

机械通风式笼养鸡舍内外颗粒物特征与影响因素分析

郭丽^{1,2} 王春^{1,2} 马淑丽^{1,2} 陈东辉^{1,2} 佟金^{1,2} 任丽丽^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 以夏季机械通风式笼养蛋鸡舍内外颗粒物为研究对象, 采用风机将鸡舍内颗粒物排放到舍外, 监测舍内、外颗粒物浓度变化, 并分析颗粒物的传播规律。结果表明: 笼养蛋鸡舍内、外以对人体危害最大的细颗粒物为主, 且鸡舍外颗粒物主要来源于舍内, 其浓度最高可达到舍内的 55.2%; 鸡舍外颗粒物粒径越小, 在空气中传播的距离越远, 越容易对周围居民的健康造成影响。通过分析鸡舍内、外颗粒物浓度日变化发现, 舍内工作人员活动和喂料机工作均会扰动舍内沉积的颗粒物, 并惊动蛋鸡, 致使蛋鸡活动性增强, 引起舍内、外颗粒物浓度升高。同时, 随着蛋鸡日龄的增加或空气湿度的下降, 舍内、外颗粒物浓度均呈现升高的趋势。因此, 控制鸡舍内颗粒物浓度并采用适当的降尘措施将有利于保障蛋鸡和工作人员的健康, 减轻畜禽场颗粒物对周围环境的危害。

关键词: 蛋鸡舍空气质量; 颗粒物浓度; 颗粒物粒径分布; 成分分析

中图分类号: S811.1; X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)01-0276-07

Characterization and Influencing Factors Analysis of Indoor and Outdoor Particulate Matter for Caged Laying Hen House with Mechanical Ventilation

GUO Li^{1,2} WANG Chun^{1,2} MA Shuli^{1,2} CHEN Donghui^{1,2} TONG Jin^{1,2} REN Lili^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: High concentrations of particulate matter (PM) emitted from animal feeding operations (AFOs) may adversely affect the health of the farmers and welfare of animals. Large quantities of PM released to the atmosphere can be transported away from sources causing environmental problem and health issues of people living in the vicinity of farms as well. PM characterization was mainly talked about inside and outside of the mechanical ventilation of caged laying hen house which used the fan to release PM outside of the house, and the propagation law of PM was studied as well. Results showed that the concentration of fine PM, which was the most harmful to the human body, was mainly derived from the inside and outside of the house, and the concentration of the PM outside was up to 55.2%, which mainly came from inside; the smaller the PM size was, the farther the distance was away from the air, which was more likely to affect the health of the vicinity of the farms; by analyzing the concentration inside and outside of daily variation of PM, it was found that the inner staff activities and feeder disturbance inner deposition of PM led to the laying hen activity enhanced which would increase the concentration inside and outside. At the same time, indoor and outdoor PM concentrations were increased with the age of laying hen and air humidity; meanwhile, to control the indoor PM concentrations and using the appropriate measures to remove the indoor PM would help to ensure the health of staffs and welfare of animals, and reduce the hazards of PM to the surrounding environment.

Key words: air quality in laying hen house; particulate matter concentration; particulate size distribution; component analysis

收稿日期: 2017-03-14 修回日期: 2017-07-05

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2013M540252)、国家自然科学基金项目(51575228、41501510)和吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(2016-439)

作者简介: 郭丽(1979—),女,副教授,主要从事农业环境与环境仿生研究,E-mail: liguo2012@jlu.edu.cn

通信作者: 任丽丽(1984—),女,副教授,主要从事仿生吸附材料和农业生物质材料研究,E-mail: liliren@jlu.edu.cn

0 引言

根据悬浮颗粒物的粒径,将其分为 TSP(空气动力学直径小于等于 $100\ \mu\text{m}$)、 PM_{10} (空气动力学直径小于等于 $10\ \mu\text{m}$)、 $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学直径小于等于 $2.5\ \mu\text{m}$),其中 PM_{10} 可以通过呼吸进入体内, $\text{PM}_{2.5}$ 通过呼吸进入人体的肺泡中^[1]。不同粒径的颗粒物通过呼吸可以进入呼吸道的不同部位,进而引发不同的呼吸系统疾病^[2]。流行病学的研究表明,环境颗粒物会引起心脏和肺部有关疾病^[3]。进入到人体呼吸系统的颗粒物会引起呼吸系统感染,并增加患哮喘、血管炎症、肺癌和心脏疾病的危险^[4]。

近年来,随着畜禽养殖规模化发展,养殖过程中会向周围环境释放大量的颗粒污染物^[5],不但对畜禽的活动和生产性能产生影响,而且还会对畜禽和工作人员的健康产生危害^[6]。畜禽舍内的颗粒物浓度是其他室内颗粒物浓度的 10 到 100 倍,且畜禽舍内颗粒物表面会吸附大量的细菌和微生物^[7-8]。在相同颗粒物浓度条件下,畜禽舍颗粒物对人畜的危害更大^[9]。进入到动物体内的颗粒物携带有各种病原体、真菌等能够发生反应,刺激呼吸道或引发炎症^[10-11]。对于畜禽舍内颗粒物,一般采用通风系统控制,将其排放到舍饲周边的环境中^[12],颗粒物可随着空气传播到周围 5 km 左右的范围内^[13],会导致能见度降低,造成植物应激和生态系统的改变,影响植物、森林和陆地生态系统^[14]。畜禽舍排放的颗粒物吸附大量的氨气,可形成次级颗粒物,是大气中酸雨形成的主要原因之一^[15]。而且,排到舍外的颗粒物不仅其自身会产生危害,而且还携带舍内的气味及传播细菌,对周围居民的健康造成影响^[16-17]。

对畜禽舍内颗粒物浓度产生影响的因素有很多。不同畜禽舍内颗粒物浓度不尽相同,除此之外,同一畜禽舍内颗粒物浓度还与畜禽种类、通风、昼夜和季节变化、饲养条件等因素有关^[18]。而排到畜禽

舍外的颗粒物浓度不仅与舍内颗粒物浓度有关,而且还随着禽舍类型、舍内外环境、通风方式等的不同而发生变化^[19]。畜禽养殖过程中排放出的 PM_{10} 占总排放量的 8%,初级 $\text{PM}_{2.5}$ 仅占 $\text{PM}_{2.5}$ 总排放量的 4%^[20]。为了保护畜禽养殖场周围的环境,保障居民和动物的健康,畜禽舍内及其排放到舍外的颗粒物浓度必须受到关注^[21]。

国内关于畜禽舍内颗粒物的研究主要集中在不同畜禽种类及类型的颗粒物浓度研究^[22-25]上,关于畜禽舍外环境的研究集中在畜禽舍内微生物气溶胶及其扩散研究^[26-27]上,对舍内颗粒物在周围环境中的扩散以及影响研究有限。本文以夏季机械通风式笼养蛋鸡舍内外颗粒物为研究对象,采用风机将舍内颗粒物排放到舍外,监测舍内、外颗粒物浓度变化,并分析颗粒物的传播规律,以期对笼养蛋鸡舍外颗粒物的逸散控制奠定一定的理论基础。

1 试验和方法

1.1 试验场地概况

试验场地在长春市郊区某笼养蛋鸡养殖场。试验鸡舍为育成鸡舍,鸡舍长 53 m,宽 10 m,高 3 m,鸡舍平面图如图 1 所示。鸡舍采用机械通风和自然通风相结合的通风方式,东墙设有一个前门和 2 个湿帘,西墙设有 4 台风机,南墙开设有一个后门和 17 个窗户,北墙开有 19 个窗户。监测开始时鸡舍内的“海兰褐”蛋鸡鸡龄为 60 d,蛋鸡数量为 8 000 只左右。饲养方式为层叠笼养(共 3 层)。每天喂料 2 次,时间分别为 10:00—10:30、16:00—16:30,饲料是该公司自加工配比。鸡舍采用乳头式饮水器,夏季采用湿帘保持鸡舍内的温湿度(当舍内温度高于 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开启),由于监测试验在夏季进行,因此湿帘一直处于开启状态。

1.2 监测时间和内容

监测试验在 2016 年 7—8 月进行,每月中下旬选取微风晴朗的天气(为减小舍外周边环境对颗粒物浓度变化的影响)进行为期 6 d 的监测。据相关

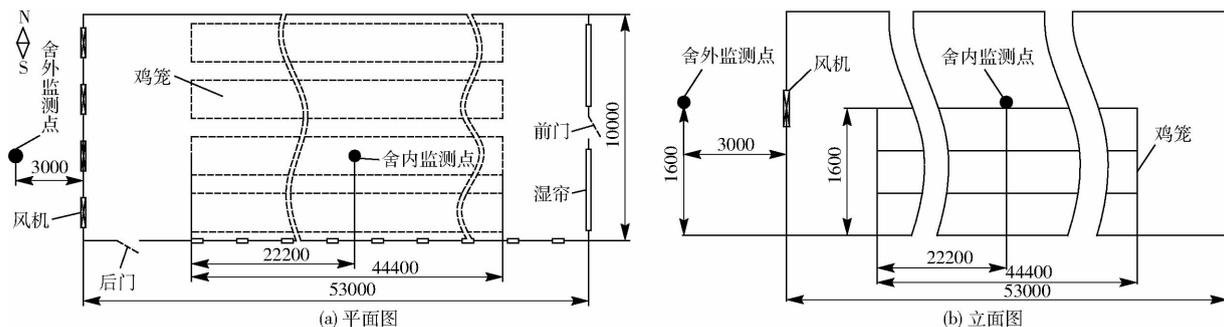


图 1 鸡舍结构及舍内、外监测点示意图(未按比例)

Fig. 1 Schematic diagrams of monitoring locations inside and outside laying hen house(not to scale)

研究表明,鸡舍内白天颗粒物浓度高于晚上,且此时间段内发生的各种舍内作业亦会影响舍内颗粒物浓度变化^[28],选取 10:00—16:00 作为监测时间段,因为此时间段试验鸡舍的喂食和工作人员的其他作业均在进行,且此时间段内风机(DS-1380型,通风量 35 000 m³/h)全部处于开启状态。温湿度是影响颗粒物浓度的一个主要因素,因此本研究在颗粒物浓度监测点处同时监测舍内外温湿度;此外,由于颗粒物粒径越小,进入呼吸道的部位就越深,对人体的危害相对也就越大^[23],因此本研究除了监测舍内外 PM₁₀浓度、PM_{2.5}浓度外,还监测了 PM₁(空气动力学直径小于等于 1 μm)浓度。同时,在舍内过道及舍外监测点附近采集积尘,用密封袋带回实验室,进行颗粒物成分分析。

1.3 监测方法

1.3.1 仪器设备

使用 Dust TruckDRX Desktop(8533型,美国 TSI 公司)对颗粒物浓度进行监测,颗粒物浓度精度: ±0.001 mg/m³;该仪器的主要特点是能同时检测 PM₁、PM_{2.5}、呼吸性粉尘和 PM₁₀等不同粒径的气溶胶质量浓度,这是其他仪器所没有的功能;Dust Truck 检测仪内部配有数据记录系统、光散射激光光度计和抽气泵,可供气溶胶数值的实时观测;它使用鞘气系统隔离了气溶胶和光学室,保证了光学元件的清洁,提高了设备的可靠性,降低了维修率^[29]。本研究每隔 1 min 采集一次数据,仪器自动保存数据,试验结束后利用仪器自带的分析软件导入计算机,进行统一分析计算。舍内外监测点的温湿度采用 AOSONG 监测仪(AH200型,中国奥松公司),温度测量范围:外置探头 -40℃~80℃,温度精度: ±0.3℃(25℃);相对湿度测量范围:0~99.9%,相对湿度精度: ±2%。颗粒物成分分析使用 ZEISS 扫

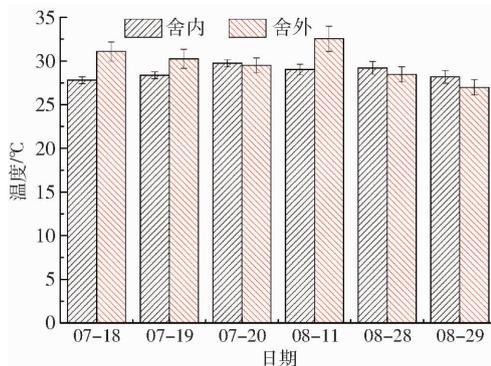


图2 舍内、外温湿度对比

Fig. 2 Comparisons of indoor and outdoor temperature and relative humidity

2.2 舍内、外颗粒物浓度对比

试验期间舍内、外颗粒物浓度如图 3 所示。舍内 PM₁₀平均浓度范围为 0.265~1.145 mg/m³,舍外

描电镜(ECO-18型,德国蔡司公司)和 OXFORD 能谱仪(INCA型,英国牛津仪器)。

1.3.2 监测点分布

据相关研究表明,相对于舍内颗粒物浓度的日变化而言,监测点位置的变化对颗粒物浓度的影响要小^[30],因此舍内颗粒物浓度监测点选在正对着风机的鸡笼中部;舍外监测点选取正对着此风机的同样高度位置,距离风机 3 m(在减少风机对监测点干扰的情况下选取离鸡舍最近的距离,且舍内、外同时进行监测),温湿度计的位置选取与粉尘监测仪相同的位置,以便于实时监测颗粒物监测点的温湿度。粉尘监测仪和温湿度计的监测点如图 1 所示。

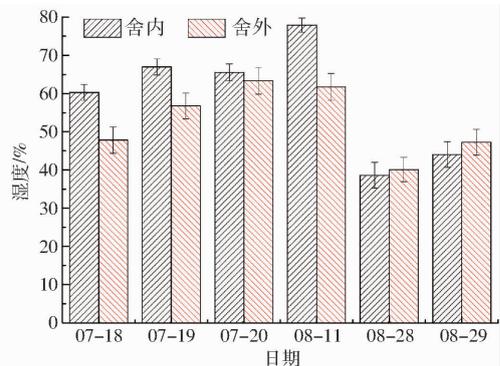
1.4 统计分析软件

采用 Excel(2010,美国微软公司)对数据进行基本统计分析。采用 SPSS(22.0,美国 IBM 公司)软件,利用双变量相关性分析温度、相对湿度与颗粒物浓度的关系。采用 Origin(9.0,OriginLab 公司)软件将分析数据生成图示。

2 结果与讨论

2.1 舍内、外温湿度对比

试验期间舍内、外温湿度对比如图 2 所示。试验期间舍内温度为 27.6~29.7℃,舍外温度为 26.9~32.4℃;舍内相对湿度为 39.3%~77.4%,舍外相对湿度为 40.4%~64.1%。舍内、外温度相差不大,舍外温度略有变化。舍内温度基本保持在恒定温度,这是因为舍内采用湿帘法在一定程度上可以保持舍内温度恒定;舍外相对湿度在 8 月 28 日之前高于舍内,之后低于舍内,且 8 月 28 日与 8 月 29 日相对湿度明显降低。这一方面是因为在 8 月底温度逐渐降低,湿帘关闭;另一方面是由于此时天气逐渐干燥,使得舍内外湿度明显低于其他时间。



PM₁₀平均浓度范围为 0.169~0.720 mg/m³。我国关于畜禽养殖场空气环境质量标准规定畜禽舍内 PM₁₀浓度为 4 mg/m³,禽舍缓冲区(畜禽舍外围,沿

场院向外小于等于 500 m 范围内) PM_{10} 浓度为 $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ ^[31]。畜禽舍内颗粒物浓度符合国家标准,但是禽舍缓冲区的颗粒物浓度在 8 月 28 日和 8 月 29 日超过国家标准。而我国空气质量准则中 $PM_{2.5}$ 的日均浓度一级标准为 $35 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[32]。而畜禽舍缓冲区的 $PM_{2.5}$ 浓度变化范围为 $0.094 \sim 0.364 \text{ mg}/\text{m}^3$,此浓度远远高于国家空气质量准则中关于 $PM_{2.5}$ 的浓度标准。陈峰等^[18]关于笼养蛋鸡舍内颗粒物浓度的研究测得 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度分别为 0.290 、 $0.260 \text{ mg}/\text{m}^3$,本次试验测得的舍内 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度在 7 月 18 日低于此值, $PM_{2.5}$ 的浓度在 7 月 19 日低于此值,其余日期所测得的浓度均高于此值。舍内 PM_1 平均浓度范围为 $0.148 \sim 0.577 \text{ mg}/\text{m}^3$,舍

外 PM_1 平均浓度范围为 $0.092 \sim 0.340 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。国内外尚无对畜禽舍内、外 PM_1 浓度的相关标准,且国内外关于笼养蛋鸡舍内 PM_1 浓度的研究亦有限。

监测结果显示,舍内颗粒物浓度高于舍外颗粒物浓度,且随着试验的进行,舍内、外颗粒物浓度均有所升高。这与蛋鸡的日龄有关,WINKEL 等^[33]的研究也证明了蛋鸡舍内颗粒物浓度随着鸡龄的增长而升高。同时,舍外颗粒物浓度与舍内颗粒物浓度也存在一定的关系,舍内颗粒物浓度升高的同时,舍外颗粒物浓度也随之升高。此外,空气湿度也能影响颗粒物浓度^[34],在 8 月 28、29 日空气湿度明显降低,因此也是造成这 2 日舍内、外颗粒物浓度升高的原因。

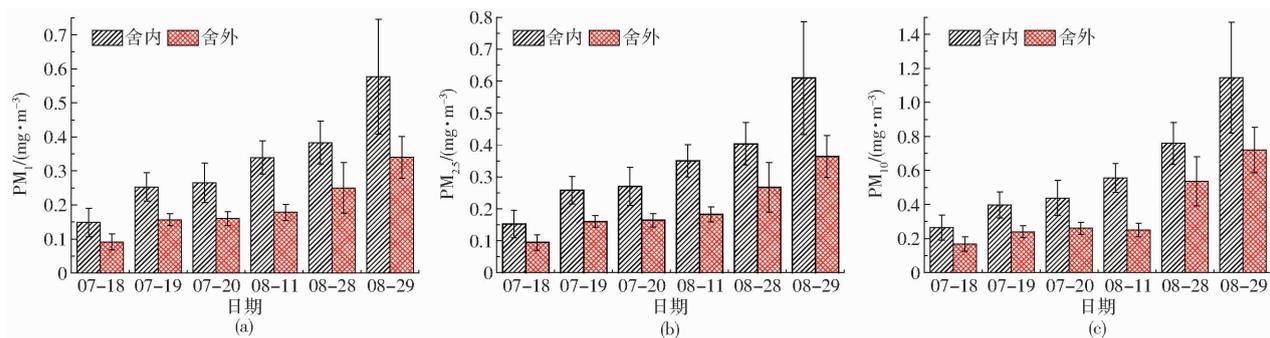


图 3 舍内、外颗粒物浓度对比

Fig. 3 Comparisons of indoor and outdoor PM concentrations

2.3 舍内、外颗粒物浓度相关性分析

2.3.1 舍内、外颗粒物浓度日变化

为了解舍内外颗粒物浓度日变化的趋势,选取 7 月 20 日舍内、外颗粒物浓度数据进行分析,如图 4 所示。在监测试验进行期间,舍内颗粒物浓度整体呈现波动趋势,这是由于舍内工作人员的作业对沉积的颗粒物进行扰动,致使颗粒物再悬浮从而影响颗粒物浓度出现变化。在 10:30 和 15:30 左右舍内颗粒物浓度呈现出明显的高峰,这是由于此时鸡舍进行喂料,自动喂料机经过仪器时致使沉积的颗粒物再悬浮,造成颗粒物浓度升高。随着喂料作业的开始舍内颗粒物浓度逐渐下降。在 11:00—11:30 鸡舍内颗粒物呈现下降趋势,且此时段内颗粒物浓

度波动较小,这是由于此时段工作人员休息,鸡舍内无工作人员干扰,颗粒物沉积,故此时颗粒物浓度变化较小。舍内工作人员活动和喂料机工作均会扰动沉积的颗粒物,并惊动蛋鸡,致使蛋鸡活动性增强,也引起舍内颗粒物浓度变化,这与 LIN 等^[34]的蛋鸡舍内颗粒物浓度与蛋鸡的活动性有关的结论相一致。

在监测试验进行期间,鸡舍外颗粒物浓度与鸡舍内颗粒物浓度变化趋势相似,由图 4 可以看出,在 10:30 和 15:30 左右,由于鸡舍内喂料作业,鸡舍外颗粒物浓度亦呈现出较大的波动趋势;在喂料作业结束后,颗粒物浓度逐渐稳定。在 11:00—11:30 颗粒物浓度呈现轻微下降趋势,之后趋于稳定,这是由

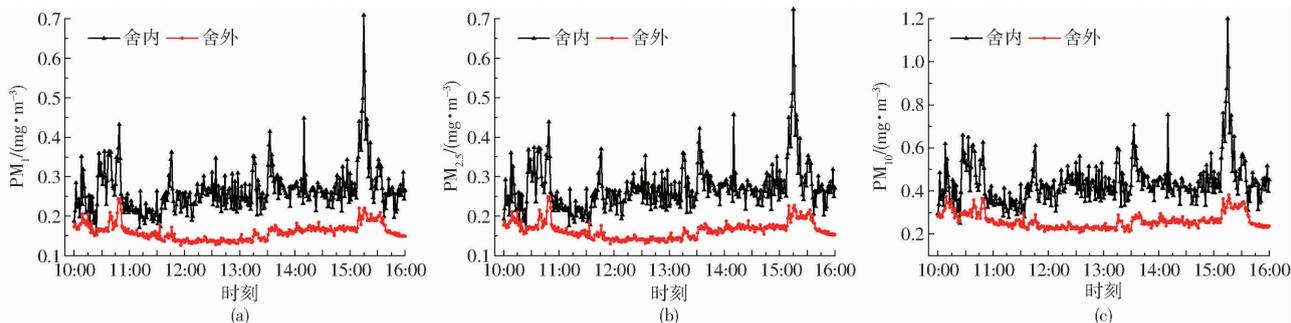


图 4 舍内、外颗粒物浓度日变化

Fig. 4 Diurnal variations of indoor and outdoor PM concentrations

于鸡舍内工作人员的收蛋作业对鸡舍内颗粒物扰动属于局部较小的扰动,因此对鸡舍外颗粒物浓度影响较小。

2.3.2 舍内、外颗粒物浓度相关性

鸡舍内、外 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 之间存在显著相关性($P < 0.01$) (表1)。分析结果说明,舍外颗粒物很大程度上来源于舍内,控制舍内颗粒物浓度可以在一定程度上降低舍外颗粒物浓度,减轻畜禽场颗粒物对周围环境的危害。

表1 舍内、外颗粒物浓度 Pearson 系数

Tab.1 Pearson's correlation coefficient for indoor and outdoor PM concentrations

| | 鸡舍内 PM_1 | 鸡舍内 $PM_{2.5}$ | 鸡舍内 PM_{10} |
|----------------|------------|----------------|---------------|
| 鸡舍外 PM_1 | 0.986 ** | 0.987 ** | 0.992 ** |
| 鸡舍外 $PM_{2.5}$ | 0.982 ** | 0.984 ** | 0.993 ** |
| 鸡舍外 PM_{10} | 0.931 ** | 0.936 ** | 0.971 ** |

注:**在0.01水平上显著相关,*在0.05水平上显著相关,下同。

而舍外颗粒物浓度相对于其舍内浓度的比在一定程度上反应了舍内排放到舍外的颗粒物浓度的比率,浓度比越大,排放到舍外的颗粒物越多。试验期间舍内、外 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度比如表2所示,其平均浓度比分别为39.6%、39.3%、39.5%,变化范围分别为35.6%~47.8%、35.3%~48.2%、31.8%~55.2%。舍外颗粒物浓度最高可达到舍内的55.2%,排出到舍外的颗粒物将向周围大气扩散,在一定程度上对周围环境产生影响,并会对周围居民的身体健康造成影响。

2.4 不同粒径颗粒物浓度比率

试验期间舍内颗粒物 $PM_1/PM_{2.5}$ 、 PM_1/PM_{10} 、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比率如图5a所示。舍内颗粒物浓度平均比率分别为96.7%、56.9%、58.8%,变化范围为94.7%~98.1%、50.5%~63.5%、53.1%~64.8%,MODINI等^[35]监测所得的 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比

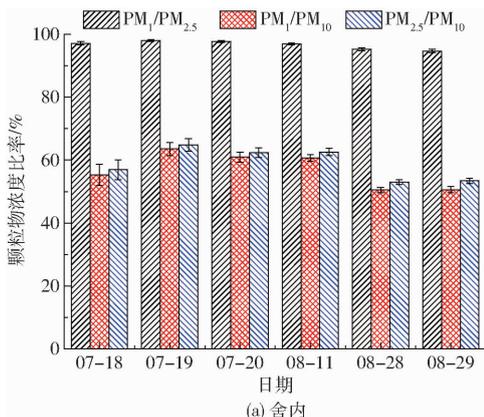


表2 舍外相对于舍内颗粒物浓度比率
Tab.2 Ratios of indoor PM concentration to that of outdoor %

| | 7月 18日 | 7月 19日 | 7月 20日 | 8月 11日 | 8月 28日 | 8月 29日 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PM_1 | 35.6 ± 7.4 | 38.1 ± 4.9 | 39.0 ± 7.5 | 47.8 ± 4.5 | 36.9 ± 6.5 | 40.4 ± 6.4 |
| $PM_{2.5}$ | 35.3 ± 7.4 | 37.9 ± 5.0 | 38.9 ± 7.5 | 48.2 ± 4.6 | 35.8 ± 6.5 | 39.6 ± 6.3 |
| PM_{10} | 33.5 ± 7.4 | 40.1 ± 5.9 | 40.0 ± 8.5 | 55.2 ± 5.6 | 31.8 ± 6.3 | 36.4 ± 5.5 |

率为23%,本试验所测得的数值远高于该值。可以看出,舍内颗粒物以细颗粒物为主。研究表明,粒径越小的颗粒物对人和动物的危害越大^[23],因此,必须对舍内颗粒物进行控制。

试验期间舍外颗粒物 $PM_1/PM_{2.5}$ 、 PM_1/PM_{10} 、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比率如图5b所示。其平均比率分别为96.1%、57.8%、60.0%,变化范围为93.1%~97.9%、46.8%~71.1%、50.0%~72.6%。可以看出,舍外颗粒物同样以细颗粒物为主,且排出到舍外的颗粒物,粒径越小,在空气中传播的距离越远^[36],越容易对周围居民的健康造成影响。因此,排出到舍外的颗粒物必须采取一定的措施进行控制。

通过对舍内、外颗粒物浓度比率的分析,可以得出:舍内、外颗粒物以对人体危害最大的细颗粒物为主。

2.5 舍内、外颗粒物成分分析

试验期间收集舍内地面的颗粒物积尘和舍外监测点附近颗粒物积尘并对其进行成分分析,舍内颗粒物成分分析结果如图6a所示,主要成分为C、O、Al、Si、P、S、K、Ca、Fe、Cl、Na;舍外颗粒物成分分析结果如图6b所示,主要成分为C、O、Al、Si、P、S、K、Ca、Fe;舍内、外颗粒物各元素含量如表3所示。分析结果显示,舍内、外颗粒物成分均含有为C、O、Al、Si、P、S、K、Ca、Fe,舍内颗粒物的主要成分还有Cl、

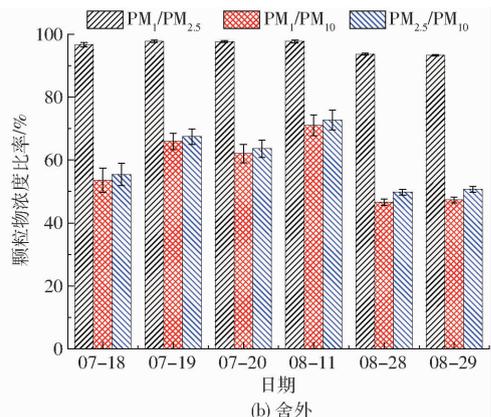


图5 舍内、外颗粒物浓度比率对比

Fig.5 Comparisons of ratio of PM concentrations at different sizes

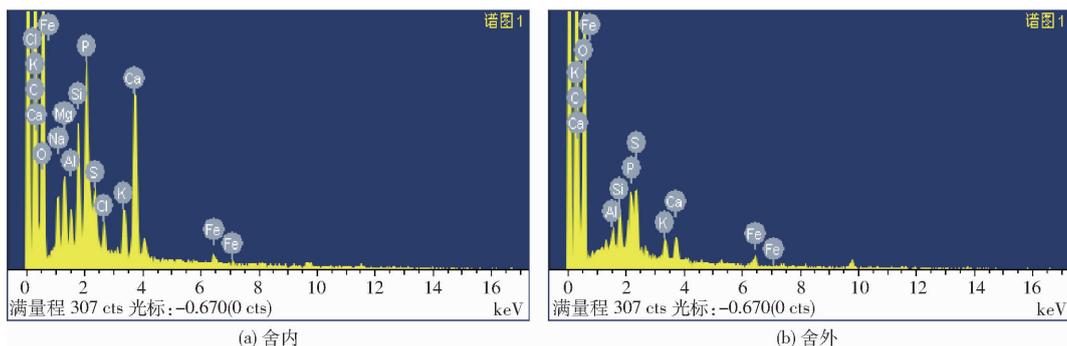


图 6 舍内、外颗粒物成分分析

Fig. 6 Chemical characterization analysis of PM indoor and outdoor

表 3 舍内、外颗粒物元素含量百分比

Tab. 3 Average element relative concentration for PM indoor and outdoor %

| 元素 | 舍内 | | 舍外 | |
|----|-------|-------|-------|-------|
| | 质量百分比 | 原子百分比 | 质量百分比 | 原子百分比 |
| C | 44.19 | 54.76 | 60.44 | 68.53 |
| O | 41.51 | 38.61 | 34.78 | 29.61 |
| Na | 1.37 | 0.89 | | |
| Mg | 1.23 | 0.76 | | |
| Al | 0.49 | 0.27 | 0.35 | 0.18 |
| Si | 1.49 | 0.79 | 0.83 | 0.40 |
| P | 2.65 | 1.27 | 0.21 | 0.09 |
| S | 0.61 | 0.28 | 1.23 | 0.52 |
| Cl | 0.58 | 0.24 | | |
| K | 1.11 | 0.42 | 0.56 | 0.19 |
| Ca | 4.14 | 1.54 | 0.81 | 0.28 |
| Fe | 0.63 | 0.17 | 0.78 | 0.19 |
| 总量 | 100 | | 100 | |

Na, Mg; 舍内、外颗粒物各元素的含量不同, 舍内 C、O、S、Fe 元素的含量低于舍外, Al、Si、P、K、Ca 元素

的含量高于舍外。通过舍内、外颗粒物的成分分析可知, 舍内外颗粒物主要成分含量不同, 但是各主要元素均存在, 因此舍内部分颗粒物通过风机排放到了舍外。

养殖场管理人员每天上午均会对舍内进行清扫, 舍内一部分积尘直接被清扫出鸡舍, 无法随着风机排出到舍外, 因此舍内外颗粒物成分略有区别。LI 等^[37]的研究也表明了舍内外颗粒物成分及其含量不相同。

3 结论

(1) 鸡舍内、外颗粒物浓度随着蛋鸡日龄的增加而升高, 随着空气湿度的降低而升高。

(2) 鸡舍外颗粒物浓度相对于舍内颗粒物浓度的比率越大, 舍内排放到舍外的颗粒物越多, 舍内颗粒物排至舍外的最高浓度比率为 55.2%。

(3) 鸡舍内、外颗粒物以对人体危害最大的细颗粒物为主, 且舍外颗粒物很多来自舍内。

参 考 文 献

- 刘岩磊, 孙岚, 张英鸽. 粒径小于 2.5 微米可吸入颗粒物的危害[J]. 国际药学研究杂志, 2011, 38(6): 428 - 431. LIU Yanlei, SUN Lan, ZHANG Yingge. Hazards of inhalable particulates PM2.5 on human health[J]. Journal of International Pharmaceutical Research, 2011, 38(6): 428 - 431. (in Chinese)
- BROWN D M, WILSON M R, MACNEE W, et al. Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2001, 175(3): 191 - 199.
- 常志勇, 杨道, 穆海峰, 等. 基于粒径谱仪的畜禽场颗粒物测量研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 246 - 251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150834&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.034. CHANG Zhiyong, YANG Xiao, MU Haifeng, et al. Real-time measurement of particulate matter emitted from animal feeding operation based on aerodynamic particle sizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 246 - 251. (in Chinese)
- POPE C A, BURNETT R T, THUN M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. Journal of the American Medical Association, 2002, 287(9): 1132 - 1141.
- TAKAI H, PEDERSEN S, JOHNSEN JO, et al. Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 70(1): 59 - 77.
- DONHAM K J, LEININGER J R. Animal studies of potential chronic lung-disease of workers in swine confinement buildings[J]. American Journal of Veterinary Research, 1984, 45(5): 926 - 931.
- 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.
- NI J Q, CHAI L, CHEN L, et al. Characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter concentrations in high-rise and manure-belt layer hen houses[J]. Atmospheric Environment, 2012, 57: 165 - 174.

- 9 DONHAM K J, LEININGER J R. Animal studies of potential chronic lung disease of workers in swine confinement buildings[J]. American Journal of Veterinary Research, 1984, 45(5):926-931.
- 10 HAYTER R B, BESCH E L. Airborne particle deposition in the respiratory tract of chickens[J]. Poultry Science, 1974, 53: 1507-1511.
- 11 MOSTAFA E, BUESCHER W. Indoor air quality improvement from particle matters for laying hen poultry houses[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(1):22-36.
- 12 WINKEL A, MOSQUERA J, KOERKAMP P W G G, et al. Emissions of particulate matter from animal houses in the Netherlands [J]. Atmospheric Environment, 2015, 111: 202-212.
- 13 李冬梅, 王丽冬. 畜禽养殖过程中排放的气体污染物及其危害[J]. 现代畜牧科技, 2015(7):184.
- 14 GRANTZ, D A, GARNER J H B, JOHNSON D W. Ecological effects of particulate matter [J]. Environment International, 2003, 29(2): 213-239.
- 15 LAMMEL G, SCHNEIDER F, BRÜGGEMANN E, et al. Aerosols emitted from a livestock farm in southern Germany [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2004, 154(1):313-330.
- 16 BAKUTIS B, MONSTVILIENE E, JANUSKEVICIENE G. Analyses of airborne contamination with bacteria, endotoxins and dust in livestock barns and poultry houses[J]. Acta Veterinaria Brunensis, 2004, 73(2): 283-289.
- 17 CAI L, KOZIEL J A, LO Y C, et al. Characterization of volatile organic compounds and odorants associated with swine barn particulate matter using solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1102(1-2):60-72.
- 18 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.
- 19 CHEN Feng, HE Yushu. Influence factors analysis on particulate matter and ammonia concentrations in cage-rearing layer house [J]. China Poultry, 2015, 37(12):26-30. (in Chinese)
- 19 ELLENH H, BOTTCHE R W, VON WACHENFELT E, et al. Dust levels and control methods in poultry houses[J]. Journal of Agricultural Safety and Health, 2000, 6(4):275-282.
- 20 CAMBRA-LÓPEZ M, AARNINK A J A, ZHAO Y, et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: a review of an air pollution problem[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(1):1-17.
- 21 HINZ T, LINKE S. A comprehensive experimental study of aerial pollutants in and emissions from livestock buildings. Part 2: results[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 70(1):119-129.
- 22 何玉书, 李保明, 施正香, 等. 北京地区平养育成鸡舍粉尘浓度分布的测试分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊):103-107.
- 23 HE Yushu, LI Baoming, SHI Zhengxiang, et al. Dust spatial distribution and emission in loose-rearing pullets house [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(Supp.):103-107. (in Chinese)
- 23 王卫红, 刘双红, 任永鑫, 等. 北方规模化猪场周围环境空气中 PM10 的监测分析[J]. 中国兽医杂志, 2015, 51(12):95-97.
- 24 胡仲仁, 杨红远, 李卫娟, 等. 高床山羊舍空气环境评价[J]. 家畜生态学报, 2008, 29(3):72-75.
- 25 梅玮, 祁巨中, 刘英玉, 等. 新疆北疆地区某集约化肉牛养殖场春季环境指标评价[J]. 中国畜牧兽医, 2015, 42(7):1738-1746.
- 26 MEI Wei, QI Juzhong, LIU Yingyu, et al. Evaluation of the environmental indices in a beef cattle farm in the north of Xinjiang [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2015, 42(7):1738-1746. (in Chinese)
- 26 姚美玲, 张彬, 柴同杰. 鸡兔舍耐药大肠杆菌气溶胶向环境扩散的研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(8):60-64.
- 27 YAO Meiling, ZHANG Bin, CHAI Tongjie. Antibiotic resistance of airborne *Escherichia coli* from hen house and rabbitry and their spreading to surroundings [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(8):60-64. (in Chinese)
- 27 柴同杰, 柴家前, MUELLER W. 牛舍空气微生物及向环境传播的研究[J]. 中国预防兽医学报, 1999, 21(4):311-314.
- 28 MOSTAFA E, BUESCHER W. Indoor air quality improvement from particle matters for laying hen poultry houses[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(1): 22-36.
- 29 QUIROS D C, YOON S, DWYER H A, et al. Measuring particulate matter emissions during parked active diesel particulate filter regeneration of heavy-duty diesel trucks[J]. Journal of Aerosol Science, 2014, 73: 48-62.
- 30 VAN RANSBEECK N, VAN LANGENHOVE H, VAN WEYENBERG S, et al. Typical indoor concentrations and emission rates of particulate matter at building level: a case study to setup a measuring strategy for pig fattening facilities [J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(3):280-289.
- 31 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.
- 32 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准 (GB3095—2012) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- 33 WINKEL A, MOSQUERA J, KOERKAMP P W G G, et al. Emissions of particulate matter from animal houses in the Netherlands [J]. Atmospheric Environment, 2015, 111:202-212.
- 34 CAMBRA-LÓPEZ M, AARNINK A J A, YANG Z, et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: a review of an air pollution problem[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(1):1-17.
- 35 LIN X, ZHANG R, JIANG S, et al. Emissions of ammonia, carbon dioxide and particulate matter from cage-free layer houses in California[J]. Atmospheric Environment, 2017, 152: 246-255.
- 36 MODINI R L, AGRANOVSKI V, MEYER N K, et al. Dust emissions from a tunnel-ventilated broiler poultry shed with fresh and partially reused litter[J]. Animal Production Science, 2010, 50(6): 552-556.
- 37 LI Y, CHEN Q, ZHAO H, et al. Variations in PM10, PM2.5 and PM1.0 in an urban area of the Sichuan basin and their relation to meteorological factors[J]. Atmosphere, 2015, 6(1):150-163.
- 38 LI Q F, WANG L, LIU Z, et al. Chemical characterization of particulate matter emitted from animal feeding operations [C] // ASABE 2009 Annual Meeting, ASABE Paper 095948, 2009.