

侧通风窗纵横比对连栋温室流场均匀性的影响

高振军¹, 司长青¹, 丁小明^{2*}, 李菁³, 何芬², 李文杨¹, 张建波¹
(1.三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002; 2.农业农村部农业设施结构设计与智能建造重点实验室, 北京 100125; 3.广东省现代农业装备研究所, 广州 510630)

摘要:【目的】探究侧通风窗纵横比对连栋温室内流场均匀性的影响, 为温室设计建造提供理论依据。【方法】本研究以广州地区连栋蝶形开窗温室为研究对象, 采用数值模拟和试验结合的方法, 设计了4种不同开窗纵横比方案并与试验温室(即开窗方案C)进行对比, 引入不均匀系数评价流场均匀性, 研究不同开窗纵横比下连栋温室内流场的分布规律。【结果】通过实测值和模拟值对比, 温度、风速的平均误差分别为2.48%和8.76%, 均方根误差分别为1.10℃和 2.1×10^{-3} m/s, 验证了模型的有效性; 不同开窗纵横比对连栋温室室内平均温度无显著影响, 但温度不均匀系数存在明显差异, 其中开窗方案A较开窗方案C总体温度不均匀系数减少了41%; 5种开窗方案中, 开窗方案A的总体平均风速和风速不均匀系数均优于其他开窗方式, 与开窗方案C相比, 平均风速提高了23%, 风速不均匀系数降低了41%。【结论】从温室内流场分布角度来看, 适当降低侧通风窗纵横比, 能够有效降低温度、风速不均匀程度。

关键词: 连栋温室; 纵横比; 自然通风; 数值模拟

中图分类号: S625.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022165

OSID:



高振军, 司长青, 丁小明, 等. 侧通风窗纵横比对连栋温室流场均匀性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 87-94.

GAO Zhenjun, SI Changqing, DING Xiaoming, et al. Influence of Aspect Ratio of Side Ventilation Window on Air Circulation in Terraced Greenhouses[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 87-94.

0 引言

【研究意义】连栋温室作为设施农业的重要代表, 能够实现作物高效生产, 已成为现代化农业发展的重要方向^[1-2]。自然通风作为温室环境调控常用的方式, 具有经济节约能耗的特点, 因此在日常运行管理中优先使用。已有研究表明通风窗的大小、位置及开窗配置是影响温室微气候的主要因素^[3-5], 但开窗纵横比对室内环境的影响尚未了解。

【研究进展】计算流体力学(CFD, computational fluid dynamics)作为一种新兴、高效的计算手段, 广泛应用于温室通风等相关领域的研究, 采用数值模拟方法提高温室性能以及研究温室流场分布具有重要作用。柏宗春等^[6]研究了自然通风条件下大跨通风窗的开设位置, 借助Fluent软件研究不同侧窗和天窗尺寸下大棚内部的流场规律。赵融盛等^[7]以陕西地区塑料温室为研究对象, 分析并比较4种侧通风口高度(40、60、80、100 cm)下室内流场、气

温、相对湿度均匀性。何科爽等^[8]研究开窗配置对温室微气候的影响, 揭示极低风速下(小于0.6 m/s)单栋塑料温室内气流和温度场的分布特征。Rasheed等^[9]利用CFD技术, 比较7种不同屋顶和通风口条件下塑料大棚内温度和通风率大小。以上研究大多关注CFD方法在单栋塑料温室、单跨温室的应用, 多数只考虑温室流场分布特征, 缺乏对流场均匀性的研究。

【切入点】目前, 鲜有研究自然通风情况下侧通风窗纵横比对温室内流场的影响。【拟解决关键问题】本研究以广州地区连栋蝶形开窗温室为研究对象, 建立连栋温室三维数值模型, 设计了4种不同开窗纵横比并与试验温室模型进行对比, 引入温度、风速不均匀性系数, 对温室流场分布特性进行评价, 探索不同开窗纵横比对室内温度及风速的分布规律。

1 材料与方法

1.1 试验温室

试验温室位于广州市天河区柯木塿农业技术推广总站示范基地(东经113.40°, 北纬23.18°), 屋脊为东西朝向。温室长36 m, 宽28.8 m, 肩高6.5 m, 脊高7.5 m。温室东西两侧设有湿帘风机降温装置以及侧通风窗, 顶窗采用电动扭矩分配开窗机构, 最

收稿日期: 2022-03-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0701500); 农业农村部农业设施结构工程重点实验室开放课题(201903)

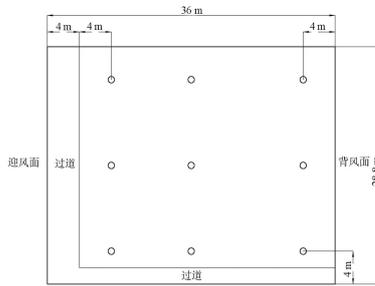
作者简介: 高振军(1986-), 男, 副教授。主要从事温室环境模拟及流体机械。E-mail: 570186276@qq.com

通信作者: 丁小明(1976-), 男, 研究员, 主要从事温室设施装备研究和标准化。E-mail: dingxiaoming@aaape.org.cn

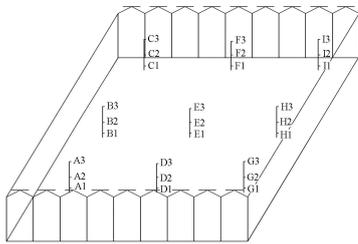
大开启角度为 45°, 屋面覆盖材料为 4 mm 厚漫反射玻璃, 四周覆盖 5 mm 厚度单层钢化玻璃。

1.2 试验条件

选取广州地区夏季典型天气进行试验, 试验时间为 2020 年 8 月 9 日, 晴天高温天气, 风向与屋脊方向平行 (即与温室迎风面垂直), 室外风速为 0.3 m/s, 室内无作物, 试验期间环境稳定。现场试验从 09:00 开始, 18:00 结束, 期间温室顶窗、侧窗均处于完全打开状态。采用 Auto-100 环境数据采集器 (北京奥托, 温度传感器精度为 ± 0.5 °C) 每隔 1 h 自动采集室内外温度、风速。室内共设置 27 个监测点, 在 0.6、2.5、3.0 m 高度处各布置 9 个采集器 (图 1)。室外数据采集器距地 2.5 m 进行安装, 周围无遮挡。



(a) 连栋温室实际检测点平面



(b) 连栋温室实际检测点立面

图 1 连栋温室室内测温点示意图

Fig.1 Schematic diagram of indoor temperature measurement points in multi-span greenhouse

1.3 评价方法

1.3.1 温室流场评价指标

以平均温度 \bar{t} 、平均风速 \bar{v} 作为室内流场评价指标, 可以反映温室内流场的基本情况。对于连栋温室而言, 室内温度、风速分布不均是制约连栋温室快速发展的主要原因, 因此, 引入温度不均匀系数 K_t 和风速不均匀系数 K_v 作为连栋温室流场均匀性评价指标^[10], 计算式为:

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i}{n}, \quad (1)$$

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i}{n}, \quad (2)$$

$$K_t = \frac{\sigma_t}{\bar{t}}, \quad (3)$$

$$K_v = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}, \quad (4)$$

式中: \bar{t} 为温度平均值 (°C); σ_t 为温度均方根差

(°C); K_t 为温度不均匀系数; \bar{v} 为速度平均值 (m/s); σ_v 为速度均方根差 (m/s); K_v 为速度不均匀系数。为了使流场均匀性评价指标计算的更加准确^[11], 本研究在温室长宽高 3 个方向分别以 4.0、6.4、1.0 m 均匀取点, 共选取 350 个取样点。

1.3.2 模型精度评价指标

为了评价数值模型的准确性, 引入相对误差、平均绝对误差和均方根误差 (Root-mean-square error, RMSE) 评价模型的精度^[12], 评价指标越小, 意味着模型精度越高, 均方根误差计算式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{n}}, \quad (5)$$

式中: x_i 为参数模拟值, 即温度 (°C) 或风速 (m/s); x 为参数实际值, 即温度 (°C) 或风速 (m/s); n 为监测点数量, 本研究为 27。

1.4 模拟方案

通过文献调研, 当室外风速小于 0.5 m/s 时, 由室内外温差所引起的热压通风对室内环境的影响不可忽略^[13-15]。鉴于此, 考虑连栋温室在风压和热压共同作用下, 采用数值计算的方法, 探索不同开窗纵横比对温室内流场均匀性的影响。在保证开窗面积以及通风窗底边高度一致的前提下, 只改变侧通风窗纵横尺寸之间的比例, 设计了 4 种不同开窗方案与试验温室进行比较。采用瞬态模拟, 实际模拟时间 10 min, 不同开窗方案见表 1。

表 1 不同开窗纵横比侧通风窗结构参数

Table 1 Structural parameters of side ventilation windows with different window aspect ratios

| 开窗方案 | 开窗尺寸 | 比例 | 纵横比 |
|------|---------------|-------|------|
| A | 0.85 m×1.70 m | 1 : 2 | 0.50 |
| B | 0.98 m×1.47 m | 2 : 3 | 0.67 |
| C | 1.20 m×1.20 m | 1 : 1 | 1.00 |
| D | 1.47 m×0.98 m | 3 : 2 | 1.50 |
| E | 1.70 m×0.85 m | 2 : 1 | 2.00 |

注 纵横比, 即通风窗长度方向与高度方向的比值。

2 CFD 模型

2.1 控制方程

假设连栋温室室内空气为定常不可压缩介质, 传质传热过程满足质量、动量和能量守恒方程, 并可由通用方程 (6) 表示^[16]:

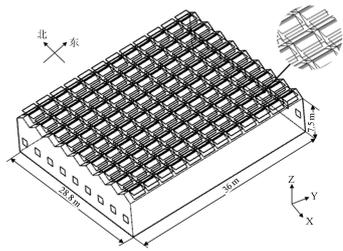
$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S_\phi, \quad (6)$$

式中: ϕ 为通用传输量; ρ 为流体密度 (kg/m^3); t 为时间 (s); \vec{u} 为流体风速矢量 (m/s); Γ 表示广义扩散系数 (m^2/s); S_ϕ 表示广义源相 (W/m^2)。

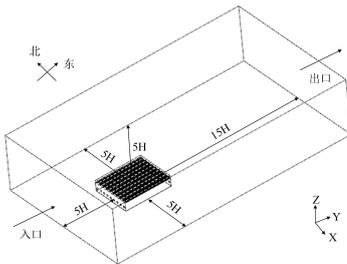
2.2 物理模型

对连栋温室物理模型进行简化, 忽略作物栽培

架对自然通风的影响, 试验时湿帘风机装置并未运行, 模型对其进行删除。将温室高度 7.5 m 作为距离单位 H , 计算域入口与温室迎风面的距离为 $5H$, 计算域出口与温室背风面的距离为 $15H$, 计算域侧面距离以及顶部距离均为 $5H$ ^[17]。利用 Workbench 中 SpaceClaim 模块建立等比例大小三维模型, 具体见图 2, 以温室宽度方向为 X 方向, 取值范围为 0~28.8 m; 长度方向为 Y 方向, 取值范围为 -36~0 m; 高度方向为 Z 方向, 取值范围为 0~7.5 m。温室东西两侧各设 9 个侧通风窗, 尺寸大小为 1.2 m×1.2 m, 底边距地高度为 2 m。



(a) 连栋温室三维模型



(b) 连栋温室计算域及三维模型

图 2 连栋温室物理模型

Fig.2 Physical model of multi-span greenhouse

2.3 网格无关性检验

对于数值模拟, 需要进行网格无关性检验, 以保证网格数量不影响最终计算结果。本研究设置 3 种不同网格划分方案, 并将模拟温度值和实际测量值比较得到平均误差, 结果见表 2。可以看出, 3 种方案温度平均误差在 2.5% 左右, 均满足计算要求。考虑到计算精度及耗费时间, 选择细网格划分方式。

表 2 网格无关性检验

Table 2 Grid independence test

| 网格划分方案 | 网格数量 | 平均误差/% |
|--------|-----------|--------|
| 粗网格 | 1 700 000 | 2.56 |
| 细网格 | 2 000 000 | 2.48 |
| 密网格 | 2 500 000 | 2.35 |

2.4 边界条件及模型求解

广州地区夏季高温弱风, 室内环境对作物生长具有较大影响。因此, 本研究选取中午 13:00 作为模型初始时刻, 对模型进行初始化设置。室外初始温度为 32.6 °C, 室内温度为 42.2 °C。西面进风口设为速度进口, 大小为 0.3 m/s (弱风条件), 方向与屋脊

方向平行, 入口温度为 32.6 °C; 东面出风口为压力出口, 压力为标准大气压。温室地面及围护结构设置为壁面边界条件, 通风窗设置为内部边界条件。模型考虑浮升力影响, 添加 Boussinesq 模型模拟自然对流。激活 DO 辐射模型, 并通过太阳追踪法 (Solar Ray Tracing) 将太阳辐射加载到计算域中。选择 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行模拟, 求解器采用瞬态、基于压力求解, 选择 SIMPLEC 算法, 动量和湍流动能选用二阶迎风格式^[18-20]。表 3 为连栋温室材料物性参数。

表 3 连栋温室材料物性参数

Table 3 Physical parameters of greenhouse materials

| 参数 | 玻璃 | 土壤 | 空气 |
|---|-------|-------|----------|
| 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 2 500 | 2 000 | 1.18 |
| 比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) | 700 | 2 000 | 1 006.43 |
| 导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) | 0.71 | 2 | 0.024 2 |
| 吸收率 | 0.1 | 0.5 | 0 |
| 散射系数 | 0 | 1 | 0 |
| 折射率 | 1.7 | 1 | 1 |

3 结果与分析

3.1 模型验证

为了验证连栋温室模型的准确性, 以 13:00 实际测得环境参数作为模拟的初始条件, 模拟连栋温室自然通风 1 h 后室内流场的变化, 将温室各监测点参数实测值和模拟结果相对比, 得到各监测点温度相对误差范围为 0.09%~5.31%, 平均相对误差为 2.48%, 均方根误差为 1.10 °C。风速相对误差范围为 0~18.92%, 平均相对误差为 8.76%, 均方根误差为 2.1×10^{-3} m/s。表明该模型能够准确模拟室内流场分布, 可用于后续温室流场模拟。

3.2 不同开窗纵横比对连栋温室温度的影响

3.2.1 不同开窗纵横比连栋温室纵截面温度分布

取温室宽度方向的中心截面作为典型截面, 不同开窗纵横比下温度分布见图 3。可以看出高度方向上温室中层及下层的温度较低, 高温区域集中在温室顶层附近, 温度分布呈现自下到上的梯度变化。这是由于热压作用, 热空气向上冷空气向下运动, 形成上层高温下层低温的分布规律。长度方向上室内温度分布呈现出迎风侧温度低, 背风侧温度高的现象。一方面是由于室外冷空气首先和迎风窗附近热空气进行交换, 带走了大部分热量, 使得迎风侧温度低; 另一方面, 背风侧窗口附近空气因受太阳辐射和地面辐射加热的影响, 温度升高, 由于室内压力小于室外压力, 热空气进入温室导致背风侧温度高。此外, 随着开窗纵横比的增加, 低温区域不断减小, 高温区域不断增加, 表明开窗纵横比影响

气流的纵向进深能力（即气流沿温室长度方向的深入能力），这是由于随着纵横比不断增加，通风窗高

度方向尺寸逐渐减小，气流在发展过程中上下层气流流通能力减弱。

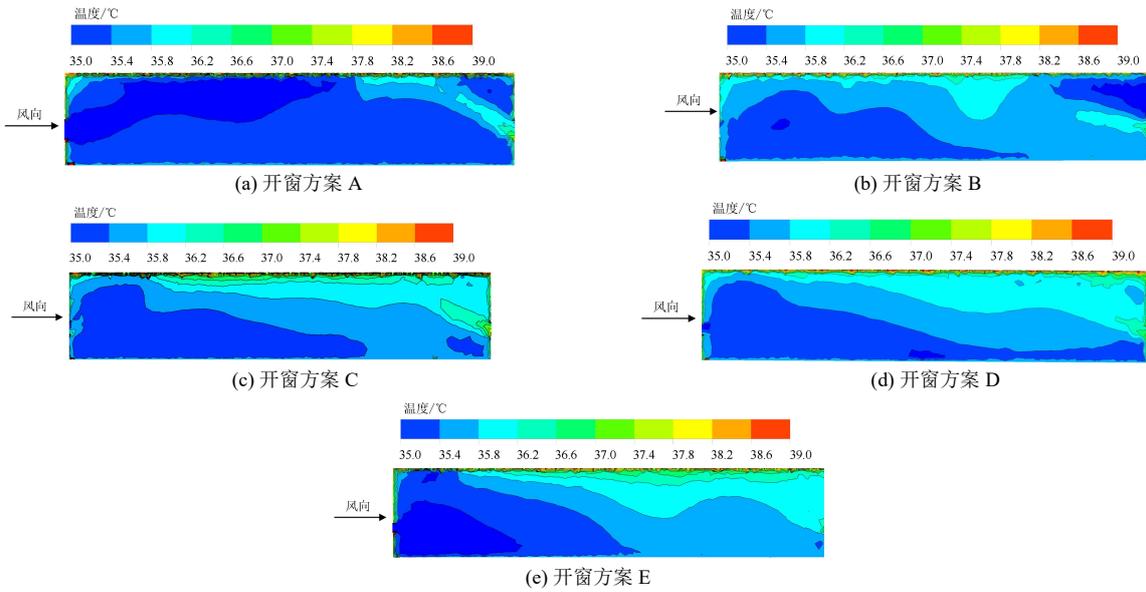


图 3 $X=14.4$ m 时不同开窗纵横比连栋温室温度分布

Fig.3 Temperature distribution of multi-span greenhouses with different window aspect ratios at $X=14.4$ m

3.2.2 不同开窗纵横比连栋温室横截面温度变化

图 4 为连栋温室长度方向平均温度及不均匀系数变化，由图 4 (a) 可知，开窗方案 B、开窗方案 C、开窗方案 E 沿温室长度方向截面平均温度呈现出上升的趋势，这是由于纵向进深距离增加气流换热能力减弱，以及背风侧风压热压共同作用导致的，详细分析见 3.2.1。开窗方案 A 沿温室长度方向截面平均温度呈现出先下降后上升的趋势，原因是该纵横比下迎风侧冷气流和背风侧热气流在温室中部气流上下流通能力较强，导致该区域的平均温度较低。开窗方案 D 与开窗方案 A 的变化趋势相同，只是平均温度最低区域位置靠近背风侧。此外，通过对比

开窗方案 C 与其余开窗方案平均温度，发现降温幅度最大为 0.9%，并无显著差异，表明在相同开窗条件下，只改变开窗纵横比对室内平均温度影响较小。

由图 4 (b) 可知，开窗方案 A、开窗方案 B、开窗方案 D、开窗方案 E 沿温室长度方向上的不均匀系数呈现出先上升后下降的趋势，这是由于迎风侧气流发展时受到相向而来的背风侧气流，导致室内出现气流停滞区温度不均系数上升。随着纵向进深距离增加，迎风侧气流逐渐减弱，背风侧气流增强，温度分布逐渐稳定，温度不均匀系数随之下降。开窗方案 C 沿温室长度方向上不均匀系数呈现出缓慢上升的趋势，没有出现明显上下波动的情况。

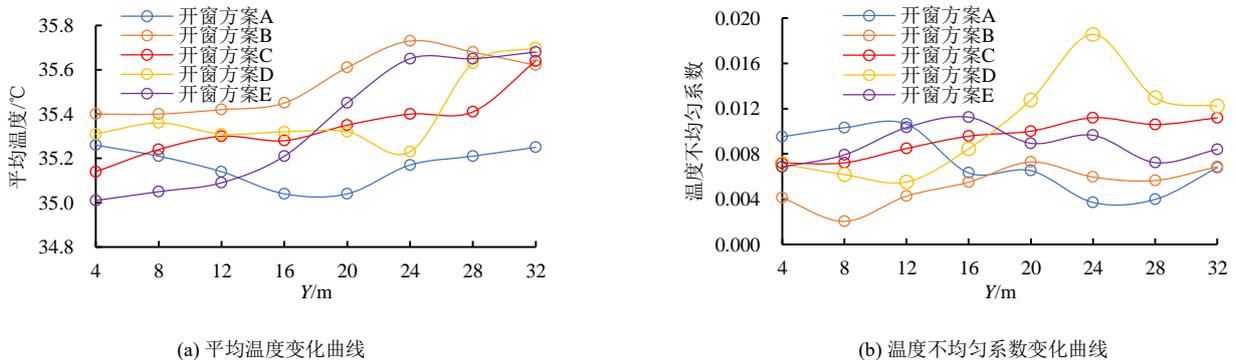


图 4 连栋温室长度方向平均温度及不均匀系数变化

Fig.4 Variation of average temperature and uneven coefficient along the length of multi-span greenhouse

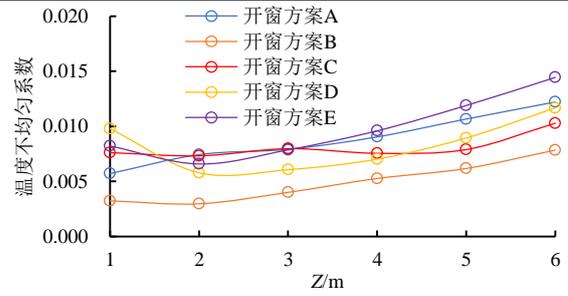
3.2.3 不同开窗纵横比对连栋温室垂直截面温度变化

图 5 为连栋温室垂直方向平均温度及不均匀系数变化，由图 5 (a) 可知，开窗方案 B、开窗方案 C、开窗方案 E 沿温室垂直方向截面平均温度呈现出先下降后上升的趋势，这是由于空气在垂直高度方

向存在密度差，迎风侧冷空气由上到下运动，通风窗底部以下区域温度较低，通风窗底部以上区域温度较高。开窗方案 A 和 D 沿温室垂直方向截面平均温度呈现出持续上升的趋势。此外，垂直高度在 2~6 m 之间温度梯度由大到小排序依次为开窗方案 C、

开窗方案 E、开窗方案 D、开窗方案 B、开窗方案 A，即开窗纵横比为 1 垂直方向温度变化率最大为 $8.25 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ，开窗纵横比为 0.5 垂直方向温度变化率最小为 $1.75 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 。

由图 5 (b) 可知，开窗方案 B—开窗方案 E 沿温室垂直方向截面不均匀系数呈现出先下降后上升的趋势，这是由于迎风侧温度较低，背风侧温度较高，而通风窗所在高度范围空气流通能力强，温度分布较为均匀，因此随着高度的增加迎风侧和背风侧温度差异先减小后增加。而开窗方案 A 沿温室垂直方向截面不均匀系数呈现出逐渐上升的趋势。此外垂直高度在 2~6 m 之间温度不均匀系数梯度由大到小排序依次为开窗方案 E、开窗方案 D、开窗方案 A、开窗方案 B、开窗方案 C，即开窗纵横比为 2 垂直方向温度不均匀系数变化率最大为 $1.97 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ，开窗纵横比为 1 垂直方向温度不均匀系数变化率最小为 $0.96 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 。



(b) 温度不均匀系数变化曲线

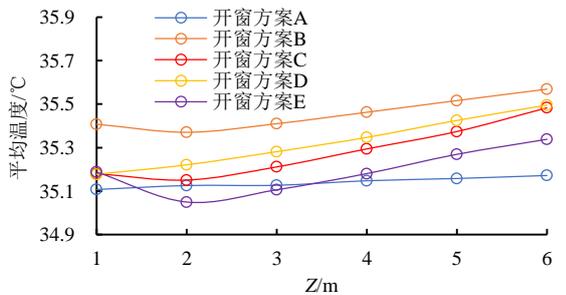
图 5 连栋温室垂直方向平均温度及不均匀系数变化

Fig.5 Variation of average temperature and uneven coefficient in vertical direction of multi-span greenhouse

3.3 不同开窗纵横比对连栋温室风速的影响

3.3.1 不同开窗纵横比连栋温室纵截面风速分布

取温室宽度方向的中心截面作为典型截面，不同开窗纵横比下风速分布见图 6。室外空气从温室两侧通风窗进入从顶窗排出，两侧通风窗口处风速较高，并且背风侧风速高于迎风侧。随着开窗纵横比的增加，迎风侧气流纵深能力不断减弱，背风侧气流纵深能力不断增强。同时迎风侧、背风侧区域均出现低速区域，这是背风侧以热压为主的上升气流和迎风侧风压为主的上升气流相遇，形成气流漩涡，导致该区域流通能力较差，造成风速分布不均。因此在弱风条件下，室内气流组织均匀性须同时考虑风压和热压的综合影响。



(a) 平均温度变化曲线

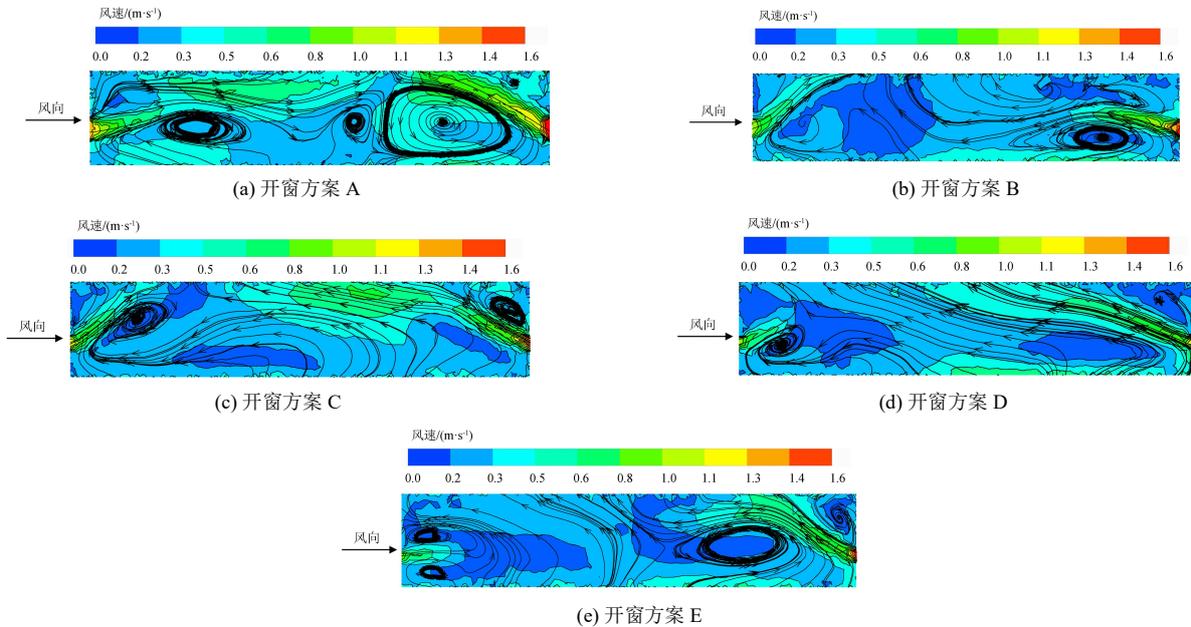


图 6 $X=14.4 \text{ m}$ 时不同开窗纵横比连栋温室风速分布与流线

Fig.6 Wind speed distribution and streamlines of multi-span greenhouses with different window aspect ratios at $X=14.4 \text{ m}$

3.3.2 不同开窗纵横比下横截面风速变化

图 7 为连栋温室长度方向平均风速及不均匀系数变化。由图 7 (a) 可知，不同开窗纵横比下沿温

室长度方向截面平均风速均呈先下降后上升的趋势，这是由于温室迎风侧和背风侧均为高速区域，在气流发展过程中，二侧气流相遇，容易形成气流漩涡，

导致平均风速下降。并且，开窗方案 A 平均风速的均值优于其他开窗方案，较开窗方案 C 提高了 50%。

由图 7 (b) 可知，沿温室长度方向截面风速不均匀系数没有明显规律变化，所以仅分析不同开窗方案最小不均匀系数位置。开窗方案 A 和开窗方案 E 在 $Y=24\text{ m}$ 时，风速不均匀系数取得最小值分别为 0.32 和 0.33；开窗方案 B 在 $Y=16\text{ m}$ 时，风速不均匀系数取得最小值为 0.34；开窗方案 C 在 $Y=28\text{ m}$ 时，风速不均匀系数取得最小值为 0.43。开窗方案 D 在 $Y=12\text{ m}$ 时，风速不均匀系数取得最小值 0.42。由此可知，风速均匀的区域大多分布在靠近温室背风侧区域，这是由于背风侧区域以热压通风为主，气流受到干扰因素较少，风速分布较为均匀。

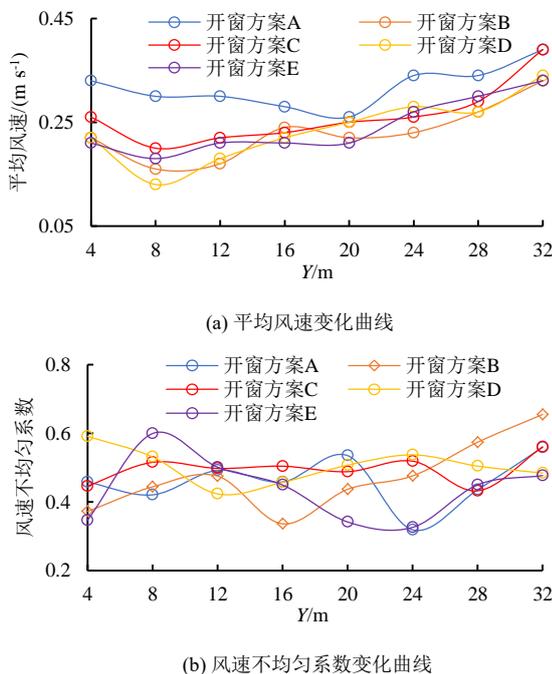


图 7 连栋温室长度方向平均风速及不均匀系数变化

Fig.7 Variation of average wind speed and uneven coefficient in the length direction of multi-span greenhouse

3.3.3 不同开窗纵横比下竖直截面风速变化

图 8 为连栋温室竖直方向平均风速及不均匀系数变化。由图 8 (a) 可知，不同开窗纵横比下沿温室竖直方向截面平均风速均呈先下降再上升的趋势。这是由于通风窗底部以下区域空气向上运动时，受到来自迎风侧水平方向上的气流干扰，容易形成气流涡旋，平均风速下降。随着高度的增加，气流发展充分，平均风速增大。并且，开窗方案 A 平均风速的均值优于其他开窗方案，较开窗方案 C 提高了 36%。

由图 8 (b) 可知，开窗方案 A、开窗方案 B、开窗方案 C、开窗方案 E 沿温室竖直方向截面风速不均匀系数变化呈现出先上升后下降的趋势，主要是由于温室两侧气流相遇，造成风速在同一截面上分布不均，导致风速不均匀系数上升。随着气流的

不断发展，气流涡旋区域逐渐减小不均匀系数随之下降。开窗方案 D 风速不均匀系数曲线在竖直高度 1~3 m 呈下降趋势，由图 6 (d) 可知，这是由于背风侧与迎风侧温室底部风速具有较大差异，导致同一截面风速不均匀系数较大，但随着高度的增加，流通能力增强使得同一截面风速差异减小。

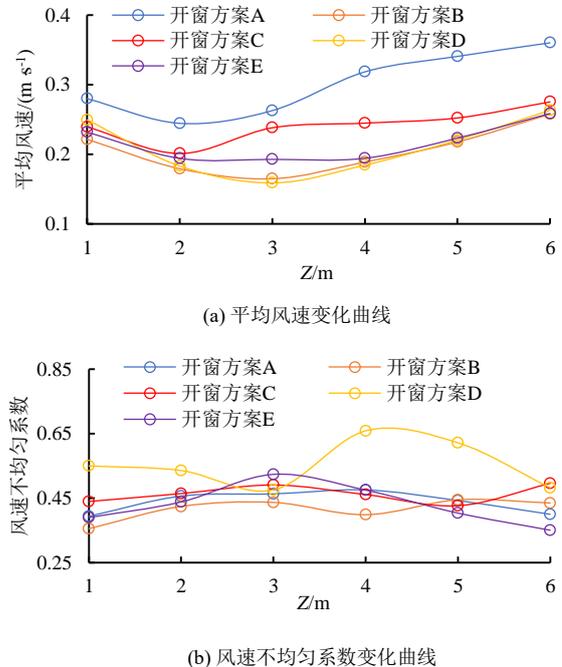


图 8 连栋温室竖直方向平均风速及不均匀系数变化

Fig.8 Variation of average wind speed and uneven coefficient in vertical direction of multi-span greenhouse

3.4 流场均匀性评价

为了全面评价不同开窗方案对温室通风效果的影响，依据式 (1) 一式 (4) 计算 5 种开窗方案总体平均温度、总体温度不均匀系数、总体平均风速、总体风速不均匀系数，计算结果如表 4 所示。

表 4 不同开窗纵横比下温室流场均匀性评价指标

| 开窗方案 | 总体平均温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 总体温度不均匀系数 | 总体平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 总体风速不均匀系数 |
|------|----------------------------|----------------------|--|-----------|
| A | 35.17 | 2.46×10^{-3} | 0.32 | 0.13 |
| B | 35.54 | 3.82×10^{-3} | 0.23 | 0.23 |
| C | 35.35 | 4.19×10^{-3} | 0.26 | 0.22 |
| D | 35.40 | 4.80×10^{-3} | 0.24 | 0.27 |
| E | 35.35 | 8.23×10^{-3} | 0.24 | 0.22 |

由表 4 可知，开窗方案 C 与其余开窗方案室内平均温度相比最大温差为 1%，表明改变开窗纵横比对温室内平均温度影响不显著。不同开窗纵横比下室内温度、风速不均匀性系数存在明显差异，具体表现为：开窗方案 A 的平均风速和风速不均匀系数明显要优于其余开窗方案，与开窗方案 C 相比，开窗方案 A 的平均风速提高了 23%，风速不均匀系数

降低了 41%，表明开窗纵横比为 0.5 时，能够增加空气上下流通能力，降低风速不均匀系数；随着开窗纵横比的增大，温度不均匀系数逐渐增加，表明开窗纵横比对连栋温室温度分布均匀性具有重要影响，其中开窗方案 A 较开窗方案 C 的温度不均匀系数降低了 41%。

4 讨论

自然通风作为连栋温室常用的通风方式之一，通常采用通风窗的合理配置以提高室内温度、风速分布均匀性。王新忠等^[21]认为侧窗和顶窗联合通风作用下，室内降温效果最好。Akrami 等^[22]在研究侧通风与顶通风对室内微气候的影响，发现侧通风口对通风的贡献最大。现有研究表明侧窗对室内气流流动以及合理分布发挥着重要的作用。因此，为了保证室内流场均匀分布，为作物生长提供适宜的生长环境，有必要开展侧通风窗对室内流场分布均匀性的研究。

本研究设计了 5 种不同开窗纵横比方案，发现在不同侧通风窗纵横比下，室内温度、风速不均匀系数具有较大差异，主要是由于自然通风条件下室内环境受到风压和热压的共同作用，表明开窗纵横比对室内流场分布均匀性具有较大影响。随着开窗纵横比的不断减小，气流的纵向进深能力不断增强，主要是由于在开窗面积一定的情况下，侧通风窗竖向尺寸越大、气流上下流通能力越强，使得室内温度、风速分布更加均匀，这与程征^[23]得出的结论一致。开窗纵横比对室内平均温度影响不显著，表明开窗纵横比主要影响气流分布均匀性，对室内温度大小影响有限。

此外，本研究并未考虑作物对连栋温室通风的影响，实际生产中作物会阻碍气流流通，造成温度、速度分布不均。另外，湿度作为农业生产必须考虑的环境因子，了解室内湿度分布均匀性具有重要的意义。因此，日后考虑将作物以及湿度等因素纳入到 CFD 仿真模型，以期能够更好指导温室设计建造。

5 结论

1) 将 27 个监测点参数实测值和模拟值进行对比，温度平均误差为 2.48%，均方根误差为 1.10 °C。风速平均误差为 8.76%，均方根误差为 2.1×10^{-3} m/s，误差在可接受范围内，验证了模型的有效性。

2) 不同开窗纵横比对连栋温室室内平均温度无显著变化，但对室内温度分布均匀性具有显著影响。开窗纵横比越大，迎风侧冷空气在温室长度方向纵深能力越弱，室内温度分布越不均匀，温度不均匀

系数越高，其中开窗方案 A 较开窗方案 C 总体温度不均匀系数减少了 41%。

3) 不同开窗纵横比下连栋温室室内温度、风速不均匀性系数存在明显差异。5 种开窗方案中，开窗方案 A 的总体平均风速和风速不均匀系数均优于其他开窗方式，与开窗方案 C 相比，平均风速提高了 23%，风速不均匀系数降低了 41%。

参考文献:

- [1] 李永欣, 王朝元, 李保明, 等. 荷兰 Venlo 型连栋温室夏季自然通风降温系统的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 44-48.
LI Yongxin, WANG Chaoyuan, LI Baoming, et al. Experimental research on cooling effect of natural ventilation in a venlo-type multi-span greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(6): 44-48.
- [2] 赵宝山, 闫浩芳, 张川, 等. Venlo 型温室室内参考作物蒸散量计算方法比较研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 61-66.
ZHAO Baoshan, YAN Haofang, ZHANG Chuan, et al. Comparison of different methods for calculating the evapotranspiration in Venlo-type greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(7): 61-66.
- [3] TOMINAGA Y, BLOCKEN B. Wind tunnel analysis of flow and dispersion in cross-ventilated isolated buildings: Impact of opening positions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 155: 74-88.
- [4] LEE J, ALSHAYEB M, CHANG J D. A study of shading device configuration on the natural ventilation efficiency and energy performance of a double skin façade[J]. Procedia Engineering, 2015, 118: 310-317.
- [5] SHETABIVASH H. Investigation of opening position and shape on the natural cross ventilation[J]. Energy and Buildings, 2015, 93: 1-15.
- [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.
- [7] 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.
BAI Zongchun, XIA Liru, LYU Xiaolan, et al. Setting of natural ventilation greenhouse windows based on CFD simulation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(12): 379-382.
- [8] 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.
- [9] RASHEED 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.
- [10] LIN Y J P, TSAI T Y. An experimental study on a full-scale indoor thermal environment using an Under-Floor Air Distribution system[J]. Energy and Buildings, 2014, 80: 321-330.
- [11] 刘晓菲, 南晓红. 装设均匀送风管对冷藏库气流流场特性的改善[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 91-96.
LIU Xiaofei, NAN Xiaohong. Improvement on characteristics of air flow field in cold storage with uniform air supply duct[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 91-96.
- [12] 陈玲, 王浩云, 肖海鸿, 等. 利用 FL-DGCNN 模型估测绿萝叶片外部表型参数[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 172-179.
CHEN Ling, WANG Haoyun, XIAO Haihong, et al. Estimation of

- external phenotypic parameters of Bunting leaves using FL-DGCNN model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(13): 172-179.
- [13] 丁露雨, 鄂雷, 李奇峰, 等. 畜舍自然通风理论与通风量估算[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 189-201.
DING Luyu, E Lei, LI Qifeng, et al. Mechanism analysis and airflow rate estimation of natural ventilation in livestock buildings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 189-201.
- [14] KITTAS C, PAPADAKIS G, BOULARD T. Greenhouse ventilation rates through combined roof and side openings: An experimental study[J]. Acta Horticulturae, 1997(443): 31-38.
- [15] PAPADAKIS G, MERMIER M, MENESES J F, et al. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(3): 219-227.
- [16] 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181-185.
GUO Wenchuan, CHENG Hanjie, LI Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181-185.
- [17] 庄智, 余元波, 叶海, 等. 建筑室外风环境 CFD 模拟技术研究现状[J]. 建筑科学, 2014, 30(2): 108-114.
ZHUANG Zhi, YU Yuanbo, YE Hai, et al. Review on CFD simulation technology of wind environment around buildings[J]. Building Science, 2014, 30(2): 108-114.
- [18] 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): 1 635-1 642.
- 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): 1 635-1 642.
- [19] 童莉, 张政, 陈忠购, 等. 机械通风条件下连栋温室速度场和温度场的 CFD 数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(6): 33-37.
TONG Li, ZHANG Zheng, CHEN Zhonggou, et al. Simulation of mechanical ventilation for Huabei-type multispan plastic greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(6): 33-37.
- [20] 赵杰强, 赵云. 机械通风连栋温室的温度场 CFD 模拟[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 76-79.
ZHAO Jieqiang, ZHAO Yun. Computational fluid dynamics simulation on temperature field of mechanical ventilation for multi-span greenhouse[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(6): 76-79.
- [21] 王新忠, 张伟建, 张良, 等. 基于 CFD 的夏季屋顶全开型玻璃温室自然通风流场分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 332-337.
WANG Xinzhong, ZHANG Weijian, ZHANG Liang, et al. Analysis of Flow Field for Full Open-roof Glass Greenhouse with Nature Ventilation in Summer Based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2016, 47(10): 332-337.
- [22] AKRAMI M, JAVADI A A, HASSANEIN M J, et al. Study of the effects of vent configuration on mono-span greenhouse ventilation using computational fluid dynamics[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 986.
- [23] 程征, 李玲玲, 亓晓琳, 等. 通风口形状对体育馆风压通风效果的影响研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(6): 106-111, 146.
CHENG Zheng, LI Lingling, QI Xiaolin, et al. Research on the influence of ventilation opening shape on the wind pressure ventilation effect of gymnasium[J]. Building Science, 2020, 36(6): 106-111, 146.

Influence of Aspect Ratio of Side Ventilation Window on Air Circulation in Terraced Greenhouses

GAO Zhenjun¹, SI Changqing¹, DING Xiaoming^{2*}, LI Wei³, HE Fen², LI Wenyang¹, ZHANG Jianbo¹

(1. College of Mechanical & Power Engineering of China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Key Laboratory of Farm Building in Structure and Intelligent Construction, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Beijing 100125, China; 3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China)

Abstract: 【Objective】 The geometry of side ventilation windows is an important design parameter of greenhouse and this paper investigates the impact of their aspect ratio on air circulation in terraced greenhouses. **【Method】** The study is based on butterfly windows of terraced greenhouses in Guangzhou, using numerical simulation and experimental data measured from a greenhouse (Window C). We modelled five aspect ratios and compared the numerical simulations with experimental data. Air circulation in the greenhouse is quantified using non-uniformity coefficients. **【Result】** The average errors between the simulated and measured temperature and wind speed are 2.48% and 8.76% respectively, and their associated root mean square errors are 1.10 °C and 2.1×10^{-3} m/s, respectively. Changes in the aspect ratio do not result in significant effect on average temperature in the greenhouses, but affect temperature variation noticeably. Among the five aspect ratios we compared, Window A gives the greatest average wind speed and highest wind uniformity coefficient. Compared with Window C, it increase average wind speed by 23% and the wind speed uniformity coefficient by 41%. **【Conclusion】** Our results show that reducing the aspect ratio of the side ventilation window as currently used by local farmers can effectively increase the uniformity of both temperature and wind speed in the greenhouse.

Key words: multi-span greenhouse; aspect ratio; natural ventilation; numerical simulation

责任编辑: 赵宇龙