

钟志君, 洪亮, 刘进远, 等. 地道通风楼房猪舍冬季环境因子空间分布规律研究 [J]. 畜牧与兽医, 2025, 57 (2): 38-45.

ZHONG Z J, HONG L, LIU J Y, et al. Spatial distribution characteristics of environmental parameters in ground channel ventilated multistory pig buildings in winter [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57 (2): 38-45.

地道通风楼房猪舍冬季环境因子空间分布规律研究

钟志君^{1,2#}, 洪亮^{3#}, 刘进远^{1,2}, 倪青松^{1,2}, 邓卉^{1,2}, 吕学斌^{1,2}, 李斌^{1,2*}

(1. 四川省畜牧科学研究院, 四川 成都 610066;

2. 动物遗传育种四川省重点实验室, 四川 成都 610066;

3. 四川省畜科集团有限公司, 四川 成都 610066)

摘要: 旨在探索空调控制的地道进风楼房猪舍冬季舍内环境因子的空间分布规律。采用现场仪器检测的方法, 对冬季楼房猪舍妊娠舍和分娩舍不同空间位点的温度、湿度、风速以及 CO₂、NH₃、粉尘浓度进行检测, 妊娠舍和分娩舍分别完成 105 个和 150 个位点的测量。结果: 在妊娠舍和分娩舍不同高度上空气粉尘粒度分布规律都是 PM_{0.3}<PM_{0.5}<PM_{1.0}<PM_{2.5}<PM_{5.0}<PM_{10.0}, 其中 PM_{10.0} 的浓度最大为 76.13 和 73.75 μg/m³。温度在垂直方向上随着高度的增加而上升, 不同高度间差异极显著 ($P<0.01$), 在水平方向不同栏位间差异不显著 ($P>0.05$)。风速在新风道 0.1 m 的高度上最大, 在妊娠舍和分娩舍分别达 0.75 和 0.41 m/s。CO₂ 的浓度随着高度的增加而增加, NH₃ 在新风道上的浓度随着高度的增加而增加; 妊娠舍中 CO₂ 和 NH₃ 的最大浓度为 1 982.90 和 34.76 mg/m³, 分娩舍中 CO₂ 和 NH₃ 的最大浓度为 1 177.20 和 8.63 mg/m³; 妊娠舍和分娩舍 CO₂ 和 NH₃ 的最小浓度均位于新风道 0.1~0.45 m 的区域。结论: 空调控制的楼房猪舍冬季保温效果好, 地道进风系统能够为猪只呼吸区域提供较好的空气质量, 妊娠舍 3.6 km³/h 的换气量时舍内空气质量较差, 建议增加阶段通风量以改善舍内空气质量。

关键词: 地道通风; 楼房猪舍; 冬季; 空调控制; 环境因子空间分布

中图分类号: S815.9 文献标志码: A 文章编号: 0529-5130(2025)02-0038-08

Spatial distribution characteristics of environmental parameters in ground channel ventilated multistory pig buildings in winter

ZHONG Zhijun^{1,2#}, HONG Liang^{3#}, LIU Jinyuan^{1,2}, NI Qingsong^{1,2}, DENG Hui^{1,2}, LÜ Xuebin^{1,2}, LI Bin^{1,2*}

(1. Sichuan Animal Science Academy, Chengdu 610066, China;

2. Key Laboratory of Animal Breeding and Genetics of Sichuan Province, Chengdu 610066, China;

3. Sichuan Animals Group Co., Ltd., Chengdu 610066, China)

Abstract: The present study aimed to explore the spatial distribution characteristics of various environmental parameters in ground channel ventilated multistory pig buildings in winter. The field test method was used to test the temperature, humidity, wind speed, and the concentrations of CO₂, NH₃ and dust at different space points in the gestation room and the farrowing room of multistory pig buildings in winter. 105 positions in the gestation room and 150 ones in the farrowing room were tested, respectively. The results showed that the dust particle size distribution rules at the points of of different heights were PM_{0.3}<PM_{0.5}<PM_{1.0}<PM_{2.5}<PM_{5.0}<PM_{10.0} in the gestation room and the farrowing room, with the biggest concentrations of PM_{10.0} were 76.13 and 73.75 μg/m³, respectively. The temperature increased with the height in the vertical direction, and the difference between different heights was very significant ($P<0.01$), and the differences between different horizontal fields were not significant ($P>0.05$). The largest wind speed in the gestation room and the farrowing room were 0.75 and 0.41 m/s, respectively, at the height of 0.1 m in the fresh air aisle. The CO₂ concentration increased with greater height, and the NH₃ concentration also increased with greater height above the fresh air aisle. The biggest concentrations of CO₂ and NH₃ in the gestation room were 1 982.90 and 34.76 mg/m³, respectively; the highest concentrations of CO₂ and NH₃ in the farrowing room were 1 177.20 and 8.63 mg/m³, respectively. The lowest concentrations of CO₂ and NH₃ in the gestation room and the farrowing room were located in the areas of 0.1-0.45 meter above the fresh air aisle. To sum up, air-conditioning controlled multistory pig buildings possessed good thermal insulation in winter. The ground

收稿日期: 2024-04-11; 修回日期: 2024-12-18

基金项目: 四川省省级科研院所基本科研业务费项目 (SASA202203)

第一作者: 钟志君, 男, 硕士, 助理研究员; 洪亮, 女, 硕士, 畜牧师。[#]共同第一作者

* 通信作者: 李斌, 硕士, 研究员, 主要从事猪禽营养与饲料科学研究, E-mail: 3017803@qq.com。

channel ventilation provided good air quality for the pig's breathing area. The air quality of the gestation room was bad when the ventilation was $3.6 \text{ km}^3/\text{h}$; therefore, we recommended increasing the ventilation to improve the air quality.

Keywords: ground channel ventilation; multistory pig buildings; winter; air conditioning control; environment parameters spatial distribution

猪舍环境对猪只健康具有重要影响,良好的猪舍环境对提高养猪生产效率,降低生产成本具有重要意义。猪舍的环境主要包括猪舍热环境和空气质量环境,评价热环境的主要指标有温度、湿度和风速等,评价空气质量环境的主要指标有 CO_2 、 NH_3 等有害气体和粉尘浓度。猪舍环境温度是影响猪群生产和繁殖性能的最直接的相关因素,温度过高或过低都会导致猪只生产性能的降低,只有在适宜的温度范围内,猪的自由采食量和能量利用才能达到最大效率^[1]。 NH_3 是猪舍最有害气体之一,主要来源于尿液中的尿素快速分解^[2]。 NH_3 进入猪只或人体呼吸系统会引起各种呼吸道疾病,并降低猪只的生产成绩^[3]。猪舍中的粉尘不仅会吸附猪舍中的有害气体,还会吸附各种致病菌和病毒进入呼吸道,对猪只和饲养员的健康造成不利影响^[4]。本文以空调控制的地道进风楼房猪舍为研究对象,对冬季妊娠舍和分娩舍内不同空间位点的温湿环境、有害气体(CO_2 、 NH_3)和粉尘浓度等环境因子进行实地监测,探索楼房猪舍内部环境因子的空间分布规律,深入了解楼房猪场在养猪生产过程中存在的环境控制问题,为优化楼房猪舍通风设计,提高楼房养猪环境控制水平提供数据支撑。

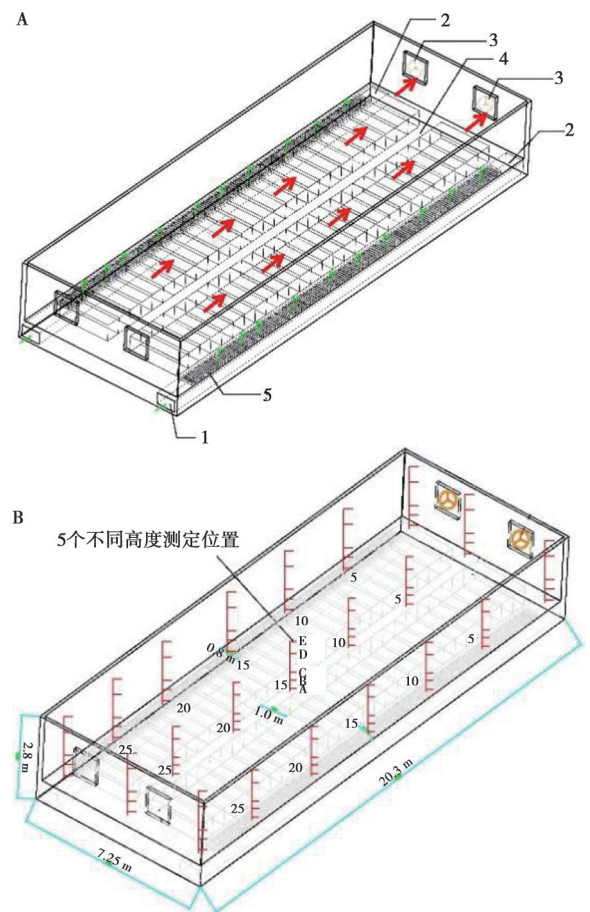
1 材料与方法

1.1 试验猪舍及测量位点

于2023年1月3—12日在四川省自贡市某楼房猪场进行。该楼房猪舍共6层,各楼层布局设计相同,每层楼包括妊娠舍17个单元,分娩舍5个单元。妊娠舍内饲养56头妊娠母猪,分娩舍饲喂56头分娩母猪,自动料线饲喂,粪污采用尿泡粪工艺,生产管理采用全进全出4周批次生产模式。该楼房猪舍采用负压通风模式,冬季采用空调来调节舍内温度。空调系统吹出的暖风通过地下风道向上进入猪舍新风过道,臭气经负压环控风机排入风井后进入顶楼的臭气处理间集中处理。冬季妊娠舍环控温度设置为 20°C ,环控风机采用时控轮转的方式,以10%的变频运行90 s后停止40 s,阶段通风量 $3.6 \text{ km}^3/\text{h}$ 。冬季分娩舍环控温度设置为 23.5°C ,环控风机采用时控轮转的方式,以20%的变频运行90 s后停止60 s,阶段通风量 $9.9 \text{ km}^3/\text{h}$ 。

妊娠舍内长20.3 m,宽7.25 m,高2.8 m,舍内2列限位栏,每列28个,共计56个限位栏。妊娠

舍内3条过道,靠墙两条地道新风过道宽0.8 m,中间漏缝地板过道宽1.0 m。在每条过道两端(风机、窗)及第5、10、15、20、25号限位栏处设7个环境因子测量位置,每个测量位置按距离地面高度0.1、0.45、0.75、1.5和2.0 m分别设置5个环境因子测量位点,妊娠舍共有测量位点 $7 \times 5 \times 3 = 105$ 个。妊娠舍气流路径及环境因子监测位点分布见图1。



A. 气流路径: 1. 气流入口; 2. 新风道; 3. 风机(气流出口); 4. 过道; 5. 地面进风口; 红色箭头代表舍内污浊空气排出方向,绿色箭头代表新鲜空气进入方向。B. 环境因子监测位点分布: 纯数字代表限位栏编号, A、B、C、D、E 分别为离地面 0.1、0.45、0.75、1.5 和 2.0 m 处测量位点。下同。

图1 妊娠舍气流路径及环境因子监测位点分布示意

分娩舍内长26.97 m,宽14.98 m,高2.75 m,舍内4列产床,每列14个,共计56个产床。分娩舍内5条过道,靠墙和圈舍正中央的3条地道新风过道

宽 0.8 m, 2 条实心水泥地面过道宽 1.0 m。在每条过道两端 (风机、窗) 及第 3、6、9、12 号产床处设置 6 个环境因子测量位置, 每个测量位置按距离地面高度 0.1、0.45、0.75、1.5 和 2.0 m 分别设置 5 个环境因子测量位点, 分娩舍共有测量位点 $6 \times 5 \times 5 =$

150 个。分娩舍气流路径及环境因子监测位点分布见图 2。

1.2 主要环境指标及仪器设备

猪舍内环境指标检测主要包括: 温度、湿度、风速、粉尘、 CO_2 和 NH_3 。检测仪器及参数见表 1。

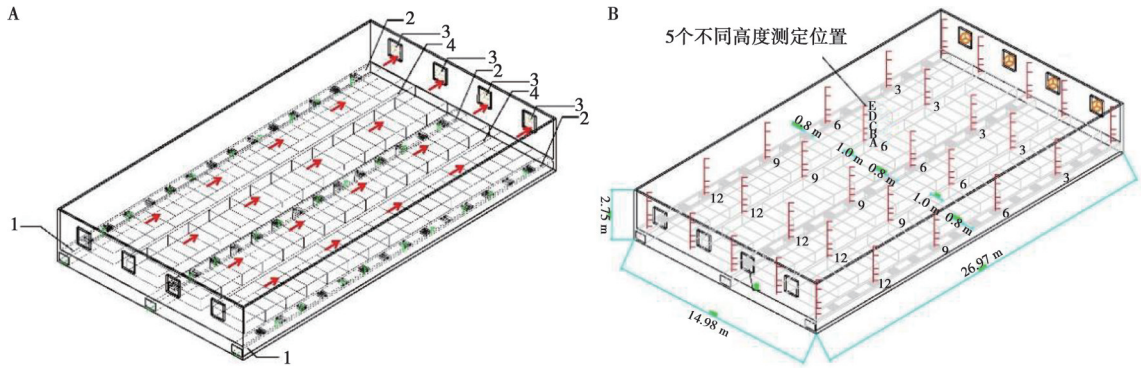


图 2 分娩舍气流路径 (A) 及环境因子监测位点分布 (B) 示意

表 1 测量仪器参数

仪器	型号	量程	精度	品牌
温湿度检测仪	Testo 625	-10~60 °C, 0~100%	0.1 °C, 0.1%	德图
氨气检测仪	AR8500	0~100 mg/m ³	0.1 mg/m ³	希玛
二氧化碳检测仪	AR8200	350~9 999 mg/m ³	5 mg/m ³	希玛
粉尘检测仪	ET-1000	0~999 μg/m ³	1 μg/m ³	艾锐普
风速检测仪	Testo 425	0~20 m/s	0.01 m/s	德图

1.3 测量方法

测量从圈舍右侧新风道的环控风机端开始, 测量路线按“S”形推进, 在圈舍左侧新风道靠窗端结束。每个测量位置按照从低到高的顺序进行测量, 每个位点测量 1 min, 分别记录测量数据。每个位置最高点测量完成后, 按顺序移动到下一位置, 从最低点开始测量, 以此循环测量各位点的环境因子。

1.4 数据统计与分析

所有试验数据由 Excel 分类汇总后, 应用 SPSS

22.0 分析软件对数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Duncan 多重比较, 试验数据以“平均值±标准差”表示。

2 结果

2.1 猪舍内粉尘分布

妊娠舍和分娩舍舍内不同高度的粉尘分布数据见表 2 和表 3。

表 2 妊娠舍内不同高度粉尘分布

高度/m	n	PM _{0.3}	PM _{0.5}	PM _{1.0}	PM _{2.5}	PM _{5.0}	PM _{10.0}
0.1	242	11.14±0.81 ^{Cc}	12.17±0.87 ^{Cc}	34.37±2.37 ^{Cc}	56.88±5.39 ^{Cc}	64.19±4.93 ^{Cc}	71.96±4.64 ^{Cc}
0.45	226	11.47±1.07 ^{Bb}	12.57±1.22 ^{Bb}	35.47±3.16 ^{Bb}	59.33±6.84 ^{Bb}	66.50±6.12 ^{Bb}	74.18±5.57 ^{Bb}
0.75	186	11.90±1.36 ^{Aa}	13.04±1.49 ^{Aa}	36.72±3.95 ^{Aa}	61.70±7.94 ^{Aa}	68.67±7.44 ^{Aa}	76.13±7.20 ^{Aa}
1.5	202	11.91±1.41 ^{Aa}	13.05±1.58 ^{Aa}	36.69±4.13 ^{Aa}	61.76±7.90 ^{Aa}	68.68±7.23 ^{Aa}	76.07±6.76 ^{Aa}
2.0	262	11.79±1.42 ^{Aa}	12.90±1.55 ^{ABa}	36.35±4.08 ^{ABa}	61.07±8.38 ^{ABa}	67.99±7.67 ^{ABa}	75.47±7.11 ^{ABa}

注: 同列数据肩标不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$), 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。表 3 同。

表3 分娩舍内不同高度粉尘分布

高度/m	n	PM _{0.3}	PM _{0.5}	PM _{1.0}	PM _{2.5}	PM _{5.0}	PM _{10.0}
0.1	274	10.78±0.58 ^{Bb}	11.80±0.61 ^{Bb}	33.42±1.55 ^{Bb}	54.70±3.95 ^{Bc}	62.53±3.83 ^{Cc}	70.84±3.97 ^{Cc}
0.45	240	10.87±0.58 ^{ABab}	11.89±0.64 ^{ABab}	33.59±1.62 ^{ABab}	54.94±3.87 ^{Bc}	62.81±3.72 ^{Cc}	71.15±3.84 ^{Cc}
0.75	254	10.89±0.56 ^{ABab}	11.89±0.58 ^{ABab}	33.61±1.54 ^{ABab}	55.96±4.36 ^{Ab}	64.04±4.25 ^{Bb}	72.56±4.49 ^{Bb}
1.5	259	10.93±0.64 ^{Aa}	11.95±0.68 ^{Aa}	33.85±1.75 ^{Aa}	56.86±4.62 ^{Aa}	65.05±4.43 ^{Aa}	73.75±4.53 ^{Aa}
2.0	268	10.96±0.59 ^{Aa}	11.97±0.62 ^{Aa}	33.80±1.59 ^{ABa}	56.70±4.35 ^{Aa}	64.85±4.20 ^{ABa}	73.48±4.39 ^{ABa}

由表2可知，不同粒径的粉尘在妊娠舍不同高度的分布具有相似的规律，0.75和1.5m处的粉尘浓度极显著高于0.45和0.1m处 ($P<0.01$)，0.45m处的粉尘浓度极显著高于0.1m处 ($P<0.01$)，0.75、1.5和2.0m之间差异不显著。由表3可知，在分娩舍，PM_{0.3}、PM_{0.5}和PM_{1.0}的粉尘浓度在0.1、0.45和0.75m处差异不显著；PM_{2.5}、PM_{5.0}和PM_{10.0}的粉尘浓度在0.75、1.5和2.0m处极显著高于0.1和0.45m ($P<0.01$)；所有粉尘在1.5和2.0m之间的浓度差异不显著。

2.2 妊娠舍内环境因子分布

妊娠舍内新风道和过道的环境因子分别从不同栏位（水平）和不同高度（垂直）两个维度进行分析，数据见表4和表5。

由表4可知，妊娠舍的各项环境指标中，温度在过道靠窗处显著低于中间栏位（10、15、20栏）处 ($P<0.05$)，在新风道不同栏位处差异不显著。湿度和风速在不同过道不同栏位处的差异均不显著。CO₂浓度在不同过道不同栏位处的差异显著，在新风道20栏处的CO₂浓度极显著高于前端（5、10、15栏及风机处） ($P<0.01$)，在过道靠窗处的CO₂浓度极显

著高于5栏和风机处 ($P<0.01$)。NH₃浓度在新风道不同栏位处的差异不显著，过道后端（20、25栏和靠窗处）的NH₃浓度极显著高于过道前端（5栏和风机处） ($P<0.01$)。从相同的栏位来看，新风道的NH₃浓度低于过道的NH₃浓度。

由表5可知，在相同的位置，温度随着高度的增加而增加，新风道1.5和2.0m处温度极显著高于0.1、0.45和0.75m处 ($P<0.01$)，0.75m处温度极显著高于0.1和0.45m处 ($P<0.01$)；在相同的高度，过道的温度均高于新风道的温度。新风道0.1m处湿度极显著低于其他高度的湿度 ($P<0.01$)，其余4个高度的湿度差异不显著；过道中0.45m处湿度最高，且显著高于0.1和2.0m处 ($P<0.05$)。新风道0.1m处风速极显著高于其他高度的风速 ($P<0.01$)，其余4个高度的风速差异不显著；过道中不同高度的风速没有差异。在相同的位置，CO₂的浓度随着高度的增加而增加。新风道CO₂和NH₃在不同高度的分布具有相同的规律，CO₂和NH₃在0.1m处的浓度极显著低于其他高度的浓度 ($P<0.01$)，在0.45m处的浓度极显著低于1.5和2.0m处 ($P<0.01$)。

表4 妊娠舍内不同过道不同栏位处环境因子分布

指标	位置	n	风机	5栏	10栏	15栏	20栏	25栏	窗
温度/℃	新风道	10	17.92±1.41	17.98±1.07	17.97±1.18	18.19±0.85	18.56±0.77	18.25±1.23	18.11±0.71
	过道	5	18.58±0.43 ^{ab}	18.62±0.57 ^{ab}	19.16±0.59 ^a	19.34±0.59 ^a	19.26±0.68 ^a	19.04±0.48 ^{ab}	18.36±0.37 ^b
	整体	15	18.14±1.20	18.19±0.96	18.37±1.15	18.57±0.94	18.79±0.80	18.51±1.09	18.19±0.62
湿度/%	新风道	10	72.46±9.55	71.83±9.14	73.56±10.85	70.83±10.39	74.32±11.31	77.41±11.88	76.99±11.12
	过道	5	69.50±3.85	70.86±2.48	74.04±5.23	72.74±3.09	75.16±4.99	76.82±2.85	74.64±7.74
	整体	15	71.47±8.06	71.51±7.46	73.72±9.14	71.47±8.54	74.60±9.46	77.21±9.65	76.21±9.89
风速/ (m·s ⁻¹)	新风道	10	0.31±0.07	0.49±0.33	0.62±0.49	0.63±0.58	0.31±0.22	0.30±0.19	0.27±0.04
	过道	5	0.36±0.17	0.26±0.01	0.27±0.03	0.25±0.02	0.28±0.05	0.29±0.05	0.29±0.03
	整体	15	0.33±0.11	0.41±0.29	0.50±0.43	0.50±0.50	0.30±0.18	0.30±0.16	0.28±0.03

续表4

指标	位置	n	风机	5 栏	10 栏	15 栏	20 栏	25 栏	窗
CO ₂ / (mg · m ⁻³)	新风道	10	1 381.70± 377.81 ^{Bbc}	1 326.40± 406.01 ^{Be}	1 411.50± 351.68 ^{Bbc}	1 418.80± 344.86 ^{Bbc}	1 982.90± 459.72 ^{Aa}	1 775.50± 563.71 ^{ABab}	1 623.00± 414.45 ^{ABabc}
	过道	5	1 250.00± 107.41 ^{Cc}	1 397.80± 78.68 ^{BCbc}	1 581.00± 210.35 ^{ABab}	1 673.60± 193.18 ^{ABa}	1 662.20± 180.18 ^{ABa}	1 608.20± 100.89 ^{ABa}	1 692.60± 105.77 ^{Aa}
	整体	15	1 337.80± 314.94 ^{Cc}	1 350.20± 330.09 ^{Cc}	1 468.00± 314.63 ^{Bbc}	1 503.73± 320.27 ^{Bbc}	1 876.00± 411.86 ^{Aa}	1 719.73± 462.44 ^{ABab}	1 646.20± 338.78 ^{ABb}
NH ₃ / (mg · m ⁻³)	新风道	10	7.29±3.63	5.86±2.68	8.14±4.40	8.18±5.83	9.03±4.91	11.89±6.79	11.23±6.28
	过道	5	7.24±1.67 ^{Cc}	7.58±2.87 ^{Cc}	16.82±8.80 ^{BCbc}	14.82±6.39 ^{BCc}	26.88±9.42 ^{ABab}	34.76±12.25 ^{Aa}	26.02±9.61 ^{ABab}
	整体	15	7.27±3.04 ^{Cc}	6.43±2.77 ^{Cc}	11.03±7.25 ^{ABCbc}	10.39±6.63 ^{ABCbc}	14.98±10.80 ^{ABCab}	19.51±14.04 ^{Aa}	16.16±10.19 ^{ABab}

注：同行数据肩标不同大写字母代表差异极显著 ($P < 0.01$)，不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)，小写字母相同代表差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

表 5 妊娠舍内不同过道不同高度环境因子分布

指标	位置	n	高度/m				
			0.1	0.45	0.75	1.5	2.0
温度/℃	新风道	14	17.24±1.16 ^{Cd}	17.32±0.70 ^{Cd}	18.05±0.37 ^{Bc}	18.79±0.31 ^{Ab}	19.30±0.28 ^{Aa}
	过道	7	18.56±0.48 ^{Cc}	18.44±0.30 ^{Cc}	18.71±0.41 ^{BCc}	19.21±0.50 ^{ABab}	19.61±0.48 ^{Aa}
	整体	21	17.68±1.16 ^{Cd}	17.70±0.80 ^{BCd}	18.27±0.49 ^{Bc}	18.93±0.42 ^{Ab}	19.40±0.38 ^{Aa}
湿度/%	新风道	14	59.01±4.52 ^{Bb}	76.71±12.26 ^{Aa}	80.91±6.76 ^{Aa}	77.83±4.93 ^{Aa}	75.11±4.38 ^{Aa}
	过道	7	70.21±6.77 ^c	77.40±2.96 ^a	75.20±4.75 ^{ab}	73.29±1.81 ^{abc}	70.87±3.26 ^{bc}
	整体	21	62.75±7.50 ^{Bd}	76.94±10.02 ^{Abc}	79.00±6.64 ^{Aab}	76.31±73.70 ^{Abc}	73.70±4.45 ^{Ac}
风速/ (m · s ⁻¹)	新风道	14	0.75±0.61 ^{Aa}	0.32±0.16 ^{Bb}	0.34±0.18 ^{Bb}	0.36±0.23 ^{Bb}	0.33±0.19 ^{Bb}
	过道	7	0.30±0.04	0.30±0.44	0.27±0.02	0.27±0.02	0.30±0.16
	整体	21	0.60±0.53 ^{Aa}	0.31±0.13 ^{Bb}	0.31±0.15 ^{Bb}	0.33±0.19 ^{Bb}	0.32±0.17 ^{Bb}
CO ₂ / (mg · m ⁻³)	新风道	14	1 047.71±412.40 ^{Cc}	1 421.71±424.73 ^{Bb}	1 674.14±388.07 ^{ABab}	1 827.43±295.46 ^{Aa}	1 828.86±284.14 ^{Aa}
	过道	7	1 415.00±228.46 ^b	1 448.57±115.68 ^b	1 569.00±184.92 ^{ab}	1 659.43±207.98 ^a	1 669.00±181.58 ^a
	整体	21	1 170.14±397.09 ^{Cd}	1 430.67±348.48 ^{BCc}	1 639.10±332.75 ^{ABab}	1 771.43±276.23 ^{Aa}	1 775.57±261.40 ^{Aa}
NH ₃ / (mg · m ⁻³)	新风道	14	2.23±1.57 ^{Cc}	7.29±3.64 ^{Bb}	9.96±3.99 ^{ABab}	12.24±4.70 ^{Aa}	12.29±4.22 ^{Aa}
	过道	7	20.21±19.22	24.31±15.43	18.11±11.54	16.70±6.07	16.46±4.75
	整体	21	8.22±13.71	12.97±12.15	12.68±8.11	13.73±5.48	13.68±4.74

2.3 分娩舍内环境因子分布

分娩舍内新风道和过道的环境因子分别从不同栏位（水平）和不同高度（垂直）2个维度进行分析，数据见表6和表7。

由表6可知，在分娩舍新风道中，温度、风速在

不同栏位处的差异均不显著；CO₂浓度、湿度在风机处显著高于3、6、9、12栏处 ($P < 0.05$)；NH₃浓度在风机处显著高于6、9、12栏和靠窗处 ($P < 0.05$)。在过道中，各环境指标在不同栏位处的差异均不显著。

表6 分娩舍内不同过道不同栏位处环境因子分布

指标	位置	n	风机	3栏	6栏	9栏	12栏	窗
温度/℃	新风道	15	21.91±0.69	21.82±1.01	21.90±1.08	21.94±1.00	21.57±1.30	21.29±0.96
	过道	10	22.43±1.17	22.65±0.68	22.45±1.00	22.77±0.80	22.88±0.66	22.49±1.86
	整体	25	22.12±0.93	22.15±0.97	22.12±1.06	22.27±1.00	22.10±1.26	21.77±1.48
湿度/%	新风道	15	53.52±3.38 ^{Aa}	47.69±6.03 ^{Bbc}	47.07±4.41 ^{Bbc}	46.33±5.39 ^{Bc}	46.15±5.53 ^{Bc}	50.29±3.09 ^{ABab}
	过道	10	50.49±7.39	47.80±2.46	47.88±2.17	48.34±2.43	48.13±3.38	46.43±3.77
	整体	25	52.31±5.42 ^{Aa}	47.73±4.85 ^{Bb}	47.39±3.64 ^{Bb}	47.13±4.49 ^{Bb}	46.94±4.81 ^{Bb}	48.75±3.83 ^{Bb}
风速/(m·s ⁻¹)	新风道	15	0.18±0.10	0.30±0.31	0.28±0.27	0.26±0.25	0.30±0.28	0.27±0.10
	过道	10	0.16±0.03	0.14±0.03	0.19±0.09	0.19±0.07	0.17±0.04	0.18±0.04
	整体	25	0.17±0.08	0.23±0.25	0.24±0.22	0.23±0.20	0.25±0.23	0.23±0.09
CO ₂ /(mg·m ⁻³)	新风道	15	1 177.20±176.69 ^a	1 008.27±215.28 ^b	946.60±238.55 ^b	945.53±228.09 ^b	937.67±234.97 ^b	1 011.60±112.28 ^b
	过道	10	1 011.60±86.31	1 001.30±125.31	1 061.50±113.17	960.08±352.94	1 056.80±72.95	1 002.80±88.80
	整体	25	1 110.96±166.91	1 005.48±181.48	992.56±203.22	951.35±277.70	985.32±194.30	1 008.08±101.64
NH ₃ /(mg·m ⁻³)	新风道	15	8.63±3.69 ^{Aa}	6.09±4.28 ^{ABab}	4.71±3.88 ^{Bb}	4.57±4.03 ^{Bb}	3.89±3.58 ^{Bb}	3.66±1.60 ^{Bb}
	过道	10	7.65±4.93	7.39±4.41	5.64±1.94	6.81±2.09	6.17±2.09	4.56±1.28
	整体	25	8.24±4.16 ^{Aa}	6.61±4.29 ^{ABab}	5.08±3.23 ^{Bbc}	5.47±3.51 ^{Bbc}	4.80±3.23 ^{Bbc}	4.02±1.52 ^{Bc}

表7 分娩舍内不同过道不同高度环境因子分布

指标	位置	n	高度/m				
			0.1	0.45	0.75	1.5	2.0
温度/℃	新风道	18	21.01±0.80 ^{Cd}	20.92±0.74 ^{Cd}	21.44±0.52 ^{Cc}	22.35±0.51 ^{Bb}	22.98±0.56 ^{Aa}
	过道	12	22.17±0.89 ^{Bc}	22.03±0.98 ^{Bc}	22.34±1.09 ^{Bbc}	22.96±0.96 ^{ABab}	23.56±0.75 ^{Aa}
	整体	30	21.47±1.01 ^{Cc}	21.36±1.00 ^{Cc}	21.80±0.90 ^{Cc}	22.59±0.77 ^{Bb}	23.21±0.69 ^{Aa}
湿度/%	新风道	18	44.30±6.05 ^{Cc}	46.99±5.51 ^{BCbc}	50.22±5.86 ^{ABa}	51.37±2.56 ^{Aa}	49.66±2.60 ^{Bab}
	过道	12	48.11±4.13	48.83±3.46	47.75±3.95	48.89±4.44	47.32±4.55
	整体	30	45.82±5.61 ^{Bc}	47.72±4.81 ^{ABbc}	49.23±5.25 ^{Aab}	50.38±3.58 ^{Aa}	48.72±3.63 ^{ABab}
风速/(m·s ⁻¹)	新风道	18	0.41±0.34 ^{Aa}	0.31±0.25 ^{Aabc}	0.25±0.22 ^{ABb}	0.16±0.08 ^{Bbc}	0.19±0.10 ^{Bbc}
	过道	12	0.19±0.05	0.19±0.08	0.15±0.03	0.14±0.03	0.18±0.06
	整体	30	0.32±0.29 ^{Aa}	0.26±0.20 ^{ABab}	0.21±0.18 ^{ABbc}	0.15±0.07 ^{Bc}	0.19±0.09 ^{Bbc}
CO ₂ /(mg·m ⁻³)	新风道	18	820.83±168.38 ^{Cc}	874.39±176.73 ^{BCc}	987.50±193.11 ^{Bb}	1 141.44±136.12 ^{Aa}	1 198.22±129.72 ^{Aa}
	过道	12	938.67±60.75	973.58±71.83	1 019.92±85.26	1 103.17±73.77	1 043.07±331.07
	整体	30	867.97±146.52 ^{Cc}	914.07±150.70 ^{BCc}	1 000.47±157.73 ^{Bb}	1 126.13±115.28 ^{Aa}	1 136.16±239.62 ^{Aa}
NH ₃ /(mg·m ⁻³)	新风道	18	2.53±2.36 ^{Cc}	3.09±2.97 ^{BCc}	5.92±3.91 ^{ABab}	7.22±3.59 ^{Aa}	7.54±3.80 ^{Aa}
	过道	12	5.81±3.00	5.22±2.68	5.78±3.30	7.25±2.87	7.79±3.59
	整体	30	3.84±3.06 ^{Bc}	3.94±3.00 ^{Bc}	5.86±3.62 ^{ABb}	7.23±3.27 ^{Aab}	7.64±3.66 ^{Aa}

由表7可知，整体而言，分娩舍温度随高度的增加而增加，新风道2.0 m处温度极显著高于其他高度温度 ($P<0.01$)，1.5 m处温度极显著高于0.1、0.45和0.75 m处 ($P<0.01$)。新风道0.1 m处湿度极显著低于0.75、1.5和2.0 m处 ($P<0.01$)，过道湿度在5个高度之间差异不显著。新风道0.1 m处风速极显著高于1.5和2.0 m ($P<0.01$)，显著高于0.75 m处 ($P<0.05$)。CO₂和NH₃的浓度整体随着高

度增加而增加，新风道1.5和2.0 m处极显著高于0.1和0.45 m处 ($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 猪舍内粉尘的空间分布规律

猪舍空气中的粉尘主要来自猪的粪便和饲料，细小的颗粒物会刺激皮肤、呼吸道黏膜及肺泡，削弱猪自身免疫系统的正常功能^[5]。沈家鲲等^[6]的研究发

现,猪舍空气 $PM_{2.5}$ 能够诱导猪肺泡巨噬细胞发生炎症反应。根据 GB/T 17824.3—2008《规模猪场环境参数及环境管理》的规定,妊娠舍和分娩舍粉尘的浓度要求是不超过 1.5 和 1.2 mg/m^3 ^[7]。本研究中妊娠舍和分娩舍不同高度粉尘的浓度均未超过且远低于国标规定值,研究结果与唐倩等^[8]分娩舍内 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{0.3}$ 浓度分别为 82.78、60.64、30.67、10.23 $\mu g/m^3$ 的研究结果相当。有研究表明,粒径的大小是决定粉尘在空气中的扩散距离、悬浮时间和进入呼吸道深度的主要因素^[9]。10 μm 以上的粉尘可被阻挡在鼻腔内,5~10 μm 的粉尘可被阻挡在呼吸道和支气管内,5 μm 以下的粉尘可进入细支气管,小于 1 μm 的粉尘可进入肺泡内^[10]。在妊娠舍和分娩舍测定的 5 个不同的高度中,每个高度粉尘的浓度均为 $PM_{0.3} < PM_{0.5} < PM_{1.0} < PM_{2.5} < PM_{5.0} < PM_{10.0}$ 。从同一粒径的粉尘在不同高度的分布来看,妊娠舍粉尘浓度最高主要出现在 0.75 和 1.5 m 处,分娩舍粉尘浓度最高主要出现在 1.5 和 2.0 m 处,而 1.5 m 左右的高度正是人的呼吸高度,因此建议猪场工作人员佩戴防尘口罩以减小粉尘对呼吸道健康的影响。

3.2 猪舍内温湿度及风速的空间分布规律

空气温度和相对湿度是直接反映畜禽舍内环境的重要指标,是影响动物健康的首要因素^[11]。猪舍内温度不适宜会影响母猪的繁殖性能,降低饲料报酬和生产效率^[12]。根据 GB/T 17824.3—2008 的规定,妊娠舍和分娩舍的温度舒适范围是 15~20 $^{\circ}C$ 和 18~22 $^{\circ}C$ ^[7]。本研究中妊娠舍各位点的温度均在舒适范围之内,分娩舍内各位点的温度在舒适温度范围或略高于舒适温度,这与分娩舍空调设置温度为 23.5 $^{\circ}C$ 有关。根据各位点的测定数据来看,地道进风猪舍在空调系统加热下能很好地维持舍内温度在设定温度。温度在妊娠舍和分娩舍的分布存在相同的规律,在水平方向上,不同栏位间的温度分布均匀性好;在垂直方向上,温度随着高度的增加而增加,且不同高度的温度差异达到了极显著水平;当高度相同时,过道的温度略高于新风道的温度。

猪舍的湿度会影响猪的体热调节,湿度过高或过低都会对猪只健康带来不利影响。湿度高会降低猪只的抵抗能力,增加患病风险;湿度低会导致猪的皮肤和黏膜干裂,影响皮肤和黏膜的防御功能^[13]。根据 GB/T 17824.3—2008 的规定,妊娠舍和分娩舍的湿度舒适范围是 60%~70%^[7]。本试验中妊娠舍中的整体湿度位于 70%~80%,高于舒适范围,这与刘玲玲等^[14]的研究结果地道通风模式猪舍湿度都比传统猪舍高相同。而分娩舍的整体湿度在 47%~53%,低于舒适范围,这可能与分娩舍管理中使用密斯陀干燥圈

舍环境有关。从湿度的空间分布来看,湿度在不同垂直高度间的差异极显著(分娩舍过道除外),在新风道 0.1 m 处最低,在新风道中高位置处增加至最大,这可能与猪只呼吸带出大量水蒸气有关;过道中不同高度间的湿度差异小于新风道。

妊娠舍和分娩舍最大风速分别为 0.75 和 0.41 m/s ,均出现在新风道 0.1 m 处,随着高度的增加,风速急剧下降;从水平方向不同栏位看,新风道的风速均高于过道风速。根据 GB/T 17824.3—2008 的规定,妊娠舍和分娩舍的冬季风速分别为 0.3 和 0.15 m/s ^[7],虽然妊娠舍和分娩舍整体风速高于国标规定,但由于新风道的风向是从下至上且不直接经过猪身体,加之猪舍温度适宜,稍高的风速对猪体舒适度影响较小。

3.3 猪舍内 CO_2 和 NH_3 的空间分布规律

CO_2 的含量可以指示畜禽舍中通风状况和空气的污浊程度, CO_2 浓度增加,其他有害气体含量也可能随之升高^[15],因此 CO_2 是监测空气污染的可靠指标^[16]。本研究结果显示, CO_2 浓度在妊娠舍和分娩舍的垂直方向上具有相同的分布规律,即 CO_2 浓度随着高度的增加而增加,且新风道不同高度的浓度差大于过道不同高度的浓度差,原因可能是猪只呼吸产生大量的 CO_2 导致新风道浓度大幅上升。妊娠舍和分娩舍新风道中 NH_3 的浓度随着高度的增加而增加,且不同高度间的浓度差异极显著。 NH_3 主要由猪舍内粪尿和污水混合物中氮元素的分解反应产生^[17-18]。妊娠舍过道位于漏缝地板上方,因此 NH_3 在过道的浓度比新风道高。本研究发现,妊娠舍和分娩舍中 CO_2 和 NH_3 浓度在新风道 0.1~0.45 m 的区域最小,这是地道进风口位于新风道,持续为圈舍提供新鲜空气所致。

从水平方向不同栏位来看,在妊娠舍过道远离环控风机区域 CO_2 和 NH_3 的浓度极显著高于环控风机附近的浓度,最大浓度为 1 982.90 和 34.76 mg/m^3 ,超过了国标中妊娠舍 CO_2 和 NH_3 浓度应低于 1 500 和 25 mg/m^3 的规定^[7],可能的原因是妊娠舍阶段通风量 (3.6 km^3/h) 设置不足,导致远离环控风机区域空气更新较慢所致。在分娩舍各位点 CO_2 和 NH_3 的最大浓度为 1 177.20 和 8.63 mg/m^3 ,均低于环境参数指标推荐的浓度 1 300 和 20 mg/m^3 ^[7],说明分娩舍阶段通风量 (9.9 km^3/h) 设置合理,环境控制系统运行效果良好,舍内空气质量较好。根据妊娠舍和分娩舍阶段通风量和圈舍空间体积,计算得到冬季妊娠舍和分娩舍的换气率分别为 8.85 和 8.91 次/h。虽然妊娠舍和产子舍存栏猪只数量与换气率相当,但空气质量确存在较大差异,推测可能的原因是圈舍设计的长宽

比不同导致通风效果存在差异,因此建议增大妊娠舍的阶段通风量来改善圈舍空气质量。

4 结论

空调控制的地道通风楼房猪舍冬季妊娠舍和分娩舍内温度能很好地达到环控系统设置温度,地道进风系统能够为猪只呼吸区域提供较好的空气质量。建议冬季适当增加妊娠舍的阶段通风量,降低 CO₂ 和 NH₃ 的浓度,改善空气质量。

参考文献:

- [1] 吕惠序. 冬季控制猪呼吸道病要做好保温与通风 [J]. 北方牧业, 2013 (22): 18.
- [2] CORTUS E L, LEMAY S P, BARBER E M, et al. A dynamic model of ammonia emission from urine puddles [J]. Biosystems Engineering, 2008, 99 (3): 390-402.
- [3] VRANKEN E, CLAES S, HENDRIKS J, et al. Intermittent measurements to determine ammonia emissions from livestock buildings [J]. Biosystems Engineering, 2004, 88 (3): 351-358.
- [4] CURTIS S E, ANDERSON C R, SIMON J, et al. Effects of aerial ammonia, hydrogen sulfide and swine house dust on rate of gain and respiratory tract structure in swine [J]. Journal of Animal Science, 1975, 41 (3): 735-739.
- [5] 唐倩, 戴鹏远, 吴胜, 等. 猪舍颗粒物对肺泡巨噬细胞功能的影响 [J]. 畜牧兽医学报, 2018, 49 (10): 2092-2101.
- [6] 沈家颀, 周子琳, 沈丹, 等. 猪舍空气细颗粒物对猪肺泡巨噬细胞精氨酸代谢和糖酵解的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2023, 46 (4): 747-755.
- [7] 季海峰, 张董燕, 单达聪, 等. 猪场环境参数与环境管理: GB/T 17824.3—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] 唐倩, 张民扬, 徐世永, 等. 冬季规模化猪场哺乳母猪舍内有害气体、颗粒物和微生物气溶胶的分布特点 [J]. 畜牧与兽医, 2022, 54 (12): 41-48.
- [9] 黄藏宇, 李永明, 徐子伟, 等. 猪舍内不同季节微生物气溶胶含量及其空气动力学分析 [J]. 家畜生态学报, 2016, 37 (11): 47-51.
- [10] NEL A. Air pollution-related illness: effects of particles [J]. Science, 2005, 308 (5723): 804-806.
- [11] HUYNH T T T, AARNINK A J A, VERSTEGEN M W A, et al. Effects of increasing temperatures on physiological changes in pigs at different relative humidities [J]. J Anim Sci, 2005, 83 (6): 1385-1396.
- [12] 刘玉龙, 周海. 温度和湿度对猪的影响及其控制措施 [J]. 现代畜牧科技, 2016 (12): 31-31.
- [13] 李如治. 家畜环境卫生学 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [14] 刘玲玲, 韩石磊, 孙彦婷, 等. 地道通风方式对冬季育肥猪舍环境及生长性能的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2017, 49 (1): 34-35.
- [15] 王骞. 禽畜舍环境多参数监测系统的研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
- [16] 王阳, 王朝元, 李保明. 蛋鸡舍冬季 CO₂ 浓度控制标准与最小通风量确定 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (2): 240-244.
- [17] PHILIPPE F X, CABARAUX J F, BAUDOUIN N. Ammonia emissions from pig houses: influencing factors and mitigation techniques [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 141 (314): 245-260.
- [18] 朱海生. 生长育肥猪氨气排放及模型的研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.