

冬季侧窗通风猪舍氨气和温室气体排放特征

周忠凯, 杨殿林, 张海芳, 赵建宁, 王丽丽, 余刚

引用本文:

周忠凯, 杨殿林, 张海芳, 等. 冬季侧窗通风猪舍氨气和温室气体排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1359–1367.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1393>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同氮钾水平及氮形态差异对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响

夏淑洁, 刘闯, 袁晓良, 李俊雅, 李林洋, 张润琴, 李志国

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1122–1129 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1220>

长三角地区蔬菜生产的活性氮损失和温室气体排放估算

赵明炯, 王孝忠, 刘彬, 邹春琴, 陈新平

农业环境科学学报. 2020, 39(6): 1409–1419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1205>

黄腐酸钾对植烟土壤氮素转化及 N_2O 排放的影响

李青山, 王德权, 高政绪, 杜传印, 管恩森, 程谊, 王慎强

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1130–1139 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1188>

中国茶园 N_2O 排放及其影响因素

姚志生, 王燕, 王睿, 刘春岩, 郑循华

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 715–725 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0137>

生物滴滤塔/景观滤床工艺高效处理农村污水

刘梦雪, 曾非凡, 文红平, 林学明, 杨小明, 任宗玲, 李永涛, 张振

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1094–1102 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1311>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周忠凯, 杨殿林, 张海芳, 等. 冬季侧窗通风猪舍氨气和温室气体排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1359–1367.

ZHOU Zhong-kai, YANG Dian-lin, ZHANG Hai-fang, et al. Ammonia and greenhouse gas emissions from enclosed pig house with side-vent ventilation in winter season[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1359–1367.



开放科学 OSID

冬季侧窗通风猪舍氨气和温室气体排放特征

周忠凯^{1,2}, 杨殿林¹, 张海芳¹, 赵建宁^{1*}, 王丽丽¹, 余刚²

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室, 南京 210014)

摘要: 冬季猪舍通风管理方式影响猪舍内的环境质量以及污染物的排放, 为确定改造后猪舍侧窗负压通风系统6阶段管理对冬季舍内环境质量以及氨气和温室气体排放的影响, 对舍内温度、湿度和空气流速等环境指标进行了测定, 采用水分平衡方程确定了不同通风阶段猪舍的通风率, 利用 INNOVA 1412 多气体分析仪-连续采样测试技术, 对冬季猪舍 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 的排放进行了测定, 确定了不同通风量条件下氨气和温室气体的排放率。结果表明, 冬季侧窗通风密闭式育肥猪舍平均温度为 $13.7\text{ }^\circ\text{C}$, 湿度为 69.7% , 舍内最大温度与湿度差值分别为 $3.2\text{ }^\circ\text{C}$ 和 39.6% , 平均通风率为 $6\,207\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (单头生猪通风量: $24.9\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$), 舍内平均空气流速为 $0.28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 满足了育肥猪生长的要求; 冬季试验猪舍中 NH_3 平均浓度范围在 $8.42\sim 15.63\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, CO_2 平均浓度范围保持在 $2\,509\sim 5\,303\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, CH_4 浓度变化在 $1.11\sim 5.90\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 可满足冬季育肥猪生长的需求; 单头生猪 NH_3 、 CO_2 和 CH_4 的平均排放率分别为 $250.0\text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $79.9\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $57.7\text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$, 单头生猪累积日排放量分别为 $6.0\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $1.92\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.39\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, 试验期间没有监测到 N_2O 的排放; 采用的6级通风管理模式显著影响 NH_3 、 CO_2 的平均排放率, 对 CH_4 的排放影响不显著。

关键词: 水冲清粪猪舍; 侧窗通风; 气候条件; 氨气; 甲烷; 二氧化碳

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)06-1359-09 doi:10.11654/jaes.2019-1393

Ammonia and greenhouse gas emissions from enclosed pig house with side-vent ventilation in winter season

ZHOU Zhong-kai^{1,2}, YANG Dian-lin¹, ZHANG Hai-fang¹, ZHAO Jian-ning^{1*}, WANG Li-li¹, YU Gang²

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Institute of Facilities and Equipment in Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Key Laboratory for Protected Agricultural Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: This study evaluates the impact of a side-vent (SV) negative pressure ventilation system of six-stage management on the environmental quality and emissions of ammonia (NH_3) and greenhouse gases (GHGs) in an enclosed pig house during winter. Temperature, relative humidity, and air velocity data were obtained inside and outside of the pig house, and the barn ventilation rates were measured using the moisture (H_2O) balance equation at inlets and outlets at six stages. In addition, air samples were obtained from the inlets and outlets of the pig house to measure GHG concentrations using a custom-made multiplexer gas sampling system equipped with an INNOVA 1412 monitor. The analysis showed that the average air temperature and relative humidity inside the pig house were $13.7\text{ }^\circ\text{C}$ and 69.7% , respectively. The difference between maximum and minimum temperature and relative humidity was $3.2\text{ }^\circ\text{C}$ and 39.6% in pig house. The moisture balance ventilation rate of the pig house was $6\,207\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, whereas the ventilation rate of a single pig was $24.9\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. The air velocity in-

收稿日期: 2019-12-18 录用日期: 2020-03-10

作者简介: 周忠凯 (1984—), 男, 山东茌平人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事畜禽环境质量控制技术研究。E-mail: zhouzk@jaas.ac.cn

*通信作者: 赵建宁 E-mail: zhaojianing@caas.cn

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(17)3030]; 江苏省科技支撑计划项目 (BE2014342)

Project supported: The Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund [CX(17)3030]; The Science and Technology Support Program of Jiangsu Province, China (BE2014342)

side the pig house was $0.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The gas concentrations inside the pig house in winter were $8.42 \sim 15.63 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ for NH_3 , $2\ 509 \sim 5\ 303 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ for carbon dioxide (CO_2), and $1.11 \sim 5.90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ for methane (CH_4). The average emission rates of a single pig based on hourly means were $250.0 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ for NH_3 , $79.9 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ for CO_2 , and $57.7 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ for CH_4 , whereas the cumulative daily emissions were $6.0 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $1.92 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ and $1.39 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. No emission of nitrous oxide (N_2O) was observed. Therefore, ventilation management has a significant impact on the emissions of NH_3 and CO_2 . No significant difference in CH_4 emissions are noted among the different ventilation stages.

Keywords: barn flush water; side-vent ventilation; climate conditions; ammonia; methane; carbon dioxide

生猪集约化养殖过程中,为了维持较高的生产效率,在较小的土地面积上投入了大量的饲料、水和能源等,这些资源的使用缩短了物质的循环周期,影响着环境与生物间的物质能量平衡^[1-2],集约化生猪生产过程产生大量的粪便和污水,成为重要的污染源^[3-5]。有研究表明,氮肥施用和畜禽养殖一直是最主要的氨排放源,共占氨排放总量的80%以上^[6],粪便中大量的碳氮等物质,经过微生物代谢分解,成为 NH_3 和温室气体(CH_4 、 N_2O 和 CO_2)排放的主要来源。 NH_3 的过量排放会影响整个农业生态系统的物质循环,加剧农田生态系统铵态氮沉降^[7],引起水体富营养化和土壤环境酸化^[8],同时 NH_3 以硫酸铵和硝酸铵的形式进入大气中,形成可吸入性颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的前体^[9],影响生猪和饲养员的健康,进一步导致 N_2O 的排放^[10],同时由于 N_2O 与 CH_4 和 CO_2 共同通过改变气溶胶和云的物理特性,进一步增强对太阳辐射的散射作用,进而影响气候的变化^[11]。

然而生猪养殖过程中氨气和温室气体的排放受到动物自身特征(动物活动、体质量和数量以及饲料营养水平)^[12-13]、养殖工艺与模式^[14-15]、舍内粪便管理模式^[16-18]的影响。不同通风管理方式影响舍内的环境质量和污染物的排放,在冬季猪舍通风系统中,进气口尺寸、数量以及气流分布和速度是影响猪舍环境的主要因素,目前部分密闭式机械通风猪舍冬季仍然采用纵向通风管理,为保证猪舍内适宜的温湿度条件,风机运行间隔时间过长、排气流量过高导致舍内空气温度分布不均匀,对生猪生产造成影响。目前通过合理的通风管理(通风量和空气流速)改善猪舍内环境质量并降低猪舍氨气和温室气体的排放,成为控制养殖过程空气污染物排放的主要手段,本文据此制定适合该区域最佳的通风管理策略^[19-20]。为确定冬季通风管理对猪舍内环境质量以及氨气和温室气体排放的影响,本研究对江苏苏北地区密闭式机械纵向负压通风水冲清粪猪舍的冬季通风系统进行了改造,由纵向负压通风改为侧窗负压通风方式。目前侧窗负压通风下猪舍内环境质量以及氨气和温室气体数

据缺乏。本文探讨了6阶段通风管理模式对猪舍内环境状况以及氨气与温室气体排放的影响,阐述了不同通风时段密闭型猪舍氨气和温室气体浓度的变化特征及排放规律,研究结果为改善猪舍内空气质量、降低氨气和温室气体排放提供技术和数据支持。

1 材料与方法

1.1 生猪养殖设施及设备

试验选择气候条件稳定的2016年1月23日至26日,在江苏省淮安市某规模化养猪场($33^\circ 30' 57.81'' \text{ N}$, $118^\circ 49' 23.54'' \text{ E}$,海拔17 m)进行。试验猪舍为密闭式猪舍,猪舍尺寸为 $54.0 \text{ m} \times 14.0 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),外围护结构为砖混结构,屋顶由彩钢岩棉夹心板覆盖,以提高冬季保温和夏季隔热性能,猪舍中间砌有砖墙与猪舍吊顶将猪舍分成两个独立的养殖仓,其主要结构及尺寸见图1。冬季通风方式选择侧墙通风小窗-风机负压通风,猪舍通风系统由4台直径为138 cm的风机(额定功率为1.1 kW,额定风量为 $32\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)和2台直径为92 cm的风机(额定功率为0.37 kW,额定风量为 $27\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)组成,工作静压10~60 Pa,进气系统由设置在猪舍侧墙1.8 m处的12个尺寸为 $55.0 \text{ cm} \times 25.0 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽)的通风小窗组成。试验猪舍生猪养殖量为500头,由水泥墙分割成两个独立的养殖仓,每个独立的养殖仓饲养250头,分为7栏饲养,喂食采用自由采食方式,每栏设有1个饮水器和1个饲料槽,采用自动喂料和饮水系统,猪舍采用水冲清粪方式,每日清粪1次;育肥周期4~5个月,试验期间生猪平均质量75 kg。

1.2 舍内环境指标和气体浓度测定

选择北侧生猪养殖仓,在舍外和仓内15.0、30.0、45.0 m处,1.0 m高度分别安装1台HOBO温湿度记录仪(HoboPro Data logger, Onset Computer Corporation, USA)测定舍内温湿度,采集频率为 $5 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ 。每日分别在4:00—5:00、8:00—9:00、10:00—11:00、13:00—14:00、16:00—17:00、19:00—20:00,使用Testo405-V1手持式热敏风速仪(Testo AG, Germany)测定猪舍

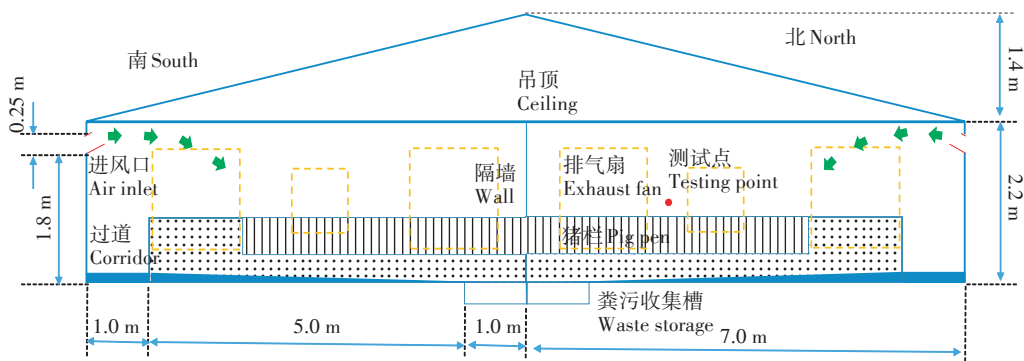


图1 猪舍结构与通风系统

Figure 1 Pig house's dimensions and ventilation systems

内3个温湿度测试点空气的流速,使用数字风速计(TM826,TECMAN,China)测定通风每个小窗进气口和风机出气口的风速,使用非接触式红外测温仪(Fluke 572-2,Fluke,USA)测定猪舍内表面和猪体表温度。非接触式红外测温仪的发射率设定值分别为混凝土材料0.95,金属材料0.8,玻璃材料0.85,猪体0.90。舍内外氨气(NH_3)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)的浓度由INNOVA1412多功能气体分析仪(Innova Air Tech Instruments A/S,Denmark)连续测定,测定频率为 $5\text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$,舍内测试点位于排风口处,距离排风风机6~7 m,舍外气体浓度测试点同温湿度测试点。

1.3 通风量计算模型

猪舍通风量的计算采用湿度平衡法计算:

$$VR_h = \frac{3600 \times A \times L}{h_{vap} \times (W_i - W_o)} \quad (1)$$

式中: VR_h 为猪舍的通风量, $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$;A为动物活动参数;L为猪舍潜热生产量,W; W_i 、 W_o 为舍内外空气的水汽浓度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; h_{vap} 为猪舍水汽蒸发热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。动物活动系数A参考Blanes等^[21]推荐值,生猪舍潜热生产参考Pedersen等^[22]和Schauberger等^[23]计算方法,参数详见表1。湿度平衡法计算猪舍的通风量在舍内外温差大于 $2\text{ }^\circ\text{C}$,水汽浓度差值大于 $0.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时具有较高的准确性^[22]。

猪舍水汽蒸发热与猪舍内温度有关,计算公式如下:

$$h_{vap} = (2501 - 2.42T_i) \times 10^3 \quad (2)$$

式中: T_i 为舍内空气温度, $^\circ\text{C}$ 。

舍内外空气的水汽浓度计算见公式(3)与公式(4):

$$W_{i,o} = 0.62198 \frac{RH_{i,o} \times P_{sat} \times \rho}{P_{atm} - RH_{i,o} \times P_{sat}} \times \frac{273.3}{273.3 + T_{i,o}} \times 1000 \quad (3)$$

表1 生猪活动系数与潜热生产

Table 1 Animal activity coefficient and latent heat production

项目 Item	时间 Time					
	I	II	III	IV	V	VI
动物活动系数	0.71	0.90	1.31	1.2	1.31	0.85
单位质量潜热生产量	1.20					

注: I 为 0:00—5:00; II 为 5:00—9:00; III 为 9:00—11:00; IV 为 11:00—14:00; V 为 14:00—17:00; VI 为 17:00—0:00。下同。

$$P_{sat} = 610.78e^{\frac{17.269T_{i,o}}{237.3 + T_{i,o}}} \quad (4)$$

式中: $W_{i,o}$ 为舍内外空气的水汽浓度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $RH_{i,o}$ 为舍内外空气的相对湿度,%; P_{sat} 为饱和蒸汽压,Pa; P_{atm} 为标准大气压,Pa; $T_{i,o}$ 为舍内外空气的温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.4 气体排放率确定

通过对猪舍 NH_3 、 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的浓度以及通风量的测定,生猪冬季气体排放因子的计算公式如下:

$$ER_{pig} = VR_h \times \frac{(C_i - C_o)}{n} \times t \quad (5)$$

式中: ER_{pig} 为单头生猪的气体排放率, $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$; VR_h 为猪舍的通风量, $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; C_i 、 C_o 为舍内外气体浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; n 为舍内生猪的数量,头; t 为通风时间,h。

1.5 数据统计分析

数据统计分析采用SAS 9.4软件和Excel工具进行,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 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 舍内外气候条件

猪舍内气候环境指标见表2,猪舍内温度的日变化见图2,结果显示舍外温度变化较大,最高温度出现在12:30,为 $1.3\text{ }^\circ\text{C}$,最低温度出现在22:30,为 $-8.2\text{ }^\circ\text{C}$;猪舍内的温度变化较为平稳,温度范围在 $11.5\sim 14.7\text{ }^\circ\text{C}$,

表2 猪舍内环境指标

Table 2 Environmental indicators in pig house

分类Class	位置Location	值Value
猪舍内表面温度/℃	墙	东 7.6±0.08
		西 14.0±1.1
		南 13.7±1.2
		北 8.8±1.6
空气温度/℃	吊顶	15.3±1.3
	地板	21.2±5.3
	舍内	13.7±0.6
	舍外	-4.6±3.4
水汽浓度/g·m ⁻³	舍内	8.32±1.22
	舍外	2.39±0.70
猪体表温度/℃		32.6±1.9
舍内空气流速/m·s ⁻¹		0.28±0.16
进风口空气流速/m·s ⁻¹		3.2 ±0.49
出风口空气流速/m·s ⁻¹		5.3 ±0.57

平均为 13.7 ℃。舍内外温差在 11.0~21.7 ℃,平均舍内外温差为 17.8 ℃,舍内温度均大于 11.0 ℃,满足了育肥猪生长对温度的需求。舍内外相对湿度变化范围分别为 44.9%~82.6%、41.6%~80.3%,平均相对湿度分别为 69.7%、62.5%,平均湿度差值在 0~22.4% 变化,平均舍内外湿度差值为 6.8%,水汽浓度差值为

5.93 g·m⁻³。

2.2 舍内通风管理

生猪养殖过程根据舍外气候条件将通风管理设置为 6 段通风管理模式,每个通风模式下的通风量使用数字风速计测定,不同通风模式的运行时间及通风管理见表 3,猪舍直接测定的通风率在 3 100~11 520 m³·h⁻¹ 变动,平均通风率为 6 165 m³·h⁻¹ (单头生猪通风量 24.7 m³·h⁻¹);湿度平衡法测定的通风率在 3 231~11 498 m³·h⁻¹,平均通风率为 6 207 m³·h⁻¹ (单头生猪通风量 24.9 m³·h⁻¹)。最大通风量和最小通风量的运行时间分别在 11:00—14:00 和 00:00—5:00,直接测定通风量与湿度平衡法测定通风量的差值为 42.0 m³·h⁻¹,显示湿度平衡法在计算冬季密闭型猪舍的通风量时具有较高的准确性。

2.3 舍内气体浓度变化

侧窗通风密闭式猪舍生猪育肥过程中舍内 CO₂、NH₃ 和 CH₄ 浓度变化见图 3,试验过程中没有监测到 N₂O 的排放。猪舍内气体浓度日变化呈现先降低后升高的趋势,夜间由于通风量较小,气体浓度明显高于日间浓度。整个试验期间猪舍内 CO₂ 浓度由于通风管理的差异,存在显著的日变化,变化范围在

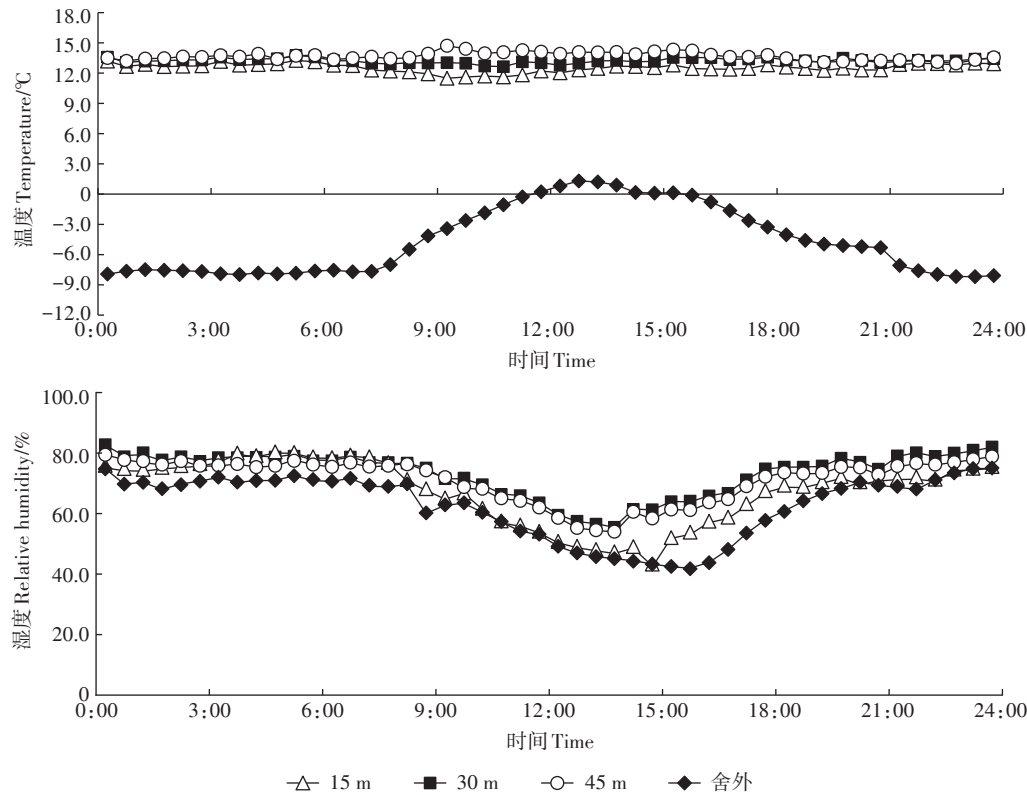


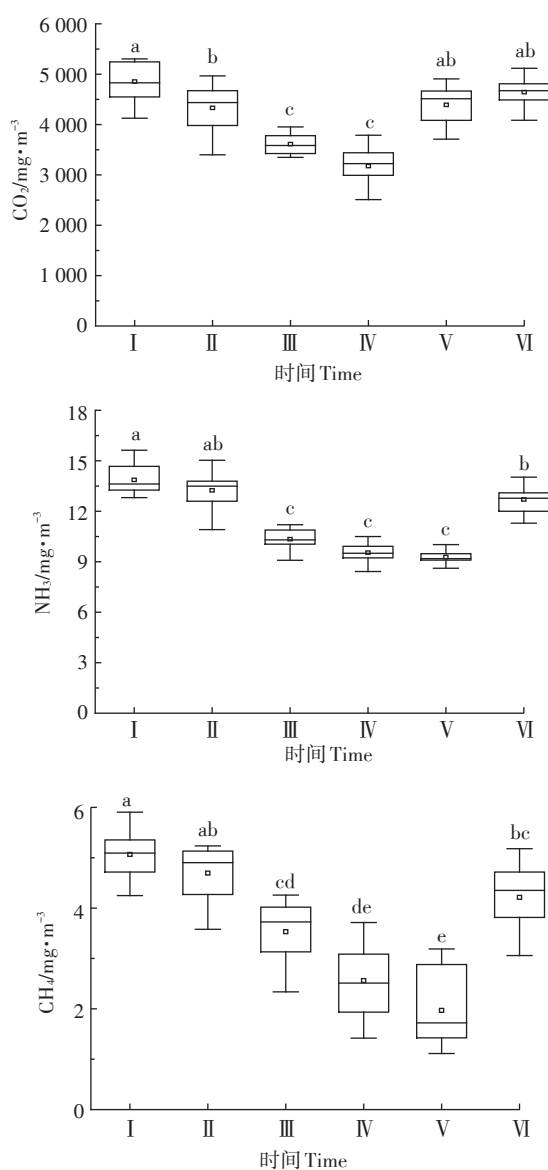
图2 舍内外温湿度的变化

Figure 2 Measured outdoor and indoor air temperature and relative humidity

表3 猪舍不同时间段通风量

Table 3 Ventilation rate for pig house in different stages

时间 Time	运行时间 Run time/h	湿度平衡法计算 Moisture balance/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	直接测定 Direct measurement/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	差值 D-value	P值 P value
I (0:00—5:00)	5	3 231±531	3 100±160	131	0.821 1
II (5:00—9:00)	4	4 537±463	4 608±240	71	0.887 5
III (9:00—11:00)	2	8 750±1 130	8 832±690	82	0.952 2
IV (11:00—14:00)	3	11 498±776	11 520±900	22	0.980 8
V (14:00—17:00)	3	9 174±853	9 216±720	42	0.964 5
VI (17:00—0:00)	7	4 983±779	4 962±360	21	0.819 1



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

The different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$)

图3 舍内 CO_2 、 NH_3 、 CH_4 浓度变化Figure 3 The concentration variation of CO_2 , NH_3 , and CH_4 in pig house

2 509~5 303 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,平均为4 330 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,舍外 CO_2 平均浓度为921 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;冬季密闭通风式猪舍 NH_3 浓度变化在8.42~15.63 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,平均浓度为11.99 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,舍外平均 NH_3 浓度为1.10 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 CH_4 浓度变化在1.11~5.90 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,平均为3.91 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,舍外平均 CH_4 浓度为1.31 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.4 不同通风管理模式下污染物的排放

养殖过程不同通风管理阶段单头生猪 NH_3 、 CO_2 和 CH_4 的排放率见表4。结果显示试验期间单头生猪的 NH_3 排放率变化范围在124.7~442.0 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$,平均为250.0 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$,一天中 NH_3 排放率在第IV阶段平均最高,达到374.0 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$,虽然该阶段舍内 NH_3 浓度较低,但是较高的通风量导致排放率显著高于其他5个通风管理阶段。 NH_3 排放率在第I阶段最低,平均值为168.7 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$,由于夜间外界温度较低(平均为-8.2 $^{\circ}\text{C}$),为维持适宜的舍内温度,该阶段采用较小的通风量管理。试验期间生猪的 CO_2 排放率变化范围在37.5~154.7 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$,平均为79.9 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$,一天中 CO_2 排放率在第V阶段中平均最高,达到132.2 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$,显著高于其他5个通风管理阶段。 CO_2 排放率在第I、II阶段最低,分别为52.7 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ 和59.9 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。生猪 CO_2 的排放受生猪体质量和活动水平的影响,其主要产生于生猪消化饲料为自身提供能量的过程,试验猪舍采用水冲清粪方式,冬季温度较低,粪便微生物代谢产生的 CO_2 可以忽略不计。试验期间生猪的 CH_4 排放率变化范围在7.3~144.8 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$,平均为57.7 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$,不同通风阶段 CH_4 的排放率差异不显著。

冬季侧窗负压通风猪舍单头生猪 NH_3 、 CO_2 和 CH_4 日累计排放量见图4。生猪在不同通风阶段 NH_3 、 CO_2 和 CH_4 日累计排放量由于通风时间和通风量的不同存在一定的差异。结果显示试验期间生猪的 NH_3 日累计排放量为6.0 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,不同通风阶段 NH_3 排放的比例分别为I段14.1%、II段15.7%、III段10.3%、IV段18.7%、V

表4 不同通风管理阶段单头生猪NH₃、CO₂和CH₄的排放率

Table 4 Emission rates of NH₃, CO₂, and CH₄ from pig in different ventilation management stages

类别/Class	统计 Statistics	I	II	III	IV	V	VI
NH ₃ /mg·h ⁻¹	平均值 Mean	168.7d	209.0c	309.1b	374.0a	327.2b	229.7bc
	标准差 Stdev	31.4	22.1	39.7	35.5	40.1	48.5
	最大值 Max	230.5	266.2	372.7	442.0	423.8	339.5
	最小值 Min	124.7	167.6	240.3	323.4	276.0	148.2
CO ₂ /g·h ⁻¹	平均值 Mean	52.7e	59.9e	89.6c	109.7b	132.2a	73.8d
	标准差 Stdev	11.0	9.8	14.1	21.7	14.7	14.7
	最大值 Max	80.2	76.7	115.1	152.5	154.7	110.9
	最小值 Min	37.5	40.9	68.6	71.4	109.3	50.6
CH ₄ /mg·h ⁻¹	平均值 Mean	48.3a	57.7a	61.5a	64.3a	57.8a	61.5a
	标准差 Stdev	14.0	17.5	34.3	44.7	44.1	20.9
	最大值 Max	84.0	98.1	115.7	132.6	144.8	116.0
	最小值 Min	27.6	22.9	11.6	7.3	10.5	26.3

注:不同小写字母表示不同时间段差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significance differences among management stages.

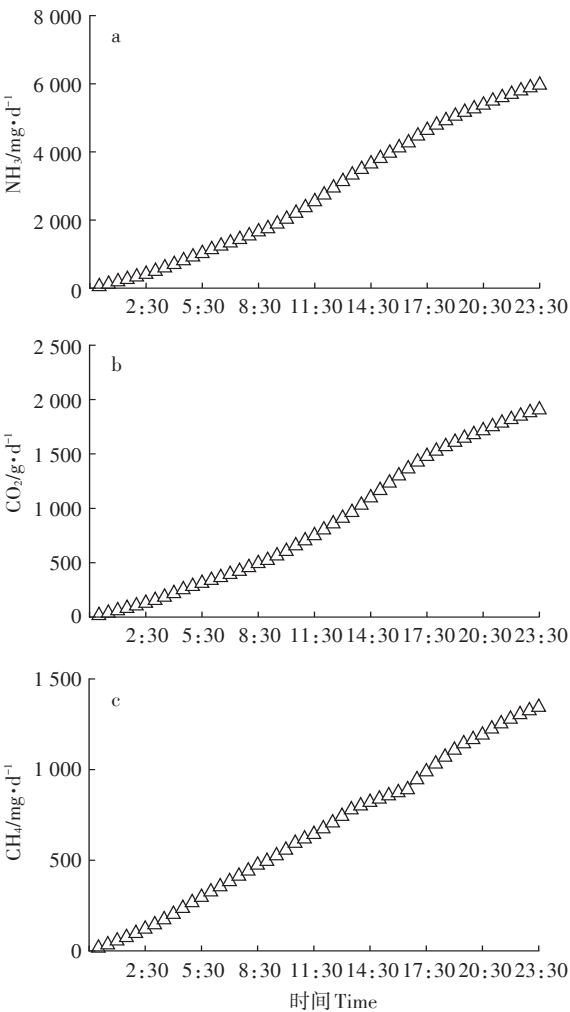


图4 单头生猪NH₃、CO₂、CH₄日累计排放

Figure 4 The concentration variation of CO₂, NH₃, and CH₄ of single pig

段16.4%、Ⅵ段24.9%;CO₂总排放量为1.92 kg·d⁻¹,不同通风阶段CO₂排放的比例分别为Ⅰ段13.7%、Ⅱ段14.1%、Ⅲ段9.3%、Ⅳ段17.2%、Ⅴ段20.7%、Ⅵ段25.0%;CH₄总排放量为1.39 g·d⁻¹,不同通风阶段CH₄排放的比例分别为Ⅰ段17.9%、Ⅱ段19.2%、Ⅲ段9.1%、Ⅳ段13.5%、Ⅴ段10.7%、Ⅵ段29.6%。

3 讨论

研究显示,在冬季猪舍通风系统中,进气口尺寸、数量以及气流分布和速度是影响猪舍环境的主要因素,改造之前的猪舍冬季采用纵向通风管理,为保证猪舍内适宜的温湿度条件,风机运行间隔时间过长、排气流量过高导致舍内空气温度分布不均匀,对生猪生产造成影响。室外温度的昼夜变化以及不同通风管理时段通风速率的变化影响舍内NH₃和温室气体的浓度,文献中不同地区不同通风管理方式猪舍内环境指标见表5。

此外,由于不同猪舍类型粪便管理模式不同,进一步影响了气体的排放,见表6。在生猪养殖过程中NH₃的排放主要是由粪便中的微生物通过脲酶降解尿素产生,NH₃排放过程受到粪便表面空气速度、粪便表面积、空气温度、粪便pH值等参数的影响^[41]。不同地区由于管理措施和猪舍结构不同,NH₃的排放存在很大的差异,经常清除舍内粪便或者对粪污固液分离可以有效减少舍内NH₃的排放。研究显示使用漏缝地板系统和刮板清粪的猪舍单头生猪NH₃的排放存在4.4~13.2 g·d⁻¹(表6),本研究水冲清粪猪舍试验期

表5 不同通风管理猪舍内环境指标

Table 5 Environmental indicators of pig house with different ventilation managements

通风类型 Ventilate	温度 Temperature/ ℃	湿度 Humidity/%	空气流速 Air velocity/ m·s ⁻¹	NH ₃ / mg·m ⁻³	CO ₂ / mg·m ⁻³	CH ₄ / mg·m ⁻³	N ₂ O/ mg·m ⁻³	单头生猪通风率 Ventilation rate of pig/m ³ ·h ⁻¹	参考文献 References
温度调节通风	—	—	—	22.8±1.3	4 025±224	86±5	0.86±0.02	—	[24]
温度调节通风	19.1±0.5	65±3	0.3±0.5	—	—	—	—	—	[25]
温度调节通风	22.1±0.6	58.2±4.7	—	14.8±1.18	4 728±615	—	1.61±0.12	20.9	[26]
屋顶进风	19.4±0.4	50±5	—	3.26~12.37	2 994~3 646	4.0~10.29	0.589	28.1±15.6	[27]
侧墙进风	19.4±0.4	54±5	—	3.19~13.51	2 929~4 378	3.57~10.79	0.589	24.2±11.5	[27]
纵向通风	25.9±0.3	66.2±3.0	—	10.4±2.05	3 469±464	27.4±6.3	0.591±0.073	29.1±12	[28]
侧墙进风	27.1±1.0	47.3±7.1	—	13.0±3.42	4 653±1 151	105±27.1	1.668±0.371	20.7±14	[28]
—	—	—	0.15~0.28	—	—	—	—	—	[29]
—	13~27	50~85	0.30	25.0	1 500	—	—	26.3	[30]
—	—	50~70	—	—	<9 800	—	—	—	[31~32]

表6 不同猪舍粪便管理方式污染物排放

Table 6 Pollutant emission of different pig houses for manure management

粪便管理 Management of manure	单头生猪大气污染物排放 Air pollutant emission of single pig				参考文献 References
	NH ₃ /g·d ⁻¹	N ₂ O/g·d ⁻¹	CH ₄ /g·d ⁻¹	CO ₂ /kg·d ⁻¹	
漏缝地板粪污贮存	6.3	0.54	16.2	1.74	[33]
漏缝地板粪污贮存	4.4~4.9	0~0.32	7.9~38.9	2.02~2.18	[34]
漏缝地板粪污贮存	—	—	1.10~9.86	1.10~3.78	[35]
漏缝地板粪污贮存	11.5~13.2	—	—	2.48	[36]
漏缝地板粪污贮存	—	0.03~0.85	4.1~23.0	1.86~3.24	[37]
垫料养殖模式	12.1±0.6	1.50±1.15	16.5±1.0	1.97±0.08	[38]
垫料养殖模式	14.1	4.6	5.9	—	[39]
垫料养殖模式	12.16~13.61	0.03~2.09	4.96~7.39	1.30~1.32	[40]
水冲清粪模式	6.0	0	1.39	1.92	本研究

间单头生猪的NH₃排放率为6.0 g·d⁻¹,与这一结果非常接近。试验期间,与其他通风时段相比,Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ阶段NH₃的日排放量较高,主要与较高的通风率有关。研究发现较高的通风率会引起粪便表面的空气流速增加,导致较高的NH₃排放^[42]。

猪舍中CO₂排放来自于动物呼吸和粪便管理过程,猪舍内CO₂的排放主要取决于动物的体质量、饲料水平和活动水平^[34];舍内粪便管理过程CO₂的排放来自于尿酶对动物尿液中尿素的水解和催化,以及粪便中有机成分的厌氧消化过程。其中粪便CO₂的排放很大程度上受粪便管理方式的影响,通常漏缝地板系统和刮板清粪猪舍粪便管理过程CO₂的排放占猪舍总排放的比例为2.3%~3.4%^[43],而垫料养殖系统猪舍粪便管理过程CO₂的排放占猪舍总排放的10%~20%,研究显示生猪育肥阶段体质量在23.3~113.5 kg的整个生长过程单头生猪CO₂的排放为1.30~1.97

kg·d⁻¹(表6)。本研究中侧窗通风猪舍粪污清除采用水冲清粪方式,生猪体质量75 kg条件下CO₂排放量为1.92 kg·d⁻¹,与以上研究一致。猪舍的CO₂排放量在第Ⅴ阶段最高,主要与这一阶段动物的活动有关。

CH₄源自猪的肠道发酵和粪便中有机物的厌氧降解过程^[44],这一过程与膳食纤维摄入水平有关^[45]。在有机物质降解过程中,厌氧、pH中性、同时温度在25~40℃条件更有利于粪便CH₄的产生^[46]。研究显示使用漏缝地板系统和刮板清粪猪舍单头生猪CH₄的排放为1.10~43.0 g·d⁻¹(表6),这主要与粪便及时清除有关;垫料生猪养殖系统CH₄的排放高于漏缝地板和刮板清粪猪舍,这主要与垫料(稻草、锯木屑)可以提供可降解的碳水化合物来提高微生物的活性,从而增加CH₄的排放有关^[47]。本研究冬季侧窗通风CH₄的排放量较小为1.39 g·d⁻¹,主要与粪便及时清除和冬季猪舍通风量较小有关(单头生猪平均通风

量 $24.9\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)。猪舍的 CH_4 排放量在第Ⅳ阶段最高,主要与这一阶段较高的通风量和动物的饲喂活动有关,但不同通风管理阶段的 CH_4 排放差异不显著。

N_2O 是通过硝化-反硝化作用将 NH_3 转化为 N_2 的过程中形成的,这一过程既需要有氧条件也需要无氧条件^[48]。 N_2O 的排放通常发生在厚垫料系统猪舍、粪便堆肥过程和粪便农田施用过程中,本研究没有监测到 N_2O 的排放。

4 结论

(1)对改造后的冬季侧窗负压通风猪舍内平均温度、湿度、通风率和舍内平均空气流速等指标的测定结果显示,猪舍侧窗负压通风系统可满足冬季育肥猪生长的需求, NH_3 、 CO_2 和 CH_4 浓度等环境质量指标在可控范围内。

(2)改造后的侧窗负压通风猪舍采用的6级通风管理模式显著影响 NH_3 、 CO_2 的平均排放率,在第Ⅳ、Ⅴ通风管理阶段 NH_3 、 CO_2 的平均排放率最高,第Ⅰ阶段 NH_3 、 CO_2 的平均排放率最低,对 CH_4 的排放影响不显著。

参考文献:

- [1] Naylor R, Steinfeld H, Falcon W, et al. Losing the links between livestock and land[J]. *Science*, 2005, 310(5754): 1621-1622.
- [2] Steinfeld H, Wassenaar T. The role of livestock production in carbon and nitrogen cycles[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2007, 32: 271-94.
- [3] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303-308.
DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, HUANG Hong-kun, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 303-308.
- [4] 程 龙, 郭秀锐, 程水源, 等. 京津冀农业源氨排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1579-1588.
CHENG Long, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan, et al. Effect of ammonia emission from agriculture in Beijing-Tianjin-Hebei on $\text{PM}_{2.5}$ [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1579-1588.
- [5] 阎波杰, 赵春江, 潘瑜春, 等. 规模化养殖畜禽粪便量估算及环境影响研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(7): 733-737.
YAN Bo-jie, ZHAO Chun-jiang, PAN Yu-chun, et al. Estimation of the amount of livestock manure and its environmental influence of large-scaled culture based on spatial information[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(7): 733-737.
- [6] 沈 丽, 于兴娜, 项 磊. 2006—2014年江苏省氨排放清单[J]. 中国环境科学, 2018, 38(1): 26-34.
SHEN Li, YU Xing-na, XIANG Lei. Estimation of ammonia emissions inventories in Jiangsu Province from 2006 to 2014[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(1): 26-34.
- [7] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494: 459-462.
- [8] Webb J, Sommer S G, Kupper T, et al. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane during the management of solid manures[J]. *Agroecology and Strategies for Climate Change*, 2012, 8: 67-107.
- [9] Wu S, Hu J, Zhang Y, et al. Modeling atmospheric transport and fate of ammonia in North Carolina-Part II: Effect of ammonia emissions on fine particulate matter formation[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(14): 3437-3451.
- [10] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [11] Pinder R W, Davidson E A, Goodale C L, et al. Climate change impacts of US reactive nitrogen[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(20): 7671-7675.
- [12] 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(14): 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(14): 175-178.
- [13] Liu S, Ni J Q, Radcliffe J S, et al. Mitigation of ammonia emissions from pig production using reduced dietary crude protein with amino acid supplementation[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 233: 200-208.
- [14] 康国虎, 董红敏, 陶秀萍, 等. 少污水排放垫料猪舍生产和环境效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 259-264.
KANG Guo-hu, DONG Hong-min, TAO Xiu-ping, et al. Evaluation on performance and thermal environment of hoop structure for finishing pigs[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 259-264.
- [15] Ngwabie N M, Chungong B N, Yengong F L. Characterisation of pig manure for methane emission modelling in Sub-Saharan Africa[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 170: 31-38.
- [16] 朱 宁, 秦 富. 畜禽废弃物处理对规模养殖环境效率的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1901-1910.
ZHU Ning, QIN Fu. Influence of livestock and poultry's waste disposal on the environmental efficiency in scale breeding: From the perspective of layers' fecal disposal[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(6): 1901-1910.
- [17] Dennehy C, Lawlor P G, Jiang Y, et al. Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: A critical analysis[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2017, 11(3): 13-18.
- [18] Petersen S O, Olsen A B, Elsgaard L, et al. Estimation of methane emissions from slurry pits below pig and cattle confinements[J]. *PLoS One*, 2016, 11(8): 1-16.
- [19] Huffer K V, Hansen M J, Feilberg A, et al. Level and distribution of odorous compounds in pig exhaust air from combined room and pit ventilation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 218: 209-219.
- [20] Cabaraux J F, Philippe F X, Laitat M, et al. Gaseous emissions from weaned pigs raised on different floor systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 130(3/4): 86-92.
- [21] Blanes V, Pedersen S. Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations[J].

- Biosystems Engineering*, 2005, 92(4):483–493.
- [22] Pedersen S, Takai H, Johnsen J O, et al. A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70(10):25–37.
- [23] Schaubberger G, Piringer M, Petz E. Steady-state balance model to calculate the indoor climate of livestock buildings, demonstrated for finishing pigs[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 43(4):154–162.
- [24] Ulens T, Millet S, Ransbeeck N V, et al. The effect of different pen cleaning techniques and housing systems on indoor concentrations of particulate matter, ammonia and greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) [J]. *Livestock Science*, 2014, 159:123–132.
- [25] Ocepek M, Škorjanc D. Does rearing system (conventional vs. organic) affect ammonia emissions during the growing and fattening periods of pigs[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 147:81–89.
- [26] Rzeźnik W, Paulina M. Evaluation of the selected microclimate parameters in a fully-slatted piggery[J]. *Research in Agricultural Engineering*, 2015, 154(2):75–87.
- [27] Zong C, Li H, Zhang G. Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pig house with two types of partial pit ventilation systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 208:94–105.
- [28] Ransbeeck N V, Langenhove H V, Demeyer P. Indoor concentrations and emissions factors of particulate matter, ammonia and greenhouse gases for pig fattening facilities[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 116(4):518–528.
- [29] Versteegen M W A, Siegerink A, Van der Hel W, et al. Operant supplementary heating in groups of growing pigs in relation to air velocity[J]. *Journal of Thermal Biology*, 1987, 12(4):257–261.
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 规模猪场环境参数及环境管理(GB/T 17824.3—2008) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Environmental parameters and environmental management for intensive pig farms (GB/T 17824.3—2008) [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [31] CIGR. Climatization of animal houses[R]. Belgium: Faculty of Agricultural Sciences, State University of Ghent, 1992.
- [32] CIGR. Report of working group on climatization of animal houses[EB/OL]. (2002)[2019–12–18]. http://www.cigr.org/documents/CIGR_4TH_WORK_GR.pdf.
- [33] Philippe F X, Nicks B. Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 199:10–25.
- [34] Ngwabie N, Jeppsson K H, Nimmermark S, et al. Effects of animal and climate parameters on gas emissions from a barn for fattening pigs [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2011, 27(6):1027–1037.
- [35] Ni J Q, Heber A J, Lim T T, et al. Methane and carbon dioxide emission from two pig finishing barns[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37:2001–2011.
- [36] Hinz T, Linke S. A comprehensive experimental study of aerial pollutants in and emissions from livestock buildings. Part 2: Results[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70:119–129.
- [37] Liu Z, Powers W J, Liu H. Greenhouse gas emissions from swine operations: Evaluation of the Intergovernmental Panel on Climate Change approaches through meta-analysis[J]. *Journal of Animal Science*, 2013, 91(8):4017–4032.
- [38] Philippe F X, Laitat M, Nicks B, et al. Ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs kept on two types of straw floor [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 150:45–53.
- [39] Dourmad J Y, Hassouna M, Robin R, et al. Influence of pig rearing system on animal performance and manure composition[J]. *Animal*, 2009, 3(4):606–616.
- [40] Nicks B, Laitat M, Farnir F, et al. Gaseous emissions from deep-litter pens with straw or sawdust for fattening pigs[J]. *Animal Science*, 2004, 78:99–107.
- [41] Oliveira L V, Higarashi M M, Nicoloso R S, et al. Use of dicyandiamide to reduce nitrogen loss and nitrous oxide emission during mechanically turned co-composting of swine slurry with sawdust[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019:1–13.
- [42] Ye Z, Zhang G, Seo I H, et al. Airflow characteristics at the surface of manure in a storage pit affected by ventilation rate, floor slat opening, and headspace height[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(1):97–105.
- [43] Zong C, Zhang G, Feng Y, et al. Carbon dioxide production from a fattening pig building with partial pit ventilation system[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 126:56–68.
- [44] Dennehy C, Lawlor P G, Jiang Y, et al. Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: A critical analysis[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2017, 11(3):1–16.
- [45] Philippe F X, Remience V, Dourmad J Y, et al. Food fibers in gestating sows: Effects on nutrition, behaviour, performances and waste in the environment[J]. *INRA Productions Animales*, 2008, 21(3):277–290.
- [46] Wang S, Ma F, Ma W, et al. Influence of temperature on biogas production efficiency and microbial community in a two-phase anaerobic digestion system[J]. *Water*, 2019, 11(1):1–13.
- [47] Sáez J A, Clemente R, Bustamante M Á, et al. Evaluation of the slurry management strategy and the integration of the composting technology in a pig farm—Agronomical and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 192:57–67.
- [48] Whalen J K, Thomas B W, Sharifi M. Novel practices and smart technologies to maximize the nitrogen fertilizer value of manure for crop production in cold humid temperate regions[J]. *Advances in Agronomy*, 2019, 153:1–85.