

规模猪场机械通风育肥舍氨气产生及排放研究

刘杨, 尚斌, 董红敏, 陶秀萍, 徐文倩, 杨培媛

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0178>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稻作条件下不同施肥模式对盐碱化土壤细菌和古菌群落结构的影响

李明, 马飞, 肖国举

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 495-504 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1107>

生活污水对土壤及湿地植物根际细菌群落的影响

李龙山, 倪细炉, 李昌晓, 李健

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2163-2170 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0506>

纳米银对四种不同性质土壤微生物量及酶活性的影响

舒昆慧, 张丽, 伍玲丽, 司友斌, 刘沁雪

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 907-914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1325>

不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响

王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 李勇, 于建光

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 125-133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0956>

铅对土壤细菌群落组成的影响研究

安凤秋, 吕家珑, 刁展, 李海红, 赵琪琪

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 268-275 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0960>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.
LIU Yang, SHANG Bin, DONG Hong-min, 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.



开放科学 OSID

规模猪场机械通风育肥舍氨气产生及排放研究

刘杨, 尚斌, 董红敏, 陶秀萍*, 徐文倩, 杨培媛

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

摘要:为了获取机械通风育肥猪舍内氨气产生和排放的基础数据,分春、夏、秋和冬四季对规模化种猪场育肥猪舍(试验期间猪的日龄在90~110 d)的氨气浓度进行测定,在猪舍设定3个采样点,每个季节连续采样5 d,每日采样4次,同时采用通风量现场测定系统对风机通风量进行测定。结果表明:育肥猪舍内春季、夏季、秋季和冬季的氨气平均浓度分别为(3.60±1.67)、(3.15±1.02)、(3.88±0.38)、(8.41±0.98) mg·m⁻³,夏季氨气平均浓度最低,其次是春季和秋季,冬季氨气浓度最高;育肥猪舍不同季节通风量为38.1~112.7 m³·h⁻¹·头⁻¹,夏季通风量分别是春季、秋季和冬季通风量的2.08、2.34、3.04倍,在此通风条件下育肥猪舍内氨气浓度为1.6~10.0 mg·m⁻³(风机故障除外),均未超过GB/T 17824.3—2008的限值(25 mg·m⁻³);育肥猪舍不同季节白天管理活动时间内(7:00—17:00)氨气排放速率为0.17~0.24 g·h⁻¹·m⁻²,而全天平均氨气排放速率为0.13~0.23 g·h⁻¹·m⁻²,夏季和冬季猪舍氨气排放值较高、其次是春季,秋季排放相对最低。

关键词:氨气;排放因子;育肥舍;猪场;通风量

中图分类号:S828 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)09-2058-08 doi:10.11654/jaes.2020-0178

Ammonia production and emissions from a mechanically ventilated fattening swine confinement building

LIU Yang, SHANG Bin, DONG Hong-min, TAO Xiu-ping*, XU Wen-qian, YANG Pei-yuan

(Institute of Environment & Sustainable Development in Agriculture, CAAS; Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management in Agricultural Structures, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: Ammonia (NH₃) emissions from livestock operations have become a major concern owing to the potential environmental and health risks, but there is a lack of NH₃ emission factors for better understanding the contributions of livestock operations to environmental pollution, especially to smog. The purpose of this study was to quantify NH₃ concentrations and the emission factors from a mechanically ventilated fattening swine barn at a commercial breeding swine farm in a suburb of Beijing. The fattening pigs were 90 d to 110 d old during the experimental period. There were three sampling areas in the barn, and the gas samples at each location were collected four times per day for five consecutive days in each season. Meanwhile, the ventilation rates of the exhaust fans in the fattening swine barns were measured using a Fan Assessment Numeration System. The average NH₃ concentrations in the fattening swine barns were (3.60±1.67), (3.15±1.02), (3.88±0.38), and (8.41±0.98) mg·m⁻³ in the spring, summer, autumn, and winter, respectively. Among them, the minimum average appeared in summer and the maximum average was observed in winter. The NH₃ concentrations were positively correlated with relative humidity, but negatively correlated with temperatures inside the fattening swine barn. The ventilation rates ranged from 38.1 m³·

收稿日期:2020-02-22 录用日期:2020-06-02

作者简介:刘杨(1991—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事农业生物环境研究。E-mail:liuyang@cau.edu.cn

*通信作者:陶秀萍 E-mail:taoxiuping@caas.cn

基金项目:沪农科创字(2019)第3-1号;国家科技支撑计划项目(2013BAD21B02)

Project supported: Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program, China (G20190301); The National Science and Technology Support Program (2013BAD21B02)

$\text{h}^{-1} \cdot \text{pig}^{-1}$ to $112.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{pig}^{-1}$ year-round, and the ventilation rate in summer was 2.08, 2.34, and 3.04 times greater than those in spring, autumn, and winter, respectively. Under the current ventilation scenario, the NH_3 concentrations in the fattening barn ranged from $1.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $10.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (except for fan fault), and all the values were lower than the limit value of $25.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ of GB/T 17824.3—2008. The NH_3 emission fluxes of the fattening barn in different seasons during the daytime (from 7 am to 5 pm) were approximately $0.17 \sim 0.24 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, and the corresponding daily mean emission fluxes were approximately $0.13 \sim 0.23 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. The emission flux in summer was equal to that in winter, both were higher than those in autumn and spring, and the lowest value of emission flux was in autumn. The fundamental data on NH_3 production and NH_3 emission factors of a deep-pit confinement fattening swine house were achieved in this study.

Keywords: ammonia; emission factor; fattening barn; swine farm; ventilation rate

畜禽对饲料氮的转化率不高,未被利用的饲料氮随粪尿排泄物进入环境,粪尿一旦排出,便会立刻生成并且几乎同步挥发氨气。氨气为无色气体,极易溶于水,有强烈的刺激性,畜禽舍内氨气积累会影响动物和饲养人员健康^[1]。氨气被畜禽舍通风系统排入大气后,不仅能直接导致敏感生态系统酸化和富营养化,形成光散射气溶胶引起雾霾和使能见度下降,而且能迅速与大气中硫酸和硝酸发生中和反应生成硫酸铵、硫酸氢铵或硝酸铵等细颗粒物,成为 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分,影响人类健康^[2-6]。 $\text{PM}_{2.5}$ 被人体吸入后可以透过肺屏障进入血液系统,导致心血管和呼吸道疾病,甚至癌症和死亡^[7]。

畜牧业是重要的农业氨气排放源,据估算畜牧业氨气排放量占加拿大氨气排放总量的64.0%、美国氨气排放总量的48.7%,瑞士农业源氨气排放总量的90%^[6,8]。对于我国氨排放总量以及各个污染源的排放量,目前尚没有明确的数据,很多学者认为畜禽养殖对氨排放贡献超过50%^[9-10],但此数据有待进一步考证。畜禽养殖氨排放主要来自畜禽生产和废弃物管理过程,相比较而言,畜禽生产的氨排放研究较少。现有畜禽生产氨排放研究中,猪舍氨排放的关注度相对较高,但相关研究主要集中于猪舍内氨气浓度测试及其影响因素分析^[11-24]。部分文献结合通风量估算对猪舍氨气排放量进行了研究:代小蓉^[11]通过猪舍内外温差估算自然通风量、出风口风速及用面积计算机械通风量,对人工气候室模拟生长育肥猪舍在自然和机械通风条件下的氨排放系数进行了研究;陈园^[12]和纪英杰等^[13]基于猪舍内外温差估算自然通风量、风机额定通风量及用运行时间估算机械通风量,探讨上海地区猪场典型机械和自然通风相结合育肥猪舍的氨排放通量;石志芳等^[14]则通过自然排风口面积及其风速估算自然通风量、机械通风额定风量和用运行时间计算机械通风量,获取了不同地面类型猪舍氨排放系数;王文林等^[15]借助排风口面积及其风速估算机械通

风猪舍通风量,并在此基础上分析了江苏规模化猪场各阶段猪舍夏季氨气排放因子;高芳^[16]采用二氧化碳平衡法估算通风量,研究山西猪场典型自然通风和机械通风相结合育肥猪的氨气排放因子。上述文献未对出(排)风口风速的测定方法进行详细介绍。对于自然通风系统,自然通风量除受猪舍内外温差影响外,还受外界风速、风向等的影响;对于机械通风系统,风机的实际排风量因受舍内静压、风机状况等诸多因素影响而与额定风量有较大的差别。为了获取猪舍通风量的准确数据,国外研究开发了风机风量现场测定系统,用其对猪舍风机的实际通风量进行测试^[16-17],并在此基础上对猪舍氨气排放因子进行研究。

随着现代养猪产业发展,猪场机械化和自动化程度越来越高,尤其饲养环境对健康养殖的影响日益受到重视、饲养员招聘难度越来越大,机械通风将成为生猪养殖环境调控的必然趋势。本文以我国现代规模化猪场机械通风育肥猪舍为例,研究在该规模猪场通风管理模式下游肥猪舍内不同季节的氨气浓度情况,结合通风量现场测定系统对风机通风量的测定,分析育肥猪舍氨气排放因子的基础数据,为评价育肥猪舍环境调控效果、科学估算猪场氨气排放量及其环境影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验猪舍

试验在北京市昌平区某规模化种猪场进行,猪场周围5 km均为农田,猪场存栏母猪1 200头。试验育肥猪舍位于猪场最北端,舍长50 m、跨度12 m;猪舍为双坡有窗结构、檐高3 m;舍内猪栏呈双列单走道布置,走道位于猪舍中部;猪舍的平面布置图如图1。猪舍地面为全漏缝地板,水泡粪清粪方式,水泡粪池自8:00开始,间隔约4 h冲水1次,每日冲水3次,共 6 m^3 ;粪尿水在猪舍下粪池中的贮存时间为2个月。试

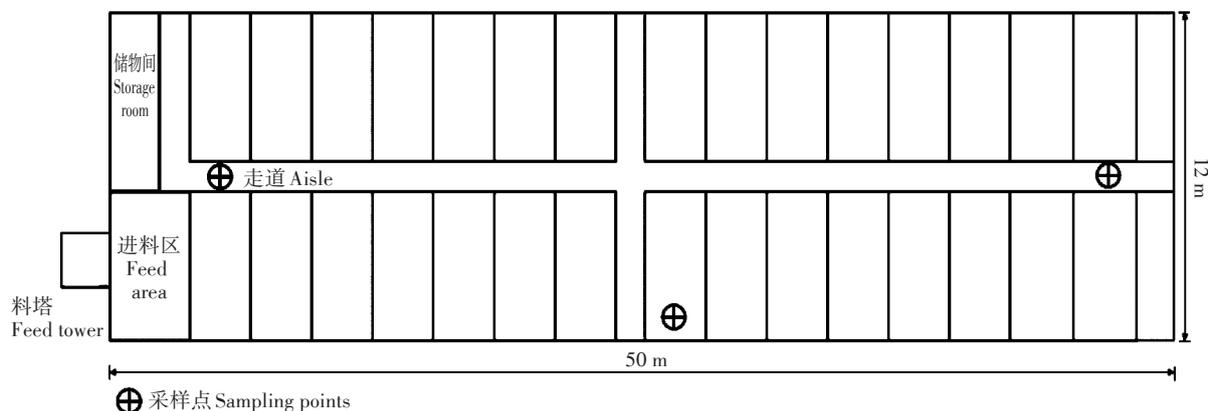


图1 试验育肥猪舍平面布置图

Figure 1 Schematic layout of the fattening swine barn

验期间猪舍内有育肥猪 397 头、日龄在 90~110 d, 每日 8:00 和 16:00 喂料。

试验育肥猪舍采用机械通风, 风机运行通过温度传感器自动控制。猪舍东西走向, 南侧墙上间隔安装 50 英寸(1 英寸=2.54 cm)(4 台)和 36 英寸(5 台)负压轴流风机, 风机距地面约 100 cm; 北侧墙上对应位置为 2.5 m 宽×1.2 m 高的窗户(窗台离地 1.2 m), 北侧窗户上间隔安装湿帘作为夏季和秋季进气口(春季和冬季使用屋顶进气口)。

1.2 测点布置

沿着猪舍纵轴中间走道, 在两端和中间各放置温湿度数据采集器(美国 ONSET 公司), 对猪舍内的温度和空气相对湿度进行自动采集, 数据采集的间隔时间为 30 min。

在猪舍的中间和两端设置 3 个氨气采样点(图 1), 其中猪舍中间采样点位于中部猪栏靠近风机内侧, 该点氨气浓度作为排放浓度进行计算。利用大气采样器(KC-6D 型, 青岛崂山应用技术研究)采集气体样品, 采样高度约 80 cm。综合考虑猪舍喂料时间、水泡粪池冲水时间以及舍内温度变化规律, 试验期间每日 7:30、10:30、12:30 和 15:30 共采样 4 次, 每次采样 30 min。分 4 个季节, 每个季节连续采样 5 d, 秋冬春夏的试验时间分别为 10 月 15—19 日、1 月 19—23 日、4 月 16—20 日和 7 月 25—29 日, 其日平均温度和相对湿度分别为(18.0±6.5)、(1.4±5.8)、(19.3±7.7)、(32.0±6.9)℃和 40.0%±0.2%、42.0±0.1%、23.0%±0.1%、57.0%±0.2%。

1.3 测定方法

氨气浓度采用《环境空气和废气 氨的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 533—2009)进行测定。在距离

猪场约 2 km 的试验基地实验室配制 0.01 mol·L⁻¹ 硫酸吸收液, 将 10 mL 吸收液装入吸收管内, 密封管口送至试验猪场, 以 1.0 L·min⁻¹ 流量采集猪舍内空气 45 min, 采样结束后密封管口并送入实验室, 当日完成样品分析; 同时全程测试空白样品。风机实际通风量采用通风量现场测定系统^[25]进行现场测定, 该系统由主体框架、驱动部分和风速计/控制系统 3 部分组成, 现场测试前该系统送中国农业大学风洞实验室校准测定通风量的校正值(Y)与猪舍风机现场测定的通风量(X)的关系为 $Y=1.0335X+322.05$ ($R^2=0.9999$)。本研究中, 对每种风机组合中各尺寸风机的通风量测定 3 次, 将其均值作为该风机的通风量。

1.4 猪舍氨气排放量计算方法

猪舍风机运行通过温度传感器自动控制, 春季和秋季白天组合风机自 8:00 开始运行, 分别于 17:00 和 16:00 停止; 夏季组合风机 24 h 运行, 冬季白天组合风机自 10:00 开始运行, 13:00 停止。不同季节风机运行情况及其通风换气量如表 1 所示。

结合采样时间点和风机运行时间, 本试验将计算猪舍管理活动时间(7:00—17:00)分成 4 个时段: 7:00—9:00、9:00—11:00、11:00—14:00 和 14:00—17:00, 将各时段通风总量与相应的 7:30、10:30、12:30 和 15:30 氨气浓度平均值相乘后求和, 得到白天猪舍氨气排放量; 在此基础上, 通过夜间时段通风量与 7:30 氨气浓度计算夜间氨气排放量。进一步计算猪舍氨气排放因子(E_{factor} , $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), 其计算公式为:

$$E_{\text{factor}} = \frac{\sum Q_j \times (C_{ji} - C_{jo})}{A \times t} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: Q_j 为猪舍第 j 时段的通风总量, m^3 ; C_{ji} 为猪舍氨气浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; C_{jo} 为大气环境氨气浓度 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; A 为

表1 育肥猪舍不同季节风机运行及其通风换气量

Table 1 Fan operation and the ventilation rates inside the fattening barn in different seasons

季节 Seasons	风机运行情况 Fan operation scenario		通风量 Ventilation rates/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	动物换气量 Air exchange rate of animals/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$)
	数量 Quantity	运行时间 Runtime*		
春季 Spring	7(4台 50"+3台 36")	8:00—17:00	5.17×10^5	54.3
夏季 Summer	9台(4台 50"+5台 36")	0:00—24:00	10.73×10^5	112.7
秋季 Autumn	6台(4台 50"+2台 36")	8:00—16:00	4.60×10^5	48.2
冬季 Winter	6台(2台 50"+4台 36")	10:00—13:00	3.53×10^5	37.1

注:*除夏季外,其他季节其他时段仅3台36"风机运行。

Note:* There were only 3 fans with diameter of 36 inches running in the seasons except for summer.

猪舍面积, m^2 ; t 为第 j 时段的时间长度, h 。

2 结果与讨论

2.1 育肥猪舍温度及通风量

育肥猪舍内风机运行根据温度传感器进行自动控制,不同季节的实际通风量均有所差别,夏季通风量大、其次是春季和秋季、冬季最小(表1)。夏季通风量分别是春季、秋季和冬季的2.08、2.34倍和3.04倍。

育肥猪舍内温度和氨气浓度日均值变化情况如图2所示。试验期间,育肥猪舍内温度在15.6~29.9℃、相对湿度在9.1%~80.6%。

Zong等^[26]报道,采用漏缝地板和水泡粪清粪方式的育肥猪舍夏季通风量为 $68.1 \sim 83.4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$ 、冬季通风量为 $24.2 \sim 28.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$,相较本试验结果偏低,可能是因其所用试验猪舍的水泡粪池安装了地沟风机,该风机通风量在冬季和夏季基本保持在 $9.0 \sim 10.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$,使舍内通风量和地沟通风量之和与本研究结果基本一致。本研究猪舍的通风换气量是

根据舍内温度参数自动调节的,从猪舍氨气浓度看,猪舍通风换气系统具有很好的运行效果。Ranbeek等^[17]的试验育肥猪舍通风量为 $15.6 \sim 66.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$,明显低于本试验结果,较低通风量可能是导致育肥猪舍内氨气浓度较高的主要原因。国外研究推荐 $68.0 \sim 100.0 \text{ kg}$ 的育肥猪在冬季、温暖季节和夏季的通风量分别为 17.0 、 59.5 、 $204.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$ ^[27],除冬季较低外,本试验猪舍通风换气量均在此推荐范围内。

2.2 不同季节育肥猪舍内氨气浓度

2.2.1 猪舍内氨气日平均浓度

猪舍内氨气浓度范围在 $1.6 \sim 10.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图2),均未超过GB/T 17824.3—2008的限值($25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)要求,表明育肥猪舍内环境自动控制系统的运行效果较好。但是春季试验的4月18日,因舍中间氨气采样点所对应的风机故障,导致该采样点当日的部分氨气浓度异常(约 $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),远超出了标准限定值。因此,如果全封闭式猪舍突发电力中断或风机故障,将会导致舍内环境质量极度异常,应提前做好应对措施。

育肥猪舍内春季、夏季、秋季和冬季的氨气日平

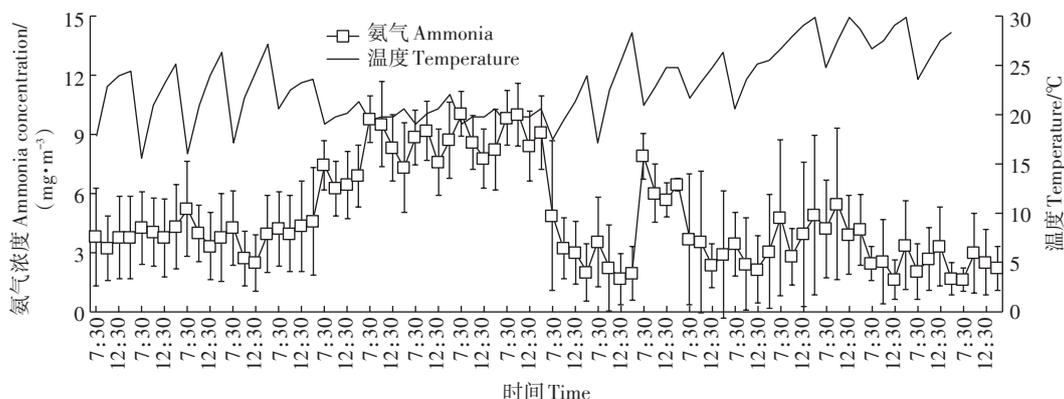


图2 不同季节育肥猪舍内温度和氨气浓度变化情况(图中从左到右依次为秋季、冬季、春季和夏季)

Figure 2 Profiles of temperature and ammonia concentration inside the fattening barns in different seasons (from left to right: autumn, winter, spring and summer)

均浓度分别为 (3.60 ± 1.67) 、 (3.15 ± 1.02) 、 (3.88 ± 0.38) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 (8.41 ± 0.98) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,夏季日平均氨气浓度最低,其次是春季和秋季,冬季相对较高,这可能与不同季节的通风量有关。本试验中,猪舍内夏季和其他季节温度最大相差 $7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,但是夏季通风量是冬季的3倍左右,较高的换气频率使得猪舍内氨气浓度较低。较低的通风量也使得猪舍内冬季氨气浓度极显著高于其他3个季节($P<0.01$),秋季浓度显著高于夏季浓度($P<0.05$),其他季节之间的氨气浓度差异不显著。本试验数据与Philippe等^[24]报道的机械通风育肥猪舍(3月龄育肥91 d) $8.22\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ($6.24\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)的氨气浓度基本一致。许稳等^[21]报道北京地区育肥猪舍内氨气浓度月均值为 $1.55\sim 5.24\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (平均 $3.26\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$),其氨气浓度较低的原因是清粪方式不同,该猪舍采用人工干清粪方式,每日清粪2次后冲洗地板;但吴胜等^[22]6月份测试江苏半封闭育肥猪舍内氨气浓度为 $9\sim 10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,该猪舍也采用人工清粪和自然通风,其较高的氨气浓度可能与饲养密度和试验期间育肥猪日龄(21周龄、体质量 $90\sim 100\text{ kg}$)有关。Ranbeek等^[17]报道机械通风全漏风地面育肥猪舍内平均氨气浓度为 $18.7\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ($14.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$),可能是育肥前期猪舍通风量较小所致。

2.2.2 育肥猪舍内氨气浓度的日变化规律

育肥猪舍内氨气浓度的日变化规律如图3所示。秋、冬和春三季猪舍氨气最高浓度均出现在7:30,而最低值均出现在12:30;夏季各时间点的氨气浓度差别不大,较大值出现在10:30,而较低值出现在7:30。猪舍内氨气浓度的日变化规律与通风量存在一定的关系,该猪舍秋、冬和春季夜间通风量较小,氨气浓度在舍内略有积累,因而7:30的浓度最高,之后舍内通

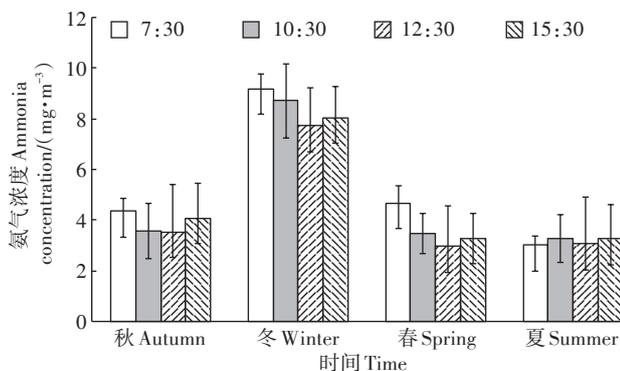


图3 育肥猪舍内不同季节各采样时间点的氨气浓度

Figure 3 Ammonia concentrations at different sampling times in four seasons

风量增加,舍内氨气浓度有所下降;而夏季是多台风机连续运行,白天和夜间通风量一致,加之动物夜间活动少,因此反而在7:30出现最低值,之后的较大值可能与猪舍粪沟冲水有关。

许稳等^[21]报道北京地区自然通风、自由采食育肥猪舍,由于干清粪后冲洗地板,舍内氨气浓度在第一次清粪后急剧下降,而吴胜等^[22]的报道自然通风、人工喂料育肥猪舍,第一次清粪后氨气浓度显著升高($P<0.05$),其原因是第一次喂料与清粪在相同时段,也可能与清粪后是否冲洗地板有关。

2.2.3 育肥猪舍氨气浓度与舍内温湿度的关系

不同季节育肥猪舍内氨气浓度与舍内温湿度的相关性如表2所示。除夏季外,其他季节育肥猪舍内氨气浓度与温度呈负相关、与相对湿度呈正相关,且春季氨气浓度与相对湿度的相关性最强,其次是冬季;春、秋和冬季氨气浓度与温度的负相关性差别不大;试验期间育肥猪舍氨气浓度与温度、相对湿度的整体相关系数分别为 -0.53 和 0.48 。氨气浓度与环境温度呈负相关的原因可能有两个方面:首先,猪舍采取环境控制措施,夏季风机全部开启,通风量增加使舍内风速增加,起到一定的降温作用,试验期间舍外环境温度为 $(32.0\pm 6.9)\text{ }^{\circ}\text{C}$,舍内温度为 $(27.7\pm 1.9)\text{ }^{\circ}\text{C}$,而冬季试验期间,舍外环境温度为 $(1.4\pm 5.8)\text{ }^{\circ}\text{C}$,舍内温度为 $(20.0\pm 0.8)\text{ }^{\circ}\text{C}$;其次,猪舍通风量增加也将更多的氨气排到舍外,从而使舍内氨气浓度降低。与湿度呈正相关的可能原因是氨气极易溶于水,湿度较大,空气所含氨气较多,因而氨气浓度也相对较高。试验期间,冬季舍内相对湿度 $(59.3\%\pm 5.6\%)$ 显著高于舍外 $(42\%\pm 0.11\%)$ ($P<0.05$),其他季节舍内平均相对湿度与舍外接近。

2.3 育肥猪舍氨气排放速率和排放因子

育肥猪舍不同季节的氨气排放速率如图4所示,夏季排放值最高,其次是冬季和春季,秋季相对最低。

表2 育肥猪舍氨气浓度与温湿度之间的相关性(r)

Table 2 Correlations between ammonia concentration and temperature and relative humidity

季节 Seasons	温度 Temperature	相对湿度 Relative humidity
秋季 Autumn($n=20$)	-0.39	0.57
冬季 Winter($n=20$)	-0.32	0.78
春季 Spring($n=20$)	-0.31	0.82
夏季 Summer($n=16$)*	0.19	-0.56

注:*数据采集器的温湿度异常数据被剔除。

Note:*The abnormal temperature and humidity date was eliminated.

有文献报道北京城区和农村1—7月大气氨气浓度平均值为 $10\sim 40\ \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$;而郊区农田周边氨浓度非常低,相对而言,秋季最高、夏季次之、春季最低为 $0.02\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ [28-29]。本试验育肥猪舍位于试验猪场最北端,周围5 km均为农田,且试验时间与上述研究报道时间基本一致,因此将文献中春、夏、秋、冬四季氨气浓度 0.02 、 0.08 、 $0.09\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.05\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 作为大气环境背景值进行计算。不同季节白天管理活动时间内(7:00~17:00)育肥猪舍氨气排放速率为 $0.17\sim 0.24\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,而全天平均氨气排放速率为 $0.13\sim 0.23\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,白天较高的排放量可能与猪的活动有关。Zhu等[30]报道深粪坑育肥猪舍每日12 h氨气排放速率为 $0.22\sim 0.61\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,其较高的排放值源于粪尿在粪坑中贮存时间高于本试验猪舍2个月的贮存期。白天管理活动时间内(7:00~17:00),夏季猪舍氨气排放速率与冬季相同,均为 $0.24\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,其原因可能与舍内温湿度相关,尽管猪舍夏季平均温度较冬季高,但是冬季猪舍内水汽较多使其中相对湿度高于夏季。全天氨气排放值夏季最高、冬季其次,原因与夏季猪舍内较高温度和较大通风量有关,增加通风量也有利于水泡粪池中氨气挥发,从而使氨气排放量增加。

猪舍内的氨气源自于猪粪尿,其产生和排放受粪便清理、饲养管理、粪便特性、环境温度、粪尿成分、通风等诸多因素的影响[28,31]。研究表明,粪尿中氨气挥发量随着温度升高而增加,当环境温度从 $4\ \text{℃}$ 增加到 $20\ \text{℃}$ 时,氨气的挥发量提高 $3.6\sim 5.8$ 倍[31]。本研究夏季较高的氨气排放量主要与猪舍夏季较高的温度有关,舍内夏季平均温度较其他季节高 $4.7\sim 7.7\ \text{℃}$,且春季温度略高于秋季;尽管冬季猪舍温度为 $(20.02\pm 0.79)\ \text{℃}$,较其他季节低,但湿度却是4个季节中最高

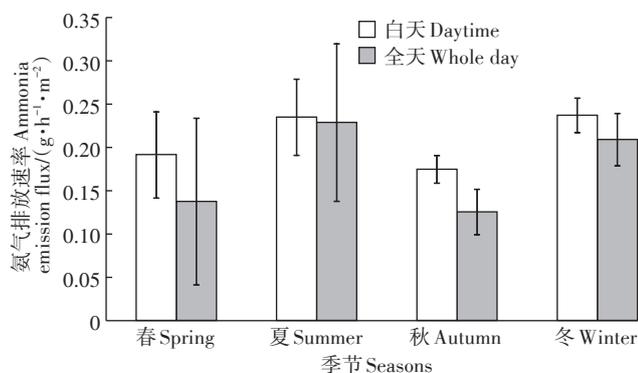


图4 育肥猪舍不同季节的氨气排放速率

Figure 4 Ammonia emission flux of fattening barns in different seasons

的,本研究发现氨气浓度与湿度呈正相关,冬季较高的氨气挥发量可能与冬季猪舍粪污干物质含量有关,干物质含量是影响粪便氨挥发的主要特性因素[31]。Hayes等[32]报道,机械通风、水泡粪育肥猪舍氨气排放因子为 $6.9\sim 11.9\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,相对高于本研究结果(不同季节氨气排放因子范围在 $4.6\sim 8.3\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$),其原因可能是漏风地板下,水泡粪池表面高风速使氨气的挥发量增加,且有文献表明水泡粪池地沟风机通风量每改变 $0.01\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,氨气挥发量将增加或减少21%。参照文献[16]的方法,育肥猪舍氨气排放因子也可以用“ $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$ ”为单位表示。育肥猪舍春夏秋冬4季的氨气排放因子分别为 (1.82 ± 0.14) 、 (3.03 ± 0.17) 、 (1.66 ± 0.53) 、 $(2.77\pm 0.50)\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,年均排放因子为 $(2.32\pm 0.68)\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,与Ranbeeck等[17]报道的育肥猪舍氨气年排放因子 $(2.2\pm 1.4)\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$ 基本一致。James等[33]报道商品机械通风育肥猪舍内夏、秋、冬和春季的氨气排放因子分别为 (1.60 ± 0.39) 、 (0.95 ± 0.60) 、 (1.88 ± 1.70) 、 $(1.64\pm 0.74)\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,即对应的氨气排放因子均值分别为 1.60 、 0.95 、 1.88 、 $1.64\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$;Blunden等[34]则报道育肥猪舍夏、秋、冬和春季的氨排放分别为 (0.82 ± 0.42) 、 (0.45 ± 0.28) 、 (1.72 ± 1.12) 、 $(2.38\pm 0.86)\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$ 。以上文献结果均低于本试验数据,其原因跟动物大小和清粪方式有关。首先是育肥猪舍清粪方式不同,James等[33]的猪舍采用水冲清粪方式对猪舍粪污进行清理,每周冲洗1次,而本研究水泡粪时间较长(2个月);其次本研究育肥猪日龄基本维持在90~110日龄,而James等[33]的夏、秋、冬和春季试验动物体重分别为 48.7 、 34.6 、 $116.6\ \text{kg}$ 和 $50.6\ \text{kg}$,Blunden等[34]的试验猪体重为 $38\sim 88\ \text{kg}$,不仅这些动物日龄的季节差别较大,且与本研究试验动物日龄不同,其较大排放因子主要是猪体质量较大所致。

3 结论

(1)育肥猪舍内氨气浓度为 $1.6\sim 10.0\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (风机故障除外),均未超过GB/T 17824.3—2008的限值($25\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。春季、夏季、秋季和冬季舍内氨气浓度平均值分别为 (3.60 ± 1.67) 、 (3.15 ± 1.02) 、 $(3.88\pm 0.38)\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(8.41\pm 0.9)\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(2)白天管理活动时间内(7:00~17:00)育肥猪舍氨气排放速率为 $0.17\sim 0.24\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,而全天平均氨气排放速率为 $0.13\sim 0.23\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] 李如治. 家畜环境卫生学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 63-73.
LI Ru-zhi. Environmental hygiene of domestic animals[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 63-73.
- [2] Bluteau C V, Massé D I, Leduc R. Ammonia emission rates from dairy livestock buildings in eastern Canada[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103: 480-488.
- [3] Hristov A N. Technical note: Contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) in the United States[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(6): 3130-3136.
- [4] Webb J, Broomfield M, Jones S, et al. Ammonia and odour emissions from UK pig farms and nitrogen leaching from outdoor pig production. A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2014: 470/471: 865-875.
- [5] Arogo J, Westerman P W, Heber A J. A review of ammonia emissions from confined swine feeding operations[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(3): 805-817.
- [6] Carew R. Ammonia emissions from livestock industries in Canada: Feasibility of abatement strategies[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 2618-2626.
- [7] World Health Organization. 2018. Ambient (outdoor) air quality and health[EB/OL]. (2018-05-02) [2019-11-19]. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- [8] Casey K D, Bicudo J R, Schmidt D R, et al. Air quality and emissions from livestock and poultry production/waste management systems[M]// *Animal Agriculture and the Environment: Center for Manure and Animal Waste Management White Papers*, 2006.
- [9] Kupper T, Bonjour C, Menzi H. Evolution of farm and manure management and their influence on ammonia emissions from agriculture in Switzerland between 1990 and 2010[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 103: 215-221.
- [10] Häni C, Sintermann J, Kupper T, et al. Ammonia emission after slurry application to grassland in Switzerland[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 125: 92-99.
- [11] 代小蓉. 集约化猪场 NH₃ 的排放系数研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 19-34.
DAI Xiao-rong. Study on ammonia emission factors in concentrated pig farm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 19-34.
- [12] 陈园. 上海市典型规模化猪场氨排放特征研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017: 28-29.
CHEN Yuan. Study on characteristics of ammonia emission from typical large scale pig farm in Shanghai[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017: 28-29.
- [13] 纪英杰, 沈根祥, 徐昶, 等. 典型季节规模化猪场氨排放特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(11): 2573-2582.
JI Ying-jie, SHEN Gen-xiang, XU Chang, et al. Seasonal ammonia emission from intensive pig farm by high resolution online monitor[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2573-2582.
- [14] 石志芳, 姬真真, 席磊. 规模化猪场 NH₃ 排放特征及影响因素研究[J]. *中国畜牧杂志*, 2017, 53(8): 100-104.
SHI Zhi-fang, JI Zhen-zhen, XI lei. Study on the characteristics and influencing factors of NH₃ emission from industrialized pig farm[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2017, 53(8): 100-104.
- [15] 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, 4(17): 214-221.
WANG Wen-lin, LIU Xiao, HAN Yu-jie, 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*, 2018, 34(17): 214-221.
- [16] 高芳. 猪场 NH₃ 排放对大气 PM_{2.5} 浓度和成分的影响[D]. 太原: 山西大学, 2018: 7-14.
GAO Fang. Effects of ammonia emissions from piggery on mass concentration and composition of atmospheric fine particulate matter[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018: 7-14.
- [17] Ranbeek 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.
- [18] 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.
- [19] 余进海. 氨气-不可忽视的雾霾元凶[EB/OL]. (2016-04-08) [2019-11-19]. http://www.iap.ac.cn/kxcb/kp wz/201604/t20160408_4580748.html.
- [20] YU Jin-hai. Important potential source of haze: Ammonia[EB/OL]. (2016-04-08) [2019-11-19]. http://www.iap.ac.cn/kxcb/kp wz/201604/t20160408_4580748.html.
- [20] 林海, 吴庆鹁, 杨全明. 不同类型猪舍建筑的环境评价[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(7): 93-97.
LIN Hai, WU Qing-wu, YANG Quan-ming. Evaluation of the microclimate of pig houses in Shandong Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(7): 93-97.
- [21] 许稳, 刘学军, 孟令敏, 等. 不同养殖阶段猪舍氨气和颗粒物污染特征及其动态[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6): 1248-1254.
XU Wen, LIU Xue-jun, MENG Ling-min, et al. Dynamics and pollution features of ammonia and particulate matter during different pig breeding stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1248-1254.
- [22] 吴胜, 沈丹, 唐倩, 等. 规模化半封闭式猪舍内颗粒物、氨气和二氧化碳分布规律[J]. *畜牧与兽医*, 2018, 50(3): 30-38.
WU Sheng, SHEN Dan, TANG Qian, et al. Distribution of particulate matters and noxious gases in large-scale semi-enclosed swine houses[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2018, 50(3): 30-38.
- [23] Amon B, Kryvoruchko V, Fröhlich M, et al. Ammonia and greenhouse gas emissions from a straw flow system for fattening pigs: Housing and manure storage[J]. *Livestock Science*, 2007, 112(3): 199-207.
- [24] Philippe F X, Cabaraux J F, Nicks B. Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141: 245-260.
- [25] Gates R S, Casey K D, Xin H, et al. Fan assessment numeration sys-

- tem (FANS) design and calibration specifications[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(5):1709-1715.
- [26] Zong C, Li H, Zhang G. Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pig house with two types of partial pit ventilation systems. *Agriculture*[J]. *Ecosystems and Environment*, 2015, 208:94-105.
- [27] 董红敏,陶秀萍. 畜禽养殖环境控制与通风降温[M]. 北京:中国农业出版社, 2007.
- DONG Hong-min, TAO Xiu-ping. Environmental control, ventilation and cooling for animal feeding operations[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [28] 董婧,孙长虹,王永刚,等. 北京市典型农业区域大气环境氨浓度动态变化分析[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(3):262-267.
- DONG Jing, SUN Chang-hong, WANG Yong-gang, et al. Dynamics of atmospheric ammonia concentrations over representative agricultural region in Beijing[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(3):262-267.
- [29] 张博韬. 北京大气中NH₃的分布和变化情况研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(1):119-122.
- ZHANG Bo-tao. Atmospheric distribution and variation of NH₃ in Beijing[J]. *Environment Science and Management*, 2016, 41(1):119-122.
- [30] Zhu J, Jacobson L, Schmidt D, et al. Daily variations in odor and gas emissions from animal facilities[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2000, 16(2):153-158.
- [31] Stelt B V, Temminghoff E J M, Van Vliet P C J, et al. Volatilization of ammonia from manure as affected by manure additives, temperature and mixing[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98:3449-3455.
- [32] Hayes E T, Curran T P, Dodd V A. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97:940-948.
- [33] James K M, Blunden J, Rumsey I C, et al. Characterizing ammonia emissions from a commercial mechanically ventilated swine fattening facility and an anaerobic waste lagoon in north Carolina[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2012, 3:279-288.
- [34] Blunden J, Aneja V P, Westerman P W. Measurement and analysis of ammonia and hydrogen sulfide emissions from a mechanically ventilated swine confinement building in north Carolina[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42:3315-3331.