

不同堆放方式对牛粪温室气体排放的影响

陆日东^{1,2}, 李玉娥^{1,2}, 石 锋^{1,2}, 万运帆^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081)

摘 要:为了研究不同堆放方式对牛粪温室气体排放的影响, 试验采用静态箱-气相色谱法对 3 种不同堆放处理的奶牛粪便在夏秋季的温室气体排放速率进行了观测。结果表明, 两个季节 CO₂ 和 CH₄ 在试验前期排放速率较大, 中后期排放较少; N₂O 在试验前期排放速率较小, 后期排放速率逐渐上升; 牛粪不同堆放方式对温室气体排放的影响很大, 除了夏季试验堆放高度 50 cm 和 25 cm 处理 CH₄ 的排放速率差异不显著之外, 其他处理间温室气体的排放差异都显著, 两个季节中每天加粪 10 kg 处理 CO₂ 和 CH₄ 的排放速率较大, 其他处理 CO₂ 和 CH₄ 的排放速率较小; N₂O 的排放速率基本表现出相反的趋势。综合温室效应每天加粪 10 kg 处理的最大, 堆放高度为 50 cm 处理的最小。

关键词:奶牛粪便; 温室气体; 堆放方式

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)03-1235-07

Effect of Compost on the Greenhouse Gases Emission from Dairy Manure

LU Ri-dong^{1,2}, LI Yu-e^{1,2}, SHI Feng^{1,2}, WAN Yun-fan^{1,2}

(1. Institute of Agro-Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China;
2. The key Laboratory for Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: In a storage experiment with dairy cow manure, the effects of different piling height (25 cm and 50 cm) and changing manure amount by adding 10 kg per day on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from manure were investigated in summer and autumn, 2006. The emissions of these three greenhouse gases from different treatments were measured by using the static chamber-GC with manual method. The emission rates of CO₂ and CH₄ were higher at the early stage, and lower at middle and late stages from the manure of three treatments in the two seasons. The emission rate of N₂O was lower at the early stage, and increased gradually at later stage of the experiment. Different treatments affected the GHG emission greatly. The GHG emissions from dairy manure were significantly different with each other except CH₄ emission between the treatments of the height of 50 cm and 25 cm in summer. And the emission rates of CO₂ and CH₄ were higher for the treatment adding 10 kg manure per day, and lower for the other treatments. The emission rates of N₂O showed the contrary trend. Global warming potential (GWP) of the treatments adding 10 kg manure per day was highest among the three treatments, while the treatment with the piling height of 50 cm was lowest.

Keywords: dairy manure; greenhouse gases; pile

自工业革命以来, 大气中温室气体的浓度持续增长, 这是引起全球气候变暖的重要原因。动物粪便中的有机物在降解过程中产生大量温室气体, 是一个重要的排放源。全球动物粪便排放的 CH₄ 大约占已知

人为 CH₄ 排放总量的 5.5%~8%^[1], 排放的 N₂O 大约占全球 N₂O 排放总量的 7%^[2]。中国是动物饲养量最大的国家之一, 随着人民生活水平的提高和膳食结构的改变, 畜禽的饲养量迅速增加, 畜禽粪便的温室气体排放量也随之增加。1990 年中国动物粪便 CH₄ 排放量为 1.25 Tg, 占全球动物粪便 CH₄ 排放总量的 5%^[3]。1995 年中国的主要动物粪便 CH₄ 排放量比 1990 年增加 28%^[4]。1994 年中国动物粪便 N₂O 排放量约为 44 Gg (不包括放牧过程中 N₂O 排放), 占农业源 N₂O

收稿日期: 2007-07-09
基金项目: 973 项目 “中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究”
(2002CB412508)
作者简介: 陆日东 (1980—), 男, 广东湛江人, 主要从事动物粪便温室气体排放研究。E-mail: lurd@ami.ac.cn
通讯作者: 李玉娥 E-mail: yueli@ns.ami.ac.cn

总排放的 5.56%^[5]。中国关于动物粪便温室气体排放的研究很少,谢军飞等研究了堆放处理猪粪和鸡粪温室气体排放及影响因子^[6,7]。本试验借助静态箱-气相色谱手动观测系统,对不同堆放处理奶牛粪便温室气体排放速率进行了研究,并分析影响温室气体排放的因素,这可为国家温室气体排放清单编制和制定减少动物粪便温室气体排放的措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验点位于内蒙古达拉特旗郊区的库布其奶牛场,地理位置为 109°00′~110°45′E, 40°00′~40°30′N,属于典型的温带大陆性半干旱季风气候区。年平均气温为 6.0℃,年平均降雨量为 312 mm。

采样箱设计:采样箱为顶部和侧面封闭的圆筒,直径 1 m,高 1 m,内部体积为 0.753 2 m³。箱内安装有两个 12 V 的风扇,风扇的直径为 12 cm,距离顶部和侧面都是 30 cm,试验时启动风扇混匀箱内的气体。取气口位于箱体侧面,距离顶部 30 cm,上接医用三通,三通用于连接注射器和密闭气袋;取气口的内侧连接一根塑料管到风扇下面,取混匀后的气体(图 1)。

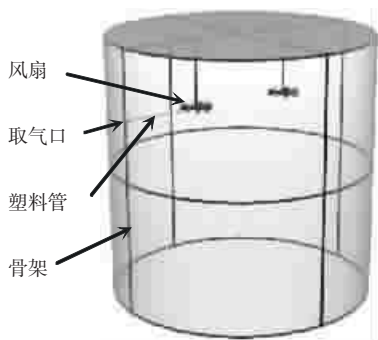


图 1 采样箱示意图

Figure 1 The sketch map of the chamber

试验采用 3 种处理:(1)堆放高度 50 cm; (2)堆放高度 25 cm; (3)每天加牛粪 10 kg, 3 次重复。试验分为两个阶段(1.2006-06-26—2006-07-25; 2.2006-09-12—2006-10-11)进行。堆放高度 50 cm 和 25 cm 处理在试验开始时收集同一牛舍奶牛 1 d 中排泄的新鲜粪便,充分混合后堆放在野外的试验场地,堆放的牛粪用高度为 25 cm 和 50 cm 的铁箍围起来,铁箍的直径为 90 cm。堆放高度 25 cm 牛粪的重量大约为 135 kg;堆放高度 50 cm 牛粪的重量大约为 280 kg。每天加粪 10 kg, 处理每天早上从同一牛舍收集奶牛排

泄的新鲜粪便后充分混合,每个重复加入 10 kg 的新鲜牛粪,一直维持到试验结束,堆放的牛粪用高度为 50 cm 的铁箍围起来,铁箍的直径为 90 cm,牛粪最后的重量为 300 kg。

1.2 气样采集与分析

利用静态采样箱对牛粪温室气体排放速率进行观测,每隔一定时间测量箱里的温室气体浓度一次,然后根据箱内气体浓度随时间的变化计算奶牛粪便的排放速率^[8]。本试验观测方法为:试验开始前先取空气作为对照,然后盖上采样箱,并在采样箱底部外侧埋上土密封,30 min 后开始采集箱内的气体,并存放在 0.5 L 的密闭气袋内,采样时间在早上 9:00—10:00 之间^[9],试验结束后再把采样箱掀开。试验开始后的前 10 d 每天采样 1 次,以后每 2 d 采样 1 次。

气样采集后,寄回实验室利用气相色谱仪(HP6890)测量气样内温室气体的浓度。 CO_2 经过转化炉转化后由 FID (氢火焰离子化检测器)检测, CH_4 直接由 FID 检测, N_2O 由 ECD (电子捕获检测器)检测。由两次采集气体的浓度差,由公式 (1) 计算牛粪温室气体的排放速率^[10]:

$$F = \rho \cdot V \cdot (dC/dt) \cdot 273 / (273 + T) / m \quad (1)$$

上式中: F 为被测气体排放速率, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为被测气体标准状态下的密度 (CO_2 为 $1.977 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, CH_4 为 $0.717 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, N_2O 为 $1.978 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); V 为取样箱顶部空间的体积 m^3 ; dC/dt 为采样箱内被测气体的浓度变化率; T 为采样过程中采样箱内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; m 为堆放牛粪的质量, kg 。

1.3 理化特性

粪便特性会影响温室气体的排放,在粪便贮存期间这些特性会变化很大。为了建立估计排放共同基础,人们最关注新鲜粪便的特性。夏季和秋季试验开始时都分析新鲜的奶牛粪便(牛粪中含有少量沙子)的理化特性,包括牛粪的密度(环刀法)、干物质(DM, 105℃烘干 24 h)、可挥发性固体(VS, 550℃燃烧样品 4 h)、总有机碳(TOC, 高温外热重铬酸钾氧化容量法)、总氮(TN, H_2SO_4 -混合加速剂蒸馏法)^[11];分析结果见表 1。分析结果表明:夏季和秋季试验新鲜牛粪的密度、干物质、挥发性固体、总有机碳和总氮差异都不显著,两个季节试验牛粪的理化特性一致。

2 结果与讨论

2.1 CO_2 排放

夏季试验各处理奶牛粪便 CO_2 的排放速率在前

表 1 奶牛粪便的特性

Table 1 Characteristics of the dairy manure used

样品	密度/kg·m ⁻³	干物质/g·kg ⁻¹	可挥发性固体/g·kg ⁻¹	总有机碳/g·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹
夏季	1 041 a	157.00a	129.38a	67.74a	2.90a
秋季	1 035 a	160.92a	131.58a	72.33a	3.00a

注:相同字母的处理差异在 5%水平上不显著。

Note: Same letters in same column represent no significant difference in characteristics of dairy manure between summer and autumn.

2 d 较大,第 3 d CO₂ 的排放速率急剧减小到一个较低值,之后各处理 CO₂ 的排放速率的变化差异明显。堆放高度 50 cm 和 25 cm 处理 CO₂ 的排放速率逐渐上升,然后又逐渐减少,最后趋于稳定,这两种处理 CO₂ 的排放速率在变化过程中变化趋势很小。每天加粪 10 kg 处理 CO₂ 的排放速率在 2 d 后急剧上升到一个

峰值,然后逐渐减小,最后也趋于稳定,但是减小的趋势比其他两种处理明显。秋季试验在前期 CO₂ 的排放速率比较大,在试验的中后期排放速率较小,而且比较稳定(图 2)。总体上试验开始阶段,堆放奶牛粪便氧气含量较大,产生的 CO₂ 较多,CO₂ 排放速率也较大,随着试验的进行,牛粪内部氧气含量降低,牛粪内

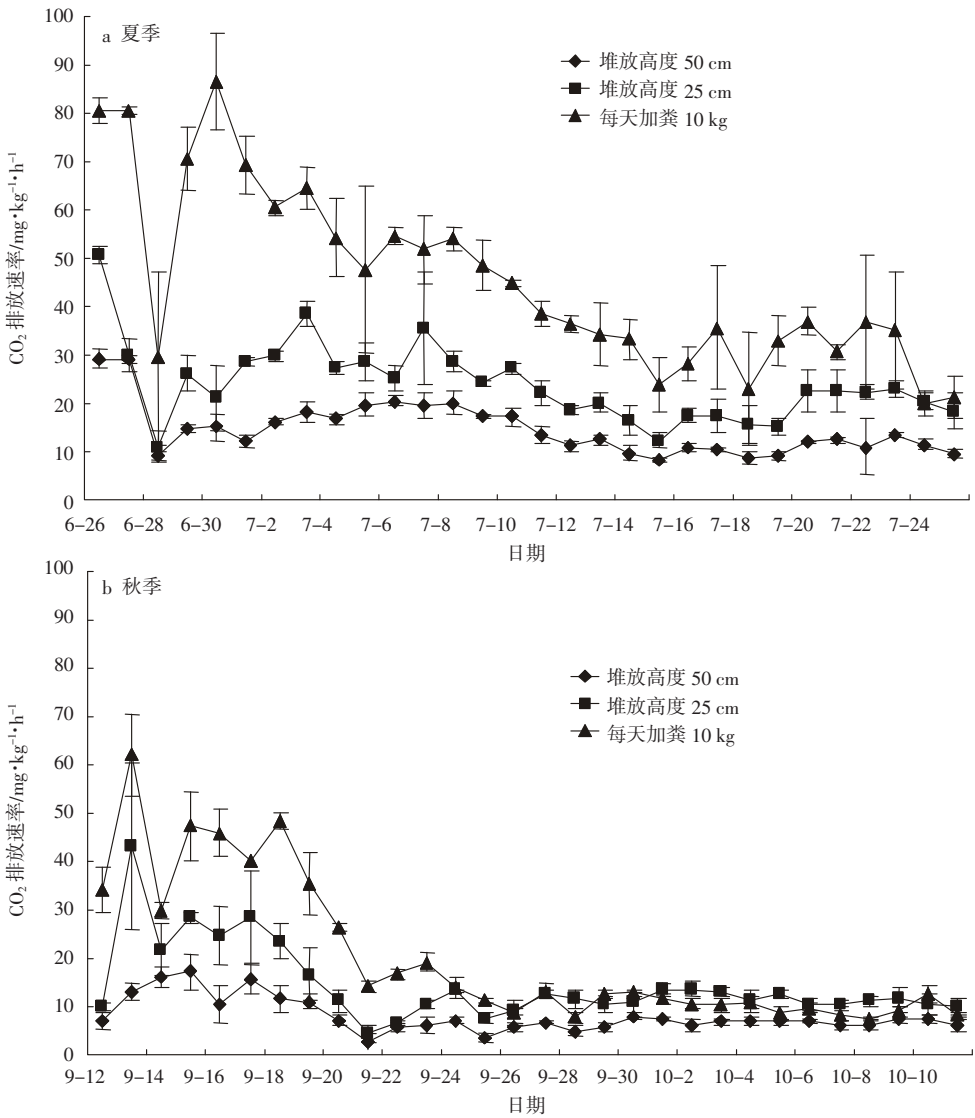


图 2 夏季和秋季不同堆放方式奶牛粪便 CO₂ 的排放速率

Figure 2 The emission rates of CO₂ from different piling styles of dairy manure in summer and autumn

部的 CO₂ 浓度也降低,因此试验中后期 CO₂ 排放速率也跟着减小^[12,13]。

2.2 CH₄ 排放

夏季试验堆放高度 50 cm 处理和堆放高度 25 cm 处理奶牛粪便 CH₄ 的排放速率在前两天较大, 随后 CH₄ 的排放速率急剧减小,之后 CH₄ 的排放速率的变化很小,在试验中期两种处理 CH₄ 的排放速率逐渐上升并达到第二个排放峰值,然后又逐渐减少,在试验后期这两种处理 CH₄ 的排放速率的变化很小,基本趋于稳定。每天加粪 10 kg 处理奶牛粪便 CH₄ 的排放速率的变化与其他两种处理比较有很大差异,试验开始的前 3 d CH₄ 的排放速率较小, 在第 4 d 急剧上升到排放峰值,此后 CH₄ 的排放速率呈下降的趋势;在试

验的后期,CH₄ 的排放速率又逐渐上升。秋季试验堆放高度 50 cm 和 25 cm 处理奶牛粪便 CH₄ 的排放速率分别在前 3 d 上升到最大值又逐渐减小,在试验的中后期 CH₄ 的排放速率变化很小,基本趋于稳定。每天加粪 10 kg 处理 CH₄ 的排放速率在试验开始后逐渐上升,7 d 后达到最大值,然后呈下降的趋势,在试验中期 CH₄ 的排放速率达到较小值,之后 CH₄ 的排放速率逐渐趋于稳定 (图 3)。总体上在试验的中前期 CH₄ 的排放速率较大,后期较小,在其他相关研究中也有相似的规律^[14-16]。

2.3 N₂O 排放

夏季试验在前期各处理奶牛粪便 N₂O 的排放速率基本没有变化,一直维持在很小的排放水平。试验

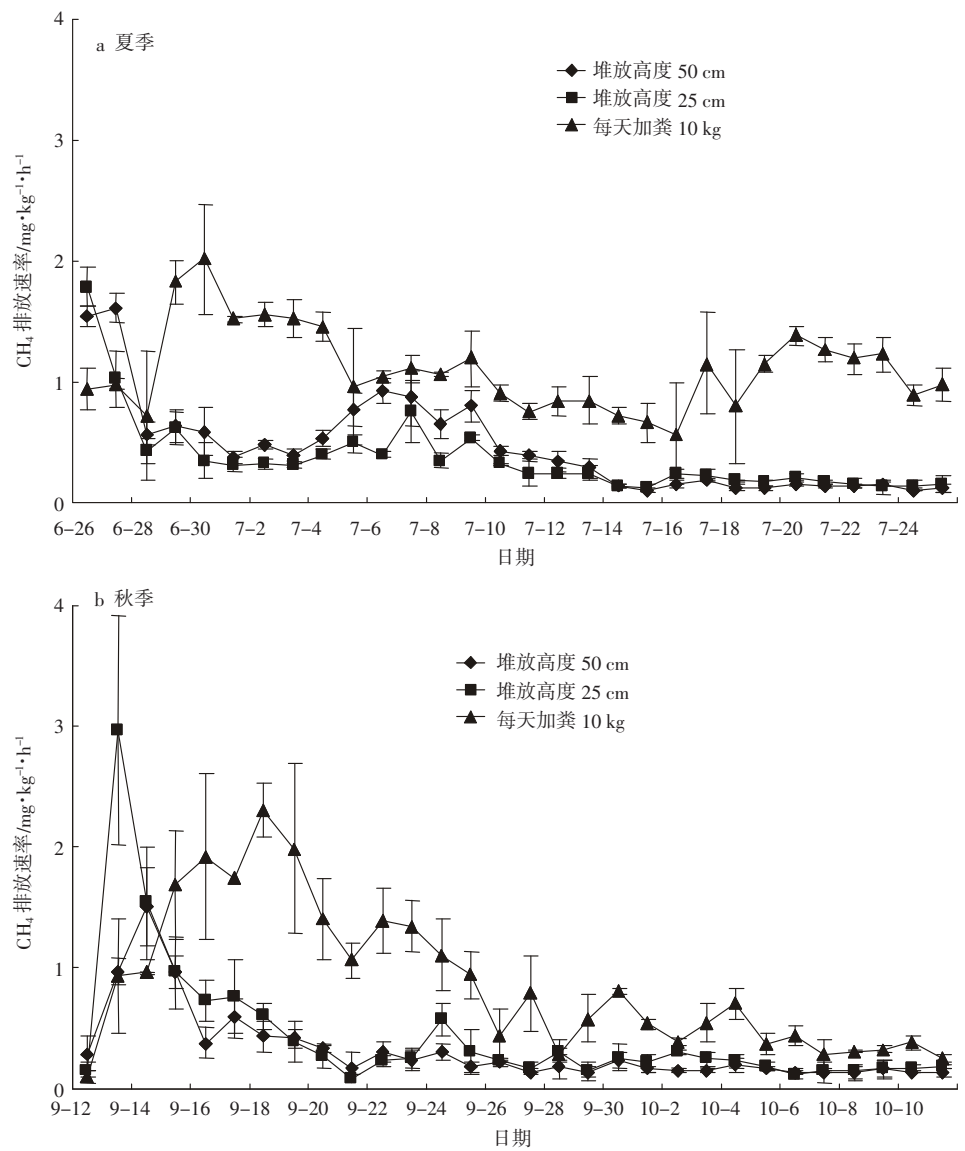


图3 夏季和秋季不同堆放方式奶牛粪便 CH₄ 的排放速率
Figure 3 The emission rates of CH₄ from different piling styles of dairy manure in summer and autumn

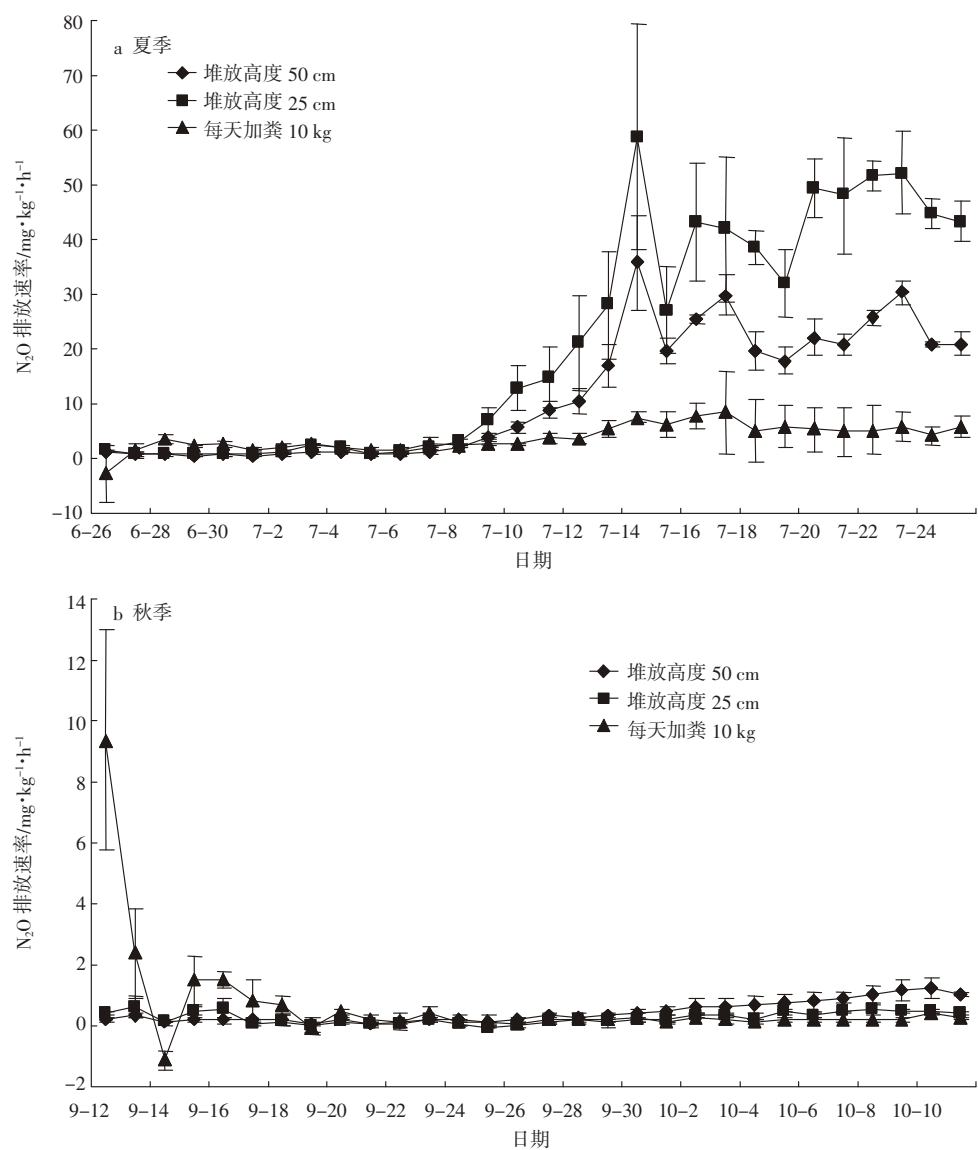


图 3 夏季和秋季不同堆放方式奶牛粪便 N₂O 的排放速率

Figure 3 The emission rates of N₂O from different piling styles of dairy manure in summer and autumn

中期 N₂O 的排放速率开始上升, 堆放高度 50 cm 和 25 cm 处理的排放速率上升的趋势比较明显, 试验后期堆放高度 50 cm 处理的排放速率仍呈缓慢上升的趋势, 而堆放高度 25 cm 处理的基本维持在同一水平; 每天加粪 10 kg 处理的排放速率上升的趋势缓慢, 在试验中后期排放速率一直保持稳定的水平。秋季试验 N₂O 的排放速率比夏季小, 而且 3 种处理 N₂O 排放速率的变化规律与夏季的基本一致, 但是秋季试验中后期 N₂O 排放速率上升的趋势比夏季的缓慢。每天加粪 10 kg 处理 N₂O 的排放速率在第 1 d 最高, 接着排放速率急剧减小, 第 3 d 达到最小值, 产生此变化规律的原因有待进一步研究 (图 4)。总体上夏季

和秋季试验奶牛粪便 N₂O 的排放速率在试验前期排放很小, 后期排放较大, Sommer 等研究畜牧场废弃物堆肥也得到相似的结果^[10]。原因可能是在存放的前几周氨的挥发也阻碍硝化细菌和反硝化细菌的生长, 硝化作用和反硝化作用很小^[17], 但是同时成为粪便中产生 NH₄⁺-N 的源^[13], 为后期产生 N₂O 作准备。

2.4 堆放方式对温室气体排放的影响及综合温室效应

牛粪堆放在畜舍外的过程中, 随着有机质的分解, 排放大量的温室气体。试验结果表明, 不同的堆放方式对温室气体排放的影响差异很大, 为了进一步说明不同堆放处理之间温室气体排放速率的差异, 本文

对 3 个处理温室气体排放速率进行了单因素方差分析,并用最小显著性差数法(LSD)比较了它们之间的差异。

夏季和秋季试验中各处理间 CO₂ 的排放速率都差异极显著(表 2)。在这 3 个处理中,每天加粪 10 kg 处理 CO₂ 的排放速率最大,堆放高度 50 cm 处理的排放速率最小。根据粪堆表面氧气的供应情况,有氧层限制在粪堆表面下 20~30 cm 的范围之内^[18],根据粪堆的湿度而定。本试验粪堆的湿度很大,有氧层只存在于粪堆的表面,而每天加粪 10 kg 处理堆放时相对表面积更大,好氧发酵的区域也相对较大,因此 CO₂ 的排放速率最大;堆放高度 50 cm 处理的相对表面积较小,CO₂ 的排放速率也最小。

夏季试验堆放高度 50 cm 处理和堆放高度 25 cm 处理间 CH₄ 的排放速率差异不显著,每天加粪 10 kg 处理与这两个处理都差异极显著;秋季试验中各处理间 CH₄ 的排放速率差异显著,而且每天加粪 10 kg 处理与另外两个处理差异都极显著。在这些处理中,每天加粪 10 kg 处理 CH₄ 的排放速率最大。其他两种处理 CH₄ 的排放速率相对较小,堆放规模大的牛粪 CH₄ 的排放速率更小。有些研究表明,改变堆肥粪堆的规模会改变 CH₄ 的排放速率,因为大部分 CH₄ 在粪堆的中心部分产生,随着堆肥规模的增大,厌氧发酵的范围扩大,产生和排放的 CH₄ 也上升^[19],本试验的 CH₄ 的排放速率与这个结论不一致,原因可能是牛粪的湿度太大,透气性很差,产生的 CH₄ 没法排放。而每天加粪 10 kg 处理开始时的堆放规模小,而且相对表面积较大,更有利于 CH₄ 排放,因此排放速率较大,随着堆放规模的增大,CH₄ 排放速率也跟着减小。

夏季试验中奶牛粪便 N₂O 的排放速率各处理间差异都极显著;秋季试验处理间 N₂O 的排放速率差异显著,而且堆放高度 25 cm 处理与另外两个处理差

异都极显著。总体上夏季试验堆放高度 25 cm 处理 N₂O 的排放速率较大,每天加粪 10 kg 处理的较小,秋季试验刚好相反,这与每天加粪 10 kg 处理前期的排放速率较高有很大关系。秋季试验后期,N₂O 的排放速率开始上升,堆放高度 50 cm 处理 N₂O 的排放速率较大,每天加粪 10 kg 处理的较小。有些研究表明,扩大堆肥粪堆的规模会增加粪堆内部厌氧发酵的区域,从而增加 N₂O 的排放^[19],但是本试验的研究结果与这个结论不太一致。

根据 CH₄ 和 N₂O 在 100 年尺度上相对 CO₂ 的增温潜势(GWP):CO₂ 为 1,CH₄ 为 21,N₂O 为 310,计算方法是 将 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放量分别乘以 1、21 或 310,转化为 CO₂ 排放量,得出 CH₄ 和 N₂O 排放量的 CO₂ 当量(CO₂e),然后把三者相加,从而计算出不同堆放处理牛粪温室气体排放的综合温室效应(mg-CO₂e·kg⁻¹·h⁻¹)(表 2)。试验期间,夏季和秋季试验各处理中每天加粪 10 kg 处理对全球变暖的贡献最大,堆放高度 50 cm 处理的贡献最低。

3 结论

两个季节温室气体排放的变化规律很相似,CO₂ 和 CH₄ 在试验前期排放速率较大,中后期排放较少;N₂O 在试验前期排放速率较小,后期排放速率逐渐上升。牛粪不同堆放方式对温室气体排放的影响差异很大,除了夏季试验堆放高度 50 cm 处理和堆放高度 25 cm 处理 CH₄ 的排放速率差异不显著之外,其他处理间温室气体的排放差异都显著,两个季节中每天加粪 10 kg 处理 CO₂ 和 CH₄ 的排放速率较大,平均排放速率最大的分别达到 45.78 mg·kg⁻¹·h⁻¹ 和 1.11 mg·kg⁻¹·h⁻¹,其他处理 CO₂ 和 CH₄ 的排放速率较小,最大的平均排放速率分别只有 23.94 mg·kg⁻¹·h⁻¹ 和 0.46 mg·kg⁻¹·h⁻¹;N₂O 的排放速率基本表现出相反的趋势。

表 2 夏季和秋季 GHG 排放方差分析结果(均值)及综合温室效应

Table 2 Analysis of variance of GHG emission and effect in summer and autumn

试验阶段	处理	CO ₂ /mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	CH ₄ /mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	N ₂ O/μg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	综合温室效应/mgCO ₂ e·kg ⁻¹ ·h ⁻¹
夏季	堆放高度 50 cm	14.63±0.80c	0.46±0.05b	11.77±0.76b	24.29
	堆放高度 25 cm	23.94±0.95b	0.38±0.02b	20.20±0.82a	38.18
	每天加粪 10 kg	45.78±2.81a	1.11±0.06a	3.81±1.30c	70.27
秋季	堆放高度 50 cm	7.89±0.66c	0.32±0.03c	0.44±0.09b	14.75
	堆放高度 25 cm	14.27±0.54b	0.43±0.03b	0.25±0.04c	23.38
	每天加粪 10 kg	19.70±0.40a	0.86±0.07a	0.69±0.04a	37.98

注:标记相同字母的处理间差异不显著。

Note: The same letters in the same column indicate no significant differences among different piling treatments in summer and autumn.

参考文献:

- [1] IPCC. IPCC Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment[R]. Cambridge University Press, 1992, 26–51.
- [2] Khalil M A K, Rasmussen R A. The global sources of nitrous oxide [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 14561–14660.
- [3] 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.
- [4] 林而达. 气候变化和农业可持续发展[M]. 北京: 北京出版社, 2001.
- [5] 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 林而达, 李玉娥. 全球气候变化和全球温室气体清单编制方法[M]. 北京: 气象出版社, 1998.
- [9] 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: 376–386.
- [10] Sommer S G, Møller 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: 327–335.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 郑玉琪, 陈同斌, 高 定, 等. 静态垛好氧堆肥堆体中氧气浓度和耗氧速率的垂直分布特征[J]. *环境科学*, 2004, 25(2): 134–139.
- [13] Peterson S O, Lind A M, Sommer S G. Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1998, 130: 69–79.
- [14] Osada T, Kuroda K, Yonaga M. Determination of nitrous oxide, methane, and ammonia emissions from a swine waste composting process[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2000, 2: 51–56.
- [15] Wolter M, Prayitno S, Schuchardt F. Greenhouse gas emission during storage of pig manure on a pilot scale[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95: 235–244.
- [16] Kuroda K, Osada T, Yonaga M, et al. Emissions of malodorous compounds and greenhouse gases from composting swine feces [J]. *Bioresource Technology*, 1996, 56: 265–271.
- [17] Mathur S P, Owen G, Dinel H, et al. Determination of compost biomaturity[J]. *Biological Agriculture and Horticulture*, 1993, 10: 65–85.
- [18] Haga K, Osada T, Harada Y, et al. Constituents of the anaerobic portion occurring in the pile during composting of cattle wastes [J]. *Journal of the Society of Agricultural Structures*, 1998, 29(3): 125–130.
- [19] Fukumoto Y, Osada T, Hanajima D, et al. Patterns and quantities of NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during swine manure composting without forced aeration—effect of compost pile scale[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89: 109–114.