

# 不同通风模式对保育猪舍冬季环境的影响

李修松<sup>1,2</sup> 叶章颖<sup>1</sup> 李保明<sup>3</sup> 冯晓龙<sup>2</sup> 朱松明<sup>1</sup> 沈盼<sup>2</sup>

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 青岛大牧人机械股份有限公司, 青岛 266000;  
3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对猪舍地下风道进风 (Ground channel ventilation, GCV) 和吊顶进风 (Ceiling ventilation, CV) 两种不同进风方式对舍内环境的影响, 分别开展了 GCV 与 CV 通风效果的试验研究。采用现场测试方法, 对冬季广西壮族自治区某规模化保育场 GCV 和 CV 两种不同通风模式猪舍的热环境和空气质量环境进行测试, 结果表明: GCV 猪舍热环境优于 CV 猪舍, 虽然测试期间 GCV 猪舍内平均温度与 CV 猪舍无明显差异 ( $p > 0.05$ ), 但 GCV 猪舍舍内温度波动  $1.7^{\circ}\text{C}$ , 小于 CV 猪舍  $4.6^{\circ}\text{C}$ , GCV 猪舍温度分布均匀性优于 CV 猪舍 ( $p < 0.05$ ); GCV 猪舍地下风道对舍外新风有加热或降温的预处理作用, 地下风道的温度常年在  $20^{\circ}\text{C}$  左右, 当舍外新风温度较低时对其加热, 舍外新风温度较高时对其降温; 尽管 GCV 猪舍平均通风量低于 CV 猪舍, 但 GCV 猪舍的  $\text{NH}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  浓度均低于 CV 猪舍 ( $p < 0.05$ ), GCV 猪舍移除气体污染物效率高于 CV 猪舍 ( $p < 0.05$ ); 两模式猪舍排风口气体污染物浓度相差不大 ( $p > 0.05$ ), GCV 猪舍污染物的排放率低于 CV 猪舍 ( $p < 0.05$ )。结果表明, 保育舍在冬季采用 GCV 通风模式, 猪舍内环境优于 CV 通风模式。

**关键词:** 保育猪舍; 通风模式; 地下通风; 吊顶进风; 热环境; 空气质量环境

中图分类号: TU264<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)03-0317-09

OSID:



## Influence of Different Ventilation System on Environment of Nursery Piggery in Winter

LI Xiusong<sup>1,2</sup> YE Zhangying<sup>1</sup> LI Baoming<sup>3</sup> FENG Xiaolong<sup>2</sup> ZHU Songming<sup>1</sup> SHEN Pan<sup>3</sup>

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Qingdao Bigherdsman Machinery Co., Ltd., Qingdao 266000, China

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming to study the differences between ground channel ventilation (GCV) and ceiling ventilation (CV) in nursery piggery in winter. The effects of GCV and CV ventilation system on the environment of piggery were studied. The field test method was used to test and analyze the thermal environment and air quality environment of piggery with GCV and CV ventilation modes in a large-scale conservation farm in Guangxi in winter. The result showed that the thermal environment of GCV piggery was better than that of CV piggery. Although there was no significant difference in average temperature of GCV and CV piggery during the test period ( $p > 0.05$ ), the temperature fluctuation of GCV piggery was smaller than that of CV piggery ( $1.7^{\circ}\text{C} < 4.6^{\circ}\text{C}$ ). GCV piggery underground air duct had heating or cooling effect on fresh air outside the house. When the temperature of fresh air outside the house was lower than  $20.2^{\circ}\text{C}$ , GCV heated the outside air. When it was higher than  $20.2^{\circ}\text{C}$ , GCV cooled the outside air. Although the average ventilation rate of GCV piggery was lower than that of CV piggery, the temperature distribution uniformity of GCV piggery was better than that of CV piggery ( $p < 0.05$ ). The concentration of  $\text{NH}_3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  in GCV piggery was lower than that in CV piggery ( $p < 0.05$ ), and the removal efficiency of gas pollutants in GCV piggery was higher than that in CV piggery ( $p < 0.05$ ). There was little difference in the concentration of gas pollutants in the outlet of the two models of

收稿日期: 2019-07-28 修回日期: 2019-10-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0500700)

作者简介: 李修松 (1978—), 男, 博士生, 青岛大牧人机械股份有限公司工程师, 主要从事畜禽养殖过程控制与环境研究, E-mail: lixiusong111111@126.com

通信作者: 朱松明 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生物环境智能控制技术与装备研究, E-mail: zhusm@zju.edu.cn

GCV and CV ( $p > 0.05$ ), and the emission rate of air pollutants in GCV piggery was lower than that in CV piggery ( $p < 0.05$ ). The results showed that GCV ventilation system was better than CV ventilation system in nursery piggery in winter.

**Key words:** nursery piggery; ventilation mode; ground channel ventilation; ceiling ventilation; thermal environment; air quality environment

0 引言

通风系统对猪舍环境的影响主要是指通风系统对猪舍热环境和空气质量环境的影响,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  $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$  等有害气体和粉尘浓度。通风系统的主要功能是根据猪只不同的生长阶段为猪只提供实现最佳生长的温度、湿度、风速等,并移除对猪只和饲养人员健康不利的  $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ 、粉尘等气体污染物。

保育阶段的仔猪消化功能发育尚不健全,主动免疫系统尚不完善,而且还承受断奶应激的影响<sup>[1]</sup>,极易受到猪舍热环境和空气质量环境的影响,产生各种疾病。RISKOWSKI 等<sup>[2]</sup>通过试验发现,在不同温度和风速的环境中,不仅对保育猪的日增重、饲料消耗量影响明显,还对饲料在消化系统的消化时间影响明显,同时还发现,饲料消化时间较短的猪只腹泻发病率较高。腹泻痊愈的猪只生长发育不良、日增重下降的现象比较常见<sup>[3]</sup>。SCHEEPENS 等<sup>[4]</sup>研究发现,保育猪在较低温度或较高风速的环境中咬耳、咬尾、打斗的行为是舒适环境的 4 倍,温度和风速等环境因素对保育猪福利行为影响明显。 $\text{NH}_3$  是猪舍最有害气体之一, $\text{NH}_3$  进入猪只或人体呼吸系统会引起各种呼吸道疾病<sup>[5]</sup>,而且在分解过程中会消耗维持猪体生长和生产的能量,降低猪只的生产成绩<sup>[6-7]</sup>,猪舍中的粉尘不仅会吸附猪舍中的各种有害气体,还会吸附各种病毒、病菌微生物进入呼吸道和肺部,对猪只和饲养人员健康造成不利影响<sup>[8]</sup>。因此,保育阶段的猪只对通风系统的要求较为严格,尤其在冬季通风量较小的情况下,舍内各部位温湿度分布需均匀,并且不能出现较大波动;气流分布均匀无死角,且能够将  $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ 、粉尘等气体污染物控制在较低的范围内<sup>[9]</sup>。

猪舍内温湿度分布的均匀性、移除气体污染物的效率主要取决于通风系统采取的通风模式<sup>[10]</sup>。猪舍通风模式与进气口和排气口的布置位置有关。STEVE 等<sup>[11]</sup>在一个 1/2 比例模型的育肥舍通过比较 5 种类型通风模式发现,通风量保持不变,进风窗和地沟风机均位于猪舍中间位置的通风模式使猪只活动区域的气流场分布最均匀。BJERG 等<sup>[12]</sup>利用 CFD 对丹麦

常见的猪舍通风模式进行优化,发现在粪池布置风量较小的排风风机,舍内  $\text{NH}_3$  浓度明显降低,并且将屋顶风机移动到躺卧区上方时,猪舍温度分布更加均匀。文献[13-14]也证实,不同进风口和排风口布置方式产生的气流组织模式对粉尘的移除效率影响明显。

目前,大部分关于通风模式的研究基于 CFD 模拟或者试验猪舍,SMITH 等<sup>[15]</sup>试验证实,实际生产中猪舍的环境比较复杂,猪舍设施、猪只身体形状及其活动行为对气体的流动和分布影响明显。本文基于商业猪场实际生产的保育舍进行测试,研究 2 种不同通风模式在冬季对保育舍内热环境和空气质量环境各项指标的影响。

1 材料与方法

1.1 试验猪舍

试验猪舍选取广西壮族自治区陆川县某养殖集团存栏 2 000 头基础母猪配套的保育场,该保育场采用全进全出周批次生产模式,每周断奶仔猪约 960 头,每周仔猪进入 2 个单元,每单元约 480 头仔猪。仔猪 21—22 日龄进入保育舍,保育 42 d,空栏消毒 7 d。保育舍共 14 间,每间宽 7.2 m,长 28.8 m,吊顶高度 2.4 m。猪舍中间过道两侧猪栏,过道宽 0.8 m,栏长 2.4 m,宽 3.2 m,每侧 12 栏,每栏 20 头猪,每头猪占地约 0.38  $\text{m}^2$ ,稍大于 MWPS 推荐值 (0.34  $\text{m}^2/\text{头}$ )<sup>[16]</sup>,栏内实体地面约占 1.9  $\text{m}^2$ ,漏粪区域约 5.8  $\text{m}^2$ ,采用规模猪场常用保育专用塑料漏缝地板,规格 0.6 m  $\times$  0.6 m,漏缝率 46%。栏位前端采用 PVC 实体隔板,两侧格栅。离前端实体隔板 0.5 m 的侧栏中间放置双面 6 孔位不锈钢保育料槽,离墙 0.5 m 的侧栏中间放置仔猪饮水盘。每栏前面实体地板上方放置 175 W 保温灯 2 只。猪舍粪污排放采用粪尿分离的机械刮粪方式,每天上午刮粪一次。根据 MWPS 保育舍对通风量建议<sup>[16]</sup>,配置 50"定速、36"定速、24"变速风机各 1 台放置粪池底部(试验期间监测两舍舍内负压均在 15~20 Pa 之间,风机流量按负压 20 Pa 下风机对应风量设计,风机运行工况满足设计要求)。降温湿帘长 12 m,高 1.8 m。猪舍屋面和吊顶均采用 100 mm 厚玻璃丝绵保温隔热材料。猪舍平面布置如图 1 所示(图中  $\bigcirc$  表示温度测点, $\triangle$  表示气体污染物浓度测点)。

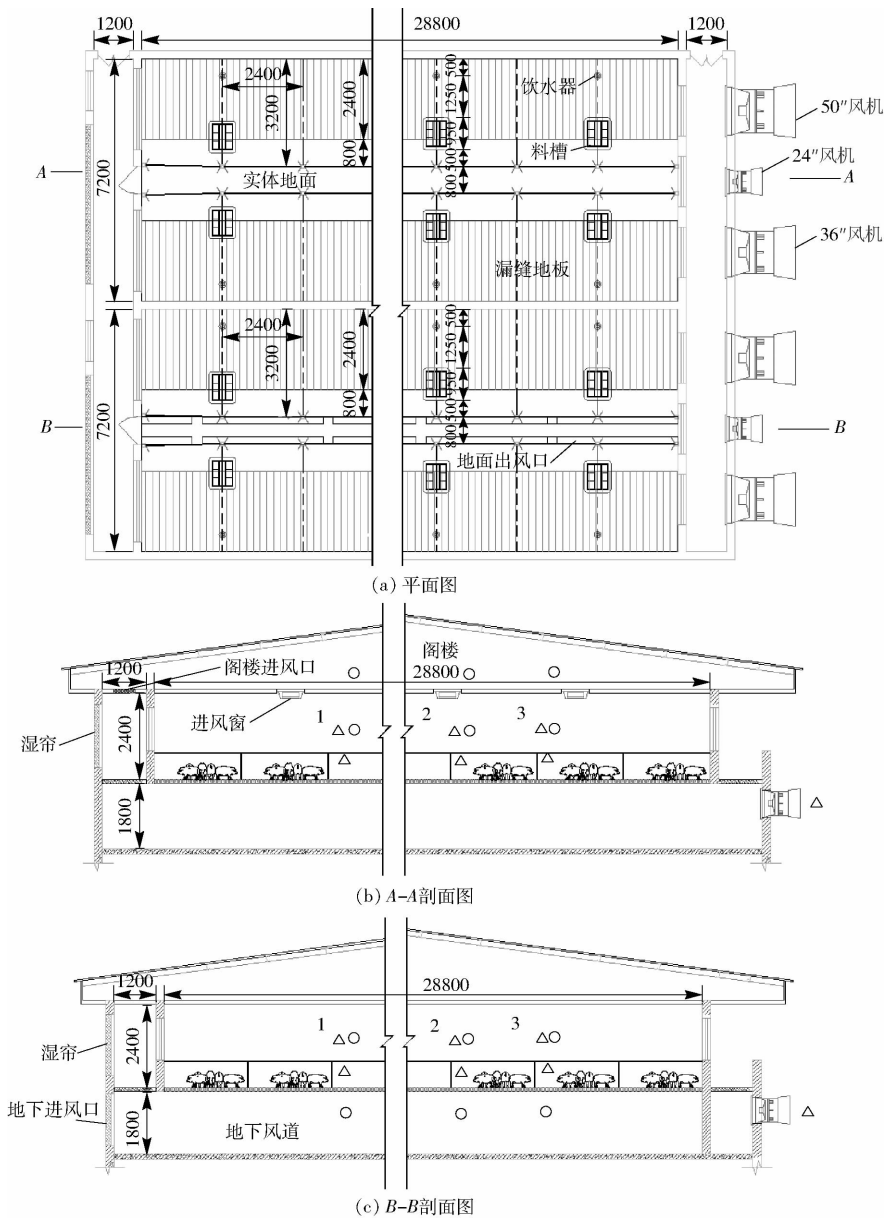


图 1 试验猪舍示意图

Fig. 1 Schematic of test pig house

选取保育 4 周龄 2 间相邻猪舍做试验猪舍,试验期间未出现仔猪死亡情况。饲料消耗和环控器温度设置如表 1 所示。

表 1 保育不同生长阶段的饲料量和环控器温度设置

Tab.1 Feed amount and environmental controller temperature settings at different growth stages of nursery house

| 断奶后周数/<br>周 | 周末质量/<br>kg | 日消耗饲料量/<br>(kg·头 <sup>-1</sup> ) | 设置温度/<br>℃ |
|-------------|-------------|----------------------------------|------------|
| 0           |             |                                  | 28         |
| 1           | 6.7         | 0.21                             | 28         |
| 2           | 9.0         | 0.36                             | 27         |
| 3           | 11.5        | 0.51                             | 26         |
| 4           | 14.5        | 0.69                             | 25         |
| 5           | 18.0        | 0.80                             | 24         |
| 6           | 22.0        | 0.96                             | 23         |

1.1.1 CV 通风模式猪舍

图 2a 为 CV 通风模式猪舍,吊顶进风窗位于中间过道上方,尺寸 0.8 m × 1.2 m,共 7 个。根据冬季通风量 5.1 m<sup>3</sup>/(h·头)、春秋通风量 25 m<sup>3</sup>/(h·头)<sup>[16]</sup>,每个进风窗通风量范围 340 ~ 1 700 m<sup>3</sup>/h。冬季时舍外新风从湿帘进风口进入公共走廊,从公共走廊上方吊顶进风口进入阁楼(图 1b),再由吊顶进风窗进入猪只活动区域,经漏缝地板进入粪池,经风机排出舍外。夏季舍外热空气经湿帘降温进入公共走廊,从猪舍前端窗户进入舍内,由风机排出舍外。

1.1.2 GCV 通风模式猪舍

图 2b 为 GCV 猪舍,地下风道进风口截面积为 4.32 m<sup>2</sup>,舍内走道地面出风口共 8 组,每组 2 块,分别为宽 0.2 m,长 3.6 m。根据猪舍冬季通风量 5.1 m<sup>3</sup>/(h·头)及春秋通风量 25 m<sup>3</sup>/(h·头)<sup>[16]</sup>,走

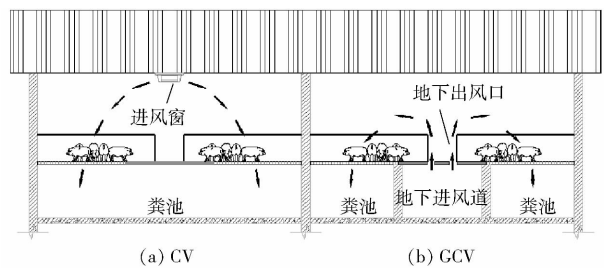


图 2 猪舍通风示意图

Fig. 2 Schematic of underground ventilated pig house

廊出口风速范围在 1 ~ 3 m/s,地下风道进风口风速范围在 0.5 ~ 1.5 m/s。冬季舍外新风从地下进风口进入舍内地下风道,经舍内中间走廊地面出风口进入舍内,漫过猪栏实体隔板均匀进入每栏的仔猪生活区,进入粪池后由风机排出舍外。夏季舍外热空气经湿帘降温进入公共走廊,从猪舍前端窗户进入舍内,由风机排出舍外。

1.2 试验方法

1.2.1 温湿度测试

在两个猪舍长度方向上分别距离湿帘 4.8、14.4、24 m 处选取 1、2、3 断面,在每个断面 1.5 m 水平高度布置 1 个温湿度测点,每个猪舍舍内均有 3 个温湿度测点。在 CV 通风猪舍吊顶进风口处分别布置 3 个温湿度测点,与舍内温湿度测点对应(图 1b),在 GCV 通风猪舍地下进风道内分别布置 3 个温湿度测点,与舍内温湿度测点对应(图 1c)。同时为防止舍外温湿度数据丢失,在舍外布置 2 个温湿度测点,距地面高 1.8 m,并用锡箔纸包裹进行防辐射处理,对测试期间舍外天气状况进行监测。利用 Elitech RC-4HA/C 型温湿度记录仪(温度:量程 -30 ~ 60℃,精确度 ±0.5℃,分辨率 0.1℃;相对湿度:量程 0 ~ 99%,精确度 ±3% (25℃, 20% ~ 90%),其他 ±5%,分辨率 0.1%)对温度和相对湿度进行采集。采集时间间隔为 15 min。测试时间为 2018 年 12 月 23 日—2019 年 1 月 29 日。

1.2.2 NH<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和粉尘测试

在 2 个猪舍长度方向上分别距离湿帘 4.8、14.4、24 m 处选取 1、2、3 断面,在每个断面 0.5、1.5 m 水平高度分别布置 1 个测点,每个猪舍舍内均有 6 个测点(图 1b、1c)。同时对两个猪舍地沟风机排出口分别布置测点,对所有测点的 NH<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度进行采集。有害气体检测采用泵吸式便携气体检测报警仪(工作温度 -40 ~ 70℃,相对湿度 0 ~ 95% (非冷凝)。其中 CO<sub>2</sub> 质量浓度测试范围 0 ~ 5 398 mg/m<sup>3</sup>,分辨率 1 mg/m<sup>3</sup>,NH<sub>3</sub> 质量浓度测试范围 0 ~ 69 mg/m<sup>3</sup>,分辨率 0.01 mg/m<sup>3</sup>,H<sub>2</sub>S 质量浓度测试范围 0 ~ 139 mg/m<sup>3</sup>,分辨率

0.1 mg/m<sup>3</sup>)。采集各测点 NH<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 质量浓度,均每次采样 3 次,取其平均值作为该测点采集浓度。颗粒物检测采用 DT-96 型颗粒物测试仪(PM<sub>2.5</sub> 质量浓度量程:0 ~ 2 000 μg/m<sup>3</sup>,PM<sub>10</sub> 质量浓度量程:0 ~ 2 000 μg/m<sup>3</sup>,分辨率 1 μg/m<sup>3</sup>,郑州君达仪器仪表有限公司)。采集各测点 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度均每次采样 3 次,手持仪器每次采样时间为 1 min,取其平均值作为该测点粉尘采集浓度。测试时间为 2018 年 12 月 23 日—2019 年 1 月 29 日,每天 08:00—10:00、13:00—15:00、19:00—21:00 采集 3 次测点数据。

1.3 通风系统评价指标

1.3.1 通风系统效率

采用 SHERYLL<sup>[17]</sup> 定义的舍内平均气体污染物移除效率和局部气体污染物移除效率来评价两种通风系统移除舍内有害气体或粉尘的能力。计算公式为

$$E_o = \frac{C_{\text{exhaust}} - C_{\text{inlet}}}{C_m - C_{\text{inlet}}} \tag{1}$$

式中  $E_o$ ——舍内平均污浊气体移除效率  
 $C_{\text{exhaust}}$ ——排气口污染物质量浓度,mg/m<sup>3</sup>  
 $C_{\text{inlet}}$ ——进气口污染物质量浓度,mg/m<sup>3</sup>  
 $C_m$ ——舍内整体污染物质量浓度,mg/m<sup>3</sup>  
 $E_o = 1$  认为舍内气体混合均匀, $E_o > 1$  认为舍内空气污染物浓度低于排气口,空气质量较好,通风系统移除舍内有害气体或粉尘的能力较高,反之认为舍内空气质量较差,通风系统移除舍内有害气体或粉尘的能力较低。

1.3.2 气体污染物排放率

气体污染物排放率可由进气口和排气口之间气体污染物浓度差计算得到<sup>[18]</sup>。采用平均气体污染物排放率来评价两种通风系统气体污染物排放量,计算公式为

$$E = V_r (C_{\text{exhaust}} - C_{\text{inlet}}) \tag{2}$$

式中  $E$ ——气体污染物排放率,mg/s  
 $V_r$ ——猪舍平均通风量,m<sup>3</sup>/s

猪舍通风量是衡量舍内环境的基本参数,可以采用直接或间接的测试方法获取。冬季保育舍通风以变速风机为主,直接测试比较困难<sup>[19]</sup>,根据猪舍热平衡原理采用间接测试的方法计算猪舍的平均通风量<sup>[20]</sup>,计算公式为

$$V_r = \frac{Q_v}{C_p \rho_a (t_i - t_o)} \tag{3}$$

其中  $\rho_a = 353 / (t_o + 273)$   
式中  $C_p$ ——空气的定压比热容,取 1 030 J/(kg·K)  
 $\rho_a$ ——空气密度,kg/m<sup>3</sup>  
 $t_i$ ——猪舍内平均温度,℃

$t_o$ ——猪舍进风口平均温度,℃  
 $Q_v$ ——猪舍需排出的热量<sup>[21]</sup>,W

1.3.3 数据分析

利用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 数据分析软件对数据进行整理和分析,其中应用 SPSS 22.0 软件对不同通风模式猪舍进行单因素方差分析,多重比较采用 LSD 法, $p < 0.05$  时确定为差异显著,数据分析结果以平均值和标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 两种通风模式舍内温湿度测试结果

2.1.1 舍外环境条件

现场测试期间舍外日平均温度为 16.3℃,最高气温在 12 月 23 日 14:39 为 24.0℃,最低温在 12 月 29 日 23:39 为 8.1℃,平均相对湿度 80.8%,最高相对湿度在 12 月 23 日 03:09 达到 92.6%,最低相对湿度出现在 12 月 23 日 14:09 为 64.1%。测试期间舍外温度和相对湿度随时间变化曲线如图 3 所示。

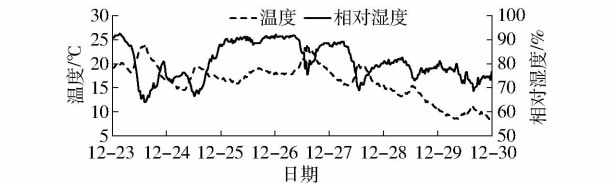


图 3 舍外温湿度变化曲线(2018 年)

Fig. 3 Changing curves of temperature and humidity outside barn during experiment

2.1.2 舍内温度分析

为了便于研究两种通风系统对猪舍热环境的影响,选取测试时间为 2018 年 12 月 23—28 日,对舍内 3 点连续采集的平均温度数据进行比较分析。其中剔除猪舍开启保温灯的时间段的温度数据(12 月 23 日 17:30 至 12 月 24 日 12:00)。如图 4 所示,GCV 猪舍平均温度 25.0℃,最高温度 25.7℃,最低温度 24℃,温度波动范围 1.7℃;CV 猪舍平均温度 24.7℃,最高温度 26.4℃,最低温度 21.8℃,温度波动范围 4.6℃。两舍舍内平均温度均满足该日龄保育猪温度要求<sup>[22]</sup>,但 GCV 猪舍平均温度稍大于 CV 猪舍,且更接近表 1 环控器设置温度。GCV 猪舍温度波动明显小于 CV 猪舍,GCV 猪舍舍内温度波动幅度是 CV 猪舍 37%。温度波动越小的猪舍对保育猪的健康越有利<sup>[23]</sup>,也大大降低环控器的操作频率,降低故障风险<sup>[24]</sup>。

舍内温度波动幅度受进风方式直接影响。GCV 猪舍舍外新风从地下风道经走廊经风口进入舍内, CV 猪舍舍外新风从吊顶阁楼经进风窗进入舍内,如图 4 所示,GCV 地下风道平均温度 19.1℃,最高温

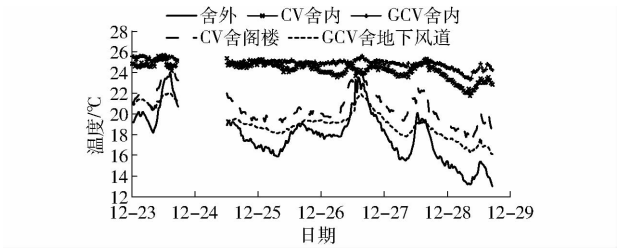


图 4 CV 和 GCV 猪舍舍内和进风口温度变化曲线(2018 年)

Fig. 4 Temperature variation curves in pig house and inlets with two ventilation modes

度 22.1℃,最低温度 15.8℃,温度波动幅度 6.3℃; CV 猪舍吊顶阁楼平均温度 20.6℃,最高温度 24.9℃,最低温度 17.2℃,温度波动幅度 7.7℃;室外平均温度 17.9℃,最高温度 24℃,最低温度 12.7℃,温度波动幅度 11.3℃;地下风道和吊顶阁楼分别将舍外的温度降低了 45.1% 和 31.8%。舍外温度较低时,地下进风和吊顶进风通风模式均能够提高新风进舍温度,但舍外温度较高时,地下进风能够降低新风进舍温度,吊顶进风仍能提高新风温度。舍外温度与地下风道的温差如图 5 所示,当舍外温度在 20.2℃ 时,舍外温度与地下风道的温差为 0℃,即当舍外温度高于 20.2℃ 时,地下风道降低进风温度,当舍外温度低于 20.2℃ 时,地下风道提高进风温度。故 GCV 猪舍温度性能优于 CV 猪舍。

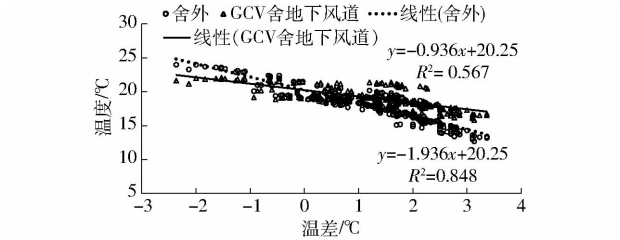


图 5 舍外温度与地下风道温度温差

Fig. 5 Temperature difference between outside house and ground channel

猪舍温度对猪群采食量、日增质量、饲料转化率等有显著影响,猪舍温度分布不均匀会造成猪舍猪群生长均匀度不同,给猪舍管理带来难度<sup>[25]</sup>。如图 6 所示,两舍均在舍中间处温度稍高,两端温度稍低,主要原因是两侧窗户保温隔热性较差,热量损失较中间多,GCV 猪舍最大温差 0.5℃,小于 CV 猪舍最大温差 1.8℃。对两舍长度方向温度差异的显著性分析显示,GCV 猪舍温度相对于位置差异不显著( $p > 0.05$ ),CV 猪舍温度 4.8 m 处和 24 m 处与 14.4 m 处温度差异显著( $p < 0.05$ )。原因可能是 GCV 猪舍进风口布置均匀度远大于 CV 猪舍(GCV 猪舍地下进风口沿过道两侧通长布置, CV 猪舍吊顶进风口沿吊顶布置 7 个),故 GCV 猪舍温度分布均匀性优于 CV 猪舍。

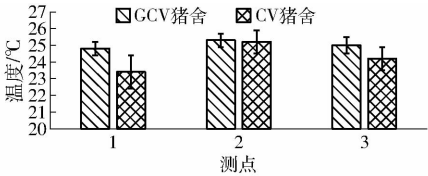


图 6 GCV 和 CV 猪舍长度方向温度的变化

Fig. 6 Length direction temperature of GCV and CV of pig house

综上,GCV 猪舍和 CV 猪舍舍内热环境的差异主要原因是两舍进风方式不同。CV 猪舍舍外新风经吊顶阁楼进入舍内。吊顶阁楼能够收集猪舍通过吊顶板对外散发的热量和太阳辐射通过屋顶板对内传导的热量。CZARICK<sup>[26]</sup>在对冬季利用吊顶进风通风方式的鸡舍进行研究发现(鸡舍屋顶彩钢板,吊顶 150 mm 玻璃丝棉),白天舍外冷空气温度可以提高 13.8℃,由于屋顶无保温隔热措施,夜间阁楼温度接近室外温度。本研究吊顶和屋面都做保温隔热处理,从舍内和舍外渗透进阁楼的热量在夜间得以保存,因此阁楼在白天和夜间对舍外冷空气都有加热作用,并在每天 13:00—15:00 达到最高(图 4)。GCV 猪舍外新风经地下风道进入舍内,地下风道的土壤储存大量的地热能,其温度主要受深度影响,在地下 1.5 m 以下开始保持稳定<sup>[27]</sup>。HESSEL<sup>[28]</sup>对一间 21.8 m×23.0 m,采用地下管道送风的分娩舍进行研究,发现地下管道能够将进风的温度波动幅度从 49.1℃(-14~35.1℃)减少到 15℃(6.5~21.5℃),舍外进风温度低于 14.1℃时,地下管道对舍外进风升温,反之进行降温,这与本研究 GCV 猪舍温度变化很相似。

相对湿度分析数据选取同温度,如图 7 所示,GCV 猪舍平均相对湿度 66.8%,最高相对湿度 75.3%,最低相对湿度 56.8%,CV 猪舍平均相对湿

度 69.4%,最高相对湿度 75.3%,最低相对湿度 57.1%。两舍的相对湿度差别不大,且均满足猪只生长的最佳相对湿度需求<sup>[22]</sup>。

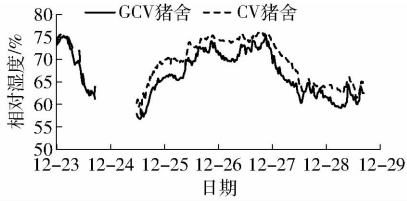


图 7 两种通风模式猪舍舍内相对湿度变化(2018 年)

Fig. 7 Relative humidity variation in pig house with two ventilation modes

2.2 猪舍空气质量环境测试分析

测试期间对舍内 0.5 m 和 1.5 m 水平高度有害气体 NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 和粉尘 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度进行采集,如图 8 所示。两个高度水平面均没有检测到 H<sub>2</sub>S 浓度,目前国内其他商业猪场测到 H<sub>2</sub>S 质量浓度也很低(小于 0.2 mg/m<sup>3</sup>)<sup>[29]</sup>。两猪舍 0.5 m 高度平面和 1.5 m 高度平面空气中 NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 和粉尘 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度均低于国家标准《规模化猪场环境参数及环境管理(GB/T 17824.3—2008)》关于保育舍的浓度规定(20 mg/m<sup>3</sup>、8 mg/m<sup>3</sup>、1 300 μg/m<sup>3</sup>、1 500 μg/m<sup>3</sup>)<sup>[22]</sup>。高度方向上,除 CO<sub>2</sub> 质量浓度外,两舍 0.5 m 高度平面处 NH<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度均大于 1.5 m 高度平面各参数浓度,检测结果表明两舍空气质量环境较好,不仅有利于猪只健康生长,而且也满足饲养人员工作环境要求。GCV 猪舍 0.5 m 和 1.5 m 高度平面的各测试点 NH<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度均小于 CV 猪舍 0.5 m 和 1.5 m 高度平面 NH<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度,故 GCV 猪舍 0.5 m 和 1.5 m 高度平面空气质量环境优于 CV 猪舍相同高度面的空气质量环境( $p < 0.05$ )。

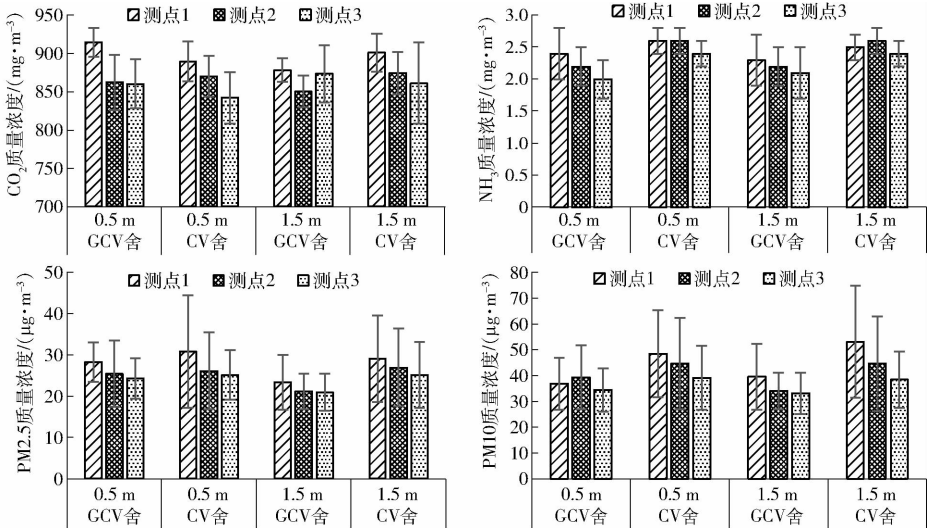


图 8 GCV 和 CV 通风模式猪舍舍内不同位置对 CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 分布的影响

Fig. 8 Effect of height on ammonia, carbon dioxide, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>

长度方向上,GCV 猪舍(除 CO<sub>2</sub>外)和 CV 猪舍 0.5 m 高度平面和 1.5 m 高度平面各空气质量环境参数差异不明显( $p > 0.05$ ),说明两舍各空气质量环境参数分布均匀,舍内通风无死角。

猪舍排风口布置位置可能是影响猪舍有害气体和粉尘浓度的重要因素。GCV 猪舍和 CV 猪舍排风机均布置于漏粪地板下方,整个粪池下方形成一个负压区,猪舍生产活动产生的有害气体和粉尘迅速均匀地进入粪池,粪池产生的有污浊气体能够直接由风机排出。传统通风模式的保育舍排风口经常位于山墙或侧墙,该模式下冬季 CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、PM2.5、PM10 质量浓度分别为 7 892 mg/m<sup>3</sup><sup>[30]</sup>、6.7 mg/m<sup>3</sup><sup>[31]</sup>、230 μg/m<sup>3</sup><sup>[32]</sup>、2 190 μg/m<sup>3</sup><sup>[32]</sup>,排风口在粪池的猪舍有害气体和粉尘的浓度明显低于传统通风模式的猪舍。NICOLAI 等<sup>[33]</sup>试验证实将排风口放置在粪池,粪池中的污浊气体不会上浮,猪舍中有害气体和粉尘的浓度大大降低。LAVOIE 等<sup>[34]</sup>对比进风方式相同(管道送风)排风方式不同(粪池排风与山墙排风)的两间猪舍发现有粪池排风的猪舍冬季氨气浓度和粉尘浓度均低于传统排风的猪舍。

猪舍进风口布置位置也可能是影响猪舍有害气体和粉尘浓度的重要因素。ZONG 等<sup>[35-36]</sup>对比排风方式相同(地沟排风)进风方式不同(吊顶弥散进风与侧墙进风)两间猪舍,发现吊顶弥散进风的猪舍 NH<sub>3</sub>和 CO<sub>2</sub>浓度均低于侧墙进风的猪舍。GCV 猪舍有害气体和粉尘浓度低于 CV 猪舍也是由于两猪舍的进风口布置不同。GCV 猪舍进风方式为地下进风,进入猪舍的新鲜空气能够更多地分布在猪群活动区域, CV 猪舍为吊顶进风,进入猪舍新鲜空气先和猪舍上部空间空气混合后进入猪群活动区域,故 CV 猪舍粪池中气体污染物进入猪舍空间可能比 GCV 猪舍多,AARNINK 等<sup>[37]</sup>也证实地下进风比屋顶弥散进风的猪舍 NH<sub>3</sub>浓度和粉尘浓度降低 21%和 78%。

2.3 猪舍通风效率的测试分析

决定猪舍通风效率的主要因素是通风系统的气流组织模式,气流组织模式由排风口或进风口布置方式决定。合理的气流组织模式可以缩短猪舍有害气体舍内停留时间,提高通风系统移除气体污染物的通风效率。根据式(1)计算两种不同的通风模式对猪舍中有害气体和粉尘的平均通风效率均大于 1,如图 9 所示,说明这两种通风模式都是移除气体污染物效率比较高的空气置换方式,即舍外新鲜空气先进入动物和人的活动区域再经风机排出舍外<sup>[38]</sup>。两种通风模式对 NH<sub>3</sub>的移除效率明显大于其他气体污染物,NH<sub>3</sub>来源于漏缝地板以下粪尿的

分解<sup>[39]</sup>,CO<sub>2</sub>和粉尘主要来源于猪舍动物的呼吸和活动<sup>[40-41]</sup>,进一步证明排风口位于粪池的通风模式能够降低舍内 NH<sub>3</sub>浓度。

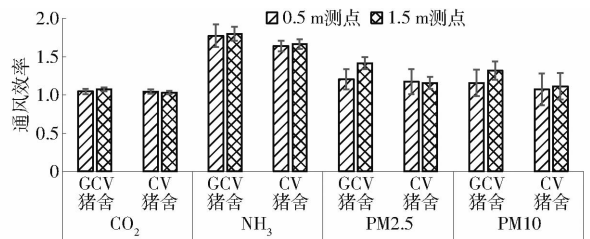


图 9 2 种不同通风模式猪舍舍内位置对通风效率的影响  
Fig. 9 Effect of length on ventilation efficiency

GCV 猪舍对 NH<sub>3</sub>和粉尘的平均通风效率均高于 CV 猪舍( $p < 0.05$ ),GCV 猪舍进气口在中间过道两侧,产生的是向上的气流组织模式, CV 猪舍进气口在猪舍吊顶,产生的是向下的气流组织模式。GCV 猪舍进风口离猪只活动区域相对于 CV 更近,新鲜空气从走廊进风口向上漫过猪栏后进入猪只活动区域,能够更快地将害气体和粉尘带到粪池下方,由排风机带出舍外,所以 GCV 猪舍通风模式通风效率更高。BREUM 等<sup>[42]</sup>试验证实,相同的猪舍进风向上的气流组织模式移除气体污染物的效率高于进风向下的气流组织模式。

根据式(3)计算得 GCV 猪舍和 CV 猪舍平均通风量分别为(2.5 ± 0.5) m<sup>3</sup>/s 和(3.1 ± 0.9) m<sup>3</sup>/s, GCV 猪舍平均通风量比 CV 猪舍低 21%。主要原因是 GCV 猪舍进风平均温度(19.1℃)低于 CV 猪舍(20.6℃)。ZONG 等<sup>[35]</sup>试验也证实,进风温度提高,猪舍通风量增大。尽管 GCV 猪舍平均通风量低于 CV 猪舍,但 GCV 猪舍气体污染物浓度低于 CV 猪舍,GCV 猪舍通风模式移除气体污染物的效率也高于 CV 猪舍,因此,GCV 通风模式为解决冬季保育舍“通风和保温”的矛盾提供了参考。

2.4 猪舍污染物排放率测试分析

进风口污染物浓度忽略不计,根据式(2)和表 2 得出猪舍气体污染物排放率如表 3 所示。两舍气体污染物排放率均小于传统通风模式的保育舍(传统通风模式的保育舍 CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、PM2.5、PM10 排放率分别为 930.3 g/(d·头)<sup>[30]</sup>、4.6 g/(d·头)<sup>[35]</sup>、67.0 mg/(d·头)<sup>[32]</sup>、455.8 mg/(d·头)<sup>[32]</sup>。NI<sup>[43]</sup>研究发现,决定 NH<sub>3</sub>散发量的是粪便表面对流传质系数,流过粪便表面的风速越大对流传质系数越大,猪舍 NH<sub>3</sub>散发量越大。两舍猪舍 NH<sub>3</sub>排放量较低主要原因可能是粪池较深(1.8 m),气流进入粪池后,到达猪粪表面的风速很低,粪池表面对流传质系数较低,粪便 NH<sub>3</sub>挥发量较少,ANDERSSON<sup>[44]</sup>也发现 1.2 m 深度的粪池散发的 NH<sub>3</sub>量较 0.45 m 深的粪池

低 30% ;NH<sub>3</sub>挥发过程伴随着 CO<sub>2</sub> 释放<sup>[45]</sup>,故 NH<sub>3</sub>挥发降低,CO<sub>2</sub>挥发量也降低;刮粪机及时将猪粪移除到粪污处理区,也大大减少了 NH<sub>3</sub>和 CO<sub>2</sub>排放率,LACHANCE 等<sup>[46]</sup>研究证实粪尿分离的刮粪机清粪工艺相对于传统水泡粪工艺猪舍最高可以减 50% 的 NH<sub>3</sub>排放;AARNINK 等<sup>[47]</sup>认为减少猪舍粪污区域面积能够显著减少猪舍 NH<sub>3</sub>排放率,猪舍粪污区域面积取决于漏缝地板的排污性能。两猪舍均采用粪尿排放性能较好的塑料漏缝地板,猪舍地板表面粪污残留少,猪舍卫生条件较好,故 NH<sub>3</sub>排放也较少;猪舍卫生条件较好,猪舍粉尘排放也较低。

表 2 2 种不同通风模式猪舍排风口气体污染物质量浓度  
Tab.2 Concentration of air pollutants in outlet of two different ventilation modes

| 类型     | CO <sub>2</sub> /(<br>(mg·m <sup>-3</sup> ) | NH <sub>3</sub> /(<br>(mg·m <sup>-3</sup> ) | PM2.5/(<br>(μg·m <sup>-3</sup> ) | PM10/(<br>(μg·m <sup>-3</sup> ) |
|--------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| GCV 猪舍 | 919.5±73.7                                  | 3.95±0.8                                    | 30.2±7.3                         | 45.5±9.5                        |
| CV 猪舍  | 905.7±64.2                                  | 3.8±0.5                                     | 30.1±7.4                         | 48.7±12.0                       |

表 3 2 种不同通风模式猪舍污染物排放率  
Tab.3 Pollutant discharge of two different ventilation modes of pig house

| 类型     | CO <sub>2</sub> /(g·<br>d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | NH <sub>3</sub> /(g·<br>d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | PM2.5/(mg·<br>d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) | PM10/(mg·<br>d <sup>-1</sup> ·头 <sup>-1</sup> ) |
|--------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| GCV 猪舍 | 419.3±7.4                                                  | 1.8±0.1                                                    | 13.8±1.8                                         | 20.8±2.1                                        |
| CV 猪舍  | 500.1±13.2                                                 | 2.1±0.1                                                    | 16.7±1.9                                         | 26.9±1.9                                        |

GCV 猪舍排风口污染物浓度与 CV 猪舍相差不大( $p>0.05$ ),GCV 猪舍平均通风量小于 CV 猪舍,故 GCV 气体污染物排放率小于 CV 猪舍。文献[48 -

49]证实猪舍通风量增大,舍内空气动量增大,粪池和地板表面的气流流量增大,猪舍 NH<sub>3</sub>和 CO<sub>2</sub>排放率增大。WANG 等<sup>[50]</sup>在一栋机械通风的鸡舍中也证实粉尘的排放率随鸡舍的通风量变大而变大。

3 结 论

- (1)GCV 猪舍冬季热环境优于 CV 猪舍。测试期间,两猪舍的温湿度均满足猪只生长需求,但 GCV 猪舍内温度(25.0℃)大于 CV 猪舍(24.7℃),GCV 猪舍内温度波动 1.7℃,小于 CV 猪舍(4.6℃),GCV 猪舍地下风道对舍外新风有加热或降温作用,当舍外新风温度低于 20.2℃ 对其加热,高于 20.2℃ 使其降温。GCV 沿舍长方向温度分布的均匀性优于 CV 猪舍( $p<0.05$ )。
- (2)GCV 猪舍在冬季的空气质量环境优于 CV 猪舍。测试期间,两猪舍气体污染物浓度均低于国家标准,但 GCV 猪舍 NH<sub>3</sub>、PM2.5、PM10 浓度均低于 CV 猪舍( $p<0.05$ )。
- (3)GCV 猪舍移除气体污染物的能力优于 CV 猪舍。测试期间,两种不同的通风模式对猪舍气体污染物的平均通风效率均大于 1,尽管 GCV 猪舍平均通风量低于 CV 猪舍( $p<0.05$ ),但 GCV 通风模式移除气体污染物的效率高于 CV 猪舍( $p<0.05$ )。
- (4)GCV 猪舍气体污染物的排放率小于 CV 猪舍。两模式猪舍排风口污染物浓度相差不大( $p>0.05$ ),两模式猪舍有气体污染物的排放率均小于传统猪舍,GCV 猪舍气体污染物的排放率小于 CV 猪舍( $p<0.05$ )。

参 考 文 献

[1] 王伟国. 规模猪场的设计与管理[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2006.  
[2] RISKOWSKI G L, BUNDY D S. Effect of air velocity and temperature on growth performance of weanling pigs[J]. Transactions of the ASAE,1990, 33(5):1669-1675.  
[3] 杨公社. 猪生产学[M]. 北京:中国农业出版社,2002.  
[4] SCHEEPENS C J M, HESSING M J C, LAARAKKER B, et al. Influences of intermittent daily draught on the behaviour of weaned pigs[J]. Applied Animal Behaviour Science, 1991, 31(1-2):69-82.  
[5] 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.  
[6] 张静,刘双红,孙斌. 猪场舍内 NH<sub>3</sub> 对猪的危害[J]. 畜禽饲养,2014, 4(13):26.  
[7] BOER S D, MORRISON W D. The effects of the quality of environment in livestock buildings on the productivity of swine and safety of humans: a literature review[J]. Animal and Poultry Science, 1998, 97(2): 511-518.  
[8] 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 respiratorytract structure in swine[J]. Journal of Animal Science, 1975, 41(3):735-739.  
[9] LAWRENCE D J, HOWARD L P, STEPHEN H P. Swine nursery facilities handbook[M]. Iowa State University, AMES,1997.  
[10] CHUNG K C, HSU S P. Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution[J]. Building and Environment, 2001,36(9): 989-999.  
[11] STEVE H P, MYLO A H. Model study of five types of manure pit ventilation systems[J]. Transactions of the ASAE, 1978, 21(3): 542-549.  
[12] BJERG B, ZHANG G, KAI P. CFD analyses of methods to improve air quality and efficiency of air cleaning in pig production [M]//MAZZEO N. Chemistry, emission control, radioactive pollution and indoor air quality, 2011:639-654.  
[13] SHERY S B, RONALDO G M. Effectiveness of local supply ventilation in improving worker zone air quality in swine confinement buildings a pilot study[J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109: 822-828.  
[14] MAGHIRANG R G, JEREZ S B, PREDICALA B Z. Relative ventilation effectiveness in a mechanically ventilated airspace under isothermal conditions[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(3): 691-696.



- [15] SMITH J H, BOON C R, WEBSTER A J F, et al. Measurements of the effects of animals on airflow in an experimental piggery [J]. J. Agric. Eng. Res. 1999, 72(2): 105–112.
- [16] MWPS. Mechanical ventilating systems for livestock housing[C]//MWPS-32, Iowa State University, AMES, 1990.
- [17] SHERYLL B J. Ventilation effectiveness criteria and measurement methods applicable to animal buildings—a review[C]//ASHRAE Winter Meeting, 2007.
- [18] 叶章颖. 猪舍氨气排放的气流特性参数及模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
- [19] XIN Hongwei, PHILIPPE F X, MONTEN G J, et al. Gaseous emissions and energy cost minimization for pig production through effective ground channel airflow system[J]. Journal of Animal and Veterinary Advances, 2015, 14(12): 361–373.
- [20] 马承伟, 苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [21] 李修松, 白士宝, 闫之春, 等. 新式猪场猪的产热产湿计算[J]. 国外畜牧学-猪与禽, 2018, 38(1): 30–32.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17824.3—2008: 规模猪场环境参数及环境管理[S].
- [23] HAHN G L, NIENABER J A, DESHAZER J A. Air temperature influences on swine performance and behavior[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1987, 3(2): 295–302.
- [24] WAGENBERG A V V, AERTS J M, BRECHT A V, et al. Climate control based on temperature measurement in the animal-occupied zone of a pig room with ground channel ventilation[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1): 355–365.
- [25] COLLIN A, VAN MILGEN J, DUBOIS S, et al. Effect of high temperature on feeding behaviour and heat production in group-housed young pigs[J]. British Journal of Nutrition, 2001, 86(1): 63–70.
- [26] CZARICK M. Cold weather performance in 50' wide[J]. Totally-Enclosed Houses, 2007, 19(5): 42–44.
- [27] DHEERAJ S, RISHI K, SNEHAL S P, et al. Effects of parameters on performance of earth air heat exchanger (EAHE) system: a review[J]. International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, 2015, 3(2): 657–661.
- [28] HESSEL Z W. Heating and cooling performance of earth-tube heat exchanger in a mechanical ventilated farrowing house[J]. Agricultural Science & Technology: A, 2011(2): 187–193.
- [29] 汪开英, 代小蓉, 李震宇, 等. 不同地面结构的育肥猪舍  $\text{NH}_3$  排放系数[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 163–166.
- [29] WANG Kaiying, DAI Xiaorong, LI Zhenyu, et al.  $\text{NH}_3$  emission factors of fattening pig buildings with different floor systems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 163–166. (in Chinese)
- [30] DONG H, ZHU Z, SHANG B, et al. Greenhouse gas emissions from swine barns of various production stages in suburban Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(11): 2391–2399.
- [31] BLUNDEN J, ANEJA V P, WESTERMAN P W. Measurement and analysis of ammonia and hydrogen sulfide emissions from a mechanically ventilated swine confinement building in North Carolina[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(14): 3315–3331.
- [32] TAKAI H, PEDERSON S, JOHNSON 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.
- [33] NICOLAI R, HOFF S. Ventilation requirements to prevent pit air up drafting in a swine finishing barn[C]//Swine Housing II Proceedings of the 2003 Conference (Research Triangle Park, North Carolina USA), ASAE, 2003: 303–308.
- [34] LAVOIE J M, GINGRAS G G. Pit ventilation in pig-housing facilities[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1997, 39(4): 317–326.
- [35] ZONG C, FENG Y, ZHANG G Q, et al. Effects of different air inlets on indoor air quality and ammonia emission from two experimental fattening pig rooms with partial pit ventilation system—summer condition[J]. Biosystems Engineering, 2014, 122(3): 163–173.
- [36] ZONG C, ZHANG G Q, FENG Y, et al. Carbon dioxide production from a fattening pig building with partial pit ventilation system[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126: 56–68.
- [37] AARNINK A J A, WAGEMANS M J M. Ammonia volatilization and dust concentration as affected by ventilation systems in houses for fattening pigs[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(4): 1161–1170.
- [38] WAGENBERG A V V, SMOLDERS M A H H. Contaminant and heat removal effectiveness of three ventilation systems in nursery rooms for pigs[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(6): 1985–1992.
- [39] PHILIPPE F X, CABARAUX J F, NICKS B. Ammonia emissions from pig houses: influencing factors and mitigation techniques[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, 141(3): 245–260.
- [40] PEDERSEN S, BLANES-VIDAL V, JOERGENSEN H, et al. Carbon dioxide production in animal houses: a literature review [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2008, X(2008).
- [41] GUSTAFSSON G. Factors affecting the release and concentration of dust in pig houses[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74(4): 379–390.
- [42] BREUM N O, TAKAI H, ROM H B. Upward vs downward ventilation airflow in a swine house[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(5): 1693–1699.
- [43] NI J Q. Mechanistic models of ammonia release from liquid manure: a review [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(1): 1–17.
- [44] ANDERSSON M. The effect of different manuring systems on ammonia emissions in pig buildings[R]. Report 100. Lund, Sweden: Swedish Univ. Agricultural Sciences, Dept. Agricultural Biosystems and Technology, 1995.
- [45] NI J Q, VINCKIER C, HENDRIKS J, et al. Production of carbon dioxide in a fattening pig house under field conditions. II. Release from the manure[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(22): 3697–3703.
- [46] LACHANCE I, GODBOUT S, LEMAY S P, et al. Effect of different under-slat separation systems for pig manure on gas and odor emissions[C]//ASABE Annual International Meeting, 2005.
- [47] AARNINK A J A, SWIERSTRA D, BERG A J V D, et al. Effect of type of slatted floor and degree of fouling of solid floor on ammonia emission rates from fattening piggeries[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 66(2): 93–102.
- [48] YE Z, ZHANG G, LI B, et al. Ammonia emissions affected by airflow in a model pig house: effects of ventilation rate, floor slat opening, and headspace height in a manure storage pit [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(6): 2113–2122.
- [49] 叶章颖, 魏晓明, 张国强, 等. 冬季猪舍粪便贮存过程中  $\text{CO}_2$  排放特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 264–269.
- [49] YE Zhangying, WEI Xiaoming, ZHANG Guoqiang, et al. Characteristics of carbon dioxide emission from pig house liquid manure stored in winter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 264–269. (in Chinese)
- [50] WANG Z, GAO T, JIANG Z, et al. Effect of ventilation on distributions, concentrations, and emissions of air pollutants in a manure-belt layer house[J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2014, 23(4): 763–772.