

奶牛场 2 种粪污处理模式碳足迹的 Meta 分析

叶小梅, 王莉, 张曼秋, 张应鹏, 杜静 (江苏省农业科学院畜牧研究所农业农村部种养结合重点实验室, 江苏南京 210014)

摘要 [目的]为综合评估不同奶牛粪污处理方式的温室气体排放规律。[方法]采用 Meta 分析法研究了粪污静态堆肥过程中、厌氧发酵过程及发酵后沼液在储存和还田过程中温室气体的排放规律。[结果]静态堆肥过程中 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 的排放因子分别为 3.66、86.77、1.70 g/kg; 厌氧发酵过程中单位沼气产量为 0.245 L/g; 厌氧发酵后沼液储存和还田过程中 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 的排放因子分别为 10.88、83.80、5.72 g/kg。对比分析结果显示, 厌氧发酵后沼液在储存和还田过程中 CH_4 和 N_2O 的排放量显著高于静态堆肥过程中的排放量, 而 2 种粪污处理模式 CO_2 的排放量间无显著差异; 但因厌氧发酵产生的 CH_4 可用于发电, 能有效减少温室气体的排放。[结论]测算显示, 厌氧发酵管理阶段温室气体的综合排放量为 $-1\ 239.91\ \text{kg/Ueq}$, 较静态堆肥具有更好的碳减排效果。

关键词 奶牛粪污; 静态堆肥; 厌氧发酵; Meta 分析; 温室气体

中图分类号 S19 文献标识码 A
文章编号 0517-6611(2023)02-0236-04
doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.02.057



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Meta Analysis on Carbon Footprint of Two Manure Treatment Modes in Dairy Farms

YE Xiao-mei, WANG Li, ZHANG Man-qiu et al (Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop and Livestock Integration, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Nanjing, Jiangsu 210014)

Abstract [Objective] In order to comprehensively evaluate the emission of greenhouse gases (GHGs) from different cow manure treatment methods. [Method] Meta analysis method was used to study the emission of GHGs during static composting process, anaerobic fermentation process and the storage and returning of biogas slurry after anaerobic fermentation. [Result] The emission factors of CH_4 , CO_2 and N_2O were 3.66, 86.77 and 1.70 g/kg in the process of static composting, respectively. In the anaerobic fermentation process, the unit biogas slurry yield was 0.245 L/g; The emission factors of CH_4 , CO_2 and N_2O were 10.88, 83.80 and 5.72 g/kg during the storage and returning of biogas slurry after anaerobic fermentation, respectively. There were significant differences in CH_4 and N_2O emissions between these two treatments, but no significant differences in CO_2 emissions between these two treatments. The results of comprehensive calculation showed that the total greenhouse gas emissions of anaerobic fermentation during storage and returning farmland were higher than that of static composting, but the CH_4 produced by anaerobic fermentation could be used for power generation, which could effectively reduce the greenhouse gas emissions produced by anaerobic fermentation. [Conclusion] The final comprehensive emission data of anaerobic fermentation greenhouse gas was $-1\ 239.91\ \text{kg/Ueq}$, which had better carbon emission reduction effect than static composting.

Key words Cow manure; Static composting; Anaerobic fermentation; Meta analysis; Greenhouse gases

随着规模奶牛厂的迅速发展, 大量粪污带来的环境压力不容小觑。目前, 奶牛场主要采用固体好氧堆肥及液体厌氧发酵的方式进行粪污的无害化及资源化利用, 粪污堆肥过程及厌氧发酵后沼液的储存和还田过程中均会产生温室气体的排放, 且排放量在整个处理过程中占比较大^[1-3], 目前我国畜禽粪污的年排放量为 38 亿 t, 其中全国奶牛粪污的年排放量约为 3.6 亿 t, 所以畜禽粪污处理的碳减排对实现农业的碳减排也起着重要的作用, 但目前还未对奶牛场不同粪污处理模式的碳排放进行核算。

Meta 分析是对若干独立研究的统计结果进行综合分析的统计方法, 可以弥补单一试验数据对粪污处理过程中温室气体的排放进行估算的局限性, 通过系统的整合所有相关文献数据, 得出相对准确的结果^[4]。但奶牛场粪污处理过程中温室气体排放的 Meta 分析主要集中于单一处理方式或全生命周期过程中进行分析, 如堆肥^[1]、厌氧发酵^[2]等。Ba 等^[5]以 41 篇科学论文为基础, 对 4 种主要的牛粪堆肥方式(静态、翻堆式、条垛和反应器)的温室气体(GHGs)和氨(NH_3)排放进行了 Meta 分析, 与其他堆肥方式相比, 翻堆式堆肥会导致更大的碳和氮损失, 尽管反应器堆肥显著促进了 NH_3 的

排放, 但较翻堆式堆肥减少了 82.84% 的温室气体损失。此外, 添加木屑或秸秆可使 CH_4 和 N_2O 排放量分别降低 66.3% 和 44.0%^[1]。Miranda 等^[2]以 30 篇论文产生的 89 个独立案例为基础, 运行单位的数据显示, 与基线情景相比, 沼液储存导致碳排放减少量的中位值为 43.2%, 沼液还田的碳排放减少量的中位值为 6.3%, 抵消化石燃料能源的碳排量减少量的中位值为 11.0%, 沼液替代无机肥料施用增加了碳排放量的中位值为 0.4%, 同时发现, 沼气池的泄漏大大增加了基线情景下的碳排放量(中位数 = 1.4%)。Jayasundara 等^[3]研究了加拿大奶牛场减少甲烷(CH_4)和一氧化二氮(N_2O)的策略, Meta 分析的结果显示, 减少粪便排放的策略有厌氧消化、堆肥、固液分离、覆盖沼液储存和燃除 CH_4 , 以及在春季施用沼液时完全排空沼液储存以及减少甲烷菌接种量。鉴于此, 笔者采用 Meta 分析方法比较分析奶牛场 2 种不同粪污处理模式的碳足迹, 为奶牛场粪污处理碳减排模式的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源 进行全面的文献检索和文献筛选工作, 主要通过中国知网(<http://www.cnki.net/>)和 Web of Science (<http://apps.webofknowledge.com/>) 2 个数据库检索关于奶牛场粪污处理过程中温室气体排放规律的文献。

畜禽粪污的处理主要有静态堆肥和厌氧发酵 2 种方式, 图 1a 表示静态堆肥相关搜索过程中的关键字和逻辑连接

基金项目 江苏现代农业产业技术体系建设专项资金(JATS[2020]391)。

作者简介 叶小梅(1976—), 女, 福建长汀人, 研究员, 博士, 从事有机废弃物资源化利用研究。

收稿日期 2022-01-24

器,共输出 925 篇文献,通过进一步的关键指标(奶牛粪便、静态堆肥、温室气体)筛选,最终检索出 13 篇文献(WOS 6 篇;知网 7 篇)^[6-18]。图 1b 表示厌氧发酵相关搜索过程中的

关键字和逻辑连接器,共输出 404 篇文献,经进一步关键指标(奶牛粪便、厌氧发酵、温室气体)的筛选,最终检索出 16 篇文献(WOS 12 篇;知网 4 篇)^[19-34]。

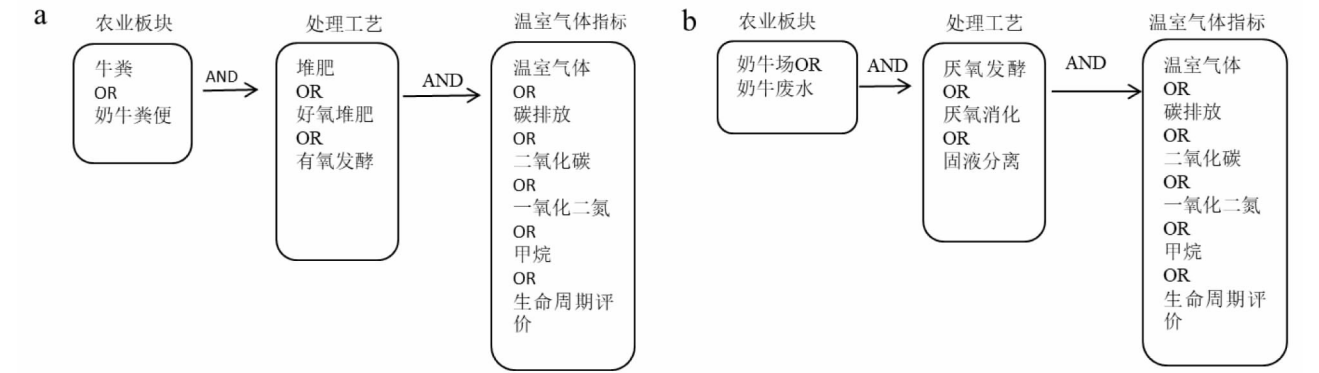


图 1 文献检索关键词和逻辑连接器
Fig.1 Literature search keywords and logical connectives

1.2 数据分析

1.2.1 单位换算。为对比不同处理方式的温室气体排放量,将文献中提取的 CO₂、CH₄、N₂O 排放量各自换算成统一的单位:ef_{CO₂}、ef_{CH₄}、ef_{N₂O}均为 g/kg。

厌氧发酵的产气能力用单位沼气产量表示为 L/g。

1.2.2 标准化。分析文献每个功能单元的不同温室气体排放量,为了使排放标准化,将其表示为二氧化碳当量(CO₂e)并计算如下式(1.1):

$$GHG_{CO_2} = \sum GWP_i \times GHG_i \tag{1}$$

式中,GHG_{CO₂}为每功能单元温室气体排放量;GWP_{*i*}为对应温室气体 *i* 的全球变暖潜势,GWP_{CO₂}为 1 kg/kg,GWPCH₄ 为 28 kg/kg,GWPN₂O 为 265 kg/kg;GHG_{*i*}为对应温室气体的排放量。

1.2.3 正态性检验。利用 SPSS 对收集换算后的数据进行正态性分布检验,对符合正态分布的采用平均值代表整体数据,不符合正态分布则取中位值代表整体数值,结果显示静态堆肥和厌氧发酵后沼液的储存及还田利用产生的温室气体排放数据为非正态性分布,取其中位值代表整体数值,而

厌氧发酵产气规律的数据符合正态分布,选用平均值代表整体数据。

2 结果与分析

2.1 奶牛粪静态堆肥过程中与厌氧发酵后沼液储存及还田的温室气体排放规律 根据对 13 篇文献,33 个案例数据的分析,可以得出奶牛粪污静态堆肥过程中温室气体的排放情况,其中关于静态堆肥过程中 CH₄ 的排放情况有 33 个案例,计算其中位值为 3.66 g/kg;关于静态堆肥过程中 CO₂ 排放情况有 24 个案例,计算其中位值为 86.77 g/kg;关于静态堆肥中 N₂O 的排放情况有 36 个案例,计算其中位值为 1.70 g/kg。根据对 9 篇文献,31 个案例的分析,可以得出奶牛粪污厌氧发酵后储存和还田过程中温室气体的排放情况。其中,关于 CH₄ 的排放情况有 15 个案例,计算其中位值为 10.88 g;关于 CO₂ 的排放情况有 5 个案例,计算其中位值为 83.8 g;关于 N₂O 的排放情况有 29 个案例,得出其中位值为 5.72 g/kg。方差分析结果显示,厌氧发酵后沼液储存及还田过程排放的 CH₄ 和 N₂O 量显著高于静态堆肥过程中产生的 CH₄ 和 N₂O 量,但 2 种粪污处理方式排放的 CO₂ 量间无显著差异(图 2)。

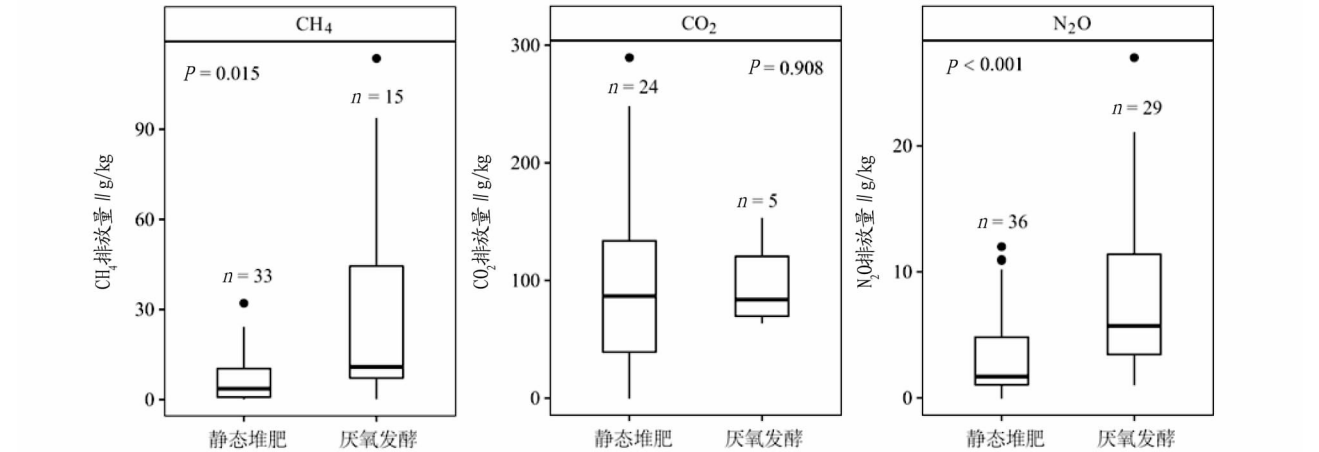


图 2 静态堆肥过程与厌氧发酵后沼液储存及还田过程温室气体排放规律

Fig.2 The law of greenhouse gas emission during static composting process and biogas slurry storage and returning to field after anaerobic fermentation

2.2 厌氧发酵过程中的产气规律 依据对检索出的 10 篇文献,65 个案例的数据进行提取,正态性分布检验显示提取出的数据符合正态性分布,计算出奶牛粪污厌氧发酵过程中 CH₄ 排放的平均值为 0.245 L/g。

2.3 不同处理方式对温室气体减排的影响

2.3.1 覆盖材料对静态堆肥过程中温室气体排放的影响。关于奶牛粪污静态堆肥过程中的覆盖材料,主要包含玉米秸秆、锯末、稻草、植物油和塑料布等。最后筛选出的文献中有 8 个案例研究了玉米秸秆对粪污覆盖的影响(表 1),结果表明,秋冬季节覆盖玉米秸秆有利于 CH₄ 的减排,减排量为

7.1%~62.9%,春夏季节反而增加了其排放量,增加量为 8.9%~117.5%;而玉米秸秆覆盖有利于 CO₂ 和 N₂O 的减排,减排率分别为 6.9%~14.3%和 10.0%~73.2%。6 个案例研究了锯末覆盖对粪污静态堆肥的影响,结果表明锯末覆盖增加了静态堆肥过程中 CH₄ 和 N₂O 的排放量,分别增加了 17.9%~37.0%和 6.0%~20.0%;而减少了 CO₂ 的排放量为 4.6%~13.2%。关于稻草、植物油和塑料布覆盖对奶牛粪污静态堆肥温室气体排放的影响研究较少,已有的研究结果显示稻草覆盖不利于其 CH₄ 和 N₂O 的减排,但对 CO₂ 的排放有正面效益;多孔油布覆盖有利于 N₂O 的减排,对于 CH₄ 的排放无显著性影响。

表 1 覆盖材料对静态堆肥过程温室气体排放的影响

Table 1 Effects of mulching materials on greenhouse gas emissions from static composting

覆盖物 Covering	案例数 Number of cases//%	对 CH ₄ 排放的影响 Impact on CH ₄ emission//%	对 CO ₂ 排放的影响 Impact on CO ₂ emission//%	对 N ₂ O 排放的影响 Impact on N ₂ O emission//%
玉米秸秆 Corn straw	8	-62.9~-7.1(秋冬) 8.9~117.5(春夏)	-14.3~-6.9	-73.2~-10.0
锯末 Sawdust	6	17.9~37.0	-13.2~-4.6	6.0~20.0

2.3.2 共消化物质对厌氧发酵产气的影响。厌氧发酵的主要产物为甲烷,有效利用甲烷可产生电能,从而减少温室气体的排放。为提升牛粪厌氧发酵的产气效率,研究牛粪与不同物质共消化的产气能力。由表 2 可知,主要共消化物质有玉米秸秆、卷心菜、芹菜、蘑菇渣、甜菜、萝卜等。研究玉米秸秆与牛粪共消化后的单位沼气产量案例共有 16 个,结果表明中温条件(35℃)下,牛粪与玉米秸秆的比例为 10:90 时单位沼气产量最高,为 0.216 L/g,高温条件(55℃)下,牛粪与玉米秸秆的比例为 50:50 时单位沼气产量最高,为 0.400 L/g;卷心菜与牛粪共消化后的单位沼气产量的案例共有 7 个,结果表明中温条件(37℃)下,牛粪与卷心菜的比例为 50:50 时单位沼气产量最高,为 0.311 L/g;芹菜与牛粪共消化后的单位沼气产量的案例共有 7 个,结果表明中温条件(37℃)下,牛粪与卷心菜比例为 25:75 时单位沼气产量最

高,为 0.282 L/g;蘑菇渣、甜菜和食物残渣与牛粪共消化后的单位沼气产量的案例共有 12 个,结果表明中温条件(35℃)下,牛粪与蘑菇渣的比例为 75:25 时单位沼气产量最高,为 0.197 L/g,牛粪与食物残渣的比例为 50:50 时单位沼气产量最高,为 0.459 L/g,高温条件(55℃)下,牛粪与甜菜的比例为 75:25 时单位沼气产量最高,为 0.159 L/g;萝卜与牛粪共消化后的单位沼气产量的案例共有 12 个,结果表明中温条件(30℃)下,牛粪与萝卜的比例为 40:60 时单位沼气产量最高,为 0.357 L/g。

2.3.3 固液分离与覆盖对厌氧发酵后沼液储存加还田温室气体排放的影响。厌氧发酵后温室气体的排放主要来源于沼液、沼渣的储存以及还田阶段,为减少温室气体的排放量,常用的方法有厌氧发酵前或后的固液分离以及在储存过程中进行覆盖。有 6 个案例研究了固液分离对厌氧发酵温室气体排放的影响,结果表明固液分离有利于 CH₄ 的减排,减排量为 14.70%~30.49%,而固液分离反而增加了 CO₂ 和 N₂O 的排放,增加量分别为 9.60%和 6.78%。有 8 个案例研究了覆盖对沼液储存过程中温室气体排放的影响,结果表明覆盖增加了 CH₄ 的排放,增加量为 130.00%左右;以对于 N₂O 排放的影响来看,冬季覆盖稻草有利于 N₂O 的减排,减排量为 8.93%左右,夏季覆盖增加了 N₂O 排放量,增加量为 4.45%~20.63%,冬季覆盖木盖增加了其排放量,增加量为 2.70%左右,夏季覆盖木盖有利于减排,减排量为 18.96%左右。

2.4 最终核算 静态堆肥过程中与厌氧发酵沼液储存和还田的总温室气体排放量根据排放因子与式(1)计算可得,单位奶牛静态堆肥年排放 CO₂ 的量为 464.51 kg,CH₄ 为 7.13 kg, N₂O 为 1.70 kg, GHG_{CO₂} 为 1 114.65 kg/Ueq,单位奶牛厌氧发酵年产甲烷量为 135.00 kg, GHG_{CO₂} 为-3 780.00 kg/Ueq;单位奶牛厌氧发酵后沼液储存加还田年排放 CO₂ 量为 410.87 kg,CH₄ 为 18.5 kg, N₂O 为 5.72 kg, GHG_{CO₂} 为 2 540.09 kg/Ueq,厌氧发酵管

表 2 共消化物质对厌氧发酵产气量的影响

Table 2 Effects of co-digested substances on anaerobic fermentation gas production

共消化物质组合 Co-digestible material combination	案例数 Number of cases//个	共消化温度 Co-digestion tempe- rature//℃	物质配比 Material ratio	最高单 位产气量 Maximum unit gas pro- duction//L/g
牛粪与玉米秸秆 Cow dung and corn straw	16	35(中温)	10:90	0.216
牛粪与卷心菜 Cow dung and cabbage	7	55(高温)	50:50	0.400
牛粪与芹菜 Cow dung and celery	7	37	50:50	0.311
牛粪与蘑菇渣 Cow dung and mushroom residue	12	37	25:75	0.282
牛粪与食物残渣 Cow dung and food residue	12	37	75:25	0.197
牛粪与甜菜 Cow dung and beet	12	35	50:50	0.459
牛粪与萝卜 Cow dung and radish	12	55	75:25	0.159
	12	30	40:60	0.357

理阶段 GHG_{CO_2} 综合数据为 $-1\ 239.91\ \text{kg}/\text{Ueq}$ 。

3 小结与讨论

静态堆肥和厌氧发酵是实现畜禽粪污无害化及资源化的 2 种主要处理方式^[1-3],静态堆肥不仅能实现畜禽粪污的减量化,而且产生了富含腐殖质的有机肥,有机肥的施用能提高作物的产量及品质,显著提高作物的产量及品质;厌氧发酵能实现大体量粪水的处理,不仅产生了清洁能源沼气,而且产生的沼液富含养分、腐殖酸、氨基酸等生物活性物质,是一种优质的液体有机肥,科学合理的施用能显著提高作物的产量及品质。但静态堆肥和厌氧发酵后产生的沼液在储存和还田过程中均会释放温室气体 CH_4 、 CO_2 、 N_2O ^[3],温室气体的排放会加剧全球气温的升高,目前气候变暖及其影响是国际社会共同关注和广泛研究的焦点性问题。目前我国畜禽粪污的年产量为 38 亿 t,而全国奶牛粪污的年产量为 3.6 亿 t,因此对奶牛场粪污的主要处理环节进行碳足迹分析,可为规模化奶牛场粪污处理碳减排模式的选择提供科学依据。

该研究通过 Meta 分析法,系统整合了与静态堆肥及厌氧发酵温室气体排放相关的所有文献数据,相较之前单一分析某种处理方式过程中的温室气体排放情况,该研究比较分析了静态堆肥和厌氧发酵 2 种粪污处理过程中产生温室气体 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 的量,研究结果显示厌氧发酵处理产生的沼液在储存和还田过程中排放的 CH_4 和 N_2O 量显著高于静态堆肥过程中释放的量,但 2 种处理方式间排放的 CO_2 无显著差异。但因厌氧发酵产生了大量可用于发电的 CH_4 ,减少了煤炭燃烧排放的 CO_2 量,最后综合测算出单位奶牛厌氧发酵管理阶段 GHG_{CO_2} 综合数据为 $-1\ 239.91\ \text{kg}/\text{Ueq}$,而静态堆肥产生的 GHG_{CO_2} 为 $1\ 114.65\ \text{kg}/\text{Ueq}$,所以厌氧发酵具有更好的碳减排潜力。

该研究也采用 Meta 分析法评估了不同处理方式对温室气体减排的影响,静态堆肥过程中覆盖有利于温室气体减排,厌氧发酵后沼液储存过程中覆盖木盖有利于温室气体减排,厌氧发酵过程中玉米秸秆和食物残渣与牛粪共消化的产气能力较好。

参考文献

- [1] 巴士迪.奶牛粪便堆肥过程温室气体和氨气排放规律及养分损失研究[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [2] MIRANDA N D, TUOMISTO H L, MCCULLOCH M D. Meta-analysis of greenhouse gas emissions from anaerobic digestion processes in dairy farms[J]. *Environmental science & technology*, 2015, 49(8): 5211-5219.
- [3] JAYASUNDARA S, RANGA NIROSHAN APPUHAMY J A D, KEBREAB E, et al. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian dairy farms and mitigation options: An updated review[J]. *Canadian journal of animal science*, 2016, 96(3): 306-331.
- [4] 程新, 黄林, 李昆太. Meta 分析: 一种新的文献综述方法[J]. *广东农业科学*, 2010, 37(6): 376-378.
- [5] BA S D, QU Q B, ZHANG K Q, et al. Meta-analysis of greenhouse gas and ammonia emissions from dairy manure composting[J]. *Biosystems engineering*, 2020, 193: 126-137.
- [6] MULBRY W, AHN H. Greenhouse gas emissions during composting of dairy manure: Influence of the timing of pile mixing on total emissions[J]. *Biosystems engineering*, 2014, 126: 117-122.
- [7] EL KADER N A, ROBIN P, PAILLAT J M, et al. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting[J]. *Bioresource technology*, 2007, 98(14): 2619-2628.
- [8] 赵加磊. 日粮添加剂对奶牛粪便堆肥过程温室气体、氨排放和碳氮变化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

- [9] 陆日东. 奶牛粪便温室气体排放及影响因素研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [10] 朱新梦, 董爱怡, 王洪媛, 等. 牛粪堆肥方式对温室气体和氨气排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 258-264.
- [11] 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.
- [12] 高翔. 农业废弃物常规堆置与条带式堆肥过程原位观测温室气体排放研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [13] 崔利刚, 王效琴, 梁东丽, 等. 不同堆高奶牛粪便长期堆积过程中温室气体和氨排放特点[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(2): 376-382.
- [14] AHN H K, MULBRY W, WHITE J W, et al. Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting of dairy manure[J]. *Bioresource technology*, 2011, 102(3): 2904-2909.
- [15] 李文圣. 不同组群奶牛粪便堆肥过程中温室气体排放及碳氮转化规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [16] SOMMER S G. Effect of composting on nutrient loss and nitrogen availability of cattle deep litter[J]. *European journal of agronomy*, 2001, 14(2): 123-133.
- [17] YAMULKI S. Effect of straw addition on nitrous oxide and methane emissions from stored farmyard manures[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2006, 112(2/3): 140-145.
- [18] VERGOTE T L I, BODÉ S, DE DOBBELAERE A E J, et al. Monitoring methane and nitrous oxide emissions from digestate storage following manure mono-digestion[J]. *Biosystems engineering*, 2020, 196: 159-171.
- [19] 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(2/3): 153-162.
- [20] HOLLY M A, LARSON R A, POWELL J M, et al. Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2017, 239: 410-419.
- [21] SAUNDERS O E, FORTUNA A M, HARRISON J H, et al. Gaseous nitrogen and bacterial responses to raw and digested dairy manure applications in incubated soil[J]. *Environmental science & technology*, 2012, 46(21): 11684-11692.
- [22] MOHANKUMAR SAJEEV E P, WINIWARTER W, AMON B. Greenhouse gas and ammonia emissions from different stages of liquid manure management chains: Abatement options and emission interactions[J]. *Journal of environmental quality*, 2018, 47(1): 30-41.
- [23] DE VRIES J W, GROENESTEN C M, DE BOER I J M. Environmental consequences of processing manure to produce mineral fertilizer and bio-energy[J]. *Journal of environmental management*, 2012, 102: 173-183.
- [24] THOMSEN I K, OLESEN J E, MØLLER H B, et al. Carbon dynamics and retention in soil after an aerobic digestion of dairy cattle feed and faeces[J]. *Soil biology and biochemistry*, 2013, 58: 82-87.
- [25] CLEMENS J, TRIMBORN M, WEILAND P, et al. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2006, 112(2/3): 171-177.
- [26] PAIN B F, WEST R, OLIVER B, et al. Mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry on a farm scale: First comparisons between digestion before and after solids separation[J]. *Journal of agricultural engineering research*, 1984, 29(3): 249-256.
- [27] SAFLEY L M, Jr, WESTERMAN P W. Biogas production from anaerobic lagoons[J]. *Biological wastes*, 1988, 23(3): 181-193.
- [28] 张彤. 温度和 pH 值调控对厌氧发酵产甲烷影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [29] 李永平, 庞震鹏, 朱敦宁, 等. 牛粪与玉米秸秆不同配比厌氧发酵的产气性能[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(10): 73-81.
- [30] 白岩. 尾菜与牛粪混合厌氧消化工艺的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [31] 李瑞栋, 赵昱皓, 张大磊. 蘑菇渣与牛粪厌氧共消化的可行性研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2019, 40(3): 88-93, 106.
- [32] BELLE A J, LANSING S, MULBRY W, et al. Anaerobic co-digestion of forage radish and dairy manure in complete mix digesters[J]. *Bioresource technology*, 2015, 178: 230-237.
- [33] BATOOL N, QAZI J I, AZIZ N, et al. Bio-methane production potential assays of organic waste by anaerobic digestion and Co-digestion[J]. *Pakistan journal of zoology*, 2020, 52(3): 971-976.
- [34] GÓMEZ-QUIROGA X, ABOUDI K, FERNÁNDEZ-GÜELFO L A, et al. Thermophilic anaerobic co-digestion of exhausted sugar beet pulp with cow manure to boost the performance of the process: The effect of manure proportion[J]. *Water*, 2021, 13(1): 1-18.