

尖顶宽度对Venlo型温室微气候的影响

高振军¹, 郝笑¹, 李浩^{2*}, 李苇³, 丁小明⁴, 张晨骏⁵

(1.三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002; 2.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 3.广东现代农业装备研究所, 广州 510520; 4.农业农村部农业设施结构设计智能建造重点实验室, 北京 100125; 5.洛阳理工学院 智能制造学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:【目的】研究自然通风条件下尖顶宽度、风速对温室微气候的影响。【方法】以Venlo型连栋玻璃温室为研究对象, 采用试验测量和CFD模拟相结合的方法, 分析了自然通风条件下3种尖顶宽度温室(3.2 m, JD3.2; 3.6 m, JD3.6; 4 m, JD4)在不同室外工况下(风速0 m/s和1 m/s)气流和温度场变化特征。【结果】①对比模拟值与各测点实测值可知, 温度相对误差为0.2%~3.3%, 故数值计算模型可靠。②尖顶宽度显著影响温室内温度分布, JD3.2处理在高度方向呈自下而上升高的变化趋势, 而JD3.6处理呈自上而下降低的变化趋势。③不同室外风速条件下, JD3.2处理除热效率最优; 当室外风速为0 m/s时, JD3.6、JD4处理的除热效率和各水平层面平均温度均优于1 m/s室外风速JD3.6、JD4处理。【结论】从温室内的流场分布情况和除热效率来看, JD3.2处理整体通风降温效果最优。

关键词: Venlo型温室; 尖顶宽度; 自然通风; 数值计算

中图分类号: S26⁺3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023421

高振军, 郝笑, 李浩, 等. 尖顶宽度对 Venlo 型温室微气候的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 90-95, 104.

GAO Zhenjun, XI Xiao, LI Hao, et al. The effect of spire width on microclimate within Venlo-type greenhouses[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 90-95, 104.

0 引言

【研究意义】Venlo 型连栋玻璃温室因其土地利用率高, 内部环境调控便捷化等优点, 得到广泛应用^[1-2]。目前, 连栋温室在夏季生产过程中存在严重的高温问题^[3]。自然通风作为直接影响外部环境及温室内气流和热量交换的重要通风方式^[4-5], 对温室内环境参数的影响较大。尖顶宽度是 Venlo 型连栋温室的重要结构参数, 合理设计尖顶宽度可以有效应对当地气象条件和温室内的环境需求。目前, 国内 Venlo 型连栋温室主要有 3.2、3.6、4 m 这 3 种尖顶宽度^[6], 而不同尖顶宽度温室, 其屋顶夹角、天沟等结构也有相应变化, 进而影响温室内的通风效果。因此, 研究尖顶宽度对 Venlo 型温室环境参数的影响具有重要意义。

【研究进展】近年来, CFD 技术越来越多地被用于温室环境的研究。Boulard 等^[7-8]研究表明, 外部风

速决定了室内通风形式, 当风速为 2 m/s 时, 为风压和热压联合通风, 风速<0.5 m/s 为热压通风^[9]。王新忠等^[10]基于DO辐射模型研究了不同开窗角度(40°、60°、75°)对温室气流速度和降温效果的影响, 结果发现侧窗与顶窗合理的开窗角度, 可以有效降低室内温度。周波等^[11]构建了太阳辐射动态模型, 分析了不同天沟结构对温室内光环境分布均匀性的影响, 结果表明天沟的间距、宽度、垂直高度和厚度对温室栽培区日辐射平均值的影响程度依次递减。邹平等^[12]对 3 种不同跨度日光温室的环境参数进行了对比, 结果发现跨度变化对温室内气温、空气相对湿度、光照强度的影响具有显著差异性。温室结构是影响连栋玻璃温室微气候变化的重要因素。尖顶宽度作为 Venlo 型连栋温室顶部尖顶部分的宽度, 直接影响着温室空间布局、通风性能等, 而适宜的尖顶宽度, 会有更多的光线透过和通风空间, 有利于植物的生长和温室内的环境调节。

【切入点】但目前尖顶宽度对 Venlo 型连栋玻璃温室内气流场和温度场变化规律的研究较少。【拟解决的关键问题】因此, 以华南地区 Venlo 型连栋温室为研究对象, 采用试验和数值模拟的方法, 研究 3 种不同尖顶宽度温室在 2 种不同通风工况下温室内降温变化过程、除热效率和流场均匀性, 为温室的选型

收稿日期: 2023-09-08 修回日期: 2024-01-09

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2017YFD0701500); 农业农村部农业设施结构工程重点实验室开放课题(201903); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(232102110286)

作者简介: 高振军, 男, 山东莒县人。副教授, 研究生导师, 博士, 主要从事园艺工程和节水灌溉研究。E-mail: 570186276@qq.com

通信作者: 李浩, 男。副研究员, 研究生导师, 博士, 主要从事节水高效灌溉新技术与智能装备相关研究。E-mail: lihao01@caas.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

式为:

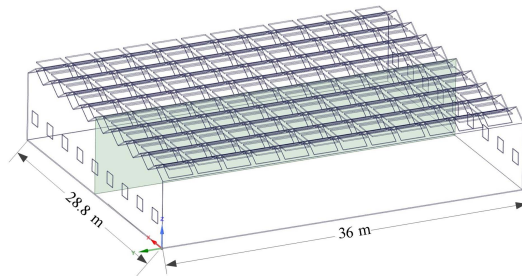
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

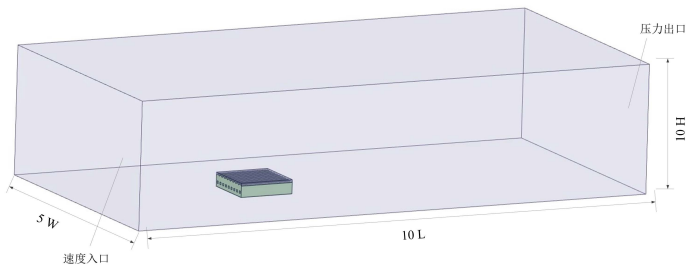
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

$$\rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$



(a) 温室三维模型图



(b) 温室计算域模型

图 2 三维模型图

Fig.2 3D model diagram

在网格生成过程中,选择非结构化网格进行划分,全域采用四面体网格模型。自然通风过程中,顶部通风口和两侧窗口附近的气流流动性较为复杂,对该区域网格加密处理。为了保证网格数对仿真结果没有影响,设计了 5 个网格划分方案,网格平均单元尺寸为 0.5~0.1 m。对 5 种网格对应的模型进行稳态计算,对比 5 种网格方案模拟结果的平均误差值,结果见表 3。由表 3 可知,随着网格数量的增加,平均误差值逐渐减小,且网格方案 3、方案 4、方案 5 之间平均误差差值较小,且都满足计算要求,考虑到计算所耗费时间,最终选择方案 3 网格划分方法。

表 3 网格无关性验证

Tab.3 Grid independence verification

网格划分方案	网格数量	平均误差/%
1	2 147 823	6.43
2	2 671 460	5.14
3	3 082 518	3.21
4	3 506 725	3.17
5	4 176 541	3.12

2.3 边界条件和模型求解

通过瞬态模拟来确定自然通风条件下不同尖顶宽度温室内温度和气流的变化情况。模型的偏微分控制方程采用压力-速度耦合算法。在空间离散化过程中,梯度采用最小二乘单元法,而动量项和能量项采用二阶逆风差分格式。此外,可实现的 k-epsilon 湍流的离散纵坐标、湍流动能和耗散率都采用了一阶离散化进行计算。在边界条件上,计算域的迎风面和背风面分

式中: G_k 表示由平均速度梯度产生的湍流动能; G_b 是由浮力产生的湍流动能^[18]; Y_M 表明波动膨胀在可压缩湍流中对整体耗散率的贡献, C_2 和 $C_{1\varepsilon}$ 是常数, σ_k 和 σ_ε 是 k 和 ε 的湍流普朗特数。

2.2 模型建立和网格划分

在简化模型时,不考虑内外遮阳系统对室内空气流动和热交换的影响。为保证自然通风模拟的准确性,利用前处理软件 SpaceClaim 建立由温室及其外流体域组成的计算域(图 2(b)),外部计算域的大小分别为温室长度(L)、高度(H)、宽度(W)的 10、10、5 倍^[15],图 2 为 Venlo 型连栋温室三维模型图。

别设置为速度入口和压力出口,温室内实体区域(地面、墙壁、屋顶)以 Wall 边界条件处理。室内外初始温度分别为 43、35.5 °C。材料物性参数见表 4。

表 4 温室材料物性参数

Tab.4 Physical parameters of greenhouse materials

参数	空气	玻璃	泥土
密度/(kg m ⁻³)	1.225	2 200	1 900
比热容/(J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1 006.42	830	2 200
导热系数/(W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.024 2	1.15	2

3 结果与分析

3.1 模型验证

图 3 为 8 月 9 日 11:00 通风 1 h 后温室内温度模拟值和实测值变化。由图 3 可知,CFD 模型在各测点上室内温度的模拟值与实测值相对误差为 0.2%~3.3%,平均相对误差为 2.05%。因此,建立的模型适用于后续对 Venlo 型连栋温室内部温度场变化的模拟。

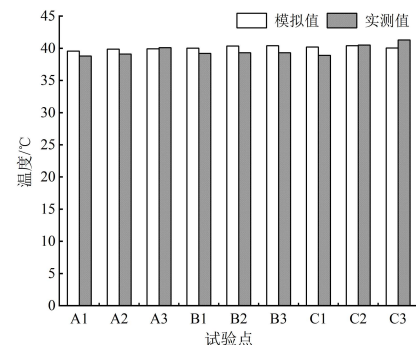


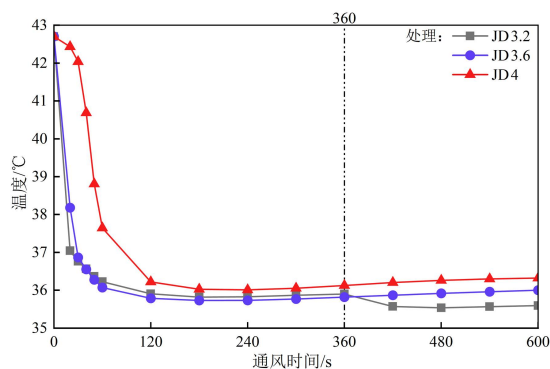
图 3 温度实测值与模拟值对比

Fig.3 Comparison between experimental value and simulated value of temperature

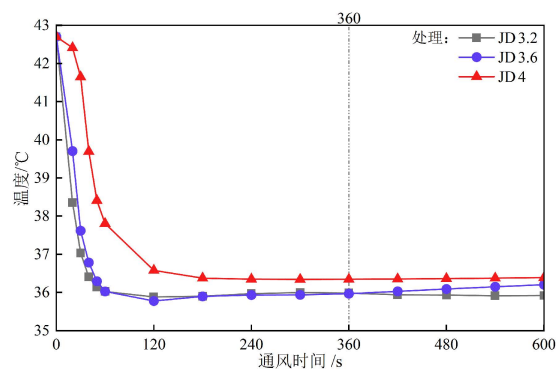
3.2 不同尖顶宽度室内温度动态变化过程

图4为通风600 s后不同尖顶宽度下温室监测点C2降温效果。由图4可知, 温室尖顶宽度越大, 温度达到动态平衡时越高。当室外风速为1 m/s时, 通风120~360 s时, JD3.2、JD3.6处理室内温度基本一致, JD4处理室内温度在通风120 s后短暂下降, 之后一直保持稳定状态; 通风360~600 s时, JD3.2处理C2测

点温度持续下降, JD3.6处理C2测点温度出现上升趋势, 这主要是因为随着温室纵深的增加, JD3.6处理室内风压作用逐渐减弱, 使靠近出风口处的室内压力低于室外压力, 出现室外热空气的回流导致温度升高。当室外风速为0 m/s时, 通风360 s后, 随着通风时间的增加, JD3.2处理室内温度呈下降趋势, 且在480 s后明显低于JD3.6、JD4处理室内温度。



(a) 室外风速 1 m/s



(b) 室外风速 0 m/s

图4 不同尖顶宽度温室降温过程对比

Fig.4 Comparison of cooling process in greenhouses with different spire widths

3.3 尖顶宽度对室内温度分布的影响

图5为通风600 s后不同尖顶宽度温室中间截面(图2)的室内温度分布图。当室外风速为1 m/s时, 随着温室尖顶宽度的增加, 高温区域面积逐渐增加, 且在入口侧到出口侧产生较为明显的梯度变化。这主要是因为随着温室尖顶宽度的增加, 风压作用减弱, 气体流动缓慢, 导致通风降温效果下降。当室外风速为0 m/s时, 温室整体降温效果较为接近, 且JD3.6、JD4处理的整体降温效果均优于室外风速1 m/s时2个尖顶宽度对应工况下的降温效果。故对于大尖顶宽度温室, 在室外风速较小且室内外温差较大时, 热压作用有助于热空气的流通, 从而降低室内温度; 而在风压作用下, 由于窗口面积占比较小, 会限制冷空气进入室内的速度, 从而导致较高的室内温度。

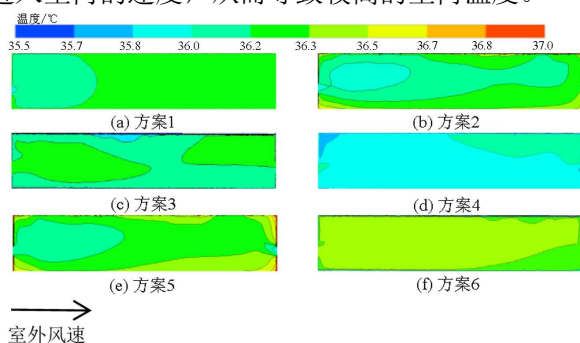


图5 连栋玻璃温室室内温度分布

Fig.5 Indoor temperature distribution of multi-spanglass greenhouse

3.4 尖顶宽度对室内风速均匀性的影响

图6分别为不同尖顶宽度温室在通风后长度和

高度方向截面风速的均匀系数。由图6(a)可知, 3种尖顶宽度温室纵截面上速度均匀性在长度方向存在差异。在温室纵深9~25 m处, 3种尖顶宽度温室均出现较大波动, JD3.2处理在纵深21 m平面上风速均匀系数达到最小为0.53, 而JD3.6、JD4处理在长度方向的风速均匀系数呈先上升后下降的趋势。这是由于受风压和热压的联合作用在温室中部区域易形成气流漩涡, 且随着温室纵深的增加, 背风侧气流受到的干扰因素减少, 风速均匀系数逐渐上升。由图6(b)可知, 水平截面的风速均匀性受温室尖顶宽度的影响较小, 随着温室平面高度的增加, 风速均匀系数呈先上升后下降的趋势, 这是由于在温室通风窗口高度以下区域, 气流连贯性较差, 不能形成良好的空气流动, 随着温室平面高度的上升, 两侧窗口带动整体通风效率使得同一高度平面气流速度差异性减弱, 而在4.5 m高度附近, 一小部分区域未能与顶窗通风结构形成有效的联合通风效果, 导致整个高度平面的风速均匀性降低。

3.5 不同尖顶宽度温室内各水平面温度特征

图7(a)、图7(b)、图7(c)分别表示尖顶宽度为3.2、3.6、4 m温室在室外风速为1 m/s和0 m/s下各平面平均温度。由图7(a)可知, 随着室外风速和室内水平面高度的增加, 各平面温度逐渐上升。当室外风速为1 m/s时, JD3.6、JD4处理各平面平均温度明显高于室外风速0 m/s时各平面平均温度, 最高温度都出现在0.6 m平面; 当风速为0 m/s时, JD3.6、JD4处理最低温度均出现在4.5 m高度平面, 均为36 °C,

这是因为在单独热压作用下温室内气流缺少外部风力驱动, 气流流动性受阻, 导致底部的降温效果减弱。当风速为 1 m/s 时, JD3.6、JD4 处理的最低温度

分别出现在 4.5 m 高度平面和 2.5 m 高度平面, 分别为 36.2、36.38 °C。

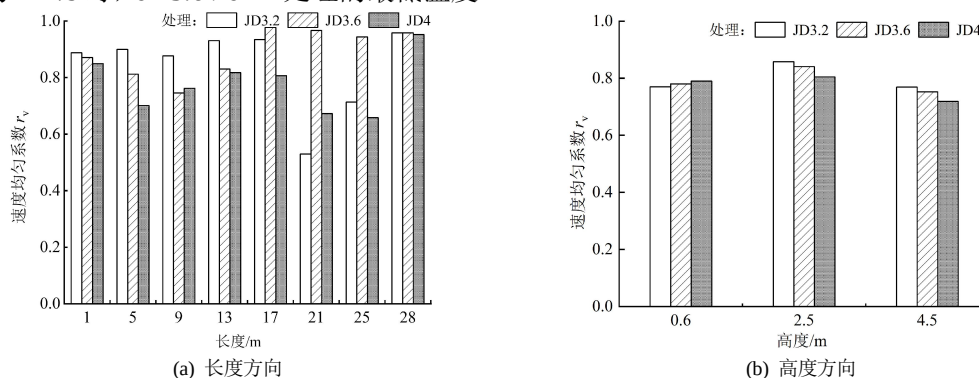


图 6 不同尖顶温室速度均匀性对比

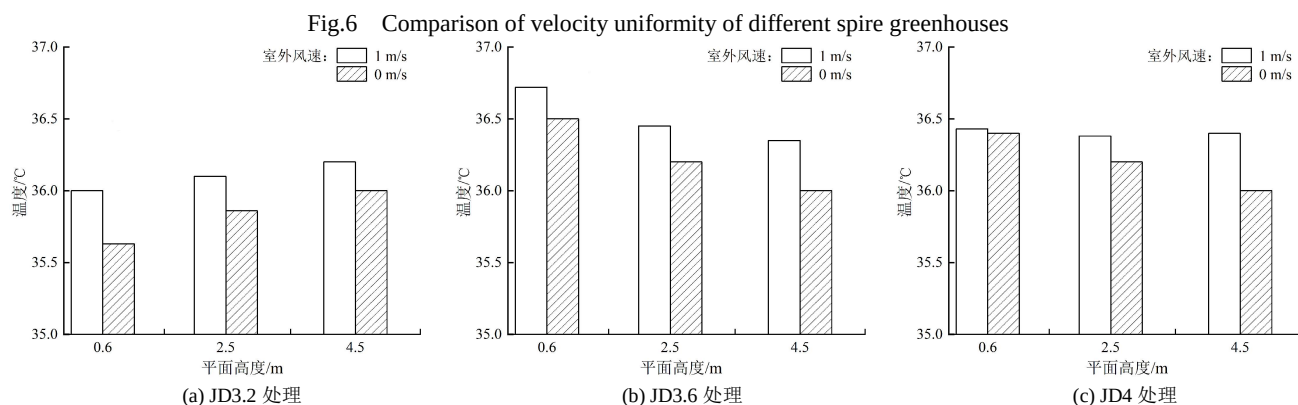


图 7 不同尖顶宽度温室内各水平面的平均温度

Fig.7 The average temperature of each level in the greenhouse with different spire widths

3.6 不同尖顶宽度温室除热效率

图 8 为不同尖顶宽度温室在不同室外风速下的除热效率。当室外风速为 1 m/s 时, JD3.2 处理的除热效率最高; 室外风速为 0 m/s 时, JD3.6 处理温室的除热效率最大。在室外风速为 1 m/s 时, 随着温室尖顶宽度的增加, 除热效率逐渐降低, 说明在热压和风压联合作用工况下, 尖顶宽度对温室除热效率的影响较为显著。当风速为 0 m/s 时, JD3.2、JD3.6、JD4 处理温室除热效率差异较小, 分别为 1.16、1.48、1.22; 室外风速为 0 m/s 时, JD3.6、JD4 处理的除热效率均优于 1 m/s 工况 JD3.6、JD4 处理, 说明大尖顶宽度温室在室外风速 0 m/s 的通风降温效果较好, 热压作用明显。

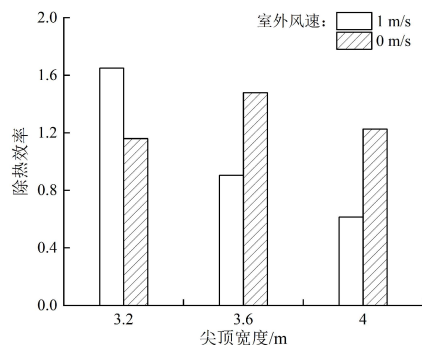


图 8 温室除热效率

Fig.8 Greenhouse heat removal efficiency

4 讨论

在温室的实际生产应用中, 影响自然通风因素是多样化的。而前人^[4,11-12]针对单一温室结构变化的研究, 会忽略不同室外风速条件下热压和风压作用对室内气流流动性的影响^[9]。本研究表明, Venlo 型温室在自然通风条件下尖顶宽度和室外风速的变化对室内风速均匀性具有较大差异。主要是由于在温室整体通风面积保持不变的情况下, 随着尖顶宽度的增加, 室内气流流动性逐渐减弱, 使得室内风速分布不均匀, 这与高振军等^[13]的研究一致。通过对室内除热效率的分析, 本研究发现随着热压驱动效应的增加, 尖顶宽度对温室通风降温效果的影响作用减弱, 主要是由于在风压和热压联合作用下, 随着温室尖顶宽度的增加, 迎面空气压力降低, 导致室内外气流交换性受阻, 进而使温室整体的降温效果减弱; 当室外风速为 0 m/s 时, 热空气的交换主要由室内外温差造成的压差主导, 削弱了尖顶宽度和室外风速的影响, 使 3.6、4 m 尖顶宽度温室整体的降温效果增加, 这与 Lyu 等^[15]的研究结果一致。综合以上分析, 说明在自然通风条件下, 不同通风配置会对室内环境造成不同程度的影响^[19]。

5 结论

1) 采用 *realize k-ε* 湍流模型构建的温室三维模型, 各测点温度实测值与模拟值的相对误差为 0.2%~3.3%, 平均相对误差为 2.05%, 故构建的数值计算模型可靠。

2) 尖顶宽度和风速对温室内环境因子影响效果显著, 且当尖顶宽度为 3.2 m, 室外风速为 1 m/s 时, 温室整体降温效果最好。

3) 相同通风配置下, 与热压和风压联合通风工况(风速为 1 m/s)相比, 热压通风(风速为 0 m/s)有利于提高 3.6、4 m 尖顶宽度温室各水平面层降温效果和除热效率。

参考文献:

- [1] 周升, 张义, 程瑞峰, 等. 大跨度主动蓄能型温室温湿环境监测及节能保温性能评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 218-225.
ZHOU Sheng, ZHANG Yi, CHENG Ruifeng, et al. Evaluation on heat preservation effects in micro-environment of large-scale greenhouse with active heat storage system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 218-225.
- [2] 束胜, 康云艳, 王玉, 等. 世界设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J]. 中国蔬菜, 2018(7): 1-13.
- [3] 柴立龙, 马承伟, 张晓蕙, 等. 地源热泵温室降温系统的试验研究与性能分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 150-154.
CHAI Lilong, MA Chengwei, ZHANG Xiaohui, et al. Experimental investigation and performance analysis on ground source heat pump system for greenhouse cooling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12): 150-154.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 许超. Venlo 型温室顶部清洗机的设计与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
XU Chao. Design and experimental research of venlo type greenhouse top cleaning machine[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021.
- [7] BOULARD T, BAILLE A. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 61(1): 37-47.
- [8] BOULARD T, MENESES J F, MERMIER M, et al. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 79(1): 61-77.
- [9] 方慧, 杨其长, 张义, 等. 日光温室热压风压耦合自然通风流量的模拟[J]. 中国农业气象, 2016, 37(5): 531-537.
FANG Hui, YANG Qichang, ZHANG Yi, et al. Simulation on ventilation flux of solar greenhouse based on the coupling between stack and wind effects[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(5): 531-537.
- [10] 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 Xinzong, 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 Machinery, 2016, 47(10): 332-337.
- [11] 周波, 孙维拓, 郭文忠, 等. 连栋玻璃温室天沟结构对栽培区光环境的影响分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 286-292.
ZHOU Bo, SUN Weituo, GUO Wenzhong, et al. Analysis and optimization of greenhouse gutter effect on radiation distribution inside multi-span greenhouses based on dynamic model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 286-292.
- [12] 邹平, 马彩雯, 肖林刚, 等. 跨度变化对日光温室光温环境的影响分析[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(12): 2 302-2 310.
ZOU Ping, MA Caiwen, XIAO Lingang, et al. Analysis of light and temperature conditions of heliogreenhouses with different span lengths[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(12): 2 302-2 310.
- [13] 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.
- [14] 李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 60-63, 92.
LI Tan, JIN Shiping, HUANG Suyi, et al. Evaluation indices of flow velocity distribution uniformity: Comparison and application[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 60-63, 92.
- [15] LYU Xin, XU Yuqing, WEI Min, et al. Effects of vent opening, wind speed, and crop height on microenvironment in three-span arched greenhouse under natural ventilation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107 326.
- [16] 严露露, 荆海薇, 鲍恩财, 等. 不同自然通风方式对日光温室性能的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 71-78.
YAN Lulu, JING Haiwei, BAO Encai, et al. Effects of different natural ventilation methods on the performance of solar greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(3): 71-78.
- [17] 李永欣, 李保明, 李真, 等. Venlo 型温室夏季自然通风降温的 CFD 数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(6): 44-48.
LI Yongxin, LI Baoming, LI Zhen, et al. CFD simulation of a naturally ventilating cooling process for a venlo greenhouse in summer[J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(6): 44-48.
- [18] 高振军, 李文杨, 丁小明, 等. 连栋温室内湿帘-风机流场特性[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 1 033-1 039.
GAO Zhenjun, LI Wenyang, DING Xiaoming, et al. Flow field characteristics of wet curtain and fan in multi-span greenhouse[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(10): 1 033-1 039.
- [19] 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.

(下转第 104 页)

in-depth analysis of water resource utilization in these regions by focusing on the Nanming River basin in the Guizhou Plateau. **【Method】** The analysis was based on the ecological footprint model - a classical method in ecological economics, and the energy ecological footprint model based on energy flow - the latest advancement in this field. Using data measured from 2010 to 2020 on water consumption and supply, we systematically analyzed the changes in water ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological deficit, and ecological pressure in the region. **【Result】** From 2010 to 2020, the annual average ecological footprint of water resources and energy in the studied region was 1.08 hm² per capita, while the annual average ecological carrying capacity was 0.562 hm² per capita. Although there was an ecological deficit in water resources, the deficit showed a declining trend over the past 10 years. The annual average ecological pressure index of water resources in the region was 2.004, indicating a sub-security state but remaining within a safe range for such ecosystems. The average ecological and economic coordination index of water resources in the region was 1.345 over the past decade, close to the optimal coordination state which is 1.414. **【Conclusion】** Our study underscores a positive trajectory in water resource management in the Nanming River basin. Energy ecological footprint per capita, thousand-yuan- GDP and ecological deficit in the basin show declining trends, while ecological carrying capacity, ecological pressure, and ecological economic coordination index exhibit fluctuating patterns. These findings can help sustainable utilization of water resources in the studied region.

Key words: Karst areas; water resource; energy value theory; water ecological footprint; sustainable development

责任编辑: 赵宇龙

(上接第 95 页)

The effect of spire width on microclimate within Venlo-type greenhouses

GAO Zhenjun¹, XI Xiao¹, LI Hao^{2*}, LI Wei³, DING Xiaoming⁴, ZHANG Chenjun⁵

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

2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Xinxiang 453002, China;

3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510520, China; 4. Key Laboratory of Structural Design and Intelligent Construction of Agricultural Facilities, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;

5. School of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: **【Objective】** The Venlo-type greenhouse is commonly used in commercial horticulture due to its efficient space utilization and superior light transmission. This study investigates the impact of spire width on microclimate within such greenhouses under natural ventilation conditions. **【Method】** The study focused on multi-span glass greenhouses. We used experimental measurement and CFD modelling to simulate the variations in temperature and airflow in the greenhouse for various spire widths: 3.2 m JD3.2, 3.6 m JD3.6 and 4 m JD4 under natural ventilation conditions when the outdoor wind speed was 0 and 1 m/s, respectively. **【Result】** ① Comparing with measured temperature at different sampling points in the greenhouse reveals that the relative error of the simulated temperature ranged from 0.2% to 3.3%, ② Spire width had a significant effect on temperature distribution in the greenhouse. In particular, temperature increased upward in the greenhouses with the JD3.2 spire, while, in contrast, temperature increased downward in the greenhouses with the JD3.6 spire. ③ Regardless of the outdoor wind speed, greenhouses with JD3.2 spire had the best heat removal efficiency. The heat removal efficiency of JD3.6 and JD4 spire and the associated temperature distribution in the greenhouses was better when the outdoor speed was 0 m/s than when the outdoor wind speed was 1 m/s. **【Conclusion】** For all spire widths we compared under different working conditions, the greenhouse with JD3.2 spire work best for ventilating and cooling the greenhouse.

Key words: venlo type greenhouse; spire width; natural ventilation; numeral calculations

责任编辑: 白芳芳