



张志远,朱寅宾,郭宇博,李鹏,程杰宇,赵淑梅,孙桂芝,魏珉. 柔性保温日光温室光环境分布特征及改善措施[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(03):197-205.
ZHANG Zhiyuan, ZHU Yinbin, GUO Yubo, LI Peng, CHENG Jieyu, ZHAO Shumei, SUN Jiazhi, WEI Min. Distribution characteristics and improvement measures of light environment of flexible thermal insulation solar greenhouse[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(03):197-205.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.03.18

柔性保温日光温室光环境分布特征及改善措施

张志远^{1,2} 朱寅宾^{1,2} 郭宇博^{1,2} 李鹏^{1,2} 程杰宇^{1,2} 赵淑梅^{1,2*} 孙桂芝³ 魏珉⁴

- (1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;
2. 农业部设施农业工程重点实验室, 北京 100083;
3. 北京市顺义区农业技术综合服务中心, 北京 100083;
4. 山东农业大学 园艺科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要 针对柔性保温日光温室因其独特的构造形式和材质导致北侧存在弱光区域的问题,在春季不同天气条件下,采用理论分析和试验测试的方法分析柔性保温日光温室北侧弱光原因;通过增加温室前屋面覆盖薄膜雾度和在后墙增设反光膜2种措施对柔性保温日光温室光环境进行改善。结果表明:1)柔性保温日光温室距北墙2.5和1.5 m处的日累积光量(DLI)仅为南侧测点(11.5 m处)18.78%~21.42%和12.93%~14.11%,南北分布极为不均,北侧弱光现象突出,主要原因为屋顶保温被遮光;2)将温室薄膜雾度从24.29%提升至43.94%,距北墙2.5和1.5 m处的DLI分别提升至南侧测点(11.5 m处)的27.63%~70.43%和23.02%~5.38%,表明提高薄膜雾度可以在一定程度上缓解温室北侧的弱光问题,增加北侧光量,减少南北光照的差异性;3)北墙面在增设反光膜后距北墙2.5及1.5 m处的光环境得到进一步改善,DLI分别提升至南侧测点(11.5 m处)的47.42%~77.95%以及33.74%~70.82%。散射光薄膜与北墙反光膜组合使用,可基本上解决柔性保温日光温室北侧弱光问题,其中,无论是散射光薄膜还是反光膜,晴天条件下对柔性保温日光温室北侧都有显著的增光效果。

关键词 柔性保温日光温室; 散射光; 雾度; 薄膜; 反光膜

中图分类号 S625.2;S625.3

文章编号 1007-4333(2025)03-0197-09

文献标志码 A

Distribution characteristics and improvement measures of light environment of flexible thermal insulation solar greenhouse

ZHANG Zhiyuan^{1,2}, ZHU Yinbin^{1,2}, GUO Yubo^{1,2}, LI Peng^{1,2}, CHENG Jieyu^{1,2},
ZHAO Shumei^{1,2*}, SUN Jiazhi³, WEI Min⁴

- (1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China;
3. Shunyi District Agricultural Technology Integrated Service Center of Beijing Municipality, Beijing 100083, China;
4. College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract Because of the problem that there is a weak light area on the north side of the flexible thermal insulation solar greenhouse due to its unique structure and material, the reasons for the low light on the

收稿日期: 2024-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A2020);现代农业产业技术体系北京市创新团队项目(BAIC01-2024)

第一作者: 张志远(ORCID:0009-0000-6735-3730),硕士研究生, E-mail:3291918050@qq.com

通讯作者: 赵淑梅(ORCID:0000-0002-6289-1027),教授,博士生导师,主要从事农业建筑环境工程研究, E-mail: zhaoshum@cau.edu.cn

north side of the flexible thermal insulation solar greenhouse were analyzed by theoretical analysis and experimental testing methods under different weather conditions in spring. The light environment of the flexible thermal insulation solar greenhouse was improved by increasing the haze of the film covering film in front of the greenhouse and adding reflective film on the back wall. The results showed that: 1) The DLIs at 2.5 and 1.5 m from the north wall of the flexible thermal insulation solar greenhouse were only 18.78%—21.42% and 12.93%—14.11% of the south measurement point (11.5 m). The distribution was extremely uneven in the north and south, and the weak light phenomenon on the north side was prominent, which was mainly due to the shading of the roof insulation. 2) The haze of the greenhouse film was increased from 24.29% to 43.94%, and the DLIs at 2.5 and 1.5 m from the north wall were increased from 27.63% to 70.43% and 23.02% to 35.38% at the south measurement point (11.5 m), respectively, indicating that increasing the haze of the film could alleviate the problem of weak light on the north side of the greenhouse to a certain extent. It increased the amount of light on the north side; and reduced the difference between north and south illumination. 3) The light environment of the north wall at 2.5 and 1.5 m away from the north wall was further improved after the addition of reflective film, and the DLIs was increased from 47.42% to 77.95% and 33.74% to 70.82% of the south measuring point (11.5 m), respectively. In conclusion, the combination of the scattered light film and the north wall reflective film can basically solve the problem of weak light on the north side of the flexible thermal insulation solar greenhouse. Both the scattered light film and the reflective film have a significant brightening effect on the north side of the flexible thermal insulation solar greenhouse under sunny conditions.

Keywords flexible insulated solar greenhouse; scattered light; haze; film; reflective film

近年来出现的柔性保温日光温室因其具有节约土地、降低成本等特点^[1-2],在全国各地都得到了快速发展。太阳光是日光温室的主要能量来源,日光温室的采光问题尤为重要^[3-4]。太阳辐射分为直射辐射和散射辐射,晴天大部分为直射辐射。已有研究^[5-8]表明屋面的形状和角度对直射光入射率影响较大。后屋面的投影长度、保温被的收拢位置,以及温室骨架等遮挡拦截,都会导致光照分布不均等问题。现场调研发现,柔性保温日光温室由于其独特的结构形式使其北侧光环境较差,导致蔬菜苗期趋光性明显,叶菜长势较弱、后期商品率较低等问题。

已有研究对改善日光温室光环境提出了一些简便的方法:1)采用散射光薄膜作为日光温室的覆盖材料,散射光薄膜可以将一部分直射光转化为散射光^[9],可以弱化入射角等因素对透过率的影响,弱化因上述遮挡因素导致的阴影,从而使日光温室光分布在空间上更加均匀^[10],还可以促进作物生长、提升作物的产量^[10-11]和品质^[12-16];2)在温室墙面或后屋面布置反光膜,反光膜通过反射自然光线来提升作物冠层光照度,具有张挂简便、成本低等优点,是一种有效的温室光环境调控手段^[17-18]。上述研究为散射光覆盖材料和反光膜可以改善日光温室的光环境提供了理论依据,但在柔性保温日光温室光

环境改善的领域缺乏采用散射光覆盖材料和反光膜的相关研究。

本研究拟采用理论分析和试验测试的方法,定量分析柔性保温日光温室光环境分布特征,阐明其弱光原因及区域,并从新材料应用的角度,针对性地探索改进措施,以期对日光温室光环境的改进与提升提供技术方案。

1 材料与方法

1.1 试验温室

试验柔性保温日光温室位于北京市顺义区绿奥蔬菜合作社(116.87°(E),40.10°(N))基地,该基地建于2021年,同期建设结构相同的柔性保温日光温室10栋,本研究选择其中南北相邻的2栋。温室长为104 m,跨度12.5 m,脊高5.3 m,种植作物为叶菜。温室室内外情况见图1。温室墙体及屋顶的围护材料均采用加厚柔性黑色保温被,内外表面为黑色针刺毡。为便于保温被安装,温室后屋面及后墙合二为一形成向南倾斜的弧面,保温被卷起时一般放置于温室前屋面定通风口的上方。前屋面保温被采用中卷式卷被机构。

选用的2栋温室,一栋作为基础对照温室,透光覆盖材料选用普通PO膜。另一栋作为试验处理温



(a) (b)

图 1 试验温室室内(a)外(b)情况

Fig.1 Test the indoor (a) and outdoor (b) conditions of the greenhouse

室,从改善光环境角度,采用 2 种措施:1)选用同样材质及厚度但雾度较高的散射光薄膜作为透光覆盖材料,雾度(Haze)为散射光的透射光强占总透射光强的百分数^[19],薄膜参数见表 1。2)在散射光薄膜应用的基础上,为进一步探讨反光膜的增光效果,将散射光薄膜温室分为东西两个区域,其中在西侧约一半长度的区域内,增设了北墙反光膜;为了保证东西两侧温度环境一致,中间不做物理分隔,保证空气的自然对流。反光膜为聚酯镀铝材质,安装于北墙面,距地面高度 0.5 m,安装的反光膜总高度为 1.5 m,实际安装效果见图 2。

表 1 透光覆盖材料薄膜参数

Table 1 Light transmission covering material film parameters

温室 Greenhouse	雾度/% Haze	透射率/% Transmittance	厚度/mm Thickness
对照 Control	24.29	89.18	0.144
试验 Trial	43.94	89.40	0.142



1. 前屋面;2. 后墙;3. 反光膜
1. Front roof; 2. Back wall; 3. Reflective film
图 2 日光温室反光膜效果

Fig.2 Renderings of reflective film for solar greenhouse

1.2 测试内容及方法

为研究柔性保温日光温室内南北方向的光分布特征,采用试验进行现场测定,测定指标为光合有效光量子流密度(PPFD),测试时间为 2023 年 4 月 1 日—4 月 30 日。在试验温室东西长度方向上分为安装和未安装反射膜的 2 个区域,分别取相应区域的中间断面作为测试断面;对照温室在中部避开固定保温被遮阴影响的位置取 1 个测试断面。3 个测试断面测点布置方案相同,即沿南北方向共设 4 个光合有效辐射测点,总计 12 个测点:测点 1、测点 5 和测点 9 与北墙的距离为 1.5 m;测点 2、测点 6 和测点 10 距北墙 2.5 m;测点 3、测点 7 和测点 11 距北墙 6.5 m;测点 4、测点 8 和测点 12 距北墙 11.5 m,所有测点高度为叶菜顶端,距地面约 0.5 m。光合有效辐射传感器型号为 RS-GH-N01-AL,精度±5%,测量范围 0~2 500 μmol/(m²·s),由济南仁智测控技术有限公司生产;数据通过采集模块进行采集,采集时间间隔为 10 min,最后通过型号为 485-4G 的无线通讯模块上传至昆仑中大云平台,进行数据存储和下载。

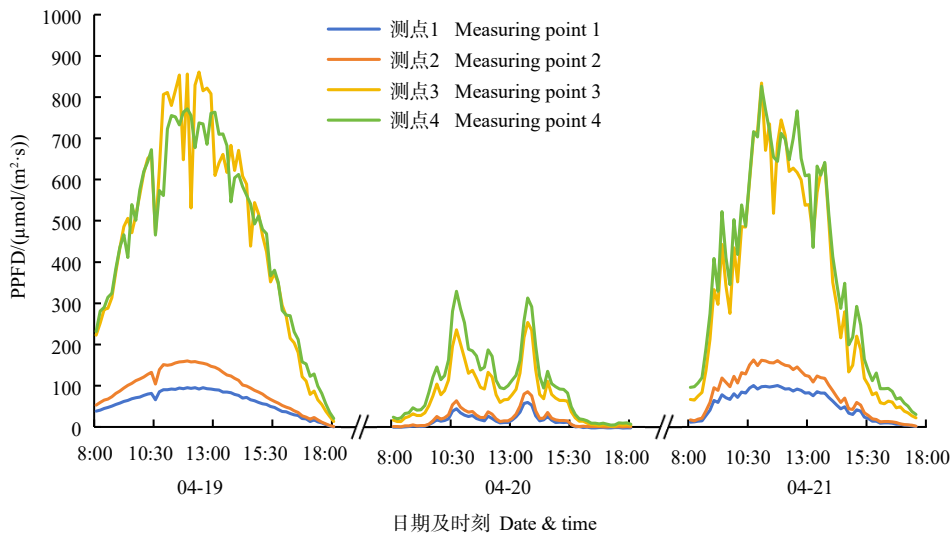
2 结果与讨论

2.1 温室南北向光分布特征

由于冬季太阳高度角较低,北侧屋面和保温被遮光问题较小,但早春季太阳辐射逐渐增强,太阳高度角也逐渐增大,温室的光分布问题更为突出,因此这里主要选取 4 月 19 日—4 月 21 日连续 3 d 的数据进行分析。虽然未做天空云量测试,但根据测试的太阳辐射情况,这 3 d 具有比较明显的晴天、阴天及多云天气特征,因此在后面的分析中,为便于阐述,定性地将

其分别称为晴天、阴天和多云天气。对照温室南北方向各测点的光合有效光量子密度(PPFD)测试结果见图3,可见:无论天气情况如何,温室南侧11.5 m处(测点4)和温室跨中6.5 m处(测点3)都能获得良好的光照环境,晴天最高可达800~900 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;与之相比,温室北侧2.5 m处(测点2)全天PPFD $<200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,

尤其是北侧1.5 m处(测点1),即种植区北侧边缘位置,全天PPFD基本都低于100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,弱光问题极为突出;与南侧2个测点相比,北侧2个测点的数值瞬时波动很小,说明该区域受到天空云量或者骨架遮光等的遮阴影响较少,因此也表明该区域日间仅能接收到少量的散射光。



测点1—测点4:沿温室南北方向距北墙分别为1.5、2.5、6.5和11.5 m,距地面高度均为0.5 m。
Measuring point 1 - measuring point 4: 1.5, 2.5, 6.5 and 11.5 m from the north wall along the north and south directions of the greenhouse, respectively, and 0.5 m from the ground.

图3 04-19—04-21日对照温室不同时刻光合有效光量子密度(PPFD)的变化

Fig.3 04-19—04-21 Changes in photosynthetically active optical quantum density (PPFD) at different times in the control greenhouse

进一步将测试数据进行统计,计算光合有效光量子密度的日累积量(DLI),结果见表2。如果以南侧测点(11.5 m处)的DLI为100%,温室跨中测点的光量与南侧基本持平或略有下降,但是距北墙2.5和1.5 m处,3天日DLI仅为南侧的18.78%~

21.42%和12.93%~14.11%,无论从光量和波动范围,更加直观地阐明了北侧2.5 m以北很难接收到直射辐射,全天基本处于弱光区域,这也直接揭示了生产调研中发现的北侧作物生长受限的主要原因。

表2 对照温室各测点日累积光量(DLI)

Table 2 Daily Accumulated Light (DLI) at each measurement point in the control greenhouse

日期 Date	距北墙 1.5 m 1.5 m from the north wall		距北墙 2.5 m 2.5 m from the north wall		距北墙 6.5 m 6.5 m from the north wall		距北墙 11.5 m 11.5 m from the north wall	
	DLI/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	比例/% Percentage	DLI/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	比例/% Percentage	DLI/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	比例/% Percentage	DLI/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	比例/% Percentage
04-19	2.22	12.93	3.42	19.92	17.33	100.93	17.17	100
04-20	0.49	12.96	0.71	18.78	2.70	71.43	3.78	100
04-21	1.91	14.11	2.90	24.42	12.11	89.44	13.54	100

为阐明导致这一分布特征的原因,本研究结合温室剖面形状、尺寸以及保温被收拢放置位置(图4)等进行分析。

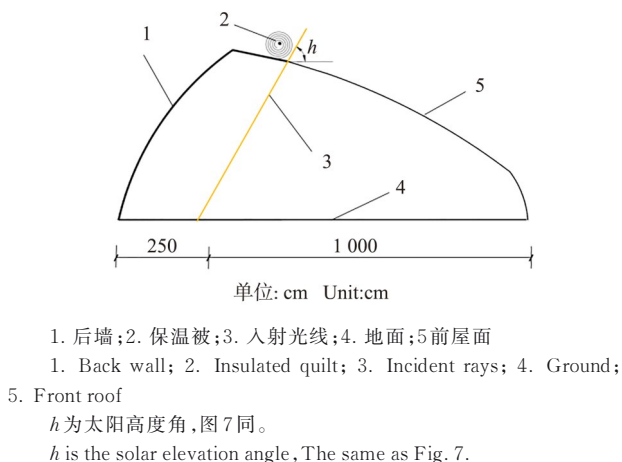


图4 保温被遮挡光线示意图

Fig.4 Schematic diagram of light blocking by insulation quilt

通常,太阳高度角(h)是某地太阳光线与通过该地与地心相连的地表切面的夹角,随太阳赤纬角和太阳时角的变化而变化,计算公式^[20]为:

$$\sin h = \cos \varphi \cos \sigma \cos \omega + \sin \varphi \sin \sigma \quad (1)$$

式中: φ 为北纬纬度,($^{\circ}$); ω 为太阳时角,($^{\circ}$); σ 为太阳赤纬。 σ 和 ω 的计算公式为:

$$\sigma = 23.45 \cos(360(n - 172)/365) \quad (2)$$

式中: n 为从1月1日起至试验当天的时间,d。

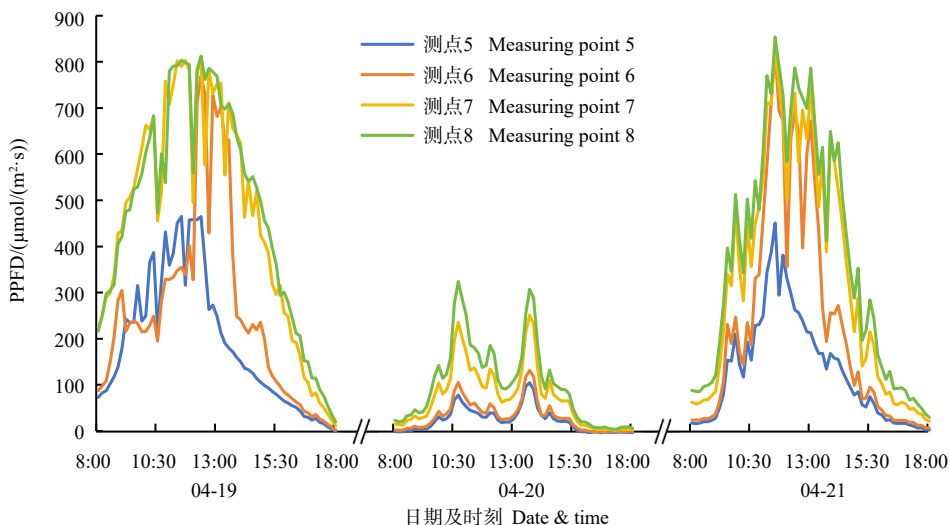
$$\omega = 15(t - 12) \quad (3)$$

式中: t 为真太阳时。

根据北京地区的地理纬度,计算得到4月21日中午太阳高度角为 61° ,此时直射光因屋顶保温被的遮挡而无法直射到距北墙2.5 m以内区域,因此导致了该区域成为弱光区,可见保温被的卷放位置对确保温室北侧的光环境至关重要,这一点在生产管理中往往被忽视。其他时段直射光线虽然会照射到北侧,但是保温被下面有1.2 m宽的通风口,其网状防水底板和防虫网等结构也会遮光;此外,传统日光温室,无论土墙还是砖墙,都是平整的表面,且颜色相对较浅,具有一定的反光特性,但是该柔性保温温室的特殊构造形式及壁面粗糙的黑色针刺毡材质表面,均无法起到反光作用,相反还有一定的吸光效果,这无疑加剧了温室北侧的弱光环境。

2.2 散射光薄膜对温室光分布的改善效果

为改善现有温室整体光分布的均匀性,减少遮光影响、增加北侧光量,首先探讨散射光薄膜的应用效果,同样选择4月19日—4月21日连续3天的试验温室数据进行分析,结果见图5。可以看出,温室北侧2个测点的光照环境得到显著改善,其中



测点5—测点8:沿温室南北方向距北墙分别为1.5、2.5、6.5和11.5 m,距地面高度0.5 m。

Measuring point 5 - measuring point 8: 1.5, 2.5, 6.5 and 11.5 m from the north wall along the north and south directions of the greenhouse, respectively, and 0.5 m from the ground.

图5 04-19—04-21日增加散射光薄膜后温室光合有效光量子密度(PPFD)的变化

Fig.5 04-19—04-21 Changes in photosynthetically effective optical quantum density (PPFD) in greenhouse after increasing the scattered light film

2.5 m处测点6在中下午的部分时段,瞬时光照水平高甚至基本可以接近跨中水平,而北侧1.5 m处测点5,日间最高光照水平也高于 $400\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

各测点光照日累积值DLI见表3。仍以南侧11.5 m处测点日累计光量为100%进行分析,温室跨中6.5 m处的DLI值为南侧的106.25%~117.38%,光照水平超过南侧;同时,北侧的2.5 m和1.5 m处,累计光量也得到了提升,分别达到南侧的27.63%~70.43%和23.03%~35.38%,表明增加薄膜雾度可以显著改善温室北侧的光照环境,南北光照的差异性减少,均匀性提升,其中晴天改善效果更为突出。

表3 增加散射光薄膜后温室各测点日累积光量(DLI)

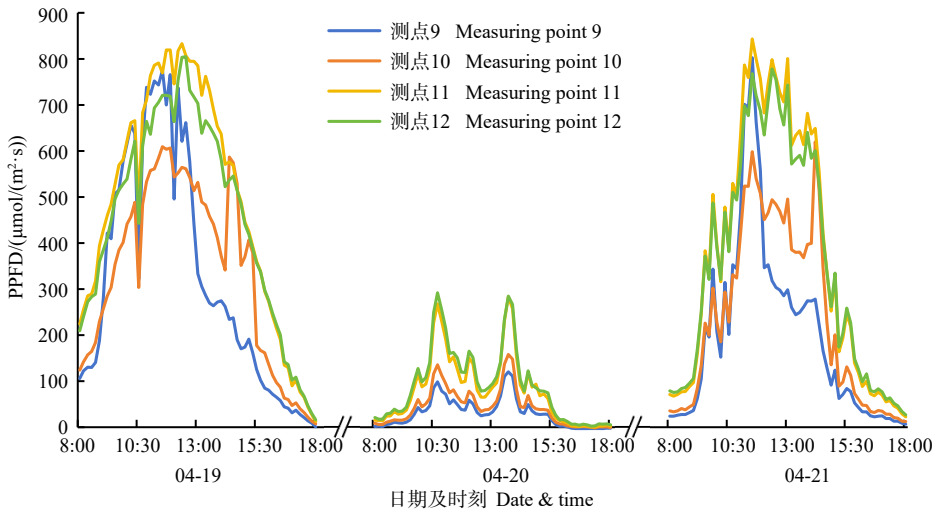
Table 3 Daily Cumulative Light (DLI) at each measurement point in the greenhouse after increasing the scattered light film

日期 Date	距北墙 1.5 m 1.5 m from the north wall		距北墙 2.5 m 2.5 m from the north wall		距北墙 6.5 m 6.5 m from the north wall		距北墙 11.5 m 11.5 m from the north wall	
	DLI/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	比例/% Percentage	DLI/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	比例/% Percentage	DLI/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	比例/% Percentage	DLI/ ($\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	比例/% Percentage
04-19	5.24	35.38	10.43	70.43	17.37	117.29	14.81	100
04-20	0.70	23.03	0.84	27.63	3.23	106.25	3.04	100
04-21	3.84	33.71	6.89	60.49	13.37	117.38	11.39	100

2.3 反光膜对温室北侧的增光效果

虽然增加透光面薄膜的雾度,改善了温室部分的光环境,但是粗糙黑色针刺毡材质的表面会弱化这种改进效果,因此进一步探索了增设后墙反光膜的效果。

反光膜设置在试验温室的西侧,图6示出试验温室西侧散射光薄膜与反光膜共同作用下的温室南北方向PPFD分布。可以看出,在试验温室西部区域,由于反光膜的设置,北侧1.5 m处测点9的光照日变化规律发生了显著改变,在晴天和多云天气条件下上午接近中午的一段时间内,PPFD最高水平可以达到温室跨中和南侧的光照水平;而2.5 m处测点10虽然下午也呈现出了部分时段达到跨中和南侧光照水平的现象,但整体上表现为全天光照水平更加均衡。



测点9—测点12:沿温室南北方向距北墙分别为1.5、2.5、6.5和11.5 m,距地面高度0.5 m。
Measuring point 9 - measuring point 12: 1.5, 2.5, 6.5 and 11.5 m from the north wall along the north and south directions of the greenhouse, respectively, and 0.5 m from the ground.

图6 04-19—04-21增加散射光薄膜和反光膜后的日光温室不同时刻光合有效光量子密度(PPFD)的变化

Fig.6 04-19—04-21 Changes of photosynthetically active light quantum density (PPFD) at different times in the solar greenhouse after the addition of scattered light film and reflective film

各测点日累积光量 DLI 见表 4。仍然将温室南侧的光照作为 100%，6.5、2.5 及 1.5 m 处 3 天日累计光照水平分别是南侧的 89.97%~107.79%、47.42%~74.26% 以及 33.74%~70.82%，与单纯散射光薄膜条件下的光照环境相比，跨中位置基本上没有增幅，而北侧的 2 个测点增幅显著，其中 1.5 m 处最大增幅达 1 倍以上，温室南北的光分布更加

均匀，这一方面说明反光膜的影响范围主要集中在北侧，另一方面也表明采用散射光薄膜和北墙反光膜的措施，可基本上解决柔性保温日光温室北侧弱光问题。这一点在后期生产跟踪调研中也得到了印证，即温室生产者反映温室北侧区域的蔬菜苗期趋光性得到明显改善，且作物长势良好、采收时商品率提升至 90% 以上。

表 4 增加散射光薄膜和反光膜后温室各测点日累积光量(DLI)

Table 4 Increasing the daily accumulated light (DLI) of each measurement point in the greenhouse after increasing the scattered light film and reflective film

日期 Date	距北墙 1.5 m 1.5 m from the north wall		距北墙 2.5 m 2.5 m from the north wall		距北墙 6.5 m 6.5 m from the north wall		距北墙 11.5 m 11.5 m from the north wall	
	DLI/ (mol/(m ² ·d))	比例/% Percentage	DLI/ (mol/(m ² ·d))	比例/% Percentage	DLI/ (mol/(m ² ·d))	比例/% Percentage	DLI/ (mol/(m ² ·d))	比例/% Percentage
04-19	11.72	70.82	12.29	74.26	17.84	107.79	16.55	100
04-20	1.11	33.74	1.56	47.42	2.96	89.97	3.29	100
04-21	7.19	54.93	8.70	66.46	13.65	104.28	13.09	100

试验温室东西两侧在 2 种薄膜覆盖条件下，南侧测点的日间光照有所差异，分析原因如下：一是测点所处位置与温室骨架的关系有所差异，二是测点对应前屋面薄膜污染程度可能不同。但是整体光照水平是一致的。

为阐明反光膜能够影响的距离，结合温室剖面形状、尺寸及图 7 所示的反光膜作用示意图进行分析。以 4 月 21 日为例，上午 08:00 时太阳高度角为 30°，此时反射的直射光线覆盖范围是距北墙 1.30~2.53 m；上午 09:00 时太阳高度角为 41°，此时反

光膜刚好被保温被遮挡，只能反射散射光；到下午 15:00 时太阳高度角为 41°，直射光线又可以照射到反光膜，可见在该日条件下反光膜作用距离主要在距北墙 1.3~2.5 m 范围。根据上述分析，4 月 21 日到夏至这段时间随着北京正午太阳高度角逐渐增大，反光膜受直射光照射的时间逐渐缩短，夏至到冬至随着北京正午太阳高度角逐渐减小，反光膜受直射光照射的时间逐渐增多。

3 结 论

本研究针对新型柔性保温日光温室生产中存在的问题，开展了温室内光环境分布特征及其改进措施的春季试验研究，主要得到以下结论：

柔性保温日光温室由于其特殊的剖面形式、保温被管理方式以及所用材质，导致其内部南北方向光照环境分布不均的问题，根据测试结果分析，温室跨中及以南区域，均能获得良好的光照环境，日间光照水平基本持平，晴天光合有效光量子密度 PPFD 最高达 800~900 μmol/(m²·s)，与之相比，温室北侧 2.5 和 1.5 m 测点处的日累积光量，仅为南侧区域的 18.78%~21.42% 和 12.93%~14.11%，北侧弱光问题极为突出。

作为改进措施，首先选择散射光薄膜作为温室

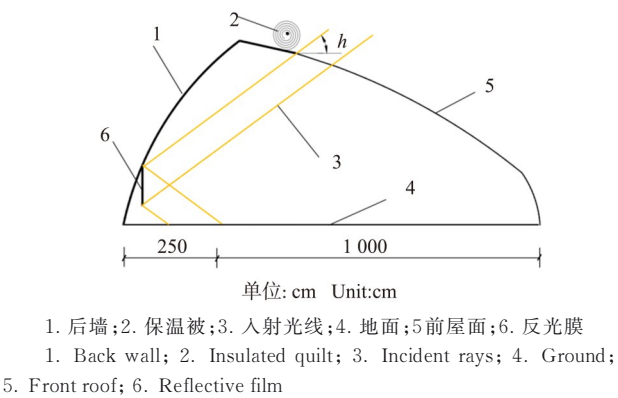


图 7 反光膜作用距离示意图

Fig.7 Schematic diagram of the action distance of the reflective film

的透光覆盖材料。结果显示,在薄膜材质、厚度、透光率相同的条件下,将雾度从24.29%提升到43.94%,温室跨中及北侧日累积光量DLI均有提升,其中跨中位置的光量提升至南侧106.25%~117.38%,高于南侧;北侧的2.5和1.5 m处光环境也得到明显改善,DLI值达到南侧的27.63%~70.43%和23.02%~35.38%,表明增加薄膜雾度可以在一定程度上缓解温室北侧的弱光问题,增加北侧光量,减少南北光照的差异性减少,其中晴天改善效果更为突出。

考虑到北侧光环境水平仍有提升空间,以及北侧墙体材料的特点,在散射光薄膜的基础上进一步探索了增设反光膜的措施。结果显示,散射光薄膜与北墙面反光膜共同作用下,北侧2.5及1.5 m处的光环境得到进一步改善,不同天气下的DLI值水平分别提升至南侧的47.42%~77.95%以及33.74%~70.82%,表明采取以上措施,可基本上解决柔性保温日光温室北侧弱光问题。

本试验的目的主要聚焦在阐明柔性保温日光温室的光环境分布特征,明确温室弱光区的现状,以及所提出的改进措施的增光效果,并没有考虑环境改进对作物生长和品质的影响,这一点将在后续研究中进行探讨。

参考文献 References

- [1] 王超,方慧,张义,桑硕,曹柯菲. 轻简柔性墙体装配式日光温室能耗分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3):190-197
Wang C, Fang H, Zhang Y, Sang S, Cao K F. Energy consumption analysis of simply soft insulated wall-assembled Chinese solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(3):190-197 (in Chinese)
- [2] 郝丽娟,韩建会,李永. 装配式异质复合墙体日光温室热性能分析与评价[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(4):159-169
Qie L J, Han J H, Li Y. Thermal performance analysis and evaluation on solar greenhouse with assembled heterogeneous composite wall [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(4): 159-169 (in Chinese)
- [3] 杨文雄. 屋面形状对日光温室光环境的影响模拟[J]. 农业工程, 2014, 4(S1):35-37
Yang W X. Influence simulation of greenhouse light environment from roof shape [J]. *Agricultural Engineering*, 2014, 4 (S1): 35-37 (in Chinese)
- [4] Chavan S G, Maier C, Alagoz Y, Filipe J C, Warren C R, Lin H, Jia B H, Loik M E, Cazzonelli C I, Chen Z H, Ghannoum O, Tissue D T. Light-limited photosynthesis under energy-saving film decreases eggplant yield[J]. *Food and Energy Security*, 2020, 9(4): e245
- [5] 陈正法,梁称福,黄小平. 四湖地区节能日光温室结构和原理[J]. 农业工

- 程学报, 2000, 16(1): 75-78
Chen Z F, Liang C F, Huang X P. Structure and principle of energy-saving solar greenhouse in Sihua area of Hubei Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16 (1):75-78 (in Chinese)
- [6] 吴毅明,曹永华,孙忠富,李佑祥. 温室采光设计的理论分析方法:设施农业光环境模拟分析研究之一[J]. 农业工程学报, 1992, 8(3):73-80
Wu Y M, Cao Y H, Sun Z F, Li Y X. An analytical method of light transmissivity in greenhouse design: The first part of serial studies in simulation of light environment in protected cultivation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1992, 8(3):73-80 (in Chinese)
- [7] 陈健,刘志杰. 高寒地区大型日光温室的采光设计[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(3):69-72
Chen J, Liu Z J. Lighting design of large scale solar greenhouse in Arctic area [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2002, 30(3): 69-72 (in Chinese)
- [8] 陈端生. 日光温室采光和保温设计要点[J]. 新疆农机化, 2004(3):51-53
Chen D S. Key points of daylight greenhouse lighting and insulation design [J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2004 (3): 51-53 (in Chinese)
- [9] 蔡履中. 光学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2007:369
Cai L Z. *Optics* [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007: 369 (in Chinese)
- [10] 宋卫堂,李晨曦,孙旭光,王平智,赵淑梅. 散射膜日光温室中种植垄向对番茄生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24):242-248
Song W T, Li C X, Sun X G, Wang P Z, Zhao S M. Effects of ridge direction on growth and yield of tomato in solar greenhouse with diffuse film [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24):242-248 (in Chinese)
- [11] 周易,周清,郑可欣,赵淑梅,王平智,陈小文,张雪松. 散射光对设施番茄生长及产量的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(5): 18-22
Zhou Y, Zhou Q, Zheng K X, Zhao S M, Wang P Z, Chen X W, Zhang X S. Effects of diffuse light on growth and yield of tomato in greenhouse [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(5): 18-22 (in Chinese)
- [12] Gu L H, Baldocchi D, Verma S B, Black T A, Vesala T, Falge E M, Downty P R. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002 (107):1-2
- [13] Marcelis L F M, Buwalda F, Dieleman J A, Dueck T A, Elings A, de Gelder A, Hemming S, Kempkes F L K, Li T, van Noort F, de Visser P H B. Innovations in crop production: a matter of physiology and technology[J]. *Acta Horticulturae*, 2014(1037):39-45
- [14] 孙士景,周清,范冰琳,赵淑梅,王平智,曲英华. 散射光薄膜对番茄生长和果实品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2016(5):22-26
Sun S J, Zhou Q, Fan B L, Zhao S M, Wang P Z, Qu Y H. Effect of diffuse light thin film on tomato growth and fruit quality [J]. *China Vegetables*, 2016(5):22-26 (in Chinese)
- [15] Zheng L, Zhang Q, Zheng K X, Zhao S M, Wang P Z, Cheng J Y, Zhang X S, Chen X W. Effects of diffuse light on microclimate of solar greenhouse and photosynthesis and yield of greenhouse-grown tomatoes [J]. *HortScience*, 2020, 55(10):1605-1613
- [16] Li T, Heuvelink E, Dueck T A, Janse J, Gort G, Marcelis L F M. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: Quantifying the contributing factors[J]. *Annals of Botany*, 2014, 114(1): 145-156 (in Chinese)

- [17] 王静,崔庆法,林茂兹. 不同结构日光温室光环境及补光研究[J]. 农业工程学报,2002, 18(4):86-89
Wang J, Cui Q F, Lin M Z. Illumination environment of different structural solar greenhouses and their supplement illumination [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(4): 86-89 (in Chinese)
- [18] 宋卫堂,孙云博,王平智,郑亮. 日光温室后坡漫反射幕应用方法及效果验证[J]. 农业工程学报,2023, 39(1):171-178
Song W T, Sun Y B, Wang P Z, Zheng L. Application and effect verification of diffuse reflective films on the backslope of solar greenhouses [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(1):171-178 (in Chinese)
- [19] GB/T 2410—2008透明塑料透光率和雾度的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2009
GB/T 2410—2008 Determination of the luminous transmittance and haze of transparent plastics [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese)
- [20] 彦启森,赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986:7-9
Yan Q S, Zhao Q Z. *Building Thermal Processes* [M]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 1986:7-9 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 张志远,中国农业大学硕士研究生在读。硕士研究生期间主要从事农业建筑环境工程、设施园艺环境工程研究。参与国家自然科学基金项目,高寒高海拔地区大棚光热与气流环境形成机制及结构优化研究。



通讯作者简介: 赵淑梅,教授,博士生导师,中国农业大学水利与土木工程学院农业建筑与环境工程系主任。北京市现代农业产业技术体系设施蔬菜创新团队岗位专家,中国农业工程学会会员,中国农业工程学会设施园艺工程专委会委员,中国农用塑料应用技术学会第八届理事,中国塑料加工工业协会农膜专委会专家工作组特聘专家,北京市科协“千人进千企”产业特派员。主要从事农业建筑环境工程、设施园艺工程、设施材料及节能调控技术等研究。目前主持国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目、北京市现代农业产业技术体系岗位专家项目、国际合作项目、国家重点研发计划子课题等。主持完成国家标准2项,发表研究论文80余篇,授权专利10余项,曾获多项省部级科研奖励。