

不同养猪模式的温室气体排放研究

郭海宁¹, 李建辉¹, 马 晗¹, 薛红波¹, 尹微琴¹, 王小治^{1,2*}, 封 克^{1,2}, 顾洪如³

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095; 3.江苏省农业科学院畜牧研究所, 南京 210014)

摘要:为评价不同养猪模式温室气体排放情况,对南京六合发酵床和传统水泥地面猪舍温室气体排放情况进行试验测定。通过测定猪舍内空气中 CH₄、CO₂、N₂O 浓度,根据二氧化碳平衡法原理,计算不同猪舍的温室气体排放通量。结果表明:发酵床舍内 CH₄、CO₂、N₂O 的平均含量分别是传统猪舍的 61.2%、78.6%、125.0%;其舍内 CH₄ 平均排放通量要低于传统猪舍,是其 63.6%,而 N₂O 和 CO₂ 平均排放通量分别是传统猪舍的 10 倍和 1.4 倍;考虑到传统猪场猪粪堆肥和化粪池后续管理过程中的温室气体排放,试验期间发酵床养猪模式每天每头猪排放的 CO₂ 当量的温室气体总量较传统养猪模式多 26.3%,CO₂ 是发酵床养猪过程中温室气体排放总量的主要贡献者,其次是 N₂O。

关键词:发酵床养猪;传统猪舍;温室气体;排放

中图分类号:X51 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)12-2457-06 doi:10.11654/jaes.2014.12.025

Greenhouse Gas Emissions in Different Pig Raising Modes

GUO Hai-ning¹, LI Jian-hui¹, MA Han¹, XUE Hong-bo¹, YIN Wei-qin¹, WANG Xiao-zhi^{1,2*}, FENG Ke^{1,2}, GU Hong-ru³

(1.College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China; 3.Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Livestock production is an important contributor to greenhouse gas emissions. To evaluate greenhouse gas emissions of different pig raising models, an experiment was carried out in a bio-bed and a traditional cement floor barn in Liuhe, Nanjing. Concentrations of CH₄, CO₂ and N₂O in the air of the barns were determined. The fluxes of greenhouse gas emissions from different barns were estimated based on carbon balance principle. The average CH₄, CO₂ and N₂O concentrations in the bio-bed were 61.2%, 78.6% and 125.0% of those in the traditional barn, respectively. Compared with the traditional barn, the average flux of CH₄ was 36% lower, but that of N₂O and CO₂ was 10 times and 1.4 times higher in the bio bed. Taking into consideration the traditional farm manure composting and swine lagoon in the process of follow-up management, the total greenhouse gas emissions as CO₂ equivalent per day per pig from the bio-bed were 26.3% more than that in the traditional farm during the experiment. Carbon dioxide, followed by N₂O, was the main contributor to the total greenhouse gas emissions in the bio-bed.

Keywords: bio-bed pig raising; traditional barn; greenhouse gases; emission

近百年来人类社会生产活动引起的温室气体排放是引起全球气候变暖的主要原因,其中 CO₂ 对温

室效应的贡献率最大,约占 60%,是最重要的温室气体^[1];其次是 CH₄ 和 N₂O,其增温潜能分别是 CO₂ 的 23 倍和 296 倍^[2],CH₄ 和 N₂O 对温室效应的贡献率分别约占 15%^[3]和 5%~6%^[4]。据联合国粮农组织(FAO)统计,畜禽养殖产生的温室气体占全球温室气体排放总量的 18%^[5]。随着畜牧生产集约化、规模化程度不断的提高,畜禽养殖过程中温室气体的排放已引起高度关注。

收稿日期:2014-07-24

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(12)1001-6),江苏省苏北科技发展规划(BN2013010);江苏省三新工程(SXGC [2013]369);江苏省研究生科研创新计划(KYLX1347)

作者简介:郭海宁(1988—),男,江苏睢宁人,硕士研究生,主要从事固体废物处理处置及资源化利用方面研究。E-mail:guohning@126.com

*通信作者:王小治 E-mail:xzwang@yzu.edu.cn

起源于日本的发酵床养猪是基于控制畜禽粪便及污染排放的一种生态养殖模式。目前,国外已有不少专家对发酵床养猪过程中的温室气体排放情况进行了研究,Osada 等^[6]测定了猪育肥阶段的 CH₄、CO₂ 与 N₂O 的排放情况,Jeppsson^[7]研究了育肥猪舍 CO₂、NH₃、水蒸气的日变化情况,Philippe 等^[8]测定了发酵床和水泥漏缝地面猪舍的 NH₃ 及温室气体排放情况;国内也有学者对育肥猪舍温室气体的排放^[9-11]以及猪粪自然堆放下含氮气体排放^[12]进行了研究,但对我国传统水泥地面猪舍的温室气体排放情况鲜有报道^[13],发酵床和传统养殖方式温室气体排放的比较研究更为缺乏。本文以发酵床和传统水泥地面养殖猪舍为背景,研究不同类型猪舍温室气体含量变化及排放情况,为评价不同猪舍饲养环境以及控制温室气体排放提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验设施

试验在江苏省农业科学研究所六合动物科学基地猪养殖场进行,发酵床育肥猪舍的垫料以木屑、稻壳接种生物菌剂制成。猪舍长 30 m、宽 8 m,东西走向,东西两端各设一个高 1.9 m、宽 1.0 m 的门,舍内布置东西走向 4 个栏位,栏间用铁栅栏隔开,每栏水泥睡台 8 m²,垫料区 40 m²。传统水泥地面猪舍为东西走向,猪舍长 60 m、宽 8.5 m,东西两端各设一门,南北墙设有窗户。

1.2 饲养方式及管理

发酵床和传统猪舍均采用鸭嘴式饮水器自由饮水,料槽自由采食。发酵床于 2013 年 6 月 3 日进猪,进猪平均体重为 30 kg,10 月 30 日出栏,其平均体重为 98 kg。传统猪场进、出栏时间为 6 月 6 日和 11 月 1 日,进、出栏猪平均体重分别为 35、90 kg。8 月 6 日至 10 月 17 日,发酵床和传统猪舍饲养密度范围分别为 0.172~0.224、0.19~0.333 头·m⁻²,10 月 30 日发酵床试验猪全部出栏,传统猪舍试验猪大部分出栏,密度为 0.07 头·m⁻²。

发酵床猪舍与传统猪舍均采用自然通风。发酵床猪舍通过敞开东西两端的门以及向上卷起南北两侧的聚乙烯膜达到通风目的,传统猪舍通过敞开东西两端的门及南北窗(每个窗户开一半)来通风。试验期间,通风时间为 9:00—17:00,夜间两猪舍为了保温,适当关闭通风设施。发酵床猪粪便被垫料吸收分解,饮水器漏水通过饮水槽排出。传统猪舍每天上午 8:

00 进行人工清粪,清出的粪便以堆肥方式处理;猪尿液、饮水器漏水以及冲洗水通过猪舍内的凹槽排出,其中仅含有少量猪粪,其温室气体排放情况以化粪池固液分离管理方式进行估算。

1.3 样品的采集与分析

为确定合理的采样频率、采样方式,进行了预备试验。设置 3 个采样点、4 个高度(距饲养地面 0.5、1、1.5、2 m),每 4 h 为一周期,前 2 h 每 20 min 采集 1 次,后 2 h 不采样,连续采集 24 h,分析发现 9:00—11:00 时段内 1 m 和 2 m 处舍内温室气体平均排放通量与全天的平均排放通量最为接近。同时,通过连续 3 d 的样品采集分析,发现每天舍内温室气体的平均排放通量变化不明显。因此,将样品采集时间分别设置为 2013 年 8 月 6 日(0 d)、9 月 3 日(28 d)、9 月 18 日(43 d)、10 月 3 日(58 d)、10 月 17 日(72 d)以及 11 月 3 日(89 d),共采集 6 批样品,采样时间间隔约 15 d。采样时间为每天上午 9:00—11:00,采样点为猪舍的中心位置及中心位置东西两侧 10 m 处,采样高度为距离猪舍饲养地面 1 m 和 2 m 处,用 20 mL 注射器采样并注入体积为 18.5 mL 的真空玻璃瓶,每次采集 6 个样品,以 1 m 和 2 m 处测量的平均值代表这个时刻舍内气体的浓度。每 20 min 采集 1 次,连续采集 2 h(采样过程中尽量避免人为干扰),共采集 42 个气样,用同一点位同一高度的 7 个气样浓度值的平均值代表该点位该高度日平均浓度,共 3 个重复。为保证环境温室气体浓度不受猪舍温室气体的影响,同时考虑到周围大气浓度基本稳定,每日采集 3 个上风向距猪舍 50 m 处的环境气体样品作为参照。

舍内通风量采用国际通用二氧化碳平衡法计算,董红敏等^[10]对该方法进行了详细的描述,根据 CIGR 选择具体参数^[14]。采集的气体样品在一周内完成测定,使用仪器为 HP7890A 气相色谱仪。每天用标准气体进行标定,标准气体由南京晨虹特气集团提供。

数据分析采用 SPSS 18.0 及 Excel 2010 软件,Origin8.5 制图。方差分析采用单因素方差分析(One-way ANOVA),Duncan 新复极差法检验不同试验间的显著性差异,显著水平为 $P < 0.05$ 。

1.4 排放通量的计算

本文以单位时间内单个育肥猪温室气体的排放通量代表养殖过程中猪舍的气体排放情况。根据二氧化碳平衡法,其计算公式为:

$$E = 24 \times 10^{-3} \times V \times (C_i - C_e) / n$$

式中: E 为单位时间内每头猪温室气体的排放通量,

$g \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; V 为猪舍通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; n 为猪舍中饲养猪的头数, 头; C_i, C_e 分别为猪舍内外的不同气体浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。按照增温潜能的不同, 把 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 转化为 CO_2 当量排放, 试验期间每天每头猪排放的 CO_2 当量的温室气体总量计算公式为:

$$Q_{\text{CO}_2} = E_{\text{CO}_2} + 23 \times E_{\text{CH}_4} + 296 \times E_{\text{N}_2\text{O}}$$

式中: E_{CO_2} 、 E_{CH_4} 和 $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别是 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放通量^[2], $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 23 和 296 分别是 CH_4 和 N_2O 相对于 CO_2 的增温潜能。

2 结果与分析

2.1 舍内外 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 浓度变化

由图 1(a)可知, 随时间推移发酵床猪舍和传统猪舍 1 m 和 2 m 处 CH_4 浓度都呈先升高后降低趋势。发酵床猪舍 1 m 和 2 m 处 CH_4 浓度分别从第 0 d 的 1.41、1.47 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到第 72 d 时 2.02、2.14 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 增幅分别为 41.6% 和 45.8%; 传统猪舍相应的增幅分别为 241.3%、205.7%, 其变化幅度较发酵床大。试验期间, 发酵床舍内平均 CH_4 浓度为 1.59 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 低于传统猪舍的 2.60 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 是传统猪舍的 61.2%。舍外 CH_4 浓度相对稳定, 变化范围为 1.23~1.37 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

由图 1(b)可知, 发酵床猪舍 1 m 和 2 m 处 CO_2 浓度分别由第 0 d 的 753.77、746.99 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到第 72 d 的 1 088.95、1 189.40 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别增加了 335.18、442.41 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 传统猪舍第 72 d 时 1 m 和 2 m 处 CO_2 浓度分别为 1 787.59、1 611.68 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。发酵床舍内平均 CO_2 浓度(893.95 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)要低于传统猪舍(1 137.71 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 是传统猪舍的 78.6%。舍外 CO_2 浓度呈先平稳后升高趋势, 在第 89 d 时的浓度为 795.19 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。值得注意的是, 舍内 CO_2 浓度变化趋势与 CH_4 的变化具有一致性。

由图 1(c)可知, 发酵床猪舍 1 m 和 2 m 处 N_2O 浓度呈先升高后降低的趋势。分别由第 0 d 的 0.77、0.75 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到第 72 d 的 1.40、1.55 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别增加 0.63、0.80 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。传统猪舍 1 m 和 2 m 处 N_2O 浓度变化不大, 其范围分别为 0.77~0.89、0.74~0.86 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在 28 d 前发酵床舍内 N_2O 浓度低于传统猪舍, 28 d 后相反。发酵床舍内平均 N_2O 浓度(1.0 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)是传统猪舍(0.80 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)的 125.0%。舍外 N_2O 浓度起初偏低, 后期稳定在 0.72 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。

2.2 猪舍内温室气体排放通量分析

试验期间发酵床和传统猪舍不同气体的排放情

况如表 1。发酵床和传统猪舍内 CH_4 排放通量分别为 2.98~3.89 $\text{g} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 4.68~6.29 $\text{g} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, N_2O 为 2.68~5.06 $\text{g} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 0.22~0.46 $\text{g} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, CO_2 为 1.96~2.40 $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 1.39~1.78 $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。比较而言, 发酵床猪舍内平均 CH_4 排放通量较传统猪舍少 1.97 $\text{g} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 是其 63.6% ($P < 0.05$), 而 N_2O 和 CO_2 平均排放通量分别是传统猪舍 10 倍和 1.4 倍 ($P < 0.05$)。

2.3 温室气体排放总量分析

由表 2 可知, 堆肥中 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放通量变

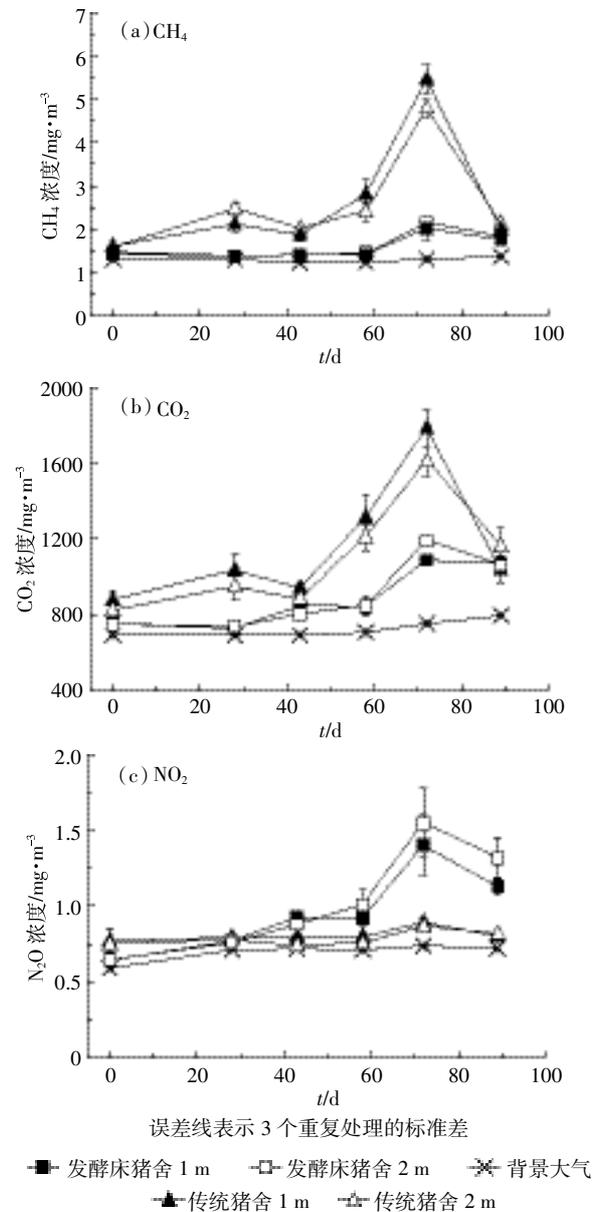


图 1 舍内外 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 浓度变化

Figure 1 Changes of CH_4 , CO_2 and N_2O concentrations inside and outside barns

表1 发酵床和传统猪舍温室气体排放通量的变化

Table 1 Changes of greenhouse gas fluxes in bio-bed and traditional barns

项目	各时段排放通量 Fluxes during each period					Mean±SD
	0~28 d	29~43 d	44~58 d	59~72 d	73~89 d	
CH ₄ /g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹						
发酵床猪舍	3.50	3.30	2.98	3.42	3.89	3.44±0.12b
传统猪舍	5.20	5.44	4.68	5.52	6.29	5.41±0.16a
N ₂ O/g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹						
发酵床猪舍	2.68	3.01	3.57	4.49	5.06	3.61±0.08a
传统猪舍	0.41	0.46	0.35	0.22	0.29	0.36±0.02b
CO ₂ /kg·头 ⁻¹ ·d ⁻¹						
发酵床猪舍	1.96	2.03	2.06	2.25	2.40	2.12±0.06a
传统猪舍	1.42	1.39	1.58	1.47	1.78	1.52±0.04b

注:各时段排放通量指该时段开始、结束排放通量的平均值;Mean±SD 指加权平均值;a,b 指不同饲养模式同种气体排放通量达到 0.05 显著水平。

Note: Fluxes during each period refer to the average of the fluxes at the beginning and the end. Mean±SD was the weighted average. a, b mean that the fluxes for the same gas were significantly difference between different raising modes at 0.05 level.

化范围分别为 56.70~137.70、0.16~2.30、0.15~5.10 g·头⁻¹·d⁻¹, 其平均排放通量分别为 97.20、1.05、2.53 g·头⁻¹·d⁻¹。总体而言,堆肥管理中 97.5%的 C 以 CO₂ 形式被氧化,以 CH₄ 形式损失的 C 仅占 2.5%;CO₂、CH₄

是化粪池排放的主要温室气体,N₂O 排放可以忽略^[15]。

由于试验限制,以前人研究结果的平均值表示传统猪场粪便、污水等温室气体排放情况(表 3)。发酵床猪场每天每头猪排放 CO₂ 当量的温室气体总量为 3.27 kg·头⁻¹·d⁻¹,CO₂ 排放量所占比例最大,达 65.0%,其次是 N₂O 占 33.0%,CH₄ 所占比例最低,仅为 2.0%。传统猪场每天每头猪排放 CO₂ 当量的温室气体总量为 2.59 kg·头⁻¹·d⁻¹,其中 CO₂、N₂O、CH₄ 排放量所占的比例分别为 63.2%、16.1%、20.7%,CO₂ 排放量所占比例最大,与发酵床的研究结果一致。然而传统猪场 CH₄ 的排放总量中有 15.31 g·头⁻¹·d⁻¹ 来源于化粪池,对传统猪场 CH₄ 的排放具有较大的影响。在不同来源中,猪舍的温室气体排放量较大,占总量-CO₂ 当量的 67.6%,堆肥、化粪池分别占 18.1%、14.3%。总体而言,发酵床和传统养猪过程中 CO₂ 的排

表2 猪粪便堆肥及化粪池管理过程中温室气体的排放通量(g·头⁻¹·d⁻¹)

Table 2 Greenhouse gas fluxes from pig manure composting and swine lagoons

来源 Source	参考文献 Reference	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
堆肥	Wolter ^[16]	137.70	1.22	5.10
	Fukumoto ^[17]	—	2.30	2.60
	罗一鸣 ^[18]	—	0.53	2.28
	李丽劫 ^[19]	56.70	0.16	0.15
	平均值	97.20	1.05	2.53
化粪池	李娜 ^[20]	16.23	—	15.31
	平均值	16.23	—	15.31

表3 发酵床和传统猪场温室气体排放情况

Table 3 Comparison of greenhouse gas emissions from bio-bed and traditional farms

饲养模式 Feeding mode	来源 Sources	CO ₂ /g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹	N ₂ O/g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹	CH ₄ /g·头 ⁻¹ ·d ⁻¹	总量-CO ₂ 当量 Total-CO ₂ equivalent/kg·头 ⁻¹ ·d ⁻¹
发酵床猪场	猪舍	2 120.0(65.0)	3.61(33.0)	3.44(2.0)	3.27
	堆肥	97.2(20.8)	1.05(66.7)	2.53(12.5)	
传统猪场	化粪池	16.23(4.4)	—	15.31(95.6)	0.37[14.3]
	猪舍	1520(86.8)	0.36(6.1)	5.41(7.1)	1.75[67.6]
	总量	1 633.43(63.2)	1.41(16.1)	23.25(20.7)	2.59

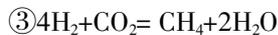
注:总量-CO₂ 当量指试验期间每天每头猪的温室气体排放总量;()内的值指 CO₂ 当量值占对应总量的百分比,%;[]内的值指不同来源的排放占总量的百分比,%。

Note:The total CO₂ equivalent refers to total greenhouse gas emissions per day per pig during the experiment. Data in the parentheses refers to the percentages of CO₂ equivalent value of the total,%. The values in the square brackets refer to the percentages of different source emissions of the total, %.

放对 CO₂ 当量的温室气体总量贡献率较大,发酵床猪场每天每头猪排放的 CO₂ 当量的温室气体总量较传统猪场多 26.3%即 0.68 kg·头⁻¹·d⁻¹。

3 讨论

试验期间,发酵床舍内 CH₄、CO₂、N₂O 的平均浓度分别是传统猪舍的 61%、79%、125%。两种猪舍舍内 CH₄ 与 CO₂ 变化趋势具有一致性,而且前者浓度较低。林而达等^[21]认为动物粪便在厌氧条件下生成 CH₄ 分三个阶段完成,分别为水解、产酸和产甲烷过程,其化学反应式如下:



从反应方程式中可以看出粪便产生 CH₄ 含量低于 CO₂ 含量,且相对滞后。研究发现同一批次的发酵床舍内 1 m 和 2 m 处的平均 CO₂ 含量均低于传统猪舍,第 72 d 时发酵床和传统猪舍平均 CO₂ 浓度达到最大值,分别为 1 139.18、1 699.63 mg·m⁻³,传统猪场 CO₂ 含量已超过畜禽舍环境质量标准中 CO₂ 含量的限制标准 1500 mg·m⁻³(NY/T 388—1999),舍内 CO₂ 含量过高会影响猪的生产效率,并且不利于饲养管理员的健康^[22]。舍内气体的浓度与饲养密度、通风换气情况密切相关,因此传统猪舍应注意舍内通风状况。第 89 d 时发酵床和传统猪舍气体浓度均有不同程度的下降,主要是因为发酵床舍内猪出栏无新的排泄物产生,传统猪舍猪头数显著减少导致。

试验期间,发酵床猪舍每天每头猪的温室气体排放总量较传统猪舍多 1.52 kg·头⁻¹·d⁻¹,CO₂、N₂O 分别比传统猪舍多 600、3.25 g·头⁻¹·d⁻¹,CH₄ 则少 1.97 g·头⁻¹·d⁻¹(表 3)。发酵床舍内 CO₂ 主要由微生物降解有机质和猪呼吸产生,CH₄ 主要源自猪粪便、垫料在厌氧条件下发酵分解产生。木屑、稻壳都是多孔结构,有利于发酵床垫料创造有氧环境,同时猪的翻拱使猪粪尿与垫料充分混合,在有氧环境下实现猪粪尿快速发酵分解,增加 CO₂ 产生的同时减少 CH₄ 产生;同步监测表明,该发酵床床体 10 cm 深度温度在 29~45 ℃(数据未列出)范围内,这有利于微生物的大量繁殖,增加 CO₂ 的产生。因此,发酵床猪舍 CO₂ 排放通量要高于传统水泥地面猪舍(约 1.4 倍),CH₄ 则低于传统猪舍,是其 63.6%。N₂O 主要是通过生物硝化及反硝化过程产生,其过程受温度、水分含量、pH、有机质等诸多因素的影响^[23],粪便的管理方式^[13]及总 N 输入

量^[24]亦会影响 N₂O 的产生。传统猪舍每天采取人工清粪,粪便不会在猪舍内累积残留,减少了 N₂O 在舍内的排放,而发酵床猪粪尿直接排放到垫料中,猪粪尿在垫料中的累积增加了 N₂O 的产生。此外,发酵床垫料中的 N 素为 N₂O 的排放提供了大量 N 源。这些因素导致了发酵床猪舍 N₂O 排放通量大于传统猪舍,也是发酵床舍内 N₂O 浓度呈上升趋势的一个原因。需要指出的是,发酵床舍内有一部分温室气体来源于垫料的分解,如能在研究中扣除垫料分解产生的排放量,可更准确地获得发酵床养殖条件下动物本身的排放量。

猪舍温室气体的排放是发酵床养猪模式温室气体的源,亦是传统猪场养殖模式下温室气体排放的一个场所,但猪粪便及污水后续管理过程同样会产生大量的温室气体。堆肥是粪便管理的一个主要途径,由于试验地点、方法、猪粪便的性质等因素影响,不同文献堆肥的温室气体排放情况差异较大(表 2)。化粪池是污水排放温室气体的主要场所,其中 CH₄ 是化粪池 CO₂ 当量温室气体排放总量的主要贡献者。在综合考虑粪便堆肥和化粪池温室气体的排放情况后,发酵床养猪模式每天每头猪排放的 CO₂ 当量温室气体的总量仍高于传统养猪模式,与 Philippe 等^[8]研究结果一致,其中发酵床养猪模式的 CO₂、N₂O 分别比传统猪场多 486.57、2.2 g·头⁻¹·d⁻¹。这可能与发酵床垫料、粪便的清理方式有关。相对的,CH₄ 则少 19.81 g·头⁻¹·d⁻¹,这主要是因为化粪池产生较多的 CH₄ 导致。虽然通过引用前人的研究结果估算了堆肥以及化粪池管理中温室气体的排放,但考虑到文献的局限性,尤其对猪粪尿、生产污水固液分离后化粪池温室气体排放的研究较少,国内仅见李娜等^[20]做了相关研究。因此,要合理、准确估算传统猪场养殖模式下温室气体的排放情况有待进一步研究。

4 结论

(1)发酵床舍内 CH₄、CO₂、N₂O 的平均浓度分别是传统猪舍的 61.2%、78.6%、125.0%。

(2)发酵床猪舍内平均 CH₄ 排放通量是传统猪舍的 63.6%,而 N₂O 和 CO₂ 平均排放通量分别是传统猪舍 10 倍和 1.4 倍。

(3)在综合考虑传统养猪模式粪便堆肥和化粪池温室气体的排放情况后,发酵床每天每头猪排放的 CO₂ 当量的温室气体总量较传统养猪模式多 26.3%,CO₂ 是发酵床温室气体排放总量的主要贡献者,其次是 N₂O。

参考文献:

- [1] Nakicenovic N, Swart R. Special report on emissions scenarios[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: The scientific basis; Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Hansen J E, Lacis A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, 346: 713-719.
- [4] Su W H, Song W Z, Zhang H, et al. A primary study of nitrous oxide emission in agriculture region of Northern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1990, 2(4): 85-94.
- [5] Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T D, et al. Livestock's long shadow: Environmental issues and options[M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006.
- [6] Osada T, Rom H, Dahl P. Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photoacoustic detection[J]. *Transaction of ASAE*, 1998, 41(4): 1109-1114.
- [7] Jeppsson K H. Diurnal variation in ammonia, carbon dioxide and water vapour emission from an uninsulated, deep litter building for growing/finishing pigs[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 81(2): 213-224.
- [8] Philippe F, Laitat M, Canart B, et al. Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs, kept either on fully slatted floor or on deep litter[J]. *Livestock Science*, 2007, 111(1): 144-152.
- [9] 朱志平, 董红敏, 尚斌, 等. 妊娠猪舍氨气及氧化亚氮浓度测定与排放通量的估算[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊2): 175-178.
ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, SHANG Bin, et al. Measurement of ammonia and nitrous oxide concentrations and estimation of the emission rates from gestation pig buildings[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Suppl2): 175-178.
- [10] 董红敏, 朱志平, 陶秀萍, 等. 育肥猪舍甲烷排放浓度和排放通量的测试与分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 123-128.
DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, TAO Xiu-ping, et al. Measurement and analysis of methane concentration and flux emitted from finishing pig house[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(1): 123-128.
- [11] 朱志平, 康国虎, 董红敏, 等. 垫料型猪舍春夏育肥季节的氨气和温室气体状况测试[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 356-361.
ZHU Zhi-ping, KANG Guo-hu, DONG Hong-min, et al. Measurement of ammonia and GHGs concentration of hoop structure barn for finishing pigs in summer and spring season[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(3): 356-361.
- [12] 袁玉玲, 王立刚, 李虎, 等. 猪粪固体自然堆放方式下含氮气体排放规律及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1422-1428.
YUAN Yu-ling, WANG Li-gang, LI Hu, et al. Nitrogenous gas emissions from solid swine manure under natural composting conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1422-1428.
- [13] 高姗姗, 邓柏林, 刘薇, 等. 育肥猪舍甲烷和氧化亚氮排放浓度检测[J]. 猪业科学, 2012, 29(12): 80-82.
GAO Shan-shan, DENG Bo-lin, LIU Wei, et al. Methane and nitrous oxide emissions concentration detection from pig fattening[J]. *Swine Industry Science*, 2012, 29(12): 80-82.
- [14] Pedersen S, Sällvik K. 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses-Heat and moisture production at animal and house levels[M]. Denmark Danish Institute of Agricultural Sciences Press, 2002.
- [15] Laguee C, Gaudet E, Agnew J, et al. Greenhouse gas emissions from liquid swine manure storage facilities in Saskatchewan[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(6): 2289-2296.
- [16] Wolter M, Prayitno S, Schuchardt F. Greenhouse gas emission during storage of pig manure on a pilot scale[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 235-244.
- [17] Fukumoto Y, Osada T, Hanajima D, et al. Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration: Effect of compost pile scale[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89(2): 109-114.
- [18] 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(22): 235-242.
LUO Yi-ming, LI Guo-xue, 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.
- [19] 李丽劼. 竹炭的添加对猪粪堆肥过程氮素持留与温室气体减排的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
LI Li-jie. Effects of bamboo charcoal on nitrogen conservation and greenhouse gas emissions reduction during swine manure composting [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [20] 李娜, 董红敏, 朱志平, 等. 夏季猪场污水贮存过程中 CO₂, CH₄ 排放试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 234-238.
LI Na, DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, et al. Carbon dioxide and methane emission from slurry storage of swine farm in summer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(9): 234-238.
- [21] 林而达, 李玉娥. 全球气候变化和温室气体清单编制方法[M]. 北京: 气象出版社, 1998.
LIN Er-da, LI Yu-e. Inventory preparation method of global climate change and greenhouse gas[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998.
- [22] Donham K J. The concentration of swine production: Effects on swine health, productivity, human health, and the environment[J]. *Veterinary Clinics of North America-Food Animal Practice*, 2000, 16(3): 559.
- [23] Jia J, Li B, Chen Z, et al. Effects of biochar application on vegetable production and emissions of N₂O and CH₄[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(4): 503-509.
- [24] 张丽萍, 孙国峰, 盛婧, 等. 猪舍不同发酵床垫料氨挥发与氧化亚氮排放特征[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 473-479.
ZHANG Li-ping, SUN Guo-feng, SHENG Jing, et al. Characteristics of ammonia volatilization and nitrous oxide emission of different fermentation beds in pig pens[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4): 473-479.