

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.034

保育舍冬季湿热环境与颗粒物 CFD 模拟研究

汪开英¹ 李开泰¹ 李王林娟² 楼振纲³ 朱晓丹³

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 北卡罗莱纳州立大学生物与农业工程系, 罗利 NC 27695-7625; 3. 浙江省环境监测中心, 杭州 310012)

摘要: 为对保育舍内环境质量状况进行评估和改善舍内环境提供有益参考,应用 CFD 对采用负压通风和水泡粪保育猪舍的气流场、温度场、湿度场和颗粒物浓度场进行三维稳态模拟。由模拟结果可知:在冬季送入气流,舍内动物所在区域高度为 0.2 m 的风速基本保持在 0~0.2 m/s,大部分区域风速在 0.1 m/s 以下,相对湿度则基本在 60%~70% 之间,舍内的平均温度保持在 26~34℃,大部分区域的 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP 质量浓度分别在 0~0.1 mg/m³、0~0.7 mg/m³ 和 0~1.0 mg/m³ 之间。由《规模猪场环境参数及环境管理》可知,舍内环境质量基本满足保育猪对冬季环境需求,但在单元入口及墙角处仍有优化空间。

关键词: 保育舍; 湿热环境; 颗粒物; CFD; 模拟

中图分类号: X513; S811.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0270-09

CFD Simulation of Indoor Hygrothermal Environment and Particle Matter of Weaned Pig Building

WANG Kaiying¹ LI Kaitai¹ LI Wanglinjuan² LOU Zhen'gang³ ZHU Xiaodan³

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China
2. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7625, USA
3. Zhejiang Environment Monitoring Center, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The quality of the environment could directly affect the production performance of pigs. Especially for weaned pigs, they have just undergone weaned stress and are very sensitive to external environment change. In order to evaluate the environmental conditions in the weaned pigs building in typical East China, and provide useful suggestions for pig barn structure design and the environment improvement, based on computational fluid dynamics (CFD) method, a three-dimensional steady state simulation was conducted on air speed, temperature, relative humidity and particle concentration distribution of a weaned pig building with negative pressure ventilation system and manure pit system. It was known from the CFD results that CFD could be a useful tool in analyzing the indoor environment in livestock house. When air was input to the pig house during winter days, the wind speeds in the region where pig was fed at $z=0.2$ m could maintain within 0~0.2 m/s, and most of them were below 0.1 m/s. Also, the relative humidity remained at about 60%~70%. Its temperature was maintained within 26~34℃. In addition, the PM_{2.5}, PM₁₀ and TSP concentrations were kept in 0~0.1 mg/m³, 0~0.7 mg/m³ and 0~1.0 mg/m³, respectively, in most area of pig house, which could meet the requirements of weaned pigs in winter according to environmental parameters and environmental management for intensive pig farms. Yet, at entrance of the units and some corners, there was still potential for optimization.

Key words: weaned pig; hygrothermal environment; particle matter; CFD; simulation

引言

随着规模化畜牧业的发展,畜禽场空气质量特

别是畜禽舍的颗粒物污染问题正日渐受到重视。由于颗粒物可能携带细菌和病原体,并吸附有害气体,对人畜健康、动物福利造成不利影响,颗粒物在不同

收稿日期: 2016-11-23 修回日期: 2017-03-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(31672467)和浙江省环保科技计划项目(2012A007)
作者简介: 汪开英(1968—),女,副教授,主要从事农业空气质量研究,E-mail: zjuwky@zju.edu.cn

畜舍间传播还会造成疫病的流行,造成巨大的经济损失。

畜禽舍颗粒物来源于饲料、动物本身、废弃物等。猪舍的主要颗粒物来源是饲料^[1-2]。由于饲养模式的高度集约化,猪舍中的空气湿度一般比舍外空气更加高,潮湿条件促进了颗粒物中微生物的繁殖,许多致病微生物均以颗粒物作为载体存活并进行传播,如炭疽病、流感病毒等^[3];另外,空气中极少量的病原微生物就可以直接导致畜禽的呼吸道感染,尤其是下呼吸道。颗粒物进入猪的眼睛还会引起眼部不适,发生结膜炎,与皮脂等皮肤分泌物结合后刺激皮肤发痒,导致皮炎的发生。在欧洲,不同种类的猪舍间颗粒物浓度差别很大,育肥猪舍一般为 2~5 mg/m³,母猪舍一般为 1~2 mg/m³^[4]。何晴等^[5]阐述了畜禽舍内颗粒物与控制技术方面的内容,近年来有部分学者从监控、解析、减排等方面出发对其进行了研究^[6-8],然而这些研究方法不仅成本较高,而且费时费力。

在应用数字仿真模拟农业污染物方面,大气扩散模型由于最初是针对工业污染源,因此在农业上的模拟精准度欠佳^[9],而 CFD 应用在颗粒物模拟方面也需要选择合适的湍流模型^[10]。2015 年,SEO 等^[11]利用 CFD 模拟空气中的病毒扩散,将得到的模拟数据与实际天气的数据进行对比用于建立空气中微生物、病毒的数据库,为农业领域工作者提供基于网络的实时预测。

国内 CFD 在畜禽舍内环境模拟的研究处于探索阶段,目前基于 CFD 的畜禽舍中的应用主要集中在通风和温度场研究中^[12-15]。国内外的研究结果表明,使用 CFD 模拟方法能够真实表达畜禽舍内气流状态,对畜禽舍内温度场和气流场的模拟是一种有效的方法。应用 CFD 技术可大量节省测量时间和重复劳动,更好地了解颗粒物浓度、时空分布及扩散规律,帮助畜禽场工作人员更好地进行管理。然而国内对该领域的探究还处于初级发展阶段,因此,本文应用 CFD 对畜禽舍内环境质量进行模拟与评估,以期改善畜禽舍环境质量提供支撑。

1 研究对象与方法

1.1 保育舍介绍

本研究猪场位于浙江省嘉兴桐乡(30°34'N、120°21'E)。该猪场占地 0.14 km²,常年存栏母猪 465 头,年出栏量 9 200 头。

选择一栋典型保育猪舍为研究对象,如图 1 所示。猪舍内部空间尺寸为 58 m(长)×26 m(宽)×3.2 m(高)。整栋猪舍呈东西走向,内设两列,每列

有 5 个单元间,中间为宽 1.4 m 的通道。每个单元间的布局为 4 栏,分别在通道左右两侧。猪栏采用热镀锌钢管,栏高 0.9 m。每单元保育猪数量约 70 头,保育猪体重 8~20 kg,转群周期为 35~40 d。猪舍粪污收集采用漏粪地板下的水泡粪工艺,漏缝地板下面水泡粪的深度为 0.8 m,清理周期为半年清理一次。喂料方式采用全自动机械供料、自由采食粉状饲料。饮水为自来水,分别经石英砂和活性炭二次过滤全自动式饮用,置于同侧猪栏之间。该保育猪舍采用机械通风,猪舍东西两侧布置湿帘,在每单元南北侧配置一小一大风机各 1 台,其中小风机和大风机的直径分别为 1 m 和 1.3 m,额定功率和通风量分别为 1.2 kW、22 000 m³/h 和 2.2 kW、32 000 m³/h。风机的启用根据气候情况决定,冬季该保育舍的小风机启动条件为舍内温度达到 25℃。猪舍空栏期间使用高压喷雾系统进行猪舍消毒。

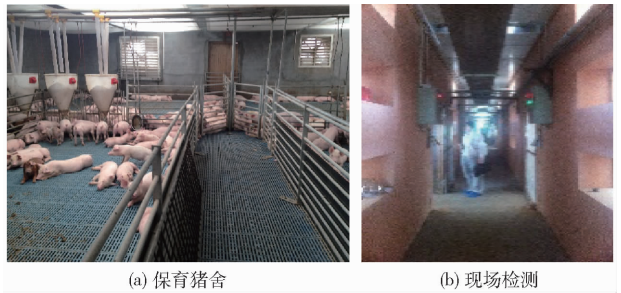


图 1 现场检测保育猪舍

Fig. 1 Weaned pig building for on-site test

1.2 现场测量

保育猪在寒冷条件下易受冷应激影响导致抵抗疾病的能力下降。该试验时间为 2015 年 11 月 26 日 09:00 至 16:00。当日舍外气温为 4~6℃,相对湿度为 49% 时,为冬季典型气温水平。当日舍内外环境的测量与对照可以有效评估猪场所采用通风方式的合理性和环境的舒适性。测量期间,位于南墙直径为 1 m 的排风风机为开启状态,气流走向为由西向东,再分别进入各保育单元。

本试验采用多功能风速-温湿度测量仪(TES-1341 型,±3%,检测限为 0.01 m/s,泰仕电子工业股份有限公司,台湾)和温湿度计(CENTER313 型,±0.7%,检测限为 0.1℃和 0.1%,泰仕电子工业股份有限公司,台湾)检测猪舍内外环境中的风速、温度和湿度。红外温度仪(Raytek MX4 型,±2.5%,检测限为 0.1℃,雷泰公司,美国)则用于测量围护结构的内表面温度以及保育猪体表的温度。采用 7 台相同的智能空气/TSP 采样器(崂应 2050 型,±2.5%,青岛崂山应用技术研究所,中国)对保育舍的不同单元内颗粒物浓度进行测量,计算单位时间(min)通过的空气量(m³/min)中的粉尘质量(mg)。

猪舍测量的分布点如图 2 所示,包括饲料槽处粉尘源颗粒物浓度,作为后续模拟边界条件。选取猪舍近门处与靠近内部 2 个进风机猪栏处进行测量。针对不同的水平面,测量高度分别为 $H=0.2\text{ m}$ (保育猪呼吸带)和 $H=1.6\text{ m}$ (工作人员呼吸带),共 40 个测量点,每个测量点位测量 3 次取平均值得到该点位的最终数据,采样间隔为 1 min。从北至南分别设为列 1、列 2、列 3 和列 4 便于后续与模拟值对比分析。

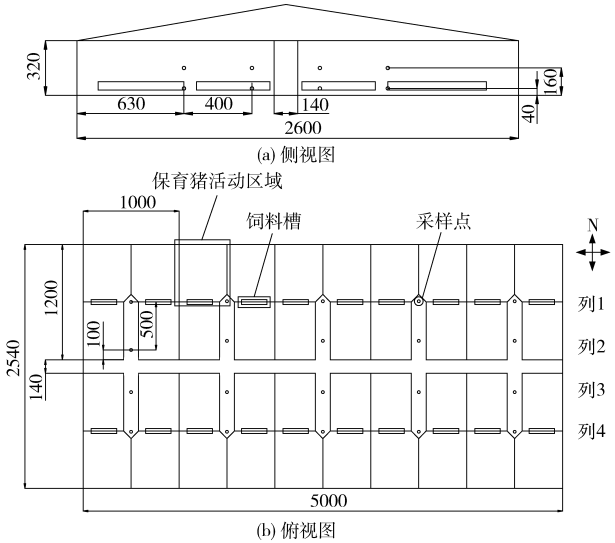


图 2 保育舍内布局与测量点分布图(圆点代表仪器测量点)

Fig. 2 Layouts of piglet house and measurement locations

2 保育舍数值模拟

流体流动遵守物理守恒定律,基本的守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。如果流动包含不同成分(组元)的混合或相互作用,系统要遵守组分守恒定律。如果流动处于湍流状态,系统还要遵守附加的湍流输运方程。控制方程是这些守恒定律的数学描述。同时本研究的数值模拟还基于以下假定:①保育舍内的空气是一种完全气体,满足状态方程。②保育舍内的气流是一种湍流,舍内环境处于稳定状态。③保育舍内栅栏形式的猪栏对风的阻力可以忽略。④冬季保育猪为取暖互相靠近,根据其形状特点,将 4 个互动区域建立为 4 个立方体模型等效为保育猪体。⑤研究表明,猪舍内的颗粒物有 91% 来自于饲料^[16-17],因此本研究为简化计算,只考虑来自于饲料的颗粒物部分,在 Fluent 中选择粉状饲料作为材料进行模拟。

2.1 基本守恒方程

2.1.1 质量守恒方程

任何流动问题都满足质量守恒定律^[18],即:单位时间内流体微元体中质量的增加等于同一时间

隔内流入该微元体的净质量。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho v) = S_m \tag{1}$$

式中 S_m ——质量源, kg/m^3 ρ ——密度, kg/m^3
 t ——时间, s v ——速度, m/s

2.1.2 动量守恒方程

动量守恒定律也是任何流动系统都必须满足的基本定律^[18],即:微元体中流体动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和,实际上是牛顿第二定律。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla (\rho v v) = -\nabla p + \nabla (\bar{\tau}) + \rho g + F \tag{2}$$

式中 p ——压力, Pa $\bar{\tau}$ ——应力张量, Pa
 F ——外力, N/m^3
 g ——重力加速度, m/s^2

2.1.3 能量守恒方程

能量守恒定律是具有热交换的流动系统必须满足的基本定律。即:微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体积力与面积力对微元体所做的功,实际上是热力学第一定律。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla (v(\rho E + p)) =$$

$$\nabla \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\tau} v) \right) + S_h \tag{3}$$

式中 E ——总能量, J k_{eff} ——传热系数
 h_j ——比焓, J/kg
 J_j ——扩散通量组分, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 S_h ——总熵, J/K T ——温度, $^{\circ}\text{C}$

2.1.4 组分质量守恒方程

在一个特定的系统中,可能存在质的交换,或者存在多种化学组分,每一种组分都需要遵守组分质量守恒定律。对于一个确定的系统而言,组分质量守恒定律可表述为:系统内某种化学组分质量对时间的变化率,等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和。一种组分的质量守恒方程实际上就是一个浓度传输方程。当水流或空气在流动过程中混有某种污染物质时,污染物质在流动情况下除了有分子扩散外,还会随流传输,即传输过程包括对流和扩散两部分,污染物质的浓度随时间和空间变化。

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \text{div}(\rho_{uc}) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho_c)) + S \tag{4}$$

式中 c ——该组分的体积浓度
 ρ_c ——该组分的质量浓度
 D_s ——该组分的扩散系数
 S ——生产率,为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量

2.2 湍流模型选择

本研究在综合考虑硬件与软件,以及前人试验研究的基础上^[19],选择在畜禽舍的模拟评估上采用适用性和精确性都较高的 RNG $k-\varepsilon$ 模型,在 RNG $k-\varepsilon$ 模型中, k 方程和 ε 方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中 k ——湍动能, m^2/s^2
 ε ——湍流耗散率, m^2/s^3
 G_k ——平均速度梯度引起的湍流动能, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
 G_b ——浮力引起的湍流动能, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
 Y_M ——在可压缩湍流中对整体耗散率的贡献, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
 α_k —— k 的逆效普朗特常数
 α_ε —— ε 的逆效普朗特常数
 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ ——常数
 S_k 、 S_ε ——用户自定义源项

2.3 物理模型建立

为提高计算效率,节约计算机模拟的时间,保育猪舍的物理模型需要进行适当的简化,图 3 为简化后的保育舍,是计算域模型,其中包括简化了猪舍围栏等围护结构以及将保育猪等效为四方体模型。

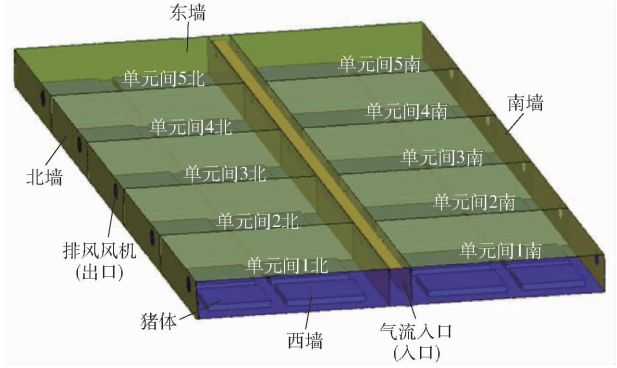


图 3 保育舍计算域

Fig. 3 Computational domain of piglet house

2.4 网格划分

使用 Gambit 2.4.6 建立物理模型并进行网格划分,所划分的网格如图 4 所示。整体的网格数量为 2 740 897。

2.5 边界条件

边界条件设置包括对模拟状态的确定、湍流模型的选择、流体边界条件和猪体边界条件的设定等方面。

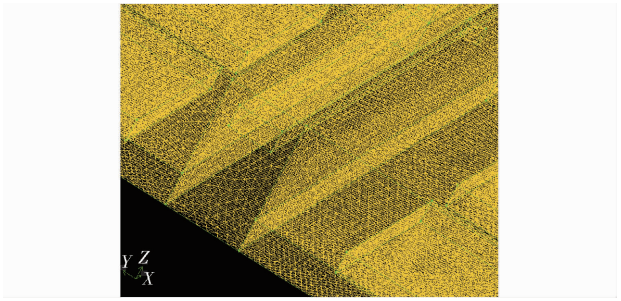


图 4 计算域网格

Fig. 4 Computational domain with grids

(1) 模拟状态的确定

在本模拟过程中,考虑到试验阶段外界温度稳定,风机持续稳定运行,故可认为舍内环境是处于稳态的,即选择模拟状态为稳态模拟。

(2) 湍流模型的选择

由 2.2 可知,本次模拟选择重整化群 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。

(3) 流体初始设置

选择该保育舍进风口设置为自由入口,空气温度为 25°C ,相对湿度为 80%,风机排风口设置为速度出口, -1 m/s 。

(4) 猪体边界条件

保育猪被设置为无滑移壁面,表面温度为 34°C 。

(5) 其余壁面边界条件

猪舍内围护结构均设置为无滑移壁面,屋顶 18.1°C ,地面 16.3°C ,东墙 22.1°C ,西墙 19.6°C ,南墙 17.5°C ,北墙 18.6°C 。

(6) 粉尘源边界条件

该保育舍粉尘源主要为饲料槽,饲料槽设置为无滑移壁面,粉尘源初始质量浓度设置为 $\text{PM}_{2.5}$: $0.1\text{ mg}/\text{m}^3$ 、 PM_{10} : $0.7\text{ mg}/\text{m}^3$ 、 TSP : $0.8\text{ mg}/\text{m}^3$ 。

3 结果与分析

3.1 保育舍的实测数据结果

图 5 分别显示了图 2 所示的列 1、列 2、列 3、列 4 处的风速、温度、相对湿度以及颗粒物浓度的实测值,分析的数据主要为分布在保育猪呼吸带高度,即 $z=0.2\text{ m}$ 水平高度。如图 5a 所示,通道 2 和通道 3 处的风速明显小于通道 1 和通道 4 处,这是由于通道 2 和 3 位于猪舍中间远离排风口的地方。由于气流在猪舍当中的流向为由西向东,风速从西侧入口至东侧主要呈递减趋势,然而由于各单元门具有缝隙的原因,导致该区域湍流强度增大,引起单元间门口处风速较大,总体而言猪舍单元间内的整体气流流动呈平稳趋势,无较大波动。

图 5b 显示了保育舍 4 个通道处的温度测量值。保育舍内最低气温位于通道 3 最西侧,为 22℃,这是由于此处为通道进风口,外界气流进入猪舍,气流流动带走了部分热量,最高气温位于通道 1,为 23.6℃,另外由图可见猪舍中间的气温普遍高于东西两侧,这是因为两侧风速较大而中间气流更为稳定。

相对湿度也是保育猪舍内环境的重要评估参数之一,图 5c 显示了保育舍 4 个通道处的相对湿度测

量值,范围为 51% ~ 56.8%。
图 5d、5e 和 5f 分别显示了此次保育猪舍内部 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP 浓度的测量值。由图可知,PM_{2.5} 质量浓度为 0.016 ~ 0.025 mg/m³,PM₁₀ 质量浓度为 0.17 ~ 0.30 mg/m³,TSP 质量浓度为 0.58 ~ 0.81 mg/m³。各个单元间的颗粒物浓度差异不大,通道 1 和通道 4 处的颗粒物浓度比通道 2 和通道 3 处要略大,主要是由于风速较大,气流的扰动导致。

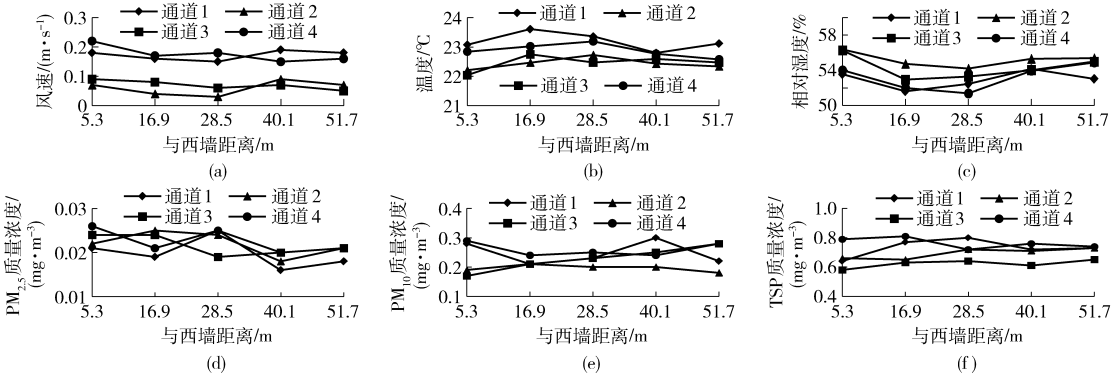


图 5 风速、温度、相对湿度和颗粒物浓度实测值
Fig. 5 Measured results of velocity, temperature, relative humidity and particle concentration

总体而言,保育猪活动区域的风速平均值为 0.15 m/s,猪舍内部平均温度为 22.9℃,颗粒物浓度处于合理的范围,基本满足保育猪对冬季通风的需求^[20]。

3.2 模拟与实测数据对比

对 CFD 模拟的精确度可以用下述公式来计算,当 NMSE 值小于 0.25 可认为 CFD 的模拟精确度是合理的^[21]。

E_v = \frac{|C_s - C_m|}{C_m} \times 100\% \tag{7}

NMSE = \frac{(C_s - C_m)^2}{C_{sm} C_{om}} \tag{8}

其中 (C_s - C_m)^2 = \frac{\sum_n (C_{si} - C_{mi})^2}{n} \tag{9}

式中 E_v——模拟值与实测值之间的相对误差
C_s——模拟值 C_m——实测值
C_{sm}——模拟值的平均
C_{om}——实测值的平均值
n——实测采样个数

图 6 显示此次模拟的模拟值与实测值的对比结果。对比分析发现,风速、温度、相对湿度的模拟与实测相对误差范围为 5.26% ~ 33.33%、3.75% ~ 12.26% 和 11.11% ~ 21.45%,PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP 的模拟值与实测值相对误差范围分别为 4.0% ~ 31.3%、3.4% ~ 22.7% 和 1.37% ~ 28.07%,其中 PM_{2.5} 的误差最大,这是由于源于粪便的颗粒物粒径

较小,即 PM_{2.5} 的成分中有部分来源于粪便,而在模拟中没有考虑此部分导致误差^[22]。然而模拟与实测数据对比的 NMSE 值分别为 0.087 (风速)、0.008 (温度)、0.028 (相对湿度)、0.033 (PM_{2.5})、0.018 (PM₁₀) 和 0.021 (TSP),均小于 0.25,因此认为模拟值与实测值无显著差异,模拟结果在可接受的范围,说明该 CFD 保育舍颗粒物模拟模型的合理可用。误差较大的点位于通道 2 的最西侧和最东侧,这是由于通道 2 靠近通风通道,较高风速引起湍流导致颗粒物的运动加剧,引起实测与模拟的较大偏差。

3.3 模拟结果评估

3.3.1 风速

在高度上分别选取 z = 0.2 m (保育猪呼吸带高度) 和 z = 1.6 m (工作人员呼吸带高度) 进行研究。图 7 为整个保育猪舍在这 2 个水平高度的风速分布云图。从模拟结果来看,猪舍内风速场的风速范围为 0 ~ 5 m/s,最大风速位于进风通道与各单元门的交汇处,由于气流从门缝进入单元间导致此处风速较大,而在保育猪活动范围,风速较为稳定,大部分风速在 0 ~ 0.2 m/s 之间,靠近排风口处,风速有所上升,这是为了排除冬季保育猪舍内的污浊空气,更换舍内新鲜空气。各个保育单元间风速并无明显差异,整体通风效果良好,基本满足保育猪对冬季通风的需求。但同时也要注意在保育猪的活动区域存在较大面积气流停滞区,这是因为保育猪在冬季聚集取暖的行为导致,在冬季为保育猪维持温度的同

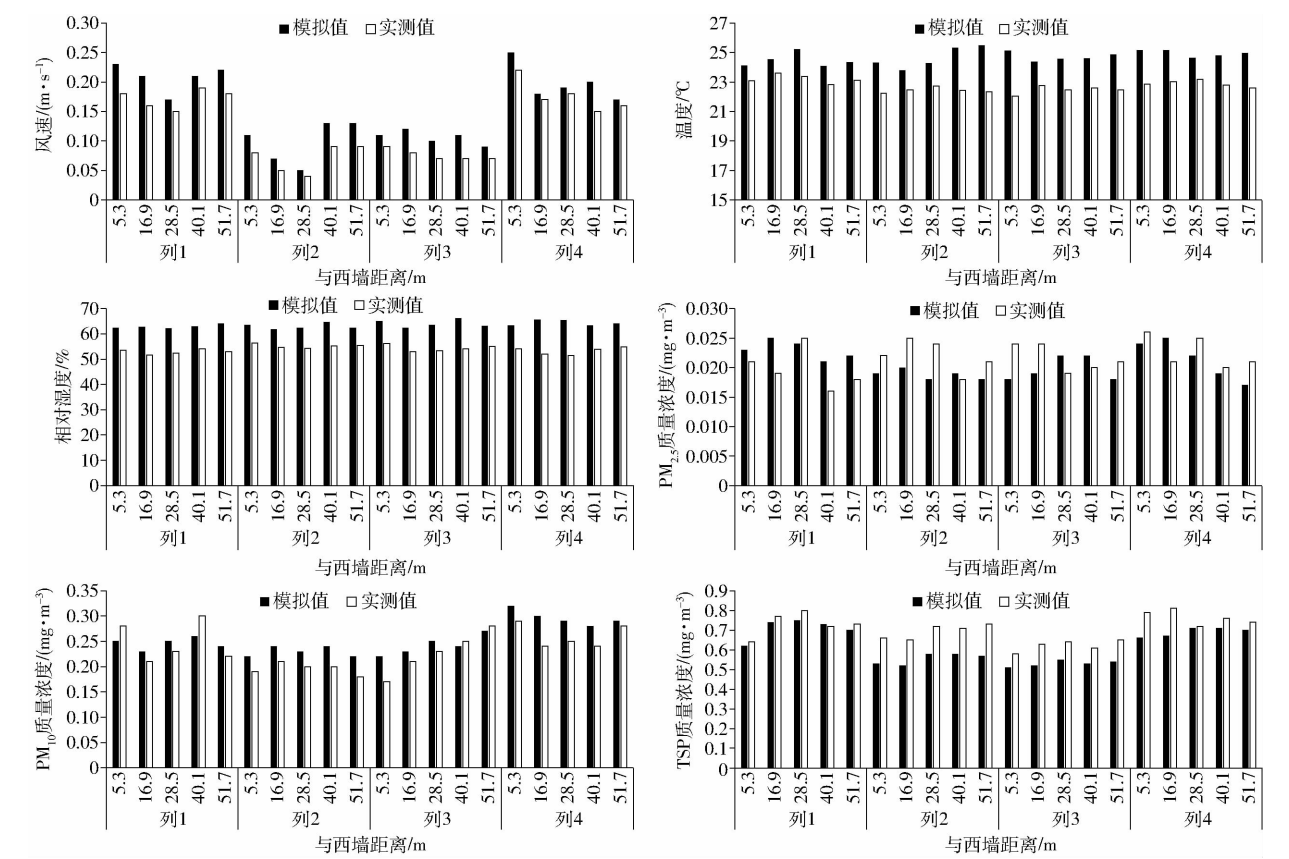


图 6 风速、温度、相对湿度和颗粒物浓度模拟值与实测值对比

Fig. 6 Comparisons of simulated and measured velocity, temperature, humidity and particle concentration results

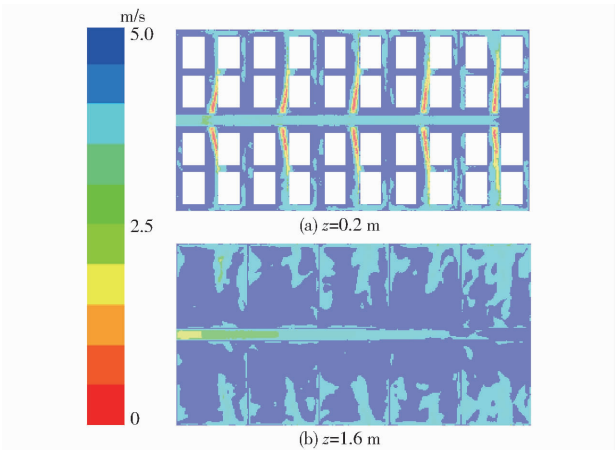


图 7 不同水平高度风速分布云图

Fig. 7 Velocity contours at two horizontal heights

时,存在空气质量的下降。因此,冬季需增强对较强气流的阻挡作用,并适时合理地进行换气。

3.3.2 温度

在寒冷的冬季,猪舍内的温度对于保育猪的生长尤为重要。较低的温度会使保育猪散热过快,为维持体热平衡,则需要进食更多的饲料用于产热消耗,不仅不能促进猪的生长,还会导致饲料转化率下降。从温度场的模拟结果(图 8)来看,保育猪舍内的温度范围为 22 ~ 34℃ 左右,在保育猪活动区域,温度范围集中在 26 ~ 34℃ ,而在较高

处的 $z = 1.6\text{ m}$ 平面,温度下降至 22 ~ 25℃ ,该舍内温度范围整体满足保育猪对冬季环境温度的需求。但从模拟结果可以看出,受外界低温气流影响,出现进风通道以及各单元间气流入口处温度较低的情况,这也解释了在测量现场,保育猪的活动范围主要集中在单元中间较为温暖的区域,而很少活动在单元门口附近。比较气流分布与温度的云图可以发现,温度和气流流速有显著的关系,速度越高的地方,温度越低。因此,在排风口以及单元入口处建议采取保温措施。

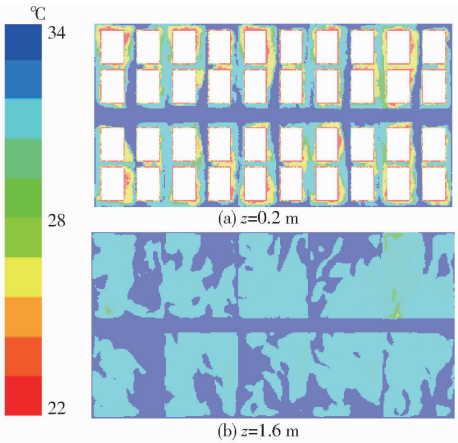


图 8 不同水平高度温度分布云图

Fig. 8 Temperature contours at two horizontal heights

3.3.3 相对湿度

从相对湿度场的模拟结果(图9)来看,保育猪舍内的相对湿度范围为30%~92%。尽管相对湿度范围差距较大,但在保育猪活动区域相对湿度较为稳定,处于60%~70%之间,这是由于保育猪舍的湿度主要来源于保育猪呼吸产生以及漏缝地板下的水泡粪。在寒冷的冬季,由于通风较差,水泡粪养殖模式由于粪便的蓄积易导致舍内氨气浓度过高,而氨气是极易溶于水的强烈刺激性物质,对保育猪的呼吸道、皮肤等产生不利因素,在冬季该范围的相对湿度虽不是保育猪生长的最优环境,但基本满足保育猪的生长需求。

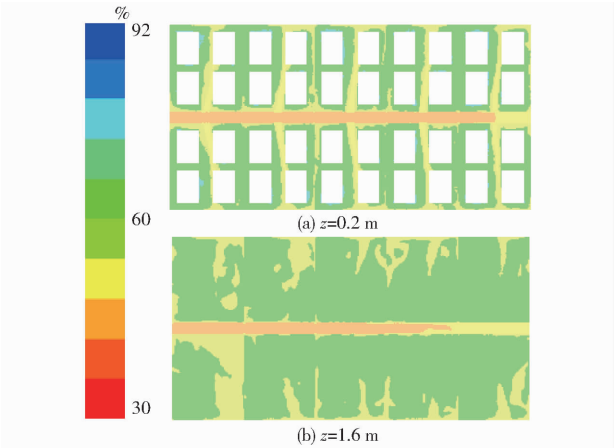


图9 不同水平高度相对湿度分布云图
Fig.9 Relative humidity contours at two horizontal heights

3.3.4 颗粒物浓度

图10~12分别为2个水平高度的PM_{2.5}、PM₁₀和TSP质量浓度的模拟分布图。从图10~12可知,该保育舍内的PM_{2.5}质量浓度范围为0~0.1 mg/m³、PM₁₀质量浓度范围为0~0.7 mg/m³、TSP质量浓度范围为0~1 mg/m³。颗粒物浓度最大的地方为各单元的中间,也就是保育猪的食槽处,由于保育猪在此处采

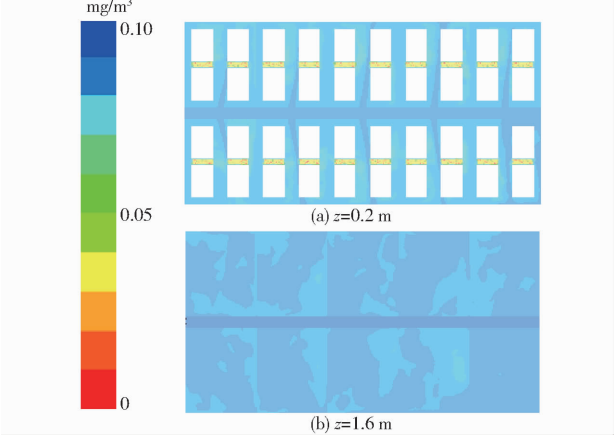


图10 不同水平高度PM_{2.5}质量浓度分布云图
Fig.10 PM_{2.5} concentration contours at two horizontal heights

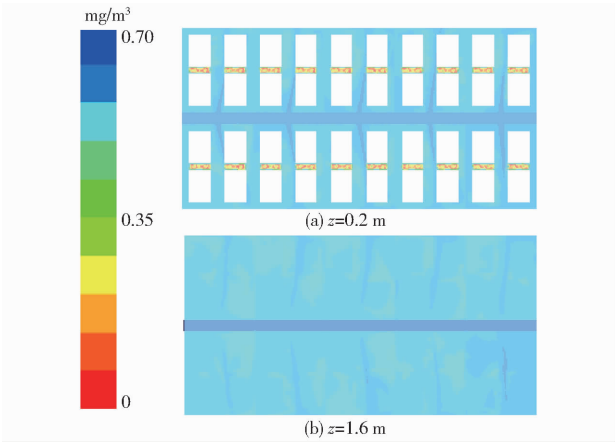


图11 不同水平高度PM₁₀浓度分布云图

Fig.11 PM₁₀ concentration contours at two horizontal heights

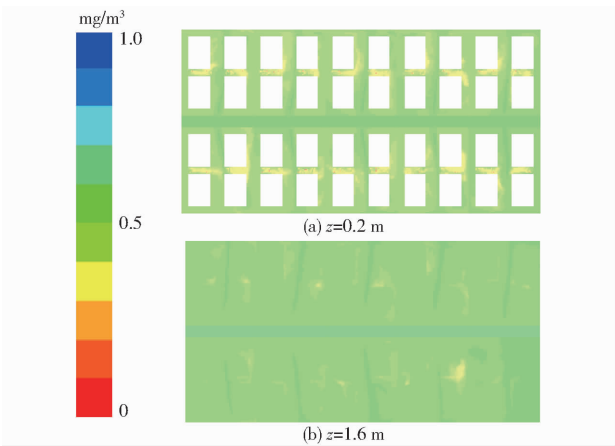


图12 不同水平高度TSP浓度分布云图

Fig.12 TSP concentration contours at two horizontal heights

食,动作频繁密集,易导致饲料颗粒运动加剧,空气中的颗粒物浓度增加。在水平高度上, $z=1.6\text{ m}$ 处的颗粒物浓度小于 $z=0.2\text{ m}$ 处。由图13的风速与颗粒物浓度的局部图可见,颗粒物浓度与风速相关,具体表现为风速较大处也是颗粒物浓度较低的地方(风速图中颜色较红的地方与颗粒物图中颜色较蓝的相对应,特别是单元门气入口口处,如图中红框所示)。PM_{2.5}、PM₁₀和TSP有着共同的趋势,食槽处的颗粒物浓度最高,其他地方受气流风速影响,风速越大,颗粒物浓度越小。在各单元气流入口口处往往由于风速较高导致较低的颗粒物浓度,但由于冬季保暖要求,保育舍内大部分区域风速较小,因此颗粒物浓度区分不大,分布较均匀,其中,PM_{2.5}由于粒径较小,质量较小,受气流影响最大。另外,保育猪的活动区域密集处要比猪舍墙体附近的颗粒物浓度高,这同样是因为保育猪的运动引起扬尘。据欧美相关研究表明,机械通风的保育猪舍内的PM_{2.5}质量浓度在0.08~0.4 mg/m³之间,PM₁₀质量浓度在0.316~2.6 mg/m³,而TSP质量浓度可达到4.2 mg/m³,尤其是在保育猪进行采食的时段颗粒物浓度最高。本

次研究猪舍内的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与 TSP 浓度与国外都有高度可比性,说明本文所模拟的保育猪舍内颗粒物浓度有实际参考价值^[23-25]。由规模猪场环境参数及

环境管理^[20]可知,颗粒物浓度建议小于 1.2 mg/m^3 ,该保育猪舍内 TSP 浓度大约为 0.8 mg/m^3 ,基本满足保育猪生长条件。

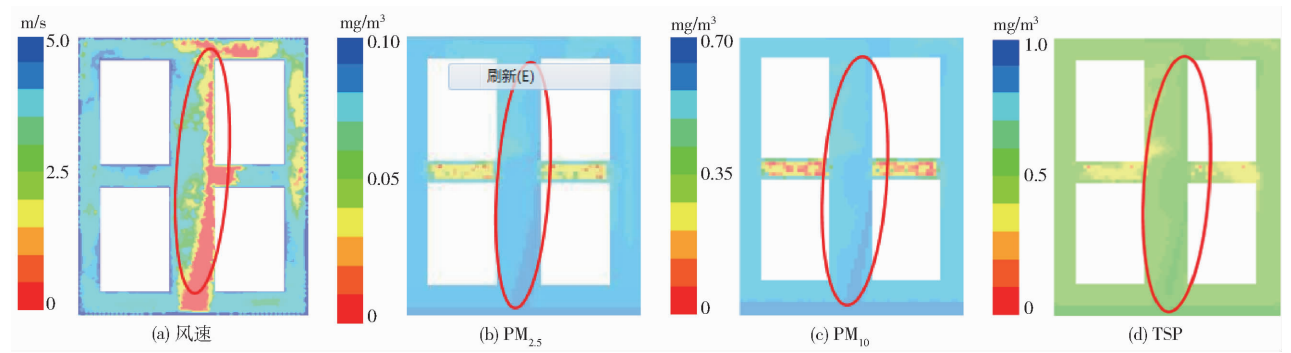


图 13 第一单元间局部风速与颗粒物质量浓度图
Fig. 13 Local contours of velocity and PM in the first unit

4 结论

(1)CFD 模拟与实测的颗粒物浓度比较接近,相对误差及 NMSE 值在可接受的范围,因此采用该 CFD 模型来模拟保育猪舍内湿热环境以及颗粒物浓度是可行的。

(2)猪舍内颗粒物浓度与热湿环境参数相关,风速越大,温度越低,颗粒物浓度越低。

(3)该猪舍在冬季空间结构较为密闭、通风量低,猪舍内气流流速、温度基本保证冬季保育猪的需求,但从颗粒物分布来看,在保育猪活动频繁区域内的浓度较高。

参 考 文 献

1 HEBER A J, STROIK M, NELSEN J L, et al. Influence of environmental-factors on concentrations and inorganic content of aerial dust in swine finishing [J]. Transactions of the ASAE, 1988,31(3):875-881.

2 汪开英,代小蓉. 畜禽场空气污染对人畜健康的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2008(10):32-35.

3 王爱国. 现代实用养猪技术[M]. 北京:中国农业出版社, 2009.

4 ILIAS K, COLIN T W. 实用猪生产学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2014.

5 何晴,董红敏,陶秀萍,等. 畜禽舍粉尘及控制技术[J]. 农业工程学报, 1999,15(增刊):101-105.

HE Qing, DONG Hongming, TAO Xiuping, et al. Dust and its control in livestock buildings[J]. Transactions of the CSAE,1999, 15(Supp.):101-105. (in Chinese)

6 ZHAO Y, AARNINK A J A, DE JONG MART C M, et al. Airborne microorganisms from livestock production systems and their relation to dust[J]. Critical reviews in Environmental Science and Technology, 2014,44(10):1071-1128.

7 CUSACK M, PEREZ N, PEY J, et al. Source apportionment of fine PM and sub-micron particle number concentrations at a regional background site in the western Mediterranean: a 2.5 year study[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013,13(10): 5173-5187.

8 HUANG Q, MCCONNELL L L, RAZOTE E, et al. Utilizing single particle Raman microscopy as a non-destructive method to identify sources of PM10 from cattle feedlot operations[J]. Atmospheric Environment, 2013,66(Supp.):17-24.

9 QUINN A D, WILSON M, REYNOLDS A M, et al. Modelling the dispersion of aerial pollutants from agricultural buildings-an evaluation of computational fluid dynamics (CFD)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001,30(1-3):219-235.

10 PREDICALA B Z, MAGHIRANG R G. Numerical simulation of particulate matter emissions from mechanically ventilated swine barns[J]. Transactions of the ASAE, 2003,46(6):1685-1694.

11 SEO I, LEE I, HONG S, et al. Web-based forecasting system for the airborne spread of livestock infectious disease using computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2015,129:169-184.

12 TONG G, ZHANG G, MORSING S, et al. Airflow simulation in a scale model of the swine building[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007,38(3):379-382.

13 陈文娟,董润坚,周海柱,等. 北方民用猪舍自然通风的数值模拟[J]. 安徽农业科学, 2010(13):6673-6676.

CHEN Wenjuan, DONG Runjian, ZHOU Haizhu, et al. Numerical simulation of natural ventilation in northern civil pig houses [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010(13):6673-6676. (in Chinese)

14 王校帅. 基于 CFD 的畜禽舍热环境模拟及优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.

WANG Xiaoshuai. Study on the indoor thermal environmental simulation and optimal design of livestock building based on CFD [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)

15 WANG K, WANG X, WU B. Assessment of hygrothermal conditions in a farrowing room with a wet-pad cooling system based on

- cfD simulation and field measurements[J]. Transactions of the ASABE, 2014,57(5):1493–1500.
- 16 CAMBRA-LOPEZ M, AARNINK A J A, ZHAO Y, et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: a review of an air pollution problem[J]. Environmental Pollution, 2010,158(1):1–17.
- 17 HEBER A J, STROIK M, NELSEN J L, et al. Influence of environmental-factors on concentrations and inorganic content of aerial dust in swine finishing buildings[J]. Transactions of the ASAE, 1988,31(3):875–881.
- 18 张师帅. CFD 技术原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.
- 19 NORTON T, SUN D, GRANT J, et al. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review[J]. Bioresource Technology, 2007,98(12):2386–2414.
- 20 GB/T 17824.3—2008 规模猪场环境参数及环境管理[S]. 2008.
- 21 SARAZ J A O, VELASQUEZ H J C, BEDOYA A E. Thermal evaluation and validation of a computational model to unrefined sugar (panela) burner GP150[J]. Dyna, 2010,77(162):237–247.
- 22 AARNINK A J A, STOCKHOFE-ZURWIEDEN N, WAGEMANS M J M. Dust in different housing systems for growing-finishing pigs[C]//Engineering the Future, AgEng Conference,2004.
- 23 VIEGAS S, MATEUS V, ALMEIDA-SILVA M, et al. Occupational exposure to particulate matter and respiratory symptoms in portuguese swine barn workers[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health-part a-current Issues, 2013,76(17):1007–1014.
- 24 VAN RANSBEECK N, VAN LANGENHOUE H, VAN WEYENBERG S, et al. Typical indoor concentrations and emission rates of particulate matter at building level: a case study to setup a measuring strategy for pig fattening facilities[J]. Biosystems Engineering, 2012,111(3):280–289.
- 25 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.
-

(上接第 294 页)

- 21 周大庆,米紫昊,茅媛婷. 基于欧拉固液两相流模型的泵站进水侧流场三维模拟[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(1):48–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130110&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.010.
- ZHOU Daqing, MI Zihao, MAO Yuanting. 3-D numerical simulation of inlet structure flow in pumping station based on Eulerian solid liquid two-phase flow model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):48–52. (in Chinese)
- 22 喻黎明,邹小艳,谭弘,等. 基于 CFD–DEM 耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2016,46(1):126–132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160117&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.017.
- YU Liming, ZOU Xiaoyan, TAN Hong, et al. 3D numerical simulation of water and sediment flow in hydro-cyclone based on coupled CFD–DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 46(1):126–132. (in Chinese)
- 23 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(2):1–11. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160201&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.001.
- WANG Fjun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):1–11. (in Chinese)
- 24 李骅,张美娜,尹文庆,等. 基于 CFD 的风筛式清选装置气流场优化[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):12–16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s203&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.003.
- LI Hua, ZHANG Meina, YIN Wenqing, et al. Optimization of airflow field on air and screen cleaning device based on CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.2):12–16. (in Chinese)
- 25 陈晋南. 传递过程原理[M]. 北京: 化学工业出版社,2004.
- 26 ANDOH R Y G, SAUL A J. The use of hydrodynamic vortex separators and screening systems to improve water quality[J]. Water Science and Technology, 2003, 47(4):175–183.