

基于 CFD 的不同通风方式塑料大棚降温效果研究

王传清¹ 倪秀男¹ 魏 珉^{1,2} 李清明^{1,2} 王少杰³ 曹 欣⁴

(1. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 泰安 271018; 3. 山东农业大学水利与土木工程学院, 泰安 271018; 4. 济南莱芜安信农业科技有限公司, 济南 271100)

摘要: 为确定合理的塑料大棚通风口配置及通风形式,提高大棚夏季降温效果,采用试验和 CFD 模拟相结合的方法,对两种通风口配置(两侧底部、两侧底部+顶部)和两种通风口形状(水平卷膜、垂直卷膜)大棚内的夏季 6—7 月温度和气流场特征进行了研究。模型经过实试验证,气温模拟值与实测值变化趋势基本吻合,均方根误差 1.27℃、平均相对误差分别为 3.7%。结果表明:与仅有两侧底部通风相比,两侧底部和顶部通风配置明显提高降温效果,番茄冠层高度昼均温、升温速率分别降低 0.4~2.1℃和 0.4℃/h,通风率增加 50%,温度、气流分布均匀度提高;与顶部水平卷膜通风相比,垂直卷膜通风大棚内冠层昼均温、升温速率分别降低 0.2~1.2℃和 0.2℃/h,通风率提高 20%,但温度、气流的空间分布均匀性稍差。综合比较,同时采用两侧底部加顶部垂直卷膜通风的大棚通风降温效果明显。

关键词: 塑料大棚; 通风方式; 温度场; 气流场; 计算流体力学

中图分类号: S625.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0351-06 **OSID:** 

Cooling Effect of Plastic Greenhouse with Different Ventilation Modes Based on CFD

WANG Chuanqing¹ NI Xiunan¹ WEI Min^{1,2} LI Qingming^{1,2} WANG Shaojie³ CAO Xin⁴

(1. College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
4. Ji'nan Laiwu Anxin Agricultural Technology Co., Ltd., Ji'nan 271100, China)

Abstract: Based on the reasonable configuration and ventilation form of plastic greenhouse, so as to achieve effective cooling in summer, by way of actual observation and CFD model, the typical temperature field and air flow field of side opening greenhouse, roof plus side opening greenhouse, horizontal roll-up greenhouse and of vertical roll-up greenhouse during June and July were studied. The model was verified by actual measurement, and the simulated values were basically consistent with the measured value, with root mean square error (RMSE) of 1.27℃ and mean relative error (MRE) of 3.7%, respectively. According to the study, compared with side openings alone, roof plus side openings improved the cooling effect significantly, decreased the daily average temperature and heating rate of tomato canopy height by 0.4~2.1℃ and 0.4℃/h, respectively, increased the ventilation rate by 50%, and enhanced the temperature and air distribution uniformity. Compared with top horizontal roll-up shape, vertical roll-up shape improved the cooling effect significantly, decreased the daily average temperature and heating rate of tomato canopy height by 0.2~1.2℃ and 0.2℃/h, respectively, increased the ventilation rate by 20%, but slightly reduced the temperature and air distribution uniformity. Comprehensive comparison showed that the plastic greenhouse with side opening and top vertical film rolling ventilation worked well in ventilation and cooling.

Key words: plastic greenhouse; ventilation mode; temperature field; flow field; CFD

收稿日期: 2022-03-11 修回日期: 2022-06-15

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-23)

作者简介: 王传清(1995—),男,博士生,主要从事设施结构与环境研究,E-mail: 1601830598@qq.com

通信作者: 魏珉(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事设施蔬菜与无土栽培研究,E-mail: minwei@sdau.edu.cn

0 引言

塑料大棚是我国现阶段园艺作物保护生产的主要设施类型之一,约占设施总面积的45%^[1]。传统塑料大棚主要通过两侧自然通风,降温排湿效果差,棚内温度和湿度过高导致作物产量和品质下降^[2-3]。

大棚通风效果受通风口配置和形状、外部风速风向、种植作物等多个因素影响,其中通风口配置和形状是重要因素^[4-6]。塑料大棚通常有3种通风配置:侧面通风、顶部通风、侧面和顶部组合通风^[7]。合理确定通风口配置和形状,对于精准调控大棚内环境参数,促进作物生长和提高产量具有重要意义。

随着计算流体力学(CFD)理论不断完善,CFD模拟技术在设施环境研究中的应用越来越普遍^[8-10]。已有研究主要集中通风口布局、风速风

向、作物种植等对室内自然通风效果和气流场的影响,而对通风口配置和形状等棚体结构优化的研究较少^[11-14]。本文通过实地观测和CFD模拟,研究不同通风口配置和通风口形状对塑料大棚内温度的调节效应,旨在为大棚结构和性能优化提供依据。

1 试验大棚与测试方法

1.1 试验大棚

试验大棚位于山东省济南市莱芜区,南北走向,单栋拱圆形,长度46 m,跨度8 m,覆盖厚度0.1 mm聚乙烯塑料薄膜。不同通风口配置(两侧底部、两侧底部+顶部)大棚脊高3 m、不同通风口形状(水平卷膜、垂直卷膜)大棚脊高3.4 m(图1)。两侧通风口离地高度0.4 m,最大开启尺寸1 m;顶部水平通风口最大开启尺寸1.2 m,垂直通风口最大开启尺寸0.7 m。

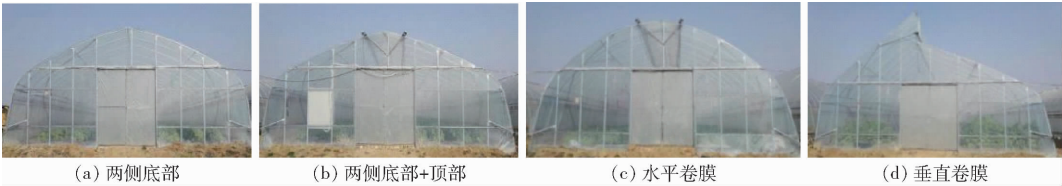


图1 不同通风口配置及通风口形状塑料大棚

Fig.1 Plastic greenhouse with different ventilation configurations and shapes

1.2 测试方法

观测日期2018年6月8日至7月10日,棚内种植作物为番茄。昼间气温超过20℃时开启顶通风口,超过24℃时开启侧通风口。为便于比较,通风口开度保持一致。

室外测点:试验大棚的北侧30 m、距地面3 m高度处安装风速风向测试仪,距地面1.8 m高度处安装温湿度记录仪和太阳辐射仪。室内测点:大棚中部剖

面处设有气温、地温观测点,具体布置如图2所示,其中T1~T13表示验证棚棚内测点,其他棚内测点布置方式同验证棚。大棚内外温湿度测定采用U23-001型温湿度记录仪(美国HOBO公司);地温和风速风向测定采用L92-1型温度记录仪和L99-FSFX型风速风向记录仪(杭州陆格公司);太阳辐射数据测定采用JTR05型太阳辐射仪(北京世纪建通公司),所有测点均每隔10 min自动采集一次数据。

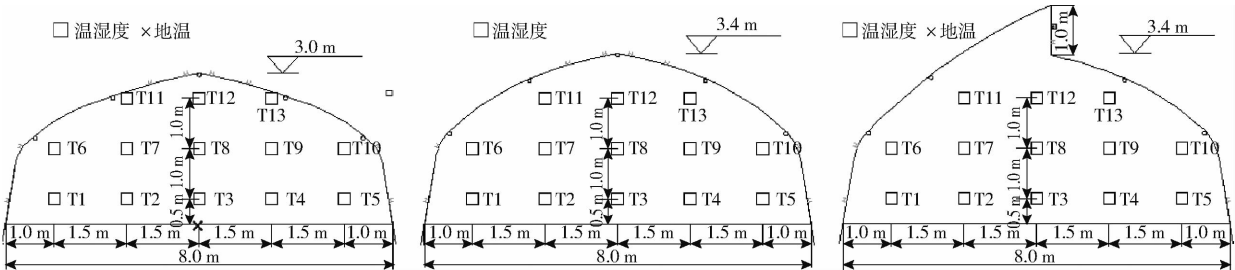


图2 塑料大棚内温度测点分布

Fig.2 Measuring points distribution inside plastic greenhouse

2 数值建模

2.1 数值模型

本研究将大棚内的空气定义为湍流状态下的有粘性的、不可压缩的理想气体,气体流动用质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程来描述,计算时采用标准k-ε求解,控制方程包括连续性方程、动

量方程、能量方程、k(湍动能方程)和ε(耗散率)方程,这些方程可由通用方程^[15]表示为

∂(ρφ)/∂t + div(ρφv) = div(Γφ gradφ) + Sφ (1)

式中 φ——通用变量
ρ——密度,kg/m³
v——速度矢量,m/s

Γ_{φ} ——广义扩散系数
 S_{φ} ——源项

番茄影响棚内气体的流动,将番茄设置为多孔介质,按实际株行距将番茄简化为 5 个宽 0.6 m、高 0.9 m 的长方形(图 3)。利用 Darcy – Forchheimer 定律将其作为方程(1)的源项加入到动量守恒方程中,即

$$S_{\varphi} = - \left(\frac{\mu}{K_p} u + \frac{C_F}{\sqrt{K_p}} \rho u^2 \right) \tag{2}$$

式中 K_p ——多孔介质渗透率, m^2
 C_F ——非线性动量损失因子
 μ ——空气动力粘度, $kg/(m \cdot s)$
 u ——空气流速, m/s

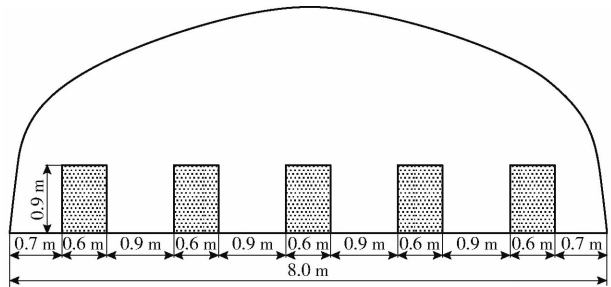


图 3 塑料大棚内番茄模拟示意图

Fig. 3 Simulation diagram of tomato in plastic greenhouse

本文中 $K_p = 0.395 m^2$, $C_F = 0.4$ 。大棚内流场受辐射传热影响较大,本研究选取 DO 辐射模型的 Solar ray tracing 方法将棚膜设为半透明介质进行计算。

2.2 网格划分及边界条件

选取两侧底部通风大棚中部的剖面建立二维模型,计算域包括大棚外部流体计算域和内部流体计算域,选取外部流体计算域 53 m × 20 m,满足进风向长度、出风向长度、高度至少为大棚脊高的 3、7、5 倍的要求^[16]。计算域采用结构化、非均匀网格划分,大棚通风口进行网格加密处理,近壁面区域采用标准壁面函数法进行计算,最大网格尺寸 200 mm,网格划分总数为 5.03×10^5 。划分网格后,检查网格问题与质量,计算结果显示平均网格质量、最小角度和长宽比分别为 0.73、30.1°、1.15,符合计算要求。

大棚初始环境均由实际试验数据确定,具体边界条件参数见表 1,当棚外自然风速较低时,棚内气流流动以热压作用引起的自然对流为主,为便于处理由温差引起的浮升力项,采用 Boussinesq 假设^[17]。对于大棚外部流体计算域,将迎风面设置为速度入口,背风面设置为压力出口,顶面设置为非滑移半透明壁面加载太阳辐射(太阳辐射为 $803 W/m^2$),大棚的围护结构和地面均设为壁面,通风口设置为内部边界条件,将番茄、大棚和外部流体

计算域设为 3 个 Fluid 流体域。具体材料属性相关参数如表 2 所示。

表 1 边界条件及参数
Tab. 1 Boundary conditions setting of model

边界类型	边界名称	设置名称	温度/ ℃	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)
迎风面	速度入口	Velocity – inlet	34.3	1.0
背风面	压力出口	Outflow		
薄膜、土壤	壁面	Wall	35.5	
通风口	内部	Interior		

表 2 材料属性相关参数
Tab. 2 Related parameters of materials

材料	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	比热容/ ($J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$)	导热系数/ ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	吸收系数	折射率	散射系数
薄膜	920.0	2 300.0	0.330	0.37	1.52	0.3
土壤	1 700.0	2 200.0	0.800	0.85	1.92	1.0
作物	700.0	2 310.0	0.170	0.50	2.77	0
空气	1.2	1 006.4	0.024	0.15	1.00	0

2.3 模型验证

选取 2018 年 6 月 26 日典型晴天 11:30 大棚内外环境参数,利用 CFD 模拟两侧底部通风大棚内的温度场和气流场。棚内温度测点 T1 ~ T13 的实测值和 CFD 模拟值绝对误差在 0.2 ~ 2.9℃ 之间,均方根误差 1.27℃,平均相对误差 3.7%,最大相对误差 9.4%,其中 T2 ~ T4 实测值与模拟值存在较大差异,原因可能是大棚受群棚效应影响,导致实测值较高(图 4)。模型相对误差在 10% 之内,且模拟值与实测值的变化趋势基本一致,证明所建立 CFD 模型是有效的^[18]。

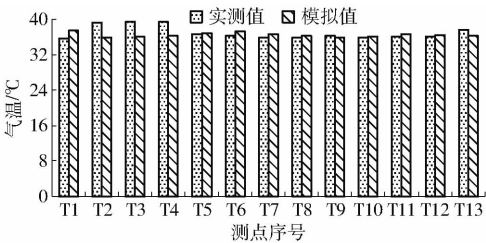


图 4 大棚内温度模拟值与实测值比较

Fig. 4 Comparison of simulated and measured temperatures in greenhouse

3 结果与分析

3.1 通风口配置对大棚温度场和气流场的影响

3.1.1 降温效果

与仅两侧底部通风相比,两侧底部 + 顶部通风大棚内昼间平均气温降低 0.4 ~ 2.1℃,平均降低 1.1℃,晴天降温效果更明显(图 5a)。由图 5b 可知,典型晴天(6 月 12 日)棚内外温度日变化速率趋

势相同,04:00—13:00 为升温阶段,两侧底部通风大棚、两侧底部 + 顶部通风大棚平均升温速率分别为 2.8、2.4℃/h,后者较前者降低 0.4℃/h;14:00—20:00 为降温阶段,两侧底部通风大棚、两侧底部 + 顶部通风大棚平均降温速率分别为 2.5、2.2℃/h,后者较前者降低 0.3℃/h,说明增设顶通风后,大棚降温效果较好,环境更为稳定。

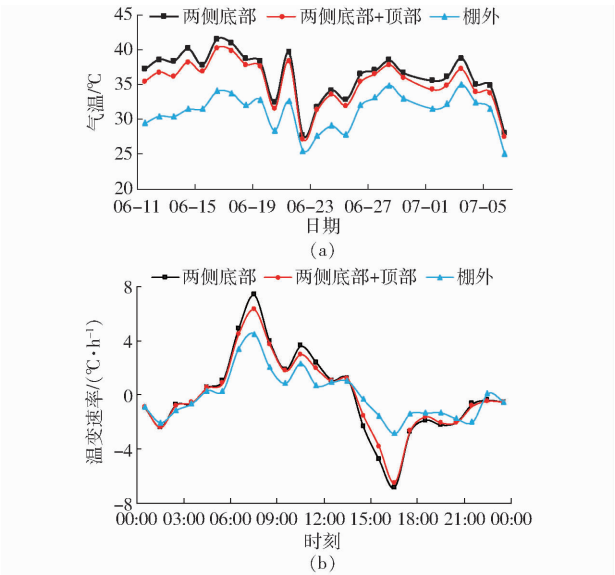


图 5 不同通风口配置大棚内温度变化曲线
Fig.5 Comparison of temperature changes in greenhouse with different vent configurations

3.1.2 气流场和温度场

图 6 为风向与大棚朝向垂直时,不同通风口配置下大棚内的气流场和温度场。当两侧底部通风口打开时(图 6a),在迎风侧和逆风侧通风口处风速最大,近棚顶区域形成循环圈,增加该区域气流混合度;近地面有作物阻挡,作物行间形成低速回流,并与地面土壤进行热交换,气流速度较慢,而大棚逆风

区域气流流速最慢,整体空气混合程度较差。大棚两侧底部和顶部通风口同时打开时(图 6c),气流从迎风侧快速进入,与棚面、骨架结构热交换后在顶部通风口下方形成强循环区,通过顶部和逆风侧通风口流出,大棚流速较仅两侧底部通风大棚明显提高,内部空气混合更为均匀。

从图 6 可以看出,大棚仅两侧底部通风口打开(图 6b),由于热空气汇聚棚顶难以排出,大棚垂直方向温度分布为棚顶最高,近地面次之,作物冠层最低。棚顶温度在 36.3 ~ 38.5℃ 之间,大部分区域气温在 35.9 ~ 37.5℃ 之间。两侧底部和顶部通风口同时打开(图 6d),棚顶热气通过顶部通风口排出,此时大棚垂直方向温度分布为近地面最高,棚顶次之,作物冠层最低。棚顶温度在 35.0 ~ 35.5℃ 之间,棚内大部分区域气温在 35.0 ~ 36.3℃ 之间,两侧底部和顶部同时通风降温效果明显。

不同通风口配置下大棚作物冠层通风降温效果见表 3。与仅两侧底部通风相比,两侧底部 + 顶部通风大棚冠层气流速率较前者高 0.22 m/s,通风率提高 50%,同时作物冠层气温降低 1.02℃,降温效果较好(Y_c 减小 1.18℃/m²)。这是由于增设顶部通风,不仅总通风面积增加,而且顶部通风占整个大棚通风的比重较大,因此两种通风口组合后通风效率更高^[19]。另外两侧底部 + 顶部通风大棚冠层变异系数小于两侧底部大棚,原因主要是组合通风口大棚气流流速增加,空气混合程度更为均匀,因此棚内风速以及温度分布均匀性显著提高^[20]。

3.2 通风口形状对大棚气流场和温度场的影响

3.2.1 降温效果

水平卷膜和垂直卷膜大棚温度变化见图 7。垂直卷膜大棚的昼间平均气温相比水平卷膜大棚降低

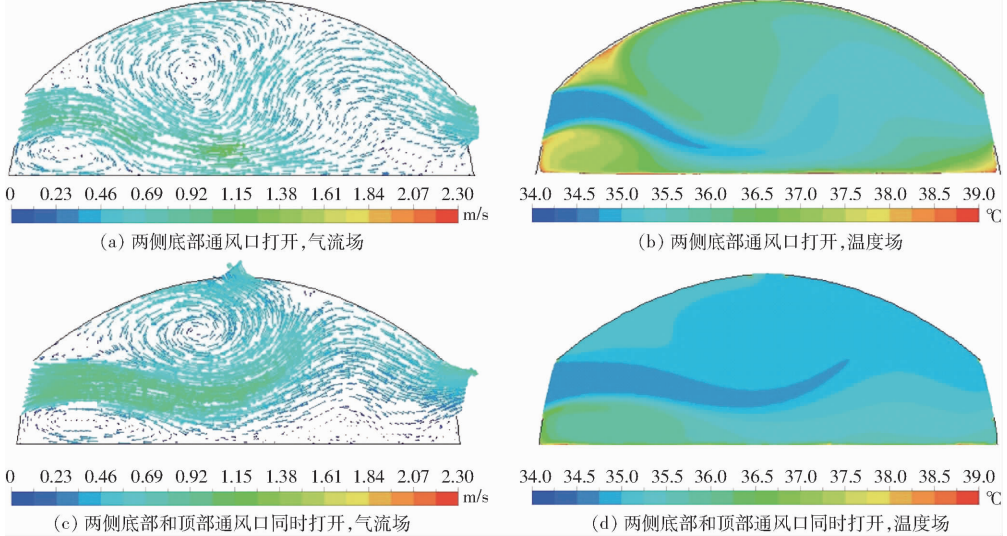


图 6 不同通风口配置大棚内的温度场和气流场
Fig.6 Temperature field and flow field of greenhouse with different vent configurations

表 3 不同通风口配置大棚通风降温效果评价

Tab.3 Evaluation of ventilation and cooling effect of greenhouse with different vent configurations

评估参数		数值	
		两侧底部	两侧底部 + 顶部
通风效率	$U_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.35	0.57
	$Q/(\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{m}^2)^{-1})$	0.85	1.27
气流均匀性	$(U_{\max}-U_{\min})/U_i$	1.38	0.99
	δ_u/U_i	0.55	0.39
降温效果	$T_i/^\circ\text{C}$	36.35	35.33
	$Y_c/(\text{C}\cdot\text{m}^{-2})$	2.58	1.40
气温均匀性	$(T_{\max}-T_{\min})/T_i$	3.73×10^{-2}	1.92×10^{-2}
	δ_T/T_i	1.31×10^{-2}	7.88×10^{-3}

注： U_i 为作物冠层平均气流速率； Q 为通风率， $Q=1\,000H/(\rho C_p\Delta TA)$ ； H 为放热量，W； C_p 为空气比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； ΔT 为室内外平均气温差， $^\circ\text{C}$ ； A 为土地面积， m^2 。 $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 为作物冠层最高和最低气流速率， m/s ； δ_u 为作物冠层空气速率标准偏差， m/s ； Y_c 为降温效率， $Y_c=100(T_i-T_o)/A'$ ， $^\circ\text{C}/\text{m}^2$ ； T_i 为作物冠层平均气温， $^\circ\text{C}$ ； T_o 为室外气温， $^\circ\text{C}$ ； A' 为通风面积， m^2 ； $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 为作物冠层最高和最低气温， $^\circ\text{C}$ ； δ_T 为作物冠层气温标准偏差， $^\circ\text{C}$ 。

0.2 ~ 1.2 $^\circ\text{C}$ ，平均降低 0.5 $^\circ\text{C}$ （图 7a）。从图 7b 可看出，在 04:00—13:00 升温阶段，垂直卷膜通风大棚平均升温速率较水平卷膜通风大棚低 0.3 $^\circ\text{C}/\text{h}$ ，在 14:00—20:00 降温阶段，垂直卷膜通风平均降温速率较水平卷膜通风低 0.2 $^\circ\text{C}/\text{h}$ ，可见垂直卷膜通风大棚降温效果更为理想。

3.2.2 气流场和温度场

图 8 为不同通风口形状下塑料大棚气流场和温度场。当水平卷膜大棚通风时（图 8a），空气从侧通风口入，在棚顶下方形成逆时针的循环圈，空气混合度较高。作物冠层附近的气流主要从逆风

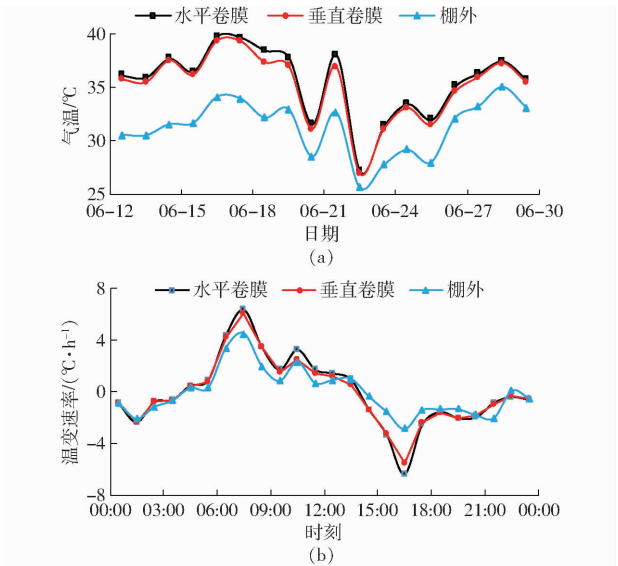


图 7 不同通风口形状大棚内温度变化曲线

Fig. 7 Comparison of temperature changes in greenhouse with different vent shapes

侧通风口流出，流速较快，棚内气体均匀性较好。当垂直卷膜大棚通风时（图 8c），空气通过侧通风口进入大棚，沿着地面水平移动，并在大棚中央向上朝着垂直顶通风口移动，在迎风侧形成逆时针的回流区，而逆风区域空气混合程度较低，大棚气流分布不均匀。

由图 8b、8d 可知，两者棚内温度垂直空间分布与两侧底部 + 顶部通风大棚相似，水平卷膜大棚、垂直卷膜大棚温度范围分别为 35.0 ~ 36.2 $^\circ\text{C}$ 、34.8 ~ 35.6 $^\circ\text{C}$ ，垂直卷膜大棚夏季降温效果好于水平卷膜大棚。

不同通风口形状大棚作物冠状层通风降温效果如表 4 所示，垂直卷膜大棚气流速率比水平卷膜大

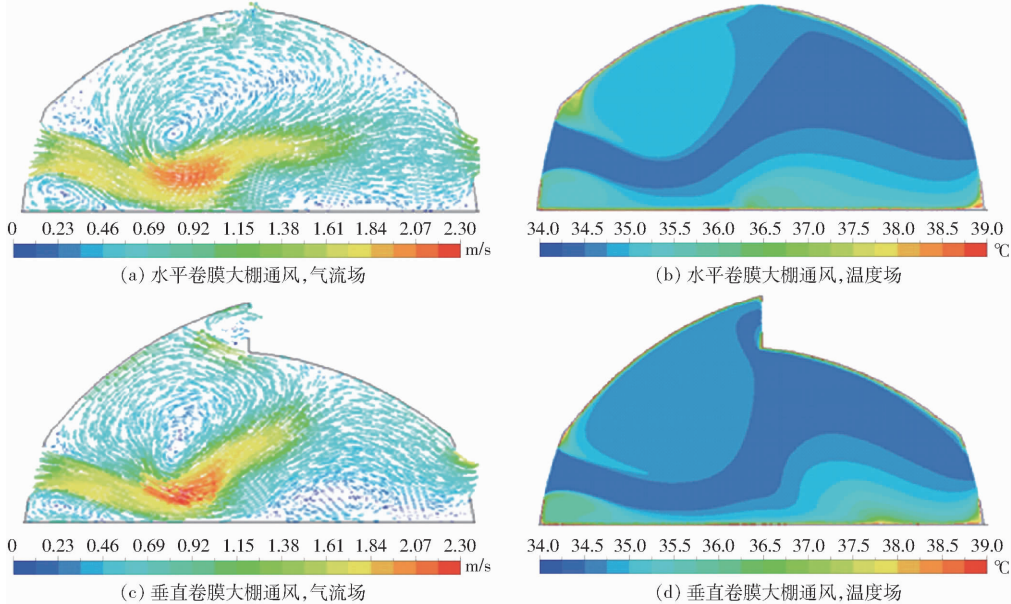


图 8 不同通风口形状大棚温度场和气流场

Fig. 8 Temperature field and flow field of greenhouse with different vent shapes

棚高 0.08 m/s,通风率为水平卷膜大棚的 1.2 倍,作物冠层气温较水平卷膜大棚降低 0.27℃,降温效果好于水平卷膜大棚。主要原因在于垂直卷膜通风大棚的底部和顶部通风口间的高度差较大,导致通风口处的压力差增加,空气流量增加,通风效率提高^[21]。但作物冠层中空气温度和气流均匀性略低

表 4 不同通风口形状大棚通风降温效果评价

评估参数		数值	
		水平卷膜	垂直卷膜
通风效率	$U_i/(m \cdot s^{-1})$	0.74	0.82
	$Q/(m^3 \cdot (s \cdot m^2)^{-1})$	1.48	1.78
气流均匀性	$(U_{max} - U_{min})/U_i$	0.80	0.88
	δ_u/U_i	0.35	0.37
降温效果	$T_i/℃$	35.18	34.91
	$Y_e/(℃ \cdot m^{-2})$	1.19	1.01
气温均匀性	$(T_{max} - T_{min})/T_i$	1.26×10^{-2}	1.30×10^{-2}
	δ_T/T_i	4.67×10^{-3}	5.32×10^{-3}

于水平卷膜大棚,差异原因是所研究大棚棚顶通风口的非对称设计,一定程度上影响大棚内部气流运动,导致气温均匀性相对较差。

4 结论

(1)构建了单栋塑料大棚 CFD 模型,实地观测并对模型的有效性和可靠性进行了验证,温度 CFD 模拟值与实测值均方根误差 1.27℃,平均相对误差 3.7%,构建的 CFD 模型其计算结果能够反映单栋塑料大棚内空气温度分布规律。

(2)夏季高温天气,两侧底部和顶部通风配置能有效降低作物冠层气温,且通风率最高,室内外温差最小,气流和温度空间分布更均匀;不同通风口形状大棚的通风降温效果具有明显差异,与水平卷膜大棚相比,垂直卷膜大棚通风效果和降温效果最好,但均匀性略低于水平卷膜通风大棚。

(3)采用两侧底部加顶部垂直卷膜的通风口配置和形状有助于实现夏季塑料大棚的通风降温。

参 考 文 献

[1] 叶崇文,段茂春,徐娥.设施农业发展现状及对策探讨[J].湖北农业科学,2017,56(22):4386-4390.
YE Chongwen, DUAN Maochun, XU E. The current situation of facility agriculture development and counter measures[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017,56(22):4386-4390. (in Chinese)

[2] 郑艳姣,杨再强,王琳,等.中国南方设施番茄高温热害风险区划[J].应用气象学报,2021,32(4):432-442.
ZHENG Yanjiao, YANG Zaiqiang, WANG Lin, et al. Refined risk zoning of high temperature and heat damage to greenhouse tomato in southern China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2021,32(4):432-442. (in Chinese)

[3] 庞真真,黄泉,曾宪豪,等.海南地区几种常见设施大棚热环境参数试验研究[J].农机化研究,2016,38(1):227-231.
PANG Zhenzhen, HUANG Quan, ZENG Xianhao, et al. Thermal environment parameters characterization of common greenhouses in Hainan[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(1):227-231. (in Chinese)

[4] 何科爽,陈大跃,孙丽娟,等.不同风况和开窗配置对夏季单栋塑料温室微气候的影响[J].农业机械学报,2017,48(12):311-318,339.
HE Keshi, CHEN Dayue, SUN Lijuan, et al. Effects of wind regime and vent configuration on microclimate in tunnel greenhouses in summer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):311-318,339. (in Chinese)

[5] 宿文,薛晓萍,熊宇,等.自然通风对日光温室气温影响的模拟分析[J].生态学杂志,2016,35(6):1635-1642.
SU Wen, XUE Xiaoping, XIONG Yu, et al. Modeling the effect of natural ventilation on temperature inside solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(6):1635-1642. (in Chinese)

[6] 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.
ZHAO Rongsheng, CAI Zelin, YANG Zhi, et al. Effect of side vent height on airflow, temperature and humidity in plastic greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University,2021,26(3):105-114. (in Chinese)

[7] BOURNET P E, BOULARD T. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2):195-217.

[8] 张艺萌,刘传岐,张汉林,等.寒地水稻育秧大棚自然通风条件下的 CFD 流场分析[J].农机化研究,2018,40(7):19-23.
ZHANG Yimeng, LIU Chuanqi, ZHANG Hanlin, et al. CFD analysis of flow field for cold region rice seedlings greenhouse under natural ventilation condition[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(7):19-23. (in Chinese)

[9] SABERIAN A, SAJADIYE S M. The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation[J]. Renewable Energy, 2019, 138:722-737.

[10] 程雪,黄伊锐,任昊宇,等.基于 CFD 的花卉温室夏季机械通风模拟[J].河北农业大学学报,2021,44(5):113-118.
CHENG Xue, HUANG Yirui, REN Haoyu, et al. Simulation of summer mechanical ventilation in flower greenhouses based on CFD[J]. Journal of Hebei Agricultural University,2021,44(5):113-118. (in Chinese)

[11] 张芳,方慧,杨其长,等.基于 CFD 模型的大跨度温室自然通风热环境模拟[J].中国农业气象,2017,38(4):221-229.
ZHANG Fang, FANG Hui, YANG Qichang, et al. Ventilation simulation in a large-scale greenhouse based on CFD[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2017,38(4):221-229. (in Chinese)

- Information Engineering (Natural Science Edition), 2022, 14(3): 304–316. (in Chinese)
- [7] 王海涛, 彭熙凤, 林本末. 软体机器人研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 94–106.
WANG Haitao, PENG Xifeng, LIN Benmo. Research progress of soft robot[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 94–106. (in Chinese)
- [8] JAFARI A, TSAGARAKIS N G, CALDWELL D G. A novel intrinsically energy efficient actuator with adjustable stiffness (AwAS)[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 355–365.
- [9] AFARI A, TSAGARAKIS N G, SARDELLITTI I, et al. A new actuator with adjustable stiffness based on a variable ratio lever mechanism[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(1): 55–63.
- [10] TSAGARAKIS N G, SARDELLITTI I, CALDWELL D G. A new variable stiffness actuator (CompAct-VSA): design and modelling[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2011: 378–383.
- [11] KIM B S, SONG J B. Design and control of a variable stiffness actuator based on adjustable moment arm[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(5): 1145–1151.
- [12] CHOI J, HONG S, LEE W, et al. A robot joint with variable stiffness using leaf springs[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(2): 229–238.
- [13] WANG R J, HUANG H P. Active variable stiffness elastic actuator: design and application for safe physical human-robot interaction[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE, 2010: 1417–1422.
- [14] VAN HAM R, VANDERBORGHT B, VAN D M, et al. MACCEPA, The mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: design and implementation in a biped robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(10): 761–768.
- [15] VANDERBORGHT B, TSAGARAKIS N G, VAN HAM R, et al. MACCEPA 2.0: compliant actuator used for energy efficient hopping robot chobino1D[J]. Autonomous Robots, 2011, 31(1): 55–65.
- [16] NAM K H, KIM B S, SONG J B. Compliant actuation of parallel type variable stiffness actuator based on antagonistic actuation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(11): 2315–2321.
- [17] OSADA M, ITO N, NAKANISHI Y, et al. Realization of flexible motion by musculoskeletal humanoid “Kojiro” with add-on nonlinear spring units[C]//IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, IEEE, 2010: 174–179.
- [18] NAKANISHI Y, ITO N, SHIRAI T, et al. Design of powerful and flexible musculoskeletal arm by using nonlinear spring unit and electromagnetic clutch opening mechanism[C]//IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, IEEE, 2011: 377–382.
- [19] YONG-JAE K. Design of low inertia manipulator with high stiffness and strength using tension amplifying mechanisms[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015: 5850–5856.
- [20] YONG-JAE K. Anthropomorphic low-inertia high-stiffness manipulator for high-speed safe interaction[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017 33(6): 1358–1374.
- [21] YONG-JAE K, KIM J, JANG W, et al. Quaternion joint: dexterous 3-DOF joint representing quaternion motion for high-speed safe interaction[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2018: 935–942.
-

(上接第 356 页)

- [12] RASDEED A, LEE J W, KIM H T, et al. Efficiency of different roof vent designs on natural ventilation of single-span plastic greenhouse[J]. Protected Horticulture and Plant Factory, 2019, 28(3): 225–233.
- [13] 鲍恩财, 汤庆, 伍德林, 等. 江淮地区双层拱架塑料大棚通风效果 CFD 仿真与分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 147–153.
BAO Encai, TANG Qing, WU Delin, et al. Simulations and analysis of ventilation in the double-layer-arch greenhouse based on the CFD in Jianghuai region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(32): 147–153. (in Chinese)
- [14] HE Keshi, CHEN Dayue, SUN Lijuan, et al. The effect of vent openings on the microclimate inside multi-span greenhouses during summer and winter seasons[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2015, 9(1): 399–410.
- [15] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [16] ROMERO-GOMEZ P, LOPEZ-CRUZ I L, CHOI C Y. Analysis of greenhouse natural ventilation under the environmental conditions of central mexico[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(5): 1753–1761.
- [17] FATNASSI H, BOULARD T, PONCET C, et al. Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(3): 301–312.
- [18] 任守纲, 杨薇, 王浩云, 等. 基于 CFD 的温室气温时空变化预测模型及通风调控措施[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 207–214.
REN Shougang, YANG Wei, WANG Haoyun, et al. Prediction model on temporal and spatial variation of air temperature in greenhouse and ventilation control measures based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 207–214. (in Chinese)
- [19] BARTZANAS T, BOULARD T, KITTAS C. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(4): 479–490.
- [20] 郝飞麟, 沈明卫, 张雅. 单栋塑料温室内部温度场 CFD 三维稳态模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 222–228.
HAO Feilin, SHEN Mingwei, ZHANG Ya. 3-D steady simulation of temperature pattern inside single plastic greenhouse using CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 222–228. (in Chinese)
- [21] LEE S Y, LEE I B, KIM R W. Evaluation of wind-driven natural ventilation of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171(1): 120–142.