

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-897-06

# 应用于温室大棚的空气源热泵优化研究

施淳予 狄育慧 蒋 婧 郑现昱

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048)

**【摘要】** 利用绿色节能技术营造适合农作物的良好生长环境是响应国家提出的“双碳”目标的重要行动。在种植阳光玫瑰葡萄的温室大棚中采用空气源热泵-风机盘管系统进行研究,通过实测及CFD模拟技术对比不同的风机盘管风口布置位置,研究温室大棚内部的温度场。研究表明不同的风机盘管风口位置,对阳光玫瑰葡萄的生长有较大影响,合理的风机盘管风口布置能够高效地发挥空气源热泵的作用,在防护冻害的前提下有效实现节能减排。

**【关键词】** 大棚; 空气源热泵; 计算流体力学; 温度场

中图分类号 S625.4 文献标识码 A

## Research on Optimization of Air Source Heat Pump Applied in Greenhouse

Shi Chunyu Di Yuhui Jiang Jing Zheng Xianyu

(College of city planning and municipal engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** The use of green energy-saving technology to create a good growing environment for crops is an important action to respond to the "two-carbon" goal proposed by the state. In this paper, the air source heat pump-fan coil system is used in the greenhouse for planting Sunny Rose grapes. Through the actual measurement and CFD simulation technology, the different layout positions of the fan coil air outlet are compared, and the temperature field inside the greenhouse is studied. Studies have shown that different fan coil tuyere positions have a greater impact on the growth of Sunshine Rose grapes. Reasonable fan coil tuyere layout can effectively play the role of air source heat pump, and effectively achieve energy saving and emission reduction under the premise of preventing frost damage.

**【Keywords】** greenhouse; air source heat pump; computational fluid dynamics; temperature field

## 0 引言

在我国提出的“双碳”背景下,农业中温室气体的排放不可忽略。我国设施农业碳排放总量为21038.17万tCO<sub>2</sub>,塑料大棚、日光温室、连栋温室3种类型设施农业碳排放量分别占60.2%、37.4%和2.4%<sup>[1]</sup>。现代温室大棚逐渐转向清洁能源供能,文献[2,3]提出了将太阳能、地热能、空气能等可再生能源的单一或复合能源系统应用于温室大棚中。其中空气源热泵具有较大的温度适用范围和突出

的节能效果,由于温室大棚内部空间有限,空气源热泵一般通过风机盘管进行送风<sup>[4]</sup>。因此空气源热泵-风机盘管系统在温室大棚上的应用受到了广大学者的关注。

蔬菜水果的生长过程当中,最重要的问题就是如何保证温室大棚内的环境参数。目前,计算流体力学(CFD)技术相对成熟,已有较多学者利用CFD技术对温室大棚内部环境进行模拟分析。文献[5]介绍了CFD技术在温室微环境模拟中的发展

基金项目:西安工程大学(柯桥)研究生学院产学研协同创新重点项目(19KQZD05);

西安工程大学博士科研启动基金(107020419)

作者简介:施淳予(1998-),男,在读研究生,E-mail:17513941@qq.com

通讯作者:狄育慧(1964-),女,博士,教授,E-mail:70836165@qq.com

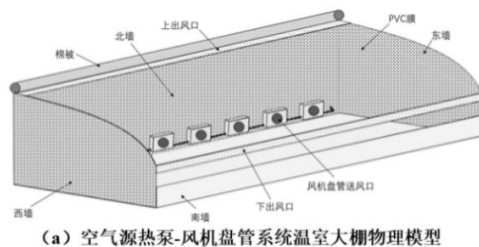
收稿日期:2022-04-19

现状、面临的挑战以及未来的应用前景；文献[6]通过与实测数据的对比从而验证了数值模拟温室通风前后的温度以及湿度的准确性；文献[7,8]模拟在自然通风条件下温室大棚内空气温度和相对湿度的分布情况；文献[9-11]模拟在自然通风、不同通风情况以及改变通风形式等条件下，温室大棚内部空气流速场、流动模式和热量对换情况；文献[12,13]模拟研究太阳辐射对日光温室内温度分布的影响和模拟研究光伏组件布置方式对棚内空气层、土壤层的影响；文献[14,15]模拟研究暖风扇、土壤-空气换热器等供暖设备对温室大棚内部环境的改善情况，分析得出将暖风扇置于离地 0.7m 处的为最佳方案，换热器在距地面 0.5~2.5m 处，对棚内空气温湿度处理有良好的效果。由于每个农作物高度不同、适宜的温度范围不同，农户对于温室大棚的具体空气源热泵-风机盘管系统的风口布置位置缺乏合理性，因此本次试验以葡萄科作物为研究主体，研究具体的风口布置位置需要合理的优化方案。

针对以上背景，在种植阳光玫瑰葡萄的温室大棚中采用空气源热泵-风机盘管系统进行供暖，通过 CFD 模拟技术对比不同的风机盘管风口布置位置，研究温室大棚的内部温度场，提出合理的风口布置方案，为其提供合适的生长条件，对设施农业的发展具有促进意义。

## 1 温室大棚模型构建

### 1.1 物理模型



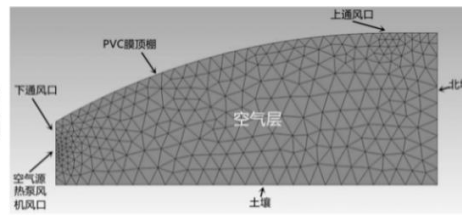
(a) 空气源热泵-风机盘管系统温室大棚物理模型

该温室大棚位于陕西省华阴市槐芽村，东西走向，长度为 140m，跨度为 12m，前墙高 2m，后墙高 4.8m。该大棚的通风口分别位于棚顶的上风口和前墙的下风口，开口尺寸宽度根据天气条件而变化，日间晴天、日间阴天、日间雨雪天开口宽度分别为 0.6m、0.4m、0.5m；夜间晴天、夜间阴天、夜间雨雪天开口宽度分别为 0.7m、0.5m、0.4m，下风口距地面 1m<sup>[6]</sup>，上风口开在后半部分靠近北墙附近<sup>[17]</sup>，其中雨雪天和夜间只开下风口，并且夜间温室大棚顶部加盖棉被，具体物理模型如图 1(a) 所示。

该地属于暖温带大陆性季风气候，年均气温为 13.7℃，最冷月为 1 月，其最高气温为 11℃，最低气温为 -5℃。温室大棚内常年种植阳光玫瑰葡萄，本次以冬季进行模拟，其间种植物处于萌芽期，白天温度保持在 20~25℃左右，夜间控制在 15℃左右，阳光玫瑰葡萄在萌芽期高度在距土壤 1.3~1.7m 左右<sup>[18]</sup>。

### 1.2 网格划分

温室大棚内部空气作为三维计算流体域，使用补丁适形法生成四面体网格进行离散。全局网格最大尺寸为 0.5m，对温室大棚棚顶、上下出风口和空气源热泵送风口进行网格加密，温室大棚棚顶网格尺寸为 0.4m，上下出风口和送风口网格尺寸为 0.25m。对划分后的网格进行质量检查，网格的平均质量为 0.84，网格质量在 0.9 以上的网格占比为 27.6%，其余网格质量均在 0.4~0.8 之间，不存在负网格情况，网格质量较好，具体如图 1(b) 所示。



(b) 温室大棚网格划分情况

图 1 温室大棚物理模型及网格划分情况

Fig.1 Physical model and grid division of greenhouse

### 1.3 控制方程

温室大棚仿真模型采用有限体积法 FVM 进行求解，其基本原理是以流体连续性、动量和能量三大守恒方程作为基本控制方程，设定一系列计算模型以构成最终的仿真控制微分方程<sup>[19]</sup>。

连续性方程为：

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

式中： $\rho$  为流体密度，kg/m<sup>3</sup>； $t$  为时间，s； $v$  为流体速度矢量，m/s； $S_m$  为用户自定义源项。

动量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla(\rho VV) = -\nabla P + (\bar{\tau}_{eff}) + F \quad (2)$$

式中:  $P$  为压强, Pa;  $\bar{\tau}$  为应力张量。

能量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(V(\rho E + P)) = \nabla(K_{eff}\nabla T - \sum_j h_j J_j + \bar{\tau}_{eff}v) + S_h \quad (3)$$

式中:  $E$  为流体能量, J;  $K_{eff}$  为有效热传导率, W/(m·K);  $T$  为温度, K;  $h_j$  为理想气体显焓, J/kg;  $J_j$  为组分扩散通量, kg/(m<sup>2</sup>·s);  $\bar{\tau}_{eff}$  为有效粘度剪切;  $S_h$  为用户自定义体积热源项。

## 2 边界条件和求解模型的确定

### 2.1 材料物理性质参数

对于空气的参数设置, 本文利用 Boussinesq 假设, 在冬季温室大棚内部光照分布有差异, 导致内部的温度存在差异, 温差会引起室内的浮升力项, 同时也会导致室内的气流组织和诸多参数发生变化, 利用 Boussinesq 假设可使问题的解决简单化<sup>[20,21]</sup>。

大棚前墙和顶棚材质为塑料膜, 墙面材质为普通砖, 本文假设材料为各向同性材料, 并且各材料的物理参数选取如表 1 所示。

表 1 材料热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of materials

材料	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热容 (J/kg·K)	导热系数 (W/m·K)	太阳辐射穿透率	太阳辐射吸收率
空气	1.24	1007	0.0251	—	—
砖墙	1400	1010	0.58	0	0.6
土壤	1900	2120	2.00	0	0.9
PVC 膜	1380	1465	0.14	0.4	0.1
棉被	120	2100	0.048	0	0.5

### 2.2 边界条件

空气源热泵-风机盘管系统温室大棚涉及的换热方式为热传导、热对流和热辐射。本文选用所有的边界条件均为壁面 wall 形式, 大棚的前墙和顶棚的换热方式为辐射换热和对流换热为主; 大棚砖墙的换热方式为对流换热为主; 大棚内部的土壤层的换热为内部空气的对流换热和太阳辐射换热。

温室大棚的入口设置为速度入口, 额定风速为 4.5m/s, 日间额定温度为 338.15K, 夜间额定温度

为 310.15K; 出口设置为压力出口, 回流总温度为室外温度。

其中天空辐射温度  $T_{sky}$  和室外空气温度  $T_0$  的关系以及室外对流换热系数可表示为<sup>[22]</sup>:

$$T_{sky} = 0.0552T_0^{1.5} \quad (4)$$

室外对流换热系数为:

$$h = 7.2 + 3.48v_0 \quad (5)$$

现选择冬季日间晴天进行模拟分析, 此时室外平均温度为 9℃, 边界条件的参数设置如表 2 所示。

表 2 边界条件参数

Table 2 Boundary condition parameters

边界面	边界类型	厚度 (m)	辐射发射率	对流换热系数 (W/m <sup>2</sup> ·K)	外部温度 (K)	材料类型
PVC 膜	Wall	0.001	0.8	21.12	282.15	半透明
北墙	Wall	4	0.8	21.12	282.15	不透明
东墙	Wall	2	0.8	21.12	282.15	不透明
西墙	Wall	2	0.8	21.12	282.15	不透明
土壤	Wall	1	0.8	21.12	282.15	不透明

### 2.3 数值方法

本文选择 1 月的晴天、阴天以及雨雪天的不同天气情况下的不同风口布置位置进行温度场模拟, 对棚外温度采用平均温度, 棚内空气源热泵设备风口出风温度采用额定温度, 因此仿真采用 CFD 稳

态模型。

本文的湍流模型采用 RNG  $K - \epsilon$  模型的非平衡壁面函数法<sup>[23]</sup>; 太阳辐射模型采用 DO 辐射模型, 并在模型中选择 Solar Ray Tracing 模型<sup>[24]</sup>, 设置地理信息为华阴市华山镇地理参数: 经度

110.09°，纬度 34.58°，时区为东八区；求解方法选用 SIMPLEX 进行计算<sup>[25]</sup>。

### 2.4 实测数据验证

利用现场温室大棚，采用内部无热源的方案，在冬季对大棚中心位置进行实测，分别以距北墙 1m 为单位共 12 组测点组成。以 2021 年 12 月 12 日为例，图 2 为测点布点和 12 月 12 日实测数据与模拟数据对比情况。

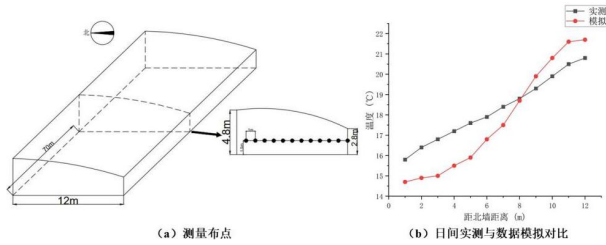


图 2 测量布点图及实测数据与模拟数据对比图

Fig.2 Survey point layout and comparison between measured data and simulated data

实测数据与模拟数据对比后，证明温度场分布情况与本模型模拟情况结果保持一致，室内温度最高温度出现在温室南侧靠近 PVC 膜的位置，最低温度出现在温室东西墙和北墙交界处附近。综合分析，温度场模型的模拟值和实测数据误差在 2℃ 以内，满足精度需求。

### 3 模拟结果及分析

本文按空气源热泵风口布置高度分别位于后墙侧和前墙侧进行模拟，其中北墙侧取距地面 0.5m、1m、1.5m、2m、2.5m、3m、3.5m、4m、4.5m；南墙侧取距地面 0.5m、1m、1.5m 一共 12 组分别建立仿真模型，模拟晴天、阴天和雨雪天三种典型气象条件的日间和夜间的温度场变化。在考虑作物温度条件的基础上，比选布置方案。

由于阳光玫瑰葡萄在萌芽期高度在距土壤 1.3~1.7m 左右，故本文选取大棚距土壤层 1.0m、1.1m、1.2m、1.3m、1.4m、1.5m、1.6m、1.7m、1.8m、1.9m、2.0m 共 11 组不同高度平面的温度平均值作为参考值，进行对比分析不同空气源热泵风口布置方案的差异。

#### 3.1 晴天棚内温度场变化和分析

晴天日间和夜间温室大棚 1.0m~2.0m 高度间的空气温度随风机盘管风口布置高度的变化如图 3 所示。选取温室大棚侧截面进行温度场分析，温度

分布云图如图 4 所示。

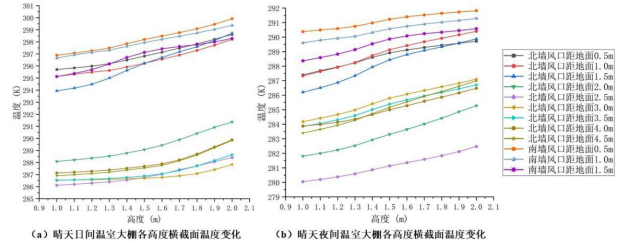
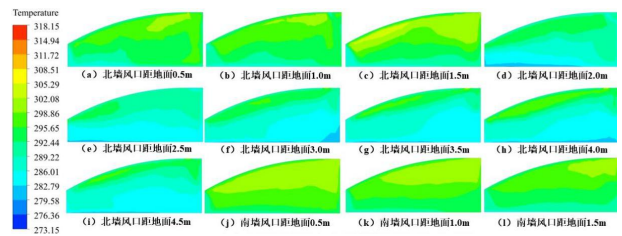
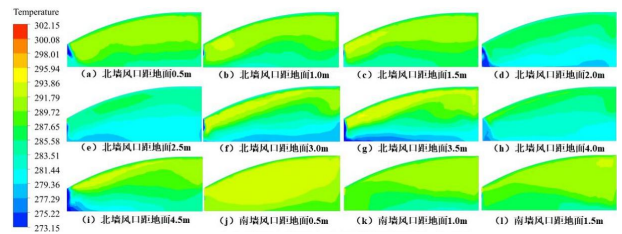


图 3 晴天温室大棚各高度横截面温度变化

Fig.3 Temperature change of cross section at each height of greenhouse in sunny days



(a) 晴天日间温室大棚侧截面温度分布图



(b) 晴天夜间温室大棚侧截面温度分布图

图 4 晴天温室大棚侧截面温度分布云图

Fig.4 Cloud diagram of temperature distribution on the side section of greenhouse in sunny days

由图 3 和图 4 可知，风机盘管安装于北墙和南墙距地面 0.5m、1m、1.5m 是最佳安装位置。晴天日间最佳安装位置处的温室大棚平均温度为 23.9℃，其余位置处的温室大棚平均温度为 14.4℃，随着高度的增加温室大棚平均温度下降 7.0~11.4℃，设备安装于南墙的温室大棚平均温度高 1.3℃；晴天夜间最佳安装位置处的温室大棚平均温度为 16.5℃，其余位置处的温室大棚平均温度为 11.0℃，随着高度的增加温室大棚平均温度下降 2.6~10.7℃，设备安装于南墙的温室大棚平均温度高 1.8℃。

#### 3.2 阴天棚内温度场变化和分析

阴天日间和夜间温室大棚 1.0m~2.0m 高度间的空气温度随风机盘管风口布置高度的变化如图 5 所示。选取温室大棚侧截面进行温度场分析，温度

分布云图如图 6 所示。

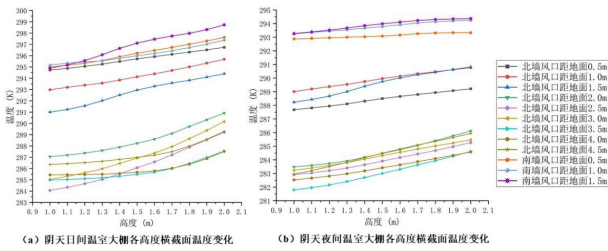
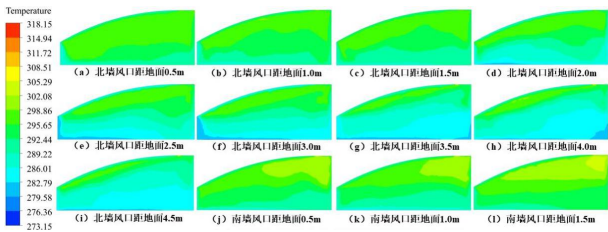
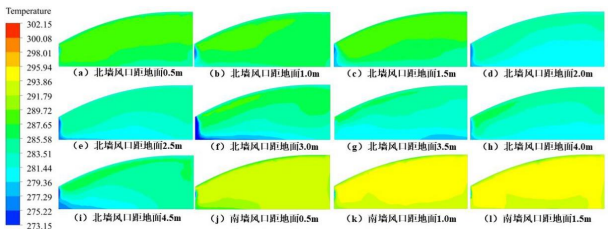


图 5 阴天温室大棚各高度横截面温度变化

Fig.5 temperature change of cross section at each height of greenhouse in cloudy days



(a) 阴天日间温室大棚侧截面温度分布图



(b) 阴天夜间温室大棚侧截面温度分布图

图 6 阴天温室大棚侧截面温度分布云图

Fig.6 cloud diagram of temperature distribution on the side section of greenhouse in cloudy days

由图 5 和图 6 可知, 风机盘管安装于北墙和南墙距地面 0.5m、1m、1.5m 是最佳安装位置。阴天日间最佳安装位置处的温室大棚平均温度为 22.2℃, 其余位置处的温室大棚平均温度为 13.4℃, 随着高度的增加温室大棚平均温度下降 4.6~11.5℃, 设备安装于南墙的温室大棚平均温度高 2.2℃; 阴天夜间最佳安装位置处的温室大棚平均温度为 18.3℃, 其余位置处的温室大棚平均温度为 10.8℃, 随着高度的增加温室大棚平均温度下降 4.0~11.0℃, 设备安装于南墙的温室大棚平均温度高 4.3℃。

### 3.3 雨雪天棚内温度场变化和分析

雨雪天日间和夜间温室大棚 1.0m~2.0m 高度间的空气温度随风机盘管风口布置高度的变化如图 7 所示。选取温室大棚侧截面进行温度场分析,

温度分布云图如图 8 所示。

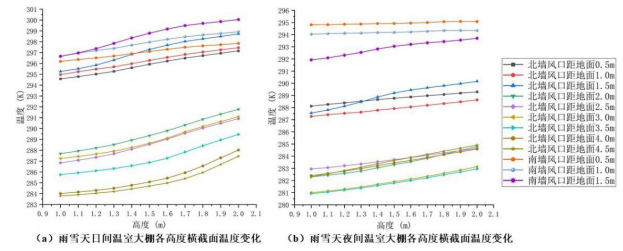
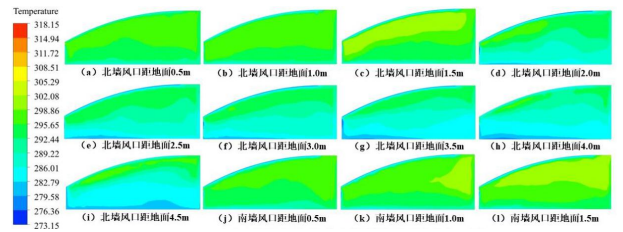
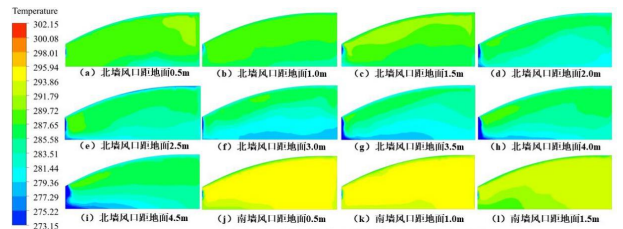


图 7 雨雪天温室大棚各高度横截面温度变化

Fig.7 Temperature change of cross section at each height of greenhouse in rainy and snowy days



(a) 雨雪天日间温室大棚侧截面温度分布图



(b) 雨雪天夜间温室大棚侧截面温度分布图

图 8 雨雪天温室大棚侧截面温度分布云图

Fig.8 Cloud diagram of temperature distribution on the side section of greenhouse in rainy and snowy days

由图 7 和图 8 可知, 风机盘管安装于北墙和南墙距地面 0.5m、1m、1.5m 是最佳安装位置。雨雪天日间最佳安装位置处的温室大棚平均温度为 24.0℃, 其余位置处的温室大棚平均温度为 14.1℃, 随着高度的增加温室大棚平均温度下降 6.5~14.0℃, 设备安装于南墙的温室大棚平均温度高 1.5℃; 阴天夜间最佳安装位置处的温室大棚平均温度为 18.2℃, 其余位置处的温室大棚平均温度为 9.8℃, 随着高度的增加温室大棚平均温度下降 4.2~13.1℃, 设备安装于南墙的温室大棚平均温度高 5.4℃。

## 4 结论

通过 Fluent 软件针对不同天气条件下的空气源热泵-风机盘管系统温室大棚进行模拟得到以下



结论:

(1) 将风机盘管风口安装于北墙和南墙距地面 0.5m、1m、1.5m 均能满足阳光玫瑰葡萄对于温度的要求,且大棚整体温度分布较为均匀。在晴天日间夜间、阴天日间夜间和雨雪天日间夜间中,其安装位置处的温室大棚的平均温度分别为 23.9℃、16.5℃、22.2℃、18.3℃、24.0℃、18.2℃。

(2) 随着风机盘管安装高度的增加,温室大棚逐渐出现温度垂直失调,热空气和冷空气出现明显的分层现象,导致大棚整体温度分布不平衡。在晴天日间夜间、阴天日间夜间和雨雪天日间夜间中,其安装位置处的温室大棚的平均温度分别为 14.4℃、11.0℃、13.4℃、10.8℃、14.1℃、9.8℃。前三组高度与后六组高度相比,日间温室大棚的平均温度降幅在 4.4℃~7.5℃;夜间温室大棚的平均温度降幅在 7℃~8.9℃。

(3) 在同样的供热温度下,将风机盘管安装于南墙位置时大棚整体平均温度最高;由于夜间大棚只开下风口通风,南墙侧安装风机盘管时夜间大棚整体温度高于日间。南墙与北墙安装风机盘管相比,日间温室大棚的平均温度增幅在 1.3℃~2.2℃;夜间温室大棚的平均温度增幅在 1.8℃~5.4℃。故可通过安装于南墙来节约空气源设备能耗,并且夜间可适当降低送风口温度。

#### 参考文献:

- [1] 尹岩,郝凤明,郝飞龙,等.我国设施农业碳排放核算及减排路径[J].应用生态学报,2021,32(11):3856-3864.
- [2] 许其杨,和西容,张顺彩.清洁供暖系统在农业大棚中的应用[J].农村牧区机械化,2019,(1):39-40.
- [3] 鲁敏,岑红蕾,郭天圣.温室大棚复合供能优化配置研究[J].农机化研究,2014,36(3):66-69.
- [4] 李丹,胡文举,李德英.北京地区空气源热泵用于果蔬大棚的分析与研究[J].天津农业科学,2017,23(9):74-77.
- [5] 胡建.CFD 数值模拟技术在温室环境因子调控中的应用[J].农业工程,2020,10(7):43-48.
- [6] 王向军,刘志刚,李荣,等.基于 CFD 数值模拟方法的日光温室建模研究[J].农机化研究,2014,36(6):184-188.
- [7] 孙鑫.大跨度塑料大棚热环境及有限元模拟分析[D].泰安:山东农业大学,2020.
- [8] 薛晓萍,宿文.基于 CFD 的自然通风对日光温室湿度分布模拟分析[J].海洋气象学报,2019,39(4):90-96.
- [9] 孙萌,呼云龙,梁春英,等.基于 CFD 的水稻育秧大棚环境数值模拟研究[J].农机化研究,2016,38(1):28-32.
- [10] 沈明卫,郝飞麟.两种风向下单栋塑料大棚内自然通风流场模拟[J].农业工程学报,2004,(6):227-232.
- [11] 陈加浪,陈大跃,何科爽,等.单栋塑料大棚在高温低风速下的自然通风数值研究[J].农机化研究,2011,33(8):19-22.
- [12] 佟国红,李保明,David M Christopher,等.用 CFD 方法模拟日光温室温度环境初探[J].农业工程学报,2007,23(7):178-185.
- [13] 成珂,马晓瑶,孙琦琦.光伏温室大棚组件布置 CFD 模拟研究[J].太阳能学报,2021,42(8):159-165.
- [14] 贾鹤鸣,韩骏骋,张森,等.基于 CFD 的玻璃温室环境数值模拟及优化分析[J].应用科技,2019,46(5):28-33.
- [15] 王志斌,杜震宇.日光温室中土壤-空气换热器作用下的热湿环境[J].科学技术与工程,2018,18(23):297-303.
- [16] 赵融盛,蔡泽林,杨志,等.侧通风口高度对塑料温室气流及温湿度的影响[J].中国农业大学学报,2021,26(3):105-114.
- [17] 柏宗春,夏礼如,吕晓兰,等.基于 CFD 仿真自然通风大棚窗口的设置[J].江苏农业科学,2016,44(12):379-382.
- [18] 吕中伟,吴文莹,娄玉穗,等.阳光玫瑰葡萄温棚栽培关键技术[J].中国南方果树,2021,50(3):167-169.
- [19] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [20] 曾臻,李晓锋,李丞.针对双层皮玻璃幕墙自然通风的 CFD 模拟计算方法的研究[J].太阳能学报,2013,34(12):2095-2100.
- [21] 李永博,周伟,李鹏飞,等.基于 CFD 模拟模型的温室温度场均匀性控制[J].农业机械学报,2012,43(4):156-161.
- [22] 朱文见.冬季供暖条件下连栋温室夜间热环境的 CFD 模拟[D].北京:中国农业大学,2005.
- [23] 杨振超.日光温室内最佳风速指标与 CFD 模拟[D].咸阳:西北农林科技大学,2006.
- [24] 严寒,张鸿雁.不同辐射模型在太阳辐射数值模拟中的比较[J].节能技术,2015,33(5):428-431,452.
- [25] 范奥华.冬季日光温室温度场 CFD 模拟与均温调控系统研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2018.