

不同自然通风方式对日光温室性能的影响

严露露^{1,2} 荆海薇³ 鲍恩财⁴ 曹晏飞^{1,2} 潘铜华^{1,2} 申婷婷^{1,2}
王昊天^{1,2} 邹志荣^{1,2,4*}

(1. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 农业农村部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

4. 农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室, 南京 210014)

摘要 为探究不同自然通风方式下日光温室室内环境因子的变化规律,提高日光温室自然通风效率,设计2种不同自然通风方式:后坡整体开窗式和后坡间隔开窗式。将分别采用后坡整体开窗式和后坡间隔开窗式通风方式的温室,依次记为G1、G2,并以传统顶通风式日光温室(G3)为对照,对上述3座采用不同自然通风方式的温室内部环境和作物生长状况进行了研究。结果表明:晴天白天,G1、G2的室内光照强度分别比G3提高了26.34%和10.16%,G1、G2、G3平均气温分别为33.7、33.8、34.8℃,平均相对湿度分别为47.15%、47.21%、44.03%,风速折减率分别为0.80、0.74、0.90;晴天13:00,G1、G2的植物冠层气温分布呈现南高北低,而G3的呈南低北高分布。G1、G2内的番茄产量分别比G3提高了19.54%、6.90%。综上,后坡整体开窗式表现最优。

关键词 日光温室; 自然通风; 后坡; 性能

中图分类号 S625.1

文章编号 1007-4333(2020)03-0071-08

文献标志码 A

Effects of different natural ventilation methods on the performance of solar greenhouse

YAN Lulu^{1,2}, JING Haiwei³, BAO Encai⁴, CAO Yanfei^{1,2}, PAN Tonghua^{1,2}, SHEN Tingting^{1,2},
WANG Haotian^{1,2}, ZOU Zhirong^{1,2,4*}

(1. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Northwest Horticultural Engineering of Ministry of Agriculture and Rural Sciences, Yangling 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

4. Key Laboratory of Protected Agriculture Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract In order to explore the changing laws of indoor environmental factors in solar greenhouses under different natural ventilation modes, and improve the natural ventilation efficiency of solar greenhouses, two different natural ventilation modes were designed including the whole window opening type and the interval window opening type of the rear slope. The greenhouses with the whole rear slope window opening type and the interval rear slope window opening type were respectively recorded as G1 and G2. Compared with the solar greenhouse (G3) using roof ventilation and top ventilation, the greenhouse environment and tomato growth and yield of the above three natural ventilation systems

收稿日期: 2019-06-28

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-NY-507); 陕西省科技厅2019年科技计划项目(2019FP-023); 陕西省重点研发计划项目(2019TSLNY01-03); 国家自然科学基金项目(31901420)

第一作者: 严露露, 硕士研究生, E-mail: luluyande@163.com

通讯作者: 邹志荣, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺研究, E-mail: zouzhirong2005@163.com

were studied. The results showed that: On a sunny day, the indoor light intensities of G1 and G2 were respectively 26.34% and 10.16% higher than that of G3, and the wind speed severance rates of G1, G2 and G3 were 0.80, 0.74 and 0.90, respectively. The average temperatures were respectively 33.7, 33.8 and 34.8 °C and the average relative humidity was 47.15%, 47.21% and 44.03%. On a sunny day at 13:00, the temperature distribution of the plant canopy of G1 and G2 showed the temperature of the south was higher than that of north, while the temperature distribution of the plant canopy of G3 was on the contrary. The yields of tomato in G1 and G2 were 19.54% and 6.90% higher than that of G3, respectively. In summary, the overall opening window on the rear slope is optimal.

Keywords solar greenhouse; natural ventilation; rear slope; performance

日光温室在我国是一种重要的温室形式,因其良好的保温节能特性而得到广泛应用,为调整农业产业结构提供了重要途径。截至2016年底,全国日光温室总面积为 $6.6 \times 10^5 \text{ hm}^2$,约占设施总面积的31.8%^[1-3]。

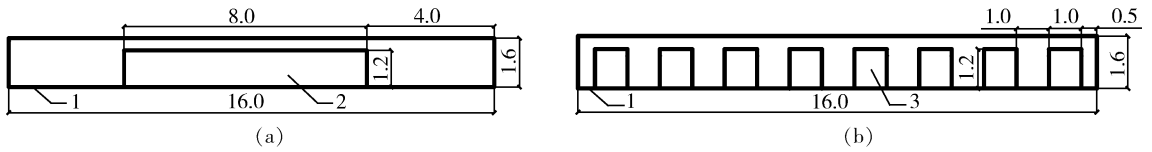
在日光温室生产中,自然通风是调节室内环境的重要技术手段。自然通风是由风压和热压的作用引起的室内外空气通过温室窗口的流动,可以降温除湿,补充CO₂,为温室内植物提供适宜的生长环境^[4-6]。温室自然通风效果的影响因素众多。已有研究认为,由于气流会在Venlo温室风口附近形成紊流,室外风向对自然通风的影响较小^[7]。也有研究表明室外风速对自然通风影响显著,而且当外界风速 $< 0.5 \text{ m/s}$ 时,热压通风起主导作用,当外界风速 $> 2 \text{ m/s}$ 时,可不考虑热压作用^[8-9]。进一步研究风速对Venlo温室内气流分布的影响发现,风速低时,室内气流分布受其影响较小且分布比较均匀一致;随着风速的增大,室内气流流速增大并伴有涡流出现,温室高度方向梯度明显^[10]。不同窗口宽度对室内风速的影响不同,杨振超^[11]认为日光温室较好的通风面积比例为18%~25%。国内还有针对日光温室不同窗口位置的通风效果研究:Wei B等^[12]将日光温室的黄麻纤维后墙分别半拆、全拆卸,形成的后墙窗口的通风降温效果均优于传统单跨温室,谢迪等^[13]研究了顶部通风对日光温室内温湿度的影响,发现温室内温湿度降低幅度随外界风速增大而增大。调查发现,以窗口位置分类,日光温室的自然通风形式主要有后墙通风口、前屋面底通风口、前屋面顶通风口、后坡通风口等^[14-16]。进一步研究不同开窗配置发现,顶侧风口同时开启时,温室通风效果优于单开顶、侧风口^[17-19]。另一方面,已有研究表明通风对植物的生长和果实品质影响显著,尤其是植物冠层的通风状况对作物的生长发育有重要影响^[20-24]。

上述研究从不同角度说明了不同因素对温室自然通风的影响,但针对不同自然通风方式对日光温室性能影响的研究较少。为进一步探究不同自然通风方式下,日光温室室内环境因子的变化规律,本研究根据我国日光温室的发展现状,在课题组前期研究的基础上^[25],拟设计2种后坡开窗自然通风方式:后坡整体开窗式和后坡间隔开窗式,并以传统前屋面顶通风式为对照,对采用上述不同自然通风方式的温室内部环境和作物生长状况进行测试分析,旨在为日光温室自然通风方式的设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试温室

本试验3座供试温室位于陕西省杨凌区西北农林科技大学园艺场(34°16'N,108°06'E)。后坡整体开窗式通风日光温室(G1)南北跨度为8 m,东西长16 m,脊高3.6 m,后墙高2.2 m,后墙结构为780 mm砖墙+100 mm聚苯板(从内到外),采用C型轻钢骨架,间距1 m,前屋面覆盖0.10 mm厚PO膜。在距地高度0.65 m处,设置宽0.8 m,长16 m前屋面底通风口。所有通风口处均有52目防虫网,用卡槽卡簧固定。G1的屋脊线上距东山墙4.0 m处,以屋脊为边,有8.0 m×1.2 m后坡窗口1个(图1(a)),采用齿条直推电动开窗机系统,使用电机为WJNA40-2.6温室专用减速电机(北京华农农业工程设计咨询有限公司,功率0.37 kW)。在后坡间隔开窗式通风日光温室(G2)的屋脊线上距东山墙0.5 m处,以屋脊为边,做1.0 m×1.2 m窗口8个(图1(b)),相邻窗洞之间的距离均为1.0 m,其他参数与G1一致。在前屋面顶通风式日光温室(G3)的前屋面距地3.38 m处做16 m×0.6 m窗口1个,其他参数与G1一致。试验期间,各温室上通风口开度为30°,前屋面底通风开度为37.5°。



单位:m Unit: m

1. 日光温室屋脊线;2. 整体开窗式后坡窗口;3. 间隔开窗式后坡窗口。

1. Sunlight greenhouse ridge line; 2. Overall windowed rear slope window; 3. Interval windowed rear slope window.

图 1 G1(a)和 G2(b)的后坡窗口分布与尺寸

Fig. 1 Distributions and sizes of rear slope windows in G1 (a) and G2 (b)

1.2 室内作物

室内种植‘佳西娜’番茄 (*Solanum lycopersicum* L.), 幼苗三叶一心时选取长势一致的定植于装有 60 L 基质的栽培袋中, 每 3 株 1 个栽培袋, 于 2018 年 8 月 1 日定植, 单蔓整枝, 留 3 穗果打顶。栽培行距为 1.0 m, 株距为 0.33 m。下挖栽培槽规格: 宽 0.3 m, 深 0.25 m, 长 5 m。试验时间为 2018 年 8 月 1 日—2018 年 10 月 31 日。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 温室内外环境测点

各温室环境测点分布相同, 详见图 2。

1) 室内空气温度测点 (图 2, 点 A~I): 使用器材为 T 型热电偶 (合柔 (上海) 电线电缆有限公司生产, 温度测量范围: $-200 \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$, 测量精度: $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$) 和安捷伦数据采集器 (美国 Agilent 公司生产, 温度测量范围 $-200 \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$, 测量精度: $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$), 自动记录, 时间间隔为 1 h。

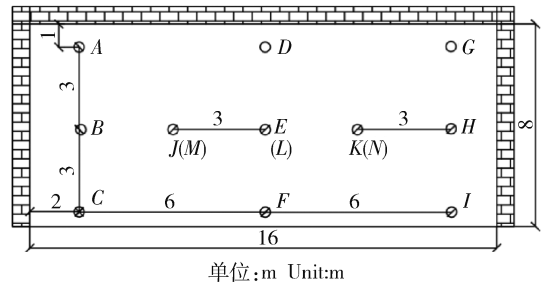
2) 室内空气湿度测点 (图 2, 点 J、K): 使用仪器为 HOBO UX100-011 (美国 Onset 公司生产, 湿度测量范围: $0\% \sim 100\%$, 测量精度: $\pm 2.5\%$), 自动记录, 时间间隔为 1 h。

3) 室内光照强度测点 (图 2, 点 L): 使用仪器为 HOBO 温度光照记录仪 UA-002-64 (美国 Onset 公司生产, 光照测量范围: $0 \sim 320 \text{ klx}$, 光谱范围: $400 \sim 700 \text{ nm}$, 光照测量精度: $\pm 10 \text{ lx}$), 自动记录, 时间间隔为 1 h。

4) 室内风速测点 (图 2, 点 M、N): 使用仪器为 Swema 03 万向微风速探头 (瑞典斯威玛公司生产, 风速测量范围: $0.05 \sim 5.00 \text{ m/s}$, 风速测量精度: $\pm 0.03 \text{ m/s}$)。自动记录, 时间间隔为 1 min。

5) 室外环境测点: 空气温湿度、太阳辐射、室外风速, 均由美国 HOBO 公司生产的 HOBO U30 便携式小型自动气象站测量, 测量高度 1.5 m, 置

于室外开阔处 (温度测量范围: $-40 \sim +75 \text{ }^\circ\text{C}$, 准确度 $\pm 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$; 湿度测量范围: $0\% \sim 100\%$, 准确度 $\pm 3\%$; 光合有效辐射 (PAR) 传感器, 光谱范围: $400 \sim 700 \text{ nm}$)。自动记录, 时间间隔为 1 min。



单位:m Unit:m

点 A~I: 气温测点; J、K: 湿度测点; L: 光照测点; M、N: 风速测点。

Points A to I are the temperature measurement points; Points J and K are the humidity measuring points; Point L is the light measuring point; Points M and N are the wind speed measuring points.

图 2 温室内距地面 1.5 m 高度测点分布图

Fig. 2 Point distribution at 1.5 m height inside the greenhouses

1.3.2 室内作物测定项目及方法

番茄生长和产量指标: 株高、茎粗、干质量、SPAD 值 (Soil-plant analysis and development) 于定植后 30 d 取样测算, 并计算相对生长速率 (RGR)。除去保护行, 将相邻两行的 10 个栽培袋作为 1 个小区, 各温室 3 个重复, 统计并计算从果实采收开始直到采收结束时的平均单果质量与单株产量。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 Matlab 2016 绘图, SPSS 19.0 软件 Duncan's 多重比较法 ($P < 0.05$) 进行数据分析。根据云量和日照时数, 将试验期间的天气类型划分为晴天和阴天 2 种典型天气^[26]。白天测试时间为 7:00—19:00, 夜晚

19:00—次日7:00。

2 结果与分析

2.1 温室内外光照强度对比

在相同天气条件下,各温室室内的光照强度变化趋势基本一致(图3)。晴天,G1、G2、G3白天平均光照强度分别为81.20、70.80、64.27 klx,室外122.11 klx,相比G3,G1、G2晴天白天光照强度分

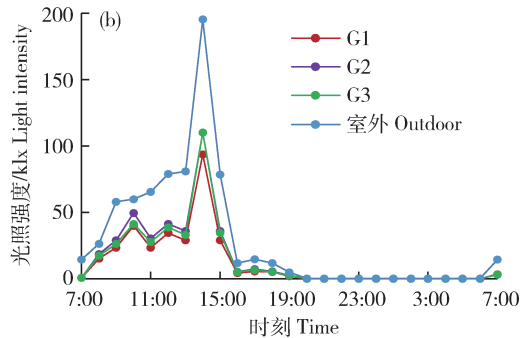
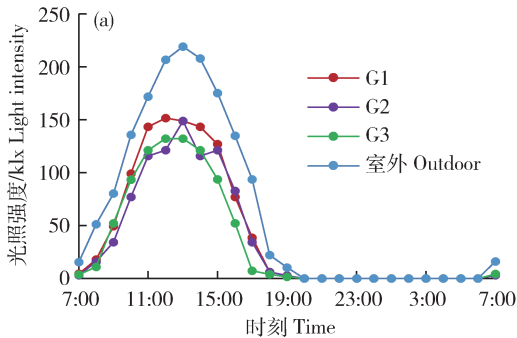


图3 典型晴天(a)和典型阴天(b)各温室内外光照强度变化

Fig. 3 Changes in light intensity inside and outside greenhouses on a typical sunny day (a) and typical cloudy day (b)

2.2 日光温室内外气温对比分析

2.2.1 典型天气下室内外气温对比

晴天白天,G1、G2、G3增温迅速,在13:00各温室内气温均达峰值(图4(a)),分别为41.2、41.2、45.0℃,G3的最高气温比G1、G2高出3.8℃。7:00—13:00G1、G2、G3和室外的平均升温速率分别为2.9、2.9、3.5、1.5℃/h。晴天白天,G1、G2、G3与室外的平均气温分别为33.7、33.8、34.8、30.0℃,G1、G2、G3室内外温差分别为1.8、2.0、2.4℃。由此可见,晴天白天,G1和G2的通风降温效果均优于G3,G1优于G2。而晴天夜间,3种温

室内部气温与室外接近而且彼此差异较小。阴天白天,G1、G2、G3增温比晴天较缓,14:00各温室内气温均达峰值(图4(b)),分别为33.8、36.2、38.0℃,此时,G3的最高气温分别比G1、G2高出4.2、1.8℃。阴天白天,G1、G2、G3与室外的平均气温分别为28.5、28.9、29.3、26.9℃,G1、G2、G3室内外温差分别为1.6、2.0、2.4℃。说明阴天条件下,G1和G2通风降温效果均优于G3,而且G1优于G2。综上分析,可知无论阴天或晴天,具有后坡连续通风窗的G1和后坡间隔通风窗的G2通风效果均优于前屋面顶通风的G3。

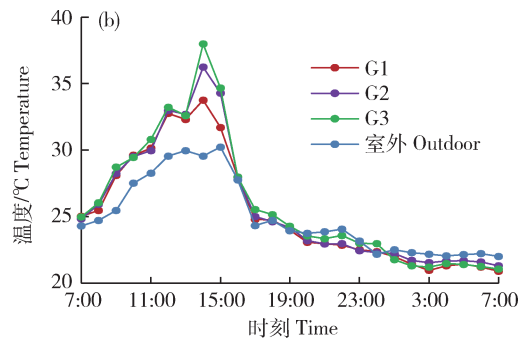
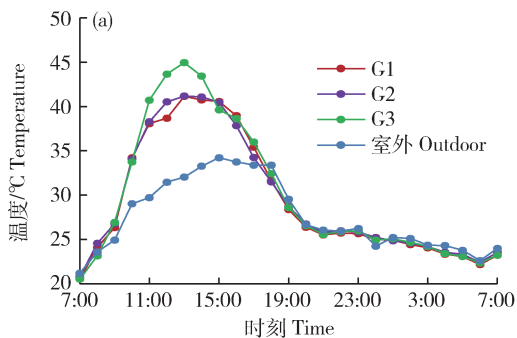


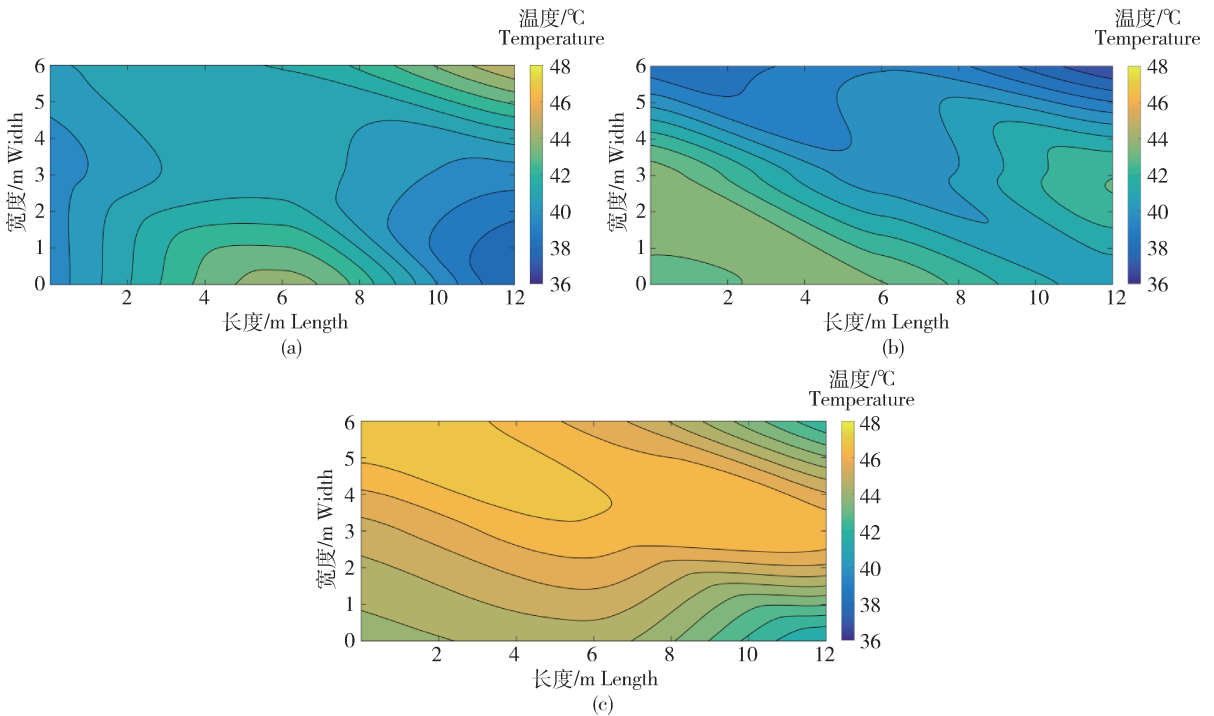
图4 典型晴天(a)和典型阴天(b)下各温室内外气温变化

Fig. 4 Changes in temperature inside and outside greenhouses on a typical sunny day (a) and typical cloudy day (b)

2.2.2 典型晴天室内植物冠层气温分布

本研究中植物冠层高度为 1.5 m。选取典型晴天 13:00 各温室内距地 1.5 m 的气温测点(即图 3 中点 A~D)的数据,各温室以气温测点 C 为坐标原点,分别向东、北做 X、Y 轴,建立二维坐标系。输入坐标值与对应气温值,cubic 插值处理,绘制植物冠层等温线分布示意图(图 5)。G3 的植物冠层气温整体高于 G1 和 G2。统计数据可知,晴天 13:00, G1、G2、G3 植物冠层平均气温为 41.2、41.1、45.0 °C。G1、G2 植物冠层气温空间分布为南高

北低,由于后坡通风口的存在,压低了出风口,使得 G1 和 G2 温室内空气对流和扰动延伸至北墙,而南向、高处的靠近薄膜附近的空气受扰动较小,热量聚集,温度升高。G3 植物冠层气温整体比 G1、G2 高,呈现南低北高分布。由于顶通风方式,空气从进风口到出风口的路径,偏向上部,对靠近北墙和下部的空气扰动较小,形成热量聚集,温度较高。综上分析,在植物冠层区域,后坡开窗式通风效果较好,而顶通风式通风效果较差,温度较高。



温室东西方向为长度方向,南北为宽度方向。

The east-west direction of the greenhouse is the length direction, and the north-south direction is the width direction.

图 5 典型晴天各温室内植物冠层气温分布

Fig. 5 Distribution of canopy temperature in greenhouses on a typical sunny day

2.3 日光温室内外风速日变化规律

图 6 示出温室内外白天(7:00—19:00)风速变化情况。在中午 12:30 之前,室外几乎无风,此时室内的风速也较小,多在 0.20 m/s 以下,G1、G2、G3 的最大风速分别为 0.16、0.44、0.15 m/s,平均风速分别为 0.02、0.05、0.01 m/s。此后,室内风速随着室外风速的增大而增大,且波动变化较为同步,G1、G2、G3 的最大风速分别为 1.52、2.36、0.74 m/s,平均风速分别为 0.08、0.10、0.04 m/s。统计数据可知,3 座温室的日平均风速折减率为 0.80、0.74、0.90。由此可见,G3 内气流运动比 G1、G2 缓慢,

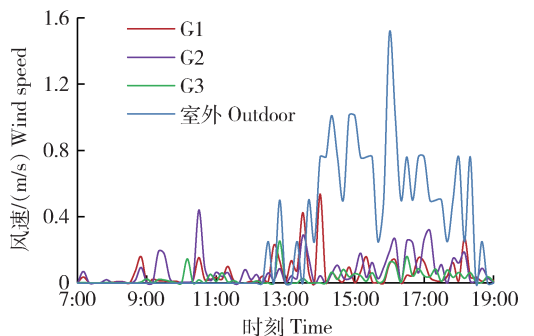


图 6 温室内外白天(7:00—19:00)风速变化

Fig. 6 Changes in wind speed inside and outside greenhouses

G2的气流运动快于G1。统计各温室内白天(7:00—19:00)不同大小风速比例可得,G1、G2、G3风速处于0.15~0.5 m/s的比例分别为6.99%、9.50%、2.27%。

2.4 日光温室内外空气湿度对比

无论晴天还是阴天,室外相对湿度均明显高于室

内(图7)。G1、G2、G3平均相对湿度晴天白天依次为47.15%、47.21%、44.03%,晴天夜间依次为76.23%、75.90%、77.58%。阴天白天依次为65.48%、65.07%、66.50%,阴天夜间依次为87.68%、86.71%、88.95%。由上述数据分析可知,与G1、G2相比,G3相对湿度白天低,夜间高,十分不利于植物的生长。

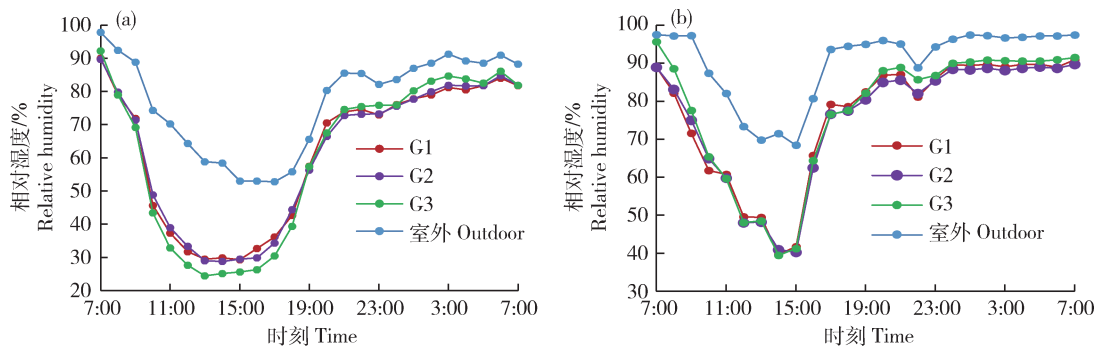


图7 典型晴天(a)和典型阴天(b)下各温室内外相对湿度变化

Fig. 7 Changes in relative humidity inside and outside greenhouses on a typical sunny day (a) and typical cloudy day (b)

2.5 日光温室内番茄生长指标与产量比较

表1示出各日光温室内番茄生长参数及产量,可知,G1内番茄株高显著小于G2、G3,而茎粗、SPAD值、单果质量显著大于G2、G3。G1、G2

内番茄根、茎干质量,相对生长速率(RGR)、单株产量均大于G3但差异不显著,经计算G1、G2内番茄单株产量分别比G3提高了19.54%、6.90%。

表1 不同类型日光温室对室内番茄生长及产量的影响

Table 1 Effect of different types of indoor solar greenhouse tomato growth and yield

温室类型 Greenhouse type	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	干质量/g Dry weight		
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
G1	39.57±1.73 b	6.47±0.54 a	0.55±0.07 a	1.26±0.10 a	2.83±0.30 a
G2	40.00±2.26 a	6.25±0.35 b	0.51±0.09 a	1.30±0.10 a	2.77±0.32 ab
G3	42.82±2.86 a	5.65±0.54 b	0.47±0.05 a	1.17±0.15 a	2.37±0.22 b

温室类型 Greenhouse type	相对生长速率 RGR	SPAD值 SPAD value	单果质量/g Fruit weight	单株产量/kg Yield per plant
G1	0.090±0.003 0 a	57.02±3.38 a	45.94±1.47 a	1.04±0.15 a
G2	0.090±0.005 0 a	53.49±2.21 b	42.21±1.34 b	0.93±0.08 a
G3	0.086±0.002 1 a	53.54±3.30 b	39.47±1.59 b	0.87±0.13 a

注:同列不同小写字母表示在5%水平下差异显著。

Note: Different lowercase letters from the same column indicate significant differences at the 5% level.

3 结 论

为提高日光温室自然通风效率,本研究在通风面积相同的情况下,对采用不同自然通风方式的日光温室即后坡整体开窗式通风日光温室(G1)、后坡间隔开窗式通风日光温室(G2)、前屋面顶通风式日光温室(G3)内部的环境和作物生长状况进行了测试分析。得出以下结论:

1)晴天白天,G1、G2的室内光照强度分别比G3提高了26.34%和10.16%,G1、G2、G3平均气温分别为33.7、33.8、34.8℃,平均相对湿度分别为47.15%、47.21%、44.03%,风速折减率分别为0.80、0.74、0.90。说明G1、G2内光照条件和通风降温效果均优于G3,为植物提供更好的生长环境。

2)G1、G2内番茄单株产量分别比G3提高了19.54%、6.90%。

参考文献 References

- [1] 李天来. 我国日光温室产业发展现状与前景[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 131-138
Li T L. Current situation and prospects of greenhouse industry development in China[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, 36(2): 131-138 (in Chinese)
- [2] 鲍恩财, 曹晏飞, 邹志荣, 申婷婷, 张勇. 节能日光温室蓄热技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 1-14
Bao E C, Cao Y F, Zou Z R, Shen T T, Zhang Y. Research progress of thermal storage technology in energy-saving solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 1-14 (in Chinese)
- [3] Cao K, Xu H J, Zhang R, Xu D W, Yan L L, Sun Y C, Xia L R, Zhao J T, Zou Z R, Bao E C. Renewable and sustainable strategies for improving the thermal environment of Chinese solar greenhouses [EB/OL]. (2019-09-02). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819327082>
- [4] 邹志荣, 邵孝侯. 设施农业环境工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 157-160
Zou Z R, Shao X H. *Facilities Agricultural Environmental Engineering* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2008: 157-160 (in Chinese)
- [5] 李永欣. Venlo型温室自然通风降温的实验研究与CFD模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2003
Li Y X. Experimental study and CFD simulation of natural ventilation and cooling in Venlo greenhouse[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003 (in Chinese)
- [6] 马承伟, 苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 90-91

- Ma C W, Miao X W. *Agricultural Bioenvironmental Engineering* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 90-91 (in Chinese)
- [7] Bot G P A. Greenhouse climate: From physical processes to a dynamic model [D]. Wageningen: Wageningen University, 1983
- [8] Boulard T, Meneses J F, Mermier M, Papadakis G. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouse [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 79(1): 61-77
- [9] 方慧, 杨其长, 张义, 程瑞锋, 张芳, 卢威. 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 H, Yang Q C, Zhang Y, Cheng R F, Zhang F, Lu W. 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 (in Chinese)
- [10] 程秀花, 毛罕平, 倪军. 风速对温室内气流分布影响的CFD模拟及预测[J]. 农机化研究, 2010, 32(12): 15-18
Cheng X H, Mao H P, Ni J. CFD simulations and predicts for effect of external airflow speeds on airflow profiles inside Venlo glasshouse[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(12): 15-18 (in Chinese)
- [11] 杨振超. 日光温室室内最佳风速指标与CFD模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006
Yang Z C. Optimal wind speed and CFD simulation in sunlight greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006 (in Chinese)
- [12] Wei B, Guo S R, Wang J, Li J, Wang J W, Zhang J, Qian C T, Sun J. Thermal performance of single span greenhouses with removable back walls[J]. *Biosystems Engineering*, 2016(141): 48-57
- [13] 谢迪, 须晖, 李天来, 王蕊. 顶部通风对日光温室室内温湿度的影响[J]. 江苏农业科学, 2010, 38(6): 573-575
Xie D, Xu H, Li T L, Wang R. Effects of top natural ventilation on temperature and humidity in solar greenhouse [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010, 38(6): 573-575 (in Chinese)
- [14] 周长吉. 周博士考察拾零(十二)日光温室自然通风原理与通风口的设置[J]. 农业工程技术, 2012(2): 38-40
Zhou C J. Dr. Zhou's investigation (12) Solar greenhouse natural ventilation principle and the setting of the vent[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2012(2): 38-40 (in Chinese)
- [15] 周长吉. 周博士考察拾零(四十五)一种活动保温被覆盖透光后屋面的日光温室[J]. 农业工程技术, 2015, 35(16): 24-26
Zhou C J. Dr. Zhou's investigation (45) A solar greenhouse with light-transparent rear roof covered by active heat preservation quilt[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2015, 35(16): 24-26 (in Chinese)
- [16] 周长吉. 周博士考察拾零(六十九)中以温室技术的结晶: 艾

- 森贝克对中国日光温室的改良与创新[J]. 农业工程技术, 2017, 37(16): 44-50
- Zhou C J. Dr. Zhou's investigation(69) The crystallization of greenhouse technology between China and Iseral; Eisenberg's improvement and innovation of Chinese solar greenhouse[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2017, 37(16): 44-50 (in Chinese)
- [17] 程秀花, 毛罕平, 伍德林. 温室自然通风研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(8): 3803-3805
- Cheng X H, Mao H P, Wu D L. Research progress on natural ventilation in greenhouse[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(8): 3803-3805 (in Chinese)
- [18] 方慧, 杨其长, 张义, 卢威, 周波, 周升. 基于CFD技术的日光温室自然通风热环境模拟[J]. 中国农业气象, 2015, 36(2): 155-160
- Fang H, Yang Q C, Zhang Y, Lu W, Zhou B, Zhou S. Simulation performance of a ventilated greenhouse based on CFD technology[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(2): 155-160 (in Chinese)
- [19] 何科爽, 陈大跃, 孙丽娟, 刘正鲁. 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
- He K S, Chen D Y, Sun L J, Liu Z L. 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 (in Chinese)
- [20] 汪小岳, 丁为民, 罗卫红, 戴剑锋. 长江中下游地区夏季温室黄瓜冠层温度模拟与分析研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 196-200
- Wang X C, Ding W M, Luo W H, Dai J F. Simulation and analysis of cucumber canopy temperature in greenhouse in Yangtze River delta during summer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(4): 196-200 (in Chinese)
- [21] 刘焕, 方慧, 程瑞锋, 杨其长. 基于CFD的人工光植物工厂气流场和温度场的模拟及优化[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(5): 108-116
- Liu H, Fang H, Cheng R F, Yang Q C. Simulation and optimization of the air flow and temperature in plant factory with artificial light based on CFD [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(5): 108-116 (in Chinese)
- [22] Teitel M, Liran O, Tanny J, Barak M. Wind driven ventilation of a mono-span greenhouse with a rose crop and continuous screened side vents and its effect on flow patterns and microclimate [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(1): 111-122
- [23] 杨振超, 邹志荣, 王军, 陈双臣, 李建明. 温室内气流运动速率对厚皮甜瓜生长发育的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 198-201
- Yang Z C, Zou Z R, Wang J, Chen S C, Li J M. Effects of air speed in greenhouse on the growth of muskmelon plants [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(3): 198-201 (in Chinese)
- [24] 赵智明, 李建明, 张艳丽, 王静静, 索江涛. 不同通风量栽培对大棚番茄果实货架品质的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(7): 98-102
- Zhao Z M, Li J M, Zhang Y L, Wang J J, Suo J T. Impacts of different ventilations in greenhouse cultivation on shelf quality of tomato fruit [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(7): 98-102 (in Chinese)
- [25] 曹晏飞, 申婷婷, 鲍恩财, 李建明. 一种具有通风结构的日光温室, 中国专利[P]. 201720678414.9, 2018-01-23
- Cao Y F, Shen T T, Bao E C, Li J M. A solar greenhouse with a ventilation structure; China, 201720678414.9 [P]. 2018-01-23 (in Chinese)
- [26] 王军伟, 洪忠举, 郭世荣, 李树海, 孙锦, 王健, 魏斌. 冬夏兼用型日光温室热湿性能分析与应用效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 190-198
- Wang J W, Hong Z J, Guo S R, Li S H, Sun J, Wang J, Wei B. Temperature humidity performance and application of solar greenhouse suiting for winter and summer [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(23): 190-198 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春