

冬季封闭式肉种鸡舍空气颗粒物、氨气和二氧化碳分布特点及 PM_{2.5}理化特性分析

沈丹, 戴鹏远, 吴胜, 唐倩, 李春梅*

(南京农业大学动物科技学院, 南京 210095)

摘要:旨在通过监测冬季肉种鸡舍内颗粒物(particulate matter, PM)、氨气(ammonia, NH₃)和二氧化碳(carbon dioxide, CO₂)的浓度变化及检测舍内细颗粒物 PM_{2.5}的化学成分和电镜观察,分析冬季封闭式种鸡舍颗粒粉尘和有害气体的分布特点及鸡舍 PM_{2.5}的可能来源。试验监测于2016年12月在江苏某封闭式肉种鸡舍进行,鸡舍内饲养5626只57~58周龄优矮种鸡。鸡舍内共设7个监测位置,舍外1个监测位置,每天05:00-21:00每2h监测一次温度、相对湿度、风速、光照、PM浓度、NH₃和CO₂浓度,连续监测8d;鸡舍中央位置固定颗粒物采样器,每天连续16h采集PM_{2.5}用于成分检测及电镜观察。结果表明:1)鸡舍前部(进风口)的温度、PM和NH₃浓度均显著低于中部和后部($P<0.05$);鸡舍内不同粒径PM浓度极显著高于舍外($P<0.001$);早上喂料时(05:00)PM_{2.5}、PM₁₀和TSP浓度最高,熄灯后(21:00)PM浓度低于其他监测时间,而PM_{2.5}/PM₁₀、PM₁₀/TSP和PM_{2.5}/TSP在安静时(21:00)最高;除了PM_{2.5},风速与其他微环境变量均有显著相关性($P<0.01$);舍内风速和CO₂浓度受舍外影响不大;2)鸡舍PM_{2.5}成分以有机碳(OC)含量最高,NO₃⁻和SO₄²⁻浓度较高;通过电镜观察发现,鸡舍PM_{2.5}多为矿物颗粒和部分烟尘集合体;PM_{2.5}能谱图显示C和O的质量百分比、原子数百分比最高。监测鸡舍外PM浓度比舍内低,舍内的前部(进风口)的空气质量比中部和后部好,鸡的活动是引起粗颗粒(PM₁₀、TSP)浓度上升的主要原因,肉种鸡舍内PM_{2.5}主要成分为有机物和矿物质,主要来源于饲料、粪便和地面扬尘等。

关键词:肉种鸡舍;颗粒物;有害气体;PM_{2.5}电镜结构;PM_{2.5}成分;相关性分析

中图分类号:S831.43

文献标志码:A

文章编号:0366-6964(2018)06-1178-16

Distribution of Particles, Ammonia and Carbon Dioxide as well as Physicochemical Property of PM_{2.5} in an Enclosed Broiler Breeder House in Winter

SHEN Dan, DAI Peng-yuan, WU Sheng, TANG Qian, LI Chun-mei*

(College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the distribution of particulate matter (PM), ammonia (NH₃) and carbon dioxide (CO₂) in an enclosed caged broiler breeder house as well as the component and ultrastructure of fine particulate matter (PM_{2.5}) collected from the hen house in winter. Detections of temperature, relative humidity, airflow speed, illumination and concentrations of PM, NH₃ and CO₂ were taken from 05:00 to 21:00 in every two hours for 8-day continuous measuring in December 2016 in an enclosed broiler breeder house with 7 monitoring positions inside the house and 1 outside the house. There were 5626 Youai breeder hens of 57-58 weeks old in the house. Furthermore, particles sampler was fixed at the middle position of the breeder hen house to collect PM_{2.5} for 16 h per day which was used to analyze chemical composi-

收稿日期:2017-10-20

基金项目:国家自然科学基金(31772648);国家重点研发计划项目(2016YFD0500505)

作者简介:沈丹(1992-),女,安徽六安人,硕士生,主要从事畜禽养殖环境与控制研究,E-mail:2015105067@njau.edu.cn

*通信作者:李春梅,教授,博士生导师,主要从事动物环境生理与营养研究,Tel:025-84395971,E-mail:chunmeili@njau.edu.cn

tion and observe ultrastructure. The results showed that: 1) The temperature, PM and NH₃ concentrations in forepart of the breeder hen house were markedly lower than middle and back position ($P < 0.05$). The PM_{2.5}, PM₁₀ and TSP concentrations inside the breeder hen house were significantly higher than outside the breeder hen house ($P < 0.001$). The PM_{2.5}, PM₁₀ and TSP concentrations all were the highest at feeding time (05:00) in the morning, and these were the lowest after turning off the lights at 21:00. Whereas the ratios of PM_{2.5}/PM₁₀, PM₁₀/TSP, PM_{2.5}/TSP were the highest when the chicken flocks were quiet. Airflow speeds showed significant correlation with other microclimatic variables except PM_{2.5} ($P < 0.01$). The CO₂ concentration and airflow speed were affected indistinctively by ambient air outside the house. 2) Organic carbon (OC) was the mainly component of PM_{2.5} collected from the enclosed breeder hen house, concentrations of NO₃⁻ and SO₄²⁻ were also relatively high comparing with other components. It was observed that the PM_{2.5} of layer house contained many mineral particles and a part of smoke collection by electron microscopy. Energy spectrum diagrams of PM_{2.5} revealed that both mass percent and atomic percent of C and O were the highest. The PM concentrations inside the monitored house were higher than outside. Air quality in the forepart of the house (air inlet) was better than middle and back. Chicken activity mainly caused coarse particles (PM₁₀, TSP) increase. Organic matter and mineral were the major components of PM_{2.5} from the enclosed breeder hen house, which mainly come from feed, feces and ground dust.

Key words: broiler breeder house; particulate matter; noxious gas; PM_{2.5} ultrastructure; PM_{2.5} component; correlation analysis

随着畜牧业集约化程度的提高,高密度饲养使得畜舍内空气污染问题突出。畜禽舍内的主要空气污染物是颗粒物(particulate matter, PM)和有害气体,它们不仅对舍内工作人员的健康和动物的福利、生产性能产生不利影响^[1-2],还会通过排风系统扩散到舍外造成大气环境污染。因此,探究畜禽舍中PM的来源及其与有害气体的空间分布和时间变化特点以及影响因素对于调控家畜生产过程中舍内空气污染物的产生具有重要意义。畜牧生产过程可产生大量PM,已成为大气环境中细颗粒物PM_{2.5}(空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$)和PM₁₀(空气动力学直径 $\leq 10 \mu\text{m}$)的重要来源之一^[3-4]。由于来源的差异,畜禽舍PM的组成成分与大气不尽相同,畜禽舍内的PM含有较高浓度的有机成分,主要由饲料、粪便、动物羽毛、皮屑等产生^[5-6]。Cambra-López等^[4]指出,皮肤和饲料颗粒中碳(C)、氧(O)和硅(Si)元素的百分比含量较高。Lovanh等^[7]检测发现,肉鸡舍中的悬浮颗粒物含有较高质量浓度的NH₄⁺、SO₄²⁻、PO₄³⁻和NO₃⁻等多原子离子。这些PM可通过呼吸进入呼吸道,不仅能引起肺炎等呼吸系统疾病^[8],还能增加胸膜炎发病率^[9],特别是PM_{2.5}粒径小,可以通过呼吸道渗入肺泡,进入血液循环系统,对机体造成损

伤^[10]。氨气(NH₃)是畜禽舍内主要的气体污染物之一,具有刺激性气味,主要来自于微生物对粪便中含氮有机物的发酵分解^[11],能够对呼吸系统、眼睛、鼻窦、皮肤等产生损害作用^[12-13]。Beker等^[14]和Miles等^[15]研究发现,鸡舍内NH₃水平超过25 ppm可引起鸡的日增重、采食量和饲料转化率下降,死亡率升高。畜禽舍中的二氧化碳(CO₂)主要来自动物的呼吸和粪便释放^[16],当CO₂浓度过高时,可导致家禽缺氧,引起家禽食欲低下和生产性能降低^[17]。畜禽舍内CO₂的排放浓度有时用于评估畜禽舍中的通风率^[18]。通风是舍内环境的重要影响因素,它在很大程度上决定了PM的形成、浓度和排放,甚至空间分布,同时影响舍内温湿度和鸡的体感温度^[19-20],适当地通风有利于降低舍内有害气体浓度。畜禽舍内相对湿度也是影响舍内环境和动物健康的重要因素。相对湿度太低,PM浓度往往更高,且易引起鸡体脱水、呼吸道疾病等,而湿度太高时,空气中氨的浓度也相对较高^[20]。目前,尽管有较多关于大气PM_{2.5}来源及成分分析的研究报道,但对鸡舍PM_{2.5}的相关研究却很少,特别是关于鸡舍PM_{2.5}微观形态的研究几乎处于空白。

本研究拟通过监测冬季肉种鸡舍内PM、NH₃

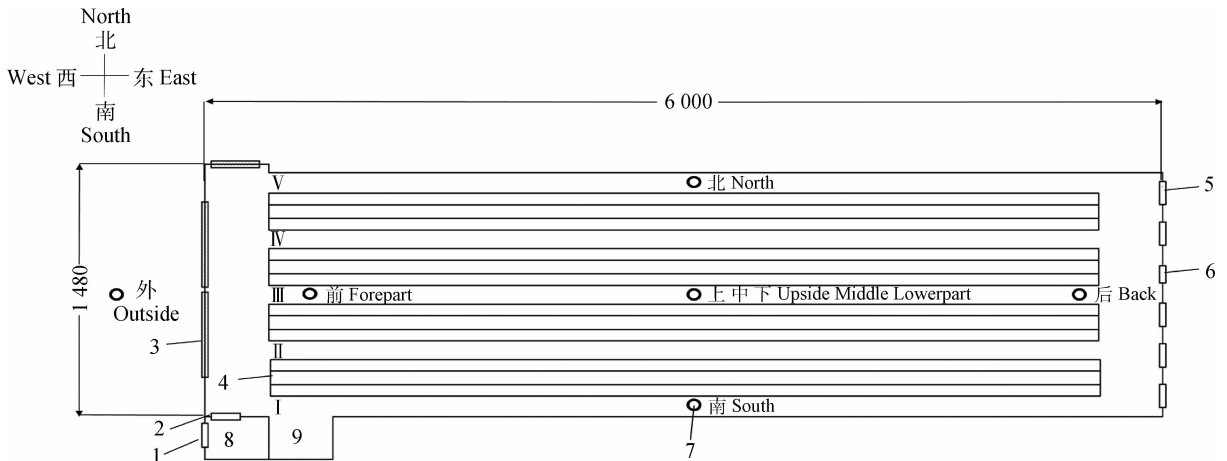
和 CO₂ 浓度变化,检测 PM_{2.5} 的化学成分和电镜观察,初步分析冬季封闭式肉种鸡舍颗粒粉尘和有害气体的分布特点及鸡舍 PM_{2.5} 的可能来源,为肉种鸡舍内 PM 与有害气体的控制提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 鸡舍基本情况

试验在江苏省常州市某肉种鸡场进行,监测鸡舍长 60 m、宽 14.8 m、檐高 3.5 m、脊高 4 m,呈东西走向(图 1)。鸡舍西侧墙面有宽 1.4 m、高 1.9 m 的大门,有 2 个湿帘,宽 6 m、高 1.95 m。南侧墙壁有 13 扇窗户,窗宽 1.46 m、高 0.85 m,北侧墙壁有

12 扇相同规格的窗户,饲养期间处于关闭状态,主要用于采光。鸡舍东面墙有 4 台大风机(青岛大牧人,型号:50),1 台小风机(青岛大牧人,型号:36)。鸡舍采用阶梯式笼养方式饲养,乳头式饮水器提供饮水。舍内共有 4 个 A 型大架,呈四列五走道,每列鸡笼总长 52 m、高 1.7 m,分为 3 层,每层 32 组鸡笼,每组合有 4 个单体鸡笼。每列鸡笼下方配有传送带,鸡笼东边有宽 0.44 m 的横向传送带,以传送带传送方式清粪。每个走道 18 个光照用 LED 灯(规格型号:AC 220 V/50 Hz 5 W 6 500 K),间隔 3.1 m、灯高 2.2 m。试验期间鸡舍内饲养 57~58 周龄优矮鸡,平均母鸡数 5 626 只,公鸡数 118 只。



1. 门; 2. 二道门; 3. 湿帘; 4. 鸡架; 5. 大风机; 6. 小风机; 7. 检测点; 8. 饲料间; 9. 办公室

1. Door; 2. The second door; 3. Wet-curtain; 4. Chicken frame; 5. Large fan; 6. Small fan; 7. Measuring point; 8. Feed room; 9. Office room

图 1 监测鸡舍平面图和监测位置分布(长度单位为 cm)

Fig. 1 Floor plan of the chicken house with measuring points marked (Unit of length is cm)

1.2 日常管理

鸡舍每天 4:30-20:30 开灯 16 h,饲养员每天 05:00-5:30 喂料 1 次并检查鸡群,分别在 09:30-10:00 和 14:00-14:30 各捡蛋 1 次,14:30-16:30 进行人工输精。由于冬季舍外温度低,为保证舍内温度适宜,将西面墙的湿帘用塑料膜和彩条布覆盖。每天 09:00-17:00,饲养员根据当天天气和气温调节舍内通风,鸡舍前部温度高于 14 °C 时,通过掀起彩条布增大湿帘暴露面积提高鸡舍内通风量;鸡舍前部温度低于 13 °C 时,通过增大挡板遮挡风机面积减少舍内通风。鸡舍内每 2 d 通过传送带清粪 1 次,试验期间清粪时间分别为 19 和 21 日 07:00 以及 23 和 25 日 05:00。

1.3 仪器与设备

鸡舍内颗粒物采集使用 BTPM-HS1 环境空气

颗粒物采样器(丹东百特仪器有限公司),采样流量为 16.67 L·min⁻¹,每天采样时间 16 h,采样滤膜为直径 47 mm 的石英滤膜(Whatman 公司),采样前在马弗炉中经 450 °C 高温处理 2 h,采样前后分别在干燥器中干燥 24 h 并称重,-20 °C 保存,用于后期成分分析和电镜观察。离子成分分析采用 ICS-90 离子色谱分析仪(美国戴安公司),元素采用 ICP-MS 7500 元素分析仪(安捷伦科技有限公司),EC、OC 采用 DRI 2001A ECOC 分析仪(Atmoslytic 公司),电镜观察采用 S4800 扫描电子显微镜(日本日立公司)。颗粒物浓度监测采用 PC-6A 型粉尘浓度监测报警仪,购自江苏省激光研究所有限公司,测量范围为 0.001~10.000 mg·m⁻³,相对误差 ≤ 10%。NH₃ 和 CO₂ 浓度监测采用 JK40-IV 型便携式多功能监测仪,购自深圳市吉顺安科技有限公司,

监测范围分别为0~100 ppm,0~5 000 ppm,最大允许误差均为 $< \pm 3\%$ (F. S)。温度和相对湿度使用购自中国上海美得时仪器仪表科技有限公司的TH101C型温湿度表,测量误差分别为 $\leq \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $\leq \pm 5\%$ RH。风速和光照分别采用DFA-3型微风测量仪(鞍山市铁东光学仪表厂)和LX-101型照度计(台湾路昌电子有限公司)测定。

1.4 监测方法

监测在2016年12月19日—2016年12月26日进行,每天监测时间为05:00—21:00,每2 h时监测1次鸡舍内的温度、相对湿度、风速、光照、PM_{2.5}、PM₁₀、TSP、NH₃和CO₂浓度。监测点分布在舍内7个位置和舍外1个位置(图1),其中监测点前、中、后、南和北高度均为1.2 m,监测点上、下高度分别为1.6和0.7 m,舍外监测点距鸡舍门6.8 m,高度1.2 m。颗粒物采样器固定于试验鸡舍中间位置,

采样器进气口高1.7 m。试验过程中详细记录鸡舍内的饲养管理流程。

1.5 数据统计与分析

将试验原始数据用Excel进行初步整理,再使用GraphPad Prism 5.0进行统计分析。用单因素ANOVA统计分析差异显著性, $P < 0.05$ 表示差异显著,试验数据以“平均值 \pm 标准误(Mean \pm SEM)”表示。鸡舍平面图由AutoCAD2016软件绘制。

2 结果

2.1 鸡舍温度、相对湿度、风速和光照分析

2.1.1 鸡舍不同位置的温度、相对湿度、风速和光照对比 如表1所示,在监测鸡舍中,前部距离大门和通风口最近,温度显著低于其他位置($P < 0.05$),而风速最高,南、北两侧靠近采光窗,光照强度最强,后部最弱。

表1 鸡舍内不同位置的温度、相对湿度、风速和光照对比

Table 1 Comparison of temperature, relative humidity, airflow speed and illumination at different positions in the layer house

测试点 Monitoring point	温度/ $^\circ\text{C}$ Temperature	相对湿度/% Relative humidity	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) Airflow speed	光照/lx Illumination
前 Forepart	13.44 \pm 0.14 ^d	60.42 \pm 1.38 ^c	0.198 \pm 0.006 ^A	51.69 \pm 5.43 ^{ab}
中 Middle	16.06 \pm 0.12 ^a	66.57 \pm 1.04 ^{ab}	0.166 \pm 0.005 ^B	54.06 \pm 5.75 ^{ab}
后 Back	14.15 \pm 0.19 ^c	68.8 \pm 0.90 ^{ab}	0.175 \pm 0.008 ^{AB}	35.61 \pm 2.69 ^b
上 Upside	15.81 \pm 0.15 ^a	64.48 \pm 1.11 ^{bc}	0.159 \pm 0.004 ^B	56.93 \pm 6.18 ^{ab}
下 Lowerpart	16.24 \pm 0.14 ^a	65.34 \pm 0.88 ^b	0.180 \pm 0.009 ^{AB}	48.69 \pm 5.03 ^{ab}
南 South	14.63 \pm 0.13 ^{bc}	69.93 \pm 1.17 ^a	0.179 \pm 0.006 ^{AB}	71.29 \pm 12.19 ^a
北 North	15.19 \pm 0.12 ^b	70.28 \pm 0.99 ^a	0.160 \pm 0.004 ^B	75.24 \pm 8.76 ^a

同列数据肩标大、小写字母不同分别表示差异极显著($P < 0.01$)和差异显著($P < 0.05$),所标字母相同表示差异不显著($P > 0.05$)。下表同

In the same column, values with different capital letters or lowercases mean significant difference between positions ($P < 0.01$) and ($P < 0.05$). The same as below

2.1.2 鸡舍温度、相对湿度、风速和光照变化 由图2A可见,随白天舍外温度的升高,鸡舍内温度也呈逐渐上升趋势,13:00时达到最高值(15.72 \pm 0.22) $^\circ\text{C}$,相对湿度在15:00时达到最低值(62.65 \pm 1.82)%。图2B显示,09:00时光照强度迅速升高,13:00时达到最高值(112.84 \pm 9.14)lx,随后逐渐降低,21:00时鸡舍内关灯,光照强度降到最低值2 lx,风速变化趋势与光照强度基本一致,白天逐渐升高,13:00时达到最高值(0.210 \pm 0.011) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 鸡舍内颗粒物分析

2.2.1 鸡舍内不同位置颗粒物浓度对比 图3A显示,不同粒径的PM浓度在鸡舍中的分布均为中、后部显著高于前部($P < 0.05$),上部的PM₁₀和TSP浓度显著高于下部($P < 0.05$),而PM_{2.5}在鸡舍的不同高度未表现出显著差异(图3B)。不同粒径的PM浓度在鸡舍南、北两侧及中部均无显著差异(图3C)。

2.2.2 鸡舍内颗粒物浓度变化 PM浓度在早上05:00喂料时最高(图4),之后呈逐渐降低趋势,

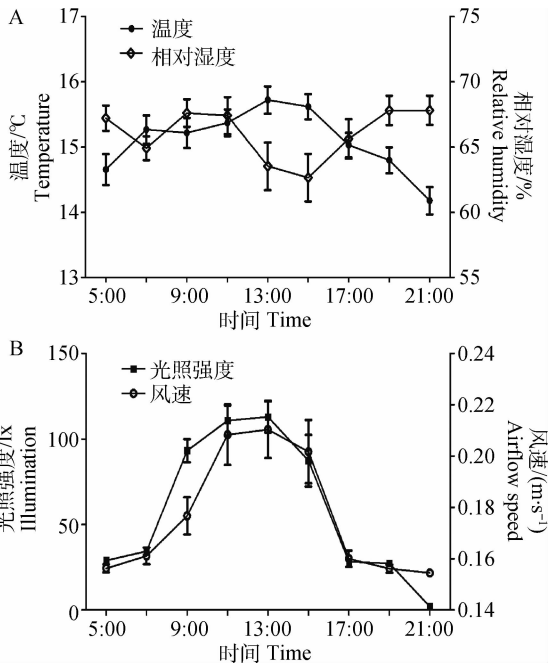


图2 鸡舍内温度、相对湿度、风速和光照在 05:00—21:00 的变化

Fig. 2 Variation of temperature, relative humidity, airflow speed and illumination at daytime from 05:00 to 21:00 in the chicken house

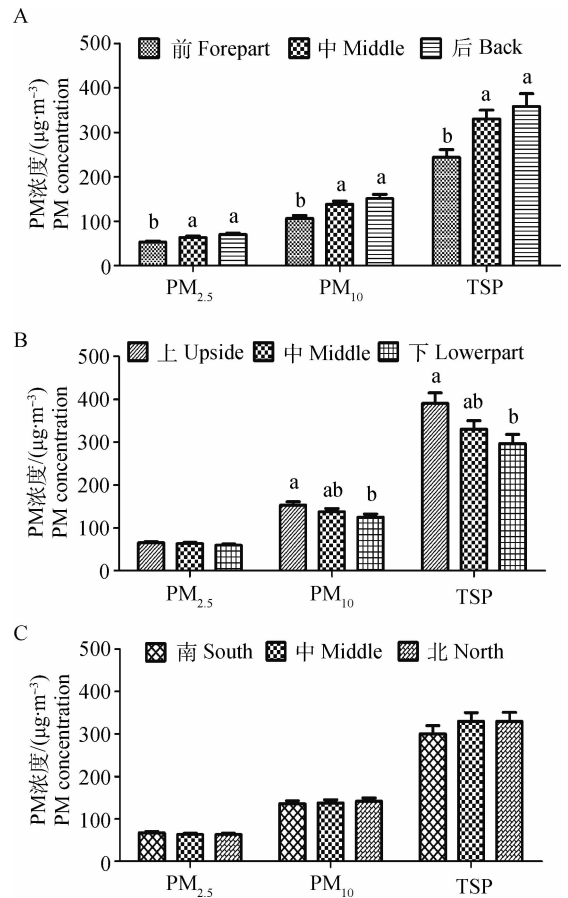
15:00 和 19:00 时 TSP 稍有上升, 21:00 时不同粒径 PM 浓度均降至最低。

2.2.3 鸡舍内不同位置颗粒物浓度比值的对比 与 PM 浓度的不同位置对比(图 3)不同, 图 5 显示, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}/TSP$ 和 PM_{10}/TSP 在前、中、后位置没有显著性差异, 而在鸡舍上部显著低于下部 ($P < 0.05$), 南部显著高于北部 ($P < 0.05$), 即相对于鸡舍上部和北部, 下部和南部的细颗粒物所占比例较高。

2.2.4 鸡舍内颗粒物浓度比值的变化 一天中不同时间的 PM 浓度比值如图 6 所示, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}/TSP$ 和 PM_{10}/TSP 的比值范围分别为 0.40~0.62、0.15~0.33 和 0.38~0.52, 其中 21:00 时 PM 浓度比值高于其他时间段, 即 21:00 鸡群处于安静状态时, 细颗粒浓度所占比例升高。

2.2.5 鸡舍内颗粒物浓度比值频率分布 试验鸡舍中总体颗粒物比值的百分频率如图 7 所示, $PM_{2.5}/TSP$ 比值在 0~0.3 范围内达到 88.89%, 而 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值在 0.3~0.6 范围内达到 88.89%, PM_{10}/TSP 比值在 0.3~0.6 范围内达到 96.43%。

2.2.6 鸡舍内外颗粒物浓度对比 图 8 显示, 试验鸡舍外不同粒径 PM 浓度均极显著低于舍内 ($P < 0.001$)。



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下图同

Different letters indicate the significant difference ($P < 0.05$). The same as below

图3 颗粒物浓度在鸡舍不同位置的对比

Fig. 3 Comparison of particulate matter concentrations at different positions in the chicken house

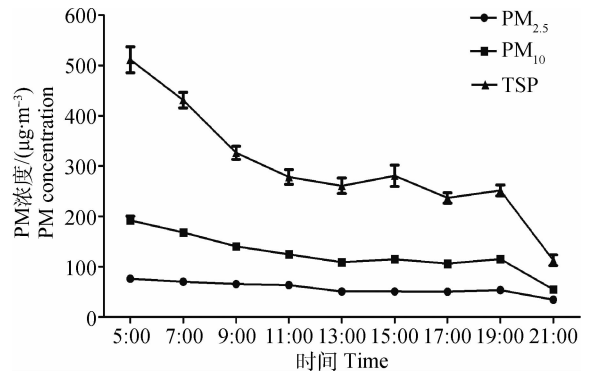


图4 鸡舍内颗粒物浓度在 05:00—21:00 的变化

Fig. 4 Variation of particulate matter concentrations at daytime from 05:00 to 21:00 in the chicken house

2.2.7 鸡舍内 $PM_{2.5}$ 成分含量 肉种鸡舍中 $PM_{2.5}$ 主要成分含量如表 2 所示, 总碳 (TC) 含量最高, 占 $PM_{2.5}$ 总质量的 30.52%, 其中有机碳 (OC) 为

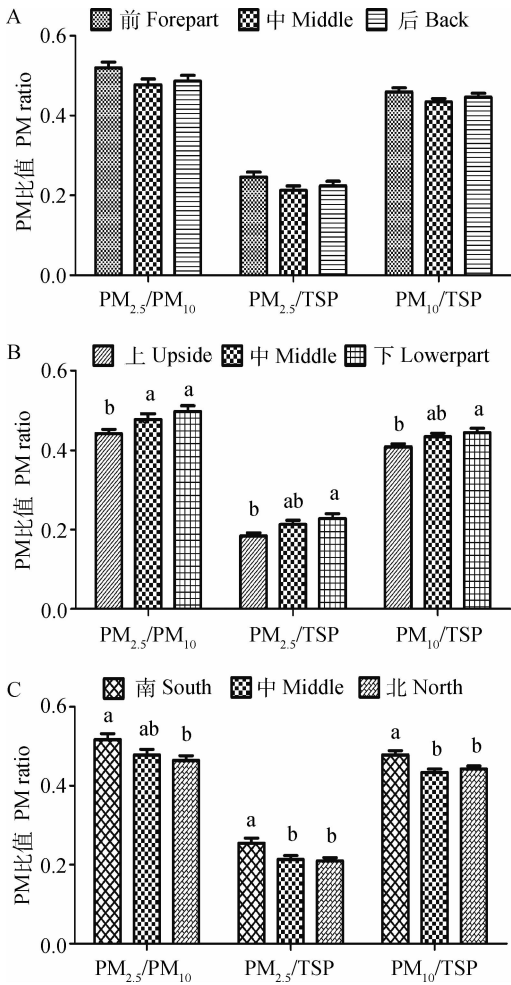


图5 颗粒物浓度比值在鸡舍不同位置的对比
Fig. 5 Comparison of particulate matter concentrations ratio at different positions in the chicken house

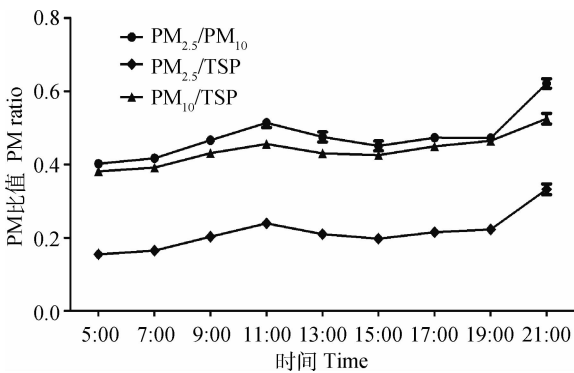


图6 鸡舍内颗粒物浓度比值在 05:00—21:00 的变化
Fig. 6 Variation of particulate matter concentrations ratio at daytime from 05:00 to 21:00 in the chicken house

TC 的主要部分,占 PM_{2.5} 总质量的 23.63%。此外,鸡舍中 PM_{2.5} 还含有较高浓度的 NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、

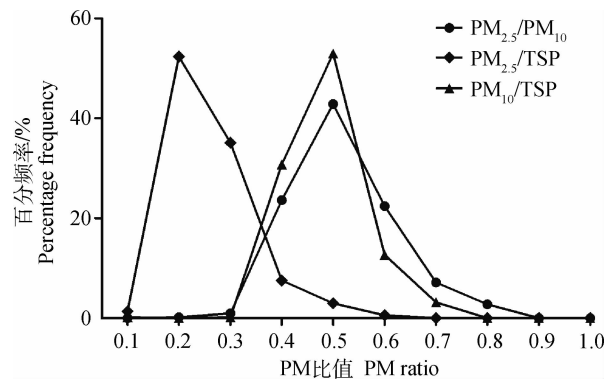
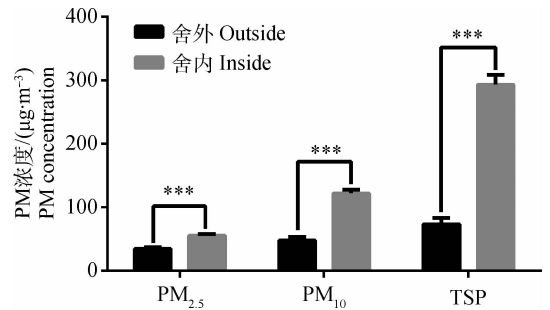


图7 鸡舍内颗粒物浓度比值频率分布
Fig. 7 Percentage frequency distribution of particulate matter concentrations ratio in the chicken house



***. $P < 0.001$
图8 鸡舍内外不同粒径颗粒物浓度对比
Fig. 8 Comparison of different size particulate matter concentrations inside and outside the chicken house

Cl⁻、Ca²⁺ 等离子,平均浓度分别为 27.03、14.43、12.64、4.80 和 3.07 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,但 K、Fe、Ca 等金属元素浓度不高。

2.2.8 鸡舍内 PM_{2.5} 中水溶性离子的相关性 由表 3 可见,鸡舍 PM_{2.5} 中的水溶性离子间,Na⁺ 与 K⁺、Cl⁻ 均表现出显著正相关 ($P < 0.05$),Mg²⁺ 与 Cl⁻ 极显著相关 ($P < 0.01$),NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 也存在显著相关关系 ($P < 0.05$)。

2.2.9 鸡舍内 PM_{2.5} 微观结构 图 9 显示,肉种鸡舍中采集到的 PM_{2.5} 形态各不相同,它们可能有不同的来源,含不同的成分。图 9A 为 2 000 倍电镜下 PM_{2.5} 形态,图 9B、C 均为 20 000 倍电镜下 PM_{2.5} 形态,图 9D、E 为 30 000 倍,图 9F 为 50 000 倍。可见鸡舍中采样 16 h 时颗粒物密度较大(图 9A),图 9B、D 表面圆润光滑,呈胶状,而图 9C、E 表面干燥,且图 9E 表面粗糙,凹凸不平;图 9F 不同于其他形态,呈现链状。

表 2 鸡舍中 PM_{2.5} 主要成分含量Table 2 Component contents of PM_{2.5} in the chicken house

项目 Item	最小值/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) Minimum value	最大值/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) Maximum value	平均值/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) Mean	质量百分比/% Mass percentage
碳 Carbon				
TC	42.30	65.79	51.24±5.32	30.52±0.71
OC	33.39	50.16	39.66±3.99	23.63±0.40
EC	8.80	15.63	11.58±1.44	6.89±0.45
离子 Ion				
Na ⁺	0.50	1.01	0.70±0.11	0.41±0.03
NH ₄ ⁺	8.94	15.13	12.64±1.33	7.57±0.61
K ⁺	0.63	2.64	1.34±0.46	0.77±0.19
Mg ²⁺	0.31	0.40	0.34±0.02	0.20±0.01
Ca ²⁺	2.58	3.44	3.07±0.19	1.89±0.23
F ⁻	0.19	0.42	0.29±0.07	0.12±0.04
Cl ⁻	3.07	9.87	4.80±1.69	2.69±0.62
NO ₃ ⁻	17.36	32.00	27.03±3.29	16.31±2.15
SO ₄ ²⁻	10.46	16.27	14.43±1.34	8.72±0.88
元素 Element				
Na	0.00	0.08	0.03±0.03	0.02±0.02
Mg	0.03	0.34	0.12±0.07	0.06±0.03
Al	0.01	0.03	0.02±0.00	0.01±0.01
K	0.75	2.02	1.39±0.31	0.83±0.18
Ca	0.22	0.92	0.55±0.17	0.32±0.09
Fe	0.48	1.22	0.88±0.19	0.53±0.13

TC. 总碳; OC. 有机碳; EC. 元素碳

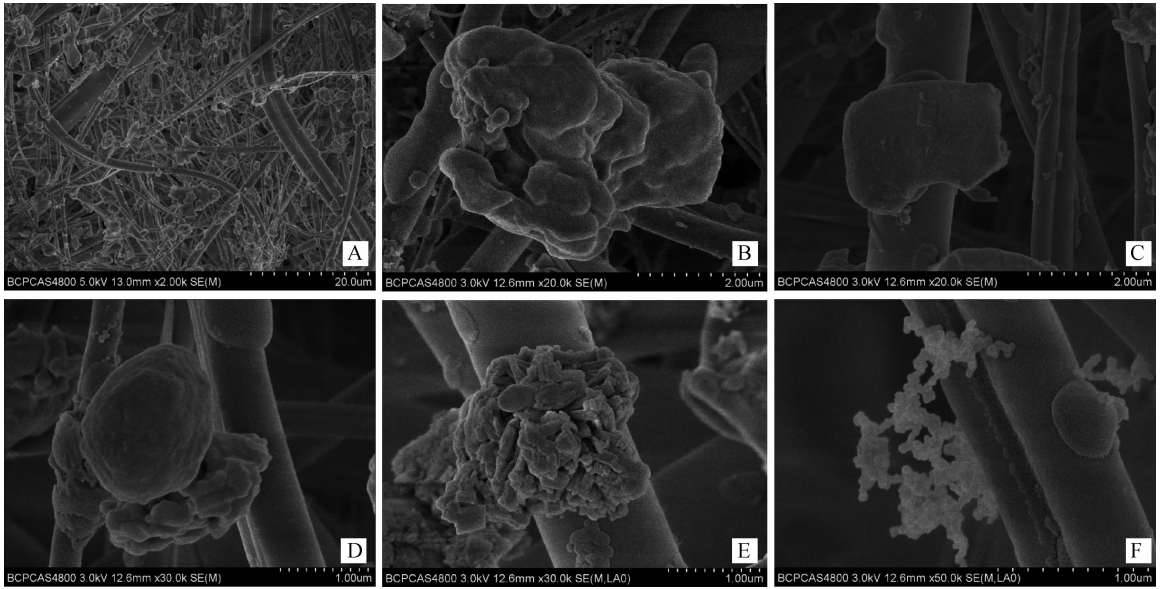
TC. Total carbon; OC. Organic carbon; EC. Element carbon

表 3 鸡舍中 PM_{2.5} 水溶性离子间的 Pearson 相关系数Table 3 Pearson correlation coefficients among water soluble ions of PM_{2.5} in the chicken house

离子 Ion	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Na ⁺	1								
NH ₄ ⁺	0.496	1							
K ⁺	0.973*	0.361	1						
Mg ²⁺	0.945	0.704	0.915	1					
Ca ²⁺	0.204	-0.474	0.158	-0.121	1				
F ⁻	0.934	0.445	0.846	0.810	0.461	1			
Cl ⁻	0.952*	0.626	0.947	0.994**	-0.103	0.796	1		
NO ₃ ⁻	0.027	0.878	-0.130	0.278	-0.584	0.040	0.178	1	
SO ₄ ²⁻	0.183	0.941	0.025	0.422	-0.550	0.181	0.326	0.988*	1

*. $P < 0.05$; **. $P < 0.01$; ***. $P < 0.001$. -. 表示负相关关系。下表同

-. Means negative correlation. The same as below



A. 颗粒物(2 000×);B. 其他颗粒(20 000×);C. 矿物颗粒(20 000×);D. 其他颗粒(30 000×);E. 矿物颗粒(30 000×);F. 烟尘颗粒(50 000×)

A. Particles (2 000×); B. Other particles (20 000×); C. Mineral particles (20 000×); D. Other particles (30 000×); E. Mineral particles (30 000×); F. Smoke dust (50 000×)

图9 鸡舍内PM_{2.5}的微观形貌

Fig. 9 Microscopic morphology of PM_{2.5} in the chicken house

2.2.10 鸡舍内PM_{2.5}能谱化学组成图

图10中,A~E为鸡舍中PM_{2.5}的微观形貌,a~e为与之对应的能谱化学组成图,反映各颗粒物中的化学成分。表4为图10a~e中颗粒物化学成分质量百分比的量化,表5为图10a~e中颗粒物化学成分原子数百分比的量化。其中C、O和Si元素含量最高,部分颗粒物中含有少量Ca、Na、Cl、K、Zn和P元素。

2.3 鸡舍内有害气体浓度

2.3.1 鸡舍不同位置有害气体浓度对比

图11显示,鸡舍前部有害气体浓度显著低于中、后部($P<0.05$,图11A、11D),而在鸡舍的不同高度,NH₃与CO₂呈现出不同趋势,下部NH₃浓度显著高于上部($P<0.05$,图11B),下部CO₂浓度显著低于中部($P<0.05$,图11E),中、南部CO₂浓度显著低于北部($P<0.05$,图11F)。

2.3.2 鸡舍有害气体浓度变化

NH₃与CO₂在一天中的变化趋势并不相同(图12),NH₃在13:00时浓度最低,21:00时浓度最高,而CO₂在05:00时浓度最高,随着白天通风的增加逐渐下降,15:00达到最低浓度值,为了控制温度降低通风后,CO₂浓度又出现小幅度回升,直到关灯后再一次下降。

2.4 鸡舍内环境参数相关性分析

2.4.1 鸡舍内各环境参数间的相关性

由表6可见,温度与PM_{2.5}浓度显著相关($P<0.01$),与PM₁₀和TSP相关性却不显著,而风速正好相反,与PM_{2.5}浓度相关性不显著,与PM₁₀和TSP显著负相关($P<0.01$)。相对湿度与颗粒物浓度存在显著负相关关系($P<0.001$),CO₂与颗粒物浓度和NH₃浓度则表现出显著正相关关系($P<0.001$)。

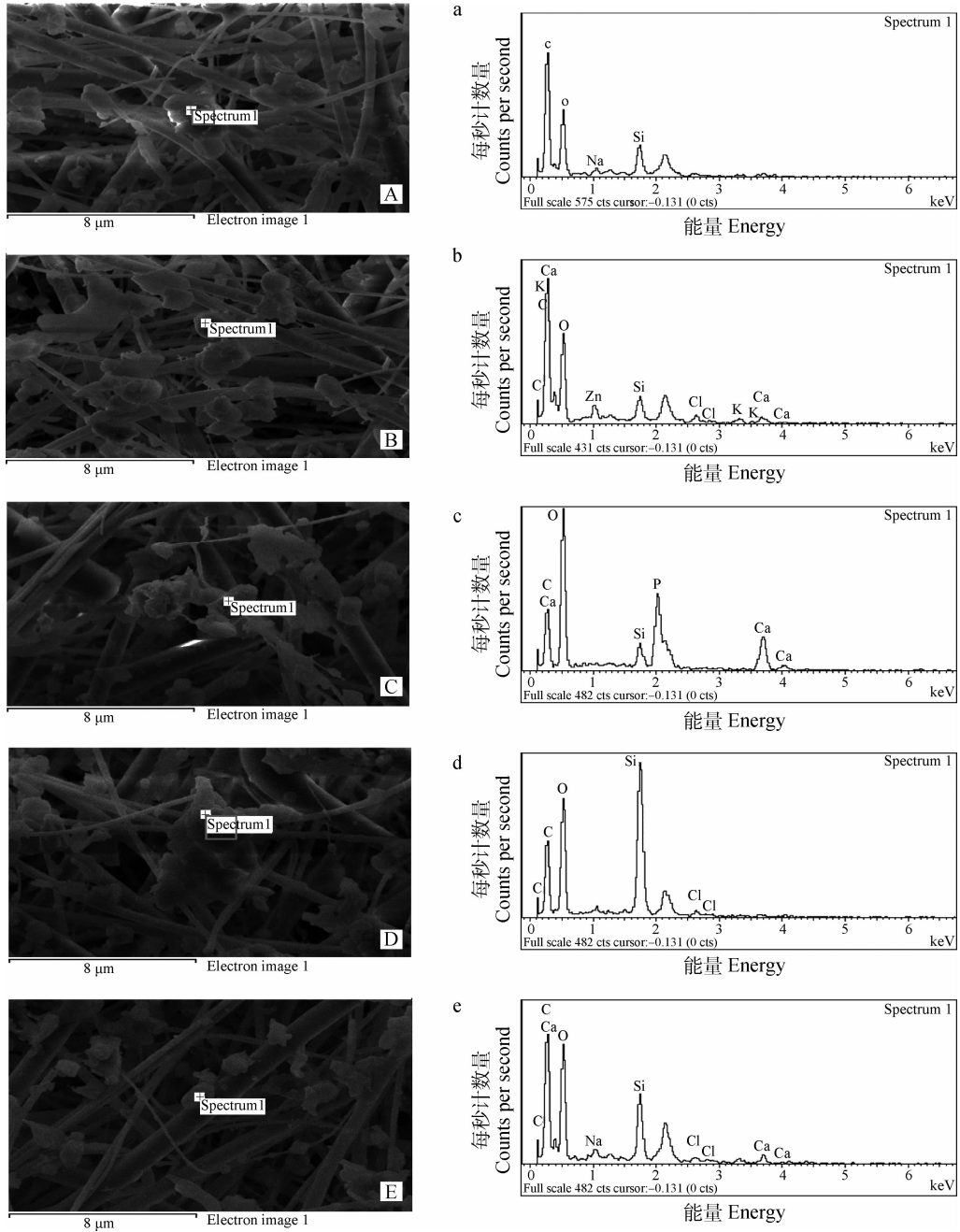
2.4.2 鸡舍内外各环境参数间的相关性

由表7可见,舍内的风速和CO₂浓度受舍外影响并不大,而舍内外温度、相对湿度、光照和颗粒物浓度、NH₃浓度表现出显著地相关性。

3 讨论

3.1 冬季封闭式鸡舍内温度、相对湿度、风速和光照的分布特点

遗传和环境是影响蛋鸡生产性能的主要因素,而後者的影响相对更大,养殖环境包括环境温度、相对湿度、气流速度和光照强度等^[21]。Dawkins等^[22]研究认为,相对于饲养密度,养殖环境条件对鸡福利的影响更大。本试验在冬季进行,鸡舍内不同位置的平均温度、相对湿度、风速和光照分别为13.44~16.24℃、60.42%~70.28%、0.159~0.198 m·s⁻¹、



A~E. 试验鸡舍中 $PM_{2.5}$ 的微观形貌; a~e. 试验鸡舍中 $PM_{2.5}$ 的能谱化学组成图

A-E. Microscopic morphology of $PM_{2.5}$ in the chicken house; a-e. Energy spectrum diagram of $PM_{2.5}$ in the chicken house

图 10 鸡舍中 $PM_{2.5}$ 的显微形貌和能谱化学组成图

Fig. 10 Microscopic morphology and energy spectrum diagram of $PM_{2.5}$ in the chicken house

35.61~75.24 lx,不同时间的各因素范围分别为 14.18~15.72 °C、62.65%~67.82%、0.155~0.210 $m \cdot s^{-1}$ 和 2.00~112.84 lx;其中温度和照度均符合中华人民共和国农业行业标准,而相对湿度未达到相应的标准^[23],也有研究认为,相对湿度对动物健康的影响因温度的不同而不同,且低湿更利于缓和畜禽的高温或低温应激^[24]。吴鹏威等^[25]监测

发现,石家庄半开放式鸡舍在寒冷季节的舍内温度为 8.9~12.5 °C,相对湿度为 54.3%~67.0%,均低于本试验鸡舍,这与试验鸡舍的地理位置和鸡舍结构有很大关系,本试验鸡舍位置相对偏南,且封闭式鸡舍较半开放式鸡舍保温御寒效果更好。因试验鸡舍有采光窗,白天舍内光照受外界影响较大,与王强等^[26]的研究一致。

表 4 颗粒物化学成分质量百分比

Table 4 Mass percentage of particulate matter chemical composition

%

光谱 Spectrum	C	O	Na	Si	Cl	K	Zn	P	Ca
A	56.14	34.71	1.50	7.65	—	—	—	—	—
B	52.98	32.44	—	3.72	2.05	2.04	4.01	—	2.75
C	21.86	47.44	—	3.04	—	—	—	12.22	15.44
D	38.85	36.08	—	23.62	1.45	—	—	—	—
E	43.54	39.07	1.09	10.76	1.48	—	—	—	4.06
平均值 Mean value	42.67	37.95	1.30	9.76	1.66	2.04	4.01	12.22	7.42

“—”表示未检测到。下表同

“—”means no detection. The same as below

表 5 颗粒物化学成分原子数百分比

Table 5 Atomic percentage of particulate matter chemical composition

%

光谱 Spectrum	C	O	Na	Si	Cl	K	Zn	P	Ca
A	65.08	30.21	0.91	3.79	—	—	—	—	—
B	64.76	29.77	—	1.95	0.85	0.77	0.90	—	1.01
C	32.08	52.27	—	1.91	—	—	—	6.95	6.79
D	50.77	35.39	—	13.20	0.64	—	—	—	—
E	54.59	36.77	0.72	5.77	0.63	—	—	—	1.52
平均值 Mean value	53.46	36.88	0.82	5.32	0.71	0.77	0.90	6.95	3.11

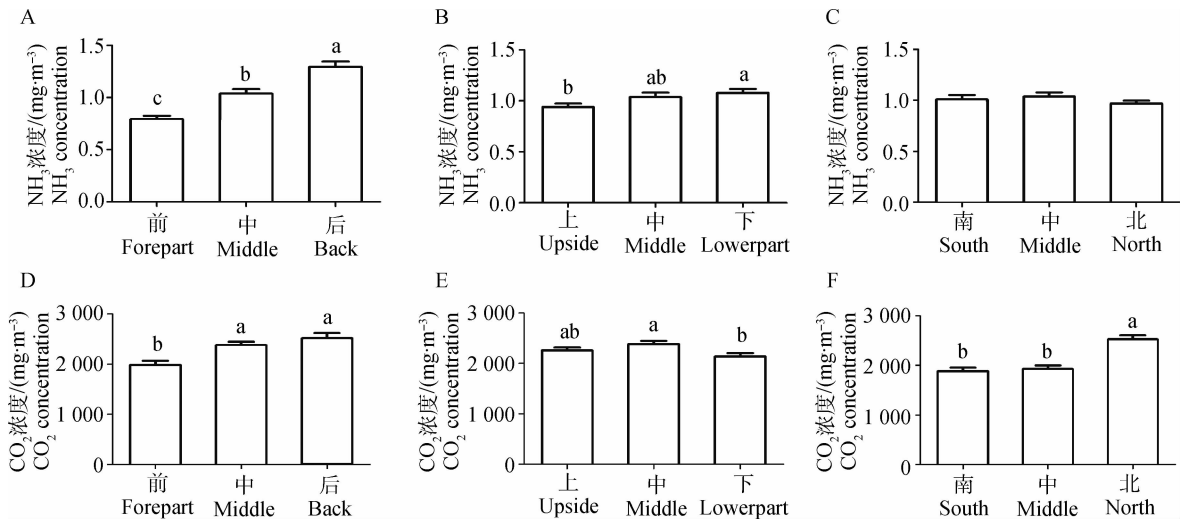


图 11 有害气体浓度在鸡舍不同位置的对比

Fig. 11 Comparison of noxious gas concentrations at different positions in the chicken house

监测鸡舍的前部温度显著低于其他位置,相对湿度也是最低,而风速是最高的。这是因为江苏地区气候特点为冬季寒冷干燥,冷空气从舍外进入舍内,导

致了离进风口近的前部温度和相对湿度偏低,这可能是本试验中温度与相对湿度呈正相关关系的原因,而这一结果与其他舍中的研究结果不一致^[27-28]。鸡群

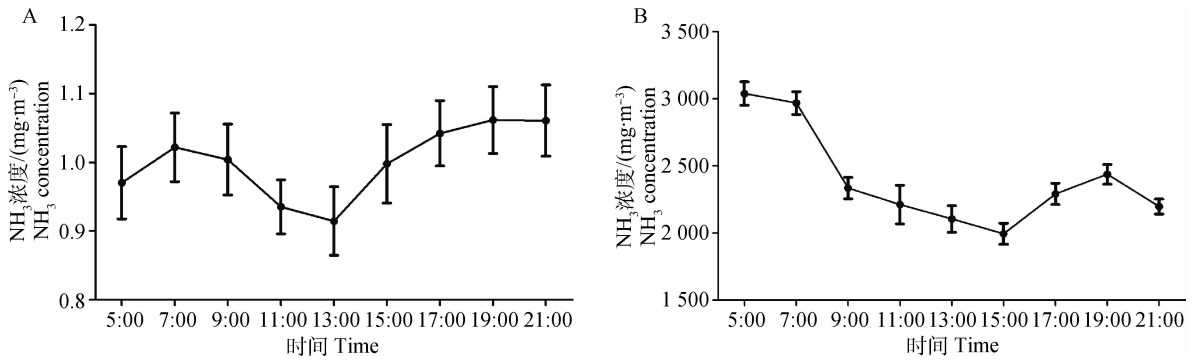


图 12 鸡舍内有害气体浓度在 05:00—21:00 的变化

Fig. 12 Variation of noxious gas concentrations at daytime from 05:00 to 21:00 in the chicken house

活动产生热量,呼吸产生水蒸气^[25],使鸡舍中部的温度和相对湿度较高,南、北两侧靠近采光窗,光照强度最强。9:00时饲养员根据天气情况适当通风改善舍内空气质量,温度稍有下降,之后随舍外光照增强、温度升高,舍内光照强度和温度也逐渐上升,同时在13:00时达到最高值,随后呈逐渐降低趋势,这与温度和光照强度呈正相关的结果一致。

3.2 冬季封闭式鸡舍内颗粒物的分布特点及 PM_{2.5} 成分分析

3.2.1 颗粒物浓度 本试验监测得到鸡舍中不同位置的 PM_{2.5} 浓度为 52.83~69.88 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM₁₀ 浓度范围为 106.23~153.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, TSP 浓度范围为 243.83~390.43 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均远低于中华人民共和国农业行业标准和其他蛋鸡舍。Nimmermark 等^[29] 监测笼养蛋鸡舍中 TSP 浓度为 2.3 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, Li 等^[30] 用不同方法监测蛋鸡舍中 PM_{2.5} 浓度为 125 和 185 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM₁₀ 浓度为 902 和 968 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这些结果的差异与测量仪器、监测时间、鸡的品种、日龄、测量时间、鸡舍构造等都有关系,且本试验选择肉种鸡舍作为试验对象,在日常管理、环境控制上比一般蛋鸡舍要求更高。

鸡舍前部的不同粒径 PM 浓度均显著低于中、后部,这是因为经风机负压送风,舍外低 PM 浓度的空气进入鸡舍,将前部 PM 带到鸡舍中部和后部。在鸡舍上部的 PM₁₀ 和 TSP 浓度显著高于下部,这与杨选将等^[31] 监测结果一致,与鸡舍内部构造和气流方向有关。试验鸡舍每天只在 05:00 喂料 1 次,因间隔时间长,喂料时鸡群易出现躁动、抢食等行为,导致 PM 浓度升高,在 21:00 时,鸡群处于安静状态,各粒径 PM 浓度显著下降。本试验监测结果与 Costa 等^[32] 研究结果一致,PM 浓度与动物活动

有直接联系,喂料时 PM₁₀ 浓度达到最大。

低的 PM 浓度比值表示细颗粒(PM_{2.5})所占比例低^[33]。与 PM 浓度的对比结果和变化趋势不同,PM 浓度比值在鸡舍前、中、后位置没有显著差异。鸡舍上部的 PM_{2.5}/PM₁₀、PM_{2.5}/TSP 和 PM₁₀/TSP 均显著低于下部,表明在鸡舍上部 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的相对含量较少。相对于北部,南部的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 含量相对更多,这可能与光照有关,鸡舍南侧为向阳侧,碳氢化合物和氮氧化物等一次污染物在太阳紫外线照射下发生光化学反应生成二次气溶胶^[34],宋宇等^[35] 研究也表明,日照时间长,气温高及光化学反应活跃,是细颗粒物的重要来源。这与本次监测的结果光照和 PM_{2.5}、PM₁₀ 显著相关但与 TSP 相关性不显著一致。但与南、北两侧的光照没有显著差异相悖,是因为鸡舍外的南边种着常绿乔木,遮挡了部分阳光,但投射进鸡舍的紫外光可能仍比北边强一些。虽然 21:00 时 PM 浓度显著下降了,但比值却显著升高,即此时 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 所占比例上升,表明鸡群安静时, TSP 沉降较快,而 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 粒径较小,具有长时间悬浮的特点^[36]。Li 等^[30] 和 Takai 等^[37] 监测的蛋鸡舍中 PM_{2.5}/PM₁₀ 值分别为 0.14 和 0.11,均小于本试验结果。Bonifacio 等^[33] 在开放式牛舍中测得 PM_{2.5}/PM₁₀ 在 0~0.3 的百分频率为 45%~59%, PM₁₀/TSP 在 0~0.4 占到 77%,在该牛舍中,PM 主要为粗颗粒(PM₁₀ 和 TSP),相较于开放式牛舍,本试验鸡舍中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 为主要 PM。试验鸡舍内 PM 浓度极显著高于舍外,表明鸡舍是重要的 PM 贡献源,与 Kaasik 和 Maasikmets^[27] 的研究结果一致。

3.2.2 PM_{2.5} 成分 本次监测的肉种鸡舍内 PM_{2.5} 的主要成分为 OC,质量浓度为 39.66 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,达

表 6 鸡舍内环境参数间的 Pearson 相关系数
Table 6 Pearson correlation coefficients among microclimatic variables in the chicken house

环境参数 Microclimatic factor	温度 Temperature	相对湿度 Relative humidity	风速 Airflow speed	光照 Illumination	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	CO ₂	NH ₃
温度 Temperature	1								
相对湿度 Relative humidity	0.178***	1							
风速 Airflow speed	0.204***	-0.156***	1						
光照 Illumination	0.194***	-0.307***	0.346***	1					
PM _{2.5}	0.122**	-0.253***	-0.040	0.224***	1				
PM ₁₀	0.064	-0.238***	-0.120**	0.147***	0.885***	1			
TSP	0.063	-0.196***	-0.128**	0.084	0.740***	0.952***	1		
CO ₂	-0.174***	0.028	-0.461***	-0.148***	0.358***	0.482***	0.464***	1	
NH ₃	-0.250***	-0.106*	-0.263***	-0.179***	-0.043	0.049	0.075	0.120**	1

表 7 鸡舍内外环境参数间的 Pearson 相关系数
Table 7 Pearson correlation coefficients of microclimatic variables inside and outside the chicken house

环境参数 Microclimatic factor	温度 Temperature	湿度 Relative humidity	风速 Airflow speed	光照 Illumination	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	CO ₂	NH ₃
相关系数 Correlation coefficient	0.853***	0.883***	-0.010	0.964***	0.825***	0.454***	0.282*	0.207	0.849***

到 PM_{2.5} 质量的 23.63%，OC 和 EC 质量浓度均远高于叶招莲等^[38]于 2016 年 10—11 月在常州地区检测的大气 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的质量浓度。这些结果表明，鸡舍内 PM_{2.5} 的 OC 和 EC，除了大气来源外，还存在其他来源。鸡舍内 PM_{2.5} 的能谱化学组成图也显示鸡舍内 PM_{2.5} 中 C 和 O 含量最高，其次还有 Si、Ca 等元素，有的颗粒中还含有 Na、Cl、K、Zn、P 等元素，与 Cambra-López 等^[4]报道的结果一致。畜舍 PM 中有机物含量较高，皮肤、羽毛、粪尿、饲料等都是畜禽舍中 PM 的重要来源，且化学成分相似，粪中 P 含量相对更高，皮肤和饲料中含有高百分比的 C、O 和少量的 Si、P、Ca，极少量 Cl、Na 等^[4, 39]。结合本试验 PM_{2.5} 能谱图和成分分析结果初步判断，监测的肉种鸡舍中 PM_{2.5} 主要来源于饲料、粪尿、羽毛和皮肤。

此外，颗粒物中还含有较高浓度的 NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、Cl⁻、Ca²⁺ 等离子。在畜禽舍中，作为颗粒物形成的前体气体 NH₃、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO₂)和挥发性有机混合物(VOCs)会在气体-颗粒物转换过程中形成 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 等次级无机颗粒^[4]。Lammel 等^[40]检测畜舍 PM 的成分发现，有较高浓度的 NH₄⁺、NO₃⁻、OC 和 Ca，与本试验结果相似。但本试验样品中阴阳离子不平衡，阴离子浓度是阳离子浓度的 2.57 倍，说明有浓度较高的阳离子没有检测。水溶性离子的相关性结果显示，NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 间存在强的相关性，二者可能有相同的污染来源，NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 也是大气颗粒物中主要的阴离子，主要来源于煤炭、汽油和柴油等的燃烧^[41]，监测鸡舍所在的养殖场生活垃圾主要通过燃烧处理，这成为舍内 NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的来源之一。Na⁺ 与 K⁺，Na⁺ 与 Cl⁻，Mg²⁺ 与 Cl⁻ 之间存在显著的相关关系，这与 Li 等^[42]的研究结果一致。鸡粪、皮肤和饲料是它们的共同来源，鸡粪中富含 Na、K 等多种矿物质元素，Na⁺、K⁺ 和 Cl⁻ 通常作为添加剂添加到饲料中，来自饲料、皮肤和粪便的大多数颗粒中都有大量的 Na、Cl、Mg、K、Ca 等元素^[43]。

扫描电镜图清晰地展现了鸡舍内 PM_{2.5} 的微观形态。相较于 Cambra-López 等^[4]在兔舍的颗粒物扫描电镜图，肉种鸡舍中颗粒物浓度高很多。本试验中部分颗粒表面圆润光滑，呈胶状(图 9B、9D)，该颗粒中含有较多水分，与鸡舍中湿度大的环境相符。结合成分分析结果和陈航宇、赵承美等^[44-45]对大气颗粒物微观形态的分析，本试验中，部分颗粒为

形状比较规则的矿物颗粒(图 9C)，一般是经过化学反应行成的二次颗粒，主要是硫酸盐和硝酸盐类，可能是气体与颗粒物发生反应过程中产生的。还有一些是表面粗糙、形状不规则的矿物颗粒(图 9E)，主要来自于地面扬尘，部分来源于饲料和粪便。图 9F 中颗粒物为链状，赵承美等^[45]指出，链状颗粒物主要为烟尘集合体，可能是来自于养殖场燃烧生活垃圾所产生的烟尘。

3.3 冬季封闭式鸡舍内有害气体分布特点

在监测鸡舍中，NH₃ 在不同位置范围为 0.79~1.29 mg·m⁻³，在不同时间的平均浓度为 0.91~1.06 mg·m⁻³，与陈峰和何玉书^[46]监测结果相近，但 Costa 等^[47]、Koerkamp 等^[48]在蛋鸡舍的监测结果均高于本试验结果，这是因为饲养员管理、监测仪器的使用、鸡的品种日龄等多种因素对 NH₃ 浓度均有影响。鸡舍前部 NH₃ 浓度显著低于中、后部，因为外界的空气进入鸡舍稀释了 NH₃ 浓度^[27]，清粪的传送带位于每列鸡架的底部，故鸡舍下部 NH₃ 浓度显著高于上部。白天 NH₃ 浓度随风速的增加而下降，13:00 后逐渐上升，可能是因为此时采食几乎结束，粪便排放速率增加。05:00 时 NH₃ 浓度低于 21:00，是因为蛋鸡在关灯后进入休息状态，新陈代谢减慢^[49]。

CO₂ 主要来自动物呼吸，也有少量来源于粪便分解^[50]。监测鸡舍不同位置 CO₂ 浓度为 1 886.70~2 527.62 mg·m⁻³，不同时间的平均浓度为 1 993.64~3 037.28 mg·m⁻³，均高于杨选将等^[31]监测的结果。试验鸡舍前部的 CO₂ 浓度显著低于中、后部，与 PM 和 NH₃ 结果相似，中部显著高于下部，北部显著高于南部，是因为在高度上，下部风速最高，这与风机的高度有关，而北侧的风速也低于中部和南侧，鸡舍大门在南侧，饲养员进出开门时舍外寒风由此进入，这也是南侧温度略低于北侧的原因之一。为了保温，夜晚通风达到最低，CO₂ 在舍内积累，在早上浓度达到最高，白天随通风增加在 15:00 时降到最低，下午鸡群排粪增加、通风减少，15:00 后稍有上升趋势，21:00 鸡群安静后，CO₂ 再次下降。

4 结论

4.1 各环境参数在鸡舍中的不同位置存在差异，鸡舍前部(进风口)空气质量相对鸡舍中部和后部(出风口)较好。

4.2 鸡舍内饲养员的活动(输精)和鸡群的活动(采

食)均会引起颗粒物浓度的上升,而通风能够适当地降低颗粒物和有害气体浓度。

4.3 试验鸡舍内不同粒径颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀、TSP)浓度均极显著高于舍外。

4.4 肉种鸡鸡舍内 PM_{2.5} 中 OC 含量最高,成分分析及电镜扫描结果显示,鸡舍 PM_{2.5} 主要来源于肉鸡皮肤、饲料、粪便、地面扬尘和舍外大气等。

4.5 温度与细颗粒(PM_{2.5})正相关性较强,而风速与粗颗粒(PM₁₀、TSP)负相关性较强,相对湿度与各粒径颗粒物浓度均有强负相关性。

4.6 在封闭式试验鸡舍中,通风主要根据舍内温度改变而改变,所以舍外风速对舍内影响不大,但舍内温度、相对湿度、光照和 PM、NH₃ 浓度显著地受到舍外影响。

参考文献(References):

- [1] AL HOMIDAN A, ROBERTSON J F. Effect of litter type and stocking density on ammonia, dust concentrations and broiler performance[J]. *Brit Poult Sci*, 2003, 44(S1): S7-S8.
- [2] WEI F X, HU X F, SA R N, et al. Antioxidant capacity and meat quality of broilers exposed to different ambient humidity and ammonia concentrations[J]. *Genet Mol Res*, 2014, 13(2): 3117-3127.
- [3] GRANTZ D A, GARNER J H B, JONHSON D W. Ecological effects of particulate matter[J]. *Environ Int*, 2003, 29(2-3): 213-239.
- [4] CAMBRA-LÓPEZ M, ARNINK A J A, ZHAO Y, et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem[J]. *Environ Pollut*, 2010, 158(1): 1-17.
- [5] MOSTAFA E. Air-polluted with particulate matters from livestock buildings[M]//Badilla G L, Valdez B, Schorr M. Air Quality-New Perspective. InTech, 2012: 287-312.
- [6] MOSTAFA E, NANNEN C, HENSELER J, et al. Physical properties of particulate matter from animal houses—empirical studies to improve emission modeling[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(12): 12253-12263.
- [7] LOVANH N, LOUGHRIN J, SILVA P. The effect of aged litter materials on polyatomic ion concentrations in fractionated suspended particulate matter from a broiler house[J]. *J Air Waste Manage*, 2016, 66(7): 707-714.
- [8] ANDERSEN C I, VON ESSEN S G, SMITH L M, et

al. Respiratory symptoms and airway obstruction in swine veterinarians: A persistent problem[J]. *Am J Ind Med*, 2004, 46(4): 386-392.

- [9] MICHIELS A, PIEPERS S, ULENS T, et al. Impact of particulate matter and ammonia on average daily weight gain, mortality and lung lesions in pigs[J]. *Prev Vet Med*, 2015, 121(1-2): 99-107.
- [10] RADON K, WEBER C, IVERSEN M, et al. Exposure assessment and lung function in pig and poultry farmers[J]. *Occup Environ Med*, 2001, 58(6): 405-410.
- [11] 申惠敏, 杜娟, 贾秀珍. 鸡舍有毒有害气体的防控[J]. *养禽与禽病防治*, 2014(12): 11-13.
- SHEN H M, DU J, JIA X Z. Prevention and control of hazardous gas in chicken house[J]. *Poultry Raising and Disease Control*, 2014(12): 11-13. (in Chinese)
- [12] KEARNEY G D, SHAW R, PRENTICE M, et al. Evaluation of respiratory symptoms and respiratory protection behavior among poultry workers in small farming operations[J]. *J Agromedicine*, 2014, 19(2): 162-170.
- [13] NEMER M, SIKKELAND L I, KASEM M, et al. Airway inflammation and ammonia exposure among female Palestinian hairdressers: a cross-sectional study[J]. *Occup Environ Med*, 2015, 72(6): 428-434.
- [14] BEKER A, VANHOOSER S L, SWARTZLANDER J H, et al. Atmospheric ammonia concentration effects on broiler growth and performance[J]. *J Appl Poult Res*, 2004, 13(1): 5-9.
- [15] MILES D M, MILLER W W, BRANTON S L, et al. Ocular responses to ammonia in broiler chickens[J]. *Avian Dis*, 2006, 50(1): 45-49.
- [16] 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]. *Agr Ecosyst Environ*, 2015, 199: 10-25.
- [17] 潘礼斌, 徐黛平. 禽舍内有害气体的来源, 危害及控制[J]. *现代农业科技*, 2007(18): 176-177.
- PAN L B, XU D P. Source, hazard and control in poultry house[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2007(18): 176-177. (in Chinese)
- [18] NI J Q, CHAI L L, CHEN L D, et al. Characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter concentrations in high-rise and manure-belt layer hen houses[J]. *Atmos Environ*, 2012, 57: 165-174.
- [19] PUMA M C, MAGHIRANG R G, HOSNI M H, et al. Modeling of dust concentration distribution in a

- simulated swine room under non-isothermal conditions [J]. *Trans. ASAE*, 1999, 42(6):1823-1832.
- [20] 杨景晔, 祖全亮, 王春玲, 等. 蛋鸡笼养育雏舍环境参数监测与分析[J]. 中国家禽, 2017, 39(13):55-57.
YANG J C, ZU Q L, WANG C L, et al. Monitoring and analysis of environmental parameters in a caged brood layer house[J]. *China Poultry*, 2017, 39(13):55-57. (in Chinese)
- [21] 崔文典, 赵国先, 左晓磊, 等. 环境温度与家禽采食量、日粮能量和蛋白水平的关系[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2005(9):23.
CUI W D, ZHAO G X, ZUO X L, et al. Relationship between environmental temperature and poultry feed intake, daily ration energy and protein level[J]. *Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary*, 2005(9):23. (in Chinese)
- [22] DAWKINS M S, DONNELLY C A, JONES T A. Chicken welfare is influenced more by housing conditions than by stocking density[J]. *Nature*, 2004, 427(6972):342-344.
- [23] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准 畜禽场环境质量标准 NY/T388-1999 [J]. 养猪, 2005(1):42-43.
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Environmental quality standard for the livestock and poultry farm [J]. *Swine Production*, 2005(1):42-43. (in Chinese)
- [24] MISSON B H. The effects of temperature and relative humidity on the thermoregulatory responses of grouped and isolated neonate chicks[J]. *J Agr Sci*, 1976, 86(1):35-43.
- [25] 吴鹏威, 陈辉, 高杨, 等. 寒冷季节半开放式蛋鸡舍内环境参数监测与分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013(12):63-66.
WU P W, CHEN H, GAO Y, et al. Monitoring and analysis of environmental parameter in semi-open layer house in cold season [J]. *Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary*, 2013(12):63-66. (in Chinese)
- [26] 王强, 杨凌, 徐玲霞, 等. 笼养蛋鸡养殖环境指标调查分析 [J]. 中国家禽, 2012, 34(11):40-43, 47.
WANG Q, YANG L, XU L X, et al. Investigation of environmental parameters in gaged hen house [J]. *China Poultry*, 2012, 34(11):40-43, 47. (in Chinese)
- [27] KAASIK A, MAASIKMETS M. Concentrations of airborne particulate matter, ammonia and carbon dioxide in large scale uninsulated loose housing cowsheds in Estonia[J]. *Biosyst Eng*, 2013, 114(3):223-231.
- [28] KUMARI P, CHOI H L. Seasonal variability in airborne biotic contaminants in swine confinement buildings [J]. *PLoS One*, 2014, 9(11):e112897.
- [29] NIMMERMARK S, LUND V, GUSTAFASSON G, et al. Ammonia, dust and bacteria in welfare-oriented systems for laying hens[J]. *Ann Agr Env Med*, 2009, 16(1):103-113.
- [30] LI Q F, WANG L L, LIU Z F, et al. Field evaluation of particulate matter measurements using tapered element oscillating microbalance in a layer house [J]. *J Air Waste Manage*, 2012, 62(3):322-335.
- [31] 杨选将, 刘盛南, 詹凯, 等. 八层层叠式笼养蛋鸡舍夏季环境质量参数测定与相关性分析[J]. 中国家禽, 2015, 37(10):26-29.
YANG X J, LIU S N, ZHAN K, et al. Measurement of environmental quality parameters and its correlation analysis of layer house with eight overlap tiers cages in summer[J]. *China Poultry*, 2015, 37(10):26-29. (in Chinese)
- [32] COSTA A, BORGONOVO F, LEROY T, et al. Dust concentration variation in relation to animal activity in a pig barn[J]. *Biosyst Eng*, 2009, 104(1):118-124.
- [33] BONIFACIO H F, MAGHIRANG R G, TRABUE S L, et al. TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} emissions from a beef cattle feedlot using the flux-gradient technique [J]. *Atmos Environ*, 2015, 101:49-57.
- [34] 张远航, 邵可声, 唐孝炎, 等. 中国城市光化学烟雾污染研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1998, 34(2):392-400.
ZHANG Y H, SHAO K S, TANG X Y, et al. The study of urban photochemical smog pollution in China [J]. *Journal of Peking University: Natural Science Edition*, 1998, 34(2):392-400. (in Chinese)
- [35] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 夏季持续高温天气对北京市大气细粒子(PM_{2.5})的影响[J]. 环境科学, 2002, 23(4):33-36.
SONG Y, TANG X Y, ZHANG Y H, et al. Effects on fine particles by the continued high temperature weather in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2002, 23(4):33-36. (in Chinese)
- [36] SEINFELD J H, PANDIS S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016:47-54.
- [37] TAKAI H, PEDERSEN S, JOHNSEN J O, et al. Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in northern Europe [J]. *J Agr Eng Res*, 1998, 70(1):59-77.

- [38] 叶招莲,刘佳澍,李 清,等.常州夏秋季 PM_{2.5}中碳质气溶胶特征及来源[J].环境科学,2017,38(11):4469-4477.
YE Z L, LIU J S, LI Q, et al. Characteristics and source identification of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} measurements during summer and fall in Changzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4469-4477. (in Chinese)
- [39] QI R, MANBECK H B, MAGHIRANG R G. Dust net generation rate in a poultry layer house [J]. *Trans ASAE*, 1992, 35(5): 1639-1645.
- [40] LAMMEL G, SCHNEIDER F, BRÜGGEMANN E, et al. Aerosols emitted from a livestock farm in southern Germany [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2004, 154(1-4): 313-330.
- [41] 张宁宁,何元庆,王春风,等.丽江市冬季大气总悬浮颗粒物(TSP)中水溶性离子化学特征[J].环境科学,2011,32(3):619-625.
ZHANG N N, HE Y Q, WANG C F, et al. Chemical characteristic of water-soluble ions in total suspended particles (TSP) at Lijiang winter time [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3): 619-625. (in Chinese)
- [42] LI Q F, WANG L L, LIU Z F, et al. Major ionic compositions of fine particulate matter in an animal feeding operation facility and its vicinity [J]. *J Air Waste Manage*, 2014, 64(11): 1279-1287.
- [43] 王晓明.鸡粪常规营养成分分析及其开发利用[J].湖北农业科学,2013,52(21):5314-5316.
WANG X M. Analysis on nutrient contents of chicken manure and its utilization and development [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(21): 5314-5316. (in Chinese)
- [44] 陈航宇,王京刚,董树屏,等.北京夏冬季雾霾天气大气单颗粒物特征[J].环境工程学报,2016,10(9):5023-5029.
CHEN H Y, WANG J G, DONG S P, et al. Character of individual aerosol particles under haze days in summer and winter in Beijing, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9): 5023-5029. (in Chinese)
- [45] 赵承美,邵龙义,侯 聪,等.北京、郑州和深圳三城市空气中气溶胶单颗粒特征的扫描电镜分析[J].岩石矿物学杂志,2015,34(6):925-931.
ZHAO C M, SHAO L Y, HOU C, et al. Scanning electron microscopic analysis of individual aerosol particle characteristics in three cities of Beijing, Zhengzhou and Shenzhen [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2015, 34(6): 925-931. (in Chinese)
- [46] 陈 峰,何玉书.笼养蛋鸡舍颗粒物和氨气浓度变化及其影响因素分析[J].中国家禽,2015,37(12):26-30.
CHEN F, HE Y S. Influence factors analysis on particulate matter and ammonia concentrations in cage-rearing layer house [J]. *China Poultry*, 2015, 37(12): 26-30. (in Chinese)
- [47] COSTA A, FERRARI S, GUARINO M. Yearly emission factors of ammonia and particulate matter from three laying-hen housing systems [J]. *Anim Prod Sci*, 2012, 52(12): 1089-1098.
- [48] KOERKAMP P W G G, SPEELMAN L, METZ J H M. Litter composition and ammonia emission in aviary houses for laying hens: Part II, modelling the evaporation of water [J]. *J Agr Eng Res*, 1999, 73(4): 353-362.
- [49] LI H, XIN H W, BURNS R T, et al. Reducing ammonia emissions from laying-hen houses through dietary manipulation [J]. *J Air Waste Manage*, 2012, 62(2): 160-169.
- [50] SHEPHERD T A, ZHAO Y, LI H, et al. Environmental assessment of three egg production systems—Part II. Ammonia, greenhouse gas, and particulate matter emissions [J]. *Poult Sci*, 2015, 94(3): 534-543.

(编辑 郭云雁)