4, N_2O, and NH_3 emissions to different slurry pH values of 5.5-10.0: characteristics and mechanisms[J]. *Environmental Research*, 2023, 234:116613.

[26] WANG K Y, HUANG D D, YING H C, et al. Effects of acidification during storage on emissions of methane, ammonia, and hydrogen sulfide from digested pig slurry[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 122:23-30.

[27] LEI X H, SUGIURA N, FENG C P, et al. Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 145(3):391-397.

[28] SOMMER S G, HJORTH M, LEAHY J J, et al. Pig slurry characteristics, nutrient balance and biogas production as affected by separation and acidification[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(1):177-191.

[29] HJORTH M, COCOLO G, JONASSEN K, et al. Continuous in-house acidification affecting animal slurry composition[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 132:56-60.

[30] 娄雨, 李艳, 姜灵伟, 等. 微生物菌剂处理不同浓度沼液效果[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9):135-141. LOU Y, LI Y, JIANG L W, et al. Effects of microbial agents on treating liquid digestate with different concentrations[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9):135-141.

[31] ZILIO M, ORZI V, CHIODINI M, et al. Evaluation of ammonia and odour emissions from animal slurry and digestate storage in the Po Valley(Italy)[J]. *Waste Management*, 2020, 103:296-304.

[32] DAI X R, BLANES-VIDAL V. Emissions of ammonia, carbon dioxide, and hydrogen sulfide from swine wastewater during and after acidification treatment: effect of pH, mixing and aeration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 115:147-154.

[33] HE G, CHEN G, XIE Y C, et al. Sustained bacterial N_2O reduction at acidic pH[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1):4092.

[34] OBIA A, CORNELISSEN G, MULDER J, et al. Effect of soil pH increase by biochar on NO, N_2O and N_2 production during denitrification in acid soils[J]. *PLoS One*, 2015, 10(9):e0138781.

[35] MICKAN B S, REN A T, BUHLMANN C H, et al. Closing the circle for urban food waste anaerobic digestion: the use of digestate and biochar on plant growth in potting soil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 347:131071.

[36] MURINDANGABO Y T, KOPECKÝ M, PERNÁ K, et al. Prominent use of lactic acid bacteria in soil-plant systems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 189:104955.

(责任编辑:宋潇)