

日光温室光照强度与空气温湿度变化趋势分析

吕欢欢 牛源艺 张漫 李寒

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为研究温室内光照及空气温湿度的变化趋势,指导温室作物生产,以下沉式日光温室为研究对象,利用无线传感器网络实现光照强度与空气温湿度的实时采集,分析在夏季日光温室内部光照强度及空气温湿度的变化趋势,得到靠近温室内南侧测点(S)、北墙测点(N)、东侧测点(E)、西侧测点(W)、中部测点(M)与室外测点(O)的光照强度变化趋势,以及温室跨度1/2截面内不同位置处的空气温湿度变化特征。实验结果表明,夏季晴朗天气下,温室内外日间平均光照强度由大到小依次为O(68 267 lx)、S(53 359 lx)、M(44 770 lx)、W(44 141 lx)、N(38 907 lx)、E(28 615 lx),南北方向光照环境较东西两侧光照环境更为接近,温室内日间平均温度高于35℃,日间平均相对湿度低于50%,不利于作物生长。夏季阴天时,温室内整体光照较弱,温室整体温、光、湿环境较晴朗天气下均匀,靠近北墙区域的光照明显不足(日间平均光强7 985 lx)。

关键词: 日光温室; 光照强度; 空气温湿度; 无线传感器网络

中图分类号: S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0410-08

Analysis of Variation Trend of Light Intensity and Air Temperature and Humidity in Solar Greenhouse

LÜ Huanhuan NIU Yuanyi ZHANG Man LI Han

(Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Light is the main energy source of solar greenhouse. The change of outdoor light and temperature will cause internal environmental parameters. Light intensity, air temperature and humidity are important factors affecting the rate of plant photosynthesis. Therefore, it is important to study the changing trend of light intensity, air temperature and humidity in greenhouse to guide crop production in greenhouse. In this experiment, the sunken solar greenhouse was taken as the research object, and the wireless sensor network was used to realize the real-time collection of light intensity and air temperature and humidity. Through the analysis of the variation trend of the light intensity, air temperature and humidity, the variation trend of light intensity at the observation points can be obtained, which were located on the south (S), north wall (N), east (E), west (W), middle (M) of the greenhouse interior and outdoor (O) of the greenhouse, also the variation characteristics of air temperature and humidity at different locations within 1/2 section of the greenhouse span. The results showed that the average of light intensity at daytime during summer sunny weather in descending order was as follows: observation points O (68 267 lx), S (53 359 lx), M (44 770 lx), W (44 141 lx), N (38 907 lx) and E (28 615 lx). The light environment in the north and south direction was more similar to that in the east and west sides. The average of temperature at daytime in the greenhouse was higher than 35℃, and the average of relative humidity at daytime was lower than 50%, which was harmful to crops. On cloudy days in summer, the overall light in the greenhouse was weak, but the overall temperature, light and wet environment of the greenhouse was more uniform than that on sunny days in summer. In the area around the north wall, the light was obviously insufficient (the average of light intensity at daytime was 7 985 lx).

Key words: solar greenhouse; light intensity; air temperature and humidity; wireless sensor network

0 引言

设施农业具有单位土地产出率高、生产环境及周期可控等优点,在我国农业现代化中具有重要地位^[1]。日光温室是我国特有的、发展最快的温室结构类型,因其良好的保温特性,在我国北方地区大面积推广应用^[2]。日光温室因其封闭可控,通过物联网信息采集系统获取温室环境信息,根据作物生长需求,应用可调控的管理手段,提供作物生长最佳条件^[3-4]。无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)已成为环境监测的重要工具,通过在生产现场部署温度、光照强度、湿度、气体等传感器节点来获取环境参数^[4]。WSN 设备因其低成本特点,使得安装足够密集的传感器节点成为可能,以充分反映环境参数在空间上变化趋势^[5-6]。目前已广泛应用于温室环境参数的自动监测。

太阳辐射能是日光温室能源的主要来源^[7],在阴天、雾霾天气下,温室内光照严重不足,即便是在夏季晴朗天气下,由于日光温室塑料薄膜的覆盖、采光曲面的曲率变化、北墙及东西两侧山墙的遮挡使得温室内光照分布不均和不足^[8-11]。除此之外,温室内环境变化与温室外环境变化密切相关,温室内外光照、温室内外温度彼此之间呈极显著正相关,并与温室内外湿度呈极显著负相关^[12-13]。在南北方向上,日光温室内南部光照强度高于北部,在东西方向上,上午东部光照强度低于西部,下午则与之相反^[14],作物冠层上部光照强度在南北方向的差异比东西方向差异大,冠层下部光照强度的东西方向差异更为明显^[15]。太阳总辐射在日光温室的分布规律为南部高于北部,中部略高于东、西部^[7,16-18],且无论是晴天还是寡照的天气情况,日光温室的中部都是高太阳辐射的区域^[19]。

不同天气类型下温室内气温日变化均呈单峰曲线^[20]。日光温室中部温度最高^[21],南部温度高于北部温度,在东西方向上,上午东部温度低于西部,下午东部温度高于西部温度^[14]。晴天日光温室垂直方向表现为:温室冠层上方和中部温度分布相似,寡照天日光温室内中部温度较高,东西两侧的温度低。在寡照的情况下,温室中部不同冠层高度湿度分布差异变化大,冠层底部的空气相对湿度较低;在晴朗天气下,日光温室内空气相对湿度变化趋势为冠层下部的空气相对湿度高于冠层上部和中部^[19]。温室内空气相对湿度呈上午北部高于南部、下午北部低于南部的特点^[14]。

光调节植物光合作用中的碳同化过程^[22],同时也影响植物的生长发育,植株生长环境光照条件将

直接影响植株的生长,进而决定果实的品质^[23-25]。温度通过改变酶的活性,进而影响光合速率,研究发现空气相对湿度通过影响植物叶片气孔导度来影响光合速率^[26-27],在高湿环境下,易引发作物病害、作物徒长、落花落果^[28-29]。因此,营造有利于设施作物生长的光温湿环境是设施农业发展亟待解决的问题。

本文以日光温室为研究对象,采用 WSN 实时采集温室光照强度、温度、湿度信息,以此为基础,分析夏季温室内不同天气条件下的光照与空气温湿度变化趋势,以期为北方日光温室蔬菜合理生产、管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 系统整体设计

为分析日光温室内光照强度和空气温湿度的变化趋势,为温室作物生产提供参考,采用无线传感器网络,通过传感器节点实时采集温室内外不同位置处的光照强度和空气温湿度,并将数据发送给网关节点;网关节点将收到的数据转发到远程数据管理中心,便于用户远程分析,如图 1 所示。传感器节点采样周期设置为 5 min,对数据进行处理分析后,得到在不同天气条件下,夏季日光温室内不同位置处光照强度和空气温湿度的日变化趋势。

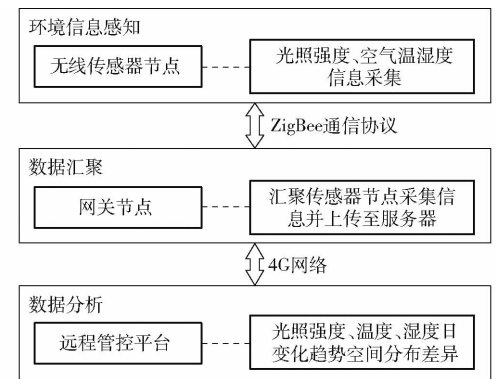


图 1 系统总体结构图

Fig. 1 System overall structure diagram

1.2 无线传感器网络监测系统设计

本实验通过基于 ZigBee 的 WSN 监测系统完成数据的实时采集,该系统由网关节点、传感器节点、远程管理平台构成,如图 2 所示。

传感器节点采用 ATmega1280 高性能处理器, ZigBee 通信模块选择 CC2431 芯片,满足低功耗 ZigBee/IEEE802.15.4 协议,以其多跳、自组网、低功耗等特点,实现与网关的实时通信^[30]。网关由 TI cortex A3 处理器、GPRS 远程通信模块 SIM900A、ZigBee 通信模块及其辅助功能模块组成,主要用来连接传感器节点和远程服务器。

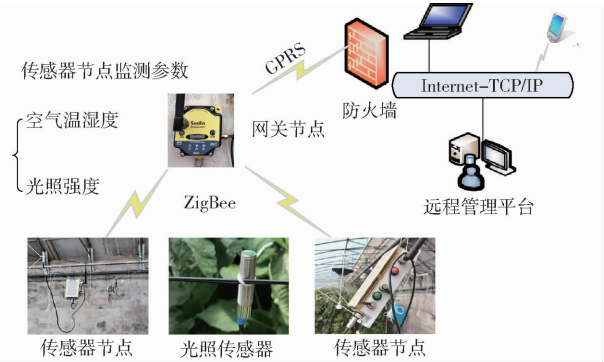


图2 基于WSN的温室环境信息自动监测系统

Fig.2 Automatic monitoring system of environmental information based on WSN in greenhouse

传感器节点分别连接光照强度和空气温湿度传感器,与网关节点形成星型拓扑结构,通过 ZigBee 协议实现传感器节点与网关节点间的数据传输,遵循 TCP/IP 通信协议建立网关与服务器的通信信道,网关节点通过 GPRS 将数据透传至远程服务器,实现数据的实时传输和远程管理平台实时接收,使用 SQL Server 数据库对数据进行存储。

通过 WSN 技术实现对温室环境的实时监测,光照强度和空气温湿度采集周期均设置为 5 min,提高数据的连续性和可靠性,为温室光强和空气温湿度时空分布差异提供有效、可靠的研究平台和重要的数据支持。

1.3 实验设计

实验于2021年6月22日—7月31日在北京市农林科学院实验基地(40°10'55"N,116°27'26"E)的日光温室(下沉式覆膜半拱形温室)内进行。温室坐北朝南,东西方向长30 m,南北跨度为7 m,脊高3.7 m,后墙高3 m,后屋面仰角30°(图3a)。前屋面使用塑料薄膜覆盖,后屋面由彩钢板构成,后墙使用水泥砂浆抹面,实心黏土砖砌墙。实验测试期间温室内种植番茄,番茄处于果期。

选取温室东西方向1/2跨度截面,共安装8个空气温湿度传感器(MXS1201型,温度量程-40~123.8℃,精度±0.4℃,相对湿度量程0~100%,测量精度±3%,北京美信凌科信息技术有限公司),其几何位置如图3a所示。空气温湿度测点1、2位于同一竖直方向,靠近温室南侧(距离南侧1 m),安装高度分别为0.5、1 m;测点3、4、5位于温室中央竖直方向,安装高度分别为0.5、1、2 m;测点6、7、8靠近北墙(距离北墙地面1 m),安装高度分别为0.5、1、2 m。

为获得进入温室内部的光照强度信息,光照传感器的安装高度高于植物冠层顶部,避免光照传感器被植物叶片所遮挡,在同一竖直方向若无遮挡物,不同高度处光照强度较为接近。光照传感器安装高

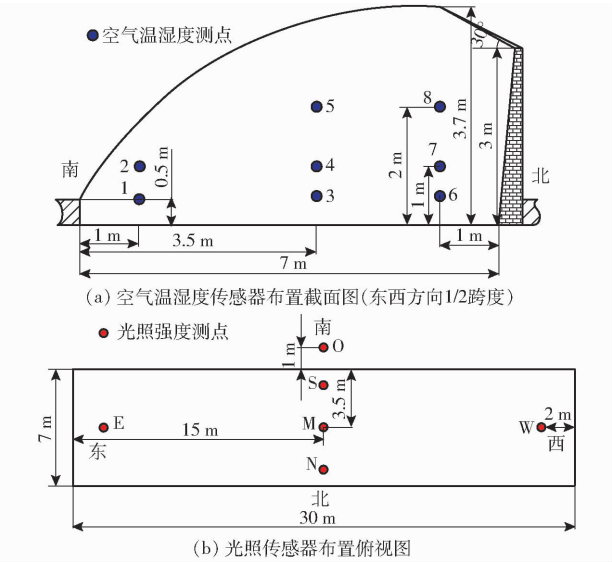


图3 温室内外传感器布置示意图

Fig.3 Schematics of sensors layout inside and outside greenhouse

度为2 m,因采光曲面的遮挡,其中测点S的安装高度略低于2 m(无遮挡情况下,该高度处的光照强度可近似认为等于2 m高度处的光强),温室内部共布置5个光照传感器,外部布置1个光照传感器(MXS1501型,量程0~180 000 lx,北京美信凌科信息技术有限公司),分别安装在靠近温室北部测点(N,距离北墙1 m),南部测点(S,距离温室南侧边缘1 m),东部测点(E,距离东侧山墙2 m),西部测点(W,距离西侧山墙2 m),中央测点(M,温室内部中央),外部测点(O,距离温室南侧外1 m),图3b为光照传感器布置俯视图。

在夏季,光照是影响温室内气候环境的最主要因素,夏季阳光充足,利于温室作物生产,但过高的光照强度会导致温室内温度过高,对植物造成高温伤害^[31],分析夏季日光温室在不同天气条件下的光强日变化趋势,为夏季温室合理生产提供建议(例如遮阳网、湿帘等)。

实验选择典型晴天3 d(2021年7月7—9日)的连续数据;阴天光照强度变化较大,分析阴天光照强度变化时,难以保证相似的天气条件,选择典型阴天1 d(2021年6月24日)的连续数据进行分析。筛选主要采光时段06:00—18:00的光照传感器采集数据,经均值处理(06:00开始,每15 min内采集3次数据取平均值),将光照强度日变化曲线相邻坐标点间隔由5 min扩大到15 min(光照强度变化剧烈,相邻坐标点时间间距不宜过大),并采用样条曲线绘制曲线,从而平滑曲线。

比较在晴天(2021年7月7—9日)和阴天(2021年6月24日、6月25日、6月29日)下,温室

内不同位置处温湿度的变化趋势,得到在晴天和阴天条件下,空气温湿度变化趋势,传感器采集周期为 5 min,通过均值处理(从 00:00 开始,每 30 min 内采集 6 次数据取平均值),将相邻坐标点的间隔由 5 min 扩大到 30 min,并采用样条曲线连接,进而平滑曲线。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 整理实验数据,利用

Origin 2019 的绘图功能绘制点线图。

2 结果与分析

2.1 光照强度日变化趋势

图 4 显示了晴天和阴天时主要采光时段内(06:00—18:00)不同测点光照强度的变化,可见室外光照条件的改变会伴随室内光照条件的改变,温室内外光照曲线总体趋势基本一致。

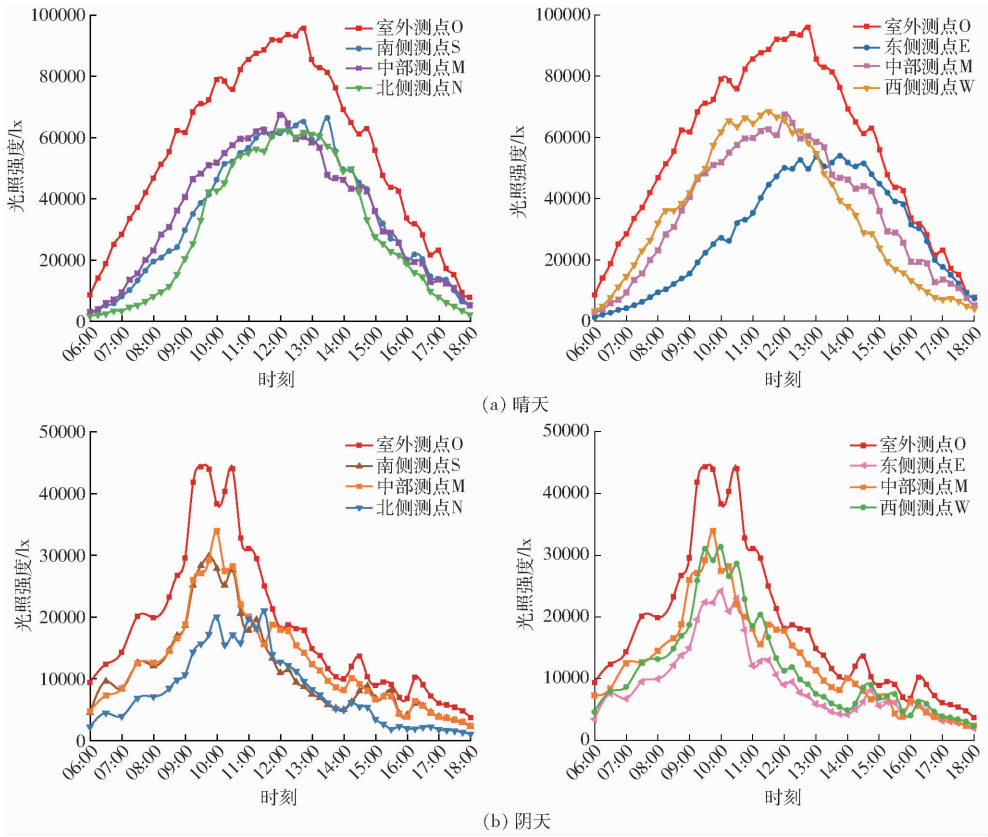


图 4 晴天和阴天温室内外不同位置处光照强度日变化曲线
Fig. 4 Diurnal variation curves of light intensity inside and outside greenhouse in sunny and cloudy days

晴天时,室外的光照强度明显高于室内 5 个观测点。06:00—18:00 光照强度平均值按从大到小依次为测点 O(68 267 lx)、测点 S(53 359 lx)、测点 M(44 770 lx)、测点 W(44 141 lx)、测点 N(38 907 lx)、测点 E(28 615 lx);最大光照强度依次为测点 O(95 942 lx)、测点 W(68 501 lx)、测点 M(67 509 lx)、测点 S(66 513 lx)、测点 N(62 362 lx)、测点 E(54 026 lx)。

如图 4a 所示,测点 O 在 06:00—12:30 光照强度逐渐上升,12:30—12:45 光照强度达到最大,13:00—18:00 光照强度逐渐下降,温室南北方向测点 S、M、N(布置间隔 2.5 m)曲线趋势一致性较好,均呈现先上升再下降的趋势,且曲线的峰值和峰值所对应的时间接近。东西方向测点 E、M、W(布置间隔 12 m)曲线一致性较差,西侧和中部光照环境较为接近,东侧的光照强度日变化曲线峰值出现的时间较中部和西部延迟 2 h 左右,且曲线峰值最低。

测点日间晴天光照强度在 20 000 lx 以上的持续时间由长到短依次为测点 O、S、M、W、E、N(表 1),分别为 10.5、8.5、8.25、8、7.25、6.75 h,光照强度在 40 000 lx 以上的持续时间从长到短依次为测点 O、M、S、W、N、E,分别为 8、5.75、5.25、5、4.75、4.25 h。晴朗天气下,06:00—18:00 温室内各点平均光照强度为室外测点 O 的 60%。

在阴天条件下,从曲线变化来看(图 4b),室外光照强度高于温室内各点的光照强度,光照强度波动较大,但 6 个测点光照强度日变化曲线趋势大致相同。随着时间推移,光照强度整体趋势为先增加后降低,局部时间段内数据存在较大的波动(可能是云层的遮盖,使得太阳直射光减弱,也可能是空气湿度较高,空气中的水分子加剧了光的折射和散射现象^[15])。温室内不同位置处的光照强度也存在着差异,南北方向,南侧和中部光照环境较为相似,北

墙处光照最差,温室中部光照最好。

由表 1 可知,阴天时日间最大光照强度从大到小依次为测点 O (44 329 lx)、M (33 915 lx)、W(31 334 lx)、S(29 860 lx)、E(24 177 lx)、N(21 012 lx), 温室内阴天日间最大光照强度为晴天最大光照强度的 50%; 日间平均光照强度从大到小依次为测点 O(18 405 lx)、M(12 674 lx)、W(11 770 lx)、S(11 374 lx)、E(9 206 lx)、N(7 985 lx), 温室内各点平均光照强度

的均值为室外测点 O 的 58%, 且为晴天各测点日间平均光照强度均值的 25%。阴天无论从最大光照强度、日间平均光照强度均明显小于晴朗天气下的光照强度。测点日间光照强度在 20 000 lx 以上的持续时间由长到短依次为测点 O(4.25 h)、W(2 h)、M(1.75 h)、S(1.5 h)、E(1.25 h)、N(0 h), 仅室外测点光照强度存在 40 000 lx 以上的时刻,持续时间仅 1.25 h。

表 1 晴天和阴天时温室内外光照强度统计
Tab.1 Statistics of light intensity data inside and outside greenhouse in sunny and cloudy days

测点	晴天				阴天			
	最大光照	平均光照	≥20 000 lx	≥40 000 lx	最大光照	平均光照	≥20 000 lx	≥40 000 lx
	强度/lx	强度/lx	时段	时段	强度/lx	强度/lx	时段	时段
O	95 942	68 267	06:30—17:00	07:45—15:45	44 329	18 405	07:30—11:45	09:15—10:30
S	66 513	53 359	08:00—16:30	09:30—14:45	29 860	11 374	09:15—10:45	
M	67 509	44 770	07:45—16:00	09:00—14:45	33 915	12 674	09:15—11:00	
N	62 362	38 907	09:00—15:45	09:45—14:30	21 012	7 958		
E	54 026	28 615	09:15—16:30	11:15—15:30	24 177	9 206	09:15—10:30	
W	68 501	44 141	07:15—15:15	08:45—13:45	31 334	11 770	09:15—11:15	

2.2 空气温湿度变化趋势

图 5 为晴朗天气下测点 1~8 的空气温湿度日变化曲线。由图 5 可知,空气温度变化与空气相对湿度变化存在着密切的联系,随着温度的升高,

空气相对湿度逐渐下降,两者呈相反的变化趋势。由图 4、5 可以看出,光照强度影响温室内温度,随着光照强度逐渐上升,温度也呈逐渐上升趋势。

如表2所示,晴天最高气温由高到低依次为测点

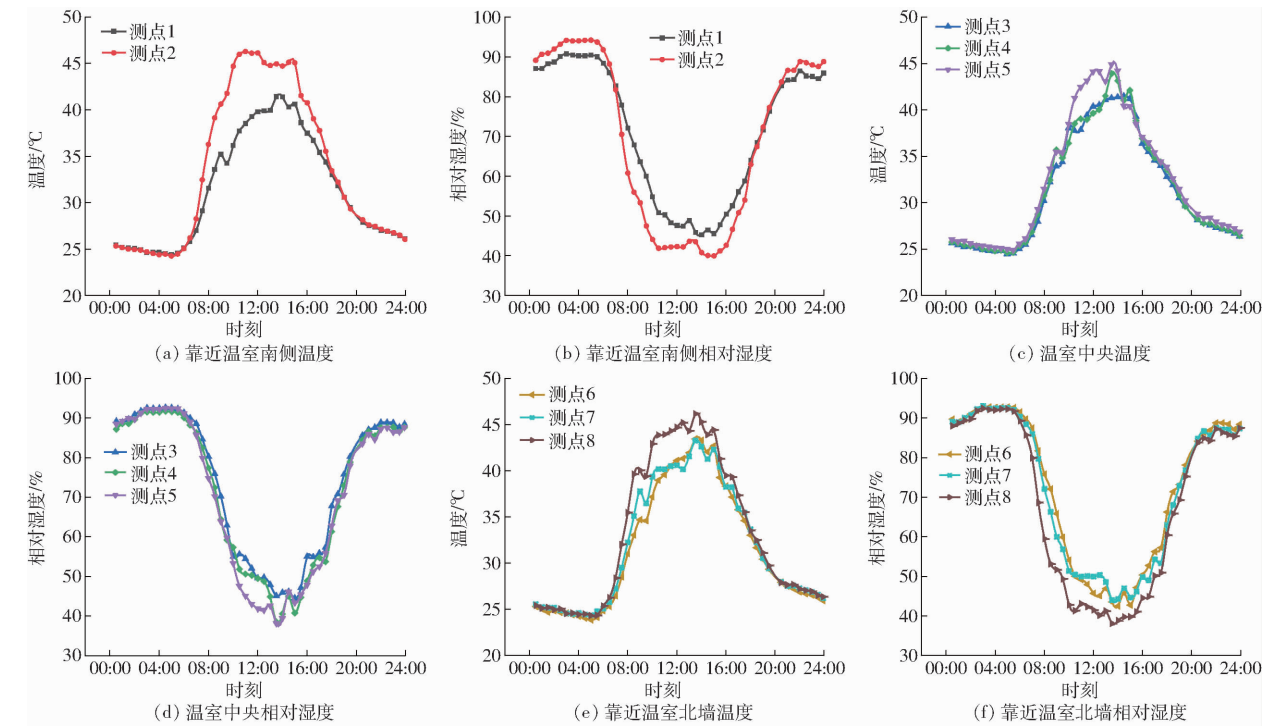


图 5 晴朗天气下温室内观测点温湿度变化曲线

Fig.5 Temperature and humidity curves of observation points in greenhouse in sunny weather

2、8、5、4、6、7、3、1, 日间平均气温(06:00—18:00)从大到小为测点 2、8、5、7、6、4、1、3,同一竖直方向,距离地面越高,其日间平均温度越高;在高度为0.5 m 与

1 m 处的位置,温室中央测点 3、4 的日平均气温相差在 0.6℃ 以内,测点 4、5 日平均气温相差在 1℃ 左右。靠近温室北墙处测点 6、7 日间平均气温相差也在

0.6℃以内,而温室南侧区域日间平均气温相差超过4℃。温室中央温度均匀性高于靠近北墙附近,北墙附近均匀性高于靠近南侧附近区域。

在同一竖直方向,测点安装位置越高,温度越高,空气相对湿度越低,日间平均相对湿度由大到小依次为测点3、6、1、4、7、5、2、8,与日间温度变化规律大致相反。如图5所示,夜间温室内不同位置处的8个测点的温湿度曲线均在一定范围内波动,曲线较为平缓,且同一竖直方向处温湿度曲线贴合程度高,夜间8个测点平均温度为(26.5±0.6)℃,平均相对湿度均为(86.8±1.5)%。

在晴朗天气下,温室内日间最高温度均超过

40℃,温室内日间平均气温高于35℃,植物生长受到高温胁迫,不同观测点均存在日间空气相对湿度低于50%的现象,不利于植物生长^[32],持续时间较长的为测点2、5、8(分别为09:00—16:30,09:00—17:00,10:00—16:00),持续时间较短的为测点6(12:30—15:30)。在夏季晴朗天气下,上述时间段内光照条件较好,各测点温度均高于35℃,在上述时间段内可采取增加温室通风、打开湿帘(增加空气湿度,可一定程度降低温度,减小高温对植物造成的伤害)、打开遮阳网(适当减弱温室内光照强度)等措施,保证夏季温室作物的正常生产。

表 2 晴天和阴天条件下温室内测点温湿度
Tab.2 Temperature and humidity at observation points in greenhouse in sunny and cloudy days

测点	晴天日间(06:00—18:00)			晴天夜间		阴天日间(06:00—18:00)			阴天夜间	
	最高气温/℃	平均温度/℃	平均相对湿度/%	平均温度/℃	平均相对湿度/%	最高气温/℃	平均温度/℃	平均相对湿度/%	平均温度/℃	平均相对湿度/%
1	41.10	35.68	58.36	26.38	85.34	30.48	27.60	75.93	24.12	90.28
2	46.24	39.84	52.44	26.35	87.71	33.66	29.06	73.86	24.13	93.61
3	41.49	35.55	61.25	26.58	88.29	29.26	27.21	80.04	24.18	93.67
4	43.91	35.97	58.32	26.70	86.69	30.03	27.53	77.62	23.31	92.46
5	44.91	37.09	56.61	27.08	87.20	30.64	28.00	77.91	24.69	92.39
6	43.47	36.37	58.66	26.20	87.86	29.99	27.46	78.32	23.95	93.06
7	43.29	36.95	57.80	26.50	87.23	31.08	27.74	77.49	24.09	93.25
8	46.19	39.30	51.07	26.50	86.13	32.43	28.53	74.05	24.08	92.35

比较图4、6,可以看到,阴天条件下不同测点日间(06:00—18:00)温湿度受光照影响,温湿度曲线

在日间也存在较大的波动。如表2所示,阴天温室内日间最高气温从高到低依次为测点2、8、7、5、1、

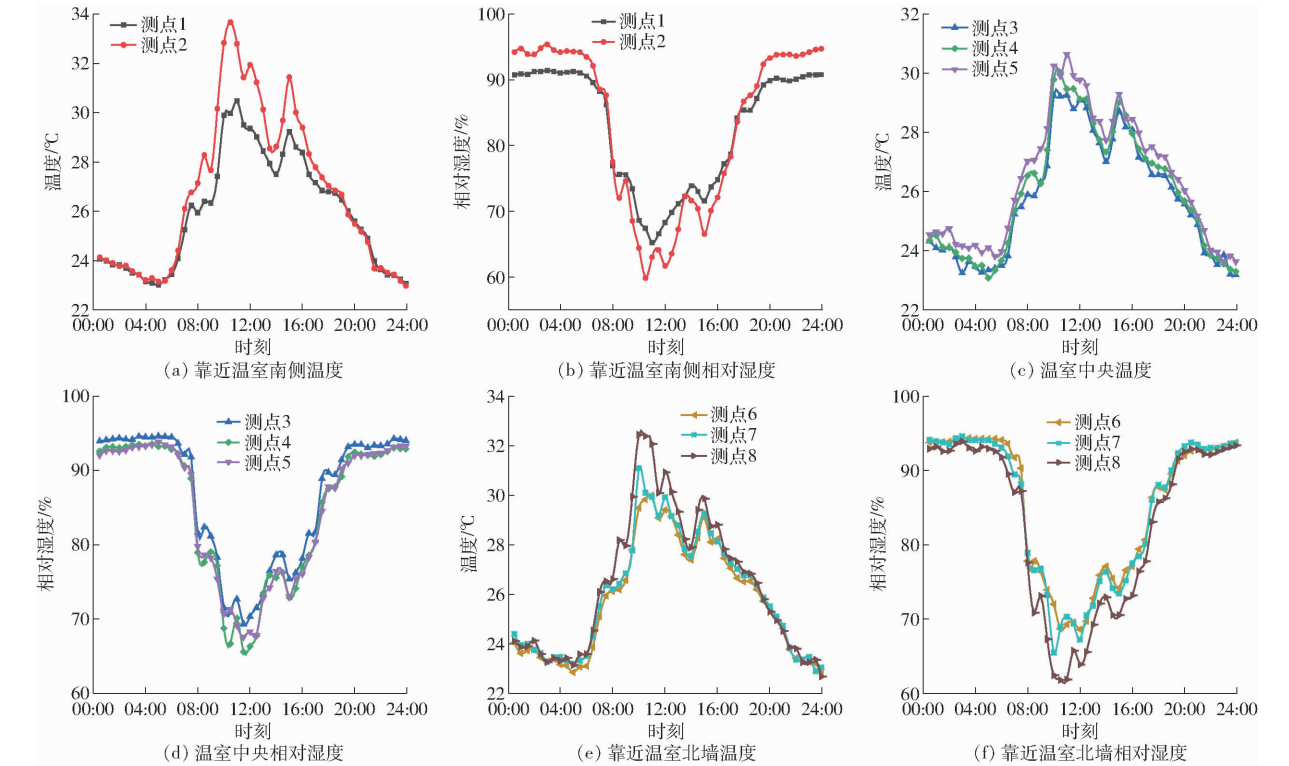


图 6 阴天温室内观测点温湿度变化曲线
Fig.6 Temperature and humidity curves of observation points in greenhouse in cloudy days

4、6、3,靠近北墙测点温度高于温室中央测点,在同一竖直方向,距离地面越高,温度越高;日间平均气温由高到低依次为测点2、8、5、7、1、4、6、3,且均低于30℃,最大值与最小值相差在2℃以内;日间平均相对湿度由大到小依次为测点3、6、5、4、7、1、8、2,不同位置处测点的日平均空气相对湿度变化不大,测点1~8分别为75.93%、73.86%、80.04%、77.62%、77.91%、78.32%、77.49%、74.05%,最大值与最小值相差在7%以内。

在夜间,温湿度波动范围较小,8个测点夜间温湿度均值相差较小(极大值与极小值相差在1.38℃,2.07%),温室内整体湿热环境较为一致;阴天夜间较晴天夜间表现为温度更低(平均温度低2.5℃),湿度更大(平均相对湿度高5.5%)。

3 结论

(1)室外光照变化会影响室内不同位置处光照的变化、进而影响空气温湿度的变化。晴天时,温室南北方向光照均匀性较好,东侧最大光照强度出现时间较西侧提前2h左右。晴天和阴天温室内平均

光照强度为分别为室外的60%和58%(由温室透光性能决定),阴天最大光照强度和日间(06:00—18:00)平均光照强度分别为晴天的50%和25%。

(2)同一竖直方向,距离地面越远的区域,其温度越高,相对湿度越低。夏季晴天温室内光照较好,但日间平均温度高于35℃,主要采光时段(09:00—16:00)空气相对湿度小于50%,不利于植物生长发育。夏季阴天温室内日间平均相对湿度低于30℃,日间空气相对湿度大于60%,但光照较弱(室内光强大于20 000 lx的持续时间仅有1~2 h,靠近北墙处关照最弱)。夜间温室内整体湿热环境较为一致,阴天夜间较晴天夜间表现为温度更低(平均温度低2.5℃),湿度更大(平均相对湿度高5.5%)。

(3)为避免温室作物受高温胁迫,晴朗天气主要采光时段内应保证良好的通风,打开湿帘来提高空气湿度,并适时打开遮阳网。阴天时温室整体光照强度弱,尤其是北墙及东西两侧山墙附近,湿热条件适宜植物生长,可采取人工补光来增强作物光合速率。

参 考 文 献

- [1] 皮杰, 柳军, 夏礼如, 等. 基于主动蓄热型日光温室环境控制系统研究与设计[J]. 中国农机化学报, 2019,40(1): 132-136. PI Jie, LIU Jun, XIA Liru, et al. Research and design of environmental control system based active heat storage solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2019,40(1):132-136. (in Chinese)
- [2] 高雪. 日光温室内光环境分布规律的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2017. GAO Xue. The research on the distribution of sun light environment in solar greenhouse[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [3] 菅燕波. 基于物联网的日光温室番茄环境信息采集及水分需求分析[D]. 泰安:山东农业大学, 2020. ZI Yanbo. Analysis on Internet of things based tomato environmental information collection and tomato water demand in solar greenhouse[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [4] KOCHHAR A, KUMAR N. Wireless sensor networks for greenhouses; an end-to-end review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,163: 104877.
- [5] FERENTINOS K P, KATSOULOS N, TZOUNIS A, et al. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment[J]. Biosystems Engineering, 2017,153: 70-81.
- [6] BHUJEL A, BASAK J K, KHAN F, et al. Sensor systems for greenhouse microclimate monitoring and control: a review[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2020,45(4): 341-361.
- [7] ZHANG X, LÜ J, XIE J, et al. Solar radiation allocation and spatial distribution in Chinese solar greenhouses; model development and application[J]. Energies, 2020,13(5):1108
- [8] 张勇, 邹志荣. 日光温室主动采光机理与透光率优化试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(11): 178-186. ZHANG Yong, ZOU Zhirong. Optimization experiment of light transmittance and active lighting mechanism of solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11):178-186. (in Chinese)
- [9] NEBBALI R, ROY J C, BOULARD T. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse[J]. Renewable Energy, 2012,43: 111-129.
- [10] TEITEL M, DERIUGIN M, HASLAVSKY V, et al. Light distribution in multispan gutter-connected greenhouses; effects of gutters and roof openings[J]. Biosystems Engineering, 2012,113(2): 120-128.
- [11] 邵丽, 杨小龙, 王蕊, 等. 设施栽培蔬菜光环境及调控研究进展[J]. 中国蔬菜, 2018(8): 19-26. SHAO Li, YANG Xiaolong, WANG Rui, et al. Research progress on light environment and regulation for facility vegetables[J]. Chinese Vegetables, 2018(8):19-26. (in Chinese)
- [12] 张恩太, 范涛, 钱宝玲, 等. 日光温室冬季环境因子变化关系研究[J]. 中国农学通报, 2017,33(22): 90-94. ZHANG Entai, FAN Tao, QIAN Baoling, et al. Change relationship of environmental factors in sunlight greenhouse in winter[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017,33(22):90-94. (in Chinese)
- [13] YU J, ZHANG Q, LIN S, et al. Effects of different management measures on environmental factors in solar greenhouse[J]. Acta Agricolae Jiangxi, 2018,30(2):80-86.
- [14] 赵建贵, 李志伟, 王文俊, 等. 日光温室番茄种植环境参数时空分布测试与分析[J]. 山西农业科学, 2019,47(12): 2172-2176.

- ZHAO Jiangui, LI Zhiwei, WANG Wenjun, et al. Spatial and temporal distribution test and analysis of tomato planting environment parameters in solar greenhouse[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(12): 2172 – 2176. (in Chinese)
- [15] 彭致功,段爱旺,郜庆炉. 节能日光温室光照强度的分布及其变化[J]. 干旱地区农业研究, 2003(2): 37 – 40.
PENG Zhigong, DUAN Aiwang, GAO Qinglu. Distribution and variation radiant intensity in solar greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003(2): 37 – 40. (in Chinese)
- [16] 曲佳, 须晖, 王蕊, 等. 日光温室番茄群体太阳总辐射量的分布规律及其与光合作用的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 178 – 184.
QU Jia, XU Hui, WANG Rui, et al. Solar radiation distribution and relationship between solar radiation and photosynthesis of tomato canopy in solar greenhouse[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2011, 39(6): 178 – 184. (in Chinese)
- [17] 韩亚东, 薛学武, 罗新兰, 等. 日光温室内太阳辐射估算模型的构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 174 – 181.
HAN Yadong, XUE Xuewu, LUO Xinlan, et al. Establishment of estimation model of solar radiation within solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 174 – 181. (in Chinese)
- [18] 许红军, 曹晏飞, 李彦荣, 等. 日光温室太阳辐射模型构建及应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 160 – 169.
XU Hongjun, CAO Yanfei, LI Yanrong, et al. Establishment and application of solar radiation model in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 160 – 169. (in Chinese)
- [19] 王旭. 日光温室环境要素时空分布计算模型研究[D]. 石河子:石河子大学, 2017.
WANG Xu. Reaserch of estimation model for temporal and spatial distribution of environmental elements in solar greenhouse[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017. (in Chinese)
- [20] 张继波, 李楠, 薛晓萍, 等. 山东冬春季双屋面日光温室温湿度变化特征研究[J]. 山东农业科学, 2016, 48(10): 129 – 133.
ZHANG Jibo, LI Nan, XUE Xiaoping, et al. Variation characteristics of air temperature and humidity in double-roof solar greenhouse in winter and spring in Shandong[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(10): 129 – 133. (in Chinese)
- [21] 张军华, 沈楷程, 陈丹艳, 等. 基于物联网的日光温室冠层特征温度时空变化规律分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 335 – 342.
ZHANG Junhua, SHEN Kaicheng, CHEN Danyan, et al. Spatial-temporal variation of canopy characteristic temperature in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 335 – 342. (in Chinese)
- [22] ZHOU C, ZHANG Y, LIU W, et al. Light quality affected the growth and root organic carbon and autotoxin secretions of hydroponic lettuce[J]. Plants, 2020, 9(11): 1542.
- [23] 张传帅, 徐岚俊, 李小龙, 等. 日光温室主要环境参数对番茄本体长势的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(10): 118 – 124.
ZHANG Chuanshuai, XU Lanjun, LI Xiaolong, et al. Effects of main environmental parameters on the growth of tomato in solar greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(10): 118 – 124. (in Chinese)
- [24] 贾海晨, 王秀峰, 史宇亮, 等. 日光温室温光环境与秋茬番茄茎叶及果实生长量的关系[J]. 山东农业科学, 2017, 49(9): 56 – 60.
JIA Haichen, WANG Xiufeng, SHI Yuliang, et al. The relationship between the growth of stems, leaves and fruits of tomato in autumn and temperature and light environment in solar greenhouse[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(9): 56 – 60. (in Chinese)
- [25] 黄薪历. LED补光对番茄幼苗和生菜生长发育、产量及品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
HUANG Xinli. Effects of supplemental light on tomato seedlings and lettuce growth and development, yield and quality[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [26] 李佳佳, 杨再强, 韦婷婷, 等. 高温与空气湿度交互对番茄叶片气孔特性的影响[J]. 北方园艺, 2020(6): 23 – 31.
LI Jiajia, YANG Zaiqiang, WEI Tingting, et al. Effect of high temperature and different air humidity on stomatal characteristics for tomato leaves[J]. Northern Horticulture, 2020(6): 23 – 31. (in Chinese)
- [27] 韦婷婷, 杨再强, 王明田, 等. 高温与空气湿度交互对花期番茄植株水分生理的影响[J]. 中国农业气象, 2019, 40(5): 317 – 326.
WEI Tingting, YANG Zaiqiang, WANG Mingtian, et al. Effects of high temperature and different air humidity on water physiology of flowering tomato seedlings[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(5): 317 – 326. (in Chinese)
- [28] 袁小康. 高湿环境对设施栽培作物生理代谢及生长发育影响的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(11): 147 – 149.
YUAN Xiaokang. Research progress in effects of high humidity environment on physiological metabolism and growing development of facility cultivation crops[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 147 – 149. (in Chinese)
- [29] PANCHAL S, CHITRAKAR R, THOMPSON B K, et al. Regulation of stomatal defense by air relative humidity[J]. Plant Physiology, 2016, 172(3): 2021 – 2032.
- [30] 李婷, 季宇寒, 张漫, 等. CO₂与土壤水分交互作用的番茄光合速率预测模型[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 208 – 214.
LI Ting, JI Yuhan, ZHANG Man, et al. Tomato photosynthetic rate prediction models under interaction of CO₂ enrichments and soil moistures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 208 – 214. (in Chinese)
- [31] COHEN S P, LEACH J E. High temperature-induced plant disease susceptibility: more than the sum of its parts[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2020, 56: 235 – 241.
- [32] ANGMO P, PHUNTOSOG N, NAMGAIL D, et al. Effect of shading and high temperature amplitude in greenhouse on growth, photosynthesis, yield and phenolic contents of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2021, 27(7): 1539 – 1546.