

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.

不同养殖阶段猪舍氨气和颗粒物污染特征及其动态

许 稳, 刘学军*, 孟令敏, 郑 鲲

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:为了揭示不同养殖阶段猪舍氨气和颗粒物污染特征和时间(日和季节)变化规律,对北京郊区一集约化猪场室内妊娠舍、哺乳舍、保育舍和育肥舍等4种不同养殖阶段猪舍内氨气(NH_3)和颗粒物[TSP(总悬浮颗粒物,空气动力学当量直径 $d \leq 100 \mu\text{m}$)、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$]的浓度进行了连续测定。离线和实时的 NH_3 采集分别采用ALPHA被动采样器和气体检测管;颗粒物采集采用中流量颗粒物采样器。结果表明,育肥舍、妊娠舍、哺乳舍和保育舍的月均 NH_3 浓度平均分别为 (3.26 ± 1.49) 、 (3.48 ± 2.20) 、 (2.95 ± 1.13) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 (2.94 ± 1.48) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,并呈现冬季>秋季>夏季的季节变化趋势;育肥舍、妊娠舍和保育舍实时 NH_3 浓度的波动范围分别为3.43~6.73、0.82~4.51 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和0.99~3.14 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其在一定程度上受舍内粪粪影响。舍内TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度平均值在保育舍分别为 (0.99 ± 0.32) 、 (0.18 ± 0.04) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 (0.07 ± 0.03) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,而育肥舍则分别为 (2.39 ± 0.39) 、 (0.88 ± 0.17) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 (0.40 ± 0.17) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。进一步分析发现,猪舍内颗粒物以10~100 μm 为主,在保育舍和育肥舍中分别占TSP质量浓度的82%和63%。本研究结果表明当前舍内 NH_3 和颗粒物污染具有潜在健康风险,需采取相关的舍内空气污染减缓措施加以控制。

关键词:空气污染物;环境浓度;污染特征;养殖业;猪舍

中图分类号:X51 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)06-1248-07 doi:10.11654/jaes.2017-1440

Dynamics and pollution features of ammonia and particulate matter during different pig breeding stages

XU Wen, LIU Xue-jun*, MENG Ling-min, ZHENG Kun

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To reveal the pollution characteristics and temporal (i.e., diurnal and seasonal) variations of ammonia and particulate matter in different breeding stages of pigs, the indoor concentrations of NH_3 and particulate matter [PM: including total suspended particulate matter (TSP, aerodynamic diameter $\leq 100 \mu\text{m}$), PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$] for four types of pig houses (i.e., fattening, gestation, farrowing, and weaning pig houses) at an intensive farm in the suburbs of Beijing were investigated in this study. Gaseous NH_3 was sampled using passive samplers and detector tubes, and aerial PM was collected using middle-flow particle samplers. Monthly mean NH_3 concentrations in the fattening, gestation, farrowing, and weaning pig houses averaged (3.26 ± 1.49) , (3.48 ± 2.20) , (2.95 ± 1.13) , and (2.94 ± 1.48) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, and exhibited pronounced seasonal variations, ranking in the order: winter > autumn > summer. Real-time NH_3 concentrations in the fattening, weaning, and gestation pig houses were in the ranges of 3.43~7.99, 0.82~4.51, and 0.99~3.14 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, which to some extent is affected by manure removal. Daily mean concentrations of TSP, PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ averaged (0.99 ± 0.32) , (0.18 ± 0.04) , and (0.07 ± 0.03) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in the weaning pig houses, respectively, whereas they amounted to (2.39 ± 0.39) , (0.88 ± 0.17) , and (0.40 ± 0.17) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in the fattening pig houses. Further analysis of the concentrations showed that PM with a diameter of 10~100 μm dominated the indoor particle pollution, accounting for 82% and 63% of TSP mass concentrations in the weaning and fattening pig houses, respectively. Our results suggest that the de-

收稿日期:2017-10-23 录用日期:2018-01-18

作者简介:许 稳(1988—),男,安徽安庆人,博士,助理研究员,主要研究方向为大气污染化学。E-mail:hi.xuwen@163.com

*通信作者:刘学军 E-mail:liu310@cau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41425007);国家自然科学基金青年科学基金项目(41705130);国家科技支撑计划项目(2017YFC0210106)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41425007); The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41705130); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2017YFC0210106)

ected indoor NH₃ and PM levels could pose potential health risks to pigs and humans and that relevant air pollution control strategies should be implemented to improve indoor air quality of intensive pig farms in the future.

Keywords: air pollutants; ambient concentration; pollution characteristics; breeding industry; pig house

氨气(NH₃)和颗粒物污染已成为全球畜牧业主要的环境问题之一^[1]。人和动物长期暴露在高浓度的NH₃和颗粒物环境中,容易导致呼吸道疾病的发生,如慢性咳嗽、慢性支气管炎、过敏反应和哮喘等^[2]。此外,NH₃和颗粒物均是主要的大气污染物,可引起一系列的生态环境负面效应:大量的NH₃排放到大气,会通过大气干湿沉降过程返回到地表,进而引起一系列的环境问题,如水体富营养化、土壤酸化、生物多样性减少,且影响生态系统的稳定性^[3-4];畜禽舍内颗粒物的排放不仅会恶化周边空气质量,影响周边居民身体健康,而且也会对气候产生影响^[5]。

畜禽舍内的NH₃源主要为动物粪便、尿液和剩余饲料,而舍内颗粒物主要来源于饲料、粪便、动物皮肤、体毛和羽毛,是大气颗粒物的重要贡献源^[6]。为了保护饲养员和动物的健康及减缓对环境的负面影响,世界范围内的环境科学家从畜禽舍的通风类型、地板类型、粪便管理模式、喂养模式等各方面来比较,评估不同猪舍类型和管理模式对减少舍内NH₃和颗粒物浓度及排放的效果^[7]。

预计到2020年,世界范围内对猪肉的需求量将增加75%^[8]。我国猪肉产量约占世界猪肉产量的50%^[9]。集约化养猪场猪舍内产生的NH₃和颗粒物不仅对周边环境的污染日益严重,而且威胁到人类和动物的健康。Van Ransbeeck等^[10]对漏缝地板、机械通风的育肥猪舍中的颗粒物和NH₃浓度进行了两个饲养周期、为期一年的测定,结果显示舍内PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁的年均浓度分别为0.719、0.039和0.015 mg·m⁻³,舍内NH₃的平均浓度为14.2 mg·m⁻³。我国针对养猪场NH₃和颗粒物浓度的监测研究日益增多,大部分集中于育肥期猪舍^[11-13]。朱志平等^[11]采用比色法探究了不同月份育肥舍内NH₃浓度的季节变化和日变化。刘杨^[12]利用颗粒物采样器分析了机械通风育肥舍内PM₁₀、PM_{2.5}和TSP(总悬浮颗粒物,空气动力学当量直径 $d \leq 100 \mu\text{m}$)日均浓度的季节变化规律。Huitalla等^[13]利用红外光探测器在线监测了我国不同猪舍内PM₁₀、PM_{2.5}和PM₁在夏季和冬季的实时浓度,但国内针对不同养殖阶段猪舍内NH₃和颗粒物污染信息仍不够完善,进而约束了养猪场整体空气环

境评价工作的开展。本研究监测了北京郊区一个集约化养猪场内4个养殖阶段(妊娠期、哺乳期、保育期和育肥期)猪舍内NH₃和颗粒物的浓度,初步探明不同养殖阶段NH₃和颗粒物的浓度差异、季节性变化,及不同粒径颗粒物占TSP的比例,以期为养猪场大气污染控制措施和法规的制定提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 采样猪场概况

本试验于2010—2011年在北京市顺义区赵全营镇北郎中村北郎中养猪场(116.7°E,40.1°N)进行。该养猪场面积约为10 hm²,包含东厂和西厂两个厂区,共有56栋猪舍。东厂有28栋猪舍,主要是育肥猪舍;西厂有28栋猪舍,主要是母猪舍。猪场的年存栏量约为8000头,年出栏育肥猪和种猪约为15000头。猪场内的采样点选在4个养殖阶段猪舍,包括育肥舍、妊娠舍、哺乳舍和保育舍。

1.2 猪舍类型

育肥舍长50 m、宽8 m、高2.4 m,猪舍内有两排东西走向的猪栏,中间为1 m宽的走道。每排各有栏位16个,每个栏位长3 m、宽3.5 m,栏内有与污水沟相连的2°斜坡的水泥地板。猪舍的南北墙各有14扇窗户。育肥期约为80~120 d,猪进舍体质量约为20 kg,出舍体质量约为100 kg。

妊娠舍的大小、构造和育肥舍相同。妊娠期大约为110 d,进舍体质量为120~180 kg,出舍体质量为150~200 kg。

哺乳舍长17.3 m、宽11 m、高2.7 m,猪舍东西走向,中间为1.5 m宽的过道。猪舍采用离地面0.1 m高的铁栏床,其水泥地板有2°斜坡,与污水沟相连。猪舍的南北墙各有7扇窗户。哺乳期约为35 d,小猪出生体质量约为1.5 kg,出栏体质量约为10 kg。

保育舍长14.5 m、宽11 m、高2.4 m,猪舍采用离地面0.1 m的网格床,南北墙各有7扇窗户。保育期约为30 d,猪进舍体质量约为10 kg,出栏体质量约为20 kg。

所有猪舍的窗户和门在夏天全部打开,在冬季全部关闭;在春秋季节所有窗户和门在白天打开,晚上则

关闭。养猪场及各实验猪舍的其他主要信息见表1。

1.3 样品采集与分析方法

1.3.1 气态 NH₃

离线 NH₃ 样品采样期为 2010 年 7 月—2011 年 1 月,覆盖夏季(7 月和 8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月至次年 1 月)。采样期间分别对 4 个饲养阶段猪舍内 NH₃ 浓度进行监测,包含 1 个育肥舍、1 个妊娠舍、1 个保育猪和 1 个哺乳舍,各猪舍内不同季节 NH₃ 采样时期如表 2 所示。每个猪舍设 1 个采样点,位于走道中央处,离地面 2.0 m 高。采样频率根据舍内 NH₃ 的浓度设置为 3~7 d(一般夏季为 7 d,秋冬季为 3 d),每次采样设置 3 个重复,样品被采回后保存于 4 °C 冰箱中,每月集中浸提、分析。时均 NH₃ 浓度的分析样品采用英国生态水文中心(CEH, Centre for Ecology and Hydrology)提供的被动采样器 ALPHA (Adapted Low-cost Passive High Absorption)采集。每个采样器主体为长 26 mm、外径 27 mm 的聚乙烯管,管子的一端含有一个 5 μm 的 PTFE 膜来阻挡空气中的颗粒物进入,而气态 NH₃ 可以通过 PTFE 膜扩散,并被管子另一端的采样膜(用柠檬酸浸泡)吸附。被动采样器 ALPHA 与主动采样器 DELTA 系统的采样结果相似且两者线性拟合程度较高^[14],已有研究采用 ALPHA 对猪舍内 NH₃ 进行监测^[15]。

离线 NH₃ 样品浸提方法:用镊子将采样膜从采样器中取出放于 100 mL 的烧杯中,加入 100 mL 的高纯水浸提,浸提过程中每小时轻摇烧杯,样品充分浸提大约 1~2 h 后,用镊子将采样膜上的浸提液挤干,

然后将其取出,浸提液置于 4 °C 冰箱冷藏待测。浸提液分析采用连续流动分析仪(Continuous Flow Analyzer, AA3, 德国)测定。连续流动分析仪的工作原理:样品与水杨酸和二氯异脲酸钠(DCI)反应生成蓝色化合物,在 660 nm 波长下检测,得到水样中 NH₄⁺-N 含量,并进一步根据浸提液的体积计算采集的 NH₃ 质量。空气中 NH₃ 浓度($C, \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的计算公式如下:

$$C=0.944\ 12\times(m_a-m_b)\times 10^6/\beta_{\text{NH}_3}\times V$$

式中:0.944 12 为浸提液中 NH₄⁺与气态 NH₃ 的分子量比值; m_a 为样品中 NH₄⁺质量,μg; m_b 为空白样品中 NH₄⁺质量,μg; 10^6 代表单位换算; β_{NH_3} 为 ALPHA 被动采样器的质量转换校正系数(0.669 9); V 为有效采样体积,m³。

有效采样体积 V 计算公式如下:

$$V=DA\ t/L=0.198\ 7(273.15+T/273.15)^{1.81}A\ t/L$$

式中, D 为气体的扩散系数, $\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$; A 为采样器有效横截面积, $3.463\times 10^{-4}\ \text{m}^2$; t 为采样时间,h; T 为环境温度,°C; L 为气体的扩散距离,0.006 m。

实时 NH₃ 浓度采用德尔格氨检测管(手泵和氨管均购于德国 Drägerwerk AG 公司)测定。氨检测管中填充固态酸性混合物以及遇碱变蓝的 pH 指示剂溴苯酚,外表带有刻度值,可检测 NH₃ 浓度范围为 0.05~700 μL·L⁻¹。每次采样时将管子一口打开后连接手泵,抽气结束后(一般为 5~10 次),结合管子变色的长度和外表刻度值可得到环境 NH₃ 的浓度值。实时 NH₃ 浓度的监测于 2010 年 7 月 22—23 日在妊娠

表 1 实验猪场及各猪舍的主要信息

Table 1 Main information on the investigated pig farm and pig houses

猪舍类型 House type	存栏量 Capacity pig	猪舍数量 Numbers of houses	饮食量 Access to feed	进料类型 Feeding regime	饮水 Water	清粪系统 Manure collection system	通风系统 Ventilation
育肥舍	300	25	自由	干	水	干清粪 ^c	自然通风
妊娠舍	70	20	限量 ^b	湿	水	干清粪	机械通风
哺乳舍	20/200 ^a	8	限量	湿	水	干清粪	机械通风
保育舍	200	3	自由	干	水	干清粪	自然通风

注:a. 20/200 表示每栋哺乳舍有 20 头母猪和 200 头小猪;b. 限量表示人工每天喂料两次,喂料量约为 2.5 kg;c. 干清粪系统为人工每天清粪两次,每次之后用自来水冲洗猪圈地板。

Note: a. There were approximately 20 sows and 200 piglets in each gestation house; b. The limit means the artificial feeding is twice a day and the feeding amount is about 2.5 kg; c. The pig manure is collected manually twice a day, and then the pig pens are flushed with tap water.

表 2 4 种猪舍内 NH₃ 采样时期(年/月/日)

Table 2 NH₃ sampling periods for four types of pig houses (year/month/day)

季节 Season	育肥舍 Fattening house	妊娠舍 Gestation house	哺乳舍 Farrowing house	保育舍 Weaning house
夏季	2010/07/28—2010/09/01	2010/08/04—2010/08/25	2010/07/28—2010/08/22	2010/08/22—2010/09/15
秋季	2010/09/15—2010/11/27	2010/09/01—2010/11/27	2010/09/08—2010/11/27	2010/09/01—2010/11/14
冬季	2010/12/01—2011/01/17	2010/12/01—2011/01/17	2010/12/01—2011/01/17	2010/12/22—2011/01/17

舍、育肥舍和保育舍内进行,采样从22日早上6:00开始到次日凌晨2:00结束。采样点为猪舍的中心位置,采样高度为1.5 m,每4 h采样一次,每次设置3个重复。

1.3.2 颗粒物

在2010年8月20—27日和2010年10月2—9日期间,采用中流量颗粒物采样器(TH-150C III型,100 L·min⁻¹,武汉天虹仪表有限公司)分别对保育舍和育肥舍内颗粒物(TSP、PM₁₀和PM_{2.5})样品进行连续监测。采样点设在猪舍走道中央,采样口距地面1.5 m高,每次连续采样24 h。采样滤膜采用北京赛福莱博公司进口的Staplex直径为90 mm石英纤维素滤膜,采样前将滤膜置于马弗炉高温加热到900℃,保持2~3 h,然后冷却至室温,恒温恒湿(20℃±2℃,40%±5%)24 h,再用百万分之一天平(TB-215D,美国丹佛)称质量。采样后的滤膜在恒温恒湿条件下平衡24 h后再次称质量。然后放入干净的铝箔纸内于-20℃的冰箱内储存备用。颗粒物浓度(mg·m⁻³)的计算采用重量法,即采样后膜质量(g)减去采样前膜质量(g),再除以标准状态下的采样体积(采样器根据温度自动校正,m³)。采用TSP与PM₁₀的差值和PM₁₀与PM_{2.5}的差值分别计算出PM₁₀₋₁₀₀(空气动力学粒径在10~100 μm之间的颗粒物)和PM_{2.5-10}(空气动力学粒径在2.5~10 μm之间的颗粒物)的浓度。

1.3.3 环境温度

4种猪舍内的温度均采用Hobo Pro WEH(Onset Computer Corporation,美国)记录,采样位置和高度与采集日均NH₃浓度分析样品时相同。该设备每30 min记录一次数据,精准度为±0.7℃。

1.4 统计分析

采用SPSS 11.5(SPSS Inc.,美国)进行单因素方差分析,检验不同养殖阶段猪舍内时均NH₃浓度、不同季节NH₃浓度、不同时刻实时NH₃浓度差异的显著性,显著水平设为α=0.05。

2 结果与讨论

2.1 月均NH₃浓度

在2010年8月—2011年1月期间,育肥舍NH₃的月均浓度变化范围为1.55~5.24 mg·m⁻³,平均为3.26 mg·m⁻³(图1a)。本研究测得的季节性浓度值明显低于早期研究报道:夏季和冬季育肥猪舍内NH₃浓度分别为(3.44±2.34) mg·m⁻³和(10.1±4.60) mg·m⁻³^[10]。与国外研究相比,所测的NH₃浓度均值接近于

韩国相同类型的猪舍内NH₃的平均浓度(3.87 mg·m⁻³)^[16],但明显低于德国、英国和爱尔兰养猪场育肥舍内NH₃浓度(7.59~30.0 mg·m⁻³)^[17-19]。这主要是由不同类型的猪舍粪便清理系统和通风类型造成的^[20]。国外的大部分猪舍为机械通风,且采用漏缝地板和深坑储存粪便的方式,因此粪便的舍内存放增加了NH₃从粪便的挥发和在舍内滞留的时间。本研究猪舍的粪便清理采用干清粪系统,即粪尿通过一定角度的斜坡自动分离,每天人工将粪便清理出猪舍并用水冲刷地板,这些措施均能有效降低舍内NH₃的挥发^[21-22],从而使所测的NH₃浓度低于上述国外的报道结果。妊娠舍内月均NH₃浓度平均为3.48 mg·m⁻³(波动范围为1.22~6.35 mg·m⁻³,图1b),低于发酵床和传统妊娠舍的NH₃浓度(分别为4.61 mg·m⁻³和6.41 mg·m⁻³)^[23]。哺乳舍内月均NH₃浓度为1.12~4.59 mg·m⁻³,平均值为2.95 mg·m⁻³(图1c)。保育期猪舍内月均NH₃浓度平均值为2.94 mg·m⁻³(1.21~4.88 mg·m⁻³)(图1d),明显低于欧洲国家(如德国、英格兰、爱尔兰和丹麦)的报道值(4.0~7.0 mg·m⁻³)^[18,24-25]。

比较不同阶段猪舍,NH₃浓度由高到低排列依次是妊娠舍>育肥舍>哺乳舍>保育舍,但彼此间差异不显著($P>0.05$)。妊娠舍内NH₃浓度较高,可能是由于妊娠期猪体质量最大,维持其正常的生理代谢需要摄入更多的含氮化合物^[26],致使排泄物中氮含量增加,从而增加舍内NH₃的产生。类似地,由于育肥猪数量通常多于其他3个阶段猪的数量(表1),这导致舍内排泄物增多,进而提升NH₃挥发强度,使育肥舍NH₃浓度较高。从季节性变化来看,4种猪舍内NH₃浓度在夏季(8月)和冬季(12月和1月)分别处于最低和最高水平,且与其他季节浓度间存在显著($P<0.05$)差异。这主要是猪舍窗户的开关措施和通风速率的不同所致。夏季猪舍窗户全部打开,增加了舍内外空气的对流,进而降低了舍内NH₃浓度;冬季窗户全部关闭,使NH₃在舍内大量累积,促使浓度上升。Ni等^[27]研究表明,猪舍内NH₃浓度与通风速率在一定程度上呈负相关性。本文中猪舍夏季的通风速率明显高于秋季和冬季(2009—2011年育肥舍通风速率的季节变化见先前报道^[15]),从而加速NH₃向舍外扩散。

与国际上其他研究相比,本研究中猪舍内NH₃浓度低于国际报道值,但仍存在健康风险。目前,许多国家为了保证饲养工人的身体健康,确立了猪舍内8 h工作时间的NH₃浓度临界值(19 mg·m⁻³)^[25]。虽然各类型猪舍内NH₃的浓度均明显低于临界浓度值(图

1),但值得注意的是,国际上的大部分猪舍的通风为机械通风,饲养人员基本无需进入猪舍工作,而本研究育肥舍和保育舍为自然通风系统,自动化程度低。并且,饲养员每天需要进行2次清理粪便和喂食,舍内的工作时间超过8 h,因而面临潜在的健康风险。另外,长期处于高浓度 NH_3 环境下的牲畜,其体重增速减缓且肉品质也会下降,从而影响养殖场的经济效益和人类食品的安全^[28]。鉴于以上分析,本研究建议猪场管理人员缩短饲养员的舍内工作时间或在秋冬季适当打开猪舍窗户来增加猪舍通风。另外,可从营养调控方面采取措施来减少 NH_3 产生量,如降低饲料中蛋白质的含量、加入非淀粉多聚糖和酸化后的盐代替碳酸钙等^[29]。

2.2 实时 NH_3 浓度

本研究中育肥猪、保育猪和妊娠猪每天进食两次,分别在8:00和16:30左右,之后清理舍内粪便和冲洗地板。育肥舍、妊娠舍和保育舍内实时 NH_3 浓度的动态变化规律如图2所示, NH_3 的波动范围分别为

3.43~6.73、0.82~4.51、0.99~3.14 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。3种猪舍内的 NH_3 浓度均在第一次人工清粪后急剧下降,10:00时所测 NH_3 浓度显著低于6:00时。此结果表明舍内 NH_3 的变化和舍内粪便的清理有一定的相关性,这一结果与Wang等^[30]的报道类似。但是,在第二次清粪(16:30—17:00)后相似的现象并未在育肥舍和保育舍内发生, NH_3 浓度在18:00时和14:00时处于相似的水平,这一现象可能与猪的排泄物增加有关。猪的第二次进食是在16:30,猪通常在进食1~2 h排泄粪便^[31],舍内新鲜的粪便会挥发出大量的 NH_3 ,因此导致 NH_3 浓度在18:00时仍处于较高水平。

2.3 颗粒物浓度

如图3所示,8月20—27日期间保育舍内日均TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的平均值分别为0.99(0.55~1.60)、0.18(0.11~0.24)、0.07 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (0.02~0.09 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$);10月2—9日期间育肥舍内日均TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值分别为2.39(1.62~2.87)、0.88(0.56~1.05)、0.40 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (0.18~0.67 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。进一步细分颗粒物粒径发

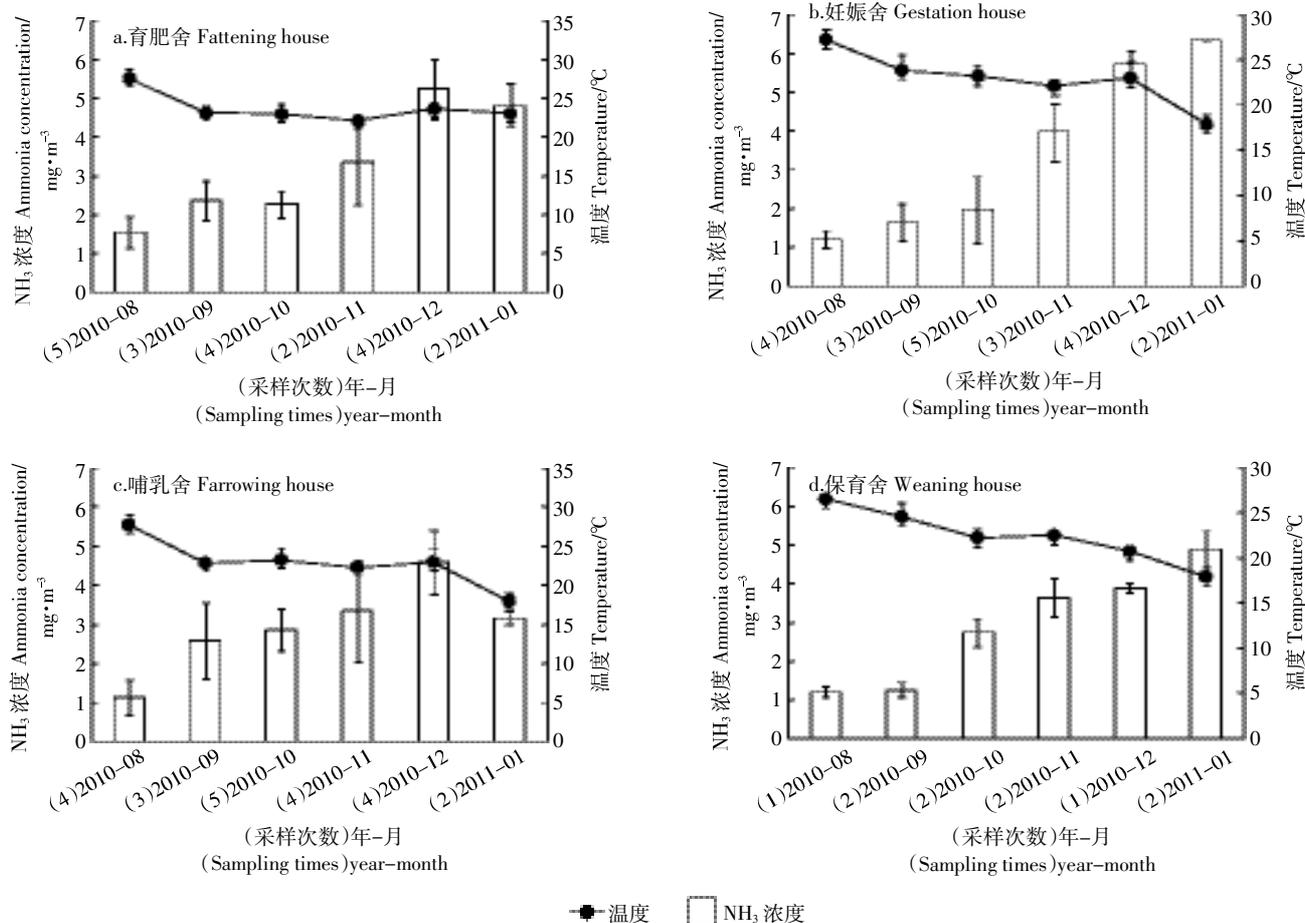
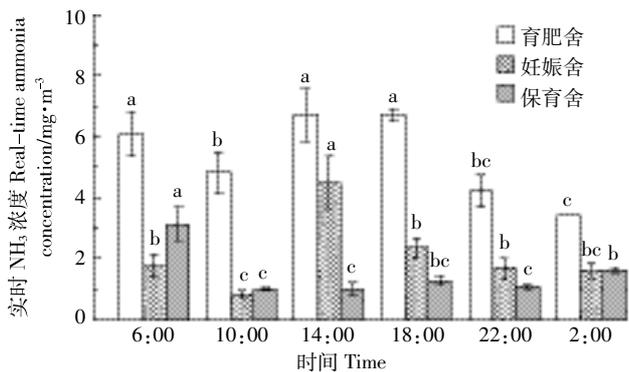


图1 猪舍氨气浓度的月变化

Figure 1 Monthly variation in NH_3 concentrations inside pig houses



误差线为3次重复测量的标准差,同一猪舍不同字母表示存在显著差异
The error bars are standard deviations of three replications, different letters at bars indicate significantly different at $P<0.05$

图2 猪舍内实时 NH₃ 浓度的动态

Figure 2 Dynamic of real-time NH₃ concentrations in the three pig houses

现,保育舍和育肥舍内颗粒物浓度均表现出:PM₁₀₋₁₀₀[平均值分别为(0.81±0.31)、(1.51±0.26) mg·m⁻³] $>$ PM_{2.5-10}[(0.11±0.03)和(0.48±0.23) mg·m⁻³] $>$ PM_{2.5}。这3种粒径颗粒物占保育期猪舍所测 TSP 的比例分别为 82%、11%和 7%,而在育肥舍内分别为 63%、20%和 17%。这些结果表明猪舍内颗粒物污染以大于 10 μm 粒径的颗粒物为主,这很可能与饲料粉末再悬浮有关。空气中 PM₁₀ 能够通过人类呼吸摄入并且累积到呼吸系统中,其中 PM_{2.5} 由于粒径很小而很容易寄宿到肺中,带来健康危害^[32]。与我国二级标准日均浓度值(环境空气质量标准 GB 3095—2006 中 TSP:300 μg·m⁻³;PM₁₀:150 μg·m⁻³;PM_{2.5}:75 μg·m⁻³)相比,超过标准值的 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样本数分别占到总样本数的 100%、93%和 79%。显而易见,3 种猪舍存在严重

的颗粒物污染。因此,为提高舍内空气质量,保护人和动物的健康,制定和实施更为综合完善的颗粒物减缓措施迫在眉睫,如增强猪舍通风、使用湿饲料以及向舍内空气中喷射水雾。

3 结论

(1)4 种猪舍内 NH₃ 浓度水平表现为妊娠舍 $>$ 育肥舍 $>$ 哺乳舍 $>$ 保育舍,但彼此间差异未达到统计学显著水平。各猪舍 NH₃ 浓度均存在明显的季节性变化:冬季最高,秋季次之,夏季最低。

(2)实时的 NH₃ 浓度结果表明上午清粪能够显著降低舍内氨气浓度水平,但其效果受到猪排泄活动的影响。

(3)保育舍和育肥舍内的颗粒物主要是以粒径在 10~100 μm 间的颗粒物为主,分别占所测 TSP 质量浓度的 82%和 63%。

(4)本研究所测 4 种猪舍内 NH₃ 浓度低于国外同类型猪舍报道值,但育肥舍和保育舍内至少 76% 以上的 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度值高于相应的国家二级标准日均浓度值,可能对人类和动物造成健康危害。因此,猪场需采取可行性措施(如降低饲料蛋白含量、增强舍内外通风)提升舍内空气质量。

参考文献:

[1] Krupa S V. Effects of atmospheric ammonia(NH₃) on terrestrial vegetation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(2): 179-221.
[2] Schiffman S S, Studwell C E, Landerman L R, et al. Symptomatic effects of exposure to diluted air sampled from a swine confinement atmosphere on healthy human subjects[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2005,

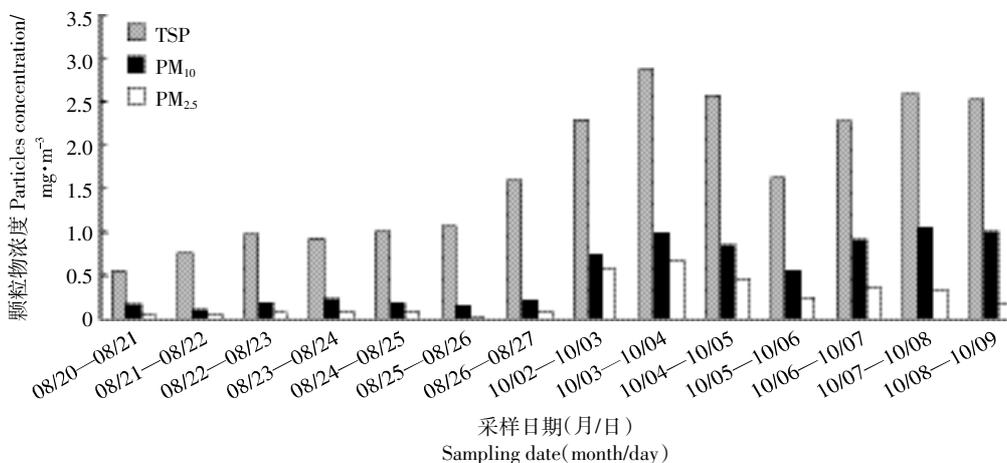


图3 猪舍内不同粒径颗粒物日均浓度(8月20—27日在保育期猪舍,10月2—9日在育肥期猪舍)

Figure 3 Daily mean concentrations of various particles in the pig houses (from 20 August to 27 August in weaning pig house, from 2 October to 9 October in fattening pig house)

- 113(5):567-576.
- [3] Pearson J, Stewart G R. The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants[J]. *New Phytologist*, 1993, 125(2):283-305.
- [4] Fangmeier A, Hadwiger-Fangmeier A, Van der Eerden L, et al. Effects of atmospheric ammonia on vegetation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 1994, 86(1):43-82.
- [5] IPCC. Report of the IPCC expert meeting on emission estimation of aerosols relevant to climate change[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
- [6] Cambra-López M, Torres A G, Aarnink A J A, et al. Source analysis of fine and coarse particulate matter from livestock houses[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(3):694-707.
- [7] Cambra-López M, Aarnink A J A, Zhao Y, et al. Airborne particulate matter from livestock production system: A review of an air pollution problem[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1):1-17.
- [8] Fiala N. Meeting the demand: An estimation of potential future greenhouse gas emissions from meat production[J]. *Ecological Economics*, 1993, 67(3):412-419.
- [9] Huaitalla R M, Gallmann E, Zheng K, et al. Pig husbandry and solid manures in a commercial pig farm in Beijing, China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2010, 4(5):217-226.
- [10] Van Ransbeeck N, Van Langenhove H, 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.
- [11] 朱志平, 董红敏, 尚斌, 等. 育肥猪舍氨气浓度测定与排放通量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):1076-1080.
ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, SHANG Bin, et al. Measurements of ammonia concentration and estimation on emission flux of finishing pig in pig house[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):1076-1080.
- [12] 刘杨. 育肥猪舍气溶胶产生规律与减排方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
LIU Yang. Study on the aerosols production and mitigation methods in fattening pig barns[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [13] Huaitalla M R, Gallmann E, Liu X J, et al. Aerial pollutants on a pig farm in peri-urban Beijing, China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, 6(1):36-47.
- [14] Reche C, Viana M, Pandolfi M, et al. Urban NH₃ levels and sources in a Mediterranean environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 57:153-164.
- [15] Xu W, Zheng K, Liu X J, et al. Atmospheric NH₃ dynamics at a typical pig farm in China and their implications[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, 5(3):455-463.
- [16] Kim K Y, Ko H J, Kim Y S, et al. Assessment of Korean farmer's exposure level to dust[J]. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 2008, 15(1):51-58.
- [17] Radon K, Danuser B, Iversen M, et al. Air contaminants in different European farming environments[J]. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 2002, 9(1):41-48.
- [18] Hayes E T, Curran T P, Dodd V A. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(7):940-948.
- [19] Demmers T G M, Burgess L R, Short J R, et al. Ammonia emissions from two mechanically ventilated UK livestock buildings[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(2):217-227.
- [20] 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.
- [21] Guingand N. Preliminary results on the influence of emptying slurry pits on the emission of ammonia and odours from fattening buildings[J]. *Journées de la Recherche Porcine*, 2000, 32:83-88.
- [22] Lim T T, Heber A J, Ni J Q, et al. Effects of manure removal strategies on odor and gas emissions from swine finishing[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(6):2041-2050.
- [22] Blanes-Vidal V, Hansen M N, Pedersen S, et al. Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry effects of rooting material, animal activity and ventilation flow[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 124(3/4):237-244.
- [23] 周玉刚, 许百年, 潘磊, 等. 发酵床猪舍和传统猪舍 H₂S 和 NH₃ 浓度的比较研究[J]. 畜牧兽医科技信息, 2010(3):30-31.
ZHOU Yu-gang, XU Bai-nian, PAN Lei, et al. Comparison study on concentrations of H₂S and NH₃ between fermentation bed piggery and traditional piggery[J]. *Animal Husbandry and Veterinary Science and Technology Information*, 2010, 3:30-31.
- [24] Seedorf J, Hartung J. Survey of ammonia concentrations in livestock building[J]. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 1999, 133(4):433-437.
- [25] Koerkamp P W G, Metz J H M, Uenk G H, et al. Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70:75-79.
- [26] Dekock J, Vranken E, Gallmann E, et al. Optimisation and validation of the intermittent measurement method to determine ammonia emissions from livestock buildings [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(3):396-403.
- [27] Ni J, Heber A J, Lim T T, et al. Ammonia emission a large mechanically-ventilated swine building during warm weather[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(3):751-758.
- [28] Kouimintzis D, Chatzis C, Linos A. Health effects of livestock farming in Europe[J]. *Journal of Public Health*, 2007, 15(4):245-254.
- [29] Daumer M L, Guiziuo F, Dourmad J Y. Effect of dietary protein content and supplementation with benzoic acid and microbial phytase on the characteristics of the slurry produced by fattening pigs[J]. *Journées de la Recherche Porcine*, 2007, 3:13-22.
- [30] 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.
- [31] Guarino M, Costa A, Porro M. Photocatalytic TiO₂ coating-to reduce ammonia and greenhouse gases concentration and emission from animal husbandries[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7):2650-2658.
- [32] 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.