

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023021105

徐一硕, 赵哲, 吴迪, 等. 生物炭、醋糟、菌剂对鸡粪存储中理化性质、氨和温室气体排放的影响[J]. 环境化学, 2023, 42(10): 3500-3510.

XU Yishuo, ZHAO Zhe, WU Di, et al. Impacts of biochar, vinegar residue and microbial inoculant on the physicochemical properties, ammonia and greenhouse gas emissions of stored chicken manure[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(10): 3500-3510.

生物炭、醋糟、菌剂对鸡粪存储中理化性质、 氨和温室气体排放的影响

徐一硕 赵哲 吴迪 高志岭* 廖文华 刘春敬

(河北农业大学资源与环境科学学院/河北省农田生态环境重点实验室, 保定, 071000)

摘要 降低畜禽粪便存储过程中氨与温室气体排放是推动养殖业绿色发展的重要环节. 本研究应用动态箱技术探讨了醋糟覆盖(CZ1)、醋糟混合(CZ2)、生物炭覆盖(BC1)、生物炭混合(BC2)、菌剂喷洒(JJ1)和菌剂混合(JJ2)等处理方法对自然堆存鸡粪的发芽指数、氮素气态损失以及长生命周期(N_2O)和短生命周期(CH_4)温室气体排放的影响. 结果表明: (1) 鸡粪存储过程中氮素损失最主要方式是 NH_3 排放(>98.0%), 温室气体主要以直接和间接 N_2O 排放为主(>85.0%); (2) 与对照相比, 添加菌剂使得鸡粪存储中氮素气态损失和温室气体排放分别增加了39.4%—63.3%和19.3%—36.7%, 醋糟和生物炭处理的氮素气态损失则分别降低了12.4%—32.2%和31.2%—36.2%, 温室气体排放降低了23.0%—35.9%和47.5%—49.9%, 但醋糟混合处理有增加 CH_4 排放的风险; (3) 与醋糟相比, 生物炭覆盖和混合处理均可同步降低长生命周期气体 N_2O 和短生命周期 CH_4 排放; (4) 醋糟、生物炭处理均可降低鸡粪EC, 并提高鸡粪氨氮含量和种子发芽指数. 综上, 与菌剂和醋糟相比, 生物炭覆盖或混合均是降低鸡粪存储过程中氨和温室气体排放、提高鸡粪农田施用安全性的有效措施.

关键词 鸡粪存储, 氨气, 温室气体, 生物炭, 醋糟.

Impacts of biochar, vinegar residue and microbial inoculant on the physicochemical properties, ammonia and greenhouse gas emissions of stored chicken manure

XU Yishuo ZHAO Zhe WU Di GAO Zhiling* LIAO Wenhua LIU Chunjing

(College of Resource and Environmental Sciences, Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Hebei Agricultural University, Baoding, 071000, China)

Abstract Reducing ammonia and greenhouse gas emissions from chicken manure storage is of great importance to promote the green development of livestock industry. This study investigated the impacts of management practices including vinegar residue covering (CZ1), vinegar residue mixing (CZ2), biochar covering (BC1), biochar mixing (BC2), microbial inoculant spraying (JJ1) and microbial inoculants mixing (JJ2) on the germination index, gaseous nitrogen loss and greenhouse gas emissions (including nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4)) of the naturally stacked chicken manure compared to the CK without any control. The results showed that: nitrogen loss of the chicken manure storage was dominated by the NH_3 emissions (>98.0%), and the greenhouse gas emissions were dominated by the direct and indirect N_2O emissions (>85.0%). Compared to the CK, the application of microbial inoculant enhanced the N losses and greenhouse gas emissions by

2023年2月11日收稿(Received: February 11, 2023).

* 通信联系人 Corresponding author, E-mail: zhilinggao@hebau.edu.cn

39.4%—63.3% and 19.3%—36.7%, respectively. However, the application of vinegar residue and biochar reduced the N losses by 12.4%—32.2% and 31.2%—36.2%, respectively, and reduced the greenhouse gas emissions by 23.0%—35.9% and 47.5%—49.9%, respectively; meanwhile, the risk of enhanced CH₄ emission with the vinegar residue addition was noticed. Of the vinegar and biochar application, the latter practice can both reduce long-lived (N₂O) and short-lived (CH₄) climate pollutants simultaneously. Additionally, applying vinegar residue and biochar improved the quality of chicken manure at the aspects of electrical conductivity, ammonical nitrogen content and germination index. In conclusion, biochar covering or mixing methods are effective measures to reduce NH₃ and greenhouse gas emissions from chicken manure storage and can improve the safety of chicken manure utilization in farmland.

Keywords chicken manure storage, ammonia, greenhouse gases, biochar, vinegar residue.

近年来,我国畜牧业持续稳定发展,规模化、标准化、产业化进程不断加快,而畜禽养殖粪污的污染问题已经成为当前畜牧养殖业急需解决的重点问题. 畜禽养殖过程中会产生大量氨(NH₃)与温室气体,其中氧化亚氮(N₂O)、二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)已成为引起全球气温变暖的主要温室气体^[1-2],所排放的氨可通过大气干、湿沉降回到陆地和水体,造成土壤酸化和水体富营养化^[3-4]. 此外,氨还会与空气中某些酸性物质反应形成氯化铵、硫酸铵、硝酸铵等细小颗粒物并危害人类健康^[5-6].

粪污露天堆置是养殖场粪污处理过程中的常见手段之一,而堆置过程中不仅会造成营养元素的大量流失^[7],还导致大气和土壤污染严重. 降低粪便存储过程中氨与温室气体排放的措施包括调节粪便pH值的酸化法、添加微生物制剂、表面覆盖材料和添加吸附剂等. 研究表明,醋糟、木屑、锯末、稻草、生物炭、聚乙烯膜等物料均可不同程度地降低畜禽粪便的氨排放^[8-10]. 例如,作为一种酸性有机物料,醋糟可通过降低禽粪表层pH和阻隔气体挥发降低畜禽粪便中的氨挥发^[11];生物炭则主要是通过较大的比表面积和多孔结构等特征吸附氮素以降低氮素^[12-13]. 此外,添加微生物制剂可以加速有机废弃物中的纤维素、木质素、糖类及粗蛋白分解,提高速效养分含量,减少堆肥时间和堆肥成本,提高堆肥品质并降低土传病害^[14-15],而其对粪污存储中氨和各种温室气体排放的影响尚不明晰.

针对我国鸡粪存储环节的氮素损失和温室气体减排措施研究与评估不足等问题^[16-18],本研究系统研究了酸性醋糟、生物炭和菌剂对鸡粪进行覆盖(喷施)或混合处理对鸡粪存储过程中氨和不同温室气体排放的影响,揭示了实验材料施用技术对鸡粪存储过程中长生命周期温室气体(long-lived climate pollutants, LLCPs, 如 N₂O、CO₂)、短生命周期温室气体(short-lived climate pollutants, SLCPs, 如 CH₄)的权衡(trade-off)及其总排放影响的技术特点,通过与处理鸡粪的生物安全方面的评价相结合,为规模化养鸡场鸡粪绿色管理和循环利用提供重要技术支持.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 实验材料

实验所用鸡粪取自河北省保定某蛋鸡养殖场. 醋糟购自山西省某醋厂,是高粱经过二次发酵并通过固液分离得到的固态部分. 生物炭为经过酸改性的商用木质生物炭. 微生物菌剂(有效活菌数≥0.5亿·g⁻¹)购自北京沃土天地生物科技有限公司,是一种复合微生物菌剂,主要由光合细菌、放线菌、乳酸菌、酵母菌等近10个菌株构成. 原材料的理化性质如表1所示.

表1 鸡粪、醋糟、生物炭的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of chicken manure, vinegar grains and biochar

实验材料 Tested materials	pH	含水率/% Water content	有机碳/% Organic carbon	全氮/% Total nitrogen
鸡粪Chicken manure	8.3	68.6	35.3	2.4
醋糟Vinegar residue	3.6	62.4	34.8	1.2
生物炭Biochar	2.9	4.3	30.9	0.6

1.2 实验设计

本研究中醋糟、生物炭和菌剂 3 种实验材料的添加方式均为覆盖和混合. 每处理设置 3 个重复, 各处理详细配比如表 2 所示. 醋糟和生物炭的用量设置为鸡粪鲜重的 15.0% 左右, 微生物菌剂的用量设置为鸡粪干重的 3.0‰, 其添加方式详见表 2.

表 2 不同处理的物料配比

Table 2 Material ratios of different treatments

实验处理 Treatments	鸡粪与物料 Chicken manure and added materials	处理方式 Application methods
CK	3.5 kg 鸡粪	自然存储
CZ1	3.5 kg 鸡粪+0.5 kg 醋糟	在鸡粪表面覆盖
CZ2	3.5 kg 鸡粪+0.5 kg 醋糟	与鸡粪充分混合
BC1	3.5 kg 鸡粪+0.5 kg 生物炭	与表层鸡粪混合
BC2	3.5 kg 鸡粪+0.5 kg 生物炭	与鸡粪混合均匀
JJ1	3.5 kg 鸡粪+3.5 g 菌剂原液	原液稀释40倍, 表面喷洒
JJ2	3.5 kg 鸡粪+3.5 g 菌剂原液	原液稀释40倍, 混合均匀

1.3 气体排放和鸡粪理化性质测定

1.3.1 气体排放

本研究采用的监测系统包括动态箱、红外光声谱气体监测仪(INNOVA 1412i)和中央控制系统(包括控制面板和控制单元)等 3 部分. 动态箱设备是 PVC 材质制作成的长方形箱子. 采样盖的前后两端开孔, 分为进气孔和出气孔. 红外光声谱气体监测仪可以监测氨气和温室气体浓度. 中央控制系统是基于 PCL 的气体自动采集系统, 能够定时连接 INNOVA 与相应动态箱体气路^[19]. 本研究利用该系统对各处理的 CO₂、N₂O、NH₃ 和 CH₄ 排放进行了连续监测, 共监测了 15 d.

1.3.2 鸡粪理化性质

实验期间鸡粪 pH 值、总氨氮(TAN)和电导率等测定样品为鲜样, 取样后冷冻保存并及时进行测定. 铵态氮的测定采用 KCl 溶液浸提-靛酚蓝比色法, 硝态氮测定采用酚二磺酸比色法^[20]. pH 采用玻璃电极法测定, 电导率使用电导率仪进行测定, 总氨氮(TAN)采用凯氏定氮法进行测定, 全氮(TN)采用 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮法, 消煮至无色或者淡黄色的澄清液, 然后使用凯氏定氮仪进行测定, 通过硫酸滴定法进行全氮含量的测量, 有机碳(TOC)采用重铬酸钾容量法测定^[21].

1.3.3 种子发芽指数(GI)

此指标可以直观地判断堆肥的腐熟情况和鸡粪堆肥的毒性. 发芽指数的计算公式如式(1)^[21]:

$$GI = \frac{\text{上清液培养的种子发芽率} \times \text{上清液培养的种子根长}}{\text{蒸馏水培养的种子发芽率} \times \text{蒸馏水培养的种子根长}} \times 100\% \quad (1)$$

1.4 气体排放测定与计算

每个动态箱监测 30 min. 气体排放速率公式如式(2):

$$F = \frac{(C - C_0) \times v \times M \times 273.15 \times P}{V_m \times S \times (273.15 + T) \times 1013.25} \quad (2)$$

式中, F : 鸡粪气体排放速率(具体包括 CO₂、N₂O、NH₃ 和 CH₄), mg·m⁻²·h⁻¹; C_0 、 C : 分别为箱体进气口和出气口的气体浓度, μL·L⁻¹; v : 箱体内空气流速, m³·h⁻¹; M : 4 种气体的摩尔质量, g·mol⁻¹; V_m : 气体标准摩尔体积, 22.4 L·mol⁻¹; S : 箱体底面积, 0.07 m²; P : 气体压强, hPa; T : 气体温度, °C.

不同气体累积排放量计算均采用式(3):

$$Q = \sum \left(t_i \times \frac{(F_i + F_{i+1})}{2} \right) \quad (3)$$

式中, Q : 气体排放总量, mg·kg⁻¹; F_i : 第 i 天测定时气体排放通量; t : 相邻两次测定的天数; i : 测定时间.

此外, 本研究利用 IPCC^[2] 方法计算了各处理 N₂O(E_{N_2O})和 CH₄(E_{CH_4})直接排放产生的 E_{CO_2-e} , 同时

还考虑了氨挥发(E_{NH_3})沉降后引起的间接 N_2O 排放. 计算公式如下:

$$E_{\text{CO}_2-e} = 28 \times E_{\text{CH}_4} + 265 \times (E_{\text{N}_2\text{O}} + 0.01 \times E_{\text{NH}_3-N} \times 44/28) \quad (4)$$

1.5 数据分析

采用 Excel 软件对实验数据进行处理和统计分析, 采用 SPSS20 软件进行显著性检验.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 醋糟、生物炭和菌剂对鸡粪存储气体排放的影响

2.1.1 NH_3 排放

实验期间不同处理氨排放速率如图 1 所示. CK、CZ1、CZ2、BC1 和 BC2 处理氨排放特征基本相同, 排放速率在第 1—2 天内到最大值, 而 JJ1 和 JJ2 处理的氨排放则在第 4 天时达到峰值, 且排放高峰持续时间要高于其他处理. 由图 1 可知, 与 CK 相比较, CZ1、CZ2、BC1 和 BC2 的 4 个处理具有明显的减排效果, 减排率分别为 32.1%、12.1%、36.0% 和 30.9%, 其中 BC1 减排效率最高; 而 JJ1 和 JJ2 处理均显著增加了氨排放, 增幅分别达到 39.8% 和 63.9%. 本研究发现醋糟和生物炭的覆盖或混合均可降低氨挥发, 这可能是由于醋糟和生物炭的酸性特点很大程度上抑制了 NH_4^+ 向 NH_3 的转化^[22-23], 甚至推动游离 NH_3 转化为 NH_4^+ , 最终导致氨挥发降低^[24-25].

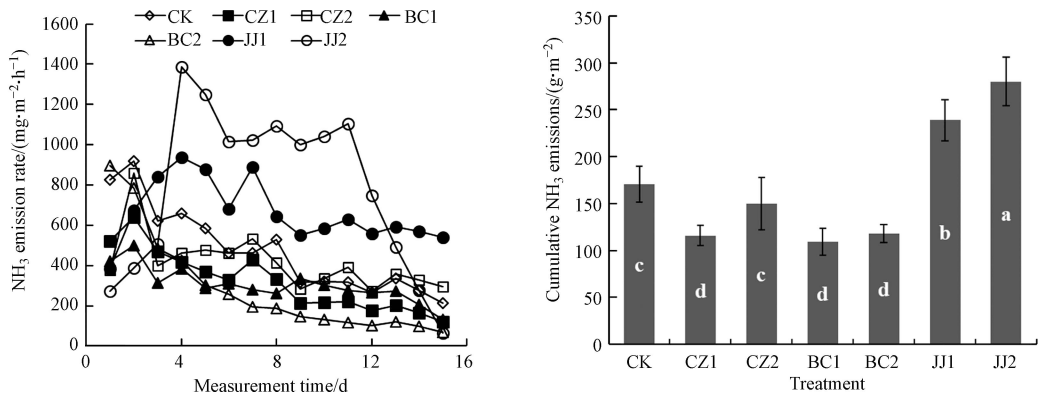


图 1 不同处理下鸡粪氨排放

柱状图中小写字母表示各处理间差异显著性, $\alpha=0.05$

Fig.1 Ammonia emissions from stored chicken manure storage under different treatments

The small letters in the bars indicate the significant difference among treatments, $\alpha=0.05$

2.1.2 CO_2 排放

由图 2 可知, 监测期间 CK、CZ1、CZ2、BC1 和 BC2 处理 CO_2 排放均呈逐渐下降的特征, 且各处理的差异逐渐减小, 相较而言, JJ1 和 JJ2 处理 CO_2 排放的峰值出现在监测的第 4 天. 对比各处理的 CO_2 累积排放发现(图 2), 与 CK 处理相比较, CZ1、CZ2、BC1 和 BC2 的 4 个处理均降低了 CO_2 排放, 减排率分别为 37.6%、30.3%、55.9% 和 56.6%, 其中 BC1 和 BC2 减排效果最好; 然而, JJ1 和 JJ2 处理一定程度上增加了 CO_2 排放量, 增幅达到 12.8% 和 19.5%, 但两者无显著差异. 由此可见, 应用醋糟和生物炭可降低鸡粪存储中 CO_2 的排放. 这可能是由于醋糟和生物炭具有较大的酸性, 不同程度的抑制了微生物的活动; 微生物的好氧分解作用需要氧气, 醋糟有一定的阻隔作用, 降低了鸡粪内部的氧气含量, 并导致 CO_2 排放下降^[26-28].

2.1.3 N_2O 排放

如图 3 所示, CK、CZ1、CZ2、BC1 和 BC2 处理的 N_2O 排放均为逐渐下降的特征, 但 JJ1 和 JJ2 处理的排放峰值出现在第 4 天. 与 CK 处理相比较(图 3), CZ1、CZ2、BC1 和 BC2 的 4 个处理均具有减排效果, 减排率分别为 39.3%、34.1%、57.9% 和 58.3%, 而 JJ1 和 JJ2 处理对 N_2O 的累积排放影响较小, 分别比 CK 增加了 6.7% 和 13.9%, 但两者无显著差异. 本研究中醋糟和生物炭处理降低 N_2O 排放的途径可能有所不同. 醋糟混合处理的可能途径为: 鸡粪 pH 下降导致细菌等微生物活性下降; 醋糟覆盖处理

可能降低鸡粪表面与空气的接触,一定程度上抑制了鸡粪 NH_4^+ 氧化和硝化过程,同时也降低了反硝化底物 NO_3^- 的生成,进而降低了鸡粪中 N_2O 的排放量^[28]. 生物炭覆盖和混合两种方式均降低 N_2O 排放的原因可能是由生物炭对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸附、促进 N_2O 还原等过程所致^[29].

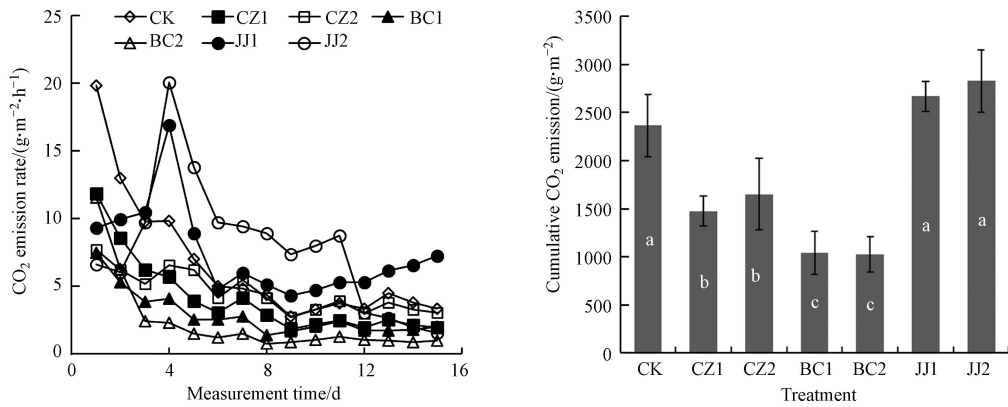


图2 不同处理下鸡粪二氧化碳排放

柱状图中小写字母表示各处理间差异显著性, $\alpha=0.05$

Fig.2 CO_2 emission from stored chicken manure under different treatments

The small letters in the bars indicate the significant difference among treatments, $\alpha=0.05$

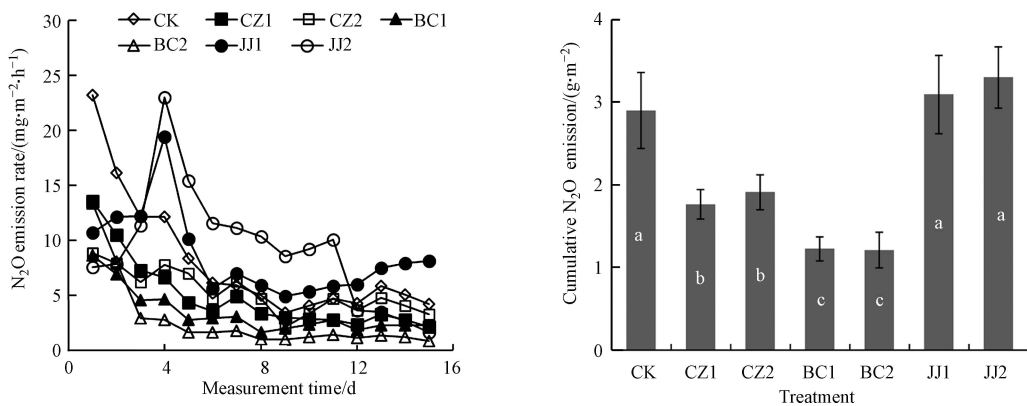


图3 不同处理下鸡粪氧化亚氮排放

柱状图中小写字母表示各处理间差异显著性, $\alpha=0.05$

Fig.3 Nitrous oxide emissions from stored chicken manure under different treatments

The small letters in the bar chart indicate the significant difference among treatments, $\alpha=0.05$

2.1.4 CH_4 排放

CH_4 排放速率如图4所示,各处理 CH_4 的排放均在第一天达到了最大值,随后呈现下降趋势,但 JJ2 处理 CH_4 排放速率在第3—12天期间的下降趋势明显低于其他处理.与 CK 处理相比较(图4), CZ1、BC1 和 BC2 的3个处理均具有降低 CH_4 排放的效果,减排效率分别为 27.0%、43.4%、30.9%,而 CZ2、JJ1 和 JJ2 处理都增加了 CH_4 的排放量,增幅分别为 12.5%、35.4% 和 94.2%. 整体看来,不同类型添加剂对鸡粪 CH_4 排放的影响比较复杂.由于生物炭具有高孔隙度的特点,优化了鸡粪内部氧气的分配和供应,抑制了产甲烷菌活性,从而降低了 CH_4 的排放量^[30-31]. 而醋糟混合处理增加 CH_4 排放的原因可能是随着鸡粪温度的升高,微生物降解可利用有机物的作用增强,堆体内的氧气被大量消耗,扩大了厌氧区域,从而导致 CH_4 排放增加^[32].

2.2 醋糟、生物炭和菌剂对鸡粪堆存理化性质的影响

2.2.1 pH 和 EC

由图5可知,醋糟、生物炭和菌剂添加均不同程度地降低了鸡粪 pH,其中醋糟处理的下降幅度最大,生物炭和菌剂处理 pH 变化幅度相近.但监测结束时,CZ1 和 CZ2 两个处理的 pH 值提高最大,分别为 2.68、2.66,远高于 BC1、BC2、JJ1 和 JJ2 处理的 pH 增加,后者分别增加了 1.26、1.34、1.23 和 1.07.

这可能是由于醋糟中的有机酸引起实验初期鸡粪 pH 的剧烈变化,但随着有机酸的消耗、鸡粪中的有机氮或蛋白质的矿化等原因^[33],最终使得该处理与其他各处理对鸡粪的 pH 比较相近.此外,图 5 可知,添加生物炭显著降低了实验前期鸡粪 EC 值,而醋糟和菌剂对鸡粪 EC 影响较小;实验结束时,各处理的电导率都有所降低,降幅为 9.9%—24.9%,其中 BC1 和 BC2 处理降幅最大,JI1 处理降低最大.

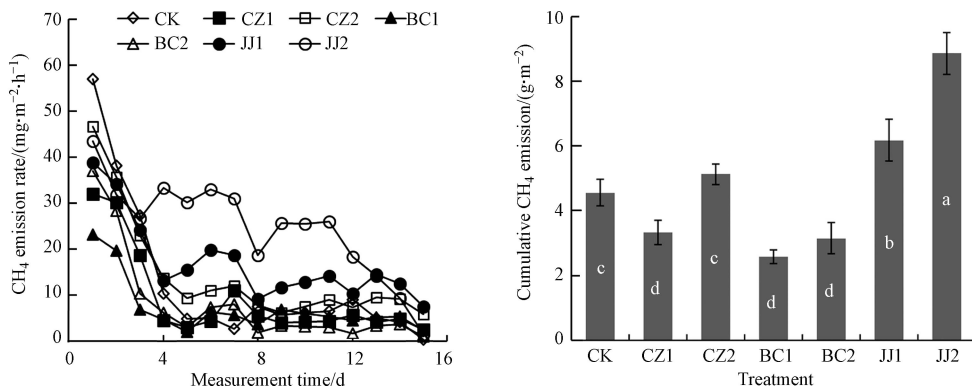


图 4 不同处理下鸡粪甲烷排放

柱状图中小写字母表示初始时各处理间差异显著性, $\alpha=0.05$

Fig.4 Methane emission from stored chicken manure under different treatments

The small letters in the bars indicate the significant difference between treatments at the beginning, $\alpha=0.05$

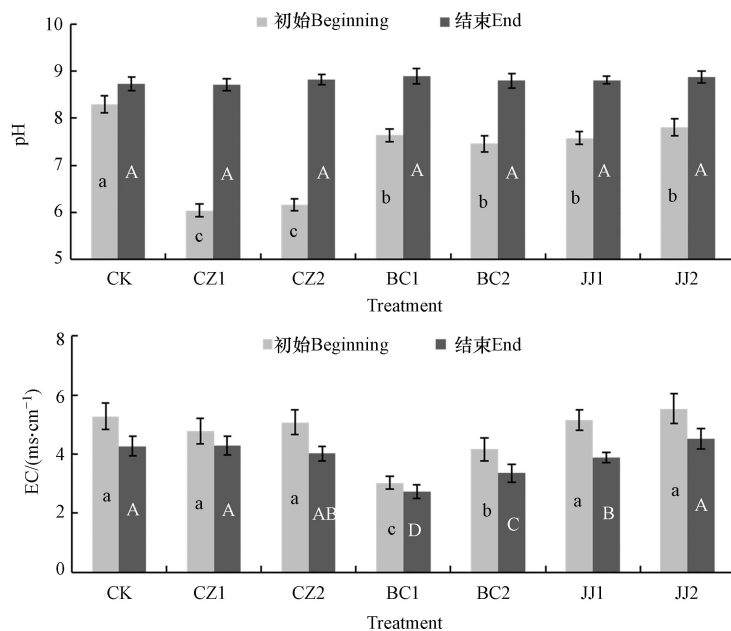


图 5 不同处理下鸡粪 pH 值和电导率变化

柱状图中小写字母表示初始时各处理间差异显著性,大写字母表示结束时各处理间差异显著性, $\alpha=0.05$

Fig.5 Changes of pH value and electronic conductivity (EC) of stored chicken manure under different treatments. In the bar chart, small letters indicate the significant difference between treatments at the beginning, and uppercase letters indicate the significant difference between treatments at the end, $\alpha=0.052$

2.2.2 氨氮和全氮

由图 6 可知,实验结束时, CZ2、BC2、JJ1 和 JJ2 处理鸡粪全氮有明显下降,分别降低了 22.5%、21.6%、28.5% 和 20.9%,而其他处理全氮含量无显著变化.此时,尽管各处理均与 CK 无显著差异,但 CZ1 处理的全氮含量显著高于 BC2、JJ1 处理.由图 6 可知,实验结束时期各处理的氨氮含量均较初始时有不同程度的下降,降低幅度变化范围为 7.9%—65.4%,其中 CK 处理降幅最大.实验结束时,添加醋糟和生物炭处理的氨氮含量均显著高于 CK,导致此现象的原因可能是由于醋糟和生物炭能够降低 NH_3 排放等氮素损失所致.尽管添加菌剂处理增加了 NH_3 的排放量,但添加菌剂可能通过提高微生物

群落多样性和活性,促进了有机物降解,从而产生其氨氮含量高于 CK 的现象。

2.2.3 有机碳

实验初始和结束时各处理鸡粪的有机碳含量如图 6 所示. 与实验开始时相比,实验结束时各处理的有机碳含量均降低,降低幅度的变化范围为 23.4%—44.6%. 各处理之间,生物炭处理 BC1、BC2 显著提高了初始和结束时鸡粪的有机碳含量,而添加醋糟和菌剂对两个时期的鸡粪有机碳含量影响甚微。

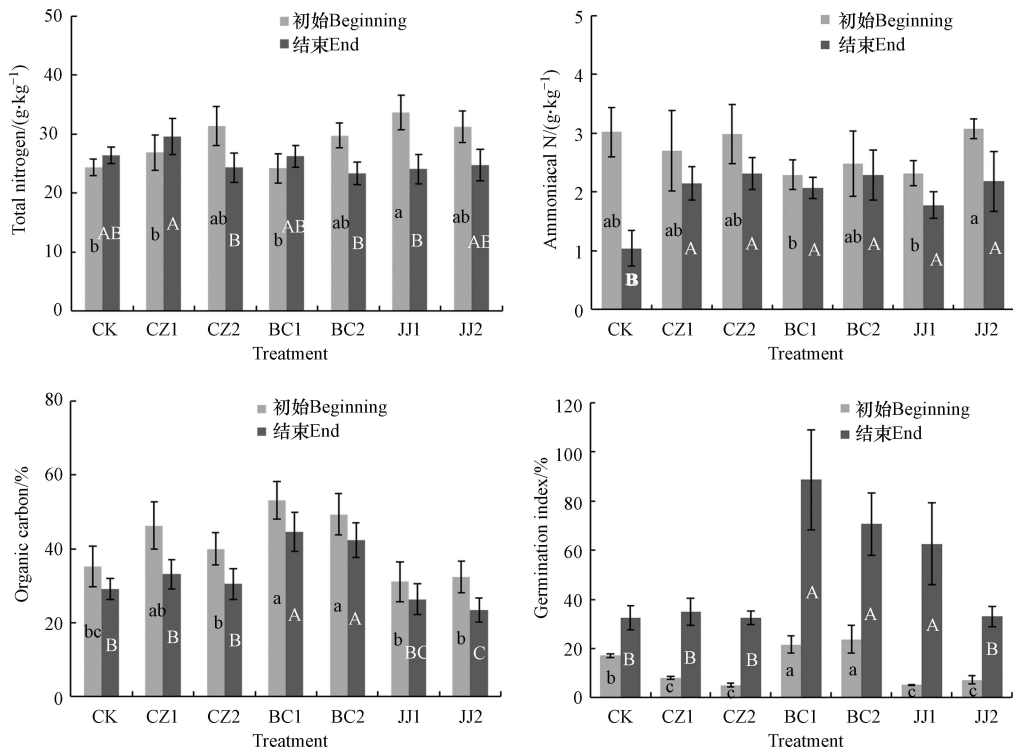


图 6 不同处理下鸡粪总氮、总氨氮、有机碳和发芽指数的变化

柱状图中小写字母表示初始时各处理间差异显著性,大写字母表示结束时各处理间差异显著性, $\alpha=0.05$

Fig.6 Changes of total nitrogen, total ammonia nitrogen, organic carbon and germination index of stored chicken manure under different treatments. Small letters in bars indicate the significant difference between treatments at the beginning, and uppercase letters indicate the significant difference between treatments at the end, $\alpha=0.05$

2.2.4 种子发芽指数

实验初始和结束时各处理鸡粪的种子发芽指数 GI 变化如图 6 所示. 在监测初始时,生物炭添加处理 BC1 和 BC2 提高了鸡粪的发芽指数,而添加醋糟和菌剂均显著降低了鸡粪的 GI. 实验结束时,各处理的 GI 均较初始时有明显提高,分别增加了 32.5%、35.1%、32.5%、88.7%、70.6%、60.6% 和 32.9%; 与 CK 相比, CZ1、CZ2、JJ2 处理对鸡粪的 GI 无显著影响,而 BC1、BC2 和 JJ1 处理则显著提高了鸡粪的 GI. 本研究发现添加生物炭和菌剂处理的种子发芽指数显著升高^[34-35],前者可能与生物炭对鸡粪中可溶性盐的吸附有关,而后者可能是菌剂中的功能微生物对溶质盐的离子交换和络合、小分子有机酸转化利用以及新合成腐殖质类物质致使 EC 显著降低有关^[36-37]. 同时也表明上述这些处理技术有助于提高鸡粪农田施用的生物安全性。

2.3 不同技术的综合对比

由图 7a 和 b 可知,所有处理的氮素气态损失均以 NH_3 挥发为主(占比>98.0%),含碳气体排放均以 CO_2 排放(占比>99.0%). 醋糟处理和生物炭处理均不同程度的降低了氮素气态损失(降幅分别为 12.4%—32.2% 和 31.2%—36.2%),而菌剂处理则增加了氮素损失(增幅为 39.4%—63.3%). 不同施用方式之间,醋糟和生物炭覆盖技术的减排效果优于混合处理. 此外,不同处理方式对鸡粪含碳气体排放的影响和对氮素损失的影响基本一致,亦即醋糟处理和生物炭处理降低了含碳气体排放,而菌剂处理增加了含碳气体排放(图 7b). 由图 7c 可知,直接($\text{GHG}_{\text{N}_2\text{O}}$)和间接($\text{GHG}_{\text{inN}_2\text{O}}$)温室气体排放的长生命周期 N_2O 均是鸡粪温室气体最重要的组成,两者贡献率高达为 85.0%—90.0%,短生命周期的

CH₄ 排放贡献相对较小, 约为 10.0%—14.7%. 不同处理之间, 生物炭覆盖和混合处理的减排效果(降幅 47.5%—49.9%) 优于醋糟覆盖和混合处理(降幅 23.0%—35.9%), 而菌剂处理却增加了温室气体排放(增幅 19.3%—36.7%).

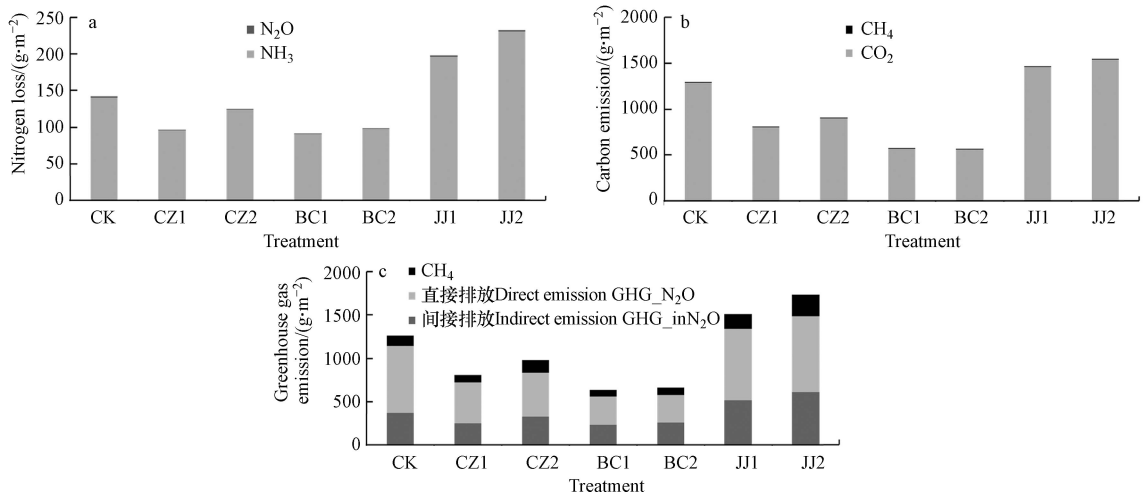


图 7 不同处理下鸡粪的养分损失和气体排放

a. 氮损失; b. 含碳气体排放; c. 温室气体排放

Fig.7 Nutrient losses and gas emissions of stored chicken manure under different treatments

a. nitrogen loss; b. carbon-contained gas emissions; c. greenhouse gas emissions

不同技术对鸡粪温室气体排放和发芽指数的综合影响如图 8 所示. 结果发现, 在所列的 5 个维度上, 与 CK 相比, 生物炭处理 BC1 和 BC2 的温室气体减排效果以及对鸡粪发芽指数的改良效果最优. 相较而言, 醋糟处理 CZ1 和 CZ2 对温室气体排放具有明显减排效果, 但 CZ2 处理存在增加 CH₄ 排放的风险. 而菌剂处理虽然可以一定程度上提高鸡粪的种子发芽指数, 但却会导致氮素气态损失和温室气体排放加剧, 因此难以独立成为控制鸡粪存储环境污染的技术.

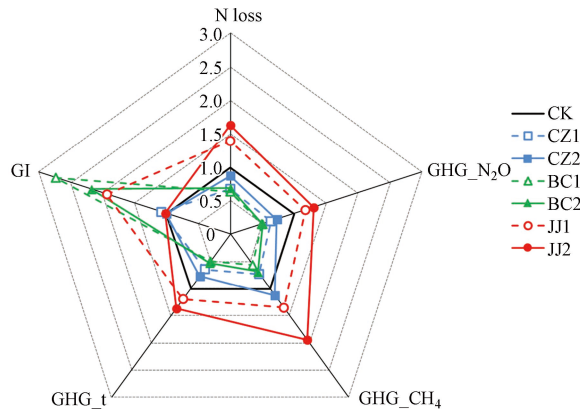


图 8 不同管理技术对鸡粪存储氮损失(N loss)、温室气体排放(GHG_N₂O: N₂O 的 CO₂-e 排放, GHG_CH₄: CH₄ 的 CO₂-e 排放, GHG_t: N₂O 和 CH₄ 总和的 CO₂-e 排放)及其种子发芽指数(GI)的综合影响

Fig.8 Comprehensive effects of different management techniques on storage nitrogen loss(N loss), greenhouse gas emissions(GHG_N₂O: CO₂-e emissions from N₂O, GHG_CH₄: CO₂-e emissions from CH₄, GHG_t: CO₂-e emissions combined for N₂O and CH₄)and germination index(GI)of chicken manure

综上, 除了添加菌剂增加了鸡粪温室气体排放之外, 醋糟和生物炭均是有效降低氮素损失和温室气体排放的减排措施, 但这两种措施对长生命周期 N₂O 和短生命周期 CH₄ 温室气体排放的减排效率存在一定差异, 而这些差异与全球温室气体排放的短期和长期控制目标密切相关^[38-39]. 《巴黎协定》中明确提出了 2030 年全球甲烷的控制目标, 这在一定程度上影响了 N₂O 和 CH₄ 两种温室气体的权衡, 即在 CO₂-e (100 年期限) 等量排放的前提下, 增加了对 CH₄ 控制的迫切性, 然而这会导致 N₂O 的减排进程变缓, 增加了实现 2100 年控制气温增加不超过 2 °C 的难度^[40]. 从这种角度看, 由于鸡粪温室气体

排放主要以直接或间接 N_2O 为主(图 7c), 且生物炭和醋糟处理对 N_2O 的减排控制效果均优于 CH_4 , 尤其是生物炭处理, 这表明鸡粪存储中应用生物炭可兼顾养殖业粪污 N_2O 和 CH_4 的同步减排, 不会造成 N_2O 控制进程的失衡. 另外, 由于本研究监测时间较短, 未来还需要在养殖场尺度, 针对鸡粪存储过程中施用生物炭的控制技术减排效果、可操作性和实用性开展大量的实地监测, 进一步校验和核实该技术的应用效果.

3 结论(Conclusion)

(1) 鸡粪存储过程中氮素损失主要以 NH_3 排放为主, 温室气体主要以直接和间接 N_2O 排放为主.

(2) 菌剂处理增加了鸡粪存储中氮素气态损失和温室气体排放.

(3) 醋糟和生物炭的覆盖和混合处理均可显著降低鸡粪存储过程中氮素气态损失和温室气体排放, 但醋糟混合处理有增加甲烷排放的风险. 与之相比, 生物炭覆盖和混合处理均可同步降低长生命周期气体 N_2O 和短生命周期 CH_4 排放.

(4) 醋糟、生物炭处理均可降低鸡粪 EC, 并提高鸡粪氨氮含量和种子发芽指数.

综上所述, 在鸡粪存储时添加生物炭在鸡粪养分含量提升、养分损失以及温室气体减排等维度均优于酸性醋糟和生物菌剂.

参考文献 (References)

- [1] 巴士迪, 张克强, 杨增军, 等. 奶牛粪便翻堆式与槽式堆肥过程气体排放规律及养分损失原位监测 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(2): 420-429.
BA S D, ZHANG K Q, YANG Z J, et al. The *In-situ* monitoring of gas emissions and nutrient losses from turning and trough composting of dairy manure [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(2): 420-429(in Chinese).
- [2] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)][R]. IPCC, Geneva, Switzerland: 151.
- [3] LIAO W H, LIU C J, JIA S Y, et al. Comparing NH_3 emissions under different cattle housing conditions in cold regions in China with an inverse dispersion technique [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 301-302: 108355.
- [4] 李昂臻, 陈思旭, 李海燕, 等. 北方某省会城市主要水库富营养化程度、特征和防治对策 [J]. *环境化学*, 2020, 39(9): 2529-2539.
LI A Z, CHEN S X, LI H Y, et al. Characteristics and evaluation of eutrophication in major reservoirs of a northern city in China [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(9): 2529-2539(in Chinese).
- [5] 刘学军, 沙志鹏, 宋宇, 等. 我国大气氨的排放特征、减排技术与政策建议 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(1): 149-157.
LIU X J, SHA Z P, SONG Y, et al. China's atmospheric ammonia emission characteristics, mitigation options and policy recommendations [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(1): 149-157(in Chinese).
- [6] 王雪君, 高志岭, 刘学军, 等. 养殖场、农田和道路大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征分析 [J]. *环境化学*, 2017, 36(11): 2398-2407.
WANG X J, GAO Z L, LIU X J, et al. Composition analysis of water-soluble ions in atmospheric $PM_{2.5}$ from dairy farm, farmland and road [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(11): 2398-2407(in Chinese).
- [7] DAI X R, SAHA C K, NI J Q, et al. Characteristics of pollutant gas releases from swine, dairy, beef, and layer manure, and municipal wastewater [J]. *Water Research*, 2015, 76: 110-119.
- [8] HOLLY M A, LARSON R A. Thermochemical conversion of biomass storage covers to reduce ammonia emissions from dairy manure [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(11): 434.
- [9] 江滔, SCHUCHARDT F, 李国学. 冬季堆肥中翻堆和覆盖对温室气体和氨气排放的影响 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 212-217.
JIANG T, SCHUCHARDT F, LI G X. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 212-217(in Chinese).
- [10] 朱海生, 左福元, 董红敏, 等. 覆盖材料和厚度对堆存牛粪氨气和温室气体排放的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 223-229.
ZHU H S, ZUO F Y, DONG H M, et al. Effects of covering materials and sawdust covering depths on ammonia and greenhouse gas emissions from cattle manure during storage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 223-

- 229(in Chinese).
- [11] 李顺义, 张红娟, 郭夏丽, 等. 畜禽粪便堆肥过程中氨挥发及调控措施 [J]. *农机化研究*, 2010, 32(1): 13-17.
LI S Y, ZHANG H J, GUO X L, et al. Ammonia volatilization and the regulation measures in the livestock manure compost [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(1): 13-17(in Chinese).
- [12] 黄向东, 薛冬. 添加竹炭对猪粪堆肥过程中升温脱水及氮素损失的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1057-1062.
HUANG X D, XUE D. Effects of bamboo biochar addition on temperature rising, dehydration and nitrogen loss during pig manure composting [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1057-1062(in Chinese).
- [13] LEHMANN J, Da SILVA J P Jr, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [14] 胡菊, 秦莉, 吕振宇, 等. VT菌剂接种堆肥的作用效果及生物效应 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊2): 604-608.
HU J, QIN L, LV Z Y, et al. Function and field test of compost inoculated with VT microbes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Sup 2): 604-608 (in Chinese).
- [15] 胡菊. VT菌剂在好氧堆肥中的作用机理及肥效研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
HU J. The mechanism of aerobic composting with the inoculation of VT agent and the field testing of composting products [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005 (in Chinese).
- [16] CHEN H Y, AWASTHI S K, LIU T, et al. Effects of microbial culture and chicken manure biochar on compost maturity and greenhouse gas emissions during chicken manure composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121908.
- [17] 谢军飞, 李玉娥, 董红敏, 等. 堆肥处理蛋鸡粪时温室气体排放与影响因素关系 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 192-195.
XIE J F, LI Y, DONG H M, et al. Influence of different factors on greenhouse gas emissions in composting of layer-hen manure with closed composting bins [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(1): 192-195(in Chinese).
- [18] JIA X Y, WANG M, YUAN W Q, et al. The influence of biochar addition on chicken manure composting and associated methane and carbon dioxide emissions [J]. *BioResources*, 2016, 11(2): 5255-5264.
- [19] 侯玉勇. 菌糠对猪粪好氧堆肥理化性质的影响及对腐熟特性的评价研究 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021.
HOU Y Y. Effect of fungus chaff on physicochemical properties of pig manure aerobic composting and evaluation of its ripening characteristics [D]. Ala'er: Tarim University, 2021 (in Chinese).
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000(in Chinese).
- [21] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY/T525-2021 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Ministry of Agriculture of the PRC. Organic fertilizer: NY/T525-2021 [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021(in Chinese).
- [22] 罗一鸣, 魏宗强, 孙钦平, 等. 沸石作为添加剂对鸡粪高温堆肥氨挥发的影响 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 243-247.
LUO Y M, WEI Z Q, SUN Q P, et al. Effects of zeolite addition on ammonia volatilization in chicken manure composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 243-247 (in Chinese).
- [23] 张金瑞. 典型覆盖物对堆存牛粪氨气和温室气体排放影响研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
ZHANG J R. Study on the impact of the typical covering on the ammonia and greenhouse gases emissions from cattle manure [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019 (in Chinese).
- [24] 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(in Chinese).
- [25] 曹喜涛, 黄为一, 常志州, 等. 鸡粪堆肥中氮转化微生物变化特征的初步研究 [J]. *土壤肥料*, 2004(4): 40-43.
CAO X T, HUANG W Y, CHANG Z Z, et al. Nitrogen transformations and the successions of microbial community during chicken manure composting [J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(4): 40-43 (in Chinese).
- [26] 李慧杰, 王一明, 林先贵, 等. 沸石和过磷酸钙对鸡粪条垛堆肥甲烷排放的影响及其机制 [J]. *土壤*, 2017, 49(1): 63-69.
LI H J, WANG Y M, LIN X G, et al. Effects of adding zeolite and superphosphate on greenhouse gas emission and methanogens during chicken manure composting [J]. *Soils*, 2017, 49(1): 63-69(in Chinese).
- [27] 谢军飞, 李玉娥. 不同堆肥处理猪粪温室气体排放与影响因子初步研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(1): 56-59.
XIE J F, LI Y. Release of greenhouse gases from composting treatments on piggery excreta [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(1): 56-59(in Chinese).
- [28] 孙凯佳, 戚鑫, 付彤, 等. 塑料薄膜覆盖对牛粪便温室气体排放的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 262-267.
SUN K J, QI X, FU T, et al. Effects of plastic sheet covering on greenhouse gas emission from beef cattle manure during storage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 262-267(in Chinese).
- [29] HE X Q, CHEN L J, HAN L J, et al. Evaluation of biochar powder on oxygen supply efficiency and global warming potential during mainstream large-scale aerobic composting [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 245: 309-317.

- [30] GUO R, LI G X, JIANG T, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 112: 171-178.
- [31] 刘立, 张朝升, 赵美花. 生物炭对好氧堆肥化处理影响的研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(9): 170-175, 182.
LIU L, ZHANG C S, ZHAO M H. Impacts of biochar on aerobic composting: A review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(9): 170-175, 182 (in Chinese).
- [32] 陈是吏, 袁京, 李国学, 等. 过磷酸钙和双氰胺联用减少污泥堆肥温室气体及NH₃排放 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 199-206.
CHEN S L, YUAN J, LI G X, et al. Combination of superphosphate and dicyandiamide decreasing greenhouse gas and NH₃ emissions during sludge composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 199-206 (in Chinese).
- [33] CHEN M L, WANG C, WANG B R, et al. Enzymatic mechanism of organic nitrogen conversion and ammonia formation during vegetable waste composting using two amendments [J]. *Waste Management*, 2019, 95: 306-315.
- [34] YANG Y, WANG G Y, LI G X, et al. Selection of sensitive seeds for evaluation of compost maturity with the seed germination index [J]. *Waste Management*, 2021, 136: 238-243.
- [35] 黄国锋, 钟流举, 张振铤, 等. 猪粪堆肥化处理过程中的氮素转变及腐熟度研究 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1459-1462.
HUANG G F, ZHONG L J, ZHANG Z T, et al. On nitrogen transformations and maturity during composting of pig manure [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1459-1462 (in Chinese).
- [36] 罗一鸣, 张丽丽, 吴迪梅, 等. VT菌剂对规模养猪场粪便高温堆肥腐熟进程的影响 [J]. *环境工程*, 2015, 33(增刊1): 610-614.
LUO Y M, ZHANG L L, WU D M, et al. Effects of VT microbes on high-temperature composting process of pig manure [J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(Sup 1): 610-614 (in Chinese).
- [37] 朱金霞, 周文生, 乔长晟, 等. 微生物菌剂对玉米秸秆堆腐发酵过程的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(11): 45-49.
ZHU J X, ZHOU W S, QIAO C S, et al. Effect of microbial agents on corn straw composting fermentation process [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(11): 45-49 (in Chinese).
- [38] SMITH M A, CAIN M, ALLEN M R. Further improvement of warming-equivalent emissions calculation [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2021, 4: 19.
- [39] CAIN M, LYNCH J, ALLEN M R, et al. Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2019, 2(1): 29.
- [40] RIDOUTT B, LEHNERT S A, DENMAN S, et al. Potential GHG emission benefits of *Asparagopsis taxiformis* feed supplement in Australian beef cattle feedlots [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337: 130499.