

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.

典型季节规模化猪场氨排放特征研究

纪英杰¹, 沈根祥^{1,2*}, 徐昶², 周忠强³, 王振旗², 钱晓雍², 王晶璐⁴, 叶贤满⁴

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 3. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 4. 杭州市环境监测中心站, 杭州 310007)

摘要:为探求典型季节规模化猪场主要污染环节的氨排放特征,通过高分辨率在线监测设备对上海典型某规模化猪场的肉猪养殖棚舍与堆粪棚的氨浓度进行连续监测,获取主要环节典型季节的氨排放通量水平。研究结果表明,肉猪养殖棚舍夏秋两季平均氨浓度水平分别为 $3.31 \pm 0.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $4.91 \pm 0.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,而堆粪棚夏秋两季氨浓度水平分别为 $6.26 \pm 1.57 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $3.19 \pm 0.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。肉猪棚舍夏秋两季氨浓度日小时范围分别为 $2.9 \sim 3.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $3.8 \sim 5.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,即夏季肉猪棚舍氨浓度呈先上升后下降的趋势,主要受温度、畜禽活动强度的影响;秋季肉猪棚舍氨浓度变化趋势为先下降后上升,主要受9:00—15:00机械通风运行模式的影响。肉猪养殖棚舍夏秋两季的氨排放通量分别为 $10.12 \pm 0.96 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$ 和 $7.07 \pm 1.58 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$,堆粪棚夏秋两季氨排放通量分别为 $2.99 \pm 0.69 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$ 和 $0.89 \pm 0.31 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$ 。相关性分析表明,在夏季,通风量是影响肉猪养殖棚舍氨排放通量的主导因素,而在秋季,氨排放通量则更多地受到温度与湿度的影响。

关键词:氨排放特征;规模化养猪场;大气污染

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)11-2573-10 doi:10.11654/jaes.2019-0558

Seasonal ammonia emission from intensive pig farm by high resolution online monitor

Ji Ying-jie¹, SHEN Gen-xiang^{1,2*}, XU Chang², ZHOU Zhong-qiang³, WANG Zhen-qi², QIAN Xiao-yong², WANG Jing-lu⁴, YE Xian-man⁴

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, State Environmental Protection Key Laboratory of the Cause and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai 200233, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 4. Hangzhou Environmental Monitoring Center Station, Hangzhou 310007, China)

Abstract: This study was focused on ammonia emission from an intensive pig farm, where ammonia concentration in piggeries and manure sheds was monitored using high-resolution online monitor during the typical time of seasons. The results showed that the average seasonal ammonia concentrations in the piggery shed were $3.31 \pm 0.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ during summer and $4.91 \pm 0.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ during autumn. The figures for manure shed were $6.26 \pm 1.57 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ for summer, and $3.19 \pm 0.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ for autumn. The hourly ammonia concentrations of the piggery shed demonstrated significant seasonal differences with $2.9 \sim 3.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $3.8 \sim 5.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in summer and autumn respectively. The ammonia emission in summer increased initially and decreased later, mainly due to the effect of temperature and livestock activity intensity, whereas the ammonia emission in autumn decreased first within the mechanical ventilation mode from 9:00 to 15:00, and then increased within the natural ventilation mode. The ammonia emission fluxes in the piggery were 10.12 ± 0.96 and $7.07 \pm 1.58 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{head}^{-1}$ for summer and autumn respectively, whereas in the manure shed, the figures were 2.99 ± 0.69 and $0.89 \pm 0.31 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{head}^{-1}$, respectively. Correlation analysis indicated that in the studied piggery, ventilation was the dominant factor for ammonia emission during summer, whereas temperature and humidity were the major factors during autumn.

Keywords: ammonia emission characteristics; large-scale pig farms; air pollution

收稿日期:2019-05-21 录用日期:2019-08-07

作者简介:纪英杰(1994—),男,山东德州人,硕士研究生,研究方向为环境健康与农村生态。E-mail:995538155@qq.com

*通信作者:沈根祥 E-mail:shengx@saes.sh.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0213303);上海市环保科研项目(2017-01,2018-22);上海市科技兴农项目(沪农科创字(2019)第3-1号)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2018YFC0213303); Environmental Protection Scientific Research Projects of Shanghai(2017-01,2018-22); Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program, China(G20190301)

氨是大气中参与氮循环的重要碱性气体,其排放会快速沉积并形成 N_2O ,是导致全球变暖的重要原因^[1-3]。氨易与氮氧化物或硫氧化物反应形成细微颗粒物($\text{PM}_{2.5}$),是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物之一,对灰霾的形成有着重要影响^[4-8]。研究显示,畜禽养殖氨排放是大气中氨的主要来源之一^[9],我国畜禽养殖氨排放占总排放量的50%以上^[10]。2016年长三角地区规模化养殖中肉猪的氨排放量达到了8.72万t,占畜禽养殖业氨排放的41%,是最主要的氨排放贡献源之一^[11]。研究表明,规模化生猪养殖过程中产生的氨主要来源于尿液中尿素的水解或粪便中有机物氮的分解^[12],养殖棚舍、堆粪棚和污水贮存是规模化猪场氨排放的三大主要环节。

国外对规模化猪场氨排放研究相对较早。Kavolelis等^[13]建立了在自然通风系统下由热浮力和通风引起的通风量的计算模型;Manap等^[14]采用开放式差分光谱吸收光谱(DOAS)系统设备对农业氨气排放的监测;Hutchings等^[15]深入分析了环境因素,特别是气象因素诸如空气温度、相对湿度、风速和通风率等对规模化养猪场氨排放的影响。相对而言,国内对于规模化猪场氨排放的研究仍较少,汪开英等^[16]监测分析了3种不同类型的猪场栏舍结构对栏舍氨排放的影响,发现地面结构类型对猪舍 NH_3 排放影响显著,半缝隙地面和实心地面常规养殖方式下的猪舍 NH_3 排放量相对生物发酵床猪舍较高。代小蓉等^[17]通过实测研究建立了自然通风系统下的棚舍养殖氨排放通风模型。王文林等^[18]探讨了规模化猪场各生长阶段育肥猪的棚舍氨排放特征,其中分娩猪的氨排放最大,达到了 $13.86 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{头}^{-1}$,是肥猪的1.87倍。陈园^[19]对开放性栏舍不同季节氨排放进行了估算,发现秋季和夏季的氨排放通量最高,达到了春冬季的2倍左右。但总体而言,国内目前针对规模化猪场氨排放特征的研究仍较少,上述的研究大多只针对某一个排放环节并且监测时间较短,一般为3d,缺乏对不同排放环节、不同季节系统性的研究,而采用的监测技术和手段较为落后,大多为手工采样实验室分析和便携式氨气检测仪,连续监测时间短,较难准确获取污染特征。

本研究通过高分辨率在线监测设备对典型规模化猪场的主要排放环节开展夏秋两个典型季节的氨排放浓度监测,计算获取肉猪养殖棚舍和堆粪棚的氨排放通量水平,并对氨排放浓度和排放通量的主要影响因素进行分析,研究结果可丰富典型行业大气氨排放本地化排放因子数据库,同时也为改善上海及长三

角区域空气质量提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点位

本实验研究对象为沁依牧业猪场,位于上海市金山区,占地面积为 4.8 hm^2 ,建筑面积 0.82 hm^2 ,具有自动化喂料系统和半自动化采暖系统。通风系统为机械通风和自然通风,夏季猪舍24h均为机械通风,秋季机械通风与自然通风相结合,机械通风时间为9:00—15:00,共7h,自然通风时间为17h,夏季的通风量接近秋季的3倍左右。试验选取的肉猪养殖棚舍为半封闭式栏舍,面积为 1380 m^2 ,共400头肉猪,肉猪养殖周期约为165d,质量在90~120kg之间,平均质量为110kg,每日饲料喂量为 $1.8 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1}$ 。养殖棚舍的栅栏类型为半水泥半截栏,舍内共3个排风扇,排风扇内径为1.37m,夏季与秋季通风速率均为 $51\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。试验选取的堆粪棚面积为 2352 m^2 ,开放式建筑风格,全年自然通风。

1.2 试验材料

本研究利用德尔格HC—68 09 645型在线氨气监测系统对棚舍养殖、粪便堆肥的氨排放水平进行监测,其原理为电化学传感器感应,量程为0~100.0ppm,精度为0.1ppm,数据分辨率最高可达每5s一个数据;本试验设置每5min输出一组数据的分辨率,排除因停电、仪器故障、维护校准和个别极端雷暴天气造成的异常数据后,共获取有效样本数13 824个,异常数据1125个,合格率达到91.86%。肉猪棚舍中传感器设置于棚舍中央离地面2m处,堆粪棚中传感器设置于离地面1.5m处,同时通过数采系统将数据采集储存在工控机上。研究期间,对夏季、秋季典型天气棚舍养殖、粪便堆肥氨排放浓度进行两周左右的连续监测。

同时,利用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀硫酸为吸收液,在相同点位、背景区域采集 NH_3 气体,采样流量为 $1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,采样与样品分析遵循《纳氏试剂分光光度法》HJ 533—2009的要求。采样监测周期为3d,用以开展手工采样与在线监测对比分析。结果表明,在线监测与手工监测相关性较好(图1), R^2 达到了0.972 8,均方误差为0.057 3,最大绝对误差为0.372 0,最小绝对误差为0.004 6,拟合公式为 $Y=0.989\,9x$,Y为在线监测值,x为手工监测值,表明在线监测数据准确可靠。

此外,通过拓普瑞气象仪获取试验期间的温度、湿度、气压、风速、风向等主要气象数据,并通过全球

天气精确预报网(www.wunderground.com)获得环境气象数据。监测期间的相关数据如表1所示,夏秋两季平均温度分别为27.8、24.9℃。夏季室外温度在27.67~32.49℃之间,秋季室外温度在22.82~28.79℃之间,夏秋两季的养殖棚舍和堆粪棚的温度均高于背景点温度,这可能是由于棚舍猪活动强度贡献,以及堆粪棚内粪便堆肥发酵导致。夏季养殖棚舍的湿度高于背景点,这主要是由于机械通风模式下肉猪养殖棚舍内湿帘的增湿作用,而秋季室外多雨,导致室外的湿度略高于室内。堆粪棚四周通风,所以湿度与背景点相差不大。

1.3 数据处理

1.3.1 肉猪养殖棚舍自然通风模式下通风量计算方法

本研究所在的猪舍为密闭式机械通风猪舍,因此,在自然通风状况下,参照Kavolelis等^[13]的研究,取得了相应的自然通风通风量,即:

$$0.38C_{d(i)} = \frac{\sqrt{H\Delta t + 14v_i^2}}{v_i}$$

式中: $C_{d(i)}$ 为猪舍通风口排放系数; H 为进、排风口高度差,m; Δt 为猪舍内外温度差,℃; v_i 为猪舍外风速,

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

$$G_i = C_{d(i)} A \rho_{0(i)} \sqrt{\frac{gH\Delta t}{T_{0(i)}} + v_i^2 \frac{k_1 - k_2}{2}}$$

式中: G_i 为猪舍每小时通风速率 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $C_{d(i)}$ 为猪舍通风口排放系数; A 为猪舍通风口面积, m^2 ; $\rho_{0(i)}$ 为猪舍内空气密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; H 为进、排风口高度差,m; Δt 为猪舍内外温度差,℃; $T_{0(i)}$ 为猪舍内热力学温度,K; v_i 为猪舍外风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; k_1, k_2 为猪舍内外的风压系数。

1.3.2 肉猪养殖棚舍自然通风模式下氨排放通量计算方法

自然通风下的氨排放通量计算同样参照Kavolelis等^[13]的研究,即:

$$A = \frac{\sum_{i=0}^{23} G_i c_i}{3600 \cdot 1000n}$$

式中: A 为氨排放通量, $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$; G_i 为猪舍每小时通风速率, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; c_i 为猪舍内氨体积浓度,%; n 为猪舍内猪的数量,头。

秋季0:00至9:00与16:00至24:00采用自然通风氨排放通量计算方法计算。

1.3.3 机械通风模式下氨排放通量计算方法

$$A_i = \frac{\sum_{i=0}^{23} V_i \Delta \rho_i}{1000 \cdot n}$$

式中: A_i 为氨排放通量, $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$; V_i 为通风量, $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; $\Delta \rho_i$ 为舍内氨气每小时平均质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; n 为猪舍内猪的数量,头。

夏季与秋季9:00至15:00采用机械通风氨排放通量计算方法计算。

1.3.4 堆粪棚氨排放通量计算方法

$$F = \frac{\sum_{i=0}^{23} (\rho_i - \rho_b) \cdot 3600 \cdot u}{1000 \cdot n}$$

式中: F 为氨排放通量, $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$; n 为猪产生单位面积粪便的数量, $\text{头}\cdot\text{m}^{-2}$; u 为风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; ρ_i 为1.5 m处堆粪棚的每小时氨浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_b 为1.5 m处的背景

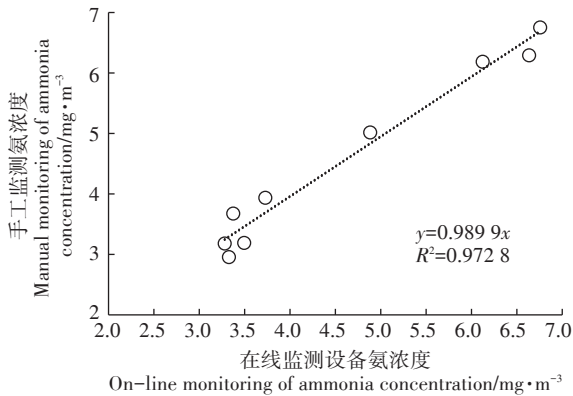


图1 手工监测与在线监测氨浓度相关性分析

Figure 1 Correlation analysis between manual monitoring and on-line monitoring of ammonia concentration

表1 监测点位风向,平均风速、温度和湿度

Table 1 Monitor point wind direction, average wind speed, temperature and humidity

监测点 Monitoring point	季节 Season	监测日期 Monitoring date	通风模式 Ventilation mode	室外风速 Outdoor wind speed/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	风向 Wind direction/(°)	温度 Temperature/℃	湿度 Humidity/%
背景 Background	夏季	07.11—07.24	—	1.24	132.2	27.8	76.8
	秋季	09.07—09.23	—	0.84	151.1	24.9	84.0
肉猪养殖棚舍 Piggery	夏季	07.11—07.24	机械通风	1.28	132.3	29.3	77.0
	秋季	09.07—09.20	半机械半自然通风	0.84	140.5	25.9	83.2
堆粪棚 Manure shed	夏季	07.11—07.20	自然通风	1.30	129.4	29.5	74.5
	秋季	09.14—09.23	自然通风	0.78	139.9	26.9	85.6

氨浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2 结果与讨论

2.1 主要环节氨排放浓度特征

夏秋两季肉猪养殖棚舍内氨浓度日均变化如图2所示。肉猪养殖棚舍夏季氨浓度均值为 $3.31 \pm 0.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值达到了 $3.90 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 出现在7月11日, 最小值则为 $2.69 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 出现在7月22日, 最大值为最小值的1.45倍。总体而言, 夏季氨日均浓度水平比较稳定, 呈现先下降后上升再下降的趋势。这主要是由于夏季棚舍采用机械通风方式换气, 较大的通风量带走了棚舍内大量的污染物, 使得浓度水平较低。7月22日出现了较强的降雨天气, 导致该日的温度较低并且湿度较大, 较低的温度导致棚舍内的氨挥发强度相对较低, 而湿度较高也利于氨气溶解于空气中的水分, 降低了氨浓度水平。

肉猪养殖棚舍秋季氨浓度均值为 $4.91 \pm 0.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值达到了 $5.66 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 出现在9月14日, 最小值则为 $3.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 出现在9月20日, 最大值为最小值的1.55倍。总体而言, 监测期间秋季氨平均浓度水平显著高于夏季, 达到了后者的1.5倍左右。秋季平均温度略低于夏季, 肉猪养殖棚舍的通风模式为半机械通风半自然通风, 换气量远低于夏季, 较低的换气量使得棚舍内的污染物不能迅速排出而在棚舍内积聚, 因而氨浓度水平远高于夏季。秋季肉猪养殖棚舍的氨浓度在9月14日开始逐渐下降, 这可能是因为9月14日开始, 受季风气候影响, 温度开始逐渐下降并且时常伴有小雨, 较低的温度和较高的湿度在一定程度上降低了氨的排放和扩散。

将研究期间各日小时浓度值平均处理, 得到了肉猪养殖棚舍空气中的氨浓度典型日小时变化趋势, 如

图3所示。夏季浓度水平波动范围为 $2.9 \sim 3.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 秋季浓度水平波动范围为 $3.8 \sim 5.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。夏秋两季氨浓度日小时变化呈现不同的趋势, 夏季总体趋势为先上升后下降, 而秋季趋势为先下降后上升。通常而言, 肉猪从早上6:00开始活动, 8:00以后肉猪开始进食排泄, 导致氨浓度迅速上升, 而夏季12:00到15:00是一天中温度最高的时间段, 即使在机械通风的模式下, 较高的温度也利于氨的排放, 氨浓度水平上升并维持在较高的水平, 17:00后温度开始下降, 猪的活动开始减弱, 因而舍内的氨浓度水平明显下降, 之后维持在相对较低的水平。

秋季的温度相对于夏季较低, 猪舍内的通风模式为半机械通风半自然通风, 机械风机仅在9:00到15:00开放, 通风量仅为夏季的1/3左右。与夏季类似, 肉猪在6:00开始活动后, 肉猪养殖棚舍内的氨浓度水平开始上升, 并在9:00时达到最高值, 然后在9:00机械风机打开后, 随着通风量的迅速增加带走了大量的污染物, 氨浓度水平急剧下降, 而在15:00机械风机关闭后, 氨浓度水平重新上升并在17:00达到高值。

由此可见, 通风量是影响养殖棚舍氨排放水平的最主要因素, 在自然通风下, 较低的通风量导致氨积聚在棚舍内部难以扩散, 导致较高的浓度水平, 而机械通风下较高的通风量可将大量污染物带出棚舍外。此外, 在通风模式不变的情况下, 温度和猪的活动强度也是影响氨浓度水平的重要因素。

夏秋两季堆粪棚中氨浓度日均变化如图4所示。夏季堆粪棚氨浓度均值为 $6.26 \pm 1.57 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值达到了 $8.84 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 出现在7月15日, 最小值则为 $3.74 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 出现在7月11日, 最大值为最小值的2.36倍。秋季堆粪棚氨浓度均值为 $3.19 \pm 0.61 \text{ mg} \cdot$

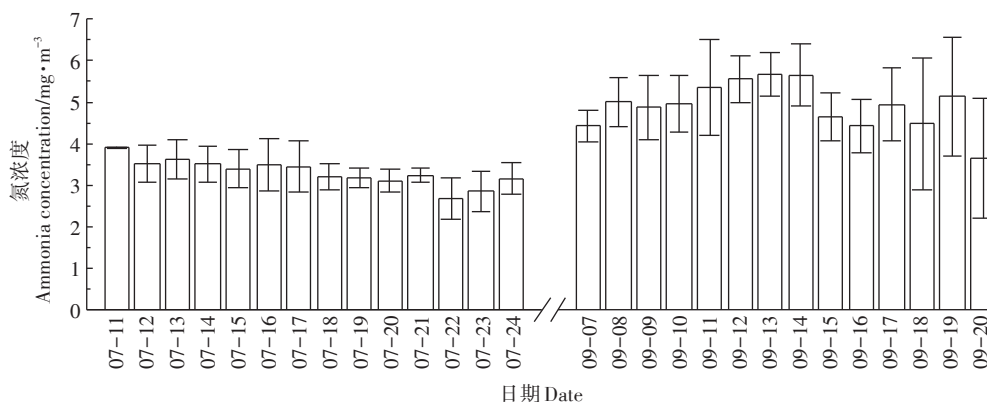


图2 夏秋两季肉猪养殖棚舍内空气中浓度日均变化

Figure 2 Daily average change of air concentration in piggyery in summer and autumn

m^{-3} ,最大值达到了 $4.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,出现在9月15日,最小值则为 $2.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,出现在9月23日,最大值为最小值的1.83倍。夏季氨的日均浓度水平较高并且起伏较大,呈现为先下降后上升再下降的趋势。秋季氨的日均浓度变化趋势较为稳定,总体呈下降趋势。夏季与秋季堆粪棚均为自然通风模式,堆粪棚内氨浓度水平变化与气象条件密切相关。夏季最大值出现在7月15日,当日的温度最高,湿度最低,空气中的水分少,气象条件均利于氨的排放和挥发,因此其浓度水平达到了最大值,相似的,秋季的最大值出现在9月15日,当日温度较高,相对湿度与风速较低,均利于氨的排放和累积。而秋季最小值出现在9月23日,当日平均的风速达到监测期间最大值,较大的通气量带走了大量的 NH_3 ,同时,前一日发生降雨,使得当日的温度也较低,因而粪便中的脲酶活性也随之降低,致使堆粪棚内的氨浓度水平低。

将研究期间各日小时浓度值平均处理,得到了堆粪棚空气中的氨浓度典型日小时变化趋势,如图5所

示。夏季浓度水平变化范围为 $3.96 \sim 9.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,最高值出现在13:00,最低值出现在3:00;秋季浓度水平变化范围为 $2.48 \sim 3.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,最高值出现在10:00,最低值出现在7:00。夏秋两季氨浓度变化呈现出完全不同的趋势,夏季变化幅度较大,表现为先上升后下降,秋季的变化较为平缓,表现为先下降后上升再下降。堆粪棚长期处于自然通风的状态,堆粪棚内氨浓度水平主要取决于气象因素与粪便管理。堆粪棚内氨浓度从8:00开始呈明显的上升趋势,并在13:00时达到最大值,这和日内温度变化趋势以及大气对流强度有着密切的关系,12:00到14:00为夏季一日之中温度最高的时间段,氨的排放强度也相对较高,浓度水平也达到高峰值;3:00到4:00为一日之中温度较低的时间段, NH_3 的排放强度也相对较低。秋季堆粪棚的氨浓度变化较为稳定,变化起伏较小。上海市气候为明显的亚热带季风气候,秋季的温度昼夜温差相差不大,4:00到7:00也是一日之中温度较低的时间段,堆粪棚内的氨浓度水平也相对较低,上午9:00

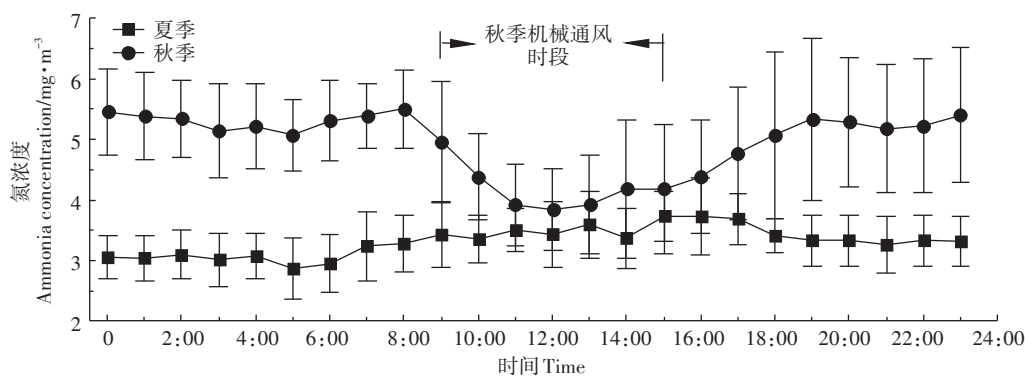


图3 肉猪养殖棚舍内夏秋两季每小时氨排放浓度日变化过程

Figure 3 Diurnal variation of ammonia emission concentration per hour in summer and autumn in the piggery

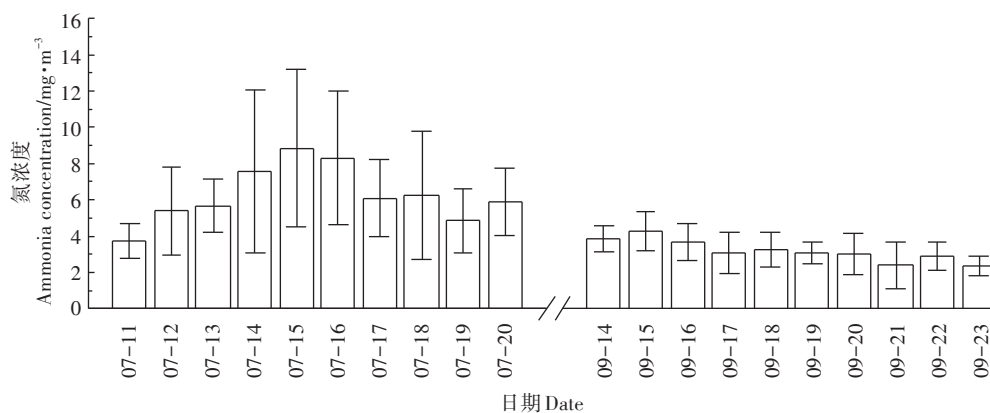


图4 夏秋两季堆粪棚中氨浓度日均变化

Figure 4 Daily average change of ammonia concentration in the manure shed in summer and autumn

温度上升之后,氨浓度也随之上升。但总体而言,昼夜温差较小使得秋季氨浓度水平相对夏季而言处在一个相对较低的水平。

2.2 氨排放通量分析

肉猪养殖棚舍夏秋两季日均氨排放通量变化过程如图6所示。夏季肉猪养殖棚舍的氨排放通量变化范围为8.24~11.92 g·d⁻¹·头⁻¹,平均通量为10.12±0.96 g·d⁻¹·头⁻¹。秋季肉猪养殖棚舍的氨排放通量变化范围为4.26~10.18 g·d⁻¹·头⁻¹,平均通量为7.49±1.58 g·d⁻¹·头⁻¹。夏季平均氨排放通量是秋季的1.42倍。夏季的氨排放通量变化趋势相对于秋季较为稳定,这可能是夏季的温度较高,湿度较低并且夏季持续24 h机械通风,较高的温度使脲酶的活性提高,猪

尿液中的尿素与粪便的有机氮更容易分解产生氨,而极大的通风量有利于氨的扩散,致使氨排放通量较高。秋季温度较低,湿度较大,机械通风时间仅为7 h,时间大大缩短,通风量仅为夏季的1/3左右,较低的通风量使猪舍的空气流通较差,舍内氨的浓度水平虽然高于夏季,但是较低的通风量导致排放通量显著较低。

堆粪棚夏秋两季氨排放通量日变化过程如图7所示,夏季的日氨排放通量变化范围为2.08~4.07 g·d⁻¹·头⁻¹,平均水平为2.99±0.69 g·d⁻¹·头⁻¹。秋季日氨排放通量变化范围为0.58~1.50 g·d⁻¹·头⁻¹,平均水平为0.89±0.31 g·d⁻¹·头⁻¹,夏季氨排放通量是秋季的3.35倍。堆粪棚夏秋两季均是自然通风的模式,日氨排放通量受气象因素的影响更大,夏季的温度显著高

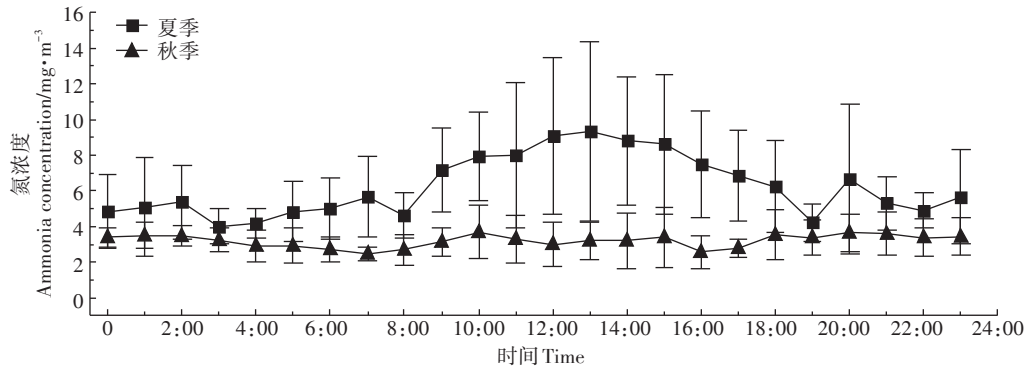


图5 堆粪棚内夏秋两季每小时氨排放浓度日变化过程

Figure 5 Diurnal variation of ammonia emission concentration per hour in summer and autumn in the manure shed

表2 氨小时排放通量与温度响应关系

Table 2 Response of hourly ammonia emission flux to temperature

排放环节 Emission link	季节 Season	通风模式 Ventilation mode	响应关系 Regression equation	R ² 值 R-squared
肉猪养殖棚舍	夏季	机械通风	$Y=0.135\ 3+0.009\ 7x_1$	0.156\ 4
	秋季	半机械半自然通风	$Y=0.042\ 2+0.006\ 1x_1$	0.032\ 0
堆粪棚	夏季	自然通风	$Y=0.019\ 4+0.448\ 3x_1$	0.415\ 5
	秋季	自然通风	$Y=-0.024+0.002\ 4x_1$	0.138\ 8

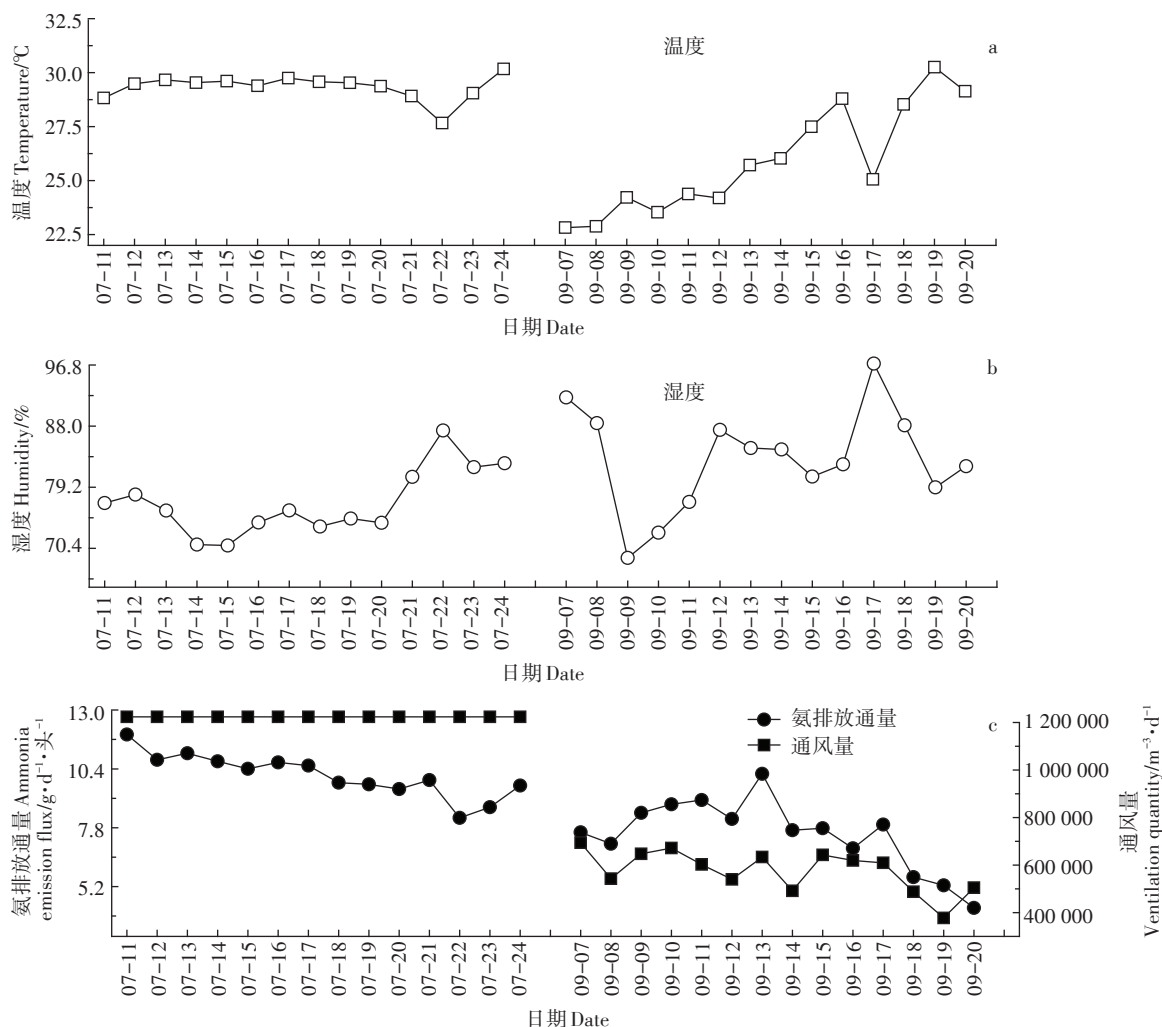
注: x_1 为温度,℃; Y 为氨排放通量, g·h⁻¹·头⁻¹。
Note: x_1 is temperature,℃; Y is ammonia emission rate, g·h⁻¹·head⁻¹.

表3 氨小时排放通量与湿度响应关系

Table 3 Response of hourly ammonia emission flux to humidity

排放环节 Emission link	季节 Season	通风模式 Ventilation mode	响应关系 Regression equation	R ² 值 R-squared
肉猪养殖棚舍	夏季	机械通风	$Y=0.804\ 0-0.006\ 7x_2$	0.207\ 7
	秋季	半机械半自然通风	$Y=0.711\ 4-0.005\ 9x_2$	0.352\ 1
堆粪棚	夏季	自然通风	$Y=0.467\ 1-0.004\ 6x_2$	0.415\ 6
	秋季	自然通风	$Y=0.103\ 3-0.000\ 8x_2$	0.217\ 0

注: x_2 为湿度,%; Y 为氨排放通量, g·h⁻¹·头⁻¹。
Note: x_2 is humidity,%; Y is ammonia emission rate, g·h⁻¹·head⁻¹.



图a为试验期间的温度变化;图b为试验期间的湿度变化;图c为试验期间的氨排放通量与通风量变化
Fig a is the temperature change during the study period; Fig b is the humidity change during the study period;
Fig c is the ammonia emission flux and ventilation change during the study period

图6 肉猪养殖棚舍夏秋两季氨排放通量日排放变化过程

Figure 6 Daily discharge of ammonia emission flux in piggery in summer and autumn

于秋季,利于粪便堆肥发酵排放大量的 NH_3 。

2.3 氨排放通量影响因素分析

为了解氨排放通量的主要因素,将小时氨排放通量水平与温度、湿度进行相关性分析,结果如表2和表3所示。对肉猪养殖棚舍氨排放通量与温度、湿度进行显著性分析及线性回归分析,夏季排放通量与温度呈显著正相关($P<0.05$), R^2 达到0.156 4,与湿度则呈显著负相关($P<0.05$), R^2 达到0.207 7。夏季为24 h机械通风模式,通风量大,导致舍内温度、湿度基本恒定,对氨排放的影响较小,因此影响肉猪养殖棚舍氨排放通量的主导因素是通风量。秋季则有所不同,氨排放通量与温度呈显著正相关($P<0.05$), R^2 为0.032 0,与湿度则呈显著负相关($P<0.05$), R^2 达到0.352 1,秋

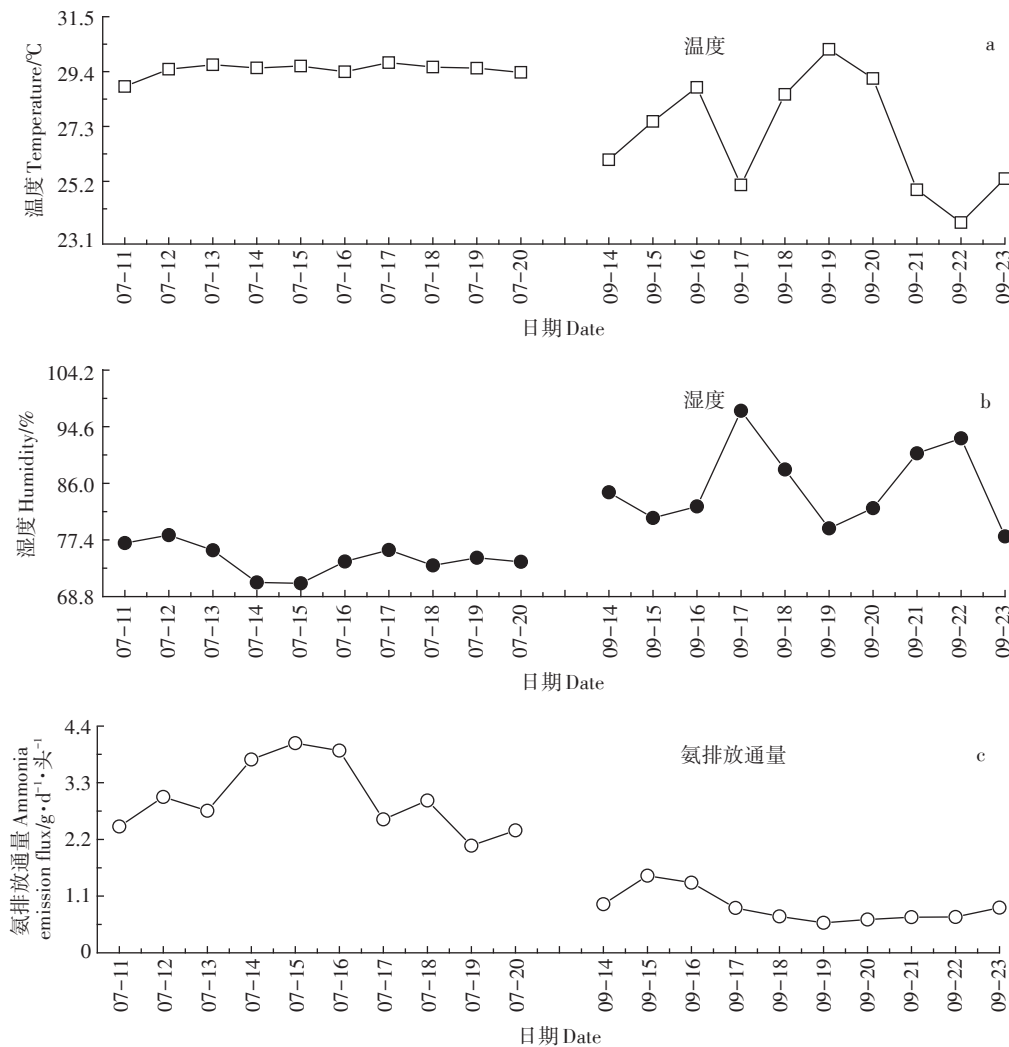
季为半机械通风半自然通风模式,通风量较夏季显著降低,对氨排放通量的影响减弱,温度与湿度对氨排放通量的影响显著增加,因此相关性也相对较好。粪便的理化性质是影响氨排放的重要因素,如粪便的含水率较低情况下氨排放量则会减少^[20],粪便的pH值通过影响脲酶活性影响其对粪便和尿液的分解^[21]等。脲酶活性随温度的增加而升高,使尿液中的尿素快速分解^[22],同时氨是易溶于水的气体,这也表明除温度外,舍内的湿度也是影响氨排放的重要因素^[23]。

对堆粪棚氨排放通量与温度、湿度进行显著性分析及线性回归分析,夏季排放通量与温度呈显著正相关($P<0.05$), R^2 达到0.415 5,与湿度则呈显著负相关($P<0.05$), R^2 达到0.415 6。秋季排放通量与温度呈显

著正相关($P<0.05$), R^2 达到0.138 8,与湿度则呈显著负相关($P<0.05$), R^2 达到0.217 0。夏秋两季小时氨排放通量与温度和湿度线性拟合程度均较好,即一定温湿度范围内,堆粪棚氨排放通量与温、湿度响应关系显著,这说明温度和湿度是影响堆粪棚氨排放的重要因素,在温度高的夏季氨排放通量高于秋季。这主要由于较高的温度能提高微生物的活性,分泌更多的酶来促进粪便中的未被分解氨基酸分解释放出氨^[24]。堆粪棚为开放式的建筑风格,与大气交换频繁,气象因素在一定程度影响着氨排放,湿度较高的气象条件下,氨溶于空气中的水分,使氨排放减少^[25]。

对近年来国内外相关研究进行整理,获取规模化猪场典型环节氨排放通量水平,如表4所示。研究表

明,肉猪养殖棚舍氨排放通量大致在 $7.07\sim 11.89\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,堆粪棚氨排放通量大致在 $0.89\sim 3.84\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,夏季总体高于秋季,表明温度对氨排放通量有重要影响。本研究夏季肉猪养殖棚舍氨排放通量为 $10.12\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,略高于王文林等^[18]的 $8.20\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,低于Ni等^[26]的 $11.89\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,这可能是因为王文林等的研究时段温度较低,湿度也有所不同,导致氨排放通量较低;Ni等的研究中肉猪养殖棚舍的地板为基于稻草的深层垫料,而本研究为全混凝土的样条地板,前者更利于氨的排放挥发,从而氨排放通量也相对较高。本研究秋季肉猪养殖棚舍氨排放通量略低于Philippe等^[27]与Kim等^[28]的结果,Philippe等研究的肉猪品种与本研究肉猪的品种有较大差别,



图a为试验期间的温度变化;图b为试验期间的湿度变化;图c为试验期间的氨排放通量变化
Fig a is the temperature change during the study period; Fig b is the humidity change during the study period;
Fig c is the ammonia emission flux change during the study period

图7 堆粪棚夏秋两季氨排放通量日排放变化过程

Figure 7 Diurnal variation of ammonia emission flux from dung shed in summer and autumn

表4 国内外研究对比

Table 4 Comparison of domestic and foreign research

排放环节 Emission link	季节 Season	通风方式 Ventilation mode	室内温度 Indoor temperature/℃	室外温度 Outdoor temperature/℃	氨排放通量 Ammonia Emission Flux/g·d ⁻¹ ·头 ⁻¹	参考文献 References
肉猪养殖棚舍	夏季	机械通风	29.3	27.8	10.12	本研究
	夏季	机械通风	28	25	11.89	[26]
	夏季	机械通风	27.4	25.1	8.20	[18]
	秋季	半机械半自然通风	25.9	24.9	7.07	本研究
	秋季	自然通风	21.2	19.2	8.52	[27]
	秋季	自然通风	18.4	17.0	7.3	[28]
堆粪棚	夏季	自然通风	29.5	—	2.99	本研究
	夏季	—	31.3	—	3.84	[29]
	秋季	自然通风	26.9	—	0.89	本研究
	秋季	自然通风	21	—	1.05	[19]

并且国外的饲料品种含氮量高于本研究的饲料,有利于氨的排放,导致其氨排放通量略高于本研究;Kim等所研究的地域为韩国,韩国的气候与我国北方相似,为温带季风气候,其地域秋季均较为干燥,相对湿度显著低于本研究,也利于氨的排放。本研究夏季堆粪棚的氨排放通量低于代小蓉等^[29]的研究结果,代小蓉等所研究的堆粪棚非自然通风模式,相对处于密闭空间,密闭空间的温度也较高,粪便也常处于搅拌状态,氨排放通量也相对较大。本研究秋季堆粪棚略低于陈园^[19]的研究,陈园所研究的堆粪棚的面积较小,所用的监测与计算方法和本研究不同,这可能是导致其结果高于本研究的重要原因。

3 结论

(1)肉猪养殖棚舍夏秋两季平均氨浓度分别为 $3.31\pm 0.31\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $4.91\pm 0.56\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,两者水平差异显著。夏季为24 h全时段机械通风,通风量达到秋季的3倍左右,表明通风量是影响养殖棚舍氨浓度水平的重要因素。堆粪棚夏秋两季平均氨浓度分别为 $6.26\pm 1.57\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3.19\pm 0.61\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,气象因素特别是温度是影响堆粪棚氨浓度水平的重要因素。

(2)肉猪棚舍夏秋两季氨浓度日小时范围分别为 $2.9\sim 3.7\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3.8\sim 5.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,变化趋势存在显著差异。夏季氨浓度总体趋势为先上升后下降,主要受温度、畜禽活动强度的影响;秋季氨浓度趋势为先下降后上升,主要受9:00—15:00机械通风运行模式的影响。

(3)肉猪养殖棚舍夏秋两季的氨排放通量分别为 $10.12\pm 0.96\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$ 和 $7.07\pm 1.58\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,肉猪

养殖棚舍夏季氨排放通量为秋季的1.42倍;堆粪棚夏秋两季氨排放通量分别为 $2.99\pm 0.69\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$ 和 $0.89\pm 0.31\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{头}^{-1}$,堆粪棚夏季氨排放通量是秋季的3.36倍。

(4)相关性分析表明,夏季为24 h机械通风模式,通风量大,导致舍内温度、湿度基本恒定,对氨排放的影响较小,因此影响肉猪养殖棚舍氨排放通量的主导因素是通风量;秋季为半机械通风半自然通风模式,通风量较夏季显著降低,温度与湿度对氨排放通量的影响显著,是该季节影响氨排放的重要因素。

参考文献:

- [1] Langridge J M, Lack D A, Brock C A, et al. Evolution of aerosol properties impacting visibility and direct climate forcing in an ammonia-rich urban environment[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D21).
- [2] Quan J, Zhang X. Assessing the role of ammonia in sulfur transformation and deposition in China[J]. *Atmospheric Research*, 2008, 88(1): 78-88.
- [3] Uvarova N E, Kuzovkin V V, Paramonov S G, et al. The improvement of greenhouse gas inventory as a tool for reduction emission uncertainties for operations with oil in the Russian Federation[J]. *Climatic Change*, 2014, 124(3): 535-544.
- [4] Behera S N, Sharma M. Transformation of atmospheric ammonia and acid gases into components of PM_{2.5}: An environmental chamber study [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2012, 19(4): 1187-1197.
- [5] Renner E, Wolke R. Modeling the formation and atmospheric transport of secondary inorganic aerosols with special attention to regions with high ammonia emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(15): 1904-1912.
- [6] Sharma M, Kishore S, Tripathi S N, et al. Role of atmospheric ammonia

- in the formation of inorganic secondary particulate matter: A study at Kanpur, India[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2007, 58(1):1-17.
- [7] Ye X, Ma Z, Zhang J, et al. Important role of ammonia on haze formation in Shanghai[J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(2):024019.
- [8] Steinfeld J. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change[J]. *Environment Science & Policy for Sustainable Development*, 1998, 40(7):26-29.
- [9] 吴 琼, 赵学涛. 畜禽养殖氨排放核算方法和模型比较[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(4):300-307.
- WU Qiong, ZHAO Xue-tao. Study on accounting method and model of ammonia emissions from livestock and poultry breeding[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(4):300-307.
- [10] 王阿婧, 张 双, 瞿艳芝, 等. 氨排放清单编制的初步研究[J]. 湖北农业科学, 2016(2):345-348.
- WANG A-jing, ZHANG Shuang, QU Yan-zhi, et al. A preliminary study on compiling the ammonia emission inventory[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016(2):345-348.
- [11] 刘 波, 童 仪, 李 安, 等. 长江三角洲地区畜禽养殖业氨排放清单研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11):1042-1049.
- LIU Bo, TONG Yi, LI An, et al. Study on ammonia emission inventory of livestock over Yangtze River Delta[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(11):1042-1049.
- [12] 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.
- [13] Kavolelis B, Bleizgys R, Cesna J. Natural ventilation of animal sheds due to thermal buoyancy and wind[J]. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2008, 16(4):188-194.
- [14] Manap H, Najib M S. A DOAS system for monitoring of ammonia emission in the agricultural sector[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2014, 205:411-415.
- [15] Hutchings N J, Sommer S G, Andersen J M, et al. A detailed ammonia emission inventory for Denmark[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(11):1959-1968.
- [16] 汪开英, 代小蓉, 李震宇, 等. 不同地面结构的育肥猪舍NH₃排放系数[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):163-166.
- WANG Kai-ying, DAI Xiao-rong, LI Zhen-yu, et al. NH₃ emission factors of fattening pig buildings with different floor systems[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1):163-166.
- [17] 代小蓉, NI Ji-qin, 潘乔纳, 等. 华东地区典型保育猪舍温湿度和空气质量监测[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7):315-322.
- DAI Xiao-rong, NI Ji-qin, PAN Qiao-na, et al. Monitoring of temperature, humidity and air quality inside pig weaner house in Eastern China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7):315-322.
- [18] 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):222-229.
- 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):222-229.
- [19] 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.
- 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.
- [20] Elliott H A, Collins N E. Chemical methods for controlling ammonia release from poultry litter[J]. *American Society of Agricultural Engineers*, 1983:16-24.
- [21] Braam C R, Smits M C J, Gunnink H, et al. Ammonia emission from a double-sloped solid floor in a cubicle house for dairy cows[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1997, 68(4):375-386.
- [22] Sommer S G, Zhang G Q, Bannink A, et al. Algorithms determining ammonia emission from buildings housing cattle and pigs and from manure stores[J]. *Advances in Agronomy*, 2006, 89(5):261-335.
- [23] Janczak D, Malińska, Krystyna, Czeka A W, et al. Biochar to reduce ammonia emissions in gaseous and liquid phase during composting of poultry manure with wheat straw[J]. *Waste Management*, 2017: S0956053X17302891.
- [24] Effenberger M, Bachmaier J, Garcés G, et al. Mesophilic-thermophilic-mesophilic anaerobic digestion of liquid dairy cattle manure[J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2006, 53(8):253.
- [25] Dhyani V, Kumar Awasthi M, Wang Q, et al. Effect of composting on the thermal decomposition behavior and kinetic parameters of pig manure-derived solid waste[J]. *Bioresource Technology*, 2017: S0960852417322289.
- [26] Ni J Q, Heber A J, Diehl C A, et al. SE-Structures and environment: Ammonia, hydrogen sulphide and carbon dioxide release from pig manure in under-floor deep pits[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 77(1):53-66.
- [27] Philippe F X, 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(1/2):144-152.
- [28] Kim K Y, Ko H J, Kim H T, et al. Quantification of ammonia and hydrogen sulfide emitted from pig buildings in Korea[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(2):195-202.
- [29] 代小蓉. 集约化猪场NH₃的排放系数研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- DAI Xiao-rong. Study on ammonia emission factors in concentrate pig farm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.