

周忠凯, 霍连飞, 王慧鑫, 等. 畜禽舍颗粒物排放特征及控制技术与装备[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(5): 1421-1431.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.05.030

## 畜禽舍颗粒物排放特征及控制技术与装备

周忠凯, 霍连飞, 王慧鑫, 汤 赤, 孟力力, 柏宗春

(江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 畜禽养殖舍是重要的颗粒物排放源, 了解畜禽舍颗粒物的排放特性及其控制技术对于畜禽健康生产和环境健康均具有重要意义。本文综述了国内外主要畜禽舍颗粒物质量浓度分布规律和排放特征, 总结了畜禽养殖设施颗粒物控制技术与装备研究发展现状, 分析了不同控制技术的主要特征及颗粒物去除效率, 对于了解不同畜禽饲养系统颗粒物排放特征, 选择最佳的颗粒物控制措施具有重要参考意义。

**关键词:** 畜禽舍;  $PM_{10}$ ;  $PM_{2.5}$ ; 环境质量; 排放特征; 控制技术与装备

**中图分类号:** S815.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2022)05-1421-11

## Emission characteristics and control technology and equipment of particulate matter in livestock and poultry houses

ZHOU Zhong-kai, HUO Lian-fei, WANG Hui-xin, TANG Chi, MENG Li-li, BAI Zong-chun

(*Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory for Protected Agricultural Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China*)

**Abstract:** Livestock and poultry houses are essential sources of particulate matter emission. Understanding the emission characteristics and control technology of particulate matter in livestock and poultry houses is significant for livestock and poultry production and environmental health. This paper summarized the mass concentration distribution and emission characteristics of particulate matter in livestock and poultry houses, reviewed the research and development status of particulate matter control technology and equipment, and analyzed the main characteristics and particulate matter removal efficiency of different control technologies. It is of great significance to understand the particulate matter emission characteristics of different livestock and poultry breeding systems and select the best technical measures for particulate matter control.

**Key words:** livestock and poultry houses;  $PM_{10}$ ;  $PM_{2.5}$ ; environmental quality; emission characteristics; control technology and equipment

畜禽集约化养殖过程产生大量的颗粒物(PM), 成为大气中可吸入性颗粒物  $PM_{10}$  (粒径  $\leq$

$10.0 \mu m$ ) 和细颗粒物  $PM_{2.5}$  (粒径  $\leq 2.5 \mu m$ ) 的重要来源之一<sup>[1-2]</sup>。颗粒物表面附着大量污染气体、重金属离子和病原微生物等, 诱发动物肺炎等多种呼吸道疾病, 颗粒物通过通风系统进入大气循环, 成为大气污染物的重要组成部分, 严重影响动物健康和养殖场周围的空气环境状况<sup>[3]</sup>。已有的研究结果显示, 畜禽养殖场 PM 主要来源于畜禽粪便、毛皮、饲料和细菌等<sup>[4]</sup>, 不同动物类型和养殖工艺其主要来

收稿日期: 2022-03-11

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(20)3007 ]

作者简介: 周忠凯(1984-), 男, 山东茌平人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事畜禽生产过程环境质量控制与污染物排放监测研究。(E-mail) zhouzk@jaas.ac.cn

源存在一定的差异<sup>[5]</sup>。畜禽养殖过程中 PM 的排放受到动物活动、饲料类型、养殖工艺、养殖模式以及舍内粪便管理的影响<sup>[6-9]</sup>。为有效控制畜禽养殖过程 PM 的产生和排放,降低养殖过程 PM 对动物健康的影响,目前对 PM 源头控制技术、过程控制技术和末端去除技术<sup>[10]</sup>进行了大量的研究。由于动物类型、畜禽舍结构和养殖工艺的差异,PM 控制技术与设备系统的选择以及适用性存在很大的差异,不同 PM 控制技术在 PM 质量浓度控制和减排效果以及适用性方面需要进一步评估。本文综述了国内外主要畜禽舍颗粒物质量浓度分布规律和排放特征,分析不同畜禽品种和养殖工艺对 PM 排放的影响,总结了国内外主要的畜禽养殖设施颗粒物控制技术与装备系统,为了解不同畜禽饲养系统颗粒物排放特征,选择最佳的颗粒物控制技术与设备提供参考。

## 1 不同畜禽舍颗粒物质量浓度分布规律及排放特征

### 1.1 猪舍可吸入性颗粒物排放

不同生猪生长阶段舍内颗粒物的平均质量浓度与排放率见表 1。结果显示,不同研究猪舍内颗粒物的质量浓度变化范围较大,PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度范围分别为 3.0~2 300.0 μg/m<sup>3</sup>和 2.0~563.0 μg/m<sup>3</sup>。其中,分娩、妊娠母猪舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度分别为 187~826 μg/m<sup>3</sup>和 19.2~101.0 μg/m<sup>3</sup>,断奶仔猪舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度分别为 110~1 836 μg/m<sup>3</sup>和 16.0~98.4 μg/m<sup>3</sup>,育肥猪舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度最高分别达到 2 300 μg/m<sup>3</sup>和 563 μg/m<sup>3</sup>。

数据分析显示不同研究猪舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的排放率[以 500 kg 动物体质量(AU)计]范围分别为 0.090~6.670 g/(AU·d)和 0.088~1.420 g/(AU·d)。其中,分娩、妊娠母猪舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的排放率分别为 0.090~1.230 g/(AU·d)和 0.088~0.100 g/(AU·d);育肥猪舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的排放率分别为 1.750~6.400 g/(AU·d)和 0.070~1.420 g/(AU·d);断奶仔猪舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的排放率最高分别达到 6.67 g/(AU·d)和 0.225 g/(AU·d)。Shang 等<sup>[7]</sup>和 Xu 等<sup>[11]</sup>分别对中国水泡粪和干清粪育肥猪舍内 PM 的排放率进行了测定,数据显示 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的排放率高于深坑贮存系统,PM<sub>2.5</sub>的排放率最高达到 1.42 g/(AU·d)。与育肥

猪舍和分娩/妊娠猪舍相比,断奶仔猪舍 PM<sub>10</sub>的排放率较高,通过改变饲喂工艺(由饲喂干饲料改为饲喂湿饲料)断奶仔猪舍的 PM<sub>10</sub>的排放率最低可以降低到 0.71 g/(AU·d),可以降低 PM<sub>10</sub>的排放率,但对舍内 PM<sub>2.5</sub>的排放无明显影响。与机械通风猪舍相比,自然通风猪舍 PM<sub>10</sub>的平均质量浓度小于 100 μg/m<sup>3</sup>,同时分析结果显示,机械通风猪舍采用隧道通风模式也可以有效降低猪舍内 PM<sub>10</sub>的质量浓度,但对舍内 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度无明显影响。清粪方式对猪舍内颗粒物质量浓度的影响相对较小,可能主要被不同间隔的通风率差异所掩盖<sup>[12]</sup>。

### 1.2 家禽舍可吸入性颗粒物排放

不同家禽养殖模式舍内颗粒物质量浓度与排放率见表 2。结果显示,不同研究家禽舍内颗粒物 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度范围分别为 29.0~10 951.0 μg/m<sup>3</sup>和 5.0~866.0 μg/m<sup>3</sup>。其中,平养、栖架笼养蛋鸡舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度范围分别为 420.0~10 951.0 μg/m<sup>3</sup>和 37.0~866.0 μg/m<sup>3</sup>,叠层、阶梯、富集型笼养蛋鸡舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度范围分别为 29.0~830.0 μg/m<sup>3</sup>和 5.0~140.0 μg/m<sup>3</sup>,垫料肉鸡舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的平均质量浓度范围分别为 100.0~5 000.0 μg/m<sup>3</sup>和 28.4~495.0 μg/m<sup>3</sup>。

不同研究禽舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的排放率范围分别为 2.55~68.59 g/(AU·d)和 0.14~5.60 g/(AU·d)。其中,平养、栖架笼养蛋鸡舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的排放率范围分别为 28.00~68.59 g/(AU·d)和 2.10~5.50 g/(AU·d),叠层、阶梯、富集型笼养蛋鸡舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的排放率范围分别为 2.55~16.00 g/(AU·d)和 0.14~4.73 g/(AU·d),垫料肉鸡舍 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的平均排放率范围分别为 12.9~34.5 g/(AU·d)和 1.65~5.60 g/(AU·d)。Winkel 等<sup>[13]</sup>调查结果显示,在舍内铺设垫料导致平养蛋鸡舍、栖架笼养蛋鸡舍和平养肉鸡舍内 PM<sub>10</sub>的质量浓度最高分别达到 7 315 μg/m<sup>3</sup>、10 951 μg/m<sup>3</sup>和 5 000 μg/m<sup>3</sup>,排放率最高分别达到 68.59 g/(AU·d)、53.2 g/(AU·d)和 34.5 g/(AU·d);PM<sub>2.5</sub>的质量浓度最高分别达到 423 μg/m<sup>3</sup>、886 μg/m<sup>3</sup>和 495 μg/m<sup>3</sup>,排放率最高分别达到 3.7 g/(AU·d)、5.5 g/(AU·d)和 5.6 g/(AU·d)。

### 1.3 牛羊舍可吸入性颗粒物排放

牛羊舍内颗粒物的平均质量浓度与排放率见表 3,牛羊舍内 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度范围分别为

12.0~1 462.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和1.8~152.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其中奶牛舍  $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度范围分别为14.0~308.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和1.8~152.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,肉牛舍  $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度范围分别为18.0~183.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和5.0~40.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,羊舍  $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度范围分别为12.0~1 462.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和3.0~138.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。牛羊舍通常采用自然通风方式,同时设置一定面积的运动场,导致舍内 PM 质量浓度受季节变化影响较大,通常在冬季寒冷季节 PM 质量浓度最低,夏季温暖季节最高<sup>[14]</sup>。但是,在寒冷地区的有窗密闭式牛舍内  $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度从夏季开始呈现增加趋势,于12月份分别达到最高的308.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和41.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[15]</sup>。同时地面类型特别是垫料类型影响舍内 PM 质量浓度。Abbouda 等<sup>[16]</sup>监测了沙土地面附加运动场绵羊

舍内 PM 的质量浓度特征,羊舍  $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度分别最高达到1 462.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和138.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,高于其他类型牛羊舍。

在有关牛羊舍 PM 排放的相关研究中,有限的数据显示, $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的排放率分别为1头0.205~30.000 g/d和0.040~4.000 g/d<sup>[13-14]</sup>。在评估空气中 PM 状态时,排放率比质量浓度更能反映环境质量状况,牛羊舍大小和动物的养殖规模对  $\text{PM}_{10}$ 排放有显著影响,但是对  $\text{PM}_{2.5}$ 排放的影响较小<sup>[17]</sup>。Joo 等<sup>[14]</sup>测定了整个奶牛舍  $\text{PM}_{10}$ 和  $\text{PM}_{2.5}$ 的排放率范围,分别为1头11.9~15.0 g/d和1.6~4.0 g/d。Bonifacio 等<sup>[18]</sup>测定了肉牛舍  $\text{PM}_{10}$ 的排放率最高达到1头30.0 g/d,高于奶牛舍。

表1 猪舍颗粒物平均质量浓度与排放率

Table 1 Average mass concentration and emission rate of particulate matter in swine house

国家	动物类型	房舍类型	粪便管理	通风类型	质量浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		500 kg 动物体质量排放率 [g/(AU·d)]		参考文献
					$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$	
比利时	育肥猪	部分漏缝地板	深坑贮存*	机械通风	328~1 746	15.2~105.0	1.75	0.150	[12]、[19]
比利时	育肥猪	全漏缝地板	深坑贮存	机械通风	425~926	17.1~49.7	2.05	0.160	[12]、[19]
荷兰	育肥猪	部分漏缝地板	深坑贮存	机械通风	662(229~1 334)	47.8(10.8~113.0)	3.12	0.155	[13]
荷兰	育肥猪	部分漏缝地板	真空清粪系统	机械通风	963(543~1 458)	52.7(32.6~65.5)	4.78	0.207	[13]
荷兰	断奶仔猪	部分漏缝地板	深坑贮存	机械通风	988(534~1 274)	39.7(16.0~81.4)	6.43	0.162	[13]
荷兰	断奶仔猪	全漏缝地板	深坑贮存	机械通风	1 091(419~1 836)	51.1(19.2~98.4)	6.67	0.225	[13]
荷兰	妊娠母猪	全漏缝地板	深坑贮存	机械通风	485(187~826)	53.5(19.2~101.0)	1.17~1.23	0.088~0.097	[13]
美国	育肥猪	全漏缝地板	深坑贮存(0.9 m)	机械通风	282±192	27.0±8.0	1.98±1.84	0.140±0.050	[5]
美国	育肥猪	全漏缝地板	深坑贮存(2.4 m)	机械通风	261±209	19.0±26.0	1.81±1.64	0.070±0.060	[5]
美国	妊娠母猪	全漏缝地板	深坑贮存	机械通风	298±193	40.0±25.0	0.95±0.44	0.100±0.040	[5]
意大利	育肥猪	全漏缝地板	深坑贮存	机械通风	470	—	2.04~2.59	—	[20]~[22]
意大利	断奶仔猪	全漏缝地板	深坑贮存	机械通风	110~400	—	0.71~2.38	—	[20]~[22]
意大利	分娩/妊娠母猪	全漏缝地板	深坑贮存	机械通风	240~310	—	0.09~1.23	—	[20]~[22]
中国	育肥猪	部分漏缝地板	人工干清粪	自然通风	91(6~756)	56.0(6.0~355.0)	—	—	[23]
中国	育肥猪	部分漏缝地板	刮板清粪	自然通风	82(3~2 140)	44.0(3.0~563.0)	—	—	[23]
中国	育肥猪	垫料养殖舍	舍内贮存	自然通风	76(3~1 160)	39.0(2.0~510.0)	—	—	[23]
中国	育肥猪	全漏缝地板	水泡粪贮存	机械通风	150~1 010	60.0~200.0	5.53±4.10	1.420±1.860	[7]
中国	育肥猪	水泥地面	干清粪	机械通风	130~2 300	—	5.96~6.40	—	[11]

\* 倾斜侧壁深坑贮存。括号内为颗粒物质量浓度或排放率变化范围。AU 代表 500 kg 动物体质量。

表 2 禽舍颗粒物的平均质量浓度与排放率

Table 2 Average mass concentration and emission rate of particulate matter in poultry house

国家	动物类型	房舍类型	粪便管理	通风类型	质量浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		500 kg 动物体质量排放率 [ $\text{g}/(\text{AU} \cdot \text{d})$ ]		参考文献
					PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	
意大利	蛋鸡	阶梯笼养	自落积存	机械通风	381~780	105.0~130.0	16.00	4.73	[24]
美国	蛋鸡	阶梯笼养	自落积存	机械通风	—	—	10.50±9.10	2.10±4.50	[25]
美国	蛋鸡	阶梯笼养	自落积存	机械通风 <sup>a</sup>	448~478	37.2~44.9	6.67±2.81	0.14±0.25	[26]
美国	蛋鸡	阶梯笼养	自落积存	机械通风	393~552	44.0±36.0	6.00~8.16	1.13±1.16	[27]~[30]
澳大利亚	蛋鸡	叠层笼养	粪带清粪	机械通风 <sup>b</sup>	29~124	5.0~61.0	—	—	[31]
加拿大	蛋鸡	叠层笼养	粪带清粪	机械通风 <sup>c</sup>	190±170	30.0±30.0	2.55 ± 2.10	1.10 ± 1.52	[32]
中国	蛋鸡	叠层笼养	粪带清粪	机械通风	350~830	100.0~140.0	—	—	[33]
美国	蛋鸡	叠层笼养	粪带清粪	机械通风	509±203	43.3±36.1	—	—	[9]、[34]
美国	蛋鸡	叠层笼养	粪带清粪/干燥	机械通风	761±661	—	8.87	—	[27]~[29]
美国	蛋鸡	叠层笼养	粪带清粪	机械通风	570~610	33.0~37.0	4.40~5.40	0.32~0.27	[35]、[36]
美国	蛋鸡	富集型笼养	粪带清粪	机械通风	420~460	54.0~59.0	4.60~5.50	0.49~0.61	[35]、[36]
意大利	蛋鸡	叠层笼养	粪带清粪/干燥	机械通风	74~551	21.0~82.0	4.44	1.45	[24]
荷兰	蛋鸡	平养蛋鸡 <sup>d</sup>	粪便与垫料堆积干燥	机械通风	3 143(1 216~7 315)	175.0(41.2~423.0)	68.59	3.70	[13]
美国	蛋鸡	栖架笼养	粪带清粪+垫料	机械通风	3 610~4 290	374.0~446.0	28.00~36.10	2.74~2.91	[35]、[36]
美国	蛋鸡	栖架笼养	粪带清粪+垫料	机械通风	2 100~2 500	240.0~270.0	29.50±11.00	2.10±1.70	[37]
美国	蛋鸡	栖架笼养	粪带清粪+网床	机械通风	1 535±590	263.5±170.0	47.20±17.90	5.50±3.80	[38]
中国	蛋鸡	栖架笼养	粪带清粪	机械通风	420±100	37.0±25.0	—	—	[39]
荷兰	蛋鸡	栖架笼养	粪带清粪+垫料	机械通风	3 362(1 198~10 951)	217.0(54.2~866.0)	53.20	3.07	[13]
德国	肉鸡	垫料平养	粪便与垫料堆积	机械通风	100~5 000	—	—	—	[40]
美国	肉鸡	垫料平养	粪便与垫料堆积	机械通风	930(110~4 768)	104.0±32.0	32.60	1.70	[25]、[41]
美国	肉鸡	垫料平养	粪便与垫料堆积	机械通风	100~300	50.0~95.0	12.90	—	[42]、[43]
荷兰	肉鸡	垫料平养	粪便与垫料堆积	机械通风	1 931(486~3 784)	137.0(28.4~495.0)	34.50	2.30	[13]
荷兰	肉鸡	平养鸡舍 <sup>d</sup>	刮板清粪	机械通风	1 703(913~2 737)	120.0(45.2~205.0)	21.91	1.65	[13]
澳大利亚	肉鸡	垫料平养	粪便与垫料堆积	机械通风	280~450	63.0~95.0	20.30~26.80	4.80~5.60	[44]

a: 冬季屋顶进风, 夏季侧墙进风; b: 有 2 种通风方式, 一端进风一端排风, 或者两端进风, 中间排风; c: 寒冷季节横向通风, 温暖季节纵向通风; d: 漏缝地板和垫料混合鸡舍。括号内为颗粒物质量浓度或排放率变化范围。

表 3 牛羊舍颗粒物的质量浓度与排放率

Table 3 Mass concentration and emission rate of particulate matter in cattle and sheep houses

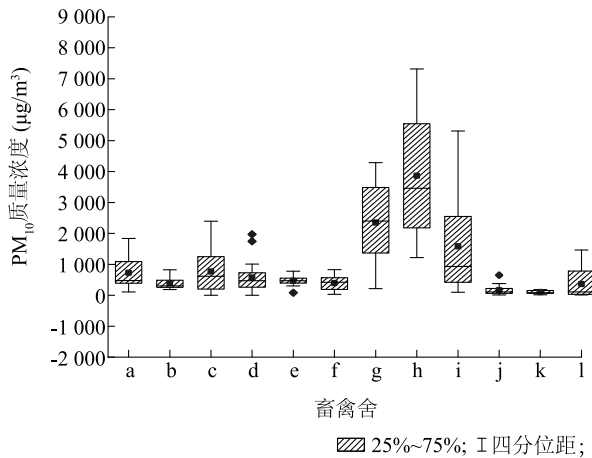
国家	动物类型	房舍类型	粪便管理	通风类型	质量浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		500 kg 动物体质量排放率 [ $\text{g}/(\text{AU} \cdot \text{d})$ ]		参考文献
					PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	
荷兰	奶牛	自由卧栏牛舍	刮板清粪	自然通风	40.0(14.0~95.0)	13.8(3.9~24.9)	0.166	0.032	[13]
爱沙尼亚	奶牛	自由卧栏牛舍	刮板清粪	自然通风	65.0±121.0	18.0±46.0	—	—	[45]
美国	奶牛	自由卧栏牛舍	刮板清粪	自然通风	106.0(22.0~240.0)	19.0(4.0~44.0)	—	—	[14]、[17]
中国	奶牛	自由卧栏牛舍	刮板清粪	自然通风	124.0~189.0	115.0~152.0	—	—	[46]
中国	奶牛	自由卧栏牛舍	铲车清粪	自然通风	84.9~308.5	1.8~53.5	—	—	[15]
北欧	奶牛、肉牛	自由卧栏牛舍	刮板清粪	自然通风	380.0(220.0~650.0)	70.0(40.0~150.0)	—	—	[47]
美国	肉牛	开放牛舍+运动场	刮板清粪	自然通风	18.0~141.0	5.0~30.0	—	—	[48]
美国	肉牛	开放牛舍+运动场	刮板清粪	自然通风	38.0~82.0	40.0	—	—	[18]、[49]
中国	肉牛	开放牛舍+运动场	刮板清粪	自然通风	156.0~183.0	—	—	—	[50]
美国	山羊	漏缝地板羊舍	水冲清粪	自然通风	12.0~46.0	3.0~23.0	—	—	[2]
沙特阿拉伯	绵阳	沙土地面+运动场	舍内贮存	自然通风	108.5~1 462.6	15.3~138.5	—	—	[16]
希腊	绵阳/山羊	—	—	自然通风	120.0	32.0	—	—	[51]

括号内为颗粒物质量浓度或排放率变化范围。



## 2 不同畜禽舍颗粒物排放对比

畜禽舍 PM 的排放受到多种因素的影响,动物养殖设施类型、粪便管理以及舍内饲喂活动、光照变化和饲养员的活动均可能导致动物活动的变化,从而导致不同畜禽舍内 PM 的质量浓度存在很大的差异<sup>[52-53]</sup>。较大颗粒物  $PM_{10}$  通常由动物(如皮肤细胞和细菌)产生,而较小颗粒物  $PM_{2.5}$  则由畜禽舍内的灰尘和粪便产生<sup>[4]</sup>。在家禽养殖场,大部分空气颗粒物来源于羽毛和粪便,生猪养殖场空气颗粒物主要来源于饲料和粪便。牛羊养殖过程  $PM_{10}$  主要来源于饲料和粪便, $PM_{2.5}$  主要来源于养殖场车辆运输过程<sup>[5,14]</sup>,但是 Joo 等<sup>[17]</sup> 研究结果显示牛舍内  $PM_{2.5}$  排放量并未随着养殖场运输活动的增加而发生显著变化,牛羊养殖过程  $PM_{2.5}$  的来源还没有明确的结



a: 断奶仔猪; b: 分娩/妊娠母猪; c: 育肥猪(部分漏缝地板); d: 育肥猪(全漏缝地板); e: 蛋鸡阶梯笼养; f: 蛋鸡叠层笼养; g: 蛋鸡栖架饲养; h: 蛋鸡平养; i: 肉鸡平养; j: 奶牛; k: 肉牛; l: 山羊/绵羊。

图1 不同畜禽舍内  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的质量浓度

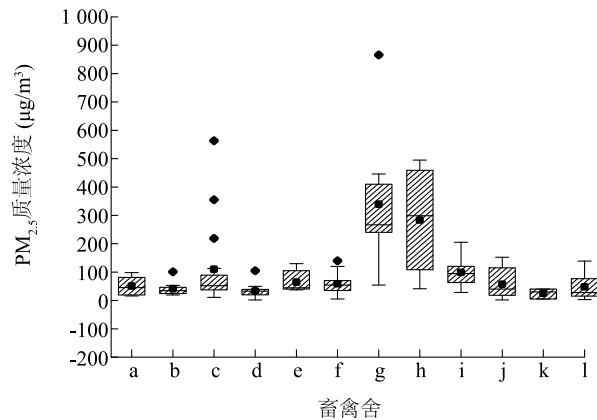
Fig.1 The mass concentration of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in different livestock and poultry houses

数据分析结果显示,断奶仔猪舍和育肥猪舍内 PM 的质量浓度和排放率高于分娩/妊娠母猪舍,断奶仔猪舍通常需要较高的温度,特别是冬季为了提高舍内的温度,通常设置较小的通风量,导致断奶仔猪舍 PM 质量浓度和排放率较高,这主要与猪舍的通风率、温度和相对湿度等因素有关。此外,地板类型影响育肥猪舍内的  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的质量浓度,采用全漏缝地板育肥猪舍内 PM 质量浓度低于部分漏缝地板猪舍。密闭式猪舍的通风影响猪舍内 PM 的质量浓度和排放率,较高通风率会降低畜禽舍中  $PM_{10}$  的质量浓度,但是通风过程中产生的湍流,导

致 PM 悬浮在空气中的持续时间更长,从而导致机械通风猪舍内 PM 排放率较高<sup>[20,22]</sup>。

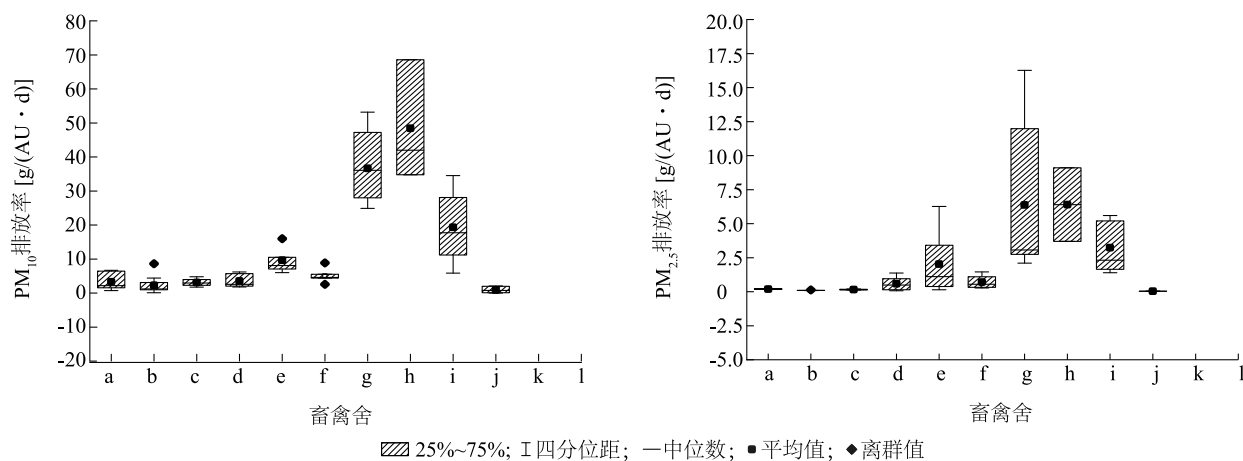
此外,由于舍内 PM 的质量浓度受到通风管理和季节的影响,PM 质量浓度数值大都呈正偏态分布,夏季 PM 质量浓度的分布范围更广,冬季分布集中,导致 PM 质量浓度往往被高估。

图 1 和图 2 显示了不同畜禽养殖工艺舍内  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度和排放率的范围。数据统计分析结果显示,垫料使用增加了舍内 PM 的质量浓度,垫料平养和栖架笼养家禽养殖场以及使用垫料的羊场和奶牛场 PM 的质量浓度高于其他类型畜禽养殖场;同时,采用垫料平养和栖架笼养蛋鸡舍内 PM 质量浓度和排放率 in 各类畜禽舍中最高,而叠层笼养和阶梯笼养蛋鸡舍,由于采用无垫料养殖工艺或者动物与粪便(垫料)分离养殖工艺,动物活动水平较低,PM 质量浓度和排放率则均处于较低的水平。



致 PM 悬浮在空气中的持续时间更长,从而导致机械通风猪舍内 PM 排放率较高<sup>[20,22]</sup>。

牛羊舍中的较低 PM 质量浓度主要与开放式自然通风畜舍较高的通风率有关<sup>[16,51]</sup>。牛的活动是导致  $PM_{10}$  质量浓度升高的主要因素,但对  $PM_{2.5}$  质量浓度没有明显影响,此外,  $PM_{10}$  质量浓度受到环境因素影响,通常较高的温度导致空气干燥,空气颗粒物更容易悬浮在空气中,  $PM_{2.5}$  的质量浓度与温度之间具有较高的正相关性,随相对湿度增加而降低<sup>[14,17]</sup>。自然通风牛羊舍中  $PM_{2.5}$  排放与风速呈正相关,在较高的风速条件下空气中  $PM_{2.5}$  悬浮时间延



a: 断奶仔猪; b: 分娩/妊娠母猪; c: 育肥猪 (部分漏缝地板); d: 育肥猪 (全漏缝地板); e: 蛋鸡阶梯笼养; f: 蛋鸡叠层笼养; g: 蛋鸡栖架饲养; h: 蛋鸡平养; i: 肉鸡平养; j: 奶牛; k: 肉牛; l: 山羊/绵阳。

图 2 不同畜禽舍  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  排放率

Fig.2 The emission rate of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in different livestock and poultry houses

长,同时空气交换率增加加速了  $PM_{2.5}$  的排放,风速对  $PM_{10}$  质量浓度的影响通常弱于环境条件和动物活动的影响<sup>[18,49]</sup>。

### 3 畜禽舍颗粒物控制工程技术与装备

通过改善畜禽养殖工艺,优化动物饲养过程管理可以降低颗粒的排放,此外,建立畜禽养殖过程颗粒物控制技术和设备系统是降低养殖过程颗粒物排放的重要手段。目前主要的控制技术有空气过滤除尘技术、空气洗涤除尘技术、喷雾除尘技术和静电除尘技术等。

#### 3.1 空气过滤除尘技术与装备

空气过滤除尘技术与装备是通过在畜禽舍排风处建造挡风墙或者植物缓冲区,使气流改变方向,通过离心力的原理,进而使 PM 在气流通过挡风墙或者植物缓冲区沉降,以达到除尘的目的。挡尘墙是指用于畜禽舍排风扇的下风向,以减少气流前进动量沉淀颗粒物的装置。挡尘墙需要使用能够抗风的金属框架固定,通常选用抗紫外线防水布、活性炭纤维或者秸秆、杂草等作为挡尘墙的材料,挡尘墙通常安装在排气扇后 3~10 m 处,高度为 3~5 m<sup>[54]</sup>,安布局见图 3。此外,在畜禽舍排风扇的下风向通过种植植物 (通常由乔木、灌木和草组成) 建立植物缓冲区,可以有效降低畜禽舍内颗粒物的排放,研究结果显示空气过滤除尘技术与装备的颗粒物去除效率为 21%~74%<sup>[55-56]</sup>。空气过滤除尘技术与装备的颗

颗粒物去除效率受到阻挡材料结构、孔隙率、位置因素以及植物种类的影响。与其他技术相比,空气过滤除尘技术与装备成本相对较低,但挡尘墙长期使用易堵塞,需要定期清理挡尘墙的表面,植物缓冲区内需要定期清理杂草,保证种植植物成活。

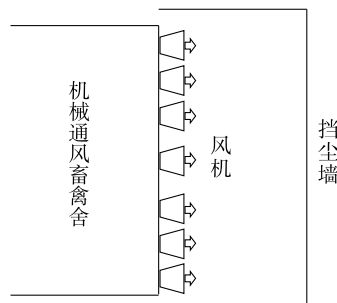


图 3 畜禽舍挡尘墙安装示意图

Fig.3 General layout of a barrier or windbreak wall on livestock and poultry houses

#### 3.2 空气洗涤除尘技术与设备

空气洗涤除尘技术与设备主要用于对排出畜舍的空气进行过滤,是在密闭空间通过喷淋系统或过滤组件 (陶瓷填料或者玻璃纤维) 收集颗粒物并去除养殖场空气污染物的技术<sup>[57]</sup>。洗涤除尘设备的尺寸取决于 PM 质量浓度以及排气量,设计需要满足最大的气流速率,颗粒物去除效率受到气流方向、洗涤液组合物、液气比和空气停留时间的影响<sup>[58]</sup>。空气洗涤除尘设备中通常使用横流式、逆流式和并流式 3 种气流配置 (图 4)。

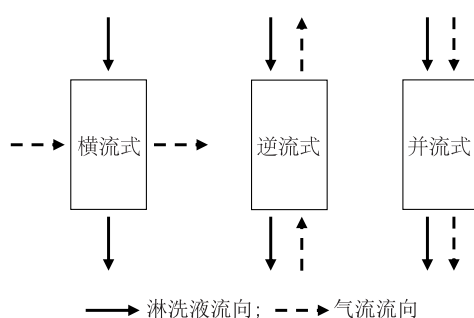


图4 空气洗涤除尘设备的气流配置结构示意图

Fig.4 Flow configurations for operating scrubbers

横流式洗涤除尘设备中,排出空气与淋洗液成直角流动,该方式空气停留时间较短。而并流式洗涤除尘设备中,排出空气与淋洗液沿相同方向流动,该方式可以最大限度地减少堵塞。目前在洗涤除尘设备中通常使用横流式和并流式。逆流式理论上是气体吸收的最佳配置,但存在堵塞问题,逆流式通常用于含有滤床的洗涤除尘设备<sup>[59]</sup>。

洗涤液 pH 值不影响 PM 的去除,水可以去除畜禽设施中的大部分污染物,当去除多种污染物时,洗涤除尘设备通常设置多级洗涤空气洗涤器,增设酸性洗涤(硫酸)模块增加  $\text{NH}_3$  的吸收,增设碱性洗涤液(次氯酸)增加  $\text{H}_2\text{S}$  去除效率<sup>[60]</sup>。随着空气在洗涤除尘设备系统内停留时间的增加,PM 去除效率也会增加,洗涤除尘设备空气停留时间为 0.4~8.0 s<sup>[59]</sup>。洗涤液流速与通过洗涤器的空气流速之比影响洗涤除尘设备运行效率,为提高 PM 的去除效率,液气比通常控制在  $2 \times 10^{-6}$  至  $4 \times 10^{-4}$  之间<sup>[61]</sup>。洗涤除尘设备可以有效去除 PM 和其他空气污染物( $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$ ),但由于其较高的压损和相对较高的投资成本、运行成本,在畜禽养殖设施中的使用受到限制。目前 FarmAir 公司、Inno+公司和 IPT 公司生产的畜禽舍空气洗涤除尘设备在畜禽养殖场已经应用,PM 的去除效率为 50%~90%<sup>[62]</sup>。风机出口风速大于  $4.0 \text{ m/s}$ <sup>[63]</sup>,不同厚度的空气洗涤器组件以及级数影响 PM 的去除效率,虽然增加洗涤器级数和厚度能够提高 PM 的去除效率,但导致压损增加,通风效率降低。需要进一步开发成本低、效率高、对轴流风机运行无显著影响的洗涤除尘设备。

### 3.3 喷雾除尘技术与设备

喷雾除尘的原理是利用高压或者高速气流的分裂作用将少量液体(水、除臭剂、油或者油水混合

物)破碎形成细小雾滴,并在整个畜禽舍中均匀分布与颗粒物结合,通过重力沉降凝结达到去除颗粒物的目的。目前畜禽养殖过程主要的喷雾装备包括高压喷雾<sup>[64]</sup>、高速气流喷雾<sup>[65]</sup>系统,高压喷雾系统主要应用于水和油水混合物的雾化,高速气流喷雾系统主要应用于油的雾化(图 5)。

喷雾除尘雾滴直径通常小于  $122 \mu\text{m}$ ,高压喷雾系统压力通常大于 5.00 MPa,液体流量根据喷头孔径大小通常控制在 5.5~12.0 L/h;高速气流喷雾系统空气管路压力通常大于 0.20 MPa,液体管路压力通常大于 0.35 MPa,液体流量为 10.5~19.2 L/h;喷雾系统在畜禽舍的安装高度在 2.5 m 至 3.0 m 之间,喷雾距离大于 1.5 m。研究结果显示,油水混合喷雾可降低家禽舍内  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度和排放,雾滴直接喷在垫料上,不会对动物产生影响,肉鸡和蛋鸡舍  $\text{PM}_{10}$  排放量分别减少 55%~85% 和 25%~40%<sup>[66]</sup>。喷雾除尘技术与设备系统相对成熟,可以广泛应用于自然/机械通风畜禽舍内外以及堆肥车间的 PM 控制、消毒和夏季降温,但是可能导致畜禽舍内湿度增加等问题。目前研究结果显示,降低喷雾频率不仅可以有效降低舍内 PM 的质量浓度,避免湿度过高对畜禽的影响,同时降低使用过程耗水量大的问题<sup>[67]</sup>。

### 3.4 静电除尘技术与设备

静电除尘技术的工作原理是畜禽舍颗粒物经过高压静电场时与负离子结合带上负电后,在阳极表面放电而沉积,实现颗粒物去除<sup>[68-69]</sup>。目前畜禽养殖过程静电除尘技术多采用空气负离子发生系统,该系统由两排串联负直流电离单元组成,电离单元由空气负离子发生器和接地收集板组成,沿着畜禽舍长度方向安装,悬挂在畜禽舍上方约 2.50 m 处,放电电极采用导电管,其尖点间距为 2.54 cm。该电极连接到高压电源,以产生高密度电子阵列( $-30 \text{ kV DC}$ ),为确保安全,电流限制为 0.7~2.0 mA<sup>[70-71]</sup>。目前 EPI Air 公司生产的静电除尘设备已经在商业化养殖场进行了应用,静电除尘技术可以改善畜禽舍内环境质量并提高动物的生产效率<sup>[72]</sup>。安装应用见图 6。研究结果显示,采用静电除尘技术的肉鸡舍内  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的排放量分别降低约 36% 和 10%<sup>[66]</sup>。

静电除尘技术与设备可以广泛应用于自然/机械通风畜禽舍内外 PM 控制,但是应用过程中畜禽

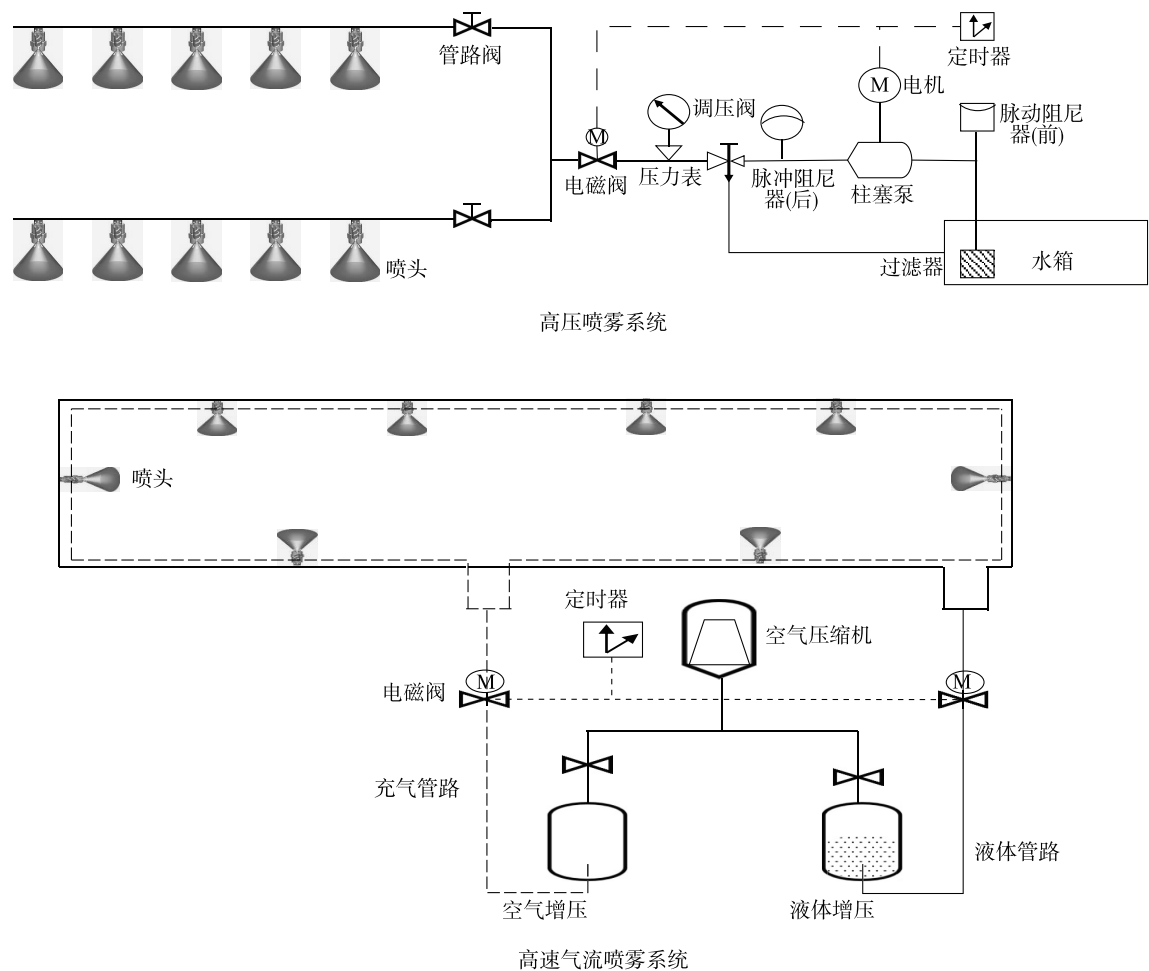


图 5 喷雾除尘系统结构示意图  
Fig.5 Function diagram of the spraying system for reduction of dust

舍内颗粒物通常收集至电极、天花板、地面或其他金属表面上,清理过程导致二次扬尘等问题,同时由于受到自身结构、供电装置和风速的影响,通风量较大的畜舍 PM 去除效率受到限制。将该技术结合空气过滤技术与装备使用,可有效提高颗粒物去除效率,同时避免二次扬尘对动物的影响。

4 小 结

畜禽养殖过程产生大量的颗粒物,畜禽种类、养殖工艺、地板类型以及环境条件是影响畜禽养殖场颗粒物质量浓度分布和排放的重要因素。其中,不同畜禽种类养殖垫料的使用是导致颗粒物质量浓度和排放增加的主要因素,家禽垫料平养和栖架饲养条件下颗粒物的质量浓度和排放率最高。

畜禽养殖过程颗粒物控制技术与设备发展对优化畜禽养殖环境管理和提升畜禽养殖业可持续发展

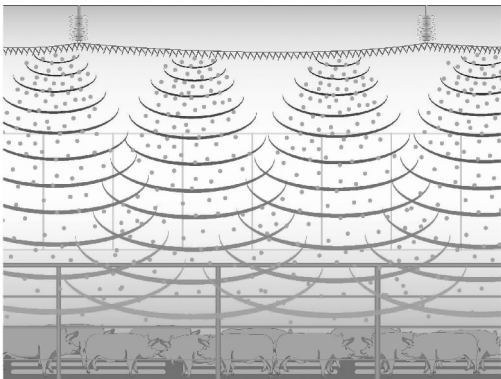


图 6 静电除尘设备工作示意图  
Fig.6 Function diagram of the electrostatic precipitation

水平具有重要意义。通过改善养殖垫料的应用和管理,优化畜禽舍通风,应用喷雾和静电除尘装备,可以有效改善畜禽舍内外环境质量。空气过滤和洗涤装备,虽然无法改善畜舍内的空气质量,但可以降低



PM 排放对环境的影响。为满足规模化畜禽养殖场对环境质量控制技术与装备的需求,在未来技术发展方向上,加大畜禽低污染排放养殖工艺与配套设备、过程控制设备和末端减排设备的研究,开发适合特定区域畜禽生产工艺和动物类型的最佳颗粒物控制技术与设备系统,并建立相关控制技术与配套设备系统标准,提高设备系统的技术适用性和经济性,促进环境质控制技术与设备的推广应用。

## 参考文献:

- [1] WANG L L, CAO Z, LI Q, et al. Concentration and particle size distribution of particulate matter inside tunnel-ventilated high-rise layer operation houses [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 66: 8-16.
- [2] HOWARD A, BOTLAGUDURU V S V, DU H, et al. Measurements and comparative air quality analysis of a goat farm operation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2019, 62(6): 1723-1733.
- [3] MARTENIES S E, SCHAEFFER J W, ERLANDSON G, et al. Associations between bioaerosol exposures and lung function changes among dairy workers in Colorado [J]. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2020, 62(6): 424-430.
- [4] CAMBRA-LÓPEZ M, HERMOSILLA T T L, LAI H, et al. Particulate matter emitted from poultry and pig houses: source identification and quantification [J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(2): 629-642.
- [5] HU F, CHENG B, WANG-LI L. Characteristics of particulate matter emissions from swine and poultry production houses in the United States [J]. *Transactions of the ASABE*, 2021, 64(5): 1569-1579.
- [6] VISSERS L S M, SAATKAMP H W, OUDE LANSINK A G J M. Analysis of synergies and trade-offs between animal welfare, ammonia emission, particulate matter emission and antibiotic use in Dutch broiler production systems [J]. *Agricultural Systems*, 2021, 189: 103070.
- [7] SHANG B, LIU Y, DONG H, et al. Particulate matter concentrations and emissions of a fattening pig facility in northern China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, 11(11): 1902-1911.
- [8] POST P M, HOGERWERF L, BOKKERS E A M, et al. Effects of Dutch livestock production on human health and the environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139702.
- [9] KNIGHT R M, TONG X, ZHAO L, et al. Particulate matter concentrations and emission rates at two retrofitted manure-belt layer houses [J]. *Transactions of the ASABE*, 2021, 64(3): 829-841.
- [10] 汪开英,吴捷刚,梅威达,等. 畜禽舍颗粒物减排技术研究现状 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 204-212.
- [11] XU W, ZHENG K, MENG L, et al. Concentrations and emissions of particulate matter from intensive pig production at a large farm in North China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 16(1): 79-90.
- [12] 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.
- [13] WINKEL A, MOSQUERA J, GROOT KOERKAMP P W G, et al. Emissions of particulate matter from animal houses in the Netherlands [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 111: 202-212.
- [14] JOO H S, NDEGWA P M, HEBER A J, et al. Particulate matter dynamics in naturally ventilated freestall dairy barns [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 69: 182-190.
- [15] 王超,赵娟娟,张伟涛,等. 全舍饲大跨度奶牛舍粉尘浓度的变化规律 [J]. *畜牧与兽医*, 2019, 51(11): 44-48.
- [16] ABBOUDA S K, ALMUHANNA E A, AL-AMRI A M, et al. Monitoring particulate matter levels and climate conditions in a sheep yard at the local environment of Saudi Arabia [J]. *International Journal of Environment and Bioenergy*, 2013, 6(2): 81-95.
- [17] JOO H, PARK K, LEE K, et al. Mass concentration coupled with mass loading rate for evaluating PM<sub>2.5</sub> pollution status in the atmosphere: a case study based on dairy barns [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 207: 374-380.
- [18] BONIFACIO H F, MAGHIRANG R G, TRABUE S L, et al. TSP, PM<sub>10</sub>, and PM<sub>2.5</sub> emissions from a beef cattle feedlot using the flux-gradient technique [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 101: 49-57.
- [19] 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): 280-290.
- [20] COSTA A, BORGONOVO F, LEROY T, et al. Dust concentration variation in relation to animal activity in a pig barn [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(1): 118-124.
- [21] HAEUSSERMANN A, COSTA A, AERTS J M, et al. Development of a dynamic model to predict PM<sub>10</sub> emissions from swine houses [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(2): 557-564.
- [22] 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.
- [23] DAI C, HUANG S, ZHOU Y, et al. Concentrations and emissions of particulate matter and ammonia from extensive livestock farm in South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(2): 1871-1879.
- [24] FABBRI C, VALLI L, GUARINO M, et al. Ammonia, methane, nitrous oxide and particulate matter emissions from two different buildings for laying hens [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97(4): 441-455.

- [25] LIN X J, CORTUS E L, ZHANG R, et al. Ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide and particulate matter emissions from California high-rise layer houses [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 46:81-91.
- [26] LI Q F, WANG L L, WANG K, et al. The national air emissions monitoring study's southeast layer site; Part II. Particulate matter [J]. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(3): 1173-1184.
- [27] NI J Q, LIU S, DIEHL C A, et al. Emission factors and characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter at two high-rise layer hen houses [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 154:260-273.
- [28] NI J Q, DIEHL C A, CHAI L, et al. Factors and characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter emissions from two manure-belt layer hen houses [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 156:113-124.
- [29] 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.
- [30] LI S, LI H, XIN H, et al. Particulate matter concentrations and emissions of a high-rise layer house in Iowa [J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(3): 1093-1101.
- [31] DUNLOP M, RISTOVSKI Z D, GALLAGHER E, et al. Odour, dust and non-methane volatile organic-compound emissions from tunnel-ventilated layer-chicken sheds: a case study of two farms [J]. *Animal Productin Science*, 2013, 53(12): 1309-1318.
- [32] MORGAN R J, WOOD D J, VAN HEYST B J. The development of seasonal emission factors from a Canadian commercial laying hen facility [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 86:1-8.
- [33] WANG Y, NIU B, NI J Q, et al. New insights into concentrations, sources and transformations of  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  and PM at a commercial manure-belt layer house [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114355.
- [34] KNIGHT R M, TONG X, LIU Z, et al. Spatial and seasonal variations of PM concentration and size distribution in manure-belt poultry layer houses [J]. *Transactions of the ASAE*, 2019, 62(2): 415-427.
- [35] 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]. *Poultry Science*, 2015, 94(3): 534-543.
- [36] ZHAO Y, SHEPHERD T A, LI H, et al. Environmental assessment of three egg production systems-Part I: Monitoring system and indoor air quality [J]. *Poultry Science*, 2015, 94(3): 518-533.
- [37] HAYES M D, XIN H, LI H, et al. Ammonia, greenhouse gas, and particulate matter emissions of aviary layer houses in the Midwestern U.S. [J]. *Transactions of the ASAE*, 2013, 56(5): 1921-1932.
- [38] 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.
- [39] LI Z, WANG C, LI B, et al. Concentration and size distribution of particulate matter in a new aviary system for laying hens in China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2020, 70(4): 379-392.
- [40] CALVET S, VAN DEN WEGHE H, KOSCH R, et al. The influence of the lighting program on broiler activity and dust production [J]. *Poultry Science*, 2009, 88(12): 2504-2511.
- [41] REDWINE J S, LACEY R E, MUKHTAR S, et al. Concentration and emissions of ammonia and particulate matter in tunnel-ventilated broiler houses under summer conditions in Texas [J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(4): 1101-1109.
- [42] WORLEY J W, NAEHER L P, CZARICK M, et al. Monitoring of fine particulates downwind of broiler houses—a field study [J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2013, 22(2): 351-360.
- [43] VISSER M C, FAIRCHILD B, CZARICK M, et al. Fine particle measurements inside and outside tunnel-ventilated broiler houses [J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2006, 15(3): 394-405.
- [44] 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.
- [45] KAASIK A, MAASIKMETS M. Concentrations of airborne particulate matter, ammonia and carbon dioxide in large scale uninsulated loose housing cowsheds in Estonia [J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114(3): 223-231.
- [46] 秦丽文. 奶牛舍微生物气溶胶  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  的检测及其环境状况评估 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [47] TAKAI H, PEDERSEN S, JOHNSEN J O, 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.
- [48] SPIEHS M J, CORTUS E L, HOLT G A, et al. Particulate matter concentrations for mono-slope beef cattle facilities in the Northern Great Plains [J]. *Transactions of the ASABE*, 2014, 57(6): 1831-1837.
- [49] BONIFACIO H F, MAGHIRANG R G, AUVERMANN B W, et al. Particulate matter emission rates from beef cattle feedlots in Kansas—Reverse dispersion modeling [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, 62(3): 350-361.
- [50] 牛欢, 张政, 颜培实. 冬季机械清粪牛舍与人工清粪牛舍空气环境分析 [J]. *畜牧与兽医*, 2015, 47(6): 26-31.
- [51] PAPANASTASIOU D K, FIDAROS D, BARTZANAS T, et al. Monitoring particulate matter levels and climate conditions in a Greek sheep and goat livestock building [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 183(1): 285-296.
- [52] COSTA A, FERRARI S, GUARINO M. Yearly emission factors of ammonia and particulate matter from three laying-hen housing systems [J]. *Animal Production Science*, 2012, 52(12): 1089-

- 1098.
- [53] MOSTAFA E, NANNEN C, HENSELER J, et al. Physical properties of particulate matter from animal houses—empirical studies to improve emission modelling [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(12): 12253-12263.
- [54] 董红敏,何 晴,陶秀平,等. 生物质挡尘墙设计与实验研究 [J]. *农业工程学报*, 2000, 16(1): 94-98.
- [55] WILLIS W B, EICHINGER W E, PRUEGER J H, et al. Particulate capture efficiency of a vegetative environmental buffer surrounding an animal feeding operation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240:101-108.
- [56] AJAMI A, SHAH S B, WANG-LI L, et al. Windbreak wall-vegetative strip system to reduce air emissions from mechanically ventilated livestock barns: Part 2—Swine house evaluation [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, 230(12): 289.
- [57] VAN DER HEYDEN C, DEMEYER P, VOLCKE E I P. Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: State-of-the-art and perspectives [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 134:74-93.
- [58] VAN DER HEYDEN C, BRUSSELMAN E, VOLCKE E I P, et al. Continuous measurements of ammonia, nitrous oxide and methane from air scrubbers at pig housing facilities [J]. *J Environ Manage*, 2016, 181:163-171.
- [59] MELSE R W, VAN WAGENBERG A V, MOSQUERA J. Size reduction of ammonia scrubbers for pig and poultry houses: use of conditional bypass vent at high air loading rates [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(1): 69-82.
- [60] YANG L, WANG X, FUNK T L. Strong influence of medium pH condition on gas-phase biofilter ammonia removal, nitrous oxide generation and microbial communities [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 152:74-79.
- [61] MELSE R W, HOFSCHEUDER P, OGINK N W M. Removal of particulate matter (PM<sub>10</sub>) by air scrubbers at livestock facilities: results of an on-farm monitoring program [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(2): 689-698.
- [62] MOSTAFA E, HOELSCHER R, DIEKMANN B, et al. Evaluation of two indoor air pollution abatement techniques in forced-ventilation fattening pig barns [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(3): 428-438.
- [63] 周忠凯,杨殿林,张海芳,等. 冬季侧窗通风猪舍氨气和温室气体排放特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1359-1367.
- [64] TAKAI H, MOLLER F, IVERSEN M, et al. Dust control in pig houses by spraying rapeseed oil [J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(5): 1513-1518.
- [65] WINKEL A, VAN RIEL J W, VAN EMOUS R A, et al. Abatement of particulate matter emission from experimental aviary housings for laying hens by spraying rapeseed oil [J]. *Poultry Science*, 2016, 95(12): 2836-2848.
- [66] HAMON L, ANDRES Y, DUMONT E. Aerial pollutants in swine buildings: a review of their characterization and methods to reduce them [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(22): 12287-12301.
- [67] 周忠凯,李 辉,秦 竹,等. 自然通风猪舍高压喷雾降温系统的降温效率 [J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(1): 106-113.
- [68] HERBUT E, SOSNÓWKA-CZAJKA E, SKOMORUCHA I. Air ionization in livestock buildings -a review [J]. *Annals of Animal Science*, 2018, 18(4): 899-905.
- [69] RITZ C W, MITCHELL B W, FAIRCHILD B D, et al. Improving in-house air quality in broiler production facilities using an electrostatic space charge system [J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2006, 15(2): 333-340.
- [70] ZHAO Y, CHAI L, RICHARDSON B, et al. Field evaluation of an electrostatic air filtration system for reducing incoming particulate matter of a hen house [J]. *Transactions of the ASABE*, 2018, 61(1): 295-304.
- [71] WINKEL A, MOSQUERA J, AARNINK A J A, et al. Evaluation of a dry filter and an electrostatic precipitator for exhaust air cleaning at commercial non-cage laying hen houses [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129:212-225.
- [72] B JEREZ S, MUKHTAR S, FAULKNER W, et al. Evaluation of electrostatic particle ionization and BioCurtain<sup>TM</sup> technologies to reduce air pollutants from broiler houses [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(6): 975-984.

(责任编辑:张震林)