

猪舍不同发酵床垫料温室气体排放研究

魏思雨¹, 李建辉¹, 刘姝彤¹, 郭海宁¹, 马 晗¹, 尹微琴¹, 王小治^{1,2*}, 封 克^{1,2}

(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)

摘 要:为评价生态养猪过程中不同发酵床垫料组成对温室气体排放的影响,在南京六合发酵床养殖基地,设置3种不同垫料的发酵床处理,其垫料组成分别为木屑(S)、木屑+稻壳(SR)、木屑+稻壳+秸秆段(SRS)。在一个试验周期内,连续测定垫料中CO₂、CH₄及N₂O等温室气体的排放,以及pH、含水率、铵态氮和硝态氮的动态变化,同时分析了三种垫料温室气体排放差异的机理。结果表明,垫料排放的温室气体以CO₂和N₂O为主,二者在三种温室气体二氧化碳排放当量中的占比高达99.3%~99.6%;三种垫料N₂O的排放主要集中在猪出栏前一个月,占整个试验期间排放总量的61%~68%;在垫料中添加秸秆段(SRS)对CO₂和N₂O排放总量的影响不显著,但显著增加CH₄的排放,其CH₄排放总量分别是S和SR的2.30倍和2.46倍;SRS的二氧化碳排放当量亦高于S和SR,而S和SR的二氧化碳排放当量相差不大,三种处理间无显著性差异。

关键词:猪发酵床;温室气体;秸秆

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)10-1991-06 doi:10.11654/jaes.2015.10.022

Greenhouse Gas Emissions from Bio-bed Pig Raising Units with Different Bedding Materials

WEI Si-yu¹, LI Jian-hui¹, LIU Shu-tong¹, GUO Hai-ning¹, MA Han¹, YIN Wei-qin¹, WANG Xiao-zhi^{1,2*}, FENG Ke^{1,2}

(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)

Abstract: Bio-bed pig-raising is a new pig-raising technique, and is drawing increasing interests. However, the impact of this new system on greenhouse gas emissions is poorly understood. In this study, greenhouse gas (CO₂, CH₄ and N₂O) emissions were monitored in pig units three bedding materials, including sawdust (S), sawdust + rice husk (SR) and sawdust + rice husk + straw (SRS), in Liuhe Bio-bed pig farms, Nanjing. The physical and chemical properties of bedding materials (pH, moisture, ammonium and nitrate) were also measured during the experimental period. Results showed that CO₂ and N₂O were the main greenhouse gases, both accounting for 99.3%~99.6% of the total greenhouse gas emissions. The emissions of N₂O mainly occurred during the last one month of the feeding period, accounting for 61%~68% of the total N₂O emission amount. The total CO₂ and N₂O emissions during the experimental period were not significantly different ($P>0.05$), while CH₄ emissions were significantly different ($P<0.01$) among three materials. The largest CH₄ emissions occurred in SRS treatment (18.60 g·m⁻²), followed by S treatment (8.10 g·m⁻²) and SR treatment (7.57 g·m⁻²). Carbon dioxide equivalent emissions were higher in SRS than in S and SR, while the carbon dioxide equivalent emissions were not significantly different ($P<0.05$) between S and SR. In addition, the carbon dioxide equivalent emissions per unit area were not significantly different in three beds during the experimental period ($P>0.05$). The mechanisms of the differences in three greenhouse gas emissions in the three treatments were also discussed.

Keywords: bio-bed; greenhouse gases; straw

发酵床养殖技术,应用自然农业理念和微生物处理技术,可实现养殖零排放、无臭味、缓解规模养

殖场的环境污染问题,是一种全新的养殖方式^[1]。随着发酵床养殖技术在国内的快速推广,其利弊及对环境的影响已引起学者的高度关注。目前,在评估发酵床养殖模式对温室气体排放的影响方面已取得了一定进展:Osada等^[2]测定了猪育肥阶段CH₄、CO₂与N₂O的排放情况;Jeppsson^[3]研究了育肥猪舍CO₂、NH₃、水蒸气的日变化规律;Philippe等^[4]测定了发酵床和水泥漏缝地面猪舍NH₃及温室气体的排放;郭

收稿日期:2015-05-04

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);江苏省六大人才高峰项目(NY--017);江苏省研究生科研创新计划(KYLX1347)

作者简介:魏思雨(1991—),江苏睢宁人,硕士研究生,从事固废资源化利用方面的研究。E-mail: 5222600021@qq.com

* 通信作者:王小治 E-mail: xzwang@yzu.edu.cn

海宁等^[5]对比研究了传统养猪模式与发酵床养猪模式的温室气体排放情况;张丽萍等^[6-7]研究了发酵床养殖过程中碳素和氮素的转化及 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等的排放情况。然而,不同垫料发酵床养猪过程中温室气体综合排放的环境效应研究还很缺乏。另外,为丰富垫料种类及实现秸秆的资源化利用,实践中已将秸秆作为垫料原料使用^[8]并大力推广。迄今为止,关于添加秸秆的发酵床垫料对环境的影响,特别是温室气体排放方面尚鲜有报道。本文围绕生态养猪过程中温室气体的排放,探讨垫料含水量、pH、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)对温室气体排放的机理,为推行发酵床的科学养殖、探寻减少温室气体排放的相应措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 原料及试验区设置

1.1.1 试验原料

发酵床垫料原料均由市场购买,秸秆为小麦秸秆,打捆后填充在床底使用,木屑和稻壳均直接使用,床体制作过程中未使用任何发酵菌剂。供试材料的基本性质见表1。

表1 发酵床垫料原料的理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of bedding materials

指标	含水量/%	pH	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹
木屑	40.86±0.06	6.84±0.20	12.52±1.94	46.03±1.27
稻壳	12.86±0.22	7.35±0.09	31.49±0.90	56.94±0.74
秸秆	15.32±0.19	5.70±0.03	3.68±0.70	126.52±5.72

1.1.2 试验区设置

试验在江苏省农科院南京六合基地猪养殖场进行,共设3种垫料处理:S(锯木屑)、SR(稻壳+锯木屑,两者质量比1:1)、SRS(稻壳+锯木屑+秸秆段,三者质量比1:1:1),每种处理3个重复。S、SR和SRS的垫料添加总量分别为2052、1900、1470 kg。3种原料分层添加:秸秆段平铺最下层,中间层铺设稻壳,最上层为木屑。猪舍为东西走向,中间通过70 cm高水泥墙和1 m高铁栅栏分隔成9栏,每个猪栏面积19 m²,其中垫料区面积16 m²,床体厚度60 cm,存栏育肥仔猪5头。试验从2014年7月30日至11月14日,共计107 d。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 垫料采集

将每个栏区划分两个采样区:粪尿区、非粪尿区

(采用多点测量并计算各个区的面积);分三层(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)进行取样,各处理6个重复,每隔15 d采样一次。

1.2.2 气体采集

采用静态箱法在粪尿区和非粪尿区采集CO₂、CH₄和N₂O^[9],每隔15 d采样一次,采样时间为9:00—11:00,每点采4个样,每次取不少于18 mL的气体于真空瓶中贮存,2周内测定。具体方法同文献[5]。

1.2.3 样品分析

CO₂、CH₄和N₂O浓度用Agilent7890A气相色谱仪测定,按实测浓度计算气体的排放通量及试验期间累积排放量。根据2007年的IPCC报告^[10],由下列公式计算二氧化碳排放当量总量。

$$F = \frac{M}{V_0} \times \frac{T_0}{T} \times H \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times 24 \times (d_{n+1} - d_n), (n=1, 2, \dots, 7) \quad (2)$$

$$E(\text{CO}_2) = Y_{\text{CO}_2} + 25Y_{\text{CH}_4} + 298Y_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

式中: F 为气体排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹; M 为气体的摩尔质量,g·mol⁻¹; V_0 为标准状态下(温度273.15 K,气压101.325 kPa)气体的摩尔体积,22.41×10⁻³ m³·mol⁻¹; T_0 为标准状态下的空气绝对温度,K; T 为采样时的绝对温度,K; H 为采样箱的净高度,m; dc/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率; Y 为养殖周期排放总量,g·m⁻²; i 为采样批次; $E(\text{CO}_2)$ 为换算成CO₂后的排放当量总量。

用烘干法测含水率;S-3C型pH计测pH;氯化钾浸提-紫外分光光度法测NO₃⁻-N;氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测NH₄⁺-N。

1.2.4 统计分析

数据采用Microsoft Excel 2007软件处理,显著性分析由SPSS18.0完成,Origin 8.5绘图。

2 结果与分析

2.1 发酵床垫料使用过程中物料性质的变化

2.1.1 含水量的变化

如图1所示,0~20 cm垫料层,S含水量在61 d时显著升高($P<0.05$),是初始时1.33倍,76~107 d期间无显著变化($P>0.05$);SR含水量初始时较高,其他时期处于50%~55%之间;SRS含水量61 d前变化不明显,在61~76 d时显著降低($P<0.05$),76 d达到最低点34.7%,76~107 d时又逐渐升高。20~40 cm垫料层,S含水量后期显著高于前期($P<0.05$);SR的含水

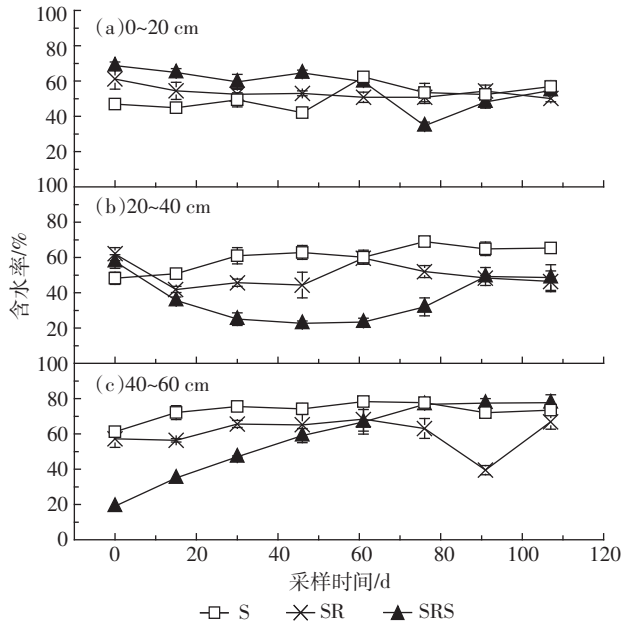


图1 不同垫料组合含水率变化

Figure 1 Changes of moisture content in beds with different bedding materials

量在前期先降低后升高,其中 15~46 d 含水量无明显变化,后期(61~107 d)下降;SRS 含水量 15~76 d 显著低于初始和 91~107 d ($P<0.05$)。40~60 cm 垫料层,S 和 SR 含水量分别保持在 72%~78%和 56%~68%之间;SRS 含水量在 0~61 d 显著升高 ($P<0.05$),76~107 d 基本稳定在 77%。

2.1.2 pH 的变化

如图 2 所示,0~20 cm 垫料层,SR 和 SRS 的 pH 在总体上变化情况一致,S 的 pH 较 SR 和 SRS 低,三种处理的 pH 均在 46 d 时出现峰值,分别为 7.21、7.87 和 7.73。20~40 cm 垫料层,SR 和 SRS 的 pH 和 0~20 cm 垫料层较类似,S 的 pH 在整个过程中低于 SR 和 SRS,后期 pH 比初始时略高 0.61。40~60 cm 垫料层,S 的 pH 无明显变化;SR 的 pH 在发酵过程中出现波动,初始和 46 d 时最低;SRS 的 pH 在 0~61 d 显著上升 ($P<0.05$),61~107 d 变化不显著,结束时为 7.66。

2.1.3 养殖过程 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化

如图 3 所示,各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化总体上一致。0~76 d 各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化均不显著 ($P>0.05$),76~91 d 显著升高 ($P<0.05$), (91±15) d 达到峰值,分别为 259.9、295.2、469.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 107 d 分别降至 149.3、227.3、328.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较初始增加 140.5、216.8、318.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。整个试验期间,SRS 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,SR 次之,S 最低。

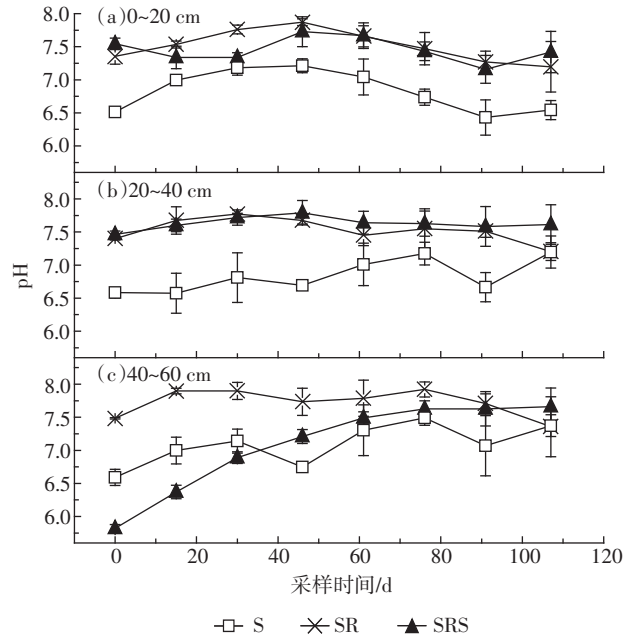
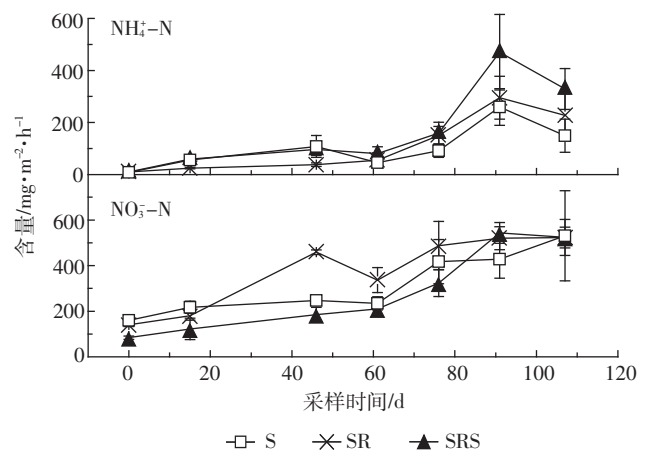


图2 不同垫料组合 pH 变化

Figure 2 Changes of pH in beds with different bedding materials

图3 不同垫料组合 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化Figure 3 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in beds with different bedding materials

各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著升高 ($P<0.05$),最终都在 530 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。S 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量总体上低于其他两种处理,SRS 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高。各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较初始分别增加 439.7、371.1 和 383.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2 三种温室气体的排放情况及 CO_2 排放当量

2.2.1 养殖过程三种温室气体的排放情况

如图 4 所示,试验期间 3 种发酵床垫料 CH_4 排放有明显差异。S 的 CH_4 排放通量相对稳定;SR 的 CH_4 排放通量前期较低,61~76 d 显著高于其他时段 ($P<0.05$);SRS 的 CH_4 排放通量在 15、61 d 和 76 d 显著

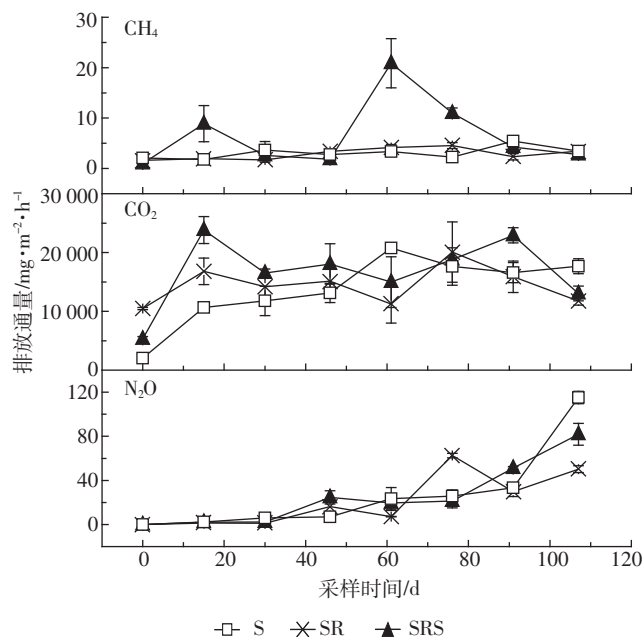


图4 不同垫料组合三种温室气体的排放规律对比

Figure 4 Dynamics of greenhouse gas emissions in beds with different bedding materials

高于其他采样时期($P<0.05$),分别达到 8.89、20.87、10.99 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

试验期间,各处理 CO_2 排放不同。S 的 CO_2 排放通量 0~61 d 显著升高($P<0.05$),61 d 时最大,达到 20.75 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,76 d 后稳定在 17.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右;SR 和 SRS 的 CO_2 排放通量各出现两个峰,SR 的 CO_2 排放通量 76 d 时显著高于其他时段($P<0.05$),达到 20.06 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,SRS 的 CO_2 排放通量在 15 d 和 91 d 时显著高于其他时段,分别达到 23.82、22.92 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。总体上,S 的 CO_2 排放通量后期比前期显著升高($P<0.05$),SR 和 SRS 的 CO_2 排放则明显分为前后两个阶段。

养殖过程中,S 和 SR 的 N_2O 排放通量显著升高($P<0.05$),SR 的 N_2O 排放通量在 46 d 以后出现较大波动。在 107 d 时 S、SR 和 SRS 的 N_2O 排放通量分别达到 115.13、50.23、80.80 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。整个试验期间,

各处理 N_2O 的排放集中在养殖后期。

2.2.2 CO_2 排放当量

根据相邻两次气体排放通量平均值和间隔时间计算在间隔时间内排放的气体总量,进而求出试验期间气体排放量和 CO_2 排放当量,结果见表 2。试验期间,SRS 的 CH_4 排放总量显著高于 S 和 SR($P<0.01$),分别是 S 和 SR 的 2.30、2.46 倍。SRS 的 CO_2 和 N_2O 排放总量略高于 S 和 SR,无显著差异($P>0.05$)。发酵床养猪过程温室气体的排放主要通过 CO_2 和 N_2O 两种形式,添加秸秆的发酵床温室气体 CO_2 排放当量总量略高于不添加秸秆的两种垫料,差异不显著($P>0.05$)。

3 讨论

发酵床舍内 CO_2 主要由微生物降解有机质和猪的呼吸产生,木屑、稻壳都是多孔结构,有利于发酵床垫料创造有氧环境,同时猪翻拱可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 CO_2 的排放量^[5]。研究表明,在试验前期 3 种垫料 CO_2 快速升高,其原因在于养殖前期环境温度较高,表层和下层垫料的好氧微生物活性较强,从而导致较高的 CO_2 排放。含水率的高低影响好氧发酵过程中垫料的物理及生物学性质^[11]。在一定的含水量范围内, CO_2 排放量与含水量呈显著负相关关系,主要是因为 CO_2 在水中可被离子化,且溶解度高,约为 0.9 $\text{cm}^3\cdot\text{L}^{-1}$ (O_2 约为 0.031 $\text{cm}^3\cdot\text{L}^{-1}$),有效的排水可降低垫料中 CO_2 溶解,增大 CO_2 在垫料孔隙中的扩散速率,导致 CO_2 排放量的增加^[12]。另外,在一定程度上,含水量越低,发酵床垫料的有氧环境越好,微生物降解有机质产生的 CO_2 越多,前期 SRS 处理 20 cm 以下的垫料含水量相对较低,且 15 d 时 SRS 的 CO_2 排放量大,随着养殖时间的延长,易降解有机质的快速消耗,使微生物的活动在一定程度上受到抑制,导致 SR 和 SRS 的 CO_2 排放通量在 30 d 时降低。三种处理的 CO_2 中后期排放通量快速增加。有研究指出,秸秆堆肥中纤

表 2 不同处理的温室气体排放量和 CO_2 排放当量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 2 Greenhouse gas emissions and carbon dioxide equivalent emissions in different bedding treatments($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

处理	CH_4 排放量		N_2O 排放量		CO_2 排放总量	总 CO_2 排放当量
	累积排放量	折合成 CO_2	累积排放量	折合成 CO_2		
S	8.10Bb	202.54Bb	57.88Aa	17 249.23Aa	36 842.40Aa	54 294.16Aa
SR	7.57Bb	189.33Bb	52.79Aa	15 732.81Aa	38 263.87Aa	54 186.02Aa
SRS	18.60Aa	464.91Aa	60.28Aa	17 963.43Aa	45 582.91Aa	64 011.25Aa

注:S:木屑;SR:木屑+稻壳;SRS:木屑+稻壳+秸秆段。同列的不同大、小写字母分别表示在 1%和 5%水平上差异显著。

纤维素酶、木聚糖酶、过氧化物酶、多酚氧化酶活性随堆料使用时间的延长而显著增加^[13],而纤维素、半纤维素、木质素的分解与酶活性关系密切,尹微琴等^[14]和李买军等^[15]研究也表明垫料中纤维素酶活性随着垫料使用时间的延长而增大。据此推断可能是由于纤维素、半纤维素等难降解的有机物有关酶活性的增强,使得微生物生长所需物质快速合成,加速微生物的生长,增加了CO₂的排放通量。本研究表明,试验期间,添加秸秆的处理CO₂排放总量略高于另外两种处理,无显著性差异($P>0.05$)。

CH₄一般通过产酸和不产酸两种途径产生,且两种途径都必须具备有机物和水分、厌氧环境、适于发酵菌和产CH₄菌生存和繁殖的温度^[12]。发酵床养猪过程中,氧气不足或局部厌氧会导致CH₄产生。本文结果显示,SRS的CH₄排放主要集中在前期和后期(图4),与张丽萍等^[7]和郭海宁等^[5]的研究结果相符。CH₄的排放与含水量关系密切(图1、图4),不同处理CH₄的合成在相应的最佳含水量时最大。其原因在于,含水量直接影响到微生物的活性及周围的环境状况,含水量适宜微生物的生长代谢时,氧气消耗量大,导致局部厌氧,含水量过高时,垫料通透性变差,也导致局部厌氧。S、SR和SRS的CH₄排放分别在垫料含水量62%~66%、56%~60%和48%~51%之间最大,过低或过高时都明显降低,说明对于不同的垫料组合,含水量对CH₄排放量的影响不同。因此,不同垫料组合CH₄排放的最适含水量有待深入研究,以便通过调节垫料的含水量来控制甲烷的生成。发酵床舍内CH₄主要源自猪粪便、垫料在厌氧条件下发酵分解,添加秸秆的发酵床垫料,由于秸秆易腐烂和结块,不利于空气流通,CH₄的排放总量显著高于其他两种处理。另外,垫料所含易分解有机物质成分(如纤维素、半纤维素和木质素)含量的不同导致3种垫料降解速率不一样,进而对CH₄排放造成影响。从减少CH₄温室气体排放考虑,秸秆作为发酵床垫料资源化利用的过程中要控制秸秆用量。

发酵床养殖过程中N₂O的排放主要通过硝化和反硝化作用。发酵床垫料的含水量、pH、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N等的变化会影响发酵过程中N₂O的产生和排放^[16]。有研究表明当含水量维持在60%以上时,氮素的转化主要以反硝化作用形成氮气为主^[17],可抑制N₂O的产生。本研究发现,垫料的含水量对N₂O的产生并无显著影响,和张丽萍等^[6]研究结果相似。同时垫料pH对N₂O排放的影响也不显著,垫料NH₄⁺-N和

NO₃⁻-N含量是影响N₂O排放的关键因素。垫料使用初期NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量均较低,随着时间的延长,出现不同程度的增高,61~91 d期间快速增长(图3)。Cegarra等^[18]研究表明,发酵过程中NH₄⁺-N在一定的发酵条件下,既可作为细胞生长的氮源供微生物利用,又可通过微生物的硝化作用转变为NO₃⁻-N, NH₄⁺-N和NO₃⁻-N通过硝化和反硝化作用产生N₂O^[19]。本文结果表明,三种垫料N₂O排放的快速增长期相对NH₄⁺-N和NO₃⁻-N滞后15 d左右。NH₄⁺-N含量的增加会促使NO₃⁻-N含量的增长,进而通过硝化和反硝化作用增加N₂O的产生量。因此,如何减少发酵床养殖过程中NH₄⁺-N向NO₃⁻-N转化及NO₃⁻-N向N₂O转化也是一个需要深入研究的问题。垫料中不断累积的猪粪尿和发酵床垫料中的氮素,导致发酵床舍内NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量增加,为N₂O的排放提供了大量氮源,进而使得N₂O浓度呈上升趋势。这和郭海宁等^[5]用微观气象法研究发酵床养殖过程中N₂O的排放结果一致。

本研究观察到,在测定的CH₄、CO₂和N₂O三种温室气体中,CH₄在CO₂排放当量总量中所占比例很小,仅为0.4%~0.7%,N₂O在CO₂排放当量总量中所占比例为28%~32%,CO₂占比最大,为68%~71%,因而发酵床温室气体的减排要以CO₂和N₂O为主。通过表2可以看出,添加秸秆段显著增大了垫料CH₄的排放量,一定程度上增大了垫料N₂O和CO₂的排放量;图1和图2表明,纯木屑和木屑/稻壳(1:1)处理的含水量和pH比较稳定,添加秸秆段的40~60 cm垫料层含水量和pH变化较大,对温室气体排放影响较显著;添加秸秆段对垫料CO₂排放当量总量的影响则不显著。这表明在发酵床垫料中合理添加秸秆段,既丰富垫料种类,又不会对环境造成较大影响,还可降低原料成本,实现秸秆的资源化利用。

4 结论

(1)纯木屑和木屑/稻壳(1:1)的处理含水量和pH比较稳定,添加秸秆段的40~60 cm垫料层含水量和pH变化较大,对温室气体排放影响较显著。

(2)发酵床养殖过程中,垫料温室气体主要以CO₂和N₂O的形式排放,二者在CO₂排放当量总量中的占比高达99.3%~99.6%。

(3)N₂O排放主要集中在猪出栏前一个月,占整个试验期间N₂O排放总量的61%~68%。

(4)在垫料中添加秸秆段显著影响垫料CH₄的排

放,对 CO_2 和 N_2O 的排放影响则不显著。

参考文献:

- [1] 李 娟. 发酵床不同垫料筛选及其堆肥化效应的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
LI Juan. Study on the selection of different litter ratio in deep-litter system and its effects on aging litter composting[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012.
- [2] Osada T, Rom H, Dahl P. Continuous measurement of nitrous oxide and ethane emission in pig units by infrared photoacoustic detection[J]. *Transaction of ASAE*, 1998, 41(4): 1109-1114.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 郭海宁, 李建辉, 马 晗, 等. 不同养猪模式的温室气体排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2457-2462.
GUO Hai-ning, LI Jian-hui, MA Han, et al. Emissions of greenhouse gases in different pig model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2457-2462.
- [6] 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.
- [7] 张丽萍, 孙国峰, 盛 婧, 等. 养猪舍不同发酵床垫料碳素流向及二氧化碳与甲烷排放初探[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1247-1253.
ZHANG Li-ping, SUN Guo-feng, SHENG Jing, et al. Emissions of carbon dioxide and methane in different pig biobeds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6): 1247-1253.
- [8] 刘 伟, 刘天明, 孔祥峰, 等. 不同垫料配方对发酵床养猪效果的影响[J]. 畜牧与兽医, 2011, 43(7): 45-46.
LIU Wei, LIU Tian-ming, KONG Xiang-feng, et al. Effects of different bedding formula on the effect on pig-rearing of different padding[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011, 43(7): 45-46.
- [9] Hao X Y, Chang C, Larney F J, et al. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 376-386.
- [10] IPCC. Climate change the physical science basis. Contribution of working group I to the forth report of the intergovernmental penal on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-10.
- [11] 罗 维, 陈同斌. 湿度对堆肥理化性质的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2657-2663.
LUO Wei, CHEN Tong-bin. Effects of moisture content of compost on its physical and chemical properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2657-2663.
- [12] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 240-249.
ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 240-249.
- [13] 周 颖. 秸秆与牛粪蚯蚓堆制处理时纤维素、半纤维素和木质素降解率及相关酶活性变化的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
ZHOU Ying. Study on the rate of cellulose, himicell use and lignin decomposition and enzyme activities change in the mixtures of cow manure and crop stalk during vermicomposting[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.
- [14] 尹微琴, 李建辉, 马 晗, 等. 猪发酵床垫料有机质降解特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 176-181.
YIN Wei-qin, LI Jian-hui, MA Han, et al. Degradation of organic components in pig bio-bed materials[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 176-181.
- [15] 李买军, 马 晗, 郭海宁, 等. 养猪场发酵床垫料及下层土壤中酶活性变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 777-782.
LI Mai-jun, MA Han, GUO Hai-ning, et al. Enzyme activities in bedding and soil layers of pig bio-beds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 777-782.
- [16] Huang G F, Zhong L J, Zhang Z D, et al. On nitrogen transformations and maturity during composting of pig manure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1459-1462.
- [17] Hwang S, Hanaki K. Effects of oxygen concentration and moisture content of refuse on nitrification, denitrification and nitrous oxide production[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 71(2): 159-165.
- [18] Cegarra J, Albuquerque J A, Gonzalez J, et al. Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") managed by mechanical turning [J]. *Waste Management*, 2006, 26(12): 1377-1383.
- [19] 吴伟祥, 李丽劫, 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 Wei-xiang, LI Li-jie, LÜ Hao-hao, et al. Mechanisms of nitrous oxide emission during livestock manure aerobic composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1704-1712.