



罗鑫兰, 杨冬艳, 田兴武, 宋卫堂, 孙云博, 郭永婷, 朱英, 郑亮. 应用行距调整机构对日光温室光温环境的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(02): 151-162.
LUO Xinlan, YANG Dongyan, TIAN Xingwu, SONG Weitang, SUN Yunbo, GUO Yongting, ZHU Ying, ZHENG Liang. Effects of the application of row spacing adjustment apparatus on the light and temperature environment of solar greenhouses [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(02): 151-162.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.02.14

应用行距调整机构对日光温室光温环境的影响

罗鑫兰¹ 杨冬艳² 田兴武³ 宋卫堂¹ 孙云博¹ 郭永婷³ 朱英³ 郑亮^{1*}

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 宁夏农林科学院 园艺研究所, 银川 750002;

3. 宁夏吴忠国家农业科技园区管理委员会, 宁夏 吴忠 751100)

摘要 为优化东西垄向双行种植番茄日光温室内光温环境, 采用对比试验, 在北京市房山区以固定行距种植为对照, 探究行距调整机构的应用对东西垄向双行栽培方式番茄冠层光分布以及温室内部温度环境的影响。试验采用东西垄向双行种植, 共种植3垄, 其中, 固定行距垄上行距为40 cm, 行距调整后垄上行距为80 cm, 2种栽培模式中心垄距均为180 cm。结果表明: 1) 行距调整机构可通过增大垄上行距, 有效提升番茄冠层的光截获量, 使试验区平均光照强度高于对照区($P < 0.05$), 其中下午时段三分之二冠层高度试验区显著高于对照区($P < 0.05$)。2) 垄上间距的增大使光分布变异系数降低14.4%~26.0%, 显著提升了温室内光分布均匀性($P < 0.05$)。3) 行距调整机构的应用使后墙温度显著提升, 2:00—11:00试验区后墙温度较对照区高3℃以上; 同时使试验区地面夜间温度较对照区高0.5℃左右。4) 行距调整机构的应用可有效提升番茄冠层温度, 使试验区第三垄番茄冠层中部与南侧夜间温度较对照区高0.5~0.7℃。综上, 应用行距调整机构可有效改善温室内光、温环境, 行距调整机构可以在东西向栽培宜机化日光温室中进行推广。

关键词 行距调整机构; 东西垄向; 栽培方式; 光温环境; 番茄

中图分类号 S626

文章编号 1007-4333(2025)02-0151-12

文献标志码 A

Effects of the application of row spacing adjustment apparatus on the light and temperature environment of solar greenhouses

LUO Xinlan¹, YANG Dongyan², TIAN Xingwu³, SONG Weitang¹, SUN Yunbo¹,
GUO Yongting³, ZHU Ying³, ZHENG Liang^{1*}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China;

3. Management Committee of Wuzhong National Agricultural Sci-Tech Garden, Wuzhong 751100, China)

Abstract In order to optimize the light and temperature environments in the greenhouse of tomato planted in east-west ridges, a comparative experiment was conducted in the Fangshan, Beijing. The fixed row spacing was taken as the control to investigate the effects of the application of the row spacing adjustment apparatus on the light distribution in the canopy and the temperature environment inside the greenhouse of tomato grown in east-west double rows. The spacing between rows on the ridge in fixed spacing mode is

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发项目(2021WZYQ0005); 山东省自然科学基金项目(ZR2021QC099)

第一作者: 罗鑫兰(ORCID:0009-0005-9425-825X), 硕士研究生, E-mail: 2018317010214@cau.edu.cn

通讯作者: 郑亮(ORCID:0000-0002-8699-5429), 副教授, 主要从事农业生物环境工程研究, E-mail: zhengliang@cau.edu.cn

40 cm and the spacing between rows on the ridge after dynamic spacing adjustment is 80 cm. In both modes, the spacing between rows in the center of the ridge in both modes are 180 cm. The results indicated that: 1) The row spacing adjustment apparatus effectively enhanced the light interception in tomato canopies by enlarging the space between rows on the ridge, and the test area had a higher average light intensity than the control area. Two-thirds of the height of the canopy in test area was significantly higher than the control area during the afternoon hours ($P < 0.05$). 2) The increase of spacing between rows on the ridge reduced the coefficient of variation of light distribution by 14.4%-26.0%, which significantly improved the uniformity of light distribution in the greenhouse ($P < 0.05$). 3) Application of row spacing adjustment apparatus led to a significant increase in the temperature of the back wall, and the temperature of the back wall in the tested area was more than 3 °C higher than that in the control area from 2:00 to 11:00. Meanwhile, the temperature of the ground in the test area at night was maintained at a higher level, which was about 0.5 °C higher than that of the control area. 4) Application of row spacing adjustment apparatus maintained the temperatures of the middle and south sides of the tomato canopy in the third row at a higher level at night, with the night temperature of the test area of the canopy was 0.5 to 0.7 °C higher than that in the control area. In general, the application of the row spacing adjustment mechanism can effectively improve the light and temperature environment in the solar greenhouse. This study demonstrated that the row spacing adjustment apparatus can be applied in the east-west cultivation of mechanized solar greenhouse.

Keywords row spacing adjustment apparatus; east-west ridge; cultivation method; light and temperature environment; tomato

随着农村剩余劳动力不断向非农产业的转移及人口老龄化问题的加剧,我国农业从业人口数量不断减少,导致农业产业的劳动力成本不断攀升^[1]。2015年起,北京地区设施农业生产中劳动力成本已经超过总成本的50%^[2],不断攀升的人工成本已经严重制约了设施园艺等劳动密集产业的健康发展。提升机械化水平,有效降低劳动力成本,是设施园艺产业的重要发展方向。目前,限制日光温室机械化水平提升的主要因素是现有的农艺措施无法满足农机作业的需求,机械作业条件差,“门难进、边难耕、头难调、效难高”问题突出^[3]。

将日光温室内传统的南北垄向种植模式,改为东西垄向是提高农机工作效率的有效方法。现有研究表明,东西垄向种植番茄、黄瓜、辣椒与茄子等主要设施作物,单产均高于南北向种植^[4-6],但东西垄向种植更凸显了温室内南北光照分布不均的问题。为提升光照均匀水平,部分试验采用东西向宽沟窄畦双行栽培模式,并证实了该栽培模式能够显著改善宽行的光环境,有利于冠层外部叶片光合作用^[7-8]。此外,增大垄间行距也可有效避免冠层南侧对北侧的遮挡,增大冠层的透光率,改善冠层中下部与北侧光环境,有利于早期产量的形成,但更宽的垄距也会导致冠层光截获量降低^[9-11]。

宽沟窄畦的栽培模式垄上局部种植密度增大,会凸显温室内温度分布不均的问题。日间作物冠层通过蒸腾作用等生理活动将吸收的光能转化为潜热,可使冠层内部升温更加缓慢,夜间作物呼吸作用释放出的热量多,且局部叶面积指数的增大不利于行内通风,导致夜间冠层内部维持在更高水平;而较宽的行间由于相对通透,日间升温与夜间降温均较冠层内部快,冠层内部整体温度振幅较行间小^[12-13]。

因此,本研究在东西垄向双行种植番茄的日光温室内引入行距调整机构^[14],依据农机作业使用需求调整冠层结构,以期提高日光温室内光能利用效率,改善温室内光温环境,为相关农业机械研发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验日光温室位于北京市房山区弘科农场(115.97° E, 39.62° N),温室坐北朝南,东西长75 m,南北跨度7.5 m,前屋面投影宽度6.1 m,后墙高2.9 m,脊高4.1 m,室内北侧硬化道路宽0.8 m;温室后墙采用空心砖和聚苯板双层材料,表面覆盖水泥砂浆层,前屋面为轻钢衍架结构,透明覆盖材料为散射光薄膜(雾度=58.3%,透光率=88.5%)。

温室种植试验在 2022 年越冬茬口进行(试验期:2022 年 11 月—2023 年 2 月),供试作物为番茄(品种为‘金冠 58 号’),定植时间为 2022 年 9 月 13 日。温室内采用东西垄向种植,本温室共种植 3 垄,栽培垄从南到北依次编号为第一至第三垄,中心垄距为 180 cm,垄底宽 80 cm,垄沟宽 100 cm,垄

上行距为 40 cm,垄间行距为 140 cm,株距为 35 cm,垄高 10 cm(图 1)。温室内东西两侧各预留 3 m 宽的工作缓冲区。番茄日光管理采用单干整枝,吊蔓栽培,坐果期通过落蔓将植株高度控制在 2 m;冬季日常管理期间 8:30 打开保温被,16:00 放下保温被。

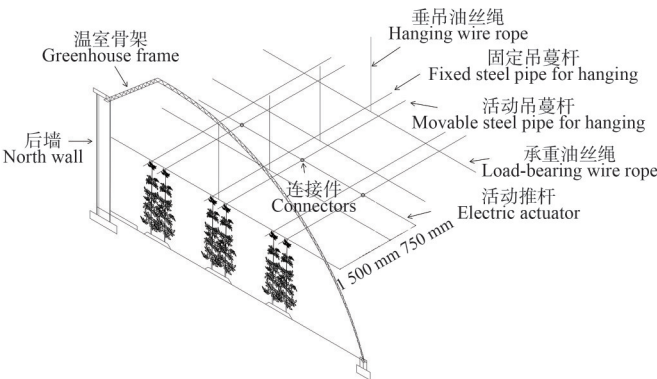


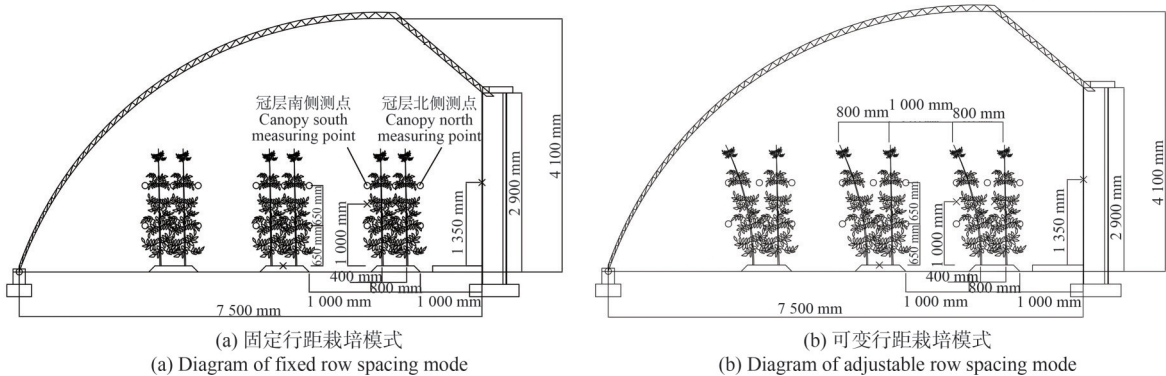
图 1 行距调整机构示意图

Fig. 1 Diagram of the row spacing adjustment apparatus

1.2 试验设计

日光温室分为 2 个区,分别为可变量行距试验区和固定行距对照区,试验区(可变量行距栽培模式)为温室种植区西侧起 30 m,对照区(固定行距栽培模式)为温室种植区东侧起 30 m,其间设有缓冲区。试验区安装行距调整机构(图 2),该机构通过电动机构调整活动吊蔓杆的位置,实现垄上双栽培行行距的调整;在无需机具进入垄间作业时,同一垄上

南侧的活动吊蔓杆向南横向移动设定距离,使得同一垄的相邻两行番茄冠层距离增大,行距扩大至 80 cm,枝蔓倾斜角度约为 11.3°,该电动推杆的移动速度为 7 mm/s,移动 40 cm 需 1 min。在生产过程中,打杈、采摘和植保等环节,调节机构将活动吊蔓杆缓慢复位至垄上行距为 40 cm,方便操作人员或机具进入垄间作业。试验期间其他生产管理措施相同。



○为光照强度测量点;x为温度测量点。

○ is the measured point of light intensity. x is the measured point of temperature.

图 2 起垄规格与测点位置示意图

Fig. 2 Diagram of ridge pattern and sensor location in the solar greenhouse

1.3 吊蔓果菜行距调整机构

行距调整机构由承重部分、吊蔓杆部分与动力

部分 3 部分组成,具体设置如下:

承重部分,包括承重钢丝绳与垂吊钢丝绳。承

重油丝绳南北向固定于温室骨架结构之上,其南侧固定于前屋面骨架,北侧固定于后墙立柱,相邻承重油丝绳的间距为1.5 m;垂吊油丝绳垂直于地面方向设置,下端固定于承重油丝绳中部,上端固定于上方温室前屋面骨架上,以保证承重油丝绳在支撑吊蔓杆的情况下保持水平。

吊蔓杆部分,共设有3组,每垄对应一组,每组由固定吊蔓杆和活动吊蔓杆两部分组成,吊蔓杆方向与栽培垄方向相同,垂直于承重油丝绳。固定吊蔓杆位于北侧,活动吊蔓杆位于南侧,固定吊蔓杆与承重油丝绳固定,活动吊蔓杆放置于承重油丝绳上,可在动力部分的牵引作用下横向南北滑动。

动力部分,由电动推杆、活动推杆与连接件组成,活动吊蔓杆通过连接件与活动推杆连接,活动推杆北端与电动推杆连接,电动推杆固定于后墙。行距调整机构工作时由电机带动电动推杆运动,电动推杆通过活动推杆,驱动活动吊蔓杆进行南北往复运动,从而带动固定于活动吊蔓杆上的植株冠层移动。电动推杆带有限位装置和控制手柄,可通过手柄控制推杆往复运动,以控制行距的增大减小;可通过限位装置限制推杆的行程,以控制行距调整的范围。

1.4 光温环境测定

1.4.1 冠层光照测量

本试验所有环境数据均在番茄坐果期测量。作物冠层各测点光照强度于典型晴天天气条件下的上午(8:30)、中午(12:00)与下午(15:30)利用手持光照度计 tes-1339(泰仕电子工业有限公司,中国)测定,各测点重复10次;为保证数据可比性,试验区与对照区由2人同步测量,每轮数据测量时间控制在30 min内。测点布置如图2所示,测量高度分别为冠层垂直三分之一高度(垄上65 cm)和冠层三分之二高度(垄上130 cm),分别测量每垄冠层南侧、冠层北侧与冠层中间位置的光照强度。冠层两侧的测点均为番茄冠层边缘,冠层中间的测量点位于垄面中心位置的正上方。

1.4.2 温度测量

温度测量采用Pt100铂电阻(北京昆仑中大传感器技术有限公司,中国),温度数据每10 min自动记录一次。番茄冠层测点位置为第三垄冠层中心位置的正上方和冠层南侧,高度为番茄冠层二分之

一高度(垄上100 cm),测点位置如图2所示,设置3个传感器重复;后墙温度测点高度为135 cm,设置3个传感器重复;土壤温度测点为第二垄垄面中心位置(200 mm土壤深度)。

1.5 数据处理

使用Origin 9.1软件对数据进行方差分析与显著性检验,其中同一垄不同测量点光照强度差异分析采用单因素方差分析Fisher检验,对照区与试验区测点光照强度使用配对样本 t 检验进行两两比较($P=0.05$),使用Excel 2017制作图表。

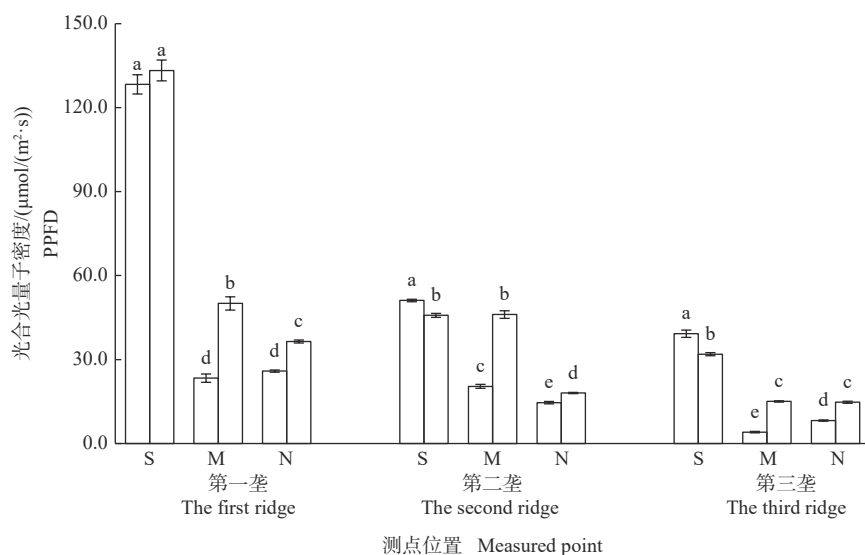
2 结果与分析

2.1 应用行距调整机构对番茄冠层光分布的影响

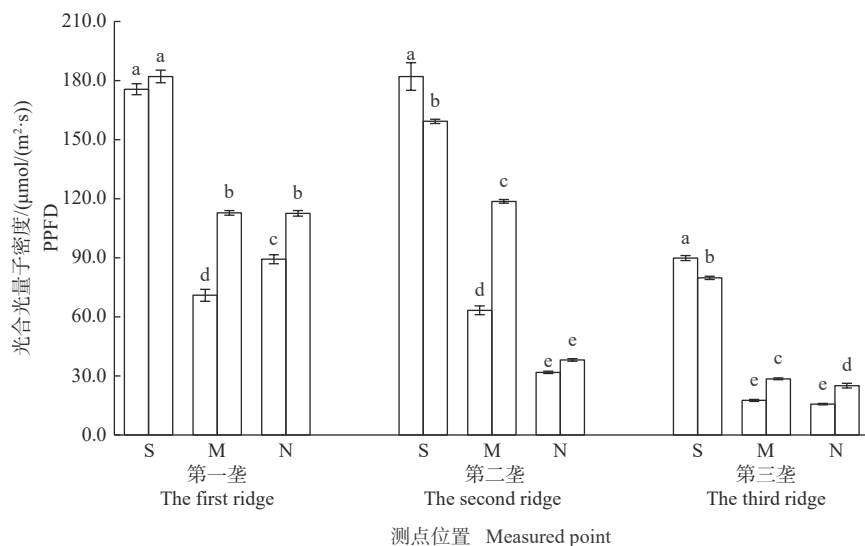
2.1.1 行距调整对番茄冠层上午光分布的影响

通过测量温室内不同位置的光照强度,得到8:30时温室内光分布情况(图3)。可知温室内光照强度整体呈现从南向北、由上到下降低的趋势,第一垄番茄冠层的南侧由于无遮挡,光照强度远高于其他位置,且试验区与对照区无显著差异。与此同时,由于行距调整机构的使用,番茄冠层三分之一高度与三分之二高度所有测点光照强度的平均值均有一定程度的提升(P 值分别为0.06与0.13),变异系数分别降低24.7%与15.9%。表明行距调整机构的使用可有效提高番茄冠层的光截获量,提升温室内光环境的均匀性,对中下部光环境改善尤其明显。

在冠层三分之一高度处(图3(a)),对照区与试验区所有测点光照强度的平均值分别为35.0和43.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P=0.06$);对照区与试验区光照强度的变异系数分别为108.3%与83.6%。表明垄上行距的增大可有效提升试验区番茄冠层光截获量,同时提升光环境的均匀性。由于垄上行距增大(每垄南侧行作物向其南侧倾斜),第二垄与第三垄试验区冠层南侧的光照强度相较于对照区均呈现显著降低趋势($P<0.05$),但第一垄与第三垄南侧光照强度仍然显著高于冠层中间与冠层北侧,第二垄南侧光照强度仍然显著高于北侧($P<0.05$),但与冠层中部差异不显著。表明垄上行距的增大,可提升冠层透光率,使冠层中部与北侧光环境得到改善,南北差异显著降低($P<0.05$),有效提升温室内光环境的均匀性。东西垄向双行栽培条件下,番茄冠层行间遮挡严重,对照区第三垄中部光照强度



(a) 三分之一冠层高度 One-third canopy height



(b) 三分之二冠层高度 Two-thirds canopy height

□ 固定行距 Fixed row spacing

▨ 可変行距 Adjustable row spacing

不同字母代表同一垄不同测量点光照强度差异显著 (Fisher 检验, $P < 0.05$); S, M, D 分别代表番茄冠层南侧、中间与北侧。下同。

Different letters represent significant differences in light intensity at different measuring points in the same row (Fisher test, $P < 0.05$). S, M, and D refer to the southern, central, and northern regions of the tomato canopy, respectively. The same below.

图3 温室内上午不同冠层位置的光照强度对比

Fig. 3 Comparison of light intensity for different canopy positions in the morning

甚至显著低于北侧。而行距的调整使冠层中部的光照均得到显著提升,且越靠近北墙效果越显著,试验区冠层中间光照均显著高于对照区 ($P < 0.05$)。番茄冠层北侧普遍光照强度较低,而行距的调整可使该位置的光照强度得到显著提升,试验区冠层北侧光照均显著高于对照区 ($P < 0.05$)。综上,行距调整机构应用可在上午显

著提升番茄冠层中下部透光性与光截获量,降低其光分布不均匀程度,但整体光照强度相较于中上部仍然较弱。

行距调整机构的应用对番茄冠层三分之二高度处光环境的影响趋势与三分之一高度处基本相似 (图3(b)),但上午时应用行距调整机构对番茄冠层不同高度的透光性、光截获量与光分布均匀性提

升效果存在差异,中下部强于中上部。垄上行距的增大使得温室内所有测点平均光照强度从81.8提升到95.2 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P=0.13$),变异系数从75.4%降低到59.5%。此高度第二垄南侧受到的遮挡较少,对照区该测量点的光照强度与第一垄南侧并无显著差异,但第三垄南侧的光照仍然较差。对照区的冠层中间与北侧遮挡严重,光分布极其不均匀,而试验区第二垄与第三垄冠层南侧光照显著降低 ($P<0.05$),同时冠层中间与北侧光环境得到

显著提升 ($P<0.05$)。虽然试验区光照仍然呈现由南向北、由上到下降低的趋势,但降幅显著减小,表明行距调整机构的使用可较好的改善日光温室内光分布不均匀的问题。

2.1.2 行距调整对番茄冠层中午光分布的影响

通过测量温室内不同位置的光照强度,得到12:00温室内光分布情况(图4)。可见中午温室内光照强度呈现由南到北、由上到下降低的趋势;与上午不同的是,中午对照区冠层中间的光照强度最

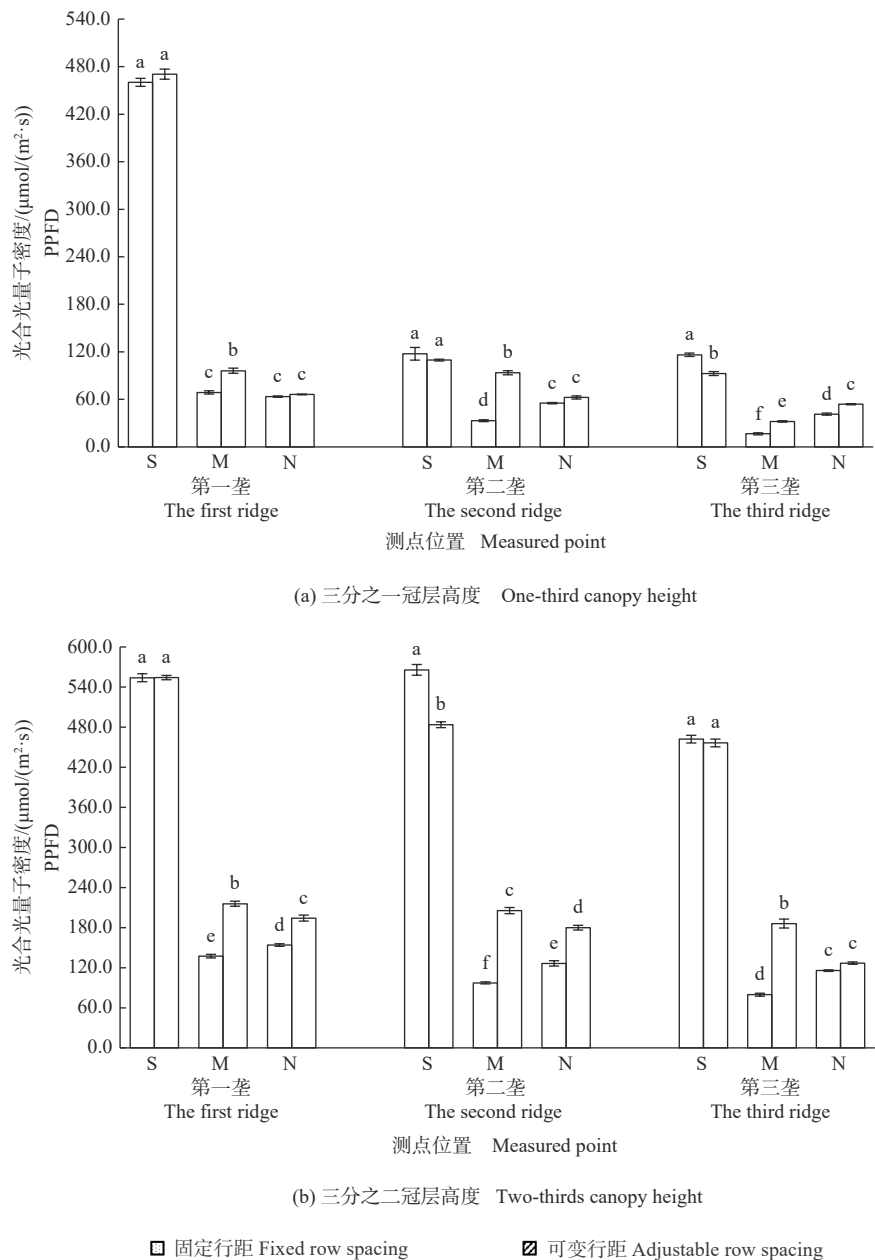


图4 温室内中午不同冠层位置光照强度对比

Fig. 4 Comparison of light intensity for different canopy positions at noon

低,除三分之一高度处南垄差异不显著外,其他测量点冠层中间的光照强度均显著低于冠层北侧(中午北墙反射光更多)。垄上行距的增大使番茄冠层三分之一高度与三分之二高度所有测点光照强度的平均值均有一定程度的提升(P 值分别为0.17与0.13),变异系数分别降低14.4%与26.0%。表明行距调整能够在一定程度上增加试验区内中午的冠层光截获量,改善光照分布的均匀性,且对冠层三分之二高度处的作用更为显著。

在番茄冠层三分之一高度处对照区与试验区的平均光照强度分别为108.1与119.7 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,变异系数分别为126.2%与111.8%(图4(a))。中午光照较强,试验区与对照区第一垄冠层南侧的光照强度分别为460.2与470.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,均远高于其他测量点;对照区第二垄与第三垄冠层南侧光照强度仅为第一垄冠层南侧的25%;试验区第三垄冠层南侧的光照强度显著低于对照($P<0.05$),第二垄冠层南侧光照强度出现降低,但差异不显著。增大垄上行距可使冠层中部光照强度大幅提升,试验区第一垄到第三垄冠层中部光照均显著高于冠层北侧($P<0.05$);但冠层北侧光照强度仅有第三垄试验区显著高于对照区($P<0.05$)。

在番茄三分之二高度处增大垄上行距使冠层中部的光照强度由254.7提升到289.2 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P=0.13$),变异系数从81.5%降低到55.5%(图4(b))。由于冠层中上部的遮挡较少,第一垄到第三垄冠层南侧光照强度均处于较高水平,第一垄与第三垄对照区与试验区无显著差异,但冠层结构的改变使得第二垄冠层南侧光照强度显著降低($P<0.05$)。对照区冠层中部的透光率较差,呈现由南向北递减趋势,冠层中部均显著低于冠层北侧($P<0.05$);增大垄上行距可使冠层中部光照强度显著高于对应位置北侧光照强度($P<0.05$)。冠层北侧遮挡也较为严重,增大垄上行距可显著提升第一垄与第二垄北侧的光照强度($P<0.05$),第三垄北侧的光照强度有提升但差异不显著,提升效果由南向北逐渐减小。

2.1.3 行距调整对番茄冠层下午光分布的影响

通过测量温室内不同位置的光照强度,得到15:30温室内光分布情况(图5)。下午时温室内各垄光照强度呈现由南向北、由上到下逐渐降低的趋

势;对照区每垄的冠层南侧光照最强,冠层中部光照最弱且均显著低于冠层北侧。垄上行距的增大可使番茄冠层三分之二高度的光截获量得到显著提升($P<0.05$),三分之一高度处也有一定程度的提升($P=0.07$),变异系数分别降低25.1%与17.3%。表明行距调整可有效提升试验区番茄冠层光截获量,同时改善光照分布的均匀性,且在下午时段对冠层三分之一高度处的冠层北侧与中部效果相较于三分之二高度处更为显著。

在番茄三分之一高度处对照区与试验区的平均光照强度分别为48.5与57.1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P=0.07$),对照区与试验区光照强度的变异系数分别为86.0%与60.9%(图5(a))。此时第一垄南侧光照强度最高为139.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;对照区的冠层中部光照最弱,第一垄到第三垄分别为18.7、18.7与19.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,均显著低于冠层北侧($P<0.05$)。垄上行距的增大可使冠层中间与北侧的光照强度显著提升($P<0.05$),其中第一垄与第二垄冠层中间作用效果最佳,第一垄与第二垄冠层北侧虽也有显著提升,但显著低于试验区冠层中间的光照强度($P<0.05$);试验区第三垄冠层中间与北侧均有显著提升,但冠层中间光照强度仍然显著低于冠层北侧($P<0.05$)。垄上行距的增大同时也使第二垄、第三垄冠层南侧的光照强度显著降低($P<0.05$)。

在番茄三分之二高度处对照区与试验区的平均光照强度分别为98.2与115.4 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P=0.03$),试验区光截获量显著高于对照区(图5(b));垄上行距的增大使温室内光照强度的变异系数从50.3%降到33.0%;此时温室内光照强度整体依旧呈现由南到北降低的趋势,但降幅减小,温室内光照均匀性有所提升。行距调整机构的应用使冠层中间与北侧光照强度均得到显著提升,且冠层中间的提升效果强于北侧($P<0.05$)。对照区第一垄与第二垄冠层中间光照强度显著低于北侧($P<0.05$);而试验区第一垄与第二垄冠层中间光照强度显著高于北侧($P<0.05$);第三垄试验区冠层中间虽然显著低于北侧($P<0.05$),但是与北侧的差距相较于对照更小。

2.2 行距调整对日光温室内温度的影响

2.2.1 北墙温度对比

连续多日典型晴天时日光温室内北墙温度变

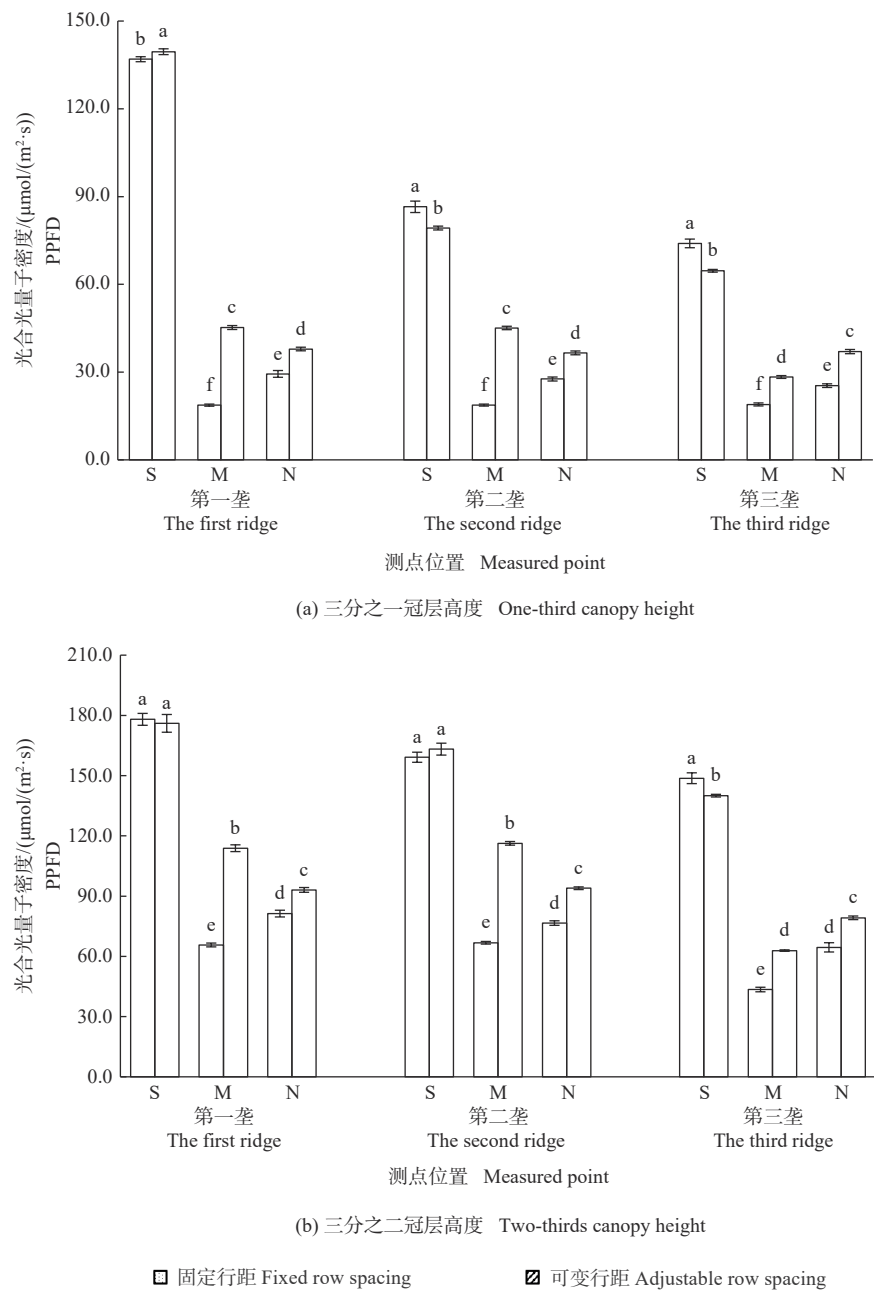


图5 温室内下午不同冠层位置光照强度对比

Fig. 5 Comparison of light intensity for different canopy positions in the afternoon

化情况见图6。试验区的北墙温度全天均高于对照区,表明行距调整机构的使用提升了冠层的透光率,使北墙接受了更多的光辐射,储存更多的热量,这与冠层北侧光照强度的结果一致。而试验区北墙保存的较多的热量在夜间释放到温室空气中,从而使试验区冠层夜间温度高于对照区。

2.2.2 土壤温度对比

连续多日典型晴天时日光温室内第二垄垄面中心位置土壤温度见图7。在保温被升起后,对照与试

验区的土壤温度均先呈现下降趋势,直至10:50左右后温度快速回升。保温被升起前,试验区温度相较于对照区高0.5℃左右;保温被升起后,对照区与试验区温差逐渐缩小,至10:30左右对照区温度超过试验区,且温差逐渐增大,14:30左右温差达到最大0.8℃左右。而后温差逐渐减小,直至保温被放下30 min左右,试验区温度再次反超对照区,且温差逐渐增大直至第二日保温被再次卷起。表明行距的调整提升冠层光截获量的同时会导致土壤蓄热减少。

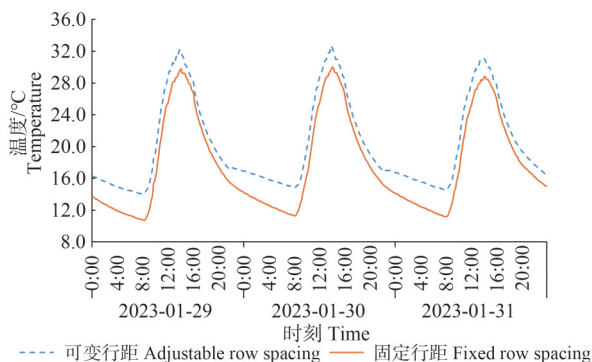


图6 温室北墙温度日变化图

Fig. 6 Diurnal temperature variation of the north wall

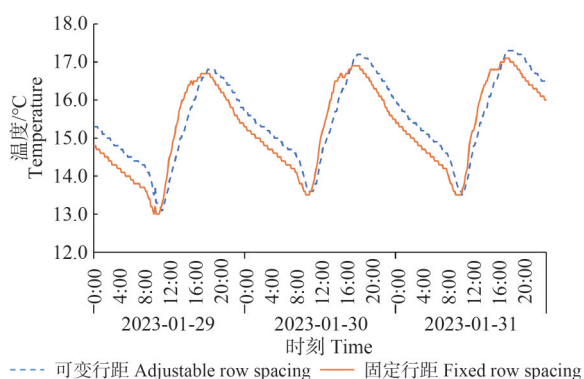


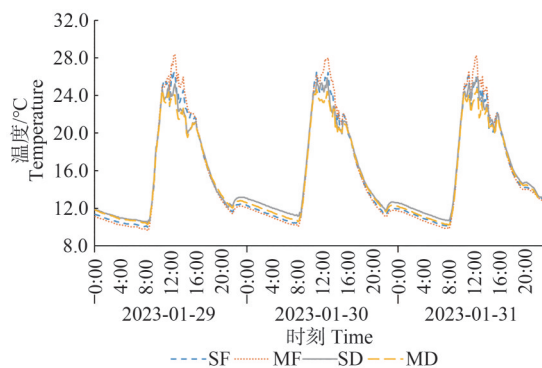
图7 温室土壤温度日变化图

Fig. 7 Diurnal variation of the soil temperature in the greenhouse

2.2.3 冠层温度对比

考虑到后墙蓄热量的增加对第三垄的温度影响较大,本试验只测量第三垄中部与南侧的温度,有关冠层温度的讨论也局限于第三垄。图8为连续多日典型晴天时第三垄番茄冠层的温度变化图,夜间至保温被卷起前所有测点温度均缓慢下降,且试验区冠层中部与冠层南侧温度均高于对照区,试验区冠层南侧与对照区保持有 0.5°C 的温差,中部保持有 $0.6\sim 0.7^{\circ}\text{C}$ 的温差。卷起保温被后,试验区与对照区温度均呈现快速上升趋势,在12:40左右达到最高峰,但对照区上升速度较试验区快。在上午9:30之后,对照区冠层中部的温度反超试验区,且12:10到14:00之间,温差维持在 3°C 以上;随后试验区与对照区温差逐渐减小,试验区下降速度较对照区慢,试验区冠层中间的温度再次高于对照区,温差逐渐增大后趋于稳定,稳定在 $0.5\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 。而对照区冠层南侧的温度在上午10:40左右也反超试验区,一直到下午16:00,但温差较冠层中部小,维

持在 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。在14:10后温差逐渐减小,在16:00左右试验区冠层南侧的温度再次高于对照区,温差逐渐增大后稳定于 0.6°C 左右。综上,行距调整机构的使用可提升植物冠层夜间温度,同时使日间冠层温度变化减缓且低于对照区。



SF: 固定行距南侧;MF:固定行距中部;SD:可变量距南侧;MD:可变量距中部。

SF, south measuring points of fixed row spacing; MF, middle measuring points of fixed row spacing; SD, south measuring points of dynamic row spacing; MD, middle measuring points of dynamic row spacing.

图8 第三垄冠层中部温度日变化图

Fig. 8 Diurnal temperature variation at the middle position of the third ridge

3 讨论与结论

行距配置是影响作物冠层结构的重要因素,构建合理的冠层结构是改善温室内光温环境^[15-17]、调控作物产量与品质的重要手段^[18-20]。本研究结果表明,增大垄上行距,可有效提升番茄冠层的光截获量,这可能与冠层结构变化导致番茄冠层密度减小、植物受光面积增大有关。常佳悦等^[21]研究表明,冠层光截获量提高的因素主要包括叶面积增大与叶片间遮荫减小两方面,且叶片间遮荫的减小主要表现在冠层中下部,叶片间遮荫减小可能是本试验冠层光截获量提升的主要原因。值得注意的是,本试验中在光照较弱的上午与下午,光截获量的提升体现在冠层中下部,这与前人研究一致^[21-22];但在光照较强的中午,冠层中上部的光截获量提升效果优于冠层中下部。

本试验中光照强度的提升主要体现在冠层中部与北侧的光照强度,试验区冠层中部光照强度由于垄上行距的增大,均显著高于对照区,第二垄与第三垄的南侧光照强度由于宽行距的减小均出现

一定程度的降低,这与前人研究结果一致^[9,11]。行距的增大或减小,会导致行内透光率也随之增大或减小。伏文卓等^[23]探究了不同株行距配置对塑料大棚番茄冠层特性的影响,结果表明叶面积指数与光透过率呈极显著的负相关,这与本试验结果一致。杨冬艳等^[24]开展了关于番茄东西垄向模式下群体光环境及产量分布特征的试验,结果表明东西垄向栽培双行种植模式时,同垄南侧行番茄植株对北侧行有遮挡,且冠层底部南侧行透光率越高,与北侧行番茄透光率相差倍数越高。但本研究结果在下午光照较弱时,北侧行冠层下部与南侧行冠层下部透光率相差倍数与光照较强的中午差异不大,这可能与种植密度相关,仍待进一步试验验证。

本研究发现,行距调整机构的使用可使各时段同一高度光照强度平均值的变异系数降低,番茄冠层南侧与冠层中间和北侧的差距减小,表明温室内光水平分布均匀性得到了有效的提升。同时,行距的调整也显著提升了冠层中下部的光照强度,缩小了冠层中下部与中上部透光率相差倍数,使冠层光垂直分布不均的问题得到显著改善,对宜机化日光温室内番茄生产果实品质形成以及早期产量形成等生理过程均具有积极意义^[25-27]。

植物冠层结构的改变也导致了温室内温度的改变。在日光温室中,主要由后墙与土壤在日间蓄集热量并在夜间向温室内释放。结合本研究中光照的结果,垄上行距提升可使番茄冠层的透光率增加,从而使后墙白天可以接收更多的太阳辐射,蓄积较多的热量;夜间释放回温室内,间接导致夜间试验区第三垄冠层的温度高于对照区。但行距调整会导致试验区地面白天接收到的太阳辐射减少^[7],在中午时段对照区土壤温度高于试验区。现有研究表明,随着种植密度增大,温室内夜间气温下降的越慢^[13],可能由于对照区行间较试验区更裸露,热量散失较快,在14:00后,试验区与对照区的温差开始逐渐减小,直至保温被放下30 min左右,试验区温度再次反超对照区。这表明行距调整并不会对土壤蓄热造成较大负面影响,且试验区夜间土壤温度较对照区高,有利于番茄冠层夜间温度维持在更高水平。

综上所述,应用行距调整机构可有效改善温室内光、温环境,行距调整机构可以在东西向栽培宜机化日光温室生产中进行推广。

参考文献 References

- [1] 宋卫堂. 设施蔬菜产业发展对机械化的需求[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(11): 112-115
Song W T. Demands of the development of protected vegetable industry on mechanized [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2017, 38(11): 112-115 (in Chinese)
- [2] 王爱玲, 李凌云, 串丽敏, 秦晓婧. 北京市设施蔬菜产业现状、问题与对策[J]. 中国蔬菜, 2023(3): 8-14
Wang A L, Li L Y, Chuan L M, Qin X J. Present Status, problems and countermeasures of facility vegetable industry in Beijing [J]. *China Vegetables*, 2023(3): 8-14 (in Chinese)
- [3] 宋卫堂, 李明. 以“农艺-农机-设施”深度融合推动设施园艺高效发展[J]. 农业工程技术, 2020, 40(1): 44-47
Song W T, Li M. Promoting the efficient development of protected horticulture with the deep integration of agronomy, agricultural machinery and facilities [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2020, 40(1): 44-47 (in Chinese)
- [4] 孙志远. 日光温室蔬菜东西方向种植优势分析[J]. 江苏农机化, 2021(2): 14-16
Sun Z Y. Analysis on the advantages of vegetables planting in east-west direction in solar greenhouse [J]. *Jiangsu Agricultural Mechanization*, 2021(2): 14-16 (in Chinese)
- [5] 唐佳宁, 陈启峰, 余朝阁, 富宏丹, 刘长春, 郑淑荣, 宋卫丽, 孙周平. 东西垄丛栽方式对日光温室秋冬茬番茄生长及其温光环境的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(30): 65-71
Tang J N, Chen Q F, Yu C G, Fu H D, Liu C C, Zheng S R, Song W L, Sun Z P. Effects of east and west ridge cluster cultivation on the growth of autumn and winter tomato and the temperature and light environment in solar greenhouse [J]. *Chinese Agronomy Bulletin*, 2022, 38(30): 65-71 (in Chinese)
- [6] Zhang Y, Hen K M, Li Y, Zhou P S, Li W J, Liu X G, Li T L. Estimating the light interception and photosynthesis of greenhouse-cultivated tomato crops under different canopy configurations [J]. *Agronomy*, 2024, 14(2): 249
- [7] 邹豪, 孙明琴, 田永强, 高丽红. 农艺农机融合的设施番茄栽培参数优化研究[J]. 中国蔬菜, 2022(2): 63-68
Zou H, Sun M Q, Tian Y Q, Gao L H. Study on parameter optimization of protected tomato cultivation integrating agronomy with agricultural mechanization [J]. *China Vegetables*, 2022(2): 63-68 (in Chinese)
- [8] 李治国, 闫子双, 王尚君, 杨立国, 李宗煦, 刘晓明. 基于农机农艺融合的北京地区塑料大棚番茄栽培模式的优化[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(4): 97-101
Li Z G, Yan Z S, Wang S J, Yang L G, Li Z X, Liu X M. Optimization of machinery use and agronomy management for tomato production in plastic greenhouse in Beijing [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, 35(4): 97-101 (in Chinese)
- [9] 杨冬艳, 王丹, 桑婷, 冯海萍, 王蓉, 马玲. 垄距对日光温室番茄东西垄向栽培光环境的影响[J]. 北方园艺, 2022(23): 54-60
Yang D Y, Wang D, Sang T, Feng H P, Wang R, Ma L. Effects of ridge spacing on light environment of tomato cultivation in east-west ridge direction in solar greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2022(23): 54-60 (in Chinese)

- [10] 田兴武, 金龙, 朱英, 郭永婷, 李国琪, 杨常新, 王晓明. 日光温室东西定植、不同梯度轻简栽培技术在樱桃番茄上的应用[J]. 农业工程技术, 2018, 38(1): 65-67
Tian X W, Jin L, Zhu Y, Guo Y T, Li G Q, Yang C X, Wang X M. Application of east-west planting and different gradient simple cultivation techniques in solar greenhouse on cherry tomato [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2018, 38(1): 65-67 (in Chinese)
- [11] 陈一鑫, 陈志远, 宋丽娜, 李建设, 高艳明. 不同密度与行距对番茄生长及产量的影响[J]. 北方园艺, 2020(16): 8-16
Chen Y X, Chen Z Y, Song L N, Li J S, Gao Y M. Effects of different density and row spacing on tomato growth and yield [J]. *Northern Horticulture*, 2020(16): 8-16 (in Chinese)
- [12] 王子聪. 日光温室东西垄向栽培对辣椒生长及群体光温环境的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023
Wang Z C. Effects of east-west ridge cultivation in solar greenhouse on growth and light and temperature environment of pepper [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [13] 马玲. 基于番茄群体效应的日光温室CFD温度仿真模型研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020
Ma L. Research on CFD temperature simulation model of solar greenhouse based on tomato group effect [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [14] 宋卫堂, 刘洋, 王平智, 郑亮, 李明, 孟令强, 李杰, 杨冬艳. 一种棚室内果菜行距动态调整机构及其使用方法. 中国, ZL202111027171X [P]. 2022-04-29
Song W T, Liu Y, Wang P Z, Zheng L, Li M, Meng L Q, Li J, Yang D Y. A dynamic adjustment mechanism for row spacing of fruit and vegetables in a shed and its method of use. China, ZL202111027171X [P]. 2022-04-29 (in Chinese)
- [15] 徐德敏. 日光温室结构与甜瓜东西垄向种植策略优化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022
Xu D M. Optimization of sunlight greenhouse structure and planting strategy of melon in east-west ridge direction [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [16] 张悦. 节能日光温室外形优化及番茄理想冠层解析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022
Zhang Y. Optimization of the shape of energy-saving solar greenhouse and analysis of the ideal canopy of tomato [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [17] 吴宣毅, 曹红霞, 郝舒雪, 王虎兵. 种植行距与灌水量对西北日光温室番茄生育和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 81-89
Wu X Y, Cao H X, Hao S X, Wang H B. Effect of planting row spacing and irrigation amount on tomato growth and yield in solar greenhouse in Northwest China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(24): 81-89 (in Chinese)
- [18] 陈真真. 栽培垄向和株行距对日光温室番茄生长及产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019
Chen Z Z. Effects of cultivation ridge direction and plant spacing on the growth and yield of tomato in solar greenhouse [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [19] Zhang Y, Hen K M, Li Y M, Xu D M, Liu A H, Liu X G, Li T L. Analyzing the impact of greenhouse planting strategy and plant architecture on tomato plant physiology and estimated dry matter [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 828252
- [20] 杨雨松, 郑昕雨, 刘杰, 孙周平. 日光温室基质袋培番茄东西垄向栽培模式研究[J]. 中国蔬菜, 2020(5): 40-47
Yang Y S, Zheng X Y, Liu J, Sun Z P. Studies on cultivation mode of east-west ridge for tomato cultivation with bags in sliding-cover solar greenhouse [J]. *China Vegetables*, 2020(5): 40-47 (in Chinese)
- [21] 常佳悦, 马小龙, 吴艳莉, 李建明. 行距和灌水量对番茄冠层光截获和光合能力、物质积累及果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(11): 2141-2157
Chang J Y, Ma X L, Wu Y L, Li J M. Effects of row spacing and irrigation amount on canopy light interception and photosynthetic capacity, matter accumulation and fruit quality of tomato [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(11): 2141-2157 (in Chinese)
- [22] 熊淑萍, 曹文博, 张志勇, 张捷, 高明, 樊泽华, 沈帅杰, 王小纯, 马新明. 行距和播种量对冬小麦冠层光合有效辐射垂直分布、生物量和籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1298-1306
Xiong S P, Cao W B, Zhang Z Y, Zhang J, Gao M, Fan Z H, Shen S J, Wang X C, Ma X M. Effects of row spacing and sowing rate on vertical distribution of photosynthetically active radiation, biomass, and grain yield in winter wheat canopy [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1298-1306 (in Chinese)
- [23] 伏文卓, 李涛涛, 高艳明, 李建设. 基于农机农艺结合的不同株行距配置对塑料大棚番茄果型分级及冠层特性的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(11): 1677-1685
Fu W Z, Li T T, Gao Y M, Li J S. Effects of different row spacing allocation on fruit classification and canopy characteristics of tomato planted in plastic greenhouse based on combination of agricultural machinery and agronomy [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(11): 1677-1685 (in Chinese)
- [24] 杨冬艳, 王丹, 桑婷, 赵云霞, 宋卫堂. 日光温室番茄东西垄向模式下群体光环境及产量分布特征[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 51-58
Yang D Y, Wang D, Sang T, Zhao Y X, Song W T. Characteristics of group light environment and yield distribution of tomato under east-west ridge pattern in solar greenhouse [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(9): 51-58 (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] Liu A H, Hen K M, Li Y M, Zhang Y, Xu D M, Liu X G, Li T L. Investigation of the impact of supplemental reflective films to improve micro-light climate within tomato plant canopy in solar greenhouses [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 966596
- [27] 伏文卓. 设施番茄果实商品性及冠层特性对种植密度与留果穗数的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2020
Fu W Z. Response of fruit commercialization and canopy characteristics to planting density and number of retained spikes in facility tomato [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 罗鑫兰,中国农业大学在读硕士研究生,专业为农业生物环境与能源工程。主要研究方向为日光温室光环境模拟与光环境调控。2022与2023年获得中国农业大学硕士二等学业奖学金。



通讯作者简介: 郑亮,博士,中国农业大学水利与土木工程学院副教授,硕士生导师。主要从事设施园艺工程领域研究工作,主要研究方向为设施环境调控技术及装备、园艺作物环境生理等方面。主持国家自然科学基金、山东省自然科学基金项目,参与国家现代农业产业技术体系项目、国家重点研发计划等项目。在 *Physiologia Plantarum*、*Photosynthesis Research*、*Scientia Horticulturae*、《农业工程学报》等期刊以第一或通讯作者发表论文15篇。