

寒冷气候区规模化妊娠猪舍氨气和二氧化碳排放规律

张锦瑞, 申仲健, 张 颖, 吴中红, 陈昭辉, 刘继军, 王美芝*

(中国农业大学动物科学技术学院, 北京 100193)

摘 要: 集约化养猪生产是氨气和二氧化碳排放的重要来源。为探究中国新建大规模猪场具有代表性的妊娠猪舍气体排放规律, 选取寒冷气候区平层与楼房养殖模式下 2 个典型机械通风妊娠猪舍进行试验, 猪舍清粪方式分别为尿泡粪和刮粪板清粪, 在冬夏季节测算 NH_3 和 CO_2 排放规律。研究结果表明, 平层猪舍冬季和夏季 NH_3 日均排放量分别为 (17.4 ± 5.3) 和 (65.8 ± 4.8) mg/kg , 楼房猪舍夏季排风过滤器前后 NH_3 日均排放量分别为 (150.9 ± 8.6) 和 (84.6 ± 6.8) mg/kg ; 平层猪舍冬季和夏季 CO_2 日均排放量分别为 (8.9 ± 0.8) 和 (18.1 ± 3.1) g/kg , 楼房猪舍夏季排风过滤器前后分别为 (11.7 ± 1.8) 和 (15.7 ± 1.9) g/kg ; 平层猪舍夏季 NH_3 和 CO_2 排放量均高于冬季。平层“尿泡粪”猪舍 NH_3 日均排放量在 1 个排污周期内呈现波动性变化; 楼房“刮粪板清粪”猪舍 NH_3 日均排放量表现为日周期波动性且呈双驼峰趋势, 峰值区间与每日清粪时间一致。平层猪舍和楼房猪舍冬夏季 CO_2 排放率均呈现日变化规律, 峰值区间与猪只饲喂时间相符, 排放率与猪只活动量和日龄正向相关。该研究为寒冷气候区规模化平层和楼房养殖典型妊娠猪舍的 NH_3 和 CO_2 排放规律提供了基础数据支撑。

关键词: 氨气; 二氧化碳; 妊娠猪舍; 排放率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.028

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-Supp.-0240-10

张锦瑞, 申仲健, 张颖, 等. 寒冷气候区规模化妊娠猪舍氨气和二氧化碳排放规律[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 240-249. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.028 http://www.tcsae.org

Zhang Jinrui, Shen Zhongjian, Zhang Ying, et al. Ammonia and carbon dioxide emissions from large-scale gestation sow houses in cold climate zones[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 240-249. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.028 http://www.tcsae.org

0 引 言

集约化生猪养殖在高效利用土地资源的同时, 带来了氨气(NH_3)和二氧化碳(CO_2)等气态污染物的集中排放^[1]。 NH_3 可促进亚硝酸(HNO_2)的形成, 增强大气氧化能力, 造成严重的二次气溶胶污染, 致使生态系统酸化和富营养化^[2], CO_2 是主要的温室气体, 增强对太阳辐射的散射作用, 进而影响气候变化^[3]。全球范围内, 几乎 95%的 NH_3 排放源于畜禽生产^[4], 国内 NH_3 排放量超过欧盟和美国的总和^[5]; 18%的温室气体源自畜牧业生产^[6]。

国外针对猪舍 NH_3 和 CO_2 排放的研究较为系统, 着重分析不同类型猪舍排放量的测定^[2]、影响排放的因素^[7]、排放通量的采样与核算策略^[8]、减排技术的研发与应用等^[9]。国内在此方面的研究集中于测算猪舍 NH_3 排放量^[10-13]和影响因素^[14], 多数研究针对育肥猪舍^[10-12]。测算猪舍有害气体排放量的方法按照试验规模可分为 3 类: 模型试验^[15]、中试试验^[14]和规模化试验^[10-13]。规模化试验即直接测定猪场的实际排放量, 相较前两者, 试验变量较难控制, 但可真实反映猪场实际生产排放现状。王

文林等^[11]测定了南通市妊娠猪舍夏季氨气排放, 为中国夏热冬冷地区猪舍养殖氨排放核算提供技术支撑。中国气候类型多样, 不同气候区的猪舍建造类型和环控措施存在差异^[16], 为提出科学可靠的妊娠猪舍 NH_3 和 CO_2 排放系数, 需对不同地区不同类型猪舍气体排放进行系统性测定。

近年, 受非洲猪瘟和新冠肺炎的双重影响, 为快速恢复生猪产能, 中国新建系列大规模猪场, 可分为平层与楼房养殖两大类^[17], 目前仍缺乏针对这两类典型猪场妊娠猪舍 NH_3 和 CO_2 排放的测定。影响舍内 NH_3 和 CO_2 排放因素较多, 不同建造类型、环境控制和饲养方式下的猪舍 NH_3 和 CO_2 排放量相异, 且存在季节性变化^[12]。因此本试验选取寒冷气候区具有代表性的平层与楼房养殖模式下的 2 个妊娠猪舍, 测定典型季节 NH_3 和 CO_2 排放, 核算排放系数, 探究 NH_3 和 CO_2 排放规律和影响因素, 从而估算中国区域排放量, 丰富寒冷气候区猪舍源 NH_3 和 CO_2 排放数据库, 为估算猪舍 NH_3 和 CO_2 排放量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验猪舍概况

本试验选取河北和北京的规模化猪场妊娠猪舍为试验猪舍, 在冬、夏 2 季监测河北平层猪舍。北京楼房猪舍受到疫情冲击, 冬季试验期间未饲养妊娠猪, 仅在夏季进行监测。

收稿日期: 2022-07-16 修订日期: 2022-10-28

基金项目: 生猪产业技术体系北京市创新团队项目(BAIC02-2021)

作者简介: 张锦瑞, 研究方向为畜牧场节能减排及畜舍环境控制。

Email: 17801115323@163.com

*通信作者: 王美芝, 博士, 副教授, 研究方向为畜牧场节能减排及畜舍环境控制。Email: meizhiwang@cau.edu.cn

1.1.1 平层猪舍

河北某猪场的平层试验妊娠猪舍为机械通风密闭式猪舍,建筑尺寸(长×宽×高)为:81.4 m×38.5 m×2.4 m(吊顶),地板类型为半漏缝半水泥地板。其中,试验猪舍内配种限位栏共420个,每个限位栏尺寸为0.55 m×2.10 m;群养栏共186个,每个群养栏尺寸为2.5 m×4.8 m。液态料线自动喂料,每天08:00—10:00与14:00—16:00各喂料1次,料水比为1:3~1:4,每个群养栏1个杯式饮水器,限位栏猪饮水器位于食槽内,饲料粗蛋白率为13.4%。粪污清理方式为尿泡粪,拔塞子清粪间隔为20 d,另外员工每天07:30—09:30进入栏位内清理地面表面粪污。

平层猪舍冬季(Single-floor Pig house in Winter, SP-Winter)采用燃气暖风机供暖,设定温度为19.0℃,根据设定温度自动控制供暖。冬季猪舍通风时,侧墙风机向室外排风,室外新风从檐口进入屋顶三角区,然后从天棚进风口进入猪舍内;设置2阶段通风模式:阶段1(08:30—17:30)开启4个36寸风机(谷瑞GSI,直径1.2 m)每转动2 min 30 s,停止2 min 30 s,5 min 1个循环;阶段2(17:30—08:30)开启2个36寸风机,每转动3 min,停止2 min,5 min 1个循环。冬季试验期间试验猪舍饲养猪只813头,品种为中国地方猪种,平均每头体质量为125 kg,平均饲养密度为3.37 m²/头,即37.1 kg/m²;冬季试验时间为2019年12月21日至2020年1月14日,试验开始前与试验结束时排空粪沟内粪污。

平层猪舍夏季(Single-floor Pig house in Summer, SP-Summer)开启2个54寸定频排风风机(谷瑞GSI,直径1.8 m),采用湿帘-风机系统进行通风降温。夏季试验期间试验猪舍饲养猪只1149头,平均饲养密度为2.38 m²/头,即52.4 kg/m²;夏季试验时间为2020年8月27日至9月4日。

1.1.2 楼房猪舍

选择北京市某楼房猪场进行试验,该楼房共5层,每层4个单元。选取底层1个妊娠猪舍单元作为试验猪舍,建筑尺寸为(长×宽×净高)52.8 m×23.4 m×2.55 m,舍内共有4列群养栏,每列17个猪栏,每个猪栏尺寸5.4 m×3.0 m,栏内漏缝地板宽度3.0 m,实体地面宽度2.4 m;饲喂方式为机械自动饲喂,饲喂频率1次/d,时间为15:00;饲料粗蛋白率为14.2%。猪舍内清粪方式为刮粪板清粪,清粪频率为2次/d,清粪时间分别为08:00—10:00和16:00—17:00,饲养员仅清理走道内粪污。

夏季楼房猪舍(Multi-floor Pig house in Summer, MP-Summer)开启2个57寸排风风机(青岛大牧人,直径1.9 m),采用湿帘-风机系统进行通风降温。为减少有害气体排放量,猪舍末端排风处配备化学过滤器,过滤剂为有效氯浓度为30%的次氯酸。试验猪舍单元过滤器尺寸为(长×厚×高)23.4 m×0.9 m×3.0 m。舍内共饲养妊娠母猪406头,品种为引进猪种(大白和长白),平均每头体质量为200 kg,饲养密度分为2.71 m²/头,即73.7 kg/m²;试验时间为2021年9月2日至9月11日。

1.2 测定指标和方法

1.2.1 平层猪舍

试验期间24 h连续监测舍内外温度、相对湿度(WSZY-1型,北京天建华仪)和排风口处CO₂浓度(WEZY-1型,北京天建华仪),采样间隔为10 min。舍内温湿度测点:在猪舍内走道均匀设置4个测点,测点高度为1.50 m;CO₂测点位于风机内侧近20 cm的风机轴线处^[18],进气口的CO₂平均浓度参照中国气象局发布的《2019年中国温室气体公报》的数据(413.2×10⁻⁶)^[19]。舍外温度和相对湿度测点位于舍外空旷无遮荫处,将仪器置于百叶箱内,距离地面1.5 m;测点布置见图1。

NH₃浓度测试方法遵循《纳氏试剂分光光度法》HJ533—2009的要求^[20],以0.01 mol/L的稀硫酸作为吸收液,设置采气气体流量为6 min×0.5 L/min,采样结束后密封管口,送往猪场内实验室,并于当日完成样品分析。NH₃采样点同CO₂,进风口NH₃浓度近似为0^[18]。NH₃浓度的采样频率为:2019年12月29日—12月31日,连续3 d每天测3次,采样时间分别为08:00—09:30,14:00—15:30和20:00—21:30,其他日期采样频率为每日1次,采样时间为20:00—21:30。2020年8月28—29日和9月4日—5日,每日采样4次,采样时间分别为08:00,10:30,14:30和17:30,以上每个采样点均重复采样3次。

为确定猪舍通风量,平层猪舍冬季(SP-Winter)采用风机断面实测法确定每台风机的风速,进而确定总通风量^[21]。采用无线万向风速风温记录仪测定风速(WWWFZY-1型,北京天建华仪,风速测量范围为0.05~30 m/s;检测精度≤全程读数的(5%±0.05) m/s)。平层猪舍夏季(SP-Summer)通过实测舍内外静压差(DP-40型,苏州宏瑞净化科技有限公司,测量范围:0~125 Pa;分辨率:0.1 Pa;检测精度:≤±0.5%FS),并根据舍内风机在伊利诺伊大学Bess实验室标定而得的不同静压差下的实际通风量求出舍内实际通风量。

1.2.2 楼房猪舍

试验期间连续监测舍内外温度与相对湿度(仪器型号同平层猪舍冬季试验)。在猪舍内走道均匀设置4个测点,测点高度为1.50 m,舍外测点和猪舍通风量测定方法同平层猪舍冬季(SP-Winter)试验,见图1。

采用INNOVA1512光声气体监测仪(Luma Sense公司,丹麦)连续监测试验单元排风外侧过滤器前后的NH₃和CO₂浓度,该仪器与《纳氏试剂分光光度法》HJ533-2009测试值精确度基本一致^[22]。共设8个采样点依次采集分析气体样品,2个排风风机处各设1个测点(过滤器前);过滤器面积较大,为提高数据准确性,在过滤器后端设6个测点,均匀分布于试验单元过滤器外侧。每个采样点均设有防尘过滤装置,以防止灰尘进入仪器。同时,为了避免外界风速对气体浓度的稀释干扰作用,过滤器后端的6个采样点周围均设置保护性管道(聚四氟乙烯管,长度50 cm,内径88.9 mm,外径90 mm)^[9]。试验开始前将仪器送往北京市计量检测科学研究院进行校准(证书编号EA21Z-AC100040)。

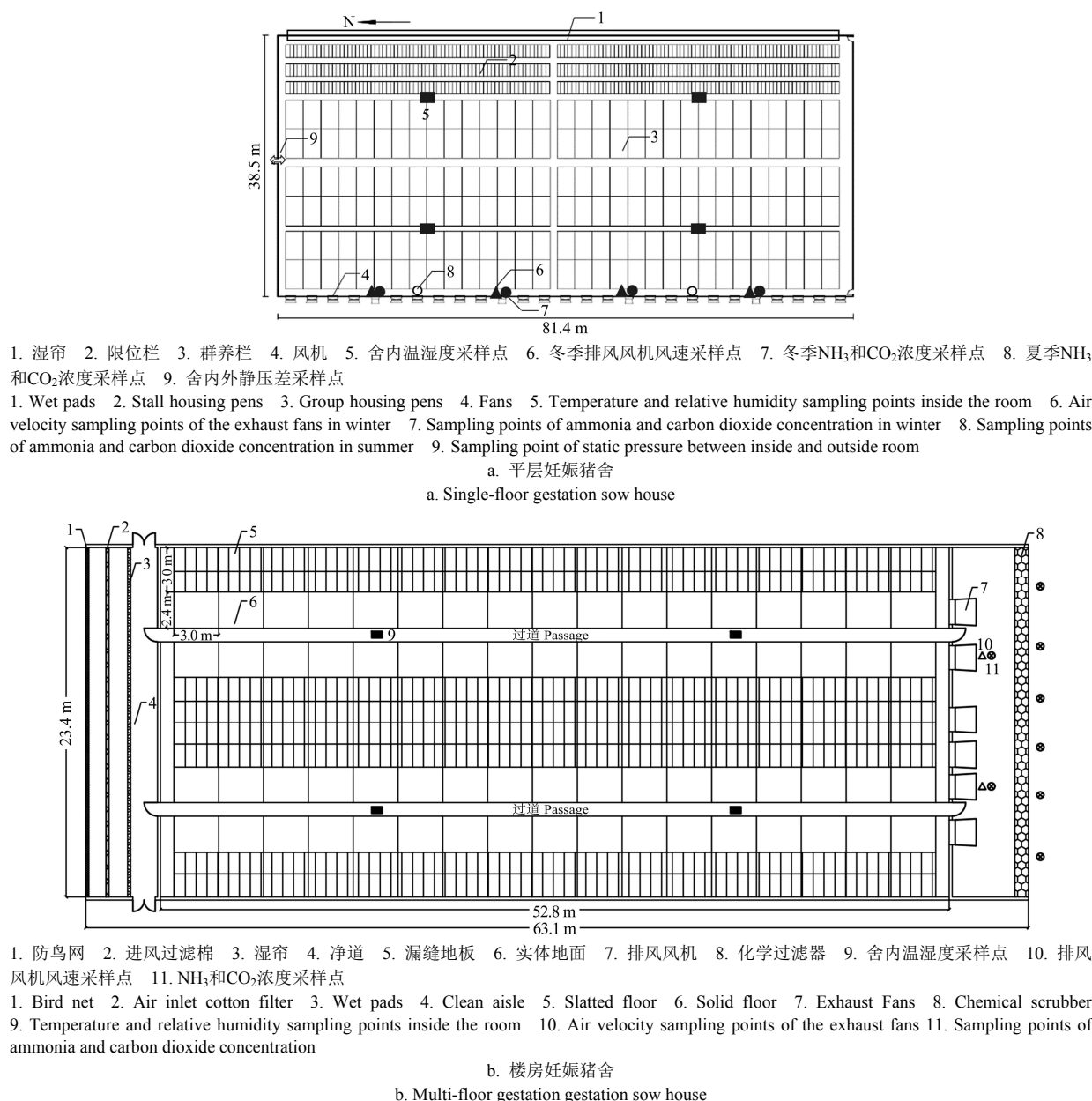


图1 试验猪舍测点平面布置图
Fig.1 Measuring points layout of the experimental pig houses

1.3 数据计算方法

1.3.1 通风量

采用风机断面实测法确定单台风机实际通风量^[21], 计算公式为

$$V_i = S \cdot \sum_1^{3600} V_p \cdot \frac{PT_0}{P_0 T} \quad (1)$$

$$V_q = S \cdot \sum_1^i V_i \quad (2)$$

$$L = \frac{V_q}{n \cdot m} \quad (3)$$

式中 V_i 为单台风机标准状况下实际通风量, m³/h; S 为风机出风口面积, m²; V_p 为出风口风速, m/s; T 为采样点每小时平均温度, K; T_0 为标准状况下气体的温度, 273 K; P 为采样点每小时平均气压, kPa; P_0 为标准状况下气体的压力, 101.3 kPa; V_q 为标准状况下猪舍实际通风量, m³/h; i 为猪舍实时开启风机台数; L 为标准状况下猪舍

实际通风率, m³/(h·kg); n 为猪只数, 头; m 为单头猪只平均体质量, kg。

1.3.2 气体排放率

NH₃ 和 CO₂ 排放率的计算公式如下^[18]:

$$E = \frac{L}{1000} \cdot (c_{out} - c_{in}) \quad (4)$$

式中 E 为母猪单位体质量气体的平均每小时排放率, g/(h·kg); c_{out} 是排气口的每小时平均气体浓度, mg/m³; c_{in} 是进气口的每小时平均气体浓度, mg/m³。

1.3.3 气体排放量

NH₃ 和 CO₂ 日均排放量 ERD (Emission Rate per Day) (g/kg) 的计算公式如下^[10]:

$$ERD = \sum_1^{24} E \quad (5)$$

1.4 数据分析方法

采用 Microsoft Excel 2021 软件初步处理试验数据,

采用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析与显著性分析，其中 $P<0.05$ 为显著差异， $P<0.01$ 为极显著差异。

2 结果与分析

2.1 舍内外温湿度和通风量

计算得到试验期间的温度、相对湿度（Relative Humidity, RH）和通风量的平均数据，统计分析如表 1。对试验期间每天同一时间段的舍内温度求平均，得出平均逐时舍内温度变化，结果见图 2。

由表 1 可知，试验期间，平层猪舍冬季（SP-Winter）、平层猪舍夏季（SP-Summer）和楼房猪舍夏季（MP-Summer）舍外平均温度分别为（-11.8±6.6）、（17.3±5.1）和（23.1±3.6）℃；舍内平均温度分别为（19.9±0.5）、

（21.3±1.1）和（23.1±1.5）℃；舍内平均相对湿度分别为（68.2±3.7）%、（72.4±7.7）%和（78.7±6.4）%。由图 2 可知，平层猪舍冬季舍内温度波动平缓，平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季舍内温度呈现单驼峰趋势，06:00—15:00 时温度上升，随后下降。GB/T 17824.3—2008《规模猪场环境参数及环境管理》推荐的空怀妊娠母猪舍舒适温湿度范围分别为 15~20℃和 60%~70%，温度最高不宜超过 27℃，最低不宜低于 13℃，相对湿度最高不超过 85%^[23]，平层猪舍冬季、平层猪舍夏季、和楼房猪舍夏季、舍内温湿度均不超过高限与低限要求。可见，新建猪舍温热环境控制效果良好，主要原因为试验平层猪舍和楼房猪舍均为密闭式机械通风猪舍，冬季辅以燃气暖风机供暖，夏季采用湿帘降温等环控设备，且新建猪舍墙体保温性能良好^[24]。

表 1 猪舍内外温湿度和通风量
Table 1 Temperature, relative humidity inside and outside sow houses and ventilation rate

试验猪舍 Experimental sow houses	舍内 Indoor		舍外 Outdoor		通风量 Ventilation rate	
	温度 Temperature/℃	相对湿度 Relative humidity/%	温度 Temperature/℃	相对湿度 Relative humidity/%	阶段 1 Stage1 (08:30—17:30)/(m ³ ·h ⁻¹)	阶段 2 Stage2 (17:30—08:30)/(m ³ ·h ⁻¹)
SP-Winter	19.9±0.5	68.2±3.7	-11.8±6.6	62.8±15.7	9 614.9	5 768.9
SP-Summer	21.3±1.1	72.4±7.7	17.3±5.1	78.6±17.3	99 680.6	99 680.6
MP-Summer	23.1±1.5	78.7±6.4	23.1±3.6	77.2±12.7	145 632.2	145 632.2

注：SP-Winter、SP-Summer 和 MP-Summer 分别为平层猪舍冬季、平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季（下同）。
Note: SP-Winter, SP-Summer and MP-Summer mean single-floor pig house in winter, single-floor pig house in summer and multi-floor pig house summer, respectively (the same below).

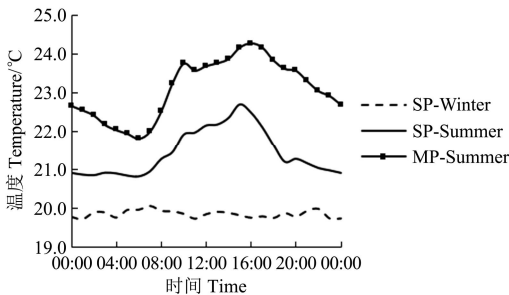


图2 舍内平均逐时温度
Fig.2 Average hourly temperature inside the room

平层猪舍冬季采用 2 段通风模式，分别为阶段 1（08:30—17:30）和阶段 2（17:30—08:30），计算得到冬季试验猪舍 2 阶段通风量分别为 0.09 和 0.06 m³/(h·kg)，低于 GB/T 17824.3—2008《规模猪场环境参数及环境管理》推荐的妊娠母猪舍冬季通风参数[0.30 m³/(h·kg)]^[23]和美国 MWPS（Midwest Plan Service）推荐的[0.14 m³/(h·kg)]^[25]。平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季全天通风量分别为 0.69 和 1.79 m³/(h·kg)，前者通风量高于中国猪舍环境标准推荐的 0.60 m³/(h·kg)^[23]，低于美国 MWPS 推荐的 1.70 m³/(h·kg)^[25]，而后者夏季通风量高于中国和美国夏季猪舍通风量推荐值。

2.2 气体排放率

2.2.1 NH₃

试验期间监测 NH₃ 排放率的统计结果汇总如表 2。图 3a~图 3c 和分别为平层猪舍冬季、平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季 NH₃ 排放率；求取楼房猪舍夏季每日同一时间段的 NH₃ 排放率的平均值，得到平均逐时 NH₃ 排放率，结果见图 3d。

试验期间，由表 2 可知，平层猪舍冬季舍内 NH₃ 平均排放率[(0.7±0.2)mg/(h·kg)]远低于平层猪舍夏季排放率[(2.7±1.3)mg/(h·kg)]，主要原因为平层猪舍夏季舍内通风量和温度[(21.3±1.1)℃]均高于冬季[温度(19.9±0.5)℃]。高通风量可能会致使舍内风速变大，增大粪污表面风速进而增大传质系数^[26]；在一定温度区间内，尿素酶的活性随着温度的升高而升高，促使粪便分解产生更多的 NH₃^[11]。同时，夏季猪只饲养密度（52.4 kg/m²）高于冬季（37.1 kg/m²），保持适宜的饲养密度有利于提高栏位清洁度，从而降低 NH₃ 排放率^[27]。由图 3a 可知，平层猪舍冬季舍内 NH₃ 排放率呈现一定波动性，主要原因为妊娠猪舍在配种高峰期不定期不定量使用水冲洗母猪外阴，增加粪污含水率进而影响氨气排放率，既有研究表明，氨气排放率随着粪污含水率的增加而减少^[28]。由图 3b 可知，平层猪舍夏季舍内每日 4 个监测时间段中，08:00 测得 NH₃ 排放率高于 10:30、14:30 和 17:30，主要原因为该时间与员工每天对地面清粪时间（07:30—09:30）一致，清粪之后减少了粪污表面积，从而减少后续氨气排放^[29]。

表 2 NH₃ 排放率平均值及范围
Table 2 Average and range of emission rate of ammonia (mg·h⁻¹·kg⁻¹)

试验猪舍 Experimental sow houses	平均值±标准差 Average ± Standard deviation	范围 Range
SP-Winter	0.7±0.2	0.2~1.3
SP-Summer	2.7±1.3	1.2~8.1
MP-Summer (BS)	6.4±1.4	3.8~11.7
MP-Summer (AS)	3.8±0.8	2.3~6.6

注：BS 和 AS 分别为过滤器前和过滤器后（下同）。
Note: BS and AS mean before the scrubber and after the scrubber, respectively (the same below).

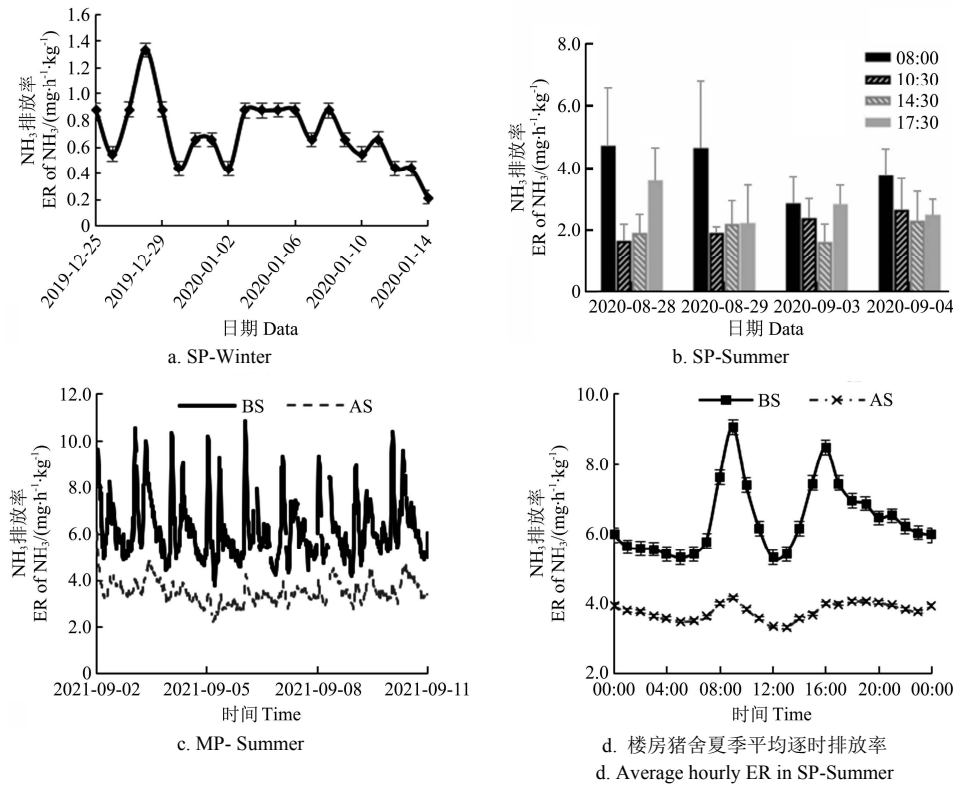


图3 NH₃排放率变化规律
Fig.3 Variation of Emission Rate (ER) of NH₃

楼房猪舍夏季排风过滤器前端和后端的 NH₃ 平均排放率分别为 (6.4±1.4)、(3.8±0.8) mg/(h·kg), 表明该过滤器对 NH₃ 有一定过滤作用。同样为夏季, 楼房猪舍夏季过滤器前舍内氨气排放率远高于平层猪舍夏季, 主要原因为两个试验猪舍粪污管理模式不同, 其中, 楼房猪舍夏季清粪方式仅为刮粪板清粪 (漏缝地板下刮粪), 饲养员并未对猪栏内地板上的粪污进行清理, 造成舍内粪污覆盖面积较大。而平层猪舍夏季舍内饲养员饲喂猪只后, 将地板上残留粪便铲入粪坑, 减少实体地面的粪污面积, 降低粪污气体扩散表面积进而减少了 NH₃ 产生量^[27]。

综上, 适度降低舍内通风量并减少栏位内粪污表面积有助于减少氨气排放率。图 3c 和 3d 表明, 楼房猪舍夏季 NH₃ 排放率具有较为明显的日周期波动现象, 过滤器前后 NH₃ 变化规律趋于一致 ($R^2=0.95$)。如图 3d 所示, 过滤器前后 NH₃ 排放率均呈现双驼峰变化规律, 分别于 08:00—10:00 和 15:00—17:00 达到峰值, 与刮粪板清粪时间段一致, 运用刮粪板设备清粪的过程会促进 NH₃ 释放, 与阮蓉丹等人研究结果一致^[30]。

2.2.2 CO₂

试验期间监测试验猪舍 CO₂ 排放率的统计结果汇总如表 3。图 4a~图 4c 和分别为平层猪舍冬季、平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季的 CO₂ 排放率。对试验期间每天同一时间段的 CO₂ 排放率求平均, 得出平均逐时 CO₂ 排放率, 结果见图 4d。

由表 3 和图 4 可知, 平层猪舍夏季舍内 CO₂ 平均排放率 [(1 024.4±247.3)mg/(h·kg)] 远高于平层猪舍冬季 [(373.6±98.4)mg/(h·kg)], 分析原因为夏季舍内通风量高于冬季, 高风量负压风机虽然会在一定程度上稀释 CO₂ 浓度, 但会在相同时间排出大量气体, 提高气体排放率^[31]。

平层猪舍夏季舍内 CO₂ 平均排放率高于楼房猪舍夏季过滤器前 [(568.7±253.5)mg/(h·kg)], 主要受到舍内饲养管理因素的影响, 平层猪舍夏季每日饲喂 2 次, 且饲养员每日进入栏内进行人工清粪, 饲养管理动作影响猪只的活动强度, 从而提高 CO₂ 排放率^[32]。楼房猪舍夏季过滤器后的 CO₂ 平均排放率 [(703.9±177.5)mg/(h·kg)] 高于过滤器前, 可能由于 CO₂ 在酸性溶液里的溶解度较低, 不易转化为其他组分^[33]; 同样, 过滤器前后的 CO₂ 变化规律趋于一致 ($R^2=0.92$)。平层猪舍夏季 2020 年 9 月 1 日数据缺失由于仪器故障造成。

由图 4d 可知, 平层猪舍冬季舍内 CO₂ 排放率呈现典型的双驼峰趋势, 峰值时间段与猪只饲喂时间相符, 猪只采食时活动量增加进而提高了 CO₂ 排放量, 与 Zong 等^[34] 结果一致; 同样, 平层猪舍夏季在 08:00 和 15:00 亦出现短暂上升趋势。平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季 12:00—15:00 期间 CO₂ 平均排放率均低于其他时间段, 主要原因为舍内白天 (06:00—15:00) 平均逐时温度升高 (图 2), 此时猪只减少活动量以降低产热, 因此导致 CO₂ 排放率降低。楼房猪舍夏季 15:00 时 CO₂ 排放率上升, 该现象与饲喂时间 15:00 相符, 正如 Groenestein 等^[35] 研究所得: 改变饲喂时间可能会对二氧化碳排放产生影响。

表 3 CO₂ 排放率平均值及范围

试验猪舍 Experimental sow houses	平均值±标准差 Average ± Standard deviation	范围 Range
SP-Winter	373.6±98.4	201.6~690.4
SP-Summer	1024.4±247.3	301.4~1559.7
MP-Summer (BS)	568.7±253.5	272.8~1561.2
MP-Summer (AS)	703.9±177.5	438.9~1376.5

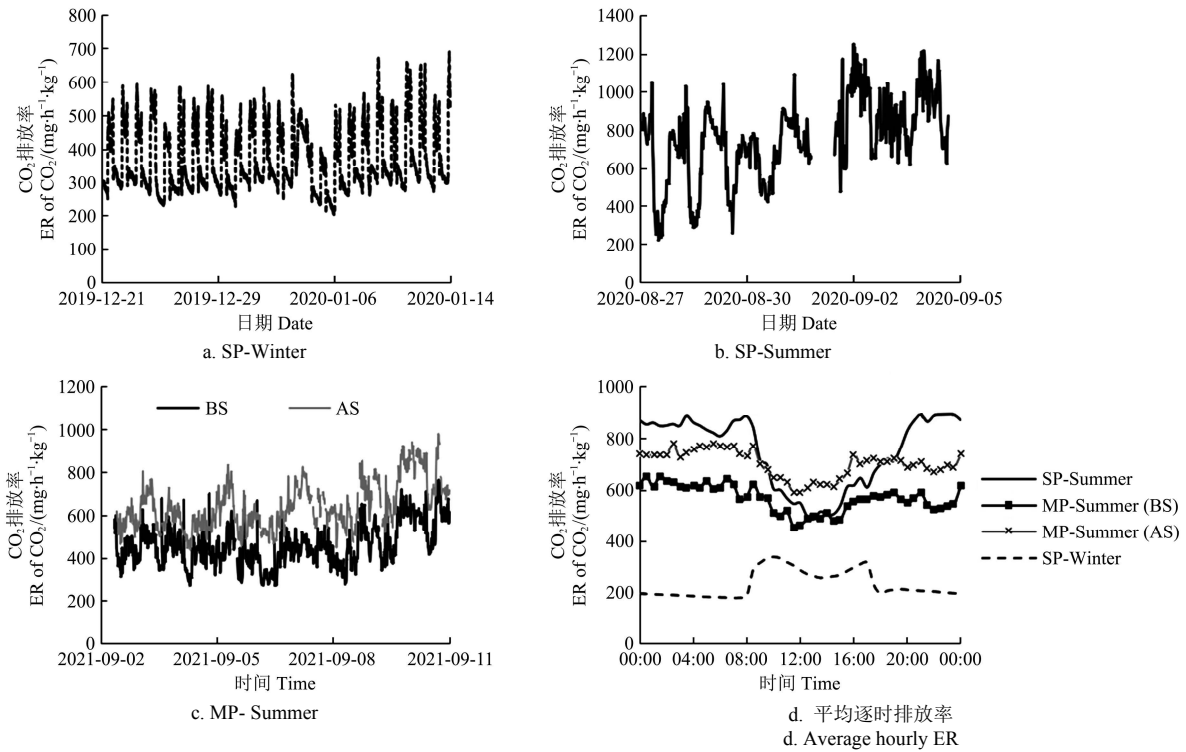


图4 CO₂排放率变化规律
Fig.4 Variation of Emission Rate (ER) of carbon dioxide

2.2.3 日均排放量

由式(5)计算得到试验期间试验猪舍日均NH₃和CO₂排放量如表4和图5所示。

表4 NH₃和CO₂日均排放量平均值及范围

Table 4 Average and range of daily emission rate of NH₃ and CO₂

试验猪舍 Experimental sow houses	NH ₃ /(mg·kg ⁻¹)		CO ₂ /(g·kg ⁻¹)	
	平均值±标准差 Average ± Standard deviation	范围 Range	平均值±标准差 Average ± Standard deviation	范围 Range
SP-Winter	17.4±5.3	10.5~32.0	8.9±0.8	7.1~10.6
SP-Summer	65.8±4.8	58.2~71.4	18.1±3.1	14.6~22.3
MP-Summer (BS)	150.9±8.6	139.0~162.0	11.7±1.8	9.3~15.1
MP-Summer (AS)	84.6±6.8	70.1~94.2	15.7±1.9	13.2~19.0

由表4和图5可知, 平层猪舍冬季在1个排污周期内, NH₃排放率呈现波动性变化, 与前述NH₃排放逐时变化规律一致, 日均排放率的平均值为(17.4±5.3) mg/kg, 范围为(10.5~32.0) mg/kg。平层猪舍冬季舍内清粪方式为尿泡粪, “尿泡粪”猪舍在1个排污周期内, NH₃排放率呈现波动性变化。研究表明, 排空粪沟并重新使用1~2周以后, 有害气体逐渐达到高峰, 然后随着时间的推移逐渐下降^[26], 与平层猪舍冬季试验结果一致(图5)。因试验条件所限, 试验期间未连续监测平层猪舍夏季在1个排污周期内NH₃排放率, 因此未在平层猪舍夏季舍内测得周期性变化数据。

2021年9月2日至11日, 楼房猪舍夏季过滤器前后的NH₃日均排放量趋于一致, 平均值分别为(150.9±8.6)和(84.6±6.8) mg/kg。不同清粪方式下NH₃排放规律相异^[36], 本试验中楼房猪舍夏季清粪方式为刮粪板清粪。楼房猪舍夏季舍内NH₃排放率具有日波动性而非逐日波动性, 每日NH₃排放量峰值出现时间与刮粪板清粪时间

吻合。因此在估算NH₃日排放量时, 首先应充分考虑猪舍清粪方式从而制定试验周期, 可监测1个排污周期内NH₃排放量, 同时考虑到NH₃日波动现象, 24 h内分时段多次测量NH₃排放浓度, 进而得到更科学的数据。

3组试验测得CO₂日均排放量均随时间的推移呈现波动式攀升趋势, 从试验开始至结束, 平层猪舍冬季CO₂日排放量由8.7上升至10.6 g/kg; 平层猪舍夏季CO₂日排放量由14.6上升至22.3 g/kg; 楼房猪舍夏季过滤器前的CO₂日排放量由9.3上升至14.9 g/kg。本试验猪只均处于妊娠阶段, 猪只体质量随着日龄的增加而提高, 随着猪只体质量的提高, CO₂产生速度提高^[34]。Zong等^[34]评估了育肥猪体质量对CO₂浓度和排放量的影响, 结果表明, 猪只体质量与CO₂产生量呈现线性相关, 猪只体质量从30.1增长至111.5 kg时, CO₂日均排放量增长3倍。

2.3 气体排放率与舍内外环境变量的相关性

计算试验猪舍NH₃和CO₂排放率与舍内外温湿度的相关性, 如表5所示。由表5可知, 试验期间, 平层猪舍冬季、平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季舍内CO₂排放率均与舍内湿度和舍外温度负相关, 其中, 平层猪舍冬季和平层猪舍夏季呈现极显著负相关。平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季CO₂排放率与舍内温度负相关并与舍外湿度极显著正相关; 平层猪舍冬季与之规律相反。楼房猪舍夏季舍内NH₃排放率与舍内外温度有极显著正相关关系, R^2 分别为0.281和0.250 ($P<0.01$), 与舍内外湿度负相关, 该结果与王文林等^[11]研究结果一致。可见, 舍内NH₃和CO₂的排放率与舍内外温湿度的变化相关, 但呈现季节性变化。

2.4 国内外研究对比

表6摘录了国内外学者近年在妊娠猪舍中监测得到的CO₂和NH₃日均排放量, 以及猪舍基本情况。

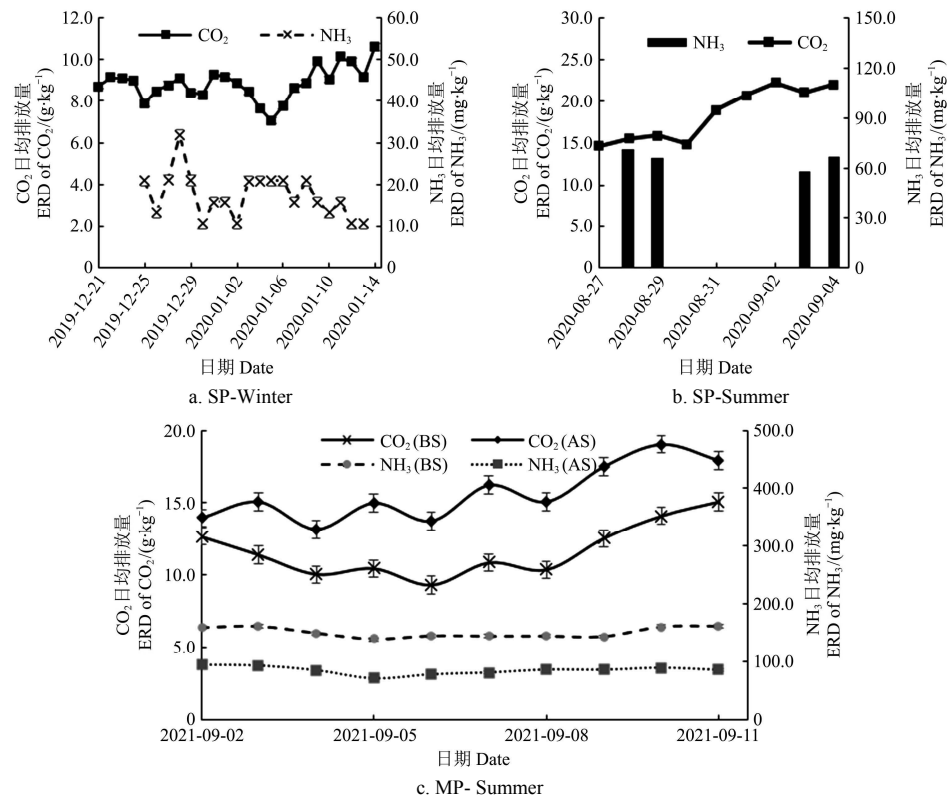


图5 NH₃和CO₂日均排放量变化规律

Fig.5 Variation of Emission Rate per Day (ERD) of ammonia and carbon dioxide

表5 NH₃和CO₂排放率与环境变量的相关性

Table 5 Correlations between ammonia and carbon dioxide emission rate and environmental variables

指标 Indexes	数据量/组 Data quantity/group	舍内温度 Indoor temperature/℃	舍内湿度 Indoor relative humidity/%	舍外温度 Outdoor temperature/℃	舍外湿度 Outdoor relative humidity/%
CO ₂ (SP-Winter)	5 279	0.048**	-0.156**	-0.644**	-0.424**
CO ₂ (SP-Summer)	193	-0.652**	-0.332**	-0.790**	0.414**
CO ₂ (MP-Summer)	966	-0.006	-0.054	-0.041	0.152**
NH ₃ (MP-Summer)	1 159	0.281**	-0.009	0.250**	-0.123**

注: **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

表6 国内外相关研究对比情况

Table 6 Comparison between domestic and abroad studies

季节 Season	清粪方式 Manure management	通风方式 Ventilation pattern	试验地点 Test location	地板类型 Floor type	NH ₃ 排放量 ER of NH ₃ / (mg·kg ⁻¹)	CO ₂ 排放量 ER of CO ₂ / (g·kg ⁻¹)	通风量 Ventilation rate/ (m ³ ·(h·kg) ⁻¹)	参考文献 Reference
夏季	水冲粪	机械通风	中国河北	漏缝地板	41	—	1.02	[12]
夏季	水冲粪	机械通风	中国江苏	漏缝地板	52	—	0.99	[11]
夏季	干清粪	机械通风	中国北京	漏缝地板	150.9	11.7	1.79	本文 MP-Summer (BS)
夏季	干清粪	机械通风	中国北京	漏缝地板	84.6	15.7	1.79	本文 MP-Summer (AS)
夏季	尿泡粪	机械通风	中国河北	漏缝地板	65.8	18.1	0.69	本文 SP-Summer
夏季	—	机械通风	意大利	漏缝地板	—	21	0.58	[37]
冬季	水冲粪	机械通风	中国河北	漏缝地板	14.5	—	0.24	[12]
冬季	尿泡粪	机械通风	中国河北	漏缝地板	17.4	8.9	0.07	本文 SP-Winter
冬季	—	机械通风	意大利	漏缝地板	—	13	0.10	[37]
全年	干清粪	自然通风	中国北京	漏缝地板	44.5	12	—	[38]
	干清粪	机械通风	中国浙江	漏缝地板	62.5	—	0.41	[13]
					63.5	12	1.49	
	尿泡粪	机械通风	比利时	漏缝地板	79	13.5	1.61	
					73	12	0.86	[39]
					54.5	12	0.92	
					45.5	14	1.45	
	垫料发酵	机械通风	比利时	垫料	27	12	1.32	
					31.5	10.5	1.20	[31]
					42	15.5	1.68	
					37.5	14.5	1.53	[31]

由表 6 可知, 国内外学者监测而得的妊娠猪舍气体排放量存在一定差异, 与粪污管理模式和环控方式等因素相关; 猪舍夏季 NH_3 排放量高于冬季, CO_2 无明显差异。本试验中楼房猪舍夏季过滤器前后的 NH_3 排放量均高于文献记载数据, 通风量 $[1.79 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{kg})]$ 远高于文献中记载的机械通风妊娠猪舍的夏季通风量。Philippe 等^[31]报告称, NH_3 排放量与通风量成正比关系; 平层猪舍夏季通风量低于文献^[11-12]记载的数据, 但 NH_3 排放量高于二者, 表明 NH_3 排放量并非仅受到通风量的制约。本试验中平层猪舍冬季舍内 NH_3 排放数据与文献记录数据基本相符, CO_2 日均排放量和通风量均低于文献记录数据。楼房猪舍夏季和平层猪舍冬季试验猪舍虽保证了温度的适宜性, 但存在楼房猪舍夏季过度通风, 平层猪舍冬季通风不足的现象, 需进一步研究合理的优化配置。本研究为夏季高通风量和冬季低通风量的气体排放量提供了基础数据支撑。

3 结 论

1) 平层猪舍冬季、平层猪舍夏季和楼房猪舍夏季(排风过滤器前后) NH_3 日均排放量分别为 (17.4 ± 5.3) 、 (65.8 ± 4.8) 、 (150.9 ± 8.6) 和 (84.6 ± 6.8) mg/kg ; CO_2 日均排放量分别为 (8.9 ± 0.8) 、 (18.1 ± 3.1) 、 (11.7 ± 1.8) 和 (15.7 ± 1.9) g/kg 。平层猪舍夏季 NH_3 和 CO_2 日均排放量高于平层猪舍冬季。

2) 不同清粪模式猪舍 NH_3 排放变化趋势相异, 试验期间, “尿泡粪”猪舍 NH_3 日均排放量在 1 个排污周期内呈现波动性变化; “刮粪板清粪”猪舍的 NH_3 排放率更具有日波动性而非逐日波动性, 排风过滤器前后的 NH_3 变化规律趋于一致 ($R^2=0.95$), 均呈现双驼峰现象, 峰值区间与每日清粪时间一致。

3) 随着妊娠猪日龄的增长, 3 组试验 CO_2 日均排放量均波动式攀升; CO_2 排放率均呈现日变化规律, 峰值区间均与猪只饲喂时间相符, 白天排放率变化存在季节性差异, 夜晚排放率波动较小。

[参 考 文 献]

- [1] Mostafa E, Selders A, Gates R S, et al. Pig barns ammonia and greenhouse gas emission mitigation by slurry aeration and acid scrubber[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(1): 9444-9453.
- [2] Annamaria C. Ammonia concentrations and emissions from finishing pigs reared in different growing rooms[J]. Journal of Environmental Quality, 2017, 46(2): 255-260.
- [3] 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 of the United States of America, 2012, 109(20): 7671-7675.
- [4] Lengling A, Reckels B, Schwennen C, et al. Validation of a new resource-efficient feeding system for fattening pigs using increased crude fiber concentrations in diets: Feed intake and ammonia emissions[J]. Animals, 2020, 10(3): 497.
- [5] Liu M X, Huang X, Song Y, et al. Ammonia emission control in China would mitigate haze pollution and nitrogen deposition, but worsen acid rain[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(16): 7760-7765.
- [6] 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 and Environment, 2012, 150: 45-53.
- [7] Philippe F X, Cabaraux J F, Nicks B. Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, 141(3-4): 245-260.
- [8] Ulens T, Daelman M, Mosquera J, et al. Evaluation of sampling strategies for estimating ammonia emission factors for pig fattening facilities[J]. Biosystems Engineering, 2015, 140: 79-90.
- [9] Heyden C V D, Brusselman E, Volcke E I P, et al. Continuous measurements of ammonia, nitrous oxide and methane from air scrubbers at pig housing facilities[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181: 163-171.
- [10] 刘杨, 尚斌, 董红敏, 等. 规模猪场机械通风育肥舍氨气产生及排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2058-2065.
- [11] Liu Yang, Shang Bin, Dong Hongmin, et al. Ammonia production and emissions from a mechanically ventilated fattening swine confinement building[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(9): 2058-2065. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王文林, 刘筱, 韩宇捷, 等. 规模化猪场机械通风水冲粪式栏舍夏季氨日排放特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 214-221.
- [13] Wang Wenlin, Liu Xiao, Han Yujie, et al. Daily emission characteristics of ammonia from typical industrial pig farm with manure cleaning by rising water in summer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(17): 214-221. (in Chinese with English abstract)
- [14] Cao Y B, Bai Z H, Misselbrook T, et al. Ammonia emissions from different pig production scales and their temporal variations in the North China Plain[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2020, 71(1): 23-33.
- [15] 代小蓉. 集约化猪场 NH_3 的排放系数研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [16] Dai Xiaorong. Study on Ammonia Emission Factors in Concentrated Pig Farm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wang K Y, Wei B, Zhu S M, et al. Ammonia and odour emitted from deep litter and fully slatted floor systems for growing-finishing pigs[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(3): 203-210.
- [18] 叶章颖. 猪舍氨气排放的集约化气流特性参数及模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
- [19] Ye Zhangying. Study on Parameters of Airflow Characteristics and Modelling for Ammonia Emissions in Pig Buildings[D]. Beijing: China Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [20] 齐飞, 施正香, 黄金军, 等. 不同气候区猪舍最大通风量确定及湿帘降温系统应用效果[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 202-209.
- [21] Qi Fei, Shi Zhengxiang, Huang Jinjun, et al. Determination of maximum ventilation and evaluation on the performance of

- the cooling system for commercial pig houses in different climate zones[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(22): 202-209. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wang X, Wu J, Yi Q, et al. Numerical evaluation on ventilation rates of a novel multi-floor pig building using computational fluid dynamics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106050.
- [18] Jin Y, Lim T T, Ni J Q, et al. Emissions monitoring at a deep-pit swine finishing facility: Research methods and system performance[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, 62(11): 1264-1276.
- [19] 中国气象局科技与气候变化司. 2019 年中国温室气体公报[R]. 北京, 2021.
- [20] 环境空气和废气-氨的测定纳氏试剂分光光度法, HJ533-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [21] 温室湿帘-风机系统降温性能测试方法, NY/T 1937-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [22] 李勋. 猪有害气体排放量实时监测系统的建立及其应用示范[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- Li Xun. Establishment and Application of Real-time Monitoring System for the Swine Harmful Gases Emissions[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [23] 猪场环境参数与环境管理, GB/T17824.3-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [24] 王美芝, 李斯旋, 王华, 等. 装配式配种妊娠猪舍冬季保温与能耗特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 241-249.
- Wang Meizhi, Li Sixuan, Wang Hua, et al. Thermal insulation and energy consumption characteristics of an assembled piggery for breeding and gestation in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 241-249. (in Chinese with English abstract)
- [25] Jede D G, Curtis J Q, Jones D D, et al. Midwest Plan Service[M]. Iowa: Iowa State University, 1987.
- [26] Blanes V V, Guardia M, Dai X R, et al. Emissions of NH_3 , CO_2 and H_2S during swine wastewater management: Characterization of transient emissions after air-liquid interface disturbances[J]. Atmospheric Environment, 2012, 54(7): 408-418.
- [27] Nannoni E, Aarnink A J A, Vermeer H M, et al. Soiling of pig pens: A review of eliminative behaviour[J]. Animals, 2020, 10(11): 2025.
- [28] Ni J Q, Heber A J, Sutton A L, et al. Effect of swine manure dilution on ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and sulfur dioxide releases[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(23): 5917-5923.
- [29] Wang Meizhi, Liu Jijun, Zhao Wanying, et al. CO_2 and NH_3 emissions and water consumption at mechanically ventilated finishing pig house in Beijing equipped with pull-plug manure removal system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(17): 152-160. (in English with Chinese abstract)
- 王美芝, 刘继军, 赵婉莹, 等. 北京夏季机械通风育肥猪舍 CO_2 、 NH_3 排放和耗水量研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 152-160. (英文)
- [30] 阮蓉丹, 曾雅琼, 蒲施桦, 等. 不同机械干清粪频次对生长猪舍内环境和粪污排放的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(8): 126-131.
- Ruan Rongdan, Zeng Yaqiong, Pu Shihua, et al. Effects of different mechanical dry dung cleaning frequency on the environment and manure discharge in growing pig houses[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019, 55(8): 126-131. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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(1): 10-25.
- [32] Pedersen S, Sällvik K. Climatization of Animal Houses: Heat and moisture production at animal and house levels [R]. Denmark: Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences, 2002.
- [33] Aarnink A J A, Landman W J M, Melse R W, et al. Scrubber capabilities to remove airborne microorganisms and other aerial pollutants from the exhaust air of animal houses[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(5): 1921-1930.
- [34] Zong C, Zhang G Q, Feng Y, et al. Carbon dioxide production from a fattening pig building with partial pit ventilation system[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126: 56-68.
- [35] Groenestein C M, Hendriks M M W B, Hartog L A. Effect of feeding schedule on ammonia emission from individual and group-housing systems for sows[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(1): 79-85.
- [36] Wang Y, Dong H, Zhu Z, et al. Mitigating greenhouse gas and ammonia emissions from swine manure management: A system analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(8): 4503-4511.
- [37] Costa A, Guarino M. Definition of yearly emission factor of dust and greenhouse gases through continuous measurements in swine husbandry[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(8): 1548-1556.
- [38] Dong H M, Zhu Z P, Shang B, et al. Greenhouse gas emissions from swine barns of various production stages in suburban Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(11): 2391-2399.
- [39] Philippe F X, Laitat M, Wavreille J, et al. Floor slat openings impact ammonia and greenhouse gas emissions associated with group-housed gestating sows[J]. Animal, 2016, 10(12): 2027-2033.

Ammonia and carbon dioxide emissions from large-scale gestation sow houses in cold climate zones

Zhang Jinrui, Shen Zhongjian, Zhang Ying, Wu Zhonghong, Chen Zhaohui, Liu Jijun, Wang Meizhi^{*}

(College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Ammonia and carbon dioxide emissions from animal houses have been one of the major environmental protection concerns, because they may raise environmental problems and pose hazards to public health. There has a vast territory and diverse climate types in China, which can be divided into five thermal zones. The environmental control systems in different climatic regions vary according to the type of pig house construction. Typical seasonal emissions in different climate zones should be measured to provide data support for Chinese total ammonia and carbon dioxide emissions. In order to enrich the database of ammonia and carbon dioxide emissions from pig houses in cold climate zones, two mechanically ventilated large-scale gestation sow houses were selected to calculate ammonia and carbon dioxide emission rates. One single-floor gestation sow house locates in Hebei Province and is full of Chinese indigenous pigs, the other multi-floor gestation sow house locates in Beijing and is filled with introduced pigs. They were mechanically ventilated and automatically fed. The manure management systems in the two pig houses were “pull-plug” system and “solid-liquid separation” system, respectively. The ammonia and carbon dioxide emission rates of the two experimental pig houses were calculated by monitoring the ventilation rates and the concentration of ammonia and carbon dioxide at the exhaust outlets. Because of the double impacts of Asian fever and corona virus, the data were obtained only in summer in the multi-floor pig house. And the emission rates were monitored both in summer and winter in the single-floor pig house. The results showed that the average daily emission rates of ammonia in the single-floor pig house (winter and summer) and in the summer of the multi-floor pig house (before and after the scrubber) were (17.4±5.3), (65.8±4.8), (150.9±8.6) and (84.6±6.8) mg/kg, respectively. The average daily emission rates of carbon dioxide were (8.9±0.8), (18.1±3.1), (11.7±1.8) and (15.7±1.9) g/kg, respectively. The emission rates of ammonia and carbon dioxide were higher in summer. The trends of daily ammonia emissions from pig houses with different manure managements were different, and the average daily ammonia emissions from the piggery with “pull-plug” system fluctuated in a manure discharge cycle. The variations in ammonia emissions showed probably more within a day than between days in the piggery with the “solid-liquid separation” system. There was a double hump trend before and after the scrubber ($R^2=0.95$), and the peak interval was consistent with the daily manure removing interval. In winter and summer, the carbon dioxide emission rates both showed a diurnal variation. The peak interval was consistent with the feeding time of pigs, and the fluctuation of night emission rates was small. The carbon dioxide emission rates after the scrubber were higher than those before the scrubber ($R^2=0.92$). The age of sows was positively correlated with the daily average carbon dioxide emission rates. It was found that in the mechanically ventilated pig houses with constant ventilation rate, the ammonia emission rates were affected by the mode of the manure management, feeding patterns, and pig activities. This study provided basic data support for the ammonia and carbon dioxide emissions of large-scale single-floor and multi-floor gestation sow houses in cold climate zone.

Keywords: ammonia; carbon dioxide; gestation sow houses; emission rates