

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.026

不同泌乳期奶牛粪便碳氮变化与温室气体排放特点研究

王效琴^{1,2} 李文圣¹ 王旭东^{1,2} 梁东丽^{1,2} 赵加磊¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 试验采集不同泌乳期(高产组、中产组、低产组)奶牛新鲜粪便进行90 d的自然堆积,用静态箱-气相色谱法测定了堆积过程中CO₂、CH₄和N₂O的排放量,并测定TOC、TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的含量变化。结果表明,不同泌乳期奶牛粪便初始总有机碳、总氮和碳氮比存在差异,牛粪初始总有机碳和总氮含量从高到低依次为高产组、中产组和低产组,而总有机碳和全氮比值的大小排序则与此相反。这些差异导致牛粪堆积过程中温室气体排放量的差异,非CO₂温室气体CH₄和N₂O累积排放量及总温室气体排放量(以二氧化碳当量计,CO₂eq)大小顺序均为高产组、中产组、低产组,低产组总温室气体排放量显著低于高产组和中产组。3种气体中温室效应贡献最大的是CO₂,占总温室效应的一半以上,CH₄和N₂O的温室效应贡献相近,分别为20%~21%和17%~21%。堆积过程中3个处理N₂O-N的累积排放量与TN含量呈显著正相关关系,与碳氮比呈显著负相关关系;CH₄-C、CO₂-C、CO₂-C+CH₄-C累积排放量与牛粪TOC含量、碳氮比没有显著相关关系。与高产组和中产组比,低产组奶牛粪便在90 d的堆积试验结束后,损失较多的碳素而保留了较高的氮素。

关键词: 奶牛粪便; 泌乳期; 堆积过程; 温室气体

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)03-0179-07

Greenhouse Gases Emissions and Varies of Carbon and Nitrogen of Manure from Different Lactating Period Cows

Wang Xiaojin^{1,2} Li Wensheng¹ Wang Xudong^{1,2} Liang Dongli^{1,2} Zhao Jialei¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Dairy systems are the important greenhouse gases emissions source, in which manure management is one of the three major GHG emission sources. Most researches focused on the effects of external conditions, such as additives, composting materials, composting height, stacking mode, and the frequency of pile up on the greenhouse gas emissions of livestock manure composting process, while a few studies focused on the impact of diet on greenhouse gas emissions from manure. Different diets were fed to dairy cows during different lactating period, which results in different physical and chemical properties of manure. The objective of the study was to quantify the greenhouse gas emissions and varies of carbon and nitrogen of manure from cows during different lactating periods. Fresh manure from cows during different lactating periods was collected and piled up naturally. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O were measured by using static chamber-GC technique, at the same time, the content of TOC, TN, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N were measured. The results showed that there was difference in content of TOC, TN and C/N between manure from different lactating period cows (high group, middle group and low group). At the beginning of piling, manure from high group contained the highest TOC and TN, followed by middle group, then

收稿日期: 2015-11-14 修回日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201588)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11)和中央高校基本科研业务费专项基金项目(QN2012039)

作者简介: 王效琴(1974—),女,讲师,博士,主要从事农业源温室气体排放与减排研究,E-mail: xqwang@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 王旭东(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事环境化学研究,E-mail: wangxudong01@126.com

low group, in opposite for the ration of TOC to TN. These differences resulted in accumulative emissions of greenhouse gas differently. The highest accumulative emissions of CH₄ and N₂O were measured from high cow group, followed by middle group and then low group. The total greenhouse gas emission from low group was significantly low than that from middle group and high group. CO₂ accounted for more than half of the total greenhouse gas emission, CH₄ and N₂O contributed 20% ~ 21% and 17% ~ 21% to the total emissions, respectively. Accumulative emission of N₂O-N was significantly positive correlation with TN content, in opposite with the ratio of TOC to TN. Accumulative emission of CH₄-C, CO₂-C and CO₂-C + CH₄-C had no significant correlation with TOC content and the ratio of TOC to TN.

Key words: cattle manure; lactating period; piling; greenhouse gas

引言

20世纪50年代以来,大气中温室气体浓度变化引起的全球气候变化问题受到了普遍关注^[1]。畜牧业是重要的温室气体排放源,占全球人为温室气体排放量的18%^[2],其中,牛奶生产系统占全球畜牧业温室气体排放的22%^[3]。奶牛养殖系统中,瘤胃、饲料生产和粪便管理是3个主要的温室气体排放环节^[4]。作为畜禽养殖系统中主要温室气体排放环节,畜禽粪便的温室气体排放特点及减排措施受到了广泛关注^[5-6]。在影响堆肥温室气体排放的因素方面,多数研究集中在添加剂^[7-8]、堆肥材料、堆肥高度、堆放方式和翻堆频率等外部条件^[9-12]对畜禽粪便堆肥过程温室气体排放的影响,只有少数研究涉及日粮对粪便温室气体排放的影响^[13-14]。从研究所关注的粪便管理方式上,多数集中在好氧堆肥模式,且粪便来源都是养殖场的混合粪便,尚未见针对不同牛群粪便源的研究报道。

规模化奶牛场为了提高产奶量及节约成本,对处于不同泌乳期的奶牛分栏饲养且饲喂不同配方的日粮,导致不同牛群粪便理化性质的差异,可能导致不同牛群来源的粪便堆积过程温室气体排放量的差异。另外,从精细化评估与管理奶牛场的碳氮循环及温室气体的角度,了解不同牛群的温室气体排放特点对于从牛群结构的角度控制奶牛养殖系统温室气体排放是非常必要的。本文结合国内规模化奶牛场的饲养特点,采集不同泌乳期奶牛的粪便,在自然堆积状态下,研究不同泌乳期奶牛粪便碳氮变化及温室气体排放特点,一方面初步了解日粮对奶牛粪便温室气体排放量的影响,另一方面也为从牛群结构的角度控制温室气体排放提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

牛粪为采自陕西省某规模化奶牛场的新鲜粪便。该奶牛场将泌乳奶牛根据其产奶量和泌乳期分

为高产组、中产组和低产组,分栏饲喂,不同牛群饲喂不同的日粮(表1)。不同泌乳期奶牛日粮粗蛋白水平随着产奶量的下降而降低,低产组奶牛日粮粗蛋白水平显著低于高产组和中产组。

表1 不同泌乳期奶牛生产性能及日粮特点

Tab.1 Productivity and diet property of cows during different lactations

泌乳牛分群	泌乳期	产奶量/ (kg·d ⁻¹)	CPI/ (kg·d ⁻¹)	DMI/ (kg·d ⁻¹)	CP/ %
高产组	泌乳初期	39	4	24	17
中产组	泌乳中期	27	3.1	20	16
低产组	泌乳后期	13	1.4	11	13

注:CPI为粗蛋白摄入量;DMI为干物质摄入量;CP为日粮中粗蛋白含量。

试验开始于2014年3月31日,分别收集3个牛群当天的新鲜粪便,每个牛群为1个处理,每个处理设置3个重复,收集的粪便分别装在9个直径500 mm、高250 mm的采样箱底箱中,每个底箱装25 kg新鲜粪便,高度约为20 cm,模拟自然堆积过程,共持续90 d。

1.2 气体采集与分析

温室气体的测定采用静态采样箱-气相色谱法,采样箱顶箱直径500 mm、高500 mm,采样时采样箱顶箱扣在装粪便的底箱上,用水密封,采样箱底箱和顶箱的示意图见图1。试验开始前用接有医用三通的注射器抽取采样箱顶箱内的空气作为对照,然后盖上采样箱顶箱,15 min后第2次采气,30 min后第

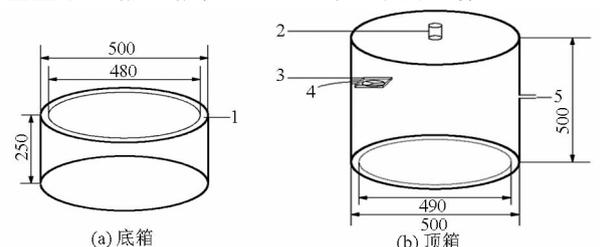


图1 采样箱示意图

Fig.1 Sampling chamber

1. 水封槽 2. 温度计插口 3. 风扇 4. 风扇线路 5. 采气口

3次采气。采样时间在09:00—10:00之间^[15]。采样频率为前10天每天采样,10 d后每2~3天采样1次。当天用气相色谱仪测定温室气体。采气体样品时用温度计测采样箱内和堆体10 cm处温度。

CO₂ 经过转化炉转化后由 FID(氢火焰离子化检测器)检测,CH₄ 直接由 FID 检测,N₂O 由 ECD(电子捕获检测器)检测。由3次采集气体的浓度变化,计算当天温室气体的排放速率^[16-17]

$$F = \frac{273\rho V \frac{dC}{dt}}{(273 + T)m}$$

式中 F ——被测气体排放速率,mg/(kg·h)

ρ ——被测气体标准状态下的密度(CO₂ 为 1.977 kg/m³,CH₄ 为 0.717 kg/m³,N₂O 为 1.978 kg/m³)

V ——粪便样顶部到采样箱顶部空间的体积,m³

dC/dt ——采样箱内被测气体的浓度变化率

T ——采样过程中采样箱内的平均温度,℃

m ——堆放牛粪的质量,kg

1.3 固体样采集与分析

取新鲜的奶牛粪便分析其理化特性,包括牛粪的密度(环刀法)、干物质量(DM,105℃干燥24 h)、总有机碳(TOC,高温外热重铬酸钾氧化-容量法)、总氮(TN,H₂SO₄-H₂O₂消煮-流动分析仪测定)^[18],硝态氮和铵态氮(NH₄⁺-N,NO₃⁻-N,KCl浸提-流动分析仪测定),结果见表2。3组奶牛牛粪初始总有机碳和总氮含量从高到低依次为高产组、中产组、低产组,而总有机碳和总氮比值的大小排序则正好相反,该差异主要受不同泌乳期奶牛的生理和日粮差异影响。

为了研究牛粪堆积过程中碳氮变化与温室气体排放的关系,在自然堆积第0、3、7、11、16、22、27、33、39、45、53、60、76、90天采集固体样,每次在表层、中层、底层各3个点共9个采样点采样,将其混合均匀,四分法取1/4(500 g左右),其余放回桶内。所采集的样品自然风干、粉碎后过100目筛,用于测定总有机碳、总氮、铵态氮和硝态氮含量。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 电子表格和 SAS 统计分析软件进行处理分析。

表2 不同泌乳期奶牛粪便的理化特性

Tab.2 Chemical-physical property of cow manure

样品	密度/ (kg·m ⁻³)	干物质量/ (g·kg ⁻¹)	总有机碳质量比/ (g·kg ⁻¹)	总氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	铵态氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	碳氮比
高产组	94.49 ± 1.63	173.34 ± 1.89	374.73 ± 2.20	24.61 ± 0.24	2.06 ± 0.03	4.16 ± 0.03	15.23 ± 0.01
中产组	96.13 ± 3.00	164.11 ± 1.64	368.76 ± 1.90	21.56 ± 0.25	2.20 ± 0.02	5.00 ± 0.02	17.11 ± 0.01
低产组	100.35 ± 0.44	216.36 ± 1.22	364.57 ± 2.40	18.51 ± 0.53	1.95 ± 0.03	4.00 ± 0.02	19.69 ± 0.18

2 试验结果与分析

2.1 温度的变化

温度是堆积过程中一个重要指标。由图2可知,在堆积前期,由于气温较低,含水量较高,微生物活动受到影响,堆体内部温度与气温没有明显差别,主要受气温影响。堆积中后期,随着气温的升高,微生物活动增强,堆体内温度受气温和有机质分解产生的热的共同影响,堆体内温度稳定上升,高于气温3~5℃,各处理间没有显著差异。在3个月的堆积过程中,虽然中后期堆体内温度高于气温,但没有超过35℃,可能的原因是堆体体积小,有机质分解产生的热较容易散发到大气中而无法蓄积在堆体内。

2.2 奶牛粪便自然堆积过程碳氮变化

2.2.1 铵态氮和硝态氮的变化

堆肥过程中铵态氮的变化有2种途径,一种是在硝化细菌的作用下转化为NO₂⁻-N和NO₃⁻-N,另一种是以NH₃的形式挥发,主要取决于温度、酸碱性

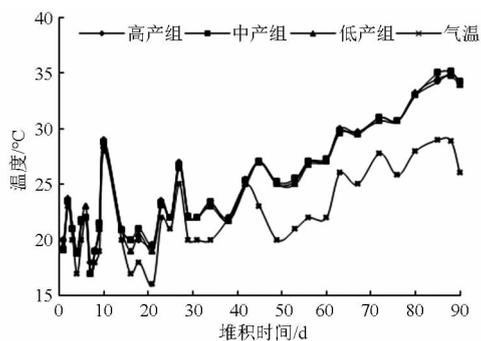


图2 堆积过程中各处理的温度变化曲线
Fig.2 Change of temperature during piling

和氨化细菌的活性。

在堆肥前期,各处理铵态氮含量出现短暂的上升趋势(图3),高产组和中产组在第3天达到峰值,上升幅度分别为11%和12%,低产组在第7天达到峰值,上升幅度为7%。随着温度的升高,氨挥发的增加和硝化细菌的繁殖,铵态氮含量迅速降低,之后保持相对稳定,到堆肥结束时,高产组、中产组、低产组的铵态氮质量比分别下降了94.82%、94.46%和

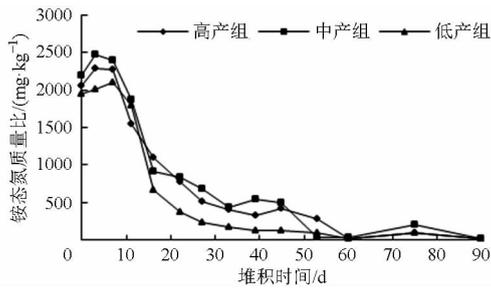


图3 堆积过程中铵态氮的变化曲线

Fig. 3 Change of NH_4^+-N during piling

88.52%。

相比铵态氮,各组初始硝态氮含量极低而变化缓慢,且在堆肥的0~27d含量相差不大(图4)。之后,各处理硝态氮含量迅速上升。在堆肥的中期硝态氮增量变缓而发生上下波动,该阶段也是 N_2O 含量开始快速上升达到峰值的时期。堆积末期硝态氮含量开始上升,堆肥结束时各处理硝态氮含量由高到低顺序依次为高产组、中产组、低产组。在堆积的前期铵态氮含量迅速下降而硝态氮含量并没有显著上升,说明该阶段的铵态氮主要以氨挥发形式损失。

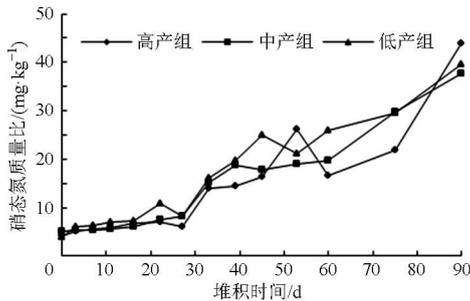


图4 堆积过程中硝态氮的变化

Fig. 4 Change of NO_3^--N during piling

2.2.2 总有机碳含量和全氮含量的变化

随着堆积的进行,有机物在微生物的作用下进行分解,总有机碳含量和全氮含量下降,3组牛粪变化趋势基本一致(图5、图6)。堆积过程中,高产组和中产组有机碳含量较为接近,低产组有机碳含量远低于前两者且堆积过程中总有机碳含量的降低速率大于前两者。这可能是由于碳氮比差异造成的,高碳氮比的牛粪有机质降解较为强烈而碳物质损失更多,这与秦莉等^[19]的猪粪堆肥试验规律一致。3组牛粪的全氮含量堆肥开始前差异显著,堆肥过程中存在差异减小而向某一范围收敛的趋势(图6)。堆肥结束后,全氮含量高产组降低了34.5%,中产组降低了32.8%,低产组降低了22.5%。说明较高碳氮比有利于减少粪便堆积过程的氮损失,这主要是由于粪便堆积过程氮素主要以氨挥发形式损失,而高碳氮有利于减少氨挥发^[20]。

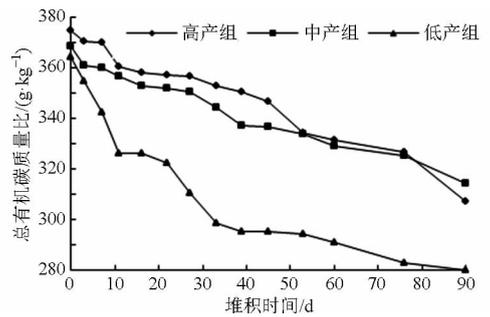


图5 堆积过程中各处理的TOC变化曲线

Fig. 5 Change of TOC concentration during

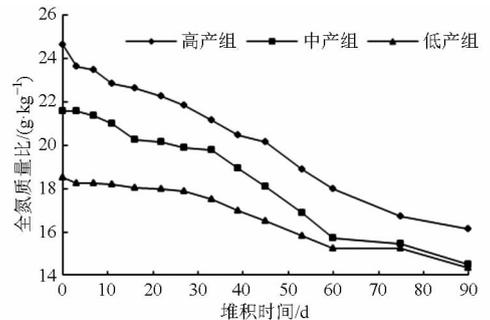


图6 堆积过程中各处理的TN变化曲线

Fig. 6 Change of TN concentration during piling

2.3 温室气体排放特点

堆积过程中,各处理 CO_2 变化趋势基本一致(图7)。在堆积的前33天中,各处理 CO_2 的排放速率相近,且变化剧烈,可能是由于这段时间处于春夏交接,温度变化大,微生物活动受影响,该阶段 CO_2 的排放速率主要受温度影响。堆积33d(5月3日)以后,随着气温逐渐升高,堆体含水率下降,各处理 CO_2 的排放速率迅速升高,且各处理 CO_2 排放速率差异显著。在堆积的第45天至90天中, CO_2 的排放速率维持在较高水平,且上下波动,在这一阶段,低产组奶牛粪便 CO_2 的排放速率明显低于其他2组,高产组和中产组的排放速率相近。在堆积的中后期, CO_2 排放速率受温度和各组群粪便本身的理化性质共同影响。各处理 CO_2 排放速率差异主要由其理化性质的差异引起。

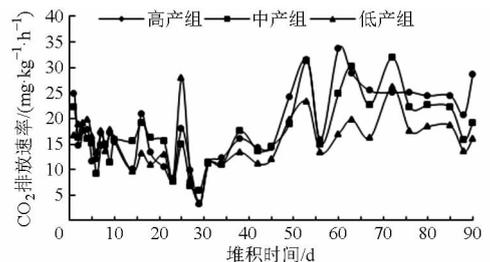


图7 不同泌乳期奶牛粪便CO2的排放速率曲线

Fig. 7 Emission rate of CO_2 from manure of different

各处理 CH_4 排放速率变化趋势基本一致(图8),在堆积的前期排放速率呈波动式下降,在堆

积的第27天左右分别达到最低值,之后开始上升,第43天(5月12日),随着气温上升和堆体内温度稳定上升,CH₄的排放速率开始迅速上升,并很快达到第一个峰值,之后呈波动式变化,且保持在较高的排放速率水平。该排放速率变化趋势与段池清^[21]的试验结果类似,表现为CH₄排放受环境温度和堆体内温度的影响。3组处理中高产组的排放速率显著高于中产组和低产组,且高产组的排放速率变化剧烈而中产组和低产组变化平稳,体现了粪便中理化性质差异对CH₄排放速率的影响。

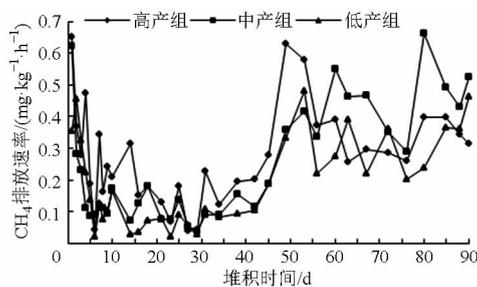


图8 不同泌乳期奶牛粪便CH₄的排放速率曲线

Fig. 8 Emission rate of CH₄ from manure of different groups

3个处理的N₂O排放速率变化趋势基本一致(图9),但与CH₄和CO₂变化趋势显著不同,经历了很明显的几乎无排放和集中大量排放2个阶段,在堆积的前45天(3月31日至5月14日),N₂O排放量几乎为零,试验中期N₂O排放速率开始快速上升并达到峰值,之后排放速率开始下降。陆日东等^[9]的奶牛粪便堆肥试验、SOMMER等^[22]的畜牧场堆肥试验也发现了同样的排放规律,即堆肥前期排放很小而后期排放大。这与粪便自然堆积过程N₂O的排放机制相符合,N₂O的产生要先后经过硝化过程和反硝化过程,N₂O的排放主要发生在反硝化过程^[23-25]。本试验前期,主要处于硝化过程;试验中期,随着水分蒸发,牛粪堆体表层形成天然外壳,为反硝化反应提供了厌氧环境,N₂O排放速率开始快速增加,SOMMER等^[22]也发现结壳有利于N₂O排放。在整个试验过程,N₂O的排放速率并未表现为受环境温度的控制而频繁的上下波动,这主要由于硝化和反硝化过程可以在较宽的温度范围内发生,而本研究整个试验时期的气温和堆体温度又恰好在可以发生硝化反应(0~40℃)和明显反硝化反应(5℃以上)的温度范围内,所以本试验N₂O排放速率的变化趋势受N₂O形成的内在机制与好氧和厌氧条件影响,而非温度。3个处理的N₂O排放速率峰值以及达到峰值的时间不同,高产组的N₂O排放速率峰值显著高于中产组和低产组,中产组和低产组峰值相近。各处理N₂O日均排放量从大到小顺序为高产组、中产组、低产组,与各处理初始全

氮含量顺序一致而与碳氮比大小顺序相反,说明粪便中碳氮含量会影响N₂O排放量。

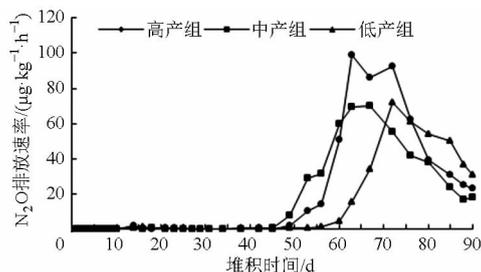


图9 不同泌乳期奶牛粪便N₂O的排放速率曲线

Fig. 9 Emission rate of N₂O from manure of different groups

3 讨论

3.1 粪便中初始碳氮含量对温室气体累积排放量的影响

处于不同泌乳期的奶牛,受生理和日粮成分等影响,其粪便的总有机碳、全氮以及碳氮比不同。试验中3个组群TOC、TN含量由高到低为高产组、中产组、低产组,碳氮比顺序则相反。本文分别计算了CO₂-C(CO₂中C的质量)、CH₄-C和N₂O-N的累积排放量(表3),分析其与奶牛粪便初始总有机碳、全氮以及碳氮比关系。

表3 粪便堆积过程温室气体中碳、氮的累积排放量

Tab. 3 Accumulative emissions of CO₂-C, CH₄-C and N₂O-N during piling

处理	CO ₂ -C/(g·kg ⁻¹)	CH ₄ -C/(mg·kg ⁻¹)	N ₂ O-N/(mg·kg ⁻¹)
高产组	11.46 ± 1.37 ^b	480.88 ± 117.93 ^c	32.31 ± 8.00 ^c
中产组	11.78 ± 1.37 ^b	472.5 ± 59.01 ^b	27.45 ± 7.54 ^b
低产组	9.62 ± 0.86 ^a	351.75 ± 25.47 ^a	23.04 ± 1.35 ^a

注:温室气体中碳、氮排放量以鲜基计;标记相同字母表示处理间差异不显著。

本试验中,3个处理的非CO₂温室气体CH₄、N₂O的累积排放量差异显著,CO₂排放量高产组和中产组不显著,二者与低产组差异显著。3个处理的CO₂-C、CH₄-C和CO₂-C + CH₄-C累积排放量与牛粪TOC含量及碳氮比没有显著相关性。不过,CH₄-C的累积排放通量随着粪便初始的TOC含量降低和碳氮比增加而降低,这与AMON等^[26]研究一致,他们认为有机质的含量越低,CH₄排放量越少。N₂O-N的累积排放量与TN含量呈显著正相关关系($r^2 = 0.995$),与碳氮比呈显著负相关关系($r^2 = 0.974$),HUANG等^[27]的研究也表明,N₂O的累积排放量和碳氮比呈显著的负相关关系($R = 0.986$)。

3.2 不同泌乳期奶牛粪便的温室效应

由于CO₂、CH₄和N₂O的增温效应不同,为便于分析堆肥过程产生的3种温室气体对温室效应的贡

献以及比较3种处理对温室效应的影响,本文根据IPCC提供的增温潜势值(GWP,100年尺度),把不同温室气体的排放量折合成二氧化碳当量(CO₂eq),并分别计算了3种温室气体90d累积排放量(CO₂eq)和总排放量(CO₂eq)(表4)。CO₂、CH₄和N₂O的增温潜势(GWP)分别为1、25和298^[28]。

表4 90d累积温室气体排放量(CO₂eq)

Tab.4 N₂O, CH₄ and CO₂ and total emission calculated

处理	in CO ₂ eq in 90 d			g/kg
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
高产组	42.03 ± 5.02 ^b	16.03 ± 3.93 ^c	15.13 ± 2.89 ^c	73.19 ± 11.84 ^b
中产组	43.19 ± 5.02 ^b	15.76 ± 1.97 ^b	12.85 ± 2.73 ^b	71.8 ± 9.72 ^b
低产组	35.27 ± 3.16 ^a	11.75 ± 0.85 ^a	10.79 ± 0.49 ^a	57.81 ± 4.5 ^a

注:表中结果为每吨物料(以鲜基计)温室气体排放的二氧化碳当量;标记相同字母表示处理间差异不显著。

从表4可看出,堆肥过程中CO₂对温室效应的贡献最大,占3种气体总排放量(CO₂eq)的57%~61%,CH₄和N₂O对温室效应的贡献相近,分别为20%~21%和17%~21%。温室气体累积排放量由高到低的顺序为:高产组、中产组和低产组,与奶牛粪便初始TOC、TN含量顺序一致而与碳氮比顺序相反。高产组与中产组总温室效应没有显著差异,二者显著高于低产组。与中产组和高产组比,低产组总温室气体排放量(CO₂eq)分别低了19%和21%;非CO₂温室气体CH₄排放量低27%和25%;N₂O排放量低29%和16%。这可能是由于低产组奶牛摄入粗蛋白水平低,粗饲料摄入水平高于精饲料,导致粪便中氮含量低而碳氮比高造成的。本试验说明调整日粮具有降低粪便堆积过程温室气体排放量的可能性。不过,本试验结果是基于不同泌乳

期奶牛得出,日粮如何影响粪便温室气体的排放量仍需通过对相同泌乳期奶牛的试验获得,另外日粮的调控应基于满足基本的生产性能的需求。因此,基于牛奶生产全过程控制的角度,进一步展开日粮对生产性能、瘤胃甲烷和粪便温室气体排放的综合影响是非常必要的。

4 结论

(1)不同泌乳期的奶牛,由于日粮和生理差异,其粪便的总有机碳和全氮含量以及碳氮比不同。3组牛粪初始总有机碳和总氮含量从高到低为高产组、中产组、低产组,而总有机碳和总氮比值的大小排序则正好相反。堆肥结束后,低产组奶牛粪便损失了较多的碳素而保留了较多的氮素。

(2)不同泌乳期奶牛粪便的温室气体排放速率变化趋势一致,但排放速率有差异。高产组的CH₄和N₂O排放速率显著高于中产和低产组。在本试验中,N₂O的排放主要受N₂O形成的好氧和厌氧条件影响,而CO₂、CH₄的排放更易受气温的影响。

(3)不同泌乳期粪便堆积过程中非CO₂温室气体CH₄和N₂O累积排放量、总温室气体排放量(CO₂eq)从大到小顺序均为高产组、中产组、低产组,低产组总温室气体排放量显著低于高产组和中产组。3种气体中温室效应贡献最大的是CO₂,占总温室效应的一半以上,CH₄和N₂O的温室效应贡献相近,分别为20%~21%和17%~21%。

(4)N₂O-N的累积排放量与粪便初始TN含量呈显著正相关关系,与碳氮比呈显著负相关关系。堆积过程中3个处理CH₄-C、CO₂-C、CO₂-C+CH₄-C累积排放量与牛粪TOC含量和碳氮比没有显著相关关系。

参 考 文 献

- HOUGHTON T, CALLANDER B A, VARNEY S K. Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992:26-51.
- FAO. Livestock's long shadow—Environmental issues and options[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- FAO. Greenhouse gas emissions from the dairy sector[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010.
- 王效琴,梁东丽,王旭东,等. 运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J]. 农业工程学报,2012,28(13):179-184.
WANG Xiaoqin, LIANG Dongli, WANG Xudong, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from dairy farming systems based on LCA[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 179-184. (in Chinese)
- 李玉娥,饶敏杰. 动物废弃物源甲烷排放量的估算与减缓技术选择[J]. 农村生态环境学报,1995,11(3):8-12.
LI Yu'e, RAO Minjie. Estimation and mitigation of methane emission from animal wastes[J]. Rural Eco-Environment, 1995,11(3):8-12. (in Chinese)
- HOU Y, VELTHOF G L, OENEMAL O. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and integrated assessment[J]. Global Change Biology,2015,21(3):1293-1312.
- 罗一鸣,李国学, Frank Schuchardt,等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. 农业工程学报,2012,28(22):235-242.
LUO Yiming, LI Guoxue, FRANK Schuchardt, et al. Effects of additive superphosphate on NH₃, N₂O and CH₄ emissions during pig manure composting[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 235-242. (in Chinese)

- 8 陶金沙, 李正东, 刘福理, 等. 添加小麦秸秆生物质炭对猪粪堆肥腐熟程度及温室气体排放的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1233 - 1240.
TAO Jinsha, LI Zhengdong, LIU Fuli, et al. Effects of wheat straw biochar on maturity extent and greenhouse gases emissions during swine manure composting [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(5): 1233 - 1240. (in Chinese)
- 9 陆日东, 李玉娥, 石锋, 等. 不同堆放方式对牛粪温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1235 - 1241.
LU Ridong, LI Yu'e, SHI Feng, et al. Effect of Compost on the greenhouse gases emission from dairy manure [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 1235 - 1241. (in Chinese)
- 10 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 Tao, SCHUCHARDT F, LI Guoxue. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 212 - 217. (in Chinese)
- 11 赵晨阳, 李洪枚, 魏源送, 等. 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 533 - 540.
ZHAO Chenyang, LI Hongmei, WEI Yuansong, et al. Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure windrow composting [J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 533 - 540. (in Chinese)
- 12 YAMULKI S. Effect of straw addition on nitrous oxide and methane emissions from stored farmyard manures [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 112(2 - 3): 140 - 145.
- 13 AGUERRE M J, WATTIAUX M A, POWELL J M. Emissions of ammonia, nitrous oxide, methane, and carbon dioxide during storage of dairy cow manure as affected by dietary forage-to-concentrate ratio and crust formation [J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(12): 7409 - 7416.
- 14 HAO X, BENKE M, LARNEY F J, et al. Greenhouse gas emissions when composting manure from cattle fed wheat dried distillers' grains with solubles [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 89: 105 - 114.
- 15 HAO X Y, CHANG C, LARNEY F J, et al. Greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(2): 376 - 386.
- 16 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子关系[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 192 - 195.
XIE Junfei, LI Yu'e, DONG Hongmin, et al. Influence of different factors on greenhouse gas emissions in composting of layer-hen manure with closed composting bins [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 192 - 195. (in Chinese)
- 17 SOMMER S G, MOLLER H B. Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production-effect of straw content [J]. Journal of Agricultural Science, 2000, 134(3): 327 - 335.
- 18 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 19 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 比堆肥腐碳素物质变化规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1388 - 1393.
QIN Li, SHEN Yujun, LI Guoxue, et al. The impact of composting with different C/N on maturity variation and emission of gas concluding [J]. Journal of Agro-Environment, 2010, 29(7): 1388 - 1393. (in Chinese)
- 20 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2668 - 2673.
QIN Li, SHEN Yujun, LI Guoxue, et al. C Matter change of composting with different C/N [J]. Journal of Agro-Environment, 2009, 28(12): 2668 - 2673. (in Chinese)
- 21 段池清, 王嘉珺, 赵雪艳, 等. 堆放奶牛粪便 7 周甲烷排放通量的研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(11): 39 - 47.
DUAN Chiqing, WANG Jiajun, ZHAO Xueyan, et al. Studies on the methane emission fluxes from stored dairy manure during seven weeks [J]. Environmental Pollution and Control, 2010, 32(11): 39 - 47. (in Chinese)
- 22 SOMMER S G, PETERSEN S O, SOGAARD H T. Greenhouse gas emission from stored livestock slurry [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(3): 744 - 751.
- 23 吴伟祥, 李丽劼, 吕豪豪, 等. 畜禽粪便好氧堆肥过程氧化亚氮排放机制[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1704 - 1712.
WU Weixiang, LI Lijie, LV Haohao, et al. Mechanisms of nitrous oxide emission during livestock manure aerobic composting [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1704 - 1712. (in Chinese)
- 24 YOSHIDA N, TOYODA S. Constraining the atmospheric N₂O budget from intramolecular site preference in N₂O isotopomers [J]. Nature, 2000, 405: 330 - 334.
- 25 MAEDA K, TOYODA S, SHIMOJIMA R, et al. Source of nitrous oxide emissions during the cow manure composting process as revealed by isotopomer analysis of amoA abundance in betaproteo bacterial ammonia-oxidizing bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(5): 1555 - 1562.
- 26 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 and Environment, 2006, 112(2 - 3): 153 - 162.
- 27 HUANG C F, WONG J W, WU Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust [J]. Waste Management, 2004, 24(8): 805 - 813.
- 28 PARRY M L, CANZIANI O F, PALUTIKOF J P, et al. IPCC fourth assessment report; climate change 2007: contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Roma: Cambridge University Press, 2007: 212 - 213.