中国农业大学学报 2026,31(11):192-204
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

贾宇轩,李友丽,王明飞,张钟莉莉,苗妍秀,李灵芝. 日光温室东西垄栽培番茄产量的空间特征及光环境驱动机制[J]. 中国农业大学学报,2026,31(11):192-204.
JIA Yuxuan, LI Youli, WANG Mingfei, ZHANGZHONG lili, MIAO Yanxiu, LI Lingzhi. Spatial characteristics of tomato yield and the driving mechanism of light environment under East-West Ridge Cultivation in solar greenhouse[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(11): 192-204.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.11.14

日光温室东西垄栽培番茄产量的空间特征及光环境驱动机制

贾宇轩[1,2] 李友丽[2] 王明飞[2] 张钟莉莉[2] 苗妍秀[1] 李灵芝[1*]
(1. 山西农业大学 园艺学院,山西 晋中 030801;
2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097)

摘 要 为探明日光温室东西垄栽培下番茄生长、产量的空间分布规律及光环境驱动机制,以番茄为试材,设置秋冬茬、冬春茬2个栽培茬口,沿南北方向设4个栽培垄(最北R1—最南R4),系统测定冠层光辐射分布、植株生长、光合生理、果实可溶性固形物(SSC)和产量等,结合Pearson相关性分析和通径分析解析光辐射的驱动路径。结果表明:番茄生长生理指标随垄位呈梯度差异,SSC和产量整体呈北低南高分布,其中秋冬茬和冬春茬R1产量较R4分别降低45.80%和25.63%,且SSC和产量垄位差异随穗位上升呈增大趋势。通径分析显示,全生育期累积光辐射可通过正向调控SPAD值和叶面积间接影响植株光合生理与群体结构,SPAD值对产量的直接效应达到极显著水平($\beta=0.702$,$P<0.01$),叶面积对可溶性固形物的直接效应达显著水平($\beta=0.474$,$P<0.05$),累积光辐射对产量的直接效应达显著水平($\beta=0.515$,$P<0.05$)。综上,日光温室东西垄栽培下,光环境空间异质性通过"累积光辐射→SPAD→产量"以及"累积光辐射→叶面积→SSC"路径差异化调控番茄产量与可溶性固形物含量,SPAD与叶面积分别为产量和SSC形成的关键中介。

关键词 东西垄向;番茄;垄间差异;产量空间特征;光环境驱动机制
中图分类号 S626.5 **文章编号** 1007-4333(2026)11-0192-13 **文献标志码** A

Spatial characteristics of tomato yield and the driving mechanism of light environment under East-West Ridge Cultivation in solar greenhouse

JIA Yuxuan[1,2], LI Youli[2], WANG Mingfei[2], ZHANGZHONG lili[2], MIAO Yanxiu[1], LI Lingzhi[1*]
(1. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;
2. Research Center of Intelligent Equipment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract To explore the spatial distribution pattern of tomato growth and yield, as well as the driving mechanism of light environment under east-west ridge cultivation in solar greenhouse, tomato was used as the test material. Two cultivation crops were set, namely the autumn-winter crop and winter-spring crop, and four cultivation ridges (northernmost RI- the southernmost R4) were arranged along the north-south direction. The canopy solar radiation distribution, plant growth, photosynthetic physiological characteristics, fruit soluble solids content (SSC) and yield were systematically determined. Pearson correlation analysis and path analysis were performed to clarify the driving pathway of solar radiation. The results showed that the growth and physiological indexes of tomato presented gradient differences along with ridge positions, and the overall distribution of SSC and yield

收稿日期:2026-02-05;接受日期:2026-05-21
基金项目:国家自然科学基金面上项目(52379035);山西重点研发计划项目(202302010101003);北京市农林科学院创新能力建设项目(KJCD20240407)
第一作者:贾宇轩(ORCID:0009-0004-6271-4858),硕士研究生,E-mail:jiayx0726@163.com
通讯作者:李灵芝(ORCID:0009-0004-7688-6255),教授,主要从事设施园艺及蔬菜生理生态研究,E-mail:13593061819@163.com

was characterized by low values in the north and high values in the south. Specifically, the yield of R1 in the autumn-winter crop and winter-spring crop was 45.80% and 25.63% lower than that of R4, respectively. Meanwhile, the differences in SSC and yield among different ridge positions increased with the rise of fruit truss position. Path analysis revealed that cumulative solar radiation during the whole growth period could indirectly affect the photosynthetic physiology and population structure of tomato plants through positively regulating SPAD value and leaf area. The direct effect of SPAD value on yield reached an extremely significant level (β=0.702, P<0.01), while the direct effect of leaf area on SSC reached a significant level (β=0.474, P<0.05). The direct effect of cumulative solar radiation on yield also reached a significant level (β=0.515, P<0.05). In summary, under east-west ridge cultivation in solar greenhouse, the spatial heterogeneity of light environment differentially regulates tomato yield and soluble solids content through the pathways of "cumulative solar radiation→SPAD→yield" and "cumulative solar radiation→leaf area→SSC". SPAD and leaf area are the key mediators for the formation of yield and SSC, respectively.

Keywords　east-west ridge orientation; tomato; inter-ridge differences; yield; light environmental driving mechanism

我国是设施园艺生产大国，截至2022年设施园艺总面积达280多万hm^2[1]，已形成了小拱棚、塑料大棚、日光温室及连栋温室并存的多元化设施格局。其中，日光温室面积达81万hm^2，占比29%，是北方地区冬春季节蔬菜稳产保供的核心设施[1]。然而，当前设施农业发展面临双重严峻挑战：一方面，劳动力成本持续攀升，青壮年劳动力供给日益短缺；另一方面，传统的南北垄向栽培模式与机械化作业需求的适配性差，制约生产效率提升[2]。在此背景下，农业农村部印发的《全国现代设施农业建设规划（2023—2030年）》[3]明确提出，要"建设以节能宜机化为核心的现代设施种植业"。近年来，日光温室东西垄向栽培模式因其显著的宜机化优势受到广泛关注。该模式将垄数量精简为4～6垄，使耕作等农机具可实现直线作业路径≥40 m，换行掉头次数降至个位数，大幅提升了作业效率[4]。因此，加快发展东西垄向栽培这一新模式，不仅为破解传统设施种植机械化适配难题提供了有效路径，也为推动设施园艺产业转型升级和高质量发展注入了新动能。

从南北垄转向东西垄，除了改变温室内的植株布局，还改变了温室内的微气候分布。在传统南北垄模式下，植株受光相对均匀；而在东西垄模式下，受日光温室结构与太阳高度角的共同影响，植株在不同垄间形成了显著的光照梯度[5-6]。目前，现有研究多集中于宜机化效果及农艺配套参数的优化[7-13]，研究对象以番茄等茄果类蔬菜为主，部分研究初步揭示了该模式下的光环境分布特征与产量空间差异。Han等[14]的研究初步揭示，东西垄栽培中各垄间光合有效辐射呈"中部＞南部＞北部"的空间分布格局。杨冬艳等[10,15]发现，同垄内南侧行的番茄单果重、单株产量和总产量均显著高于北侧行，且该差异随垄位由北向南逐渐增大；同垄不同行仅对可溶性蛋白含量产生显著影响，而适当增大垄距可有效提升早期产量，并改善果实中可溶性糖、糖酸比及维生素C含量，推测这与东西垄模式下冠层光分布特征密切相关。

上述研究多停留于光环境分布与作物产量差异的现象性关联分析，而对于垄间光辐射差异如何调控番茄形态建成、光合生理响应，进而影响产量形成与果实品质积累的内在机制，其相关作用路径与核心驱动因子仍不明确。基于此，本研究拟以东西垄栽培下的番茄为研究对象，探究其在不同垄间（R1～R4）光照分布条件下的生长、生理、产量和可溶性固形物含量（SSC）的空间分布特征，在此基础上，利用通径分析定量解析"光辐射-生理指标-产量/SSC"之间的内在演变规律与驱动关系，旨在从时空异质性角度揭示东西垄番茄产量形成的驱动机制，为优化日光温室宜机化栽培下的精细化群体管理及分区水肥调控、补光提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于2024年8月—2025年6月在北京市昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地（40°07′03" N，116°20′26" E，海拔50 m）15号日光温室内进行。基地气候属于典型的温带季风气候，光热资源丰富，年日照时间为2 684 h，平均高温为20 ℃，平均低温为9 ℃。

1.2 试验材料

试验温室坐北朝南，东西方向长度为50 m，南北跨度为7 m，脊高3.7 m。北墙高2.75 m。北墙为0.37 m厚红砖墙，后坡长1.3 m、仰角45°，采用预制板搭建；南屋面弧长7.644 m、倾角31°，透明覆盖材料为0.12 mm厚PVC膜，配套保温被为PE布复合喷胶棉材质。温室北侧设0.6 m宽水泥过道。温室设上下2个通风口，单口设计宽度均为0.7 m；温室按时间开关风口：上午9:00开启通风口，最大开度为0.7 m，下午4:00关闭，夜间或阴雨大风等极端天气全程密闭。温室内土壤类型为粉（砂）质粘土壤，土壤有机质质量分数为63.0 g/kg，全氮为4.62 g/kg，碱解氮为233 mg/kg，有效磷为420 mg/kg，速效钾质量分数达1 020 mg/kg，土壤pH为6.89。供试番茄品种为‘京采8号’（北京现代农夫种苗公司选育）。

1.3 农艺管理

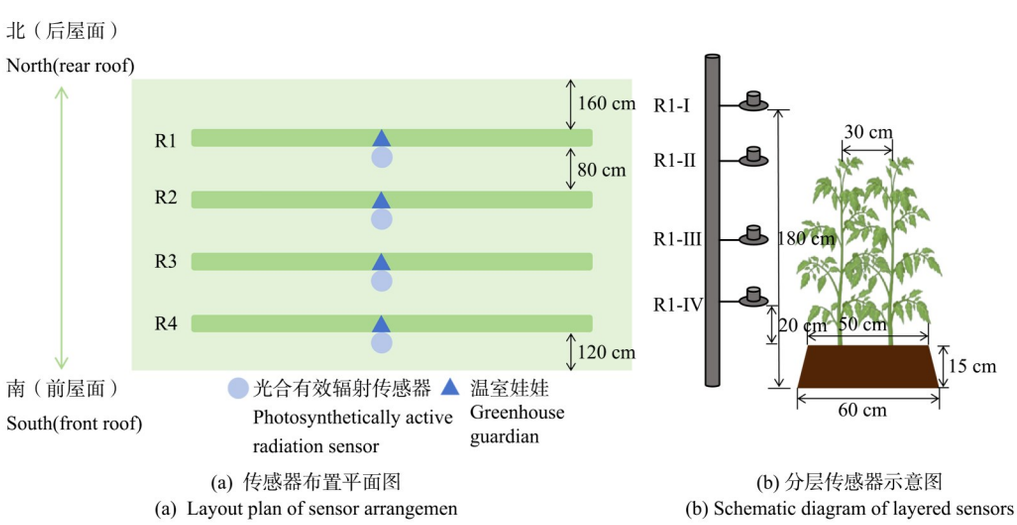
试验于2024年8月27日—2025年1月10日（秋冬茬）和2025年3月5日—6月20日（冬春茬）2个生产周期内进行。采用东西垄向宜机化栽培模式，共设4条栽培垄，由北向南依次编号为R1、R2、R3和R4。垄体结构参数如下：垄中心距140 cm、垄底60 cm、垄面50 cm、垄高15 cm、垄沟80 cm。双行定植，种植密度为2 000株/667 m²。熊蜂授粉，使用单通道智能施肥机（北京市农林科学院智能装备技术研究中心研制）对温室内4垄执行统一灌溉作业，灌溉决策方法为累积光辐射驱动法[16]，决策所需的光辐射监测数据，均由布设至R2垄的光辐射传感器提供。

单杆整枝，秋冬茬留4穗果，于10月18日去生长点；春茬留5穗果，于5月8日去生长点，去生长点时在顶端果穗上方保留2片功能叶。坐果后及时进行疏花疏果，每穗保留3～4个果形端正、无病虫害的健康果实。秋冬茬总灌溉量为3 283.81 m³/hm²，冬春茬总灌溉量为3 542.14 m³/hm²。需特别说明的是，在冬春茬栽培期间，2025年4月11—13日遭遇极端大风天气，温室保温被在此期间未能正常开启，对第3、4穗果的坐果造成一定影响。

1.4 空气温湿度及光合有效辐射监测

空气温湿度采用温室娃娃（北京农芯科技有限责任公司，空气温度测量精度为±0.2 ℃，测量范围为－30～70 ℃；相对湿度测量精度为±2%，测量范围为0～100%）部署在各栽培垄中心作物冠层上方距离地面约200 cm处，监测空气温度和相对湿度，采集频率为15 min/次，数据上传至云平台。

光合有效辐射采用RS-GH-AL型传感器（山东仁科测控技术有限公司）进行监测，测量范围为0～2 500 μmol/(m²·s)、精确度为±5%。传感器分层安装在放置于各栽培垄沟的立柱上，立柱紧邻垄沟北侧，传感器固定于立柱东侧平面，水平向上安装。共设4个垂直高度层级：I层位于作物冠层顶部（距地面180 cm），II层齐平植株生长点，III层位于植株中部，IV层靠进植株基部（距垄面20 cm）。其中，II和III层传感器的高度随植株生长动态调整，以确保始终对应相应植株部位（图1）。该布设方案可有效



(a) 传感器布置平面图 (a) Layout plan of sensor arrangemen

(b) 分层传感器示意图 (b) Schematic diagram of layered sensors

图1 温室传感器布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor arrangement in solar greenhouse

捕捉东西垄栽培模式下垄间及冠层不同高度的光合有效辐射分布特征。所有传感器与单通道智能施肥机实现数据通讯，采集频率为5 min/次。

2个茬口全生育期的空气温湿度、光辐射数据如图2和图3所示。不同垄间空气温度和相对湿度未呈现明显的空间差异，但是秋冬茬生育进程中后期最南侧垄R4相比其他栽培垄低。作物冠层日累积光辐射整体呈现为秋冬茬营养生长期到开花坐果期为R3>R4>R2>R1，果实膨大期为R4>R3>R2>R1；冬春茬整体表现为R3>R4>R2>R1，其中最北侧垄R1最低。栽培垄间不同高度光辐射呈现为I（冠层）>II（上）>III（中）>IV（下），随着生育期推进，植株中下层光截获率逐渐下降，栽培垄由北往南逐渐增大，其中采收期植株下层光截获率秋冬茬和冬春茬分别为4.50%、21.80%、28.41%、19.40%和3.10%、14.20%、20.30%、16.50%。

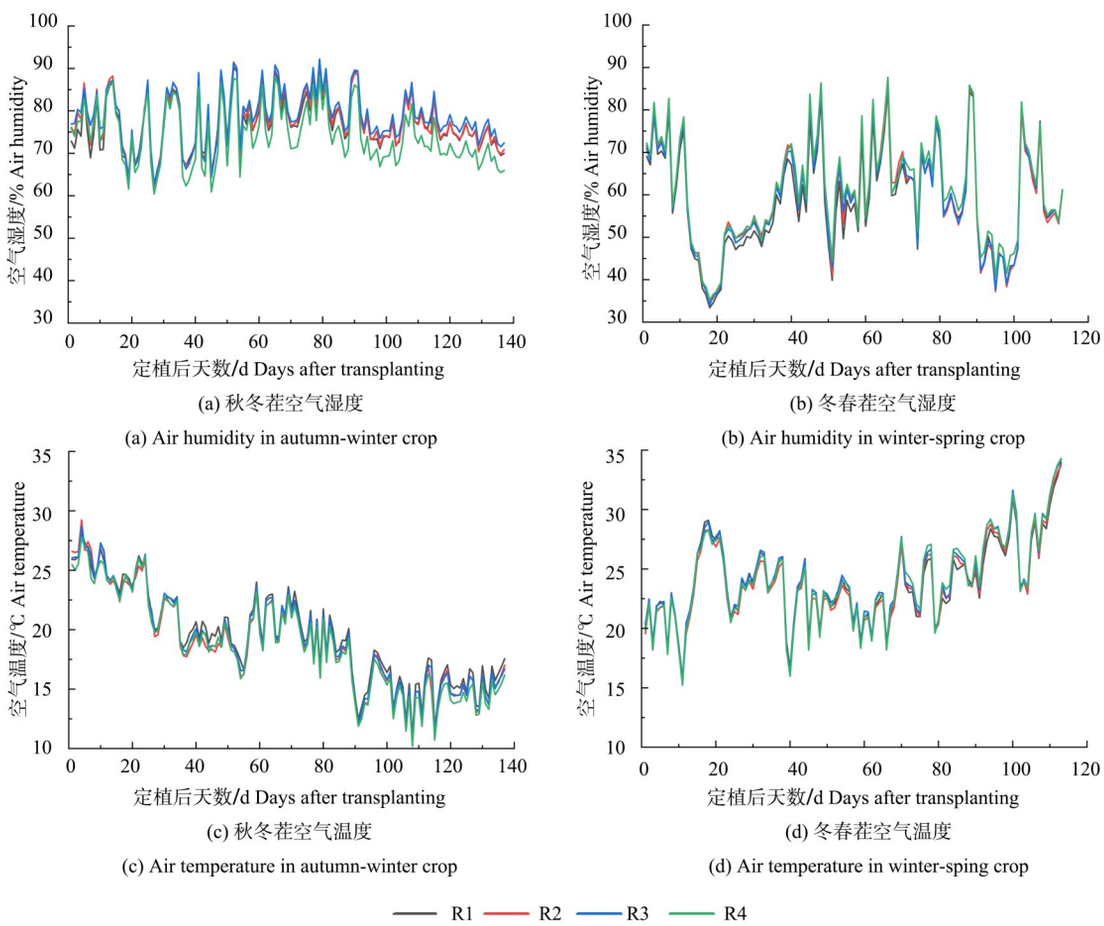


图2　不同垄间日平均冠层温湿度

Fig. 2　Daily mean canopy temperature and relative humidity among different ridges

1.5　测定指标及方法

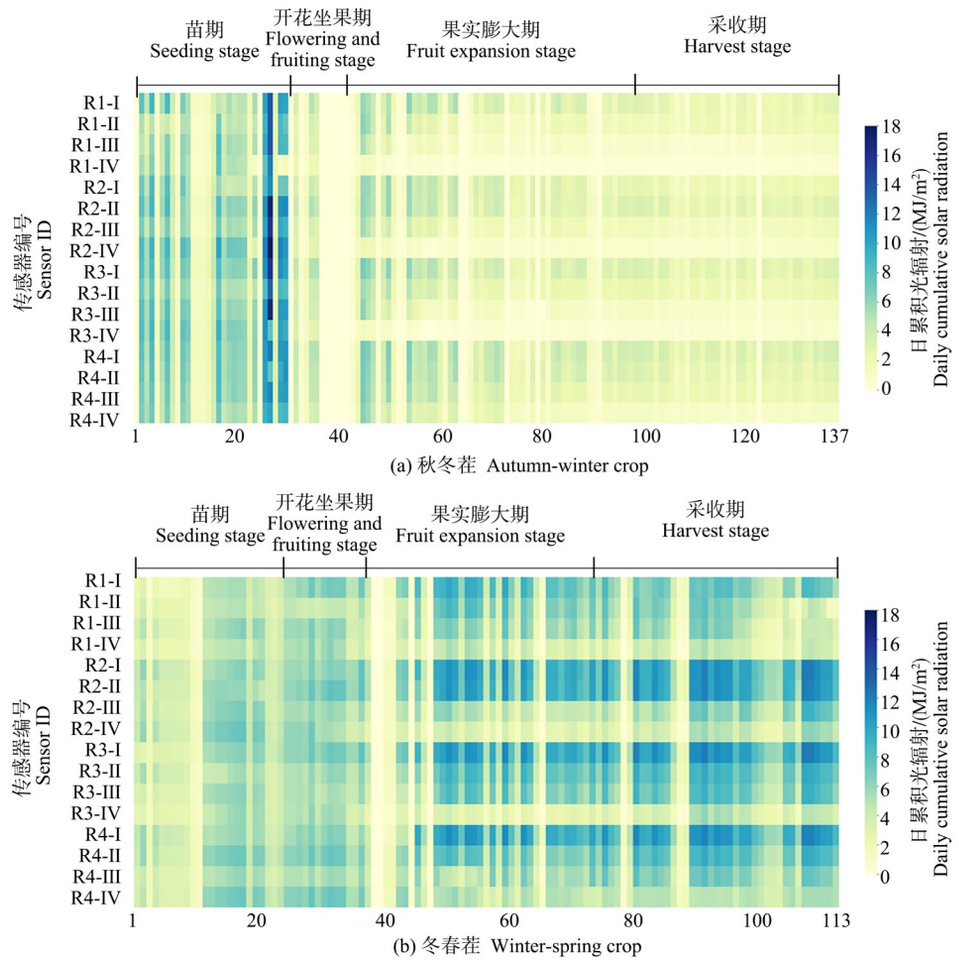
1.5.1　番茄生长指标测定

缓苗后，从定植第33天开始测定。每垄距西侧山墙及东侧进门5 m以内为保护行；于保护行以外的连续种植区双行中的南侧行随机选取5株长势一致的番茄植株进行标记，后续测定均在该标记植株上进行。测量植株高度（卷尺，精度0.1 cm）、根部茎粗（游标卡尺，精度0.01 cm）、叶片面积（软尺，精度0.1 cm），测量频率为7 d/次。其中叶片面积通过测量单叶叶片长和宽，利用式（1）和式（2）[17]计算获得。

$$LA=\begin{cases}0.378\,2ab, 0<a\leqslant 20\\ 0.318\,4ab, a>20\end{cases} \quad (1)$$

$$TLA=\sum_{i=1}^{n}LA_i \quad (2)$$

式中：LA为单叶面积，m^2；a为叶长，m；b为叶宽，m；TLA为全株叶面积，m^2。



图中秋冬茬定植第38天到第42天，机器断电维护导致数据缺失；冬春茬定植第41天到第42天特级大风天气影响温室保温被未卷起导致光辐射为0。

In the autumn-winter season, data was missing from the 38th to the 42nd day after transplanting due to power failure and maintenance of the monitoring equipment. In the winter-spring season, the greenhouse insulation quilt failed to be rolled up due to extreme gale weather from the 41st to the 42nd day after transplanting, resulting in zero solar radiation.

图3 东西垄番茄日累积光辐射热图

Fig. 3 Heatmap of daily cumulative solar radiation of tomato under east-west ridge cultivation

1.5.2 植株生理指标测定

叶绿素相对含量(SPAD)：使用SPAD-502plus叶绿素仪(KONICA MINOLTA公司，日本)测量番茄植株叶片SPAD值。测定所用植株与频率同1.5.1。每株统一选取上、中、下3个位置的健康功能叶片，不同垄间的测定叶位完全一致，测定时避开叶片主叶脉，每个叶片重复测定5次取平均值。

光合参数：在秋冬茬和冬春茬果实膨大期选择晴天(11月17日、5月13日)，采用li-6400光合仪(LI-COR公司，美国)测量番茄植株光合日变化(9：00—15：00)。每垄选择3株植株，每2 h测量1次中上部功能叶片的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、胞间CO_2浓度(Ci)、气孔导度(Gs)。设定参数为：叶室温度25 ℃，相对湿度50%，CO_2水平为400 μmol/mol，光照强度为500 μmol/(m^2·s)。

1.5.3 可溶性固形物含量和产量测定

可溶性固形物含量(SSC)测定：分垄分果穗采收成熟度一致(全红)的果实5个，采用PAL-1型号糖度计(ATOGO公司，日本)测量SSC，其测量范围为Brix 0～53%，精度为±2%。

产量测定：果实成熟后，分垄分果穗采收番茄，记录果实个数并称重，计算单垄产量。

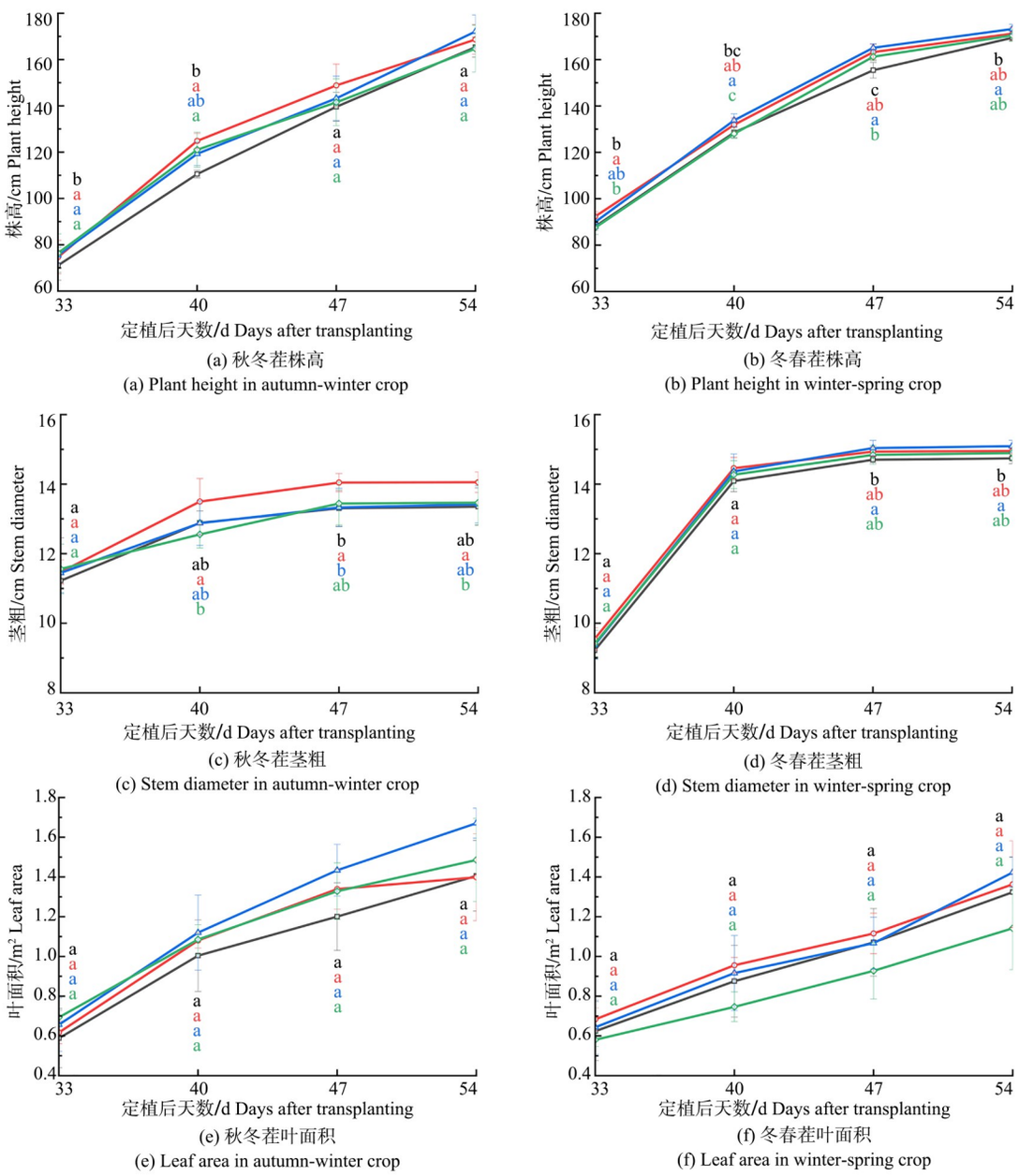
1.6 数据处理及分析方法

数据处理与图表绘制采用Origin 2024以及python完成，统计分析使用SPSS 23.0软件进行，显著性水平设定为$P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　不同栽培垄番茄的株高、茎粗和叶面积

不同垄间的番茄株高、茎粗及叶面积见图 4。随着定植天数增加，各栽培垄番茄的株高和叶面积均呈现出不断增大的趋势，茎粗先迅速增大再缓慢增加至平稳。最北垄 R1 株高较其他 3 垄低，其中秋冬茬前期达到了显著水平（$P<0.05$），其他 3 垄整体差异较小。中间垄 R2 秋冬茬茎粗较其他栽培垄高，其他栽培垄整体差异不显著。不同栽培垄叶面积秋冬茬 R1 最小、冬春茬 R4 最小，但整体差异不显著。



图中同列数据不同字母表示差异显著（$P<0.05$），相同字母表示差异不显著（$P>0.05$）。下同。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$), while the same letter indicates no significant difference ($P>0.05$). The same below.

图 4　不同栽培垄的番茄株高、茎粗和叶面积

Fig. 4　Plant height, stem diameter and leaf area of tomato among different cultivation ridges

2.2 东西垄不同垄间番茄生理指标的分布特征

2.2.1 不同栽培垄番茄叶片的SPAD值

不同垄间番茄植株不同部位叶片SPAD值见图5。不同栽培垄植株SPAD值存在显著差异($P<0.05$),这可能与光辐射空间分布存在异质性有关。由图5可知,从北往南各栽培垄叶片SPAD值整体呈逐渐增大的趋势(秋冬茬上部叶片除外,其呈现缓慢下降变化),最北垄R1最低,且与R3和R4达到显著水平($P<0.05$);不同栽培垄叶片SPAD值差异为秋冬茬大于冬春茬,秋冬茬生育进程中前期大于后期,冬春茬整个生育进程差异变化不显著。各栽培垄植株不同高度叶片SPAD值均呈现出上部>中部>下部,且从上往下的差异呈增大趋势,中下部之间叶片SPAD值差异与上中部相比秋

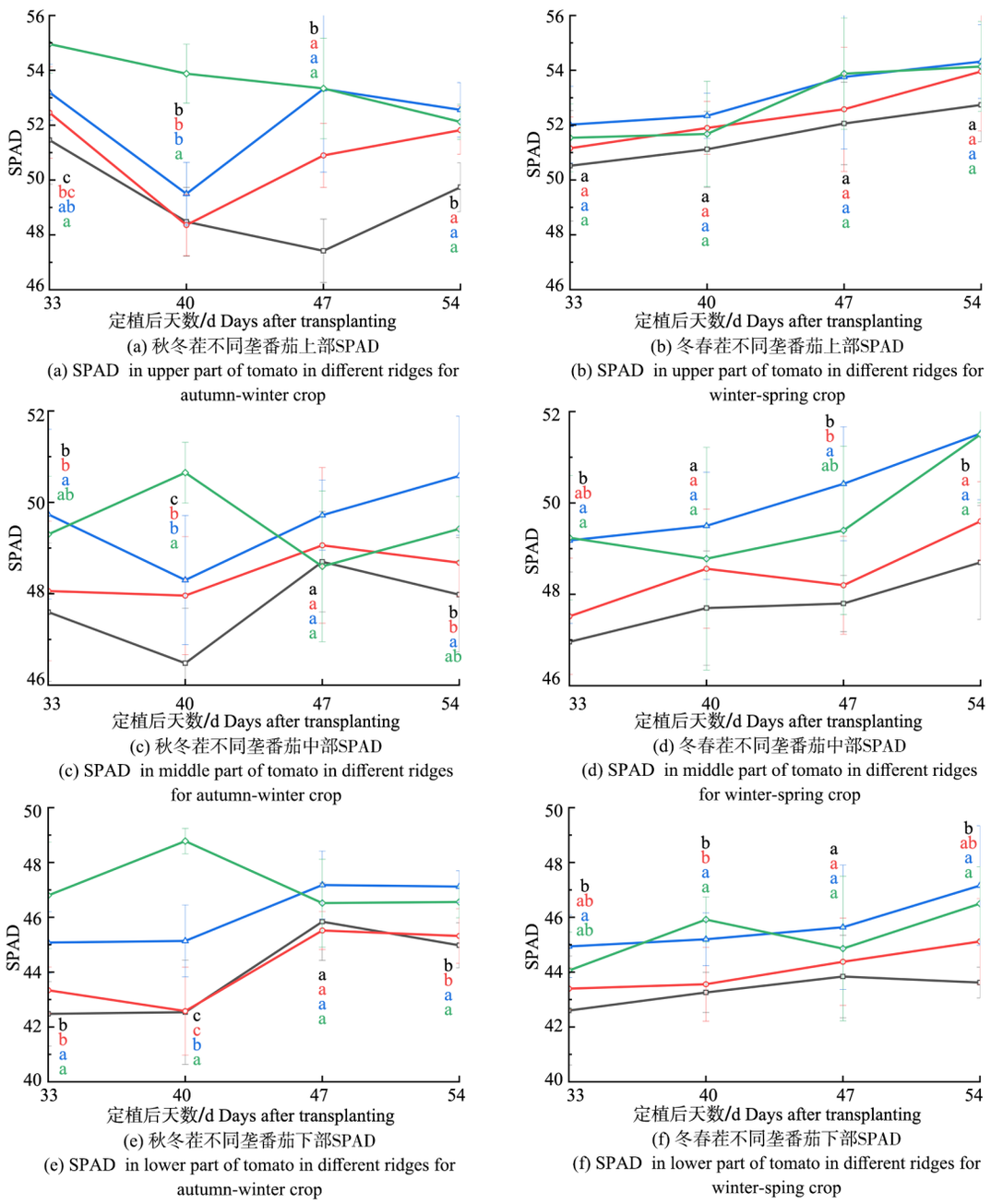


图5 不同栽培垄番茄叶片的SPAD

Fig. 5 SPAD of tomato leaves among different cultivation ridges

冬茬、冬春茬分别增加34.73%和28.22%。这与光辐射在栽培垄垂直方向的分布特征一致，说明光辐射对叶片SPAD含量具有重要作用。

2.2.2 *不同栽培垄番茄的光合参数*

不同栽培垄番茄功能叶片的净光合速率、气孔导度、胞间CO_2浓度和蒸腾速率日变化见图6。2茬番茄叶片Pn、Tr日变化均为典型单峰曲线，峰值均出现在11:00—13:00；Gs在11点后呈下降趋势、Ci呈整体上升变化。各栽培整体表现为Pn、Gs和Tr冬春茬高于秋冬茬，Ci反之，这可能与冬春茬温室内光温条件高于秋冬茬有关。从空间分布看，4个栽培垄番茄叶片Pn、Gs和Tr均是最北垄R1最小，R2次之，南侧垄R3和R4之间无显著差异。上午最北垄R1叶片Pn、Tr与其他栽培垄之间差异显著（$P<0.05$），且Pn峰值较R3（秋冬茬）、R4（冬春茬）低27.3%和28.6%，Tr峰值较R4降低10.6%～18.3%。不同栽培垄番茄叶片Ci差异不显著。由上可知，日光温室东西垄栽培不同栽培垄之间番茄叶片光合性能存在显著差异，并受茬口影响，推测可能与光辐射从北往南栽培垄上的空间分布差异性相关。

2.3　不同栽培垄番茄可溶性固形物含量和产量

不同栽培垄番茄各果穗可溶性固形物含量见表1。各栽培垄番茄果实SSC存在差异，且与穗位、茬口相关。秋冬茬4个栽培垄番茄果实SSC由高到低依次为R4、R3、R2、R1，不同垄之间的差异整体呈现为第4穗＞第3穗＞第2穗＞第1穗，其中第3穗、第4穗果SSC在R4、R3与R2、R1之间差异达到显著水平（$P<0.05$）。冬春茬，中间垄R3、R2果实SSC高于南侧垄R4和北侧垄R1（第5穗果除外），其中R1前4穗果显著低于R3，R4第1穗果与R3达到显著水平（$P<0.05$），中间垄R3与R2之间无显著差异；此外，随着果实穗位上升，不同垄间果实SSC差异缩小，这与秋冬茬相反，可能与该茬口下光温的时序变化特征有关。

东西垄栽培下，各栽培垄光热条件不同导致植株生长生理存在差异，进而影响果实产量。从表2可知，番茄果实产量在空间分布上呈现出明显的垄位差异，且受茬口影响。2个栽培茬，由北往南R1～R4的果实产量均呈逐渐增加的趋势，依次为24.35、39.61、40.32、44.93 t/hm²和51.15、62.62、67.86、68.78 t/hm²；最北侧垄R1产量明显低于其他3垄且秋冬茬差异大于冬春茬，其中较最南侧垄R4（产量最高）分别低了45.80%和25.63%。进一步分析单穗果产量，R1各穗果产量均最低，R4秋冬茬第1和4穗、冬春茬第1和2穗果较R2、R3低；不同栽培垄果穗产量差异随穗位上升呈现增大趋势，即秋冬茬第1至4穗果产量变异系数依次为11.52%、30.71%、27.11%和37.74%，冬春茬为10.73%、8.84%、22.42%、40.46%和18.74%。

2.4　光环境对番茄产量和SSC的作用机制

生育期总累积光辐射、叶面积、SPAD、Pn、产量以及SSC之间的Pearson相关性分析结果见图7。生育期总累积光辐射与产量（$r=0.829$）、SPAD（$r=0.531$）呈极显著正相关（$P<0.01$），与Pn（$r=0.690$）呈正相关，与SSC呈显著正相关（$r=0.361$，$P<0.05$），与叶面积呈正相关（$r=0.462$）；叶面积与Pn呈显著正相关（$r=0.737$，$P<0.05$），与SSC呈正相关（$r=0.701$）；SPAD与产量呈极显著正相关（$r=0.863$，$P<0.01$），与Pn呈显著正相关（$r=0.707$，$P<0.05$）；Pn与产量（$r=0.773$）、SSC（$r=0.893$）呈显著正相关（$P<0.05$）。

进一步采用通径分析解析光环境对产量和品质的驱动路径（表3）。鉴于叶面积、SPAD与Pn之间存在高度相关性，直接纳入通径分析易导致多重共线性。因此，本研究采用简化通径模型，剔除Pn变量，直接分析光辐射通过叶面积（群体结构）、SPAD（光合功能）对产量和品质的驱动效应，以避免共线性导致的系数失真。其中，累积光辐射对叶面积和SPAD的标准化通径系数分别为0.462和0.531。以产量为因变量时：SPAD对产量的直接通径系数为0.702，累积光辐射直接通径系数为0.515，叶面积直接通径系数为0.013。累积光辐射的总效应为0.894，其中直接效应0.515，间接效应0.379（经叶面积和SPAD介导）。以SSC为因变量时：叶面积对SSC的直接通径系数为0.474，SPAD直接通径系数为0.431，累积光辐射直接通径系数为0.354。累积光辐射的总效应为0.802，其中直接效应0.354，间接效应0.448（经叶面积和SPAD介导）。

综上，累积光辐射通过差异化路径调控番茄产量与品质：①产量路径：直接促进产量，并通过提升SPAD间接增强光合能力，SPAD为核心驱动，叶面积无显著独立贡献；②品质路径：通过提升叶面积和SPAD间接促进SSC积累，叶面积为核心驱动。

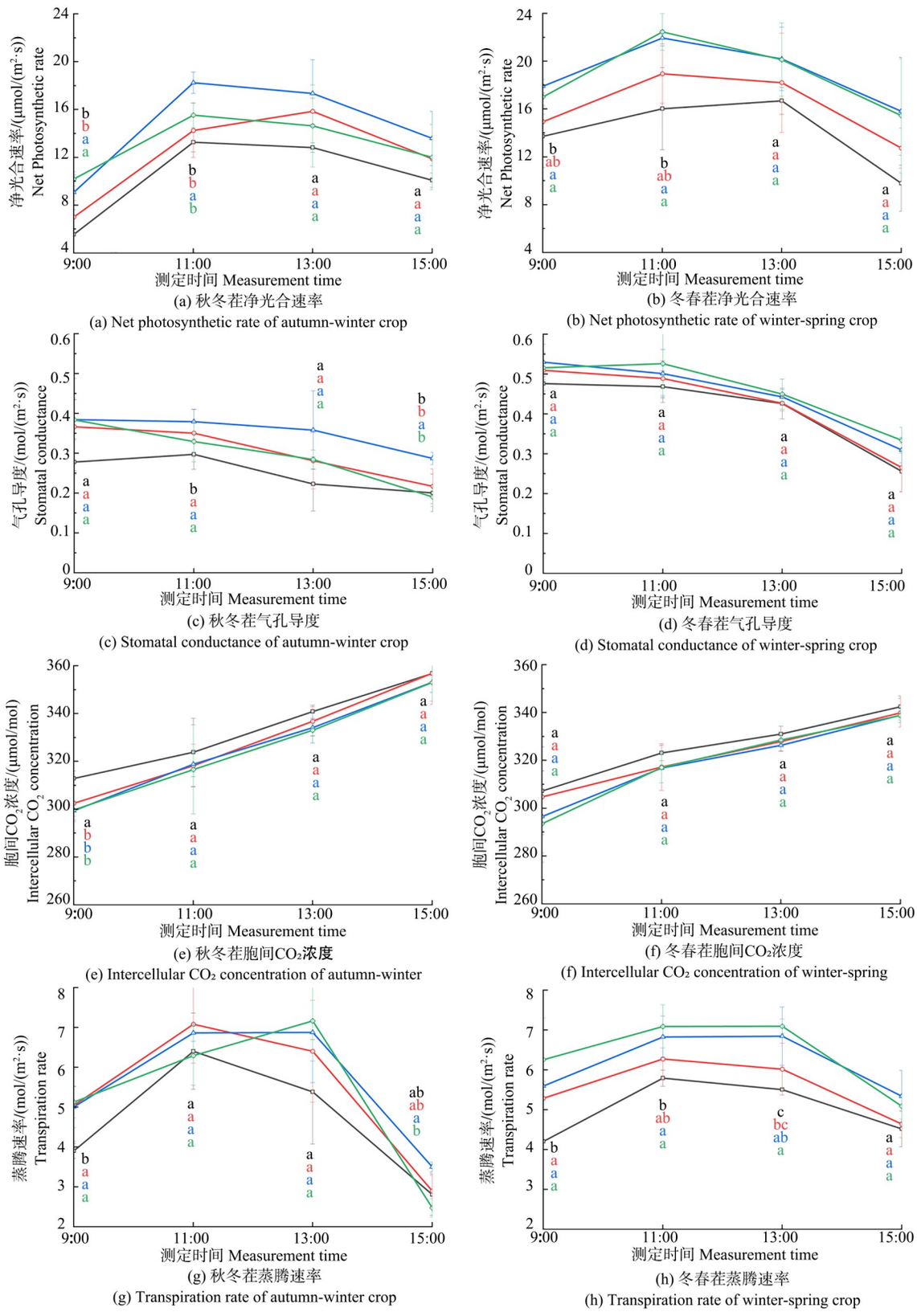


图 6　不同栽培垄的番茄光合参数

Fig. 6　Photosynthetic parameters of tomato among different cultivation ridges

表 1　不同栽培垄番茄的可溶性固形物含量

Table 1　Soluble solids content of tomato among fifferent cultivation ridges

茬口 Cropping season	垄位 Ridge position	可溶性固形物含量/% Soluble solids content				
		1穗 1st truss	2穗 2nd truss	3穗 3rd truss	4穗 4th truss	5穗 5th truss
秋冬茬 Autumn-winter season	R1	5.78±0.50 a	6.20±0.33 a	6.24±0.15 b	6.20±0.33 b	
	R2	5.86±0.45 a	6.36±0.38 a	6.36±0.34 b	6.08±0.18 b	
	R3	5.98±0.31 a	6.76±0.45 a	6.62±0.51 ab	6.48±0.59 ab	
	R4	6.10±0.56 a	6.62±0.53 a	6.88±0.34 a	6.84±0.39 a	
冬春茬 Winter-spring season	R1	6.28±0.43 b	6.48±0.43 b	6.70±0.51 b	6.90±0.38 b	7.08±0.26 a
	R2	6.68±0.24 ab	7.24±0.68 ab	7.00±0.41 ab	8.14±0.47 a	7.24±0.21 a
	R3	6.82±0.29 a	7.68±0.86 a	7.56±0.59 a	7.62±0.53 a	7.46±0.42 a
	R4	6.22±0.35 b	6.98±0.40 ab	7.06±0.29 ab	7.68±0.39 a	7.38±0.52 a

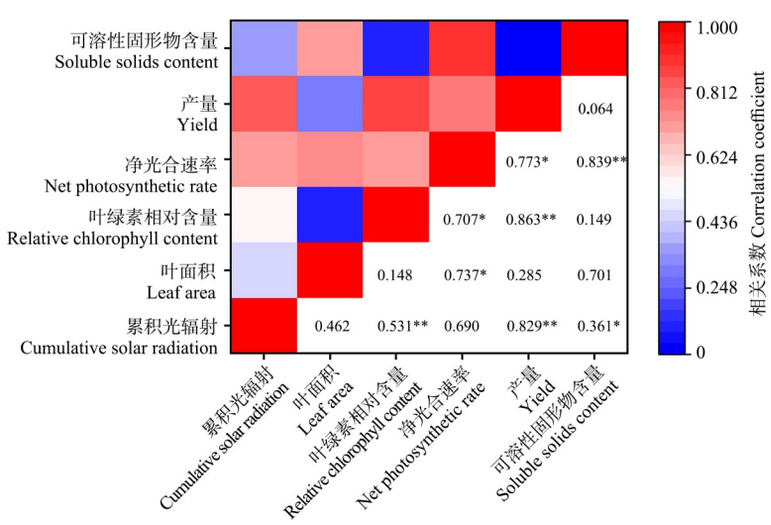
注：同列数据不同字母表示差异显著（$P<0.05$），相同字母表示无显著差异（$P>0.05$）。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$), while the same letter indicates no significant difference ($P>0.05$). The same below.

表 2　不同栽培垄番茄的产量

Table 2　Yield of tomato among different cultivation ridges

茬口 Cropping season	垄位 Ridge position	产量/(t/hm²) Yield						垄产量/kg Yield per ridge
		1穗 1st truss	2穗 2nd truss	3穗 3rd truss	4穗 4th truss	5穗 5th truss	总产量 Total yield	
秋冬茬 Autumn-winter season	R1	11.73	7.30	4.02	1.30		24.35	49.70
	R2	15.04	14.53	6.47	3.58		39.61	80.85
	R3	16.24	14.06	6.96	3.06		40.32	82.30
	R4	14.80	19.30	8.87	1.96		44.93	91.70
冬春茬 Winter-spring season	R1	18.62	16.71	7.50	2.35	5.98	51.15	104.40
	R2	22.81	19.87	9.55	4.56	5.83	62.62	127.80
	R3	24.11	20.58	12.30	3.77	7.10	67.86	138.50
	R4	22.38	18.96	12.30	6.52	8.62	68.78	140.40



*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著和极显著。

*and ** indicate significant and extremely significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

图 7　生育期总累积光辐射、叶面积、SPAD、Pn、产量以及 SSC 的相关性分析

Fig. 7　Correlation analysis of total accumulated radiation, leaf area, SPAD, Pn, yield and SSC during the growth period

表 3 生育期总累积光辐射、叶面积以及 SPAD 与产量和 SSC 的通径分析

Table 3 Path analysis of total accumulated radiation, leaf area and SPAD with yield and SSC during the growth period

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect
产量 Yield	累积光辐射	0.515*	0.379	0.894
	叶面积	0.013		—
	SPAD	0.702**		—
可溶性固形物含量 Soluble solids content	累积光辐射	0.354	0.448	0.802
	叶面积	0.474*		—
	SPAD	0.431		—

注：*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著和极显著。

Note: *and ** indicate significant and extremely significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨 论

3.1 东西垄向栽培下番茄植株生长生理的空间分布特征

设施内光热环境不均是影响作物群体生长一致性的核心问题。日光温室内，侧墙及固定保温被产生的动态阴影叠加作物遮荫，天然存在北部光照弱于南部的现象[18]，而东西垄向栽培会进一步放大温室内的光环境差异。本研究表明，番茄各生长指标呈现出与温室内光环境相类似的空间分布特征。具体表现为，北侧垄 R1 的株高、茎粗及叶面积均显著低于南侧垄 R3 和 R4，尤其在秋冬茬差异最为显著。本研究结果与已在葡萄[19]、黄瓜[20]、南瓜[20]等作物上得出的研究结论一致。这一结果初步证实了“南强北弱”的光环境是导致植株生长出现空间异质性的因子。值得注意的是，本研究还观察到，在冬春茬生长后期，R1 的生长指标与其他垄之间的差距有所缩小。推测是季节更替带来的自然光强增强与太阳高度角增大，部分补偿了北侧的结构性遮荫，从而缓解了前期的生长劣势[21]。本研究表明，叶片 SPAD 值呈现由下到上、由北向南逐渐升高的空间分布特征，净光合速率、气孔导度和蒸腾速率日均值均表现为 R4≈R3＞R2＞R1 的趋势，与袁仕溢[23]研究发现的南侧垄叶片叶绿素含量和净光合速率均高于北侧垄结果一致；而胞间 CO_2 浓度无显著垄间差异，R1 的“低 Pn、高 Ci”生理特征表明其光合能力下降源于非气孔限制。光环境作为调控植物光合作用与生理代谢的核心因子，可通过水平分布差异改变冠层结构与光垂直分布，二者循环互作进一步放大垄间生理差异[22]。上述研究结果，从功能层面进一步证实光环境异质性是光合参数空间分化的核心环境因子。本研究中北侧垄 R1 的 SPAD 值与净光合速率显著偏低，表明该区域光照强度可能已接近或低于番茄光补偿点，长期弱光胁迫限制了植株光合生理与生长发育，实际生产中可对北侧垄采用 LED 等方式补光，优化冠层光环境，有效缩小垄间生长与产量差异，提升日光温室东西垄宜机化栽培的整体生产效益。综上，光环境的空间分布影响了东西垄不同垄间番茄的生长，且其调控效应具有一定的季节动态特征。

3.2 番茄产量与品质间分布特征及驱动机制

作物产量的形成核心取决于光合产物的总量及其在不同器官间分配方式，而这一分配过程主要由各器官竞争与利用同化物的能力所驱动[24]。本研究发现，东西垄向栽培模式下，番茄产量呈现由北向南递增的趋势，秋冬茬中 R1 垄的产量仅为 R4 垄的 54.20%，而冬春茬中该比例升至 74.37%，该规律与光合有效辐射的空间梯度高度吻合，并且与杨冬艳[9]等研究结果一致。果实的可溶性固形物含量也表现出相同趋势，但两茬口间差异的时序动态相反：秋冬茬各垄间 SSC 差异随穗位升高而扩大；而冬春茬则缩小。这一差异可能是秋冬茬随着生育进程推进，自然光照由强转弱和太阳高度角的下降，R1 受温室结构遮荫及南侧垄植株遮挡的叠加影响光辐射接收量进一步降低，导致光合产物供应不足，果实糖分积累受限，最终拉大垄间果实 SSC 差异；冬春茬则相反。

为深入解析上述空间分异现象的内在驱动机制，本研究采用 Pearson 相关性分析以及通径分析进行定量解析。结果表明，累积光辐射是驱动产量

与SSC空间分异的根本环境因子，其作用通过2条差异化路径实现：一是累积光辐射既可以直接驱动产量形成（$\beta=0.515$，$P<0.05$），又可通过叶片SPAD间接驱动产量形成（$\beta=0.702$，$P<0.01$）；二是累积光辐射对SSC的直接效应不显著（$\beta=0.354$，$P>0.05$），主要通过叶面积间接促进SSC积累（$\beta=0.474$，$P<0.05$）。这条“光辐射→SPAD→产量”与“光辐射→叶面积→SSC”的路径，解释了不同栽培垄间生产力差异的生理基础：R1因光环境劣势导致叶片SPAD值与叶面积偏低，削弱了光合产物合成与积累能力，直接造成产量和SSC的下降。

综上，东西垄向栽培下“南强北弱”的产量和SSC格局，本质上是“南强北弱”的光环境差异，这一结果明确了群体结构与光合功能在产量与品质形成中的功能分化：SPAD主导产量形成，而叶面积对SSC具有独特贡献，完善了“光环境→光合器官→产量品质”的作用机制链条。

4　结　论

本研究探究日光温室东西垄栽培番茄生长生理和品质产量的空间特征及光环境驱动机制，主要结论如下：

1）番茄植株生长、光合生理、品质及产量的垄位差异显著。北侧垄（R1）各项指标均显著低于南侧垄（R3、R4），且垂直冠层内上、中、下部叶片的SPAD值差异显著。果实SSC以及产量整体呈现由北向南递增，2茬R1的产量分别较R4低45.80%和25.63%；并且SSC和产量的垄位差异随穗位上升呈增大趋势。该结果主要适用于华北地区同类型的日光温室东西垄向栽培模式，后续可进一步开展不同区域和不同结构参数日光温室试验，明确东西垄向栽培番茄产量空间分异的普适性规律。

2）光辐射主要通过群体结构（叶面积）和光合功能（SPAD）介导的间接路径作用于可溶性固形物，且其对产量的直接调控效应达到显著水平。其中SPAD是驱动产量的核心生理因子，对产量具有极显著直接正向效应（$\beta=0.702$，$P<0.01$）；叶面积则是驱动SSC积累的关键因子，对SSC表现出显著直接正向效应（$\beta=0.474$，$P<0.05$）。综上，日光温室东西垄栽培番茄品质、产量空间异质性与光辐射分布密切相关，光环境通过差异化调控群体结构（叶面积）与光合功能（SPAD）驱动产量与品质形成，进一步推进光环境优化调控研究对日光温室东西垄宜机化栽培模式发展具有重要意义。

参考文献　References

[1] 李天来，齐明芳，孟思达. 中国设施园艺发展60年成就与展望[J]. 园艺学报，2022，49(10)：2119-2130
Li T L，Qi M F，Meng S D. Sixty years of facility horticulture development in China：Achievements and prospects [J]. *Acta Horticulturae Sinica*，2022，49(10)：2119-2130 (in Chinese)

[2] 宋卫堂，李明，宋坚利，王平智. 基于“农艺-农机-设施”融合的设施番茄机械化生产技术模式构建与验证[J]. 农业工程技术(温室园艺)，2022，42(4)：47-50
Song W T，Li M，Song J L，Wang P Z. Construction and verification of mechanized production technology model of protected tomato based on the integration of agronomy，agricultural machinery and facilities[J]. *Agriculture Engineering Technology(Greenhouse Horticultore)*，2022，42(4)：47-50 (in Chinese)

[3] 农业农村部，国家发展改革委，财政部，自然资源部. 全国现代设施农业建设规划(2023—2030年)[R]. 北京：农业农村部，2023
Ministry of Agriculture and Rural Affairs，National Development and Reform Commission，Ministry of Finance，Ministry of Natural Resources. National Modern Facility Agriculture Construction Plan (2023—2030)[R]. Beijing：Ministry of Agriculture and Rural Affairs，2023 (in Chinese)

[4] 韩芙蓉. 日光温室东西垄种植的蔬菜分区灌溉系统构建与应用研究[D]. 太谷：山西农业大学，2024
Han F R. Construction and application of partition irrigation system for vegetable planted in east and west ridges in solar greenhouse [D]. Taigu：Shanxi Agricultural University，2024 (in Chinese)

[5] 陈婷，任成梁，李泽山，何翔，院海英，张国龙. 不同垄向栽培模式下日光温室番茄光环境及产量分布特征研究[J]. 西北园艺，2025(9)：63-67
Chen T，Ren C L，Li Z S，He X，Yuan H Y，Zhang G L. Study on light environment and yield distribution characteristics of tomato in solar greenhouse under different ridge cultivation modes [J]. *Northwest Horticulture*，2025(9)：63-67 (in Chinese)

[6] 谭春梅，轩正英，邹学校，戴熊泽，杨莎，杨振超，王永明，马新超，王婷婷，杨生保. 垄向对设施辣椒光温利用、生长、品质及生产效率影响的研究进展[J]. 塔里木大学学报，2025，37(6)：1-8
Tan C M，Xuan Z Y，Zou X X，Dai X Z，Yang S，Yang Z C，Wang Y M，Ma X C，Wang T T，Yang S B. Research progress on the effects of ridge orientation on light and temperature utilization，growth，quality，and production efficiency of protected pepper[J]. *Journal of Tarim University*，2025，37(6)：1-8 (in Chinese)

[7] 宋卫堂. 日光温室蔬菜生产全程机械化的一种解决方案[J]. 中国农机化学报，2018，39(9)：26-29
Song W T. A complete mechanization solution for greenhouse vegetable production [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*，2018，39(9)：26-29 (in Chinese)

[8] 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(温室园艺)，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]. *Agriculture Engineering Technology (Greenhouse Horticultore)*，2020，40(1)：44-47 (in Chinese)

[9] 杨冬艳，赵云霞，王丹，桑婷，宋卫堂. 宁夏日光温室蔬菜机械化生产实践及效果[J]. 中国蔬菜，2021(10)：117-121
Yang D Y，Zhao Y X，Wang D，Sang T，Song W T. Practice and effect of mechanized vegetable production in solar greenhouse in Ningxia[J]. *China Vegetables*，2021(10)：117-121 (in Chinese)

[10] 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)

[11] 陈启峰, 李星, 富宏丹, 余朝阁, 刘义玲, 董文阁, 张华仁, 孙周平. 日光温室秋冬茬番茄东西垄宜机化栽培适宜垄距参数研究[J]. 中国蔬菜, 2024(9): 104-111
Chen Q F, Li X, Fu H D, Yu C G, Liu Y L, Dong W G, Zhang H R, Sun Z P. Research on suitable distance parameters for east-west ridge mechanized tomato cultivation in autumn and winter crops in solar greenhouses[J]. *China Vegetables*, 2024(9): 104-111 (in Chinese)

[12] 潘文博. 整枝措施对东西垄栽培番茄产量和品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024
Pan W B. Effects of pruning pattern and east-west ridges cultivation on yield and quality of tomatoes[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024 (in Chinese)

[13] Li Y M, Henke M, Zhang D L, Wang C Q, Wei M. Optimized tomato production in chinese solar greenhouses: The impact of an east-west orientation and wide row spacing[J]. *Agronomy*, 2024, 14(2): 314

[14] Han F R, Zhangzhong L L, Zheng W G, Li J J, Shi K L, Wei Y B. Water utilization strategy of tomato grown on east-west orientation in solar greenhouses revealed based on hydroxide isotopes[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 308: 109286

[15] 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)

[16] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998

[17] 任乐, 罗新兰, 李天来, 符特, 薛俊华, 顾继光. 日光温室温度对番茄叶面积扩展的影响[J]. 安徽农业科学, 2007(9): 2610-2612
Ren L, Luo X L, Li T L, Fu T, Xue J H, Gu J G. Effect of temperature on expansion of tomato leaf area in greenhouse [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007(9): 2610-2612 (in Chinese)

[18] Zhang R, Liu Y C, Zhu D L, Zhang X M, Lu L Q, Gao F, Zheng C J. Dynamics of shaded areas in a typical-shaped solar greenhouse and their effects on tomato growth: A case study in winter[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 312: 111882

[19] 王明洁, 鲁会玲, 胡禧熙, 杨瑞华, 梁文卫, 覃杨, 唐克, 叶万军, 高越, 谭巍. 日光温室不同部位葡萄光合作用、生长和果实品质差异分析[J]. 中国果树, 2025(12): 83-88
Wang M J, Lu H L, Hu X X, Yang R H, Liang W W, Qin Y, Tang K, Ye W J, Gao Y, Tan W. Analysis of the differences in photosynthesis, growth and fruit quality of grapes in different parts of solar greenhouse[J]. *Journal of China Fruits*, 2025(12): 83-88 (in Chinese)

[20] 李新苗, 郑姗姗, 段佳怡, 姜立娜, 周俊国, 翟于菲. 光照强度对黄瓜及南瓜幼苗生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(3): 88-93
Li X M, Zheng S S, Duan J Y, Jiang L N, Zhou J G, Zhai Y F. Effects of light intensity on the growth of cucumber and pumpkin seed-lings[J]. *China Cucurbit and Vegetables*, 2025, 38(3): 88-93 (in Chinese)

[21] Zhang X D, Lv J, Xie J M, Yu J H, Zhang J, Tang C N, Li J, He Z X, Wang C. Solar radiation allocation and spatial distribution in Chinese solar greenhouses: Model development and application[J]. *Energies*, 2020, 13(5) 1108

[22] Sanchez A, Shin J, Davis S J. Abiotic stress and the plant circadian clock[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2011, 6(2): 223-231

[23] 袁仕溢. 定植行向对日光温室黄瓜生长和产量的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2024
Yuan S Y. Effect of planting row direction on growth and yield of cucumber in solar greenhouse[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2024 (in Chinese)

[24] Marcelis L F. Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(Special Issue): 1281-1291

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 贾宇轩,硕士研究生,现就读于山西农业大学园艺学院农艺与种业专业。主要从事设施园艺方向研究,参与国家自然科学基金面上项目1项(52379035)。



通讯作者简介: 李灵芝,山西农业大学园艺学院教授,山西农业大学番茄产业研究院院长,《中国农业气象》《山西农业大学学报(自然科学版)》等期刊杂志编委和审稿专家。主要从事设施园艺科学与工程、蔬菜栽培生理与品质调控等方面的研究和教学工作。主持和承担国家自然科学基金项目、国家农业科技成果转化资金项目、山西省科技攻关项目、山西省农业科技成果转化资金项目、山西省农业综合开发科技推广项目、山西省留学回国人员科研资助项目、山西省科技厅"三区"科技人才项目以及地市与企业横向项目60余项。主持选育并在农业农村部登记1个番茄新品种,制定4项山西省地方标准,授权发明专利4项、软件著作权1项、实用新型专利16项,出版专著1部、编著3部,参编"十三五"规划教材3部,鉴定成果1项(国内领先),在国内外学术期刊上发表学术论文70多篇。