

光伏组件遮阴对光伏农业系统光环境及无花果产量影响分析

张 龙^{1,2,3}, 吴翠南^{1,3}, 鲍恩财^{1,2,3*}, 龚剑晖¹, 王芽芽¹, 杨 晨⁴,
许桂俊⁴, 王 励⁵, 邓 力⁵

(1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 南京 210014; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 3. 农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室, 南京 210014; 4. 深能南京能源控股有限公司, 南京 211225;
5. 长江三峡集团江苏能源投资有限公司, 南京 210019)

摘 要: 为保证光伏农业项目中的光伏发电效益, 通常在农业用地上铺设大量的光伏组件。日间, 光伏组件会遮挡太阳光线并在农业用地上产生较大的遮阴面积。为探明光伏组件遮阴对光伏农业系统内部光环境、阴影宽度、作物叶片光合特性和产量的影响, 以江苏南京地区光伏组件下沿边缘距离地面垂直高度 (以下简称光伏组件铺设高度) 为 2.5、3.2、3.9 m 的光伏农业系统为试验对象, 测试了光伏农业系统内部光伏阵列板下和板间种植区域的太阳辐射强度, 计算分析了光伏组件遮阴形成的阴影宽度在 1 a 中的变化规律, 研究了光伏阵列板间种植区域无花果的产量和叶片光合特性差异。结果表明, 试验期间光伏阵列板间种植区域的采光率保持在 55.4%~68.9%, 是光伏阵列板下种植区域的 2.1~3.3 倍。在 3 种光伏组件铺设高度下, 光伏阵列板间种植区域的采光率随着光伏组件铺设高度的增加而降低, 光伏阵列板下种植区域相反。无花果全生育期内, 光伏组件遮阴宽度随纬度、光伏组件铺设高度增大而增大。光伏组件遮阴导致各处理的无花果平均产量较露天对照减少了 19.9%~48.9%, 且叶片的光合特性能较好地反映各处理间的产量差异。较低的光伏组件铺设高度能有效提高无花果叶片的净光合速率和气孔导度, 从而减轻光伏组件遮阴导致的光合抑制。综上, 与光伏组件铺设高度为 3.2 和 3.9 m 的光伏农业系统相比, 光伏组件铺设高度为 2.5 m 的光伏农业系统内部光环境更好, 遮阴宽度更窄, 能较好地降低无花果产量的减产幅度, 在各地的光伏农业项目中具有一定的实用价值。

关键词: 农业; 光伏; 光伏组件; 光照; 阴影; 产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407202

中图分类号: S214

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-23-0294-09

张龙, 吴翠南, 鲍恩财, 等. 光伏组件遮阴对光伏农业系统光环境及无花果产量影响分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 294-302. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407202 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Long, WU Cuinan, BAO Encai, et al. Effects of photovoltaic module shading on internal light environment and fig (*Ficus carica* L.) yield in agrivoltaic systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 294-302. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407202 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

光伏农业系统是将太阳能发电与农业生产有机耦合的新型发展模式。随着可再生能源的推广和农业现代化的需求, 该模式在全球范围内得到了快速发展^[1-2]。2021 年的国际光伏农业大会指出, 中国已成为光伏农业模式发展最好的国家之一, 农光一体总装机容量位居世界第一^[3]。目前, 光伏农业项目在中国 3 种类别的太阳能资源区均有应用推广, 为光伏产业发展和乡村振兴作出了

重要贡献^[4-5]。

在农业用地上建设的光伏阵列是光伏农业系统的主体结构, 其主要由光伏组件与支撑部件等组成, 具体包括固定支架、柔性支架与跟踪式支架 3 种光伏阵列类型^[6-7]。鉴于施工成本及设备运行的可靠性, 目前绝大部分的光伏农业项目会优先选用固定支架的安装方案^[6]。为充分保障光伏农业系统中农业生产的土地利用率和机械化率, 中国江苏、云南等省份相继发文要求光伏农业项目的光伏组件在具有一定的倾角下, 设计足够的铺设高度以保证农业的正常生产。通过调研发现, 截至 2024 年 6 月, 已有江苏、陕西等 13 个省份对光伏农业系统中光伏组件下沿边缘距离地面的垂直高度 (以下简称光伏组件铺设高度) 做了强制性规定, 其中江苏等大多省份的光伏农业项目最低光伏组件铺设高度为 2.5 m。

虽然最低光伏组件铺设高度在一定程度上保障了农业的生产, 但是仍有大量的光伏农业项目在实际生产过程中存在“重光轻农”的现象^[8-9]。在光伏农业项目规划建设时, 铺设的大量光伏组件会产生较大的遮阴面积与

收稿日期: 2024-07-22 修订日期: 2024-10-11

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2023BCF01022); 中国三峡新能源 (集团) 股份有限公司科研项目 (合同编号: 32010105); 深圳能源集团股份有限公司科研项目 (0309-NKRC-技开-2023-0030); 农业与能源互补互促技术与应用研究 (37-2023-QQ-49-Q0001)

作者简介: 张龙, 博士生, 研究方向为新能源农业环境工程与装备。

Email: 18862072387@163.com

*通信作者: 鲍恩财, 博士, 副研究员, 研究方向为农业生物环境与能源工程。Email: baoencai1990@163.com

中国农业工程学会高级会员: 鲍恩财 (E041200295S)

动态阴影带, 从而影响光伏农业系统内部的光环境, 最终影响农作物的产量, 这在一定程度上限制了光伏农业产业的发展^[10-12]。针对上述情况, 国内外学者对光伏农业系统内部的光环境进行了深入研究。西北农林科技大学邹志荣团队以光伏日光温室为研究对象, 探究了光伏组件遮阴对室内光环境及番茄生长的影响^[13]; 浙江大学郑荣进团队分析了光伏茶园中固定支架与跟踪式支架的光伏组件遮阴对茶园内部光环境及茶树生长的影响^[14]; SANTRA 等^[15]以 3 种光伏组件铺设密度的光伏阵列研究对象, 研究了光伏组件遮阴对 3 种光伏农业系统内部光量子通量密度的影响; 江苏省农业科学院鲍恩财团队结合传感器配置策略和光伏农业系统空间结构特征, 揭示了光伏组件铺设高度为 3.2 m 的光伏农业系统内部光环境在夏、冬两季的变化规律^[16-17]。

上述研究有效表征了光伏农业系统内部的光环境特征, 不过未考虑光伏组件铺设高度这一结构参数对其内部太阳辐射强度的变化的影响。另外, 光伏组件在光伏农业系统内产生的阴影带随时间变化而变化, 关于光伏农业系统中光伏组件遮阴宽度的动态变化规律亦未见报道。目前对农业建筑中阴影动态变化规律的研究仅局限在连栋温室天沟^[18]、日光温室固定保温被^[19]等结构。

已有研究发现光伏组件遮阴对甘薯^[20]、小麦^[21]、蔬菜^[22]及猕猴桃^[23]等作物的产量均会造成负面影响, 而无花果 (*Ficus carica* L.) 是一种适应性强、耐旱、耐荫、挂果早、产量高、抗病性好且栽植容易的经济性苗木, 在江苏、云南、陕西和湖南等地均有种植, 能较好适应光伏农业系统内部的复杂环境^[24-25]。故本研究以栽植无花果树的光伏农业系统为研究对象, 通过试验测试分析光伏组件铺设高度对光伏农业系统内部太阳辐射强度的影响。根据太阳直射辐射理论计算光伏组件遮阴宽度, 并对受不同光伏组件铺设高度和地理位置影响而形成的阴影宽度进行分析。同时从光伏组件遮阴的角度定量分析光伏组件铺设高度对无花果产量和叶片光合特性的影响。

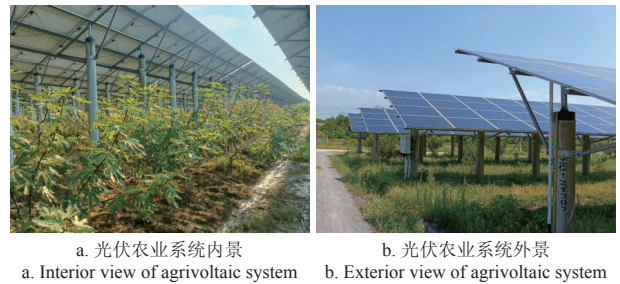
1 材料与方法

1.1 试验光伏农业系统描述

供试光伏农业系统位于江苏省南京市溧水区的光伏农业园区 (31.62°N, 119.18°E)。该园区于 2016 年建成, 占地约 47 hm², 包含 8 个光伏阵列片区, 总装机容量为 20 MW, 每年可发电约 2 400 万 kW·h。供试光伏农业阵列 (以下简称光伏阵列) 坐北朝南, 跨度为 6.8 m, 采用横向 4 排光伏组件紧密排布方式, 如图 1 所示。光伏组件的铺设高度均不低于 2.5 m, 垂直投影比例 (光伏组件在农田上的垂直投影总面积/架设光伏组件的农田面积) 为 53.3%, 由混凝土预制桩等结构支撑, 安装倾角为 24°, 材料为 265 Wp 多晶硅, 光电转换效率为 16.3%。单块光伏组件尺寸为 1 640 mm×992 mm×35 mm。

为保证光伏农业系统内部的采光率和机械化作业空间, 目前江苏省现存光伏农业项目的光伏组件铺设高度区间为 2.5~4.0 m。基于此, 本研究选取了光伏组件铺

设高度为 2.5、3.2、3.9 m 的 3 种光伏农业系统。除光伏组件铺设高度外, 供试光伏农业系统的其他结构和材料参数完全一致。



a. 光伏农业系统内景 b. 光伏农业系统外景
a. Interior view of agrivoltaic system b. Exterior view of agrivoltaic system

图 1 试验光伏农业系统

Fig.1 Experimental agrivoltaic systems

1.2 栽植果树

2019 年初在供试光伏阵列内部南北向居中位置, 沿东西向栽植了单行矮化无花果 (品种: 青皮), 如图 1a 所示。无花果树株间距约 3.0 m, 株高约 1.0 m, 冠幅约 2.5 m, 栽植密度约 490 株/hm², 每年 9—10 月为采收期。

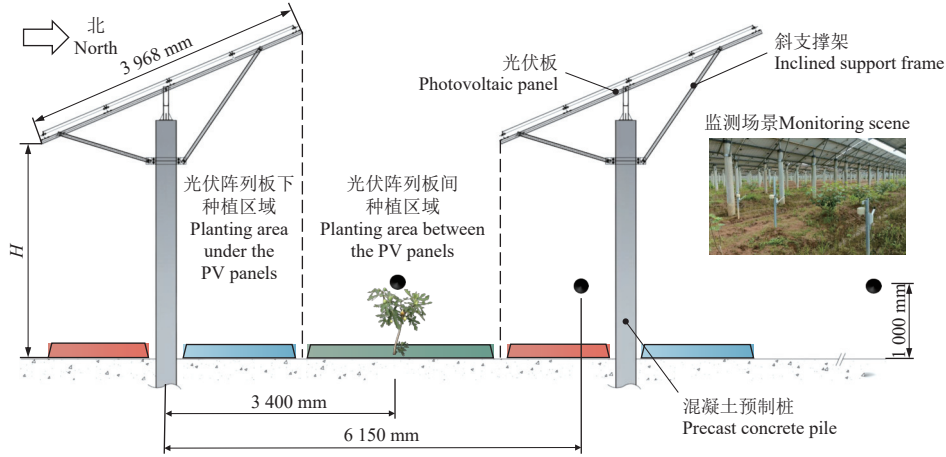
1.3 试验设计

1.3.1 种植区域光环境

结合无花果株高等生长参数, 距地面 1.0 m 高度的太阳辐射强度大小及分布情况是评价光伏农业系统内部光环境的重要指标。基于此, 本文监测的光环境因子包括 2.5、3.2、3.9 m 的光伏组件铺设高度下 (分别对应为 H2.5、H3.2、H3.9) 光伏农业系统内部的太阳辐射强度, 其中分为光伏阵列板下种植区域 (U) 和板间种植区域 (B) 2 个部分。同时, 在系统外部开阔地设置气象站, 同步监测露天 (CK) 的太阳辐射强度, 具体种植区域分类及测点布置如图 2 所示。本文以单跨光伏阵列北侧板下种植区域的太阳辐射强度测点数据作为评价光伏阵列板下种植区域太阳辐射强度的数据来源。试验时间为 2023 年无花果的全生育期, 即 2023 年 4 月 1 日—2023 年 9 月 30 日。

测试仪器采用 HOBO 系列传感器。所有传感器进行全天监测, 数据记录时间间隔为 10 min。研究所用的太阳辐射强度传感器为太阳总辐射传感器 (S-LIB-M003, Onset Computer Crop 公司, 美国, 精度为 ±10 W/m²), 由 HOBO 微型气象站 (H21-USB, Onset Computer Crop 公司, 美国) 采集。钟坤炎等^[26]在研究全年太阳辐射规律时, 明确中国夏半年地方时 06:00 前为太阳升起时段、18:00 后为太阳落下时段。基于此, 本研究定义夏季白昼时间段为 06:00—18:00, 夜间时间段为 18:00 至次日 06:00。

采光率作为光环境的重要评价指标, 在各类建筑的光环境分析中都有应用。张勇等^[27]将日光温室内测点光照度均值与室外测点光照度均值的比值作为透光率来评价日光温室采光性能。基于此, 本文结合光环境试验, 规定以光伏农业系统内部测点的太阳辐射强度平均值与外部太阳辐射强度平均值的比值作为该测点的采光率, 以某一测点在多个时间段下采光率的均值作为该测点的平均采光率, 将采光率和平均采光率作为光伏农业系统内部光环境的评价指标, 并通过式 (1)~(2) 计算。



注: H 为光伏组件铺设高度, m。

Note: H represents the vertical distance between the lower edge of the photovoltaic module and the ground, m.

图2 试验测点布置图

Fig.2 Layout of test points

$$R_d = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k E_{in_k} / \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k E_{out_k} \quad (1)$$

$$R_{avg} = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j R_{d_j} \quad (2)$$

式中 E_{in} 为内部太阳辐射强度的测量值, W/m^2 ; E_{out} 为外部太阳辐射强度的测量值, W/m^2 ; R_d 为试验期间日采光率, %; R_{avg} 为试验期间平均采光率, %; k 为太阳辐射强度数据日记录条数; j 为试验天数, d。

1.3.2 作物产量、光合特性

为探究光伏组件遮阴对作物产量和光合特性的影响,本研究对光伏农业系统内部无花果产量和叶片光合特性进行测定分析。本试验以光伏组件铺设高度为试验因素,设置 H2.5、H3.2、H3.9 共 3 种处理,以露天种植为对照 (CK),在每个高度下选取 5 棵生长状况良好、具有代表性的果树进行挂牌。试验的所有处理在同一块大田,氮、磷、钾肥用量相同。试验期间除施肥外,不涉及其他农艺措施。

在产量对比试验中,于 9 月份果实成熟期对每个处理的挂牌果树进行一次性采收并统计果数。同时每个处理下各选取果树外围中部长势一致且无病虫害的成熟果实 15 个,并现场进行单果质量等产量构成指标测定。

在光合参数对比试验中,于 9 月份果实成熟期使用 LI-COR 6800 型便携式光合仪 (LI-COR 公司,美国) 测定无花果树冠面中间位置叶片的光合特性,光合仪参数设定为环境温度 $25^\circ C$,相对湿度为 50%,光量子通量强度为 $1000 \mu mol/(m^2 \cdot s)$, CO_2 浓度为 $400 \mu mol/mol$,测定系统采用开放式气路,自然光源;每个处理选取长势一致、生长良好的 3 棵果树,重复 3 次,取均值;测定的叶片光合参数包括净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i)。

1.4 数据处理

光伏组件铺设高度对无花果产量及叶片光合特性的

影响采用单因素方差分析,差异显著性检验采用 Duncan 新复极差法。根据云量的观测情况和日照时数,将试验期间的天气类型划分为晴天、阴天和雨天^[28]。采用 Microsoft Excel 2010 软件对试验数据进行计算和绘图,采用 SPSS 20 统计软件进行统计分析。

2 光伏组件遮阴宽度的确定方法

2.1 光伏组件遮阴宽度定义

为研究光伏组件在光伏农业系统内形成的阴影宽度,现将遮阴宽度 d 进行如下定义:单侧光伏组件在光伏阵列间隔处地面上的投影宽度 (OP),如图 3 所示。

为明确受光伏组件尺寸和铺设高度等因素影响的光伏组件遮阴宽度计算方法,提出如下假设:1) 光伏组件只对直射光产生阻挡,散射光在阵列内部任一个方向上具有相同的辐射强度;2) 两侧光伏组件之间种植区同一时间内只受单侧或双侧光伏组件遮阴的影响;3) 阵列尺寸、光伏组件数量不受限制,光伏阵列长度在东西方向上无限延伸;4) 光伏组件的结构、材料一致且透光率默认为 0;5) 光伏组件上下对称截面为宽度忽略不计的矩形;6) 光伏阵列的垂直立剖面与正南方向的夹角 (方位角) 默认为 0。

2.2 光伏组件遮阴宽度计算方法

太阳高度角 h 是指太阳直射光线入射方向与地平线的夹角, h 可由式 (3) 计算^[29]。

$$\sin h = \sin \eta \cdot \sin \delta + \cos \eta \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (3)$$

式中 η 为当地北纬纬度, ($^\circ$); δ 为太阳赤纬角, ($^\circ$); ω 为太阳时角, ($^\circ$)。

太阳赤纬角 δ 可由式 (4) 计算^[30]。

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left(360^\circ \times \frac{284 + N}{365} \right) \quad (4)$$

式中 N 为日序数,当日期是 1 月 1 日时, $N=1$ ($1 \leq N \leq 365$)。

时间角度 ω 可由式 (5) 计算^[30]。

$$\omega = 15(T_r - 12) \quad (5)$$

式中 T_r 为真太阳时, T_r 可由式 (6) 计算求得。

$$T_r = t - \frac{120 - \theta}{15} + \frac{e}{60} \quad (6)$$

式中 t 为北京时间, θ 为当地经度, ($^\circ$), 时差 e 可由式 (7) 计算。

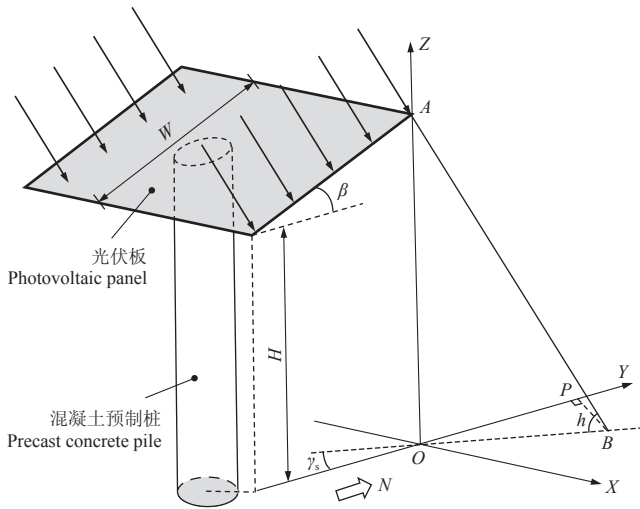
$$e \approx 9.87 \sin(2A) - 7.53 \cos A - 1.5 \sin A \quad (7)$$

式中 A 为常数, A 可由式 (8) 计算求得。

$$A = \frac{360(N - 81)}{364} \quad (8)$$

太阳方位角 γ_s 是指太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角, γ_s 可由式 (9) 计算^[29]。

$$\cos \gamma_s = \frac{\sinh \cdot \sin \eta - \sin \delta}{\cosh \cdot \cos \eta} \quad (9)$$



注: A 为光伏组件东北侧顶点与太阳光线的交汇点; B 为太阳光线透过 A 点在地面上的投影点; O 为 A 点在地面上的垂直投影点; P 为 B 点在 Y 轴上的垂直投影点; W 为单侧光伏组件的宽度, m ; β 为光伏组件的倾角, ($^\circ$); γ_s 为太阳方位角, ($^\circ$); h 为太阳高度角, ($^\circ$)。
Note: A represents the point where direct sunlight meet the northeast vertex of the photovoltaic (PV) panel; B represents projection point on the ground of direct sunlight through point A ; O represents vertical projection point on the ground of point A ; P represents vertical projection point on the Y -axis of point B ; W represents the width of the single-side PV module, m ; β represents the inclination angle of the PV panel, ($^\circ$); γ_s represents the azimuth of the sun, ($^\circ$); h represents the altitude angle of the sun, ($^\circ$).

图 3 光伏农业系统内部遮阴宽度的形成

Fig.3 Formation of internal shading width in an agrivoltaic system

为便于计算光伏组件在光伏农业系统内形成的阴影宽度, 本研究以光伏组件东北角边缘点在地面上的垂直投影点作为坐标轴原点建立了三维坐标系, 如图 3 所示。光伏阵列遮阴阴影的形成过程为: 某时刻, 太阳直射光线以平行于 AP 的角度入射至系统内部, 经光伏组件遮挡后在地面形成实际阴影宽度 OB , 其在南北方向的投影长度 OP 为光伏组件在两排光伏阵列间隔处遮阴的宽度 (L_s)。根据太阳位置参数、地理位置参数和几何关系, L_s 可由式 (10) 计算求得。

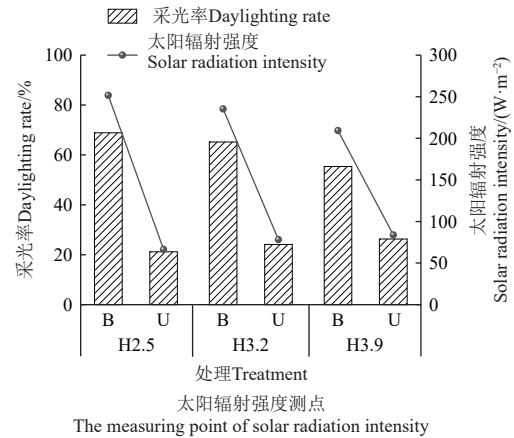
$$L_s = (W \cdot \sin \beta + H) \cdot \coth \cdot \cos \gamma_s \quad (10)$$

3 结果与分析

3.1 光热环境特性分析

3.1.1 太阳辐射强度

图 4 显示了 3 个光伏组件铺设高度下光伏农业系统内日平均太阳辐射与采光率的变化。H2.5、H3.2 和 H3.9 处理下, 光伏阵列板间与板下 2 个种植区域日平均太阳辐射强度变化范围分别为 51.6~432.7、28.4~82.3 W/m^2 , 47.6~439.2、33.4~108.6 W/m^2 , 40.3~448.5、34.9~113.5 W/m^2 ; 平均采光率分别为: 68.9%、21.2% (H2.5), 65.2%、24.1% (H3.2), 55.4%、26.3% (H3.9)。由图 4 可见, 在 3 种光伏组件铺设高度下, 光伏阵列板间种植区域的平均太阳辐射强度和采光率随着光伏组件铺设高度的增加而降低, 光伏阵列板下种植区域相反。



注: H2.5、H3.2、H3.9 分别代表 2.5、3.2、3.9 m 的光伏组件铺设高度; B 为光伏阵列板间种植区域, U 为光伏阵列板下种植区域。
Note: H2.5, H3.2 and H3.9 represent the vertical heights of the lower edge of the PV module from the ground which are 2.5, 3.2 and 3.9 m respectively. B represents the planting area between PV modules, U represents the planting area under PV modules.

图 4 光伏农业系统内部太阳辐射强度变化

Fig.4 Variation of solar radiation intensity in agrivoltaic systems

为深入了解不同光伏组件铺设高度的光伏农业系统内部光环境变化特征, 本研究选择晴天 (7 月 12 日)、雨天 (7 月 13 日) 和阴天 (7 月 14 日) 的太阳辐射强度数据进行分析, 其逐时变化特征如图 5 所示。数据显示, 3 种天气条件下各测点曲线具有较高的一致性, 均呈现先上升后稳定波动达到峰值, 最后下降变为 0 的变化趋势, 且各曲线峰值对应的时间节点基本一致。所有测点的太阳辐射强度在 12:00—14:00 来回波动达到最大值。

晴天条件下, CK 日平均太阳辐射强度为 477.9 W/m^2 , H2.5、H3.2、H3.9 的光伏阵列板间和板下种植区域日平均太阳辐射强度分别为 336.8、75.8 W/m^2 , 323.3、84.2 W/m^2 , 315.4、90.5 W/m^2 。由此可见, 晴天条件下 3 种光伏组件铺设高度的光伏阵列板下和板间种植区域采光率变化区间分别为 21.5%~24.7%、66.1%~70.5%, 故光伏阵列板间种植区域平均采光率比整体试验期间略高, 光伏阵列板下种植区域相反。

3.2 光伏组件遮阴宽度计算

由式(10)可知,遮阴宽度会受到光伏组件宽度、光伏组件倾角、光伏组件铺设高度、太阳高度角和太阳方位角5个参数的影响。其中,太阳方位角、太阳高度角受到光照时间、所在地理位置的影响,光伏组件宽度和光伏组件倾角因发电效率、发电容量等客观原因在同一地区任一光伏农业项目上基本是固定的,而光伏组件铺设高度会因地形及防洪标高一致性等因素存在差异。基于此,本文从不同的地理位置和光伏组件铺设高度这两个参数入手,计算分析其对光伏农业系统内光伏组件遮阴宽度的影响。为了量化光伏组件遮阴的宽度,本文在计算时间范围上,取1个季度为1个时间跨度,共4个跨度。

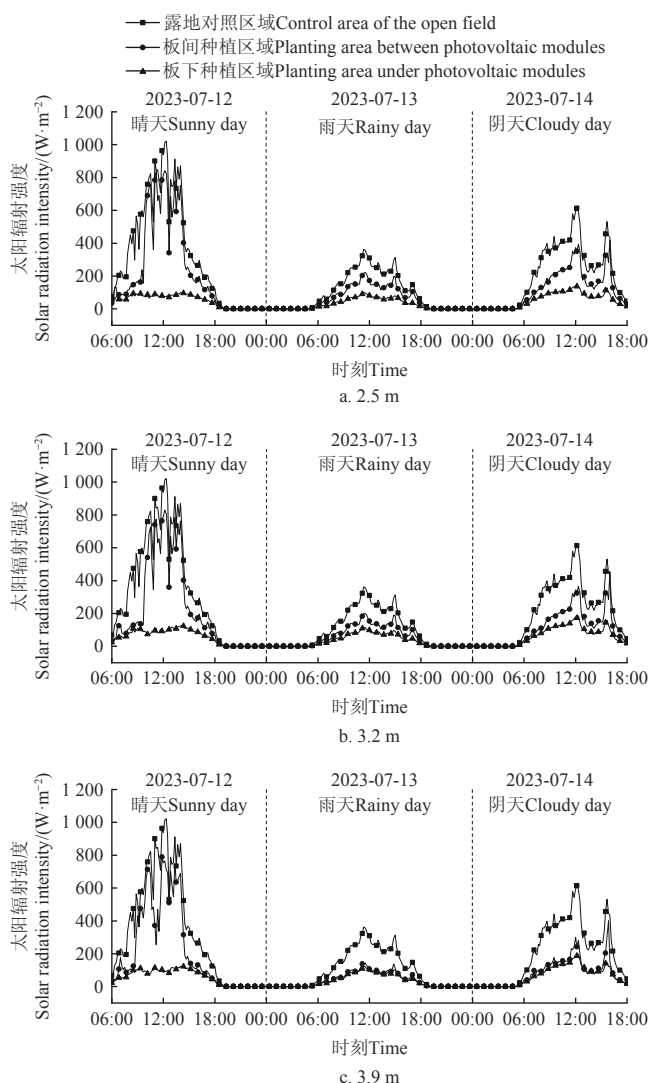


图5 不同天气条件下不同光伏组件铺设高度的光伏农业系统内部太阳辐射强度变化

Fig.5 Variation of solar radiation intensity in agrivoltaic systems with different PV panel heights under different weather conditions

3.2.1 地理位置对遮阴宽度的影响

不同地理位置的经纬度不同,其中,经度会影响当地真太阳,纬度会影响当地太阳高度角,从而导致遮阴

宽度存在差异。由于无花果在江苏、云南、陕西和湖南等省份均有大面积种植,且4个省份的最低光伏组件铺设高度均为2.5 m,故选择江苏、云南、陕西和湖南4个省份,并以4个省份的省会城市为对象分析地理位置对遮阴宽度的影响。暂不考虑光伏组件铺设高度造成的影响,即默认光伏组件铺设高度为2.5 m,且不同地理位置的光伏阵列尺寸与试验光伏阵列相同。上述地区的光伏组件遮阴宽度在整点时刻的平均值如表1所示。由表1可见,光伏组件周年遮阴宽度整体呈现先下降再上升的变化趋势,变化差异明显。在南京,无花果生育期内(4—9月)光伏组件遮阴宽度均值为0.81 m,最大值出现在中午12:00,下午遮阴宽度均值较上午大0.13 m;在昆明、西安和长沙,无花果生育期内(4—9月)光伏组件遮阴宽度均值分别为0.52、0.88和0.65 m,最大值均出现在13:00,下午遮阴宽度均值较上午分别大1.17、1.24和0.69 m。同时结合4地地理位置可以发现,同一时刻下不同地理位置的光伏组件遮阴宽度差异较大,且在无花果全生育期内光伏组件遮阴宽度随纬度增大而增大。

3.2.2 光伏组件铺设高度对遮阴宽度的影响

为研究不同光伏组件铺设高度对遮阴宽度的影响,选择2.5、3.2、3.9 m的3种光伏组件铺设高度对遮阴宽度进行分析,默认光伏阵列的结构参数除光伏组件铺设高度外均相同。由表1可见,当光伏组件铺设高度越高时,南京、昆明、西安和长沙4地在任一时间段内遮阴宽度均越大,且下午遮阴宽度均值大于上午。无花果生育期内,当光伏组件铺设高度由2.5 m增高至3.9 m时,南京、昆明、西安和长沙4地遮阴宽度均值增幅分别为34.0%、34.0%、34.2%和34.1%。同时,以2.5 m的光伏组件铺设高度为例,无花果生育期内南京、昆明、西安和长沙4地的最大遮阴宽度占光伏阵列板间种植区域宽度的比例分别为34.6%、25.5%、36.9%和29.3%。

3.3 作物产量及光合特性分析

3.3.1 果实产量及其构成

光伏组件铺设高度对无花果产量及其构成的影响如表2所示。由表2可知,光伏农业系统内部各处理的产量均显著($P<0.05$)低于露天对照,且光伏组件铺设高度对无花果产量及其构成指标的影响均达到显著水平($P<0.05$)。与露天对照相比,H2.5、H3.2和H3.9的产量分别减少了19.9%、33.8%和48.9%。由此可见,无花果产量随着光伏组件铺设高度的增加而降低,H2.5较H3.2和H3.9分别增产13.9%和29.0%。在产量构成因素方面,各处理的单果质量和果数均显著($P<0.05$)低于露天对照,且各处理间差异显著($P<0.05$)。与露天对照相比,H2.5、H3.2和H3.9的单果质量分别降低了13.4%、22.6%和34.0%;果数分别减少了7.4%、14.3%和22.5%。由此可见,H2.5的无花果单果质量和果数等产量构成指标表现最优,而H3.9的各产量构成指标表现最差。

表 1 不同光伏组件铺设高度与地理位置对遮阴宽度的影响
Table 1 Effects of photovoltaic panels with different laying heights and geographical location on the shading width

月份 Months	时刻 Time	遮阴宽度 Shading width/m											
		南京 Nanjing (31.62°N, 119.18°E)			昆明 Kunming (25.22°N, 103.10°E)			西安 Xi'an (34.10°N, 108.40°E)			长沙 Changsha (27.90°N, 112.53°E)		
		H2.5	H3.2	H3.9	H2.5	H3.2	H3.9	H2.5	H3.2	H3.9	H2.5	H3.2	H3.9
1—3	09:00	3.76	4.40	5.04	4.82	5.64	6.47	4.98	5.83	6.67	3.93	4.60	5.27
	10:00	3.24	3.79	4.34	3.38	3.95	4.53	3.68	4.31	4.94	3.20	3.74	4.29
	11:00	3.02	3.54	4.05	2.91	3.40	3.90	3.25	3.81	4.36	2.91	3.41	3.90
	12:00	2.95	3.45	3.95	2.71	3.17	3.63	3.08	3.60	4.13	2.79	3.27	3.74
	13:00	2.97	3.48	3.99	2.64	3.08	3.53	3.03	3.55	4.06	2.78	3.25	3.72
	14:00	3.11	3.64	4.17	2.65	3.10	3.55	3.09	3.61	4.14	2.85	3.34	3.83
	15:00	3.46	4.05	4.64	2.77	3.24	3.71	3.28	3.84	4.40	3.07	3.59	4.11
	平均	3.22	3.76	4.31	3.13	3.65	4.19	3.48	4.08	4.67	3.08	3.60	4.12
4—6	09:00	0.42	0.49	0.56	0.11	0.13	0.15	0.33	0.38	0.44	0.24	0.28	0.32
	10:00	0.63	0.73	0.84	0.23	0.27	0.31	0.59	0.69	0.79	0.37	0.44	0.50
	11:00	0.73	0.86	0.98	0.33	0.39	0.45	0.76	0.89	1.02	0.53	0.62	0.71
	12:00	0.77	0.90	1.03	0.43	0.50	0.57	0.84	0.98	1.13	0.60	0.70	0.80
	13:00	0.74	0.86	0.99	0.47	0.55	0.63	0.86	1.00	1.15	0.59	0.70	0.80
	14:00	0.64	0.75	0.85	0.44	0.52	0.59	0.81	0.95	1.09	0.53	0.61	0.70
	15:00	0.43	0.51	0.58	0.34	0.40	0.45	0.69	0.81	0.93	0.37	0.44	0.50
	平均	0.62	0.73	0.83	0.34	0.39	0.45	0.70	0.81	0.94	0.46	0.54	0.62
7—9	09:00	0.83	0.97	1.12	0.47	0.55	0.64	0.75	0.87	1.00	0.62	0.73	0.83
	10:00	0.99	1.16	1.33	0.58	0.68	0.78	0.97	1.13	1.30	0.76	0.89	1.02
	11:00	1.07	1.25	1.44	0.69	0.81	0.92	1.10	1.28	1.47	0.88	1.03	1.17
	12:00	1.10	1.29	1.48	0.77	0.90	1.04	1.16	1.36	1.55	0.93	1.09	1.24
	13:00	1.08	1.27	1.45	0.81	0.94	1.08	1.17	1.37	1.57	0.93	1.09	1.25
	14:00	1.02	1.19	1.37	0.79	0.93	1.06	1.14	1.34	1.53	0.89	1.04	1.19
	15:00	0.89	1.04	1.19	0.73	0.85	0.97	1.07	1.25	1.43	0.78	0.91	1.05
	平均	1.00	1.17	1.34	0.69	0.81	0.93	1.05	1.23	1.41	0.83	0.97	1.11
10—12	09:00	4.49	5.26	6.02	5.62	6.57	7.53	5.93	6.94	7.95	4.66	5.45	6.25
	10:00	3.86	4.51	5.17	4.04	4.72	5.41	4.42	5.17	5.92	3.81	4.45	5.10
	11:00	3.60	4.21	4.82	3.48	4.07	4.66	3.89	4.55	5.21	3.46	4.05	4.64
	12:00	3.53	4.14	4.74	3.24	3.79	4.34	3.68	4.31	4.94	3.33	3.90	4.47
	13:00	3.63	4.24	4.86	3.17	3.71	4.25	3.66	4.28	4.91	3.35	3.92	4.50
	14:00	3.93	4.60	5.26	3.24	3.80	4.35	3.81	4.46	5.11	3.53	4.13	4.74
	15:00	4.67	5.46	6.26	3.49	4.08	4.67	4.23	4.95	5.67	3.98	4.65	5.33
	平均	3.96	4.63	5.30	3.75	4.39	5.03	4.23	4.95	5.67	3.73	4.36	5.00

表 2 不同高度的光伏阵列对无花果果实产量及其构成的影响
Table 2 PEffects of PV panels with different laying heights on
yield and composition of fig fruit

处理 Treatments	单果质量 Single fruit weight/g	平均单株果数 Average number of fruits per plant	果实产量 Fruit yield/(t·hm ⁻²)
CK	49.97±3.08a	135.20±4.32a	3.31±0.11a
H2.5	43.27±4.14b	125.20±3.11b	2.65±0.07b
H3.2	38.67±2.41c	115.80±4.96c	2.19±0.09c
H3.9	32.99±3.72d	104.80±4.92d	1.69±0.08d

注：CK 代表对照处理，同一列不同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。
Note: CK represents the control treatment. Different letters in each column indicate significant differences at 0.05 level. The same as below.

3.3.2 光合特性

不同光伏组件铺设高度对光伏农业系统内部无花果叶片光合特性的测试结果如表 3 所示。

表 3 不同高度的光伏阵列对无花果叶片光合特性的影响
Table 3 Effects of photovoltaic panels with different laying
heights on photosynthetic characteristics of fig leaves

处理 Treatments	净光合速率 Net photosynthesis rate/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatol conductance/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳 Intercellular carbon dioxide/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CK	11.05±1.07a	14.62±2.11a	0.58±0.06a	343.47±15.64a
H2.5	10.63±1.09a	13.68±2.28ab	0.53±0.07b	342.58±15.42a
H3.2	9.94±0.58b	12.89±1.65b	0.51±0.03b	341.40±12.16a
H3.9	8.49±0.93c	10.98±1.75c	0.37±0.05c	341.97±11.87a

由表 3 可知，在 3 种光伏组件铺设高度的光伏农业系统内部，无花果叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾

速率均随着光伏组件铺设高度的增加而降低，且均显著（ $P<0.05$ ）低于露天对照；而无花果叶片的胞间二氧化碳在各处理之间没有明显差异。与露天对照相比，H2.5、H3.2 和 H3.9 的无花果叶片净光合速率分别降低了 6.3%、11.7% 和 24.8%；气孔导度分别降低了 9.2%、13.0% 和 36.6%；蒸腾速率分别降低了 3.8%、10.1% 和 23.2%，且各处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

4 讨 论

4.1 光伏组件遮阴对光环境及遮阴宽度的影响

本研究发现不同光伏组件铺设高度下光伏阵列板间种植区域的采光率保持在 55.4%~68.9%，是光伏阵列板下种植区域的 2.1~3.3 倍。魏来等^[20]研究发现 3 排光伏组件的行间地面日平均太阳辐射强度比露天对照约弱 18%，且日太阳辐射强度在 12:00—14:00 来回波动达到最大值。本研究观测的光伏农业系统内部的光环境变化规律与魏来等^[20]的研究结果较为一致。然而魏来等^[20]研究结果中的采光环境优于本研究结果，可能是由于其搭建的光伏阵列试验平台跨数较少，太阳辐射强度测点在一定程度上受到了光伏阵列外部侧光的影响。

在 3 种光伏组件铺设高度下，光伏阵列板间种植区域的平均太阳辐射强度和采光率随着光伏组件铺设高度的增加而降低，光伏阵列板下种植区域相反。结合光伏组件遮阴宽度的理论分析可以发现，在不同地理位置和

光伏组件铺设高度下形成的遮阴宽度均会对光伏阵列板间种植区域的无花果生长造成影响。以南京地区为例,遮阴宽度最大值随着光伏组件铺设高度的增加而增大。在 2.5 m 的光伏组件铺设高度下,当遮阴宽度达到最大值时,阴影会覆盖无花果冠幅的 18.9%;而在 3.9 m 的光伏组件铺设高度下,当遮阴宽度达到最大值时,阴影会覆盖无花果冠幅的 29.9%。由此可见,光伏组件遮阴对光环境及遮阴宽度的影响具有一致性。

4.2 光伏组件遮阴对无花果产量及叶片光合特性的影响

在光伏阵列板间种植区域采光率为 55.4%~68.9% 的光伏农业系统内部,无花果树仍能完成正常的生命周期。适宜的光伏组件铺设高度能为无花果树提供一个较为理想的生长环境,从而实现光伏发电和农业生产的有效耦合。本研究中 H2.5 的无花果产量最高,达到了露天对照的 80%,满足地方政府对该光伏农业项目产量的考核要求,这与 H2.5 拥有更好的光环境有关。由此可见,适宜的光伏组件铺设高度(2.5 m)能在保证正常完成生长结实的基础上,提升果树的结果数和单果质量,从而提升无花果的产量。结合试验光伏农业系统的无花果产量统计结果分析,H3.9 的无花果产量比 H2.5 减产 0.96 t/hm²。以一个 20 MW 的无花果光伏农业园区(约占地 1.67 hm²/MW)为例,占地约 33.3 hm²,可见 H3.9 无花果总产量将会比 H2.5 减少约 32.0 t。以江苏省为例,仅 2022 年以来全省新增光伏农业市场化并网项目约 1 388 MW(数据来源于江苏省发展与改革委员会官网),若不同光伏组件铺设高度下采用合理的农业生产模式,将极大改善农光耦合生产效果。

叶片是作物进行光合作用和呼吸作用等生理代谢活动的重要器官。遮阴胁迫情况下,作物净光合速率受到“气孔因素”^[31-32]和“非气孔因素”^[33]的限制。由试验数据可见,在光伏组件铺设高度逐渐增大的遮阴水平下,无花果叶片净光合速率和气孔导度显著降低($P < 0.05$),且光伏遮阴效应对胞间二氧化碳没有明显影响,说明净光合速率降低是由气孔因素和非气孔因素共同作用引起的,即可能是因为遮阴会减少无花果树叶片的的气孔开张,降低水分的利用效率,从而影响光合作用的进行。本研究中,H2.5 处理能够通过有效提高无花果叶片的净光合速率和气孔导度来缓解光合抑制。结合目前中国各地方发布的光伏组件铺设高度下限要求,说明 2.5 m 的光伏组件铺设高度更有利于保证无花果叶片的光合能力,更适于无花果树种植生产。

虽然中国的光伏农业模式在经济、社会和生态等方面取得了显著效益,成功解决了长期以来中国光伏发电产业存在的产能过剩等问题,带动了农业农村地区增收脱贫。但是现有的光伏农业系统在结构上和农业种植模式上还存在一系列问题,如在现有的结构下农作物产量低,难以实现可复制、可推广的农业生产技术体系等。未来中国光伏农业必然向提质增效方面发展,通过合理利用每一寸土地,最终提高光伏农业产出率。因为光伏阵列的板间种植区域是光伏农业系统中农田部分接受太

阳能的区域,所以在实际生产中需优先保障该区域的农业高效生产,针对不同的光伏组件铺设高度提出合适的农业生产方案。然而,影响光伏农业系统高效耦合生产的因素还有较多,诸如光伏阵列跨度、光伏组件铺设密度、作物种类和种植模式等,这些内容将在今后的研究中进一步丰富和深入。

5 结 论

本文通过试验测试,量化了光伏组件遮阴对光伏农业系统内部光环境分布和农作物产量的影响。同时,通过太阳直射辐射理论计算分析了光伏组件遮阴形成的阴影宽度在一年中的变化规律,得到了如下结论:

1) 研究发现,试验期间光伏阵列板间种植区域的采光率保持在 55.4%~68.9%,是光伏阵列板下种植区域的 2.1~3.3 倍。在 3 种光伏组件铺设高度下,光伏阵列板间种植区域的平均太阳辐射强度和采光率随着光伏组件铺设高度的增加而降低,光伏阵列板下种植区域相反。

2) 遮阴宽度受光伏组件宽度、光伏组件倾角、光伏组件铺设高度、太阳高度角和太阳方位角共 5 个参数的影响。在无花果生育期内(4—9 月),光伏组件遮阴宽度随纬度、光伏组件铺设高度增大而增大。

3) 光伏组件遮阴会显著降低无花果的产量,光伏组件铺设高度为 2.5、3.2、3.9 m 的产量较露天对照分别减少了 19.9%、33.8%和 48.9%,且叶片光合特性的测试结果验证了各处理间的产量差异。较低的光伏组件铺设高度能有效提高无花果叶片的净光合速率和气孔导度,从而减轻光伏组件遮阴导致的光合抑制。

研究发现,不同光伏组件铺设高度遮阴会严重影响光伏农业系统内部光环境的分布和作物的产量。基于此,建议如下:1) 光伏农业生产上,在 2.5 m 等低高度的光伏阵列板间种植区域可种植无花果等同类果树;在较大高度的光伏阵列板间种植区域可种植中草药等喜荫作物,尽量避免因光伏组件铺设高度增大造成的较差光环境对农作物生长造成不利影响。2) 光伏农业项目规划设计上,一方面应积极结合地方典型作物品种,做好光伏农业项目的规划设计;同时应积极开发、推广能一定程度上改善光伏阵列内部光环境的新型光伏农业阵列结构,以保证农作物的正常生长。

[参 考 文 献]

- [1] STURCHIO M A, KNAPP A K. Ecovoltaic principles for a more sustainable, ecologically informed solar energy future[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7(11): 1746-1749.
- [2] GHOSH A. Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics, agriphotovoltaics) for sustainable development goal: A review[J]. *Solar Energy*, 2023, 266(18): 112146.
- [3] 雷书彦, 王文, 袁荻, 等. 湖北省光伏农业现状及发展建议[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(S1): 360-363.
LEI Shuyan, WANG Wen, YUAN Di, et al. Current situation and development proposal of photovoltaic agriculture in Hubei Province[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(S1): 360-363. (in Chinese with English abstract)

- [4] 刘城宇, 杨洪明, 赖明勇. 农业现代化背景下县域光伏扶贫生态补偿标准评估[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 300-309.
LIU Chengyu, YANG Hongming, LAI Mingyong, et al. Assessment of ecological compensation standards for county-level photovoltaic poverty alleviation under the background of agricultural modernization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(16): 300-309. (in Chinese with English abstract)
- [5] 汤俊超, 吴宜文, 张姚, 等. 浅谈“光伏+农业”产业的发展模式[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(11): 144-152.
TANG Junchao, WU Yiwen, ZHANG Yao, et al. A brief introduction on the industrial development mode of photovoltaic agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(11): 144-152. (in Chinese with English abstract)
- [6] 徐彩芝, 陆志平. 光伏电站支架选型研究探讨[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(6): 105-109.
XU Caizhi, LU Zhiping. Discussion on selection of photovoltaic power plants bracket[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2014, 35(6): 105-109. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杜航, 徐海巍, 张跃龙, 等. 大跨柔性光伏支架结构风压特性及风振响应[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(10): 67-74.
DU Hang, XU Haiwei, ZHANG Yuelong, et al. Wind pressure characteristics and wind vibration response of long-span flexible photovoltaic support structure[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(10): 67-74. (in Chinese with English abstract)
- [8] 魏雯婧, 罗久富, 杨路培, 等. 农业光伏互补开发与盈利模式研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(3): 457-464.
WEI Wenjing, LUO Jiufu, YANG Lupei, et al. Combining development and profit model of agrivoltaics: A preliminary study[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(3): 457-464. (in Chinese with English abstract)
- [9] ZHANG N, DUAN HB, SHAN YL. Booming solar energy is encroaching on cropland[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(11): 932-934.
- [10] 罗久富, 梁松, 袁涛, 等. 光伏组件遮阴对喀斯特地区植物群落结构的影响[J]. *草业科学*, 2023, 40(12): 2982-2990.
LUO Jiufu, LIANG Song, YUAN Tao, et al. Effects of partial shading by photovoltaic panels on grassland community structure in Karst area[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12): 2982-2990. (in Chinese with English abstract)
- [11] WILLIAMS H J, HASHAD K, WANG H, et al. The potential for agrivoltaics to enhance solar farm cooling[J]. *Applied Energy*, 2023, 332(4): 120478.
- [12] MOHAMMEDI S, DRAGONETTI G, ADMANE N, et al. The impact of agrivoltaic systems on tomato crop: A case study in Southern Italy[J]. *Processes*, 2023, 11(12): 3370.
- [13] 赵雪, 邹志荣, 许红军, 等. 光伏日光温室夏季光环境及其对番茄生长的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(12): 93-99.
ZHAO Xue, ZOU Zhirong, XU Hongjun, et al. Effects of summer light environment on tomato growth in photovoltaic solar greenhouse[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2013, 41(12): 93-99. (in Chinese with English abstract)
- [14] 林佳鸿. 基于固定和跟踪支架光伏发电系统的杭州光伏茶园微气候试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
LIN Jiahong. Research on the Field Microclimate of Photovoltaic Tea Gardens Based on Fixed and Tracking Solar PV Systems in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [15] SANTRA P, MEENA H M, YADAV O P. Spatial and temporal variation of photosynthetic photon flux density within agrivoltaic system in hot arid region of India[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 209: 74-93.
- [16] 张龙, 刘璋晶莹, 吴雪, 等. 长三角地区集中式露地农业光伏方阵夏季光热环境试验研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(5): 468-474.
ZHANG Long, LIU Zhangjingying, WU Xue, et al. Experimental study on photothermal environment of centralized open-field agricultural photovoltaic array in yangtze river delta region in summer[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2024, 45(5): 468-474. (in Chinese with English abstract)
- [17] ZHANG L, YANG ZP, WU X, et al. Open-field agrivoltaic system impacts on photothermal environment and light environment simulation analysis in Eastern China[J]. *Agronomy*, 2023, 13(7): 1820.
- [18] 周波, 孙维拓, 郭文忠, 等. 连栋玻璃温室天沟结构对栽培区光环境的影响分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 286-292.
ZHOU Bo, SUN Weituo, GUO Wenzhong, et al. Analysis and optimization of greenhouse gutter effect on radiation distribution inside multi-span greenhouses based on dynamic model[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 286-292. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王建, 郭宇博, 赵淑梅, 等. 日光温室固定保温被遮阴对光热环境及产量影响分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(23): 230-237.
WANG Jian, GUO Yubo, ZHAO Shumei, et al. Effect of fixed heat preservation quilt on indoor light heat environment and yield in solar greenhouses[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(23): 230-237. (in Chinese with English abstract)
- [20] 魏来, 余明艳, 覃楠楠, 等. 农光耦合系统对田间光照条件和甘薯生长的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, 45(3): 288-295.
WEI Lai, YU Mingyan, QIN Nannan, et al. Effects of agro-photovoltaic integrating system on field illumination and sweet potato growth[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2019, 45(3): 288-295. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈凤, 郭明明, 樊继伟, 等. 不同小麦品种生长发育及产量对光伏组件遮阴的响应[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(12): 1581-1588.
CHEN Feng, GUO Mingming, FAN Jiwei, et al. Response of growth and grain yield of different wheat varieties to shading of photovoltaic panels[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(12): 1581-1588. (in Chinese with English abstract)
- [22] MOON H W, KU K M. Impact of an agriphotovoltaic system on metabolites and the sensorial quality of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) and its high-temperature-extracted juice[J]. *Foods*, 2022, 11(4): 498.
- [23] JIANG S Z, TANG D H, ZHAO L, et al. Effects of different photovoltaic shading levels on kiwifruit growth, yield and water productivity under “agrivoltaic” system in Southwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269(11): 107675.
- [24] 杨光, 张金云, 阳桂芳, 等. 20 份无花果种质资源植物学性状和品质性状比较[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(20): 49-53.

- YANG Guang, ZHANG Jinyun, YANG Guifang, et al. Comparison of botany character and quality traits in 20 *Ficus carica* linn. germplasm resources[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(20): 49-53. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王加乾. 无花果栽培技术[J]. 中国南方果树, 2001, 30(5): 57-59.
- [26] 钟坤炎, 文立, 卢绍群. 地面分布式光伏电站避雷针架设方案优化研究[J]. 电工技术, 2022, 45(19): 143-144 +148. ZHONG Kunyan, WEN Li, LU Shaoqun. Research on optimization of lightning rod erection scheme for ground distributed photovoltaic power station[J]. *Electric Engineering*, 2022, 45(19): 143-144 +148. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(11): 178-186. (in Chinese with English abstract)
- [28] 金志凤, 周胜军, 朱育强, 等. 不同天气条件下日光温室内部温度和相对湿度的变化特征[J]. *浙江农业学报*, 2007, 19(3): 188-191. JIN Zhifeng, ZHOU Shengjun, ZHU Yuqiang, et al. Characteristics of temperature and humidity in the daylight greenhouse under different weather conditions[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2007, 19(3): 188-191. (in Chinese with English Abstract)
- [29] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [30] 王志峰. 太阳能热发电站设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [31] CAVATTE P C, OLIVEIRA A A, MORAIS L E, et al. Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis[J]. *Physiologia Plantarum*, 2012, 144: 111-122.
- [32] WU JW, LI JY, SU Y, et al. A morphophysiological analysis of the effects of drought and shade on *Catalpa bungei* plantlets[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2017, 39: 80.
- [33] LEON-SANCHEZ L, NICOLAS E, NORTES P A, et al. Photosynthesis and growth reduction with warming are driven by nonstomatal limitations in a Mediterranean semi-arid shrub[J]. *Ecology and Evolution*, 2016, 6: 2725-2738.

Effects of photovoltaic module shading on internal light environment and fig (*Ficus carica* L.) yield in agrivoltaic systems

ZHANG Long^{1,2,3}, WU Cuinan^{1,3}, BAO Encai^{1,2,3*}, GONG Jianhui¹, WANG Yaya¹, YANG Chen⁴, XU Guijun⁴, WANG Li⁵, DENG Li⁵

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 3. Key Laboratory of Protected Agriculture Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 4. Shenzhen Energy Nanjing Holding Co., Ltd., Nanjing 211225, China; 5. CTG Jiangsu Energy Investment Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: An agrivoltaic system has been one of the most promising potential sources of clean energy power in green agriculture. Some guidelines have been released to fully meet the requirement of the photovoltaic (PV) modules in agricultural projects. Particularly, it is the high demand for land utilization and mechanization of agricultural production in agrivoltaic systems, such as in Jiangsu and Yunnan provinces in China. Among them, the minimum installation height of PV modules has been standardized to maintain a specific tilt angle. However, the "prioritizing light over agriculture" can often occur during actual production. A large number of PV panels are typically installed on agricultural land in order to ensure the PV power generation in agrivoltaic projects. Furthermore, these PV panels can block the sunlight to form a considerable shading area on agricultural land during the day. This study aims to investigate the effects of shading from PV modules on the internal light environment, shading width, crop yield, and leaf photosynthetic characteristics in the agrivoltaic system. A series of tests were conducted on the agrivoltaic systems at the module installation heights (the vertical distance from the ground to the lower edge of the PV module) of 2.5, 3.2, and 3.9 m in Nanjing City. A systematic measurement was performed on the solar radiation intensity of the planting area under and between the panels inside the PV agricultural system. A quantitative analysis was implemented to calculate the annual variation patterns of the shading width formed by the PV panels. Additionally, there were significant differences in the yield and leaf photosynthetic characteristics of figs (*Ficus carica* L.) in the planted areas between the modules. The results indicated that the daylighting rate in the planted areas between the panels ranged from 55.4% to 68.9% during the testing period, which was 2.1 to 3.3 times that of the area under the panels. Specifically, the daylighting rate in the areas between the panels decreased at the three heights of PV module installation as the installation height increased, while the area under the panels showed the opposite trend. The shading width caused by the PV modules also increased with latitude and installation height throughout the entire growth period of the figs. Shading from the PV panels led to a reduction in average yield across treatments compared to the CK control, ranging from 19.9% to 48.9%. Additionally, the photosynthetic characteristics of the leaves effectively reflected the yield differences among treatments. A lower installation height of the PV panels can significantly enhance the net photosynthetic rate and stomatal conductance of fig leaves, thereby alleviating the photosynthetic suppression caused by shading. In summary, compared to agrivoltaic systems with panel heights of 3.2 m and 3.9 m, the system with a panel height of 2.5 m offered a better internal light environment and shorter shading width, effectively reducing the decline in fig yield and demonstrating practical value for photovoltaic agricultural projects in various regions.

Keywords: agriculture; photovoltaics; photovoltaic module; light; shadow; yield