doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.052

进风口高度与导流板角度对猪舍空气龄和 CO_2 分布的影响

曹孟冰[1,2]　杨　婷[1,2]　宗　超[1,2]　滕光辉[1,2]　庄晏榕[1,2]　周胜楠[1,2]

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了研究进风口形式对猪舍空气龄和 CO_2 分布的影响,利用计算流体力学(CFD)技术对某实验猪舍的风速、空气龄、CO_2 浓度以及生猪的对流换热量进行了模拟研究。原猪舍模型(方案 A)进风口导流板角度为 50°,进风口高度为 1.8 m。本研究设计了 6 种通风方案与原猪舍模型进行比较,方案 B:进风口导流板角度为 90°,进风口高度为 1.8 m;方案 C:进风口导流板角度为 120°,进风口高度为 1.8 m;方案 D:进风口导流板角度为 150°,进风口高度为 1.8 m;方案 E:进风口导流板角度为 50°,进风口高度为 1.6 m;方案 F:进风口导流板角度为 50°,进风口高度为 1.4 m;方案 G:进风口导流板角度为 50°,进风口高度为 1.2 m。研究结果表明:风速模拟值与测量值的决定系数 R^2 为 0.916 2,平均相对误差为 26.7%,所构建的模型可以准确地预测猪舍内风速形态。通过比较各通风模拟方案发现:进风口高度和导流板角度会影响猪舍内空气龄和 CO_2 的分布,其中方案 C 与方案 F 可显著降低舍内生猪活动区域平均空气龄以及平均 CO_2 浓度,并具备较好的猪舍保温效果。研究同时发现,生猪生活区域的 CO_2 浓度会受到生活区域的平均空气龄和整舍空气龄分布均匀性的影响。

关键词: 猪舍; 进风口; 风速形态; 对流换热; 空气龄; CO_2 分布

中图分类号: X513; S811.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0427-08

Influence of Air Inlet Height and Angle on Air Age and CO_2 Distribution in Pig House

CAO Mengbing[1,2]　YANG Ting[1,2]　ZONG Chao[1,2]　TENG Guanghui[1,2]　ZHUANG Yanrong[1,2]　ZHOU Shengnan[1,2]

(1. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment*,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to study the influence of air inlet type on air age and CO_2 of pig house, computational fluid dynamics (CFD) technology was used to simulate the wind speed, air age, CO_2 and the convective heat transfer of pigs in an experimental pig house. The angle of the air inlet deflector of the original model (scheme A) was 50°, and the inlet height was 1.8 m. At the same time, totally six additional inlet conditions were selected to simulate and compare the pig house with the original pig house. Scheme B: the angle of the air inlet deflector was 90°, and the inlet height was 1.8 m; scheme C: the air inlet deflector angle was 120°, and the inlet height was 1.8 m; scheme D: the air inlet deflector angle was 150°, and the inlet height was 1.8 m; scheme E: the air inlet deflector angle was 50°, and the inlet height was 1.6 m; scheme F: the air inlet deflector angle was 50°, and the inlet height was 1.4 m; scheme G: the air inlet deflector angle was 50°, and the inlet height was 1.2 m. The results showed that the correlation R^2 between the simulated and the measured wind speed value was 0.916 2, and the average relative error was 26.7%. This model can accurately predict the airflow pattern in the pig house. Through the comparison of the simulation results of different air inlet deflectors, the scheme C and scheme F can significantly reduce the average air age and average CO_2 concentration of pigs in the house, and maintain the heat preservation effect of the pig house. Comparing various air intake schemes, it can be found that the CO_2 concentration in the animal occupied zone (AOZ) was not only affected by the average air age in the zone around the pigs, but also by the uniformity of the air age distribution throughout the entire pig house.

Key words: pig house; ventilation inlet; wind speed pattern; convective heat transfer; air age; CO_2 distribution

收稿日期: 2020-07-31　修回日期: 2020-09-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700204)

作者简介: 曹孟冰(1989—),男,博士生,主要从事设施农业环境调控研究,E-mail: mengbing-cao@cau.edu.cn

通信作者: 宗超(1987—),男,讲师,主要从事设施农业环境调控研究,E-mail: chaozong@cau.edu.cn

0 引言

在集约化猪场中,猪只较多,而猪舍空间有限。猪舍的气流倾向于向没有阻碍的区域流动[1-2],流体受到生猪以及养殖设备粘性阻力的作用[3],导致猪只生活区域换气较差。冬季猪舍使用最小通风量,舍内猪只较多,产生的二氧化碳(CO_2)较多。但是换气量有限导致 CO_2 大量囤积,而较多的 CO_2 对于生猪生长极其不利[4]。猪舍内 CO_2 浓度过高,猪只会出现慢性缺氧,导致猪只精神状态不佳、食欲下降、生产力下降。另外,CO_2 会影响粪便的 pH 值变化,从而影响氨气的释放[5-7]。所以保持猪舍较低的 CO_2 浓度极其重要。降低 CO_2 浓度最有效的方式为通风,但是冬季通风量过大容易引起生猪的冷应激[8],导致猪只采食量增加,以抵御寒冷,而用于生猪生产的能量则较少[9-10],同时也会影响猪只健康。因此在保持最小通风量的同时有效的换气极其重要。

国内外已有学者研究了猪舍换气对猪舍 CO_2 排放的影响,周忠凯等[11]对冬季猪舍 NH_3、N_2O、CH_4 和 CO_2 的排放进行了测定,确定了不同通风量条件下 NH_3 和温室气体的排放率。叶章颖等[12]通过对猪舍粪坑内粪便贮存过程中 CO_2 排放的测试,分析了通风量、粪便温度和粪坑挡板对 CO_2 排放的影响。ZONG 等[13]利用实验的方式量化了猪呼吸产生的 CO_2 和猪舍内粪便释放的 CO_2,并且根据测量数据建立了 CO_2 产生的数学模型。然而,实验研究耗时长,测点多。当需要对猪舍进行一定优化时,时间和资金投入更是大量增加。而计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法因成本低且时效高[14],常被用于研究污染气体的排放[15-17]。RONG 等[16]为了评估和量化氨气排放因子,使用 CFD 模拟得出了实验猪舍中混凝土漏缝地板上方的氨气传质系数。ZONG 等[17]分析了多孔介质代替漏缝地板进行气流和污染物扩散研究的可行性。TONG 等[18]模拟了季节性变化下的鸡舍热环境情况和 NH_3 浓度,评估了不同通风操作对鸡舍内热环境和 NH_3 浓度的影响。

目前针对畜禽舍 CO_2 浓度的研究主要集中在通风量或者 CO_2 的排放规律[12-13],而进风口高度以及导流板角度也是生猪活动区域环境质量的重要影响因素[15]。在空气污染物扩散的研究中,空气龄常作为评价舍内换气情况的重要指标[16,19]。因此,本研究通过建立猪舍 CFD 模型,分析进风口高度和导流板角度对猪舍 CO_2 浓度以及空气龄影响的规律,以期为猪舍通风口的改造和建筑实践提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验猪舍

本研究的现场实验在丹麦奥胡斯大学的实验猪舍中进行[20-21]。实验猪舍长 5.70 m,宽 4.88 m,高 2.67 m。猪舍尺寸和布局依照丹麦商业猪舍局部情况设计。猪舍中包含 0.9 m 宽的人工走道,生猪生活区域使用的是漏缝地板,地板下设有深 0.69 m 的粪坑。猪舍内有 4 个圆柱模型用以模仿生猪,每个圆柱内部安装了 4 个 100 W 白炽灯泡以产生热量。猪舍顶部烟囱高度为 4 m,烟囱内部装有抽风机,抽风机额定通风流量为 2 533 m^3/h。猪舍进风口长为 0.62 m,宽为 0.17 m,导流板角度为 50°,进风口底部距离地面的高度为 1.8 m,猪舍具体结构如图 1 所示。

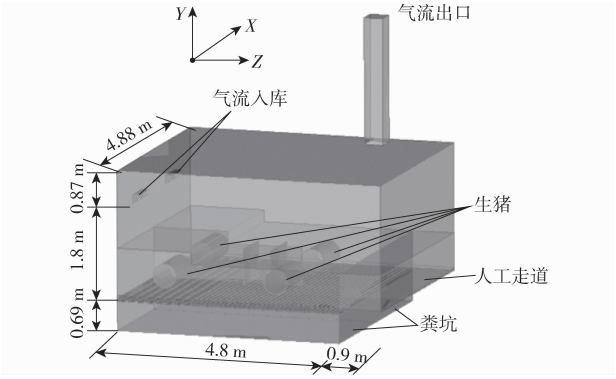

图 1 猪舍示意图

Fig. 1 Schematic of pig house

1.2 模型参数测量

实验测试布点如图 2 所示。4 个测点同时使用 8 个全向风速传感器(TSI 8475 型,TSI Inc.,美国)和 CR 1000 型数据记录仪(Campbell Scientific Ltd,英国),8 个传感器位置的竖直高度为 0.35、0.7、1.1、1.5、1.8、2.0、2.2、2.4 m。每个点的测量时间为 60 min,平均 1.0 s 获取 1 次数据。

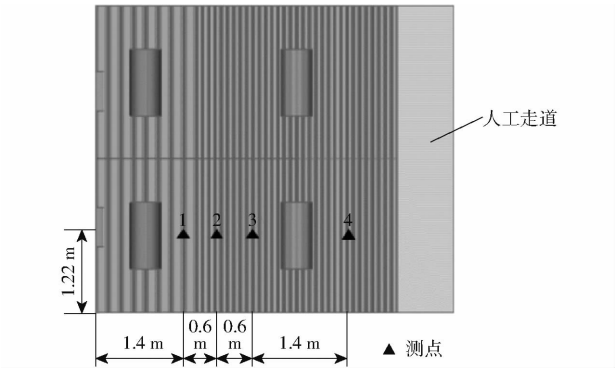

图 2 猪舍内部测点图

Fig. 2 Internal measurement points diagram of pig house

2　CFD 模拟

2.1　猪舍模型

建立的猪舍模型尺寸与真实猪舍一致。为了分析进风口导流板角度和高度对猪舍换气情况以及 CO_2 浓度分布的影响，进风口导流板角度分别设定为 50°、90°、120°、150°，进风口底部距地面高度分别设定为 1.8、1.6、1.4、1.2 m，其中导流板结构如图 3 所示。本研究共设置了 7 种不同的进风口模型，如表 1 所示。

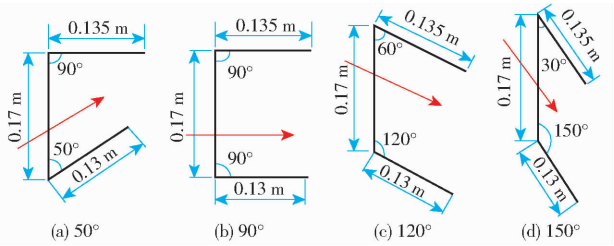

图 3　不同导流板角度侧视图

Fig. 3　Side view of deflector at different angles

表 1　不同方案下的进风口特点

Tab. 1　Air inlet characteristics under different schemes

方案	特点
A	进风口导流板角度为 50°，进风口高度为 1.8 m
B	进风口导流板角度为 90°，进风口高度为 1.8 m
C	进风口导流板角度为 120°，进风口高度为 1.8 m
D	进风口导流板角度为 150°，进风口高度为 1.8 m
E	进风口导流板角度为 50°，进风口高度为 1.6 m
F	进风口导流板角度为 50°，进风口高度为 1.4 m
G	进风口导流板角度为 50°，进风口高度为 1.2 m

2.2　网格与网格独立性检验

采用结构 + 非结构的混合网格进行模拟计算，生猪活动区域使用非结构网格，其他区域包括漏缝地板等使用结构网格。结构网格和非结构网格之间的面设置为 Interface[22]。同时，为了减少生猪表皮边界层的影响[22]，需保证无量纲壁面距离（$Y+$）小于 1。通过计算，本研究中生猪第 1 层网格节点高度设置为 0.1 mm。

图 4 是绘制的猪舍网格。为了最大程度地降低网格分辨率的影响，需进行网格独立性测试。以导流板角度为 50°、进风口高度为 1.8 m 为例，网格数确定为 5 486 663。对于此模拟，该密度被认为是足够的[20-21]。其他方案也按此方式进行网格选择，所有方案的网格数量在 5 486 663 ~ 5 964 728 之间。

2.3　边界条件设置及求解

本研究的模拟需进行如下假设：猪舍内空气为不可压缩流体；舍内气密性良好。

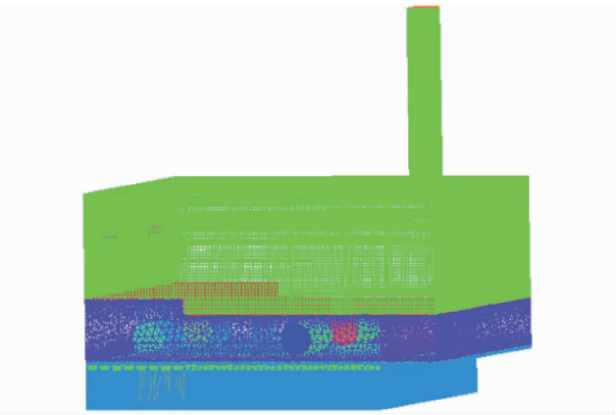

图 4　猪舍网格

Fig. 4　Pig house grid

在本研究的 CFD 模拟中，烟囱为流量出口，CO_2 释放源为质量流量入口，当流量入口与流量出口的边界条件同时出现时，模拟收敛性会较差[14]。为了更好地保证模型收敛，进风口设置为质量流量入口，出风口设置为压力出口[14]。猪舍进风口流量为 0.862 kg/s，出口静压为 0 Pa。以圆筒距离空气出口较远的面作为 CO_2 释放源，CO_2 入口流量[15]为 1 L/min。边界条件设置如表 2 所示。所有模拟都选择 SST $k-\omega$ 湍流模型[22-25]。使用二阶精度的 SIMPLE 算法进行求解[24]。在计算域中监视连续性、速度、能量、湍动能（k）、湍动能耗散率（ω），当净质量流量小于 10^{-4} kg/s 时，迭代计算被认为是收敛的。

表 2　边界条件设置

Tab. 2　Boundary condition setting

边界	边界条件
出口	压力出口，静压为 0 Pa
入口	流量入口，流量为 0.862 kg/s，温度为 19.8℃
生猪	无滑移，靠近走道的猪表皮温度为 306.45 K，靠近进风口墙壁的猪表皮温度为 309.35 K
CO_2 释放面	流量入口，流量为 1 L/min
漏缝地板	无滑移，292.85 K
其他壁面	无滑移，293.95 K

3　结果与讨论

3.1　CFD 验证

图 5 为 CFD 模拟值与实际测量值之间的对比情况。从图中可以看出，模拟的风速形态[26]与测量所获得的风速形态吻合性较高。图 6 为模拟值与测量值之间的相关性，决定系数为 0.916 2，模拟值与测量值之间的平均相对误差为 26.7%。这表明模拟结果较可靠，可以较准确地还原猪舍真实的风速，因此，可以认为本研究所建立的猪舍 CFD 预测模型可靠，可用于猪舍环境模拟。

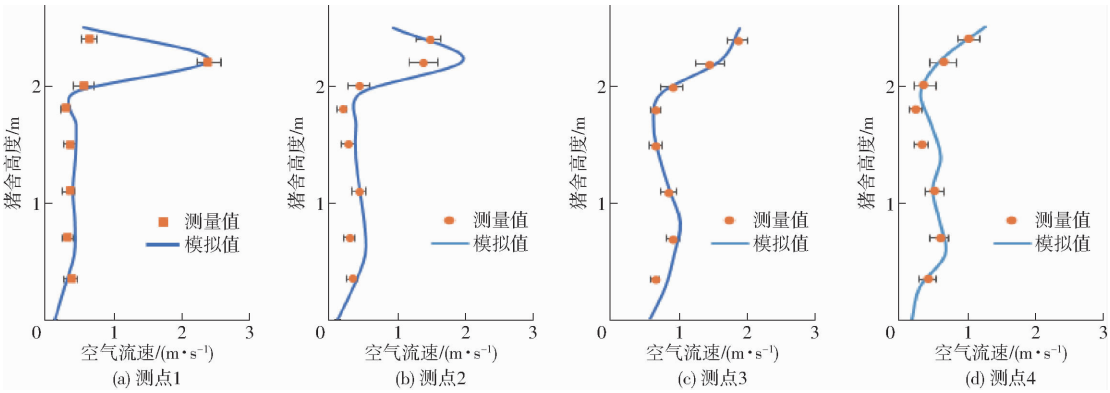

图 5 CFD 模拟值与测量值的对比

Fig. 5 Comparison of CFD simulation values and measured values

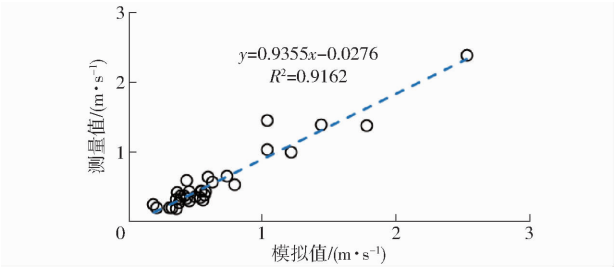

图 6 空气流速模拟值与测量值之间的相关性

Fig. 6 Correlation between simulated and measured

3.2 猪舍风速分布

图 7、8 分别为 $X = 1.22$ m 处不同进风口导流板角度下的气流分布和生猪对流换热量。$X = 1.22$ m 处截面可以同时表现空气入口以及生猪区域的气流情况，并且 CFD 模拟的验证测点都在 1.22 m 的截面上。由图 7 可知，方案 A 气流进入猪舍后，在射流惯性力的作用下，在屋顶部产生了一定的撞击，之后下沉，并在猪舍形成一定的环流。环流中的新鲜空气和生猪发生热交换。方案 B 和方案 A 相比，气流进入猪舍后没有对猪舍顶部进行撞击，所以没有在猪舍内形成较大环流，以致于靠近进风口处的生猪生活区域的风速较小。所以方案 B 生猪对流换热量比方案 A 低了 17.7%。而方案 C 气流则与走廊侧的生猪相切，而靠近进风口侧的风速较低，导致不同位置风速差异较大。此方案生猪的对流换热量比方案 A 增加 3.2%，换热量增加较小，但是气流不均匀性增加。方案 D 进风口处正下方的气流大，且气流通过地板平面流向靠走廊侧的生猪。整体对流

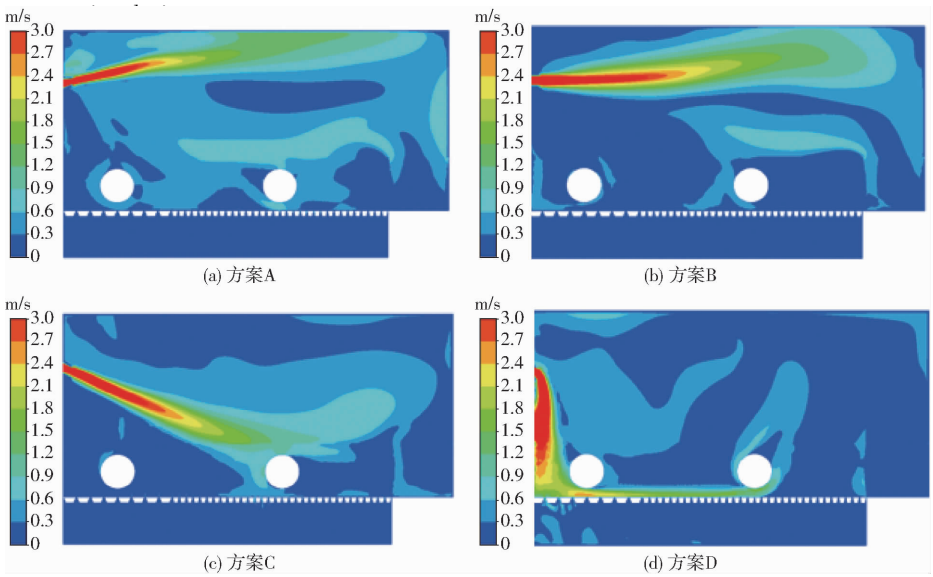

图 7 $X = 1.22$ m 处不同进风口导流板角度时的风速分布

Fig. 7 Wind speed distribution at different angles of air inlet deflector at $X = 1.22$ m

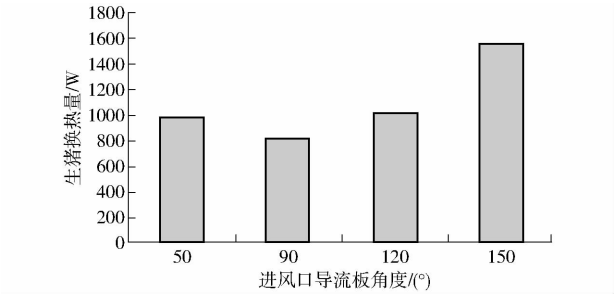

图 8 不同进风口导流板角度的生猪对流换热量

Fig. 8 Convection heat transfer of pigs at different angles of air inlet deflectors

换热量比方案 A 高 58.4%。在冬季主要需要考虑保温，且需要保证猪舍生猪区域的换气量。由图 8 可知，方案 B 对流换热量为 807.61 W，与其他方案相比换热量最低，因此其保温性能较好。

图 9、10 分别为 $X = 1.22$ m 处不同进风口高度下的气流分布和生猪的对流换热量。由图 9 可知，方案 E、F、G 与方案 A 的气流形态相近，差异较小，与方案 A 相比，对流换热量分别下降了 0.2%、0.9%、1.8%。由图 10 可知，随着进风口高度逐渐减小，生猪对流换热量也相对减小。主要是进风口高度越高对于猪舍顶的撞击越强烈，从而增加了猪舍的环流。但是由于进风口导流板角度不变，导致整体气流分布相近。而方案 G 比方案 B 生猪换热量高了 19.3%。

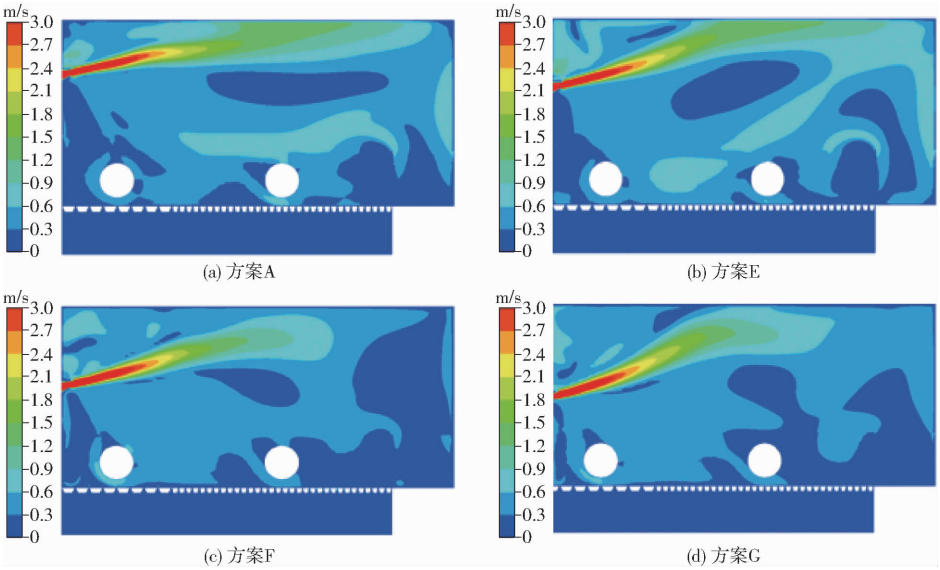

图 9　$X = 1.22$ m 处不同进风口高度的风速分布

Fig. 9　Wind speed distribution at different air inlet heights under $X = 1.22$ m

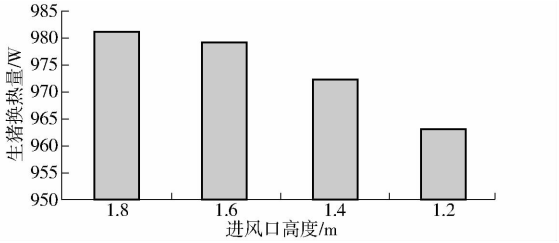

图 10　不同进风口高度的生猪对流换热量

Fig. 10　Convection heat transfer of pigs at different air inlet heights

3.3　猪舍空气龄分布

图 11、12 分别为 $X = 1.22$ m 处不同进风口导流板角度下生猪生活区域的空气龄分布和平均空气龄。由图 11、12 可知，空气龄的分布与进风口导流板角度有较大关系，由于不同进风口导流板角度造成了不同的猪舍流场，越靠近气流轨迹，空气龄就越小，空气越新鲜。方案 A、B 比方案 C、D 生猪生活区域空气龄大，即空气交换少。但方案 D 生猪换热量较大，而方案 C 比方案 A 生猪换热量提高了 3.2%。

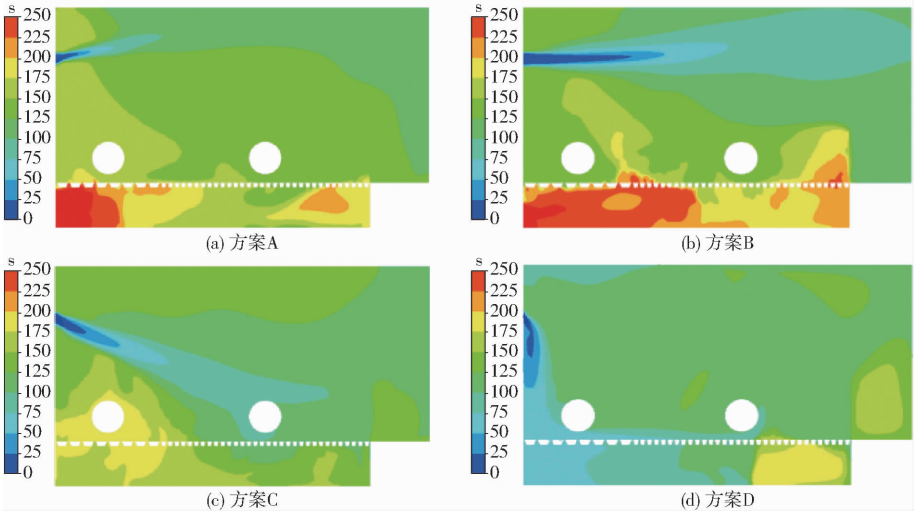

图 11　$X = 1.22$ m 处不同进风口导流板角度时的空气龄分布

Fig. 11　Air age distribution at different angles of air inlet deflector at $X = 1.22$ m

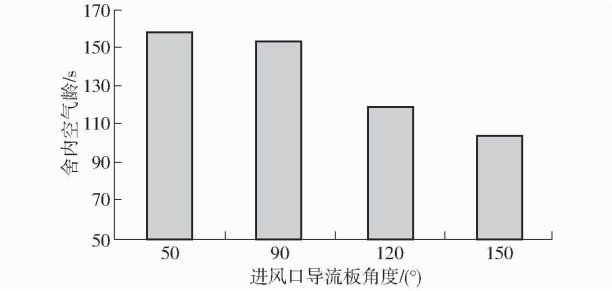

图 12 不同进风口导流板角度的生猪生活区域空气龄

Fig. 12 Air age of pig living area at different air inlet deflector angles

并且方案 C 比方案 A 生猪生活区域的空气龄降低了 24.7%。方案 C 与方案 A 保温效果相差不大,但生猪生活区域换气效果有较大提高。

图 13、14 分别为 $X = 1.22$ m 处不同进风口高度下生猪生活区域的空气龄分布和平均空气龄。由图 13、14 可知,空气进风口越低,猪舍生活区域空气龄越小。方案 F 与方案 G 相比,空气龄提高了 2.9%,但是空气龄分布更均匀。方案 F 相比方案 C,生猪生活区域空气龄相对偏高 5.9%。在众多方案中,方案 C 与方案 F 猪舍空气龄分布更均匀。

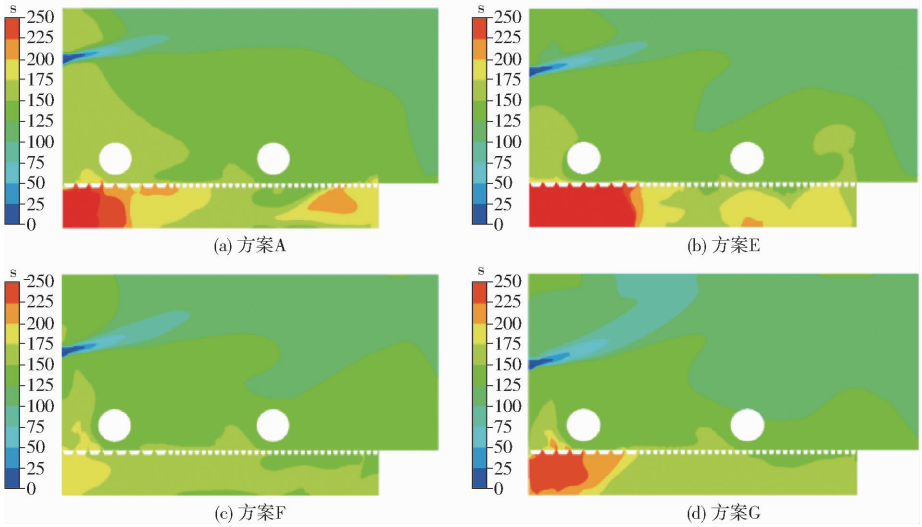

图 13 $X = 1.22$ m 处不同进风口高度的空气龄分布

Fig. 13 Air age distribution at different air inlet heights at $X = 1.22$ m

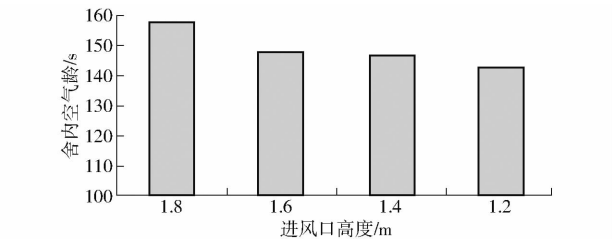

图 14 不同进风口高度的生猪生活区域空气龄

Fig. 14 Air age of pig living area with different air inlet heights

3.4 猪舍 CO_2 分布

图 15、16 分别为 $Y = 1.062$ m 处不同进风口导流板角度下的生猪活动区域的 CO_2 浓度分布和 CO_2 的平均浓度。$Y = 1.062$ m 的截面为距离漏缝地板高 0.372 m 处的截面,该截面可以表现生猪生活区域的 CO_2 浓度分布。由图 15、16 可知,随着进风口导流板角度从 50°增加到 120°,CO_2 浓度逐渐降低,而 150°时 CO_2 浓度出现回升。方案 C CO_2 平均浓度最低,并且每只生猪周围区域的 CO_2 浓度分布也较其他方案低。方案 C 比方案 A CO_2 浓度低了 48.8%,说明方案 C 可以较好地把生猪生活区域的 CO_2 排出。图 17、18 分别为 $Y = 1.062$ m 处不同进风口高度下的生猪活动区域的 CO_2 浓度分布和 CO_2 平均浓度。由图可知,方案 F 与其他方案相比,CO_2 平均浓度最低且舍内 CO_2 的浓度均匀性较好。与方案 A 相比,方案 F CO_2 浓度降低了 46.5%。说明该方案可以较好地排出 CO_2。而方案 F 与方案 C 相比,方案 F CO_2 浓度分布较均匀,但是 CO_2 浓度高了 4.5%。方案 C 与方案 F 生猪生活区域的空气龄并不是最佳的,但是整个猪舍的空气龄均匀性较其他方案好,说明生猪生活区域 CO_2 浓度不仅受到生活区域的生猪空气龄影响,还受到整个猪舍的空气龄均匀性的影响。

3.5 讨论

本研究对猪舍内气流分布情况进行了分析,并利用实验数据验证了 CFD 模型的可靠性。通过比较分析不同通风方案,结果表明进风口高度和入射角度会影响猪舍内空气龄和 CO_2 的分布,其中方案 C 与方案 A 相比,生猪活动区域平均空气龄以及平均 CO_2 浓度分别降低了 24.7%、48.8%;方案 F 与方案 A 相比,相对应指标分别降低了 7.2%、46.5%,并且两种方案都具备较好的猪舍保温效果。方案 C 与方案 F 均较好地改善了猪舍内的环境。研究还发现生猪生活区域 CO_2 浓度不仅受到生活区域的

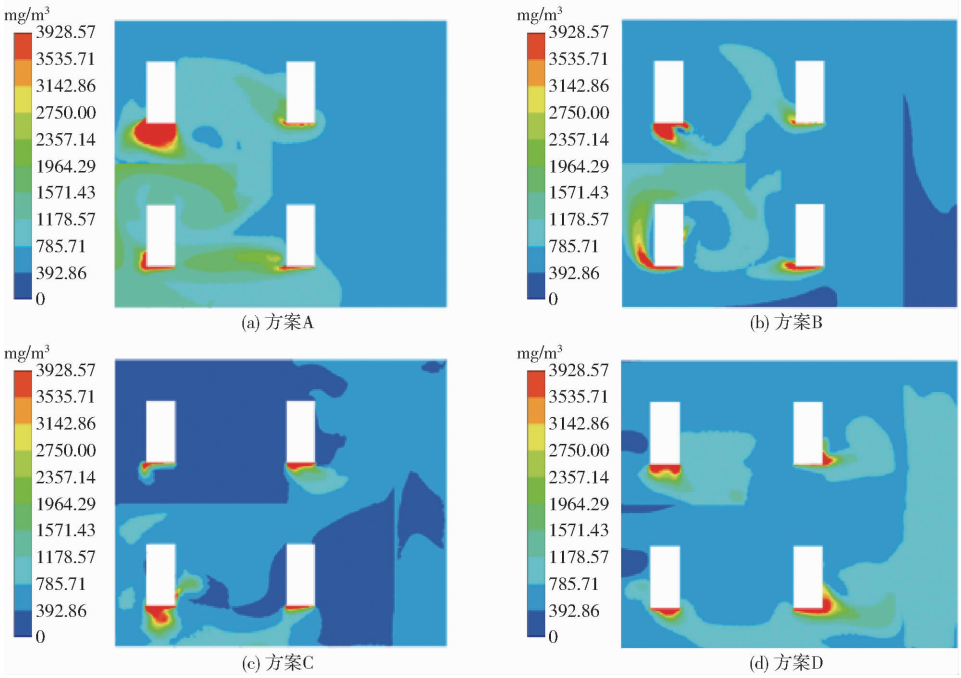

图 15　$Y = 1.062$ m 处不同进风口导流板角度的猪只活动区域 CO_2 浓度

Fig. 15　CO_2 solubility of pigs at different air inlet angles at $Y = 1.062$ m

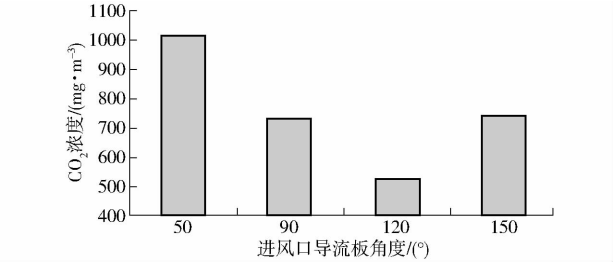

图 16　不同进风口导流板角度的猪只活动区域 CO_2 浓度

Fig. 16　CO_2 solubility in pig active area under different air inlet angles

平均空气龄影响，还受到整个猪舍的空气龄分布均匀性的影响。

舍内空气龄和 CO_2 分布除了受进风口高度和导流板角度的影响外，还受到进风口面积和结构、气流出口抽风机设置以及烟囱高度等因素的影响，本文将进风口设为标准化的通风窗，表示商业猪舍中常用的进风口面积和结构；猪舍的烟囱内壁面设为光滑壁面，忽略了因管壁粗糙而产生的沿程阻力。在下一步研究中，需要研究不同进风口面积和结构、烟囱内抽风机位置

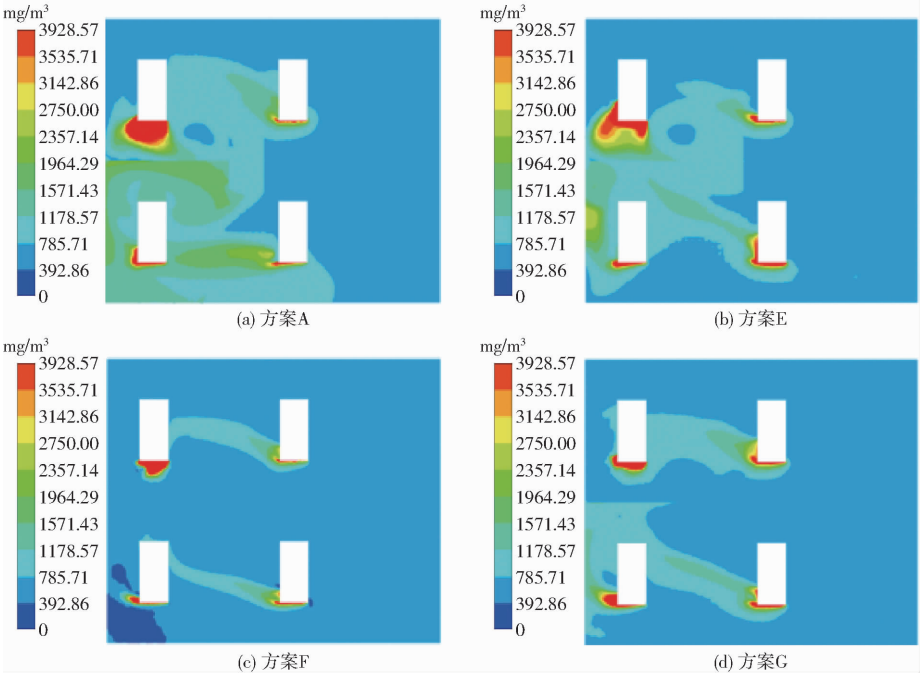

图 17　$Y = 1.062$ m 不同进风口高度的猪只活动区域 CO_2 浓度

Fig. 17　CO_2 solubility of pigs in different air inlet heights at $Y = 1.062$ m

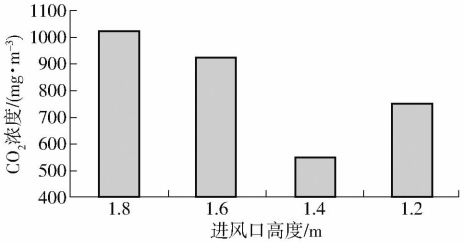

图 18 不同进风口高度的猪只活动区域 CO_2浓度

Fig. 18 CO_2 solubility of pigs' active area under different air inlet heights

以及不同高度烟囱等因素对猪舍内环境的影响。

4 结论

(1)CFD 模拟值与实测值风速形态接近,模拟值与测量值之间的决定系数 R^2 为 0.916 2。所建立的 CFD 预测模型用于分析猪舍风速形态以及换气情况是可行的。

(2)不同进风口导流板角度与高度会造成猪舍气流环流情况的不同,从而造成了气流速度分布、生猪对流换热量、空气龄分布以及 CO_2浓度分布的不同。以上环境分布表明,不同进风口情况对猪舍内空气质量有较大影响。

(3)生猪生活区域 CO_2浓度不仅受到生活区域的生猪空气龄影响,还受到整个猪舍的空气龄均匀性的影响。因此,优化生猪区域的空气龄时,也需要考虑猪舍整体的空气龄的均匀性。

参 考 文 献

[1] 程琼仪. 叠层笼养蛋鸡舍夏季通风气流 CFD 模拟与优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
CHENG Qiongyi. The CFD simulation and improvements of ventilation in stacked-cage laying hen housing[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[2] ZHOU B, WANG X S, MONDACA M R, et al. Assessment of optimal airflow baffle locations and angles in mechanically-ventilated dairy houses using computational fluid dynamics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165: 104930.

[3] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

[4] 李文刚, 吴志娟, 焦福林, 等. 猪舍有害气体对猪的危害[J]. 猪业观察, 2015(1): 92 - 94.

[5] GUARDIA O M. Emissions of NH_3, H_2S and CO_2 from swine slurry as affected by surface liquid disturbance[D]. Odense: University of Southern Denmark, 2010.

[6] BLANE-VIDAL V, NADIMI E S. The dynamics of ammonia release from animal wastewater as influenced by the release of dissolved carbon dioxide and gas bubble[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(29): 5110 - 5118.

[7] NI J Q, HENDRIKS J, VINCKIER C, et al. A new concept of carbon dioxide accelerated ammonia release from liquid manure in pig house[J]. Environment International, 2000, 26(1 - 2): 97 - 104.

[8] 彭英霞, 贾龙, 韩华, 等. 现代化猪场冬季通风模式介绍[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016(16): 76 - 78.

[9] BIANCA W. The signifiance of meterology in animal production[J]. International Journal of Biometeorology, 1976, 20(2): 139 - 156.

[10] BRUCE J M, CLARK J J. Models of heat production and critical temperature for growing pigs[J]. Animal Production Science, 1979, 28: 353 - 369.

[11] 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.
ZHOU Zhongkai, YANG Dianlin, ZHANG Haifang, et al. Ammonia and green house gas emissions from enclosed pig house with side-ventventilation in winter season[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1359 - 1367. (in Chinese)

[12] 叶章颖, 魏晓明, 张国强, 等. 冬季猪舍粪便贮存过程中 CO_2 排放特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 264 - 269.
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)

[13] ZONG C, ZHANG G, FENG Y, et al. Carbon dioxide production from a fattening pig building with partial pit ventilation system[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126: 56 - 68.

[14] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[15] MAO Ning, SONG Mengjie, CHAN Mingyin, et al. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of air flow field, mean age of air and CO2 distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet[J]. Applied Energy, 2016, 164: 906 - 915.

[16] RONG L, AARNINK A J A. Development of ammonia mass transfer coefficient models for the atmosphere above two types of the slatted floors in a pig house using computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2019, 183: 13 - 25.

[17] ZONG C, ZHANG G. Numerical modelling of airflow and gas dispersion in the pit headspace via slatted floor: comparison of two modelling approaches[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 200 - 211.

(下转第 441 页)

technology[J]. The Food Industry, 2016, 37(10):200 – 203. (in Chinese)

[23] 乌兰图雅,王春光.螺旋输送装置的研究现状及未来发展[J].农机化研究,2014,36(11):244 – 248.
Wulantuya, WANG Chunguang. Present situation and future development of screw conveyor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(11):244 – 248. (in Chinese)

[24] 白晓虎,李芳,张祖立,等.秸秆螺旋喂料装置工作性能的试验研究[J].农机化研究,2007,29(2):162 – 163,181.
BAI Xiaohu, LI Fang, ZHANG Zuli, et al. Working performance of screw feeding device for straw[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(2): 162 – 163,181. (in Chinese)

[25] 柳善建,王帅超,李永军,等.防回火农林生物质碎料燃烧机设计与燃烧特性试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(7):346 – 354.
LIU Shanjian, WANG Shuaichao, LI Yongjun, et al. Design and combustion characteristics experiment of biomass crushed aggregates burner for anti-tempering maize straw and wood chips[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):346 – 354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200739&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.039. (in Chinese)

[26] 李伟振,姜洋,饶曙,等.玉米秸秆和木屑及木钠混配成型工艺参数优化[J].农业工程学报,2018,34(1):198 – 203.
LI Weizhen, JIANG Yang, RAO Shu, et al. Parameter optimization of corn stover blended with sawdust and sodium lignosulphonate compression experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1):198 – 203. (in Chinese)

[27] XIA X, ZHANG K, XIAO H, et al. Effects of additives and hydrothermal pretreatment on the pelleting process of rice straw: energy consumption and pellets quality[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 133(2):178 – 184.

[28] 姜洋,李伟振,蒋恩臣,等.成型参数对桉树加工剩余物成型颗粒品质影响的实验研究[J].太阳能学报,2017,38(4):900 – 905.
JIANG Yang, LI Weizhen, JIANG Enchen, et al. Experimental research of effect of molding parameters on quality of eucalyptus residue pellets[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(4):900 – 905. (in Chinese)

[29] 姚云隆,张守玉,吴顺延,等.成型工艺参数对生物质热压成型燃料理化特性的影响研究[J].太阳能学报,2018,39(7):1917 – 1923.
YAO Yunlong, ZHANG Shouyu, WU Shunyan, et al. Effect of briquetting process parameters on properties of briquette prepared from biomass[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(7): 1917 – 1923. (in Chinese)

[30] NOHA S, MAHMOUD M, ANGELA G, et al. Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets [J]. Fuel Processing Technology, 2015,138:56 – 64.

[31] 盛奎川,吴杰.生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展[J].农业工程学报,2004,20(2):242 – 245.
SHENG Kuichuan, WU Jie. Review on physical properties and forming mechanisms of biomass briquettes[J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(2):242 – 245. (in Chinese)

(上接第 434 页)

[18] TONG X, HONG S W, ZHAO L. CFD modeling of airflow, thermal environment, and ammonia concentration distribution in a commercial manure-belt layer house with mixed ventilation systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 281 – 299.

[19] HAN H, SHIN C Y, LEE I B, et al. Tracer gas experiment for local mean ages of air from individual supply inlets in a space with multiple inlets[J]. Building and Environment, 2011, 46(12): 2462 – 2471.

[20] LI H, RONG L, ZHANG G. Reliability of turbulence models and mesh types for CFD simulations of a mechanically ventilated pig house containing animals[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161: 37 – 52.

[21] LI H, RONG L, ZHANG G. Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house[C]//CIGR/AgEgen2016/CFD Symposium, 2016: 1 – 20.

[22] WANG X S, ZHANG G Q, CHOI C Y. Effect of airflow speed and direction on convective heat transfer of standing and reclining cows[J]. Biosystems Engineering, 2018, 167: 87 – 98.

[23] LI H, RONG L, ZHANG G Q. Study on convective heat transfer from pig models by CFD in a virtual wind tunnel[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 203 – 210.

[24] LI H, RONG L, ZONG C, et al. A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow[J]. Biosystems Engineering, 2016, 150: 151 – 159.

[25] LI H, RONG L, ZHANG G Q. CFD prediction of convective heat transfer and pressure drop of pigs in group using virtual wind tunnels: influence of grid resolution and turbulence modelling[J]. Biosystems Engineering, 2019, 184: 69 – 80.

[26] 中国农业大学.一种用于畜禽舍环境的风速监测系统:201821682880.5[P]. 2018 – 10 – 17.