

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.040

# 奶牛粪微好氧耦合功能膜贮存稳定性与气体减排研究

黄光群 方 晨 马双双 韩鲁佳  
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:**集约化养殖场奶牛粪集中产出量大,资源化利用前贮存过程因局部厌氧易产生氨气和温室气体等,造成氮素损失和环境污染。采用具有选择渗透性的功能膜作为覆盖材料同时耦合微好氧环境,对比分析未覆膜大气环境下贮存物料特性动态变化,探索微好氧耦合功能膜技术对奶牛粪稳定贮存和气体减排的可行性。以奶牛粪为原料,在智能型膜覆盖好氧堆肥反应器系统中进行为期 30 d 的贮存试验。试验设置覆膜组 and 对照组,采用反馈调节模式使反应器内氧气体积分数处于 4% ~ 6% 的微好氧状态,监测分析贮存过程堆体理化、生物学指标的动态变化和主要气体排放规律。研究结果表明:微好氧耦合功能膜技术更有利于奶牛粪的稳定贮存,且与对照组相比,贮存过程排放至环境中的氨气量减少 14.4%,总温室气体排放量减少 25.58%,减排效果显著。

**关键词:** 奶牛粪; 贮存; 微好氧; 功能膜; 稳定性; 温室气体减排  
**中图分类号:** X713; X502      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0335-07

## Storage Stability of Micro-aerobic Coupling Functional Membrane and Gas Emission Reduction of Dairy Manure

HUANG Guangqun FANG Chen MA Shuangshuang HAN Lujia  
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Intensive farming produces a large amount of dairy manure every day. The pre-storage process of resource utilization is easy to produce ammonia gas and greenhouse gas due to local anaerobic areas, which caused the loss of nitrogen and environmental pollution. The functional membrane with selective permeability was used as the covering material and coupled with the micro-aerobic environment, and the dynamic changes of storage materials were analyzed to explore the feasibility of micro-aerobic coupling membrane technology for storage stability of dairy manure and gas emission reduction. Dairy manure was used as experimental materials, and membrane with selective permeability was used as covering material, the storage trial was carried out in an intelligent lab-scale membrane-covered aerobic composting reactor system for 30 d. There were membrane-covered treatment and control treatment in this trial. To make the internal oxygen concentration between 4% and 6%, the oxygen concentration in the reactor was controlled by the feedback regulation mode through the pipe at the bottom of the reactor. Physicochemical indicators, biological indicators and main gases emission were monitored and analyzed in the storage process. The results showed that the micro-aerobic coupling membrane technology was more conducive to storage stability compared with conventional storage. And the effect of gas emission reduction was significant. Compared with the control group, the ammonia gas emission was decreased by 14.4%, and the total greenhouse gas emission was decreased by 25.58% in the membrane-covered group.

**Key words:** dairy manure; storage; micro-aerobic; functional membrane; stability; greenhouse gas emission reduction

### 0 引言

2015 年,我国存栏 100 头以上的奶牛养殖规模

化水平已经接近 50%<sup>[1]</sup>,集约化奶牛养殖场粪污集中产出量大,在资源化利用之前的贮存阶段,因局部厌氧易反应产生大量的氨气和温室气体等<sup>[2]</sup>。由

收稿日期: 2018-04-27 修回日期: 2018-05-28  
基金项目: 欧盟框架计划项目(690142)、教育部创新团队发展计划项目(IRT1293)和国家重点研发计划项目(2018YFD0800102)  
作者简介: 黄光群(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事生物质资源与利用研究,E-mail: huangguangqun@126.com  
通信作者: 韩鲁佳(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事生物质资源与利用研究,E-mail: hanlj@cau.edu.cn

此产生的氨气( $\text{NH}_3$ )不仅污染环境,而且会造成氮素的损失;产生的甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )是两种重要的温室气体源,其全球增温潜势分别为二氧化碳( $\text{CO}_2$ )的 28 倍和 265 倍<sup>[3]</sup>,且  $\text{N}_2\text{O}$  对臭氧层有一定的破坏作用<sup>[4]</sup>。

已有研究表明,适当的覆盖处理可以减少畜禽粪污贮存过程中  $\text{NH}_3$  的挥发,以减少氮素的损失<sup>[5-6]</sup>。但覆盖不同原料,减少  $\text{NH}_3$  及温室气体的效果不尽相同,如调制成浆液状的猪粪(干物质含量 5%~8%)的贮存过程中,用稻草覆盖可以显著减少  $\text{NH}_3$  的排放量,但同时增加了  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[7]</sup>;而在奶牛粪尿贮存过程中,覆盖秸秆反而会增加  $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}_2$  的排放<sup>[8]</sup>。近年来,功能膜覆盖好氧堆肥技术正在推广应用,在气体减排方面成效显著。但是,目前关于功能膜覆盖对集约化养殖场奶牛粪贮存过程中稳定性以及主要气体排放的影响研究鲜见报道。

另有研究表明,在好氧堆肥发酵初期,创造堆体氧气体积分数在 5% 左右的微好氧环境可促进以纤维素为主要成分难分解物的分解,同时降低能源损耗,减少环境污染<sup>[9]</sup>。因此,理论上,集约化养殖场奶牛粪贮存过程处于微好氧环境可以抑制厌氧发酵而又不激活好氧发酵活力,利于物料贮存,并减少因局部厌氧可能产生的  $\text{NH}_3$  和温室气体量。

综上,本研究拟采用具有选择渗透性的功能膜作为覆盖材料同时耦合微好氧环境,并对比分析未覆膜大气环境下贮存物料特性动态变化,探索微好氧耦合功能膜技术对奶牛粪稳定贮存和气体减排的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验方法与设备

新鲜牛粪采自北京泰丰雄特奶牛发展有限公司养殖场,不添加其他辅料,在搅拌均匀后放入两组反应器中,每组奶牛粪质量约 53 kg。

覆盖材料为美国 Gore-Tex 公司生产的复合功能膜,其主要由 3 层结构组成,中间层为膨体聚四氟乙烯(e-PTEF)材料,其上均布 0.2  $\mu\text{m}$  孔径的微孔,可有效阻止灰尘、气溶胶和微生物向外扩散;内外两层由聚酯膜组成,其具有耐腐蚀的特点。该复合膜具有选择性透过和截留功能,有助于形成膜下微氧环境,减少气体外逸。

奶牛粪贮存试验设置覆膜组 and 对照组两个处理,两组试验均采用智能型膜覆盖好氧堆肥反应器系统<sup>[10]</sup>,其结构如图 1 所示。两组反应器主罐体相同且有效容积均为 90 L(罐体内径为 450 mm,高度

为 600 mm)。结合已有相关研究<sup>[9]</sup>,本研究利用该反应器系统的智能反馈调节通风模式,自动开启和关闭风机以使堆体处于 4%~6% 的微好氧环境中。

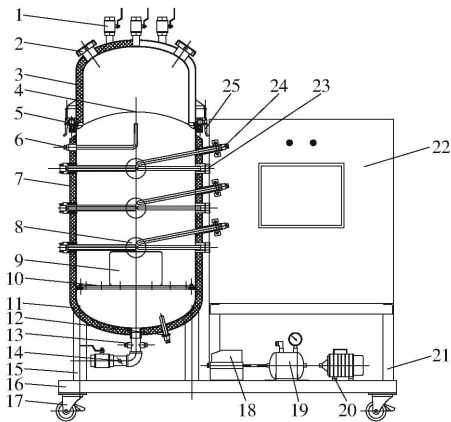


图 1 智能型膜覆盖好氧堆肥反应器系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of intelligent membrane-covered aerobic composting reactor

1. 出气阀 2. 视窗 3. 保温罩 4. 选择渗透性膜 5. 紧固螺栓  
6. 压力传感器监测口(监测膜下压力) 7. 发酵罐体 8. 取样口  
9. 出料口 10. 布气帘 11. 聚氨酯发泡 12. 压力传感器监测口  
(监测进风压) 13. 进气口 14. 滤液聚集视窗 15. 三点釜式支撑结构  
16. 移动平台 17. 双向万向轮 18. 流量计 19. 气囊  
20. 气泵 21. 曝气系统 22. 电控柜 23. 温度传感器 24. 压力  
传感器监测口(监测罐体内压力) 25. 锁扣

贮存过程中每间隔 24 h 记录堆体上、中、下层温度。每间隔 24 h 使用 500 mL 铝箔气袋各采集两袋反应器出口处气体,覆膜组另采集两袋膜下气体。其中,一袋用于即时监测  $\text{NH}_3$  的含量,另一袋用于测定分析  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的含量。分别在贮存初始和第 3、5、7、9、12、15、21、27、30 天取堆体固体样品,少部分存于  $-80^\circ\text{C}$  用于微生物的检测,其他存于  $-20^\circ\text{C}$  用于理化指标的测定。

1.2 测试方法

温度采用 PT100 型传感器测定;参照 TMECC (05.07-A) 方法测定挥发性固体含量;将样品放于  $105^\circ\text{C}$  干燥箱中干燥至恒重,以测得含水率<sup>[11]</sup>;利用 Vario EL III 型元素分析仪(德国 Elementra 公司)测定样品总碳、总氮的质量分数并计算碳氮比;将鲜样按液料比 10 mL/g 浸提过滤取上清液,利用酸碱度计和电导率仪测定样品 pH 值和电导率。每个样品做 3 个平行试样,取平均值作为最终结果。

取上述浸提液进行种子发芽率测定<sup>[12]</sup>。每个样品做 3 个平行,以去离子水作为空白对照。

采用比色管(日本 GASTEC 公司)测定  $\text{NH}_3$  含量:每次用气泵抽取 50 mL 气袋中的气体,待比色管颜色不再变化时读取并记录对应值<sup>[13]</sup>;采用 Agilent 7890 型气相色谱仪(美国 Agilent 公司)测定温室气体含量。

1.3 数据分析

分别利用 OriginPro 2017 和 Excel 2016 进行数据处理及图形绘制。

2 结果与讨论

2.1 堆体物料基础特性

新鲜奶牛粪的含水率和挥发性固体质量分数为  $(77.67 \pm 0.26)\%$  和  $(68.35 \pm 0.22)\%$ ，经干燥粉碎后测得的碳氮比为  $15.84 \pm 0.21$ 。新鲜奶牛粪的含水率过高，会影响通风效果致使堆体局部厌氧。同时，新鲜奶牛粪的碳氮比较低，贮存过程中氮素易以  $\text{NH}_3$  形式大量挥发损失。因此，新鲜奶牛粪

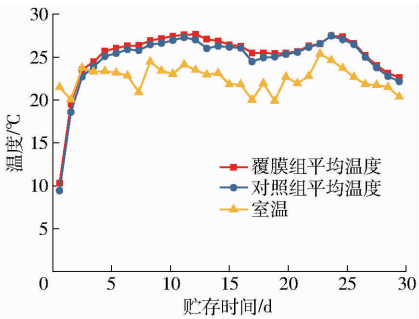
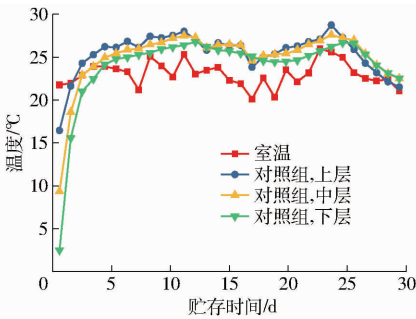
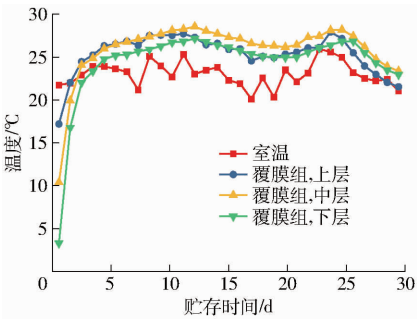


图 2 贮存过程温度变化曲线

Fig. 2 Changing curves of temperature during storage

2.2.2 含水率

图 3 所示为两组的含水率随时间的变化曲线。初始物料的含水率为 77.67%，贮存结束时覆膜组含水率略高于对照组，分别为 80.55% 和 80.06%。含水率略微上升是由于整个贮存过程中堆体温度不高，以气体形式散逸的水分很少，微生物活动产生的水分量大于蒸发损失的水分量<sup>[14]</sup>，且由于膜的阻碍作用，部分水分子遇到膜内层会冷凝回流至堆体，使得覆膜组含水率略高。整个贮存过程中两组的含水率虽小幅升高但未显著变化。

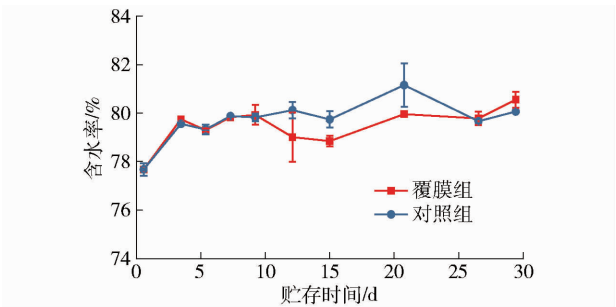


图 3 贮存过程含水率变化曲线

Fig. 3 Dynamic curves of moisture content during storage

2.2.3 挥发性固体质量分数

图 4 所示为两组的挥发性固体质量分数随时间的变化曲线。贮存前期微生物分解有机质的速率较慢，同时其次生代谢会产生水溶性碳等有机化合

在自然堆放过程中易产生大量  $\text{NH}_3$  和  $\text{CH}_4$  等温室气体。

2.2 贮存过程主要理化指标动态变化

2.2.1 温度

图 2 所示为覆膜组和对照组的温度动态变化曲线。两组试验各层温度变化趋势相同，均在贮存第 4 天时堆体的平均温度高于室温且维持到贮存试验结束。整个贮存过程两组各层的平均温度略高于室温，表明微生物活动趋缓，堆体处于一个相对稳定的过程。覆膜组的平均温度始终略高于对照组，可能的原因是覆盖的选择渗透性膜具备一定的保温作用，能够减缓热量的散失。

物<sup>[15]</sup>，因此，随着堆体含水率的增加，挥发性固体质量分数也相对增加。之后，随着微生物的繁殖，对挥发性固体的分解速率加快使得两组挥发性固体质量呈下降趋势。贮存后期，两组曲线均相对平缓，原因可能是微生物活动受到微氧环境影响使挥发性固体降解速率减慢。

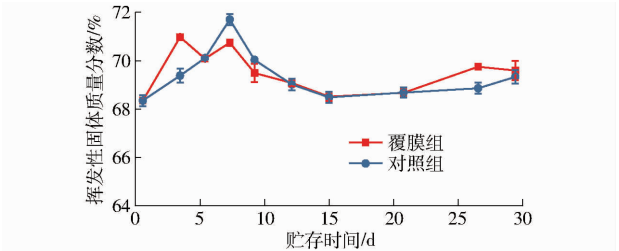


图 4 贮存过程挥发性固体质量分数变化曲线

Fig. 4 Dynamic curves of volatile solid during storage

2.2.4 碳氮比

图 5 所示为两组的碳氮比随时间的变化曲线。结合挥发性固体质量分数的分析可知贮存初期微生物对碳素的消耗较少，反而次生代谢会产生部分水溶性碳，因此，贮存初期碳氮比略有升高。中后期，微生物对碳氮两种元素的消耗处于相对平衡状态，因此两组的碳氮比曲线均较为平缓。第 12 天起覆膜组的碳氮比低于对照组，可能的原因是覆膜组的微好氧发酵优于对照组，因此其对碳素的消耗量相对较大。

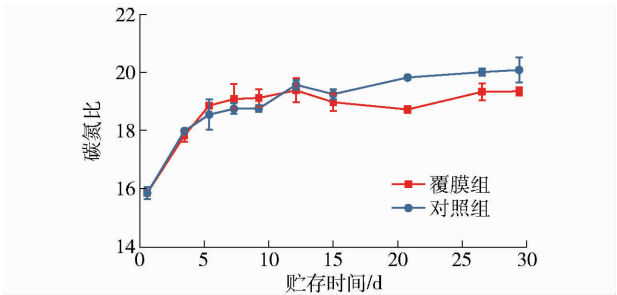


图5 贮存过程碳氮比变化曲线

Fig. 5 Dynamic curves of carbon/nitrogen ratio during storage

2.2.5 pH 值和电导率

图6所示为两组的pH值随时间的变化曲线。在整个贮存过程中两组的pH值均呈下降趋势且变化幅度基本一致。贮存初期两组的pH值下降较快,原因可能是前期微生物的活动产生了较多有机酸,而含氮有机物的氨化程度与之相比较低<sup>[16]</sup>。中后期,两组的pH值下降极缓,最终均稳定在7.9附近,表明中后期两组堆体均处于一个十分缓慢但相对稳定的发酵状态。

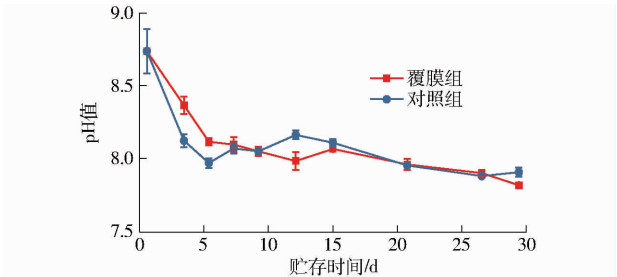


图6 贮存过程pH值变化曲线

Fig. 6 Dynamic curves of pH value during storage

图7所示为两组的电导率随时间的变化曲线。在贮存初期电导率上升较快,原因可能是有机质的矿化作用产生 $\text{NH}_4^+$ 等,以及有机酸的溶解作用产生可溶性盐等,导致其浓度不断增加。两组的电导率均在贮存中期小幅下降后又逐渐上升,原因可能是试验产生的部分可溶性盐下渗到了堆体底部致使中期测量结果偏低。总体来看,贮存过程中电导率呈增加趋势,且贮存结束时两组的电导率均大于 $2.8\text{ mS/cm}$ ,若不经适宜的后处理不利于种子的生根发芽与植物的生长<sup>[17]</sup>。

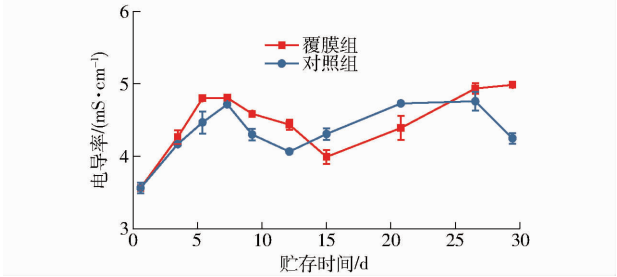


图7 贮存过程电导率变化曲线

Fig. 7 Dynamic curves of EC value during storage

2.3 贮存过程生物学和微生物指标动态变化

2.3.1 种子发芽指数

图8所示为两组的种子发芽指数(GI)随时间的变化曲线。初始样品的种子发芽指数为51.45%。随着贮存的进行,两组的GI值有不同程度的下降,说明两组堆体的生物毒性均有所增加。贮存结束时两组堆体GI值均较低,原因可能是贮存过程中产生了能够抑制种子萌发和植物生长的毒性物质。贮存结束时,覆膜组堆体的GI值高于对照组,表明覆膜处理能够在一定程度上减缓毒性物质的产生。

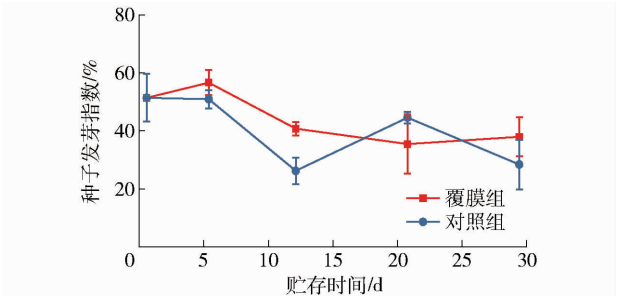


图8 贮存过程中种子发芽指数变化曲线

Fig. 8 Dynamic curves of GI during storage

2.3.2 微生物指标

在贮存初始及结束时的两组样品中均未检出沙门氏菌且蛔虫卵死亡率均达到100%。贮存结束时,两组样品中粪大肠杆菌群数由贮存初始的150 MPN/g降为3 MPN/g以下,符合畜禽粪便无害化处理技术规范中规定的小于等于 $10^5$ 个/kg<sup>[18]</sup>。表明贮存过程能在一定程度上灭杀大肠杆菌。

2.4 贮存过程主要气体动态变化及减排效果

2.4.1  $\text{NH}_3$ 动态变化及减排效果

较多研究表明 $\text{NH}_3$ 的排放与通风速率及时间密切相关<sup>[19-20]</sup>,由于本试验中采用微好氧的反馈调节机制,使得 $\text{NH}_3$ 排放速率呈现较大的波动性,图9所示为 $\text{NH}_3$ 排放速率变化曲线及累积排放量。在贮存期间,覆膜组膜内、外和对照组 $\text{NH}_3$ 的平均排放速率分别为 $0.0068$ 、 $0.0053$ 、 $0.0063\text{ mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ ,累积排放量分别为 $4.89$ 、 $3.82$ 、 $4.47\text{ mg/kg}$ 。

有研究表明,在厌氧条件下气态氮的损失很小<sup>[21]</sup>,因此,本试验中膜内排放总量大于对照组的的原因可能是覆膜减少了堆体内部的厌氧区域,一定程度上利于 $\text{NH}_3$ 的产生。膜外 $\text{NH}_3$ 排放量比膜内减少21.81%,覆膜组排放到环境中的 $\text{NH}_3$ 比对照组减少14.4%。减排的主要原因是覆膜后能够在反应器内部形成微正压环境,且水蒸气遇冷会在膜下凝结成一层水膜,使得挥发的 $\text{NH}_3$ 溶解在水膜中以氨态氮形式存在,累积到一定程度后在重力作用下

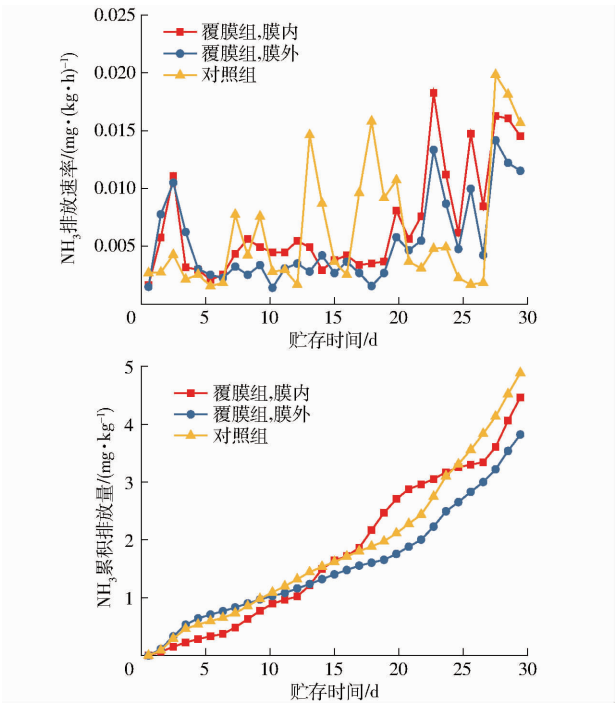


图 9 NH<sub>3</sub> 排放速率及累积排放量

Fig. 9 Emission rate and cumulative emission of NH<sub>3</sub>

随水滴回落到堆体中继续被微生物分解<sup>[22]</sup>。

2.4.2 CO<sub>2</sub> 动态变化及减排效果

图 10 所示为 CO<sub>2</sub> 排放速率变化曲线及累积排放量。在贮存前期,随着温度的升高,CO<sub>2</sub> 排放速率均呈现迅速上升趋势,且在第 5 天覆膜组膜内、外和对照组均达到排放速率的最大值,分别为 43.82、37.75、58.45 mg/(kg·h)。随着贮存的进行,覆膜组的 CO<sub>2</sub> 排放速率逐渐下降,而对对照组在后期仍保持

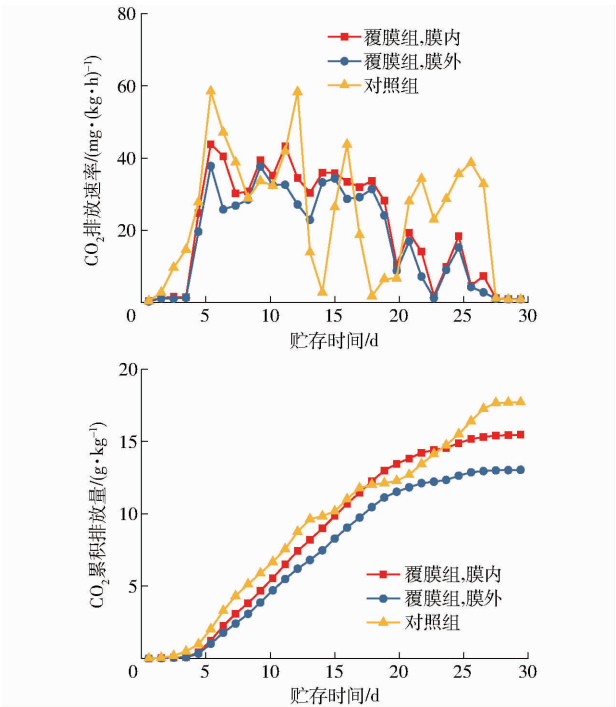


图 10 CO<sub>2</sub> 排放速率及累积排放量

Fig. 10 Emission rate and cumulative emission of CO<sub>2</sub>

较大的 CO<sub>2</sub> 排放速率。

覆膜组膜内、外和对照组 CO<sub>2</sub> 的累积排放量分别为 15.47、13.05、17.72 g/kg,表明贮存过程中以 CO<sub>2</sub> 形式损失的碳素较多。膜外 CO<sub>2</sub> 排放量比膜内减少 15.64%,覆膜组排放到环境中的 CO<sub>2</sub> 比对照组减少 26.35%。减排的原因可能是膜下的水膜层起到封闭作用,减缓了 CO<sub>2</sub> 的散逸。

2.4.3 CH<sub>4</sub> 动态变化及减排效果

已有研究表明,CH<sub>4</sub> 的排放速率与温度密切相关,当温度低于 15℃ 时,CH<sub>4</sub> 的排放速率非常低,当温度达到 25℃ 时,CH<sub>4</sub> 的排放速率会急剧上升<sup>[23]</sup>。图 11 所示为 CH<sub>4</sub> 排放速率变化曲线及累积排放量。在贮存开始的升温过程中,由于温度较低两组基本无 CH<sub>4</sub> 产生,第 5 天起温度达到 25℃ 附近,CH<sub>4</sub> 排放速率迅速上升,在贮存第 9 天覆膜组膜外 CH<sub>4</sub> 排放速率达到最大值 1.07 mg/(kg·h),第 11 天膜内达到最大值 1.14 mg/(kg·h),第 12 天对照组达到最大值 1.71 mg/(kg·h)。对照组在贮存 20 d 后保持较高排放速率,累积了大量 CH<sub>4</sub>,原因可能是贮存后期对照组堆体中存在更多的厌氧区域。

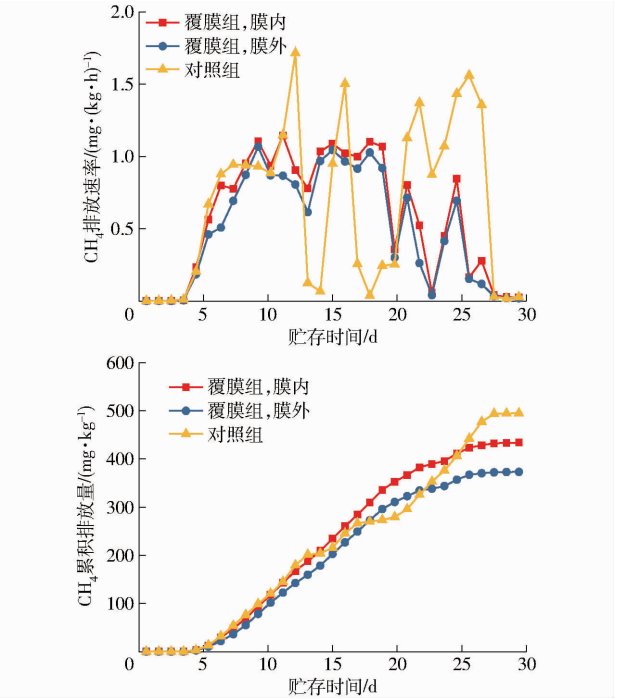


图 11 CH<sub>4</sub> 排放速率及累积排放量

Fig. 11 Emission rate and cumulative emission of CH<sub>4</sub>

覆膜组膜内、外和对照组 CH<sub>4</sub> 的累积排放量分别达到 433.76、373.09、494.92 mg/kg。膜外 CH<sub>4</sub> 排放量比膜内减少 13.99%,覆膜组排放到环境中的 CH<sub>4</sub> 比对照组减少 24.62%。表明膜下的微正压环境能促进堆体内氧气均匀分布,增强氧气向堆体颗粒单元内部渗透的能力,抑制了厌氧区域的产生,从而减少了厌氧发酵产物 CH<sub>4</sub> 的产生<sup>[24]</sup>。

2.4.4 N<sub>2</sub>O 动态变化及减排效果

图 12 所示为 N<sub>2</sub>O 排放速率变化曲线及累积排放量。与上述温室气体排放量相比,贮存期间 N<sub>2</sub>O 累积排放量极少,覆膜组膜内、外与对照组分别为 41.06、49.44、27.35 μg/kg。膜外 N<sub>2</sub>O 排放量比膜内增加 20.40%,原因可能是覆膜对 N<sub>2</sub>O 的阻碍作用不及上述温室气体,因此会在通风期间更多的散逸到环境中。

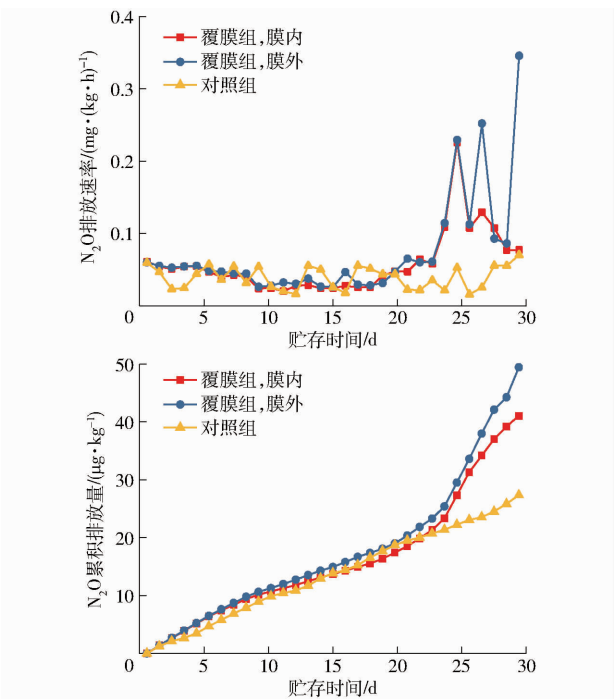


图 12 N<sub>2</sub>O 排放速率及累积排放量

Fig. 12 Emission rate and cumulative emission of N<sub>2</sub>O

在贮存过程中对照组 N<sub>2</sub>O 的排放速率偏低,且无明显起伏。覆膜组排放速率自第 23 天起有明显的升高趋势,且贮存结束时仍保持上升态势。N<sub>2</sub>O 是在微生物作用下通过硝化作用和反硝化作用产生的,严格的好氧和厌氧条件都不利于 N<sub>2</sub>O 的产

生<sup>[25]</sup>。因此,覆膜组后期累积了大量 N<sub>2</sub>O 的原因可能是贮存后期堆体内形成了更多的好氧与厌氧相结合的区域,导致排放增加<sup>[26]</sup>。

2.4.5 总温室气体动态变化及减排效果

根据 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 在 100 a 尺度上的增温潜势分别为 CO<sub>2</sub> 的 28 倍和 265 倍,计算得出各组 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放量的 CO<sub>2</sub>当量。在各组中,N<sub>2</sub>O 的 CO<sub>2</sub>当量均极低,占总温室气体排放量的比例不足 0.1%。CH<sub>4</sub>与 CO<sub>2</sub>对温室效应的贡献率相近,但各组 CH<sub>4</sub>对温室效应的贡献率均略低于 CO<sub>2</sub>。

覆膜组膜内、外与对照组的总温室气体排放量分别为 27 621.30、23 506.33、31 586.95 mg/kg。膜外总温室气体排放量比膜内减少 14.9%,覆膜组排放到环境中的总温室气体比对照组减少 25.58%。表明覆膜在减少温室气体的产生与排放方面有十分良好的效果。

3 结论

(1)覆膜堆体温度略高于对照组,且在综合分析种子发芽指数、碳氮比等指标后可得出:覆膜耦合微氧环境更有利于在奶牛粪贮存过程形成微氧抑厌氧环境,减缓堆体的发酵,保持相对稳定。

(2)覆膜耦合微氧环境贮存奶牛粪能够减少 NH<sub>3</sub>排放。由于膜下的微正压环境以及膜内表面水膜的吸收和阻碍作用,膜外 NH<sub>3</sub>排放量比膜内减少 21.81%,且覆膜组排放到环境中的 NH<sub>3</sub>比对照组减少 14.4%。

(3)与对照组相比,覆膜耦合微氧环境贮存奶牛粪排放到环境中的 CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>分别减少了 26.35%和 24.62%,虽然 N<sub>2</sub>O 的排放总量增加,但对温室效应的贡献率不足 0.1%。总体来看,覆膜组排放到环境中的总温室气体排放量与对照组相比减少了 25.58%,温室气体减排效果明显。

参 考 文 献

- 1 高鸿宾. 关于目前奶业形势和未来走势的判断[J]. 中国奶牛,2016(6):5-9.
- 2 GUARINO M, FABBRI C, BRAMBILLA M, et al. Evaluation of simplified covering systems to reduce gaseous emissions from livestock manure storage [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(3): 737-747.
- 3 IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[M]. Cambridge University Press,2013.
- 4 联合国新闻. 大气中一氧化二氮不断增长可破坏臭氧层并加剧气候变化[R]. 2013.
- 5 HANSEN M N, HENRIKSEN K, SOMMER S G. Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: effects of covering [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40 (22): 4172-4181.
- 6 CHADWICK D R. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(4): 787-799.
- 7 BERG W, BRUNSCH R, PAZSICZKI I. Greenhouse gas emissions from covered slurry compared with uncovered during storage [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 112 (2): 129-134.
- 8 AMON B, KRYVORUCHKO V, AMON T, et al. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 112 (2): 153-162.

- 9 王伟东,王小芬,刘建斌,等. 供氧方式及供氧量对堆肥发酵进程的影响[J]. 环境科学,2006,27(3):3594–3598.  
WANG Weidong, WANG Xiaofen, LIU Jianbin, et al. Effect of oxygen concentrations on process of composting [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2006, 27(3): 3594–3598. (in Chinese)
- 10 孙晓曦,马双双,韩鲁佳,等. 智能型膜覆盖好氧堆肥反应器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(12):240–245.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161229&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161229&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.029.  
SUN Xiaoxi, MA Shuangshuang, HAN Lujia, et al. Design and test on lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting reactor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 240–245. (in Chinese)
- 11 TIAN W, LI L, LIU F, et al. Assessment of the maturity and biological parameters of compost produced from dairy manure and rice chaff by excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. Bioresource Technology, 2012, 110(2): 330–337.
- 12 李季,彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- 13 马双双,孙晓曦,韩鲁佳,等. 功能膜覆盖好氧堆肥过程氨气减排性能研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):344–349. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171142&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171142&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.042.  
MA Shuangshuang, SUN Xiaoxi, HAN Lujia, et al. Reduction of ammonia emission during membrane-covered aerobic composting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):344–349. (in Chinese)
- 14 李群良,王星,黄逸鑫,等. 不同堆肥方式对氮素转化规律的影响[J]. 化学与生物工程,2014,31(9):25–28.  
LI Qunliang, WANG Xing, HUANG Yixin, et al. Effect of different composting methods on nitrogen transformation during composting [J]. Chemistry & Bioengineering, 2014, 31(9): 25–28. (in Chinese)
- 15 陈鲜妮,来航线,田霄鸿,等. 接种微生物条件下牛粪+麦秸堆腐过程有机组分的动态变化[J]. 农业环境科学学报,2009,28(11):2417–2421.  
CHEN Xianni, LAI Hangxian, TIAN Xiaohong, et al. Dynamics of organic fractions of cow manure plus wheat straw during decomposition with microbial inoculation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(11): 2417–2421. (in Chinese)
- 16 胡伟. 有机固废好氧发酵过程中的 pH 变化与原材料性质对产物 pH 的影响[D]. 扬州:扬州大学,2017.  
HU Wei. Change of pH in the aerobic fermentation process of organic solid waste and effects of raw material on product pH [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017. (in Chinese)
- 17 李赛群,肖光辉,王志伟. 有机生态型无土栽培的基质和施肥技术研究进展[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2013,9(2):194–199.  
LI Saiqun, XIAO Guanghui, WANG Zhiwei. Advance of application and research on substrate and fertilization technique of eco-organic type soilless culture [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2013, 9(2): 194–199. (in Chinese)
- 18 中华人民共和国农业部. NY/T 1168—2006 畜禽粪便无害化处理技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- 19 沈玉君,李国学,任丽梅,等. 不同通风速率对堆肥腐熟度和含氮气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1814–1819.  
SHEN Yujun, LI Guoxue, REN Limei, et al. The impact of composting with different aeration rates on maturity variation and emission of gas concluding N [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(9): 1814–1819. (in Chinese)
- 20 马闯,李明峰,赵继红,等. 通风策略对废弃物好氧堆肥的影响综述[J]. 江苏农业科学,2013,41(11):350–353.
- 21 PETERSEN S, LIND A, SOMMER S, et al. Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure [J]. Journal of Agricultural Science, 1998, 130(1): 69–79.
- 22 李广坤. 功能膜覆盖式污泥好氧堆肥系统的效能研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.  
LI Guangkun. Research on effectiveness of aerobic sludge composting with functional membrane coverage [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016. (in Chinese)
- 23 陆日东,李玉娥,万运帆,等. 温度对奶牛粪便温室气体排放的影响[J]. 生态与农村环境学报,2008,24(1):29–31.  
LU Ridong, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al. Effect of temperature on emission of greenhouse gases from cow manure [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(1): 29–31. (in Chinese)
- 24 陈佩芝,盛清凯. 德国 UTV-Gore 膜覆盖式畜禽粪便高温好氧发酵法[J]. 猪业科学,2016,33(6):52–53.
- 25 朱海生,左福元,董红敏,等. 锯末添加比例对牛粪贮存过程中氨气和温室气体排放的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版,2017,39(3):34–40.  
ZHU Haisheng, ZUO Fuyuan, DONG Hongmin, et al. Effects of sawdust addition and the mixing ratio on ammonia and greenhouse gas emission from stored cattle manure [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2017, 39(3): 34–40. (in Chinese)
- 26 WRAGE N, VELTHOF G L, BEUSICHEM M L V, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(12): 1723–1732.