

引用格式:

王万红, 孟超, 梁涛, 张霞, 邹婷, 董煌林, 李明. 光伏配置对茶树光合作用影响的模拟与预测分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(1): 74–80.

WANG W H, MENG C, LIANG T, ZHANG X, ZOU T, DONG H L, LI M. Simulation and prediction analysis of photovoltaic configuration on photosynthesis of tea plant[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(1): 74–80.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



光伏配置对茶树光合作用影响的模拟与预测分析

王万红¹, 孟超², 梁涛², 张霞², 邹婷³, 董煌林³, 李明^{3*}

(1. 五凌电力有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;

3. 湖南省农业装备研究所, 湖南 长沙 410125)

摘要: 以经济作物茶树为研究对象, 于其生长旺期(6月至8月)在农光互补基地的光伏方阵内开展田间试验, 并运用Ecotect软件模拟不同配置光伏系统板下的日均光辐射和时均光辐射, 探究不同配置方案的光伏系统对茶树光合有效辐射的影响; 采用Li-6800便携式光合测量仪测定茶树光响应曲线, 基于4种光合模型拟合其光响应数学方程, 结合光伏系统板下的实测光辐射数据, 预测光伏系统板下茶树冠层的光合速率。结果表明: 非直角双曲线模型为拟合茶树光响应曲线的最适模型, 其决定系数 $R^2(0.997\ 9)$ 最大, 均方误差和赤池信息量准则最小, 且由模型估算得到的最大净光合速率、光饱和点、光补偿点等关键光合参数均符合茶树生理实际; 与露天条件相比, 农光互补系统下茶树的日均光合速率降低了3.40%~8.07%, 09:00—11:00时段的时均光合速率下降了2.97%~6.90%; 不同配置方案中, 倾斜角20°、高度3.9 m、间距8 m时, 光伏组件对茶树光合速率影响最大, 而倾斜角28°、高度2.5 m、间距10 m时, 对茶树光合速率影响最小。

关键词: 茶树; 光伏农业系统; 光辐射模拟; 光合作用; 光响应模型

中图分类号: TM615⁺.2; S571.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)01-0074-07

Simulation and prediction analysis of photovoltaic configuration on photosynthesis of tea plant

WANG Wanhong¹, MENG Chao², LIANG Tao², ZHANG Xia², ZOU Ting³, DONG Huanglin³, LI Ming^{3*}

(1. Wuling Power Corporation Ltd., Changsha, Hunan 410004, China;

2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp. Ltd., Ji'nan, Shandong 250013, China;

3. Agricultural Equipment Institute of Hunan, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: This study was set to investigate the effects of photovoltaic(PV) arrangements on photosynthetically active radiation(PAR). Field experiments on tea plants, an important economic crop, were conducted during their peak growing season(June to August) within PV arrays of an agrivoltaic base. Daily and hourly average solar radiation beneath PV systems with different configurations was simulated using Ecotect software. Light response curves of tea plants were measured with a Li-6800 portable photosynthesis system and fitted using four photosynthetic models. The photosynthetic rates of the tea canopy under PV systems were then predicted by combining these fitted models with measured under-panel radiation. The results showed that the non-rectangular hyperbola model provided the best fit, exhibiting the highest coefficient of determination($R^2=0.997\ 9$), lowest mean squared error, and lowest Akaike information criterion. Model estimates of key photosynthetic parameters including maximum net photosynthetic rate, light saturation point, and light compensation point matched observations. Under agrivoltaics, daily average photosynthetic rates declined by 3.40%-8.07% and hourly average rates between 09:00 to 11:00 by 2.97%-6.90%. The strongest inhibition on tea plants

收稿日期: 2025-03-17

修回日期: 2025-04-11

基金项目: 国家电力投资集团有限公司科研项目(KYB12022ZH03)

作者简介: 王万红(1987—), 女, 河南浉池人, 硕士, 工程师, 主要从事新能源、综合智慧能源技术经济评价研究, wang_wwh@wldl.com.cn;

*通信作者, 李明, 博士, 教授, 主要从事生物环境智能装备研究, liming@hunau.net

photosynthesis occurred with 20° tilt, 3.9 m height, and 8 m spacing; the weakest with 28°, 2.5 m, and 10 m.

Keywords: tea plant; photovoltaic agricultural system; optical radiation simulation; photosynthesis; light response model

农光互补系统^[1]以农业生产为基础,通过合理配置光照资源进行光伏发电,能有效提高单位面积土地产出率。中国作为农业生产大国和太阳能发电量最高的国家,尤其适合推广应用农光互补系统。目前,我国主要在分布式光伏基地发展光伏农业,将太阳能组件以固定的倾角安装在地面支架上,组合形成分布式光伏板阵列。由于支架上的太阳能组件遮挡光照,光伏阵列下的微气候(土壤温度、蒸散量、光辐射量)与露天环境下不同^[2-3];微气候的变化会对植物形态、生理和发育过程产生影响^[2,4]。因此,评估农光互补系统应用的适用性,需要重点关注微气候变化对作物生产力的影响。

茶树属于光能利用率较低的C₃植物,喜温、喜湿耐阴,喜漫射光,不偏好直射强光^[5]。陈佩^[6]采用黑色遮阳网对茶园进行不同程度地遮阳,发现夏季遮光率56%、遮光率75%、遮光率30%、不遮光处理的茶树日间平均净光合速率依次降低;蒋欢^[7]利用Ladybug软件模拟光伏茶园的光环境,发现遮阴度与太阳辐射均匀度均受组件间距和高度影响,合理配置可实现茶树生长与光伏发电的协同优化;林佳鸿^[8]研究发现,与露天茶园相比,光伏茶园光伏板下和板间的光照强度低于光补偿点的时长分别增加10.57%和5.71%,介于光补偿点和光饱和点之间的时长分别减少2.68%和6.26%,高于光饱和点的时长分别减少7.89%和增加0.55%。

已有研究多聚焦于现有固定配置下光伏农业系统的作物生长表现与生理特性分析,而基于作物光生物学特性反向优化光伏系统配置参数的研究较少。鉴于太阳辐射的减少可能是光伏农业系统下作物产量的主要限制因子,本研究中,以茶树品种‘迎霜’(Camellia sinensis cv. Yingshuang)为材料,通过Li-6800测量光响应曲线,利用Autodesk Ecotect Analysis软件模拟不同配置的光伏系统板下的光环境,结合拟合的作物光响应曲线,预测作物在不同光强下的光合速率,研究光伏系统对作物光合作用的影响,以期光伏农业系统的优化配置提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与材料及试验设计

试验地位于江苏省南京市溧水区的农光互补基地(31.624 7°N, 119.174 1°E)。根据美国国家航空航天局提供的2023年数据,溧水区年平均气温为17.36 °C,年日照时数为1 409.27 h,年降水量为1 381.31 mm,太阳能资源充足。

农光互补区采用峰值功率为265 Wp的多晶硅组件,组件倾角为24°,大小为0.992 m×1.650 m,采用横向4排布置,每2块光伏组件中有0.1 m的间隙,整个光伏系统的倾斜面宽度为4.268 m,该光伏系统设计间距为6.8 m。为验证光照模拟的可靠性,在该系统中设立4个光辐射采集点,如图1所示,在单跨方阵中,选取距离地面1.0 m高处,从左至右分别选取距左侧立柱0.65、3.40、6.15 m处的3个测点(点1、点2、点3),并设置无遮挡露天测点(未在图1中标出),2023年7月,使用HOBO MX2022光照度传感器(精度±10%)连续监测光照度,数据记录间隔为10 min。

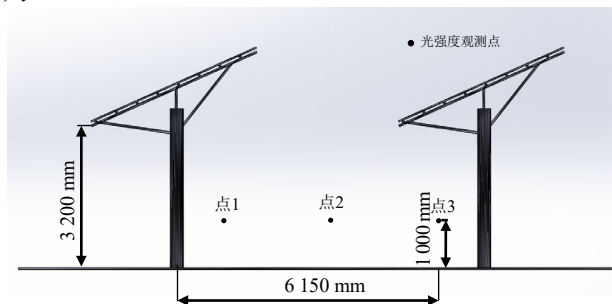


图1 光伏方阵内光照度测点布置图

Fig.1 Illumination measurement points layout in a PV array

供试茶树品种‘迎霜’,为国家级茶树良种,属小乔木型,中叶类,平均株高约1.50 m。由于基地土壤偏碱性,不利于茶树种植,故采用盆栽进行带土移植。各试验组茶树种植单元按6盆/组、2列种植的规格布设,株距为0.8 m,茶树种植地块左边缘距离左侧立柱2.45 m,右边缘距离右侧立柱2.25 m。对照组采用无遮挡露天种植模式。

1.2 光辐射模拟

为探索不同间距、高度和倾角配置下光伏系统

板下的光辐射量变化,根据GB 50797—2012《光伏发电站设计规范》,将光伏农业系统中倾角 20° 、 24° 、 28° ,组件最低点距离地面高度2.5、3.2、3.9 m,光伏组件间距8、9、10 m进行组合,设27组配置方案。基于1:1比例构建光伏系统三维模型,运用Autodesk Ecotect Analysis软件^[9-11],以 $0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ 的网格精度对27组方案进行模拟,获取2023年7月1日至31日每日06:00—18:00时段的日均光环境和09:00—11:00时段的时均光环境,重点对比分析不同配置方案下光伏系统中心南北向垂直剖面的光环境分布特征。

1.3 光响应曲线测量与拟合

茶树生长旺期在6月至8月,故选择2024年7月下旬晴朗日09:00—11:00,测定对照组茶树光响应曲线,从对照组随机挑选健壮无病虫害、长势一致的新梢,取当年生新梢成熟叶(芽下第5叶)为测定叶,取3株光合数据的平均值作为测量值。使用Li-6800进行光响应曲线测定,设定 CO_2 浓度为 $(400\pm 10)\ \mu\text{mol}/\text{mol}$,空气相对湿度为 $(60\pm 5)\%$,温度为 $(30\pm 2)\ ^\circ\text{C}$,光合有效辐射梯度设为1 800、1 500、1 200、900、600、300、200、150、100、70、30、 $0\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,分别在各梯度下测定茶树的净光合速率(P_n)。

分别采用直角双曲线模型(RH)^[12]、非直角双曲线模型(NRH)^[13]、直角双曲线修正模型(MRH)^[14]和指数模型(EM)^[15]对光响应曲线进行拟合。利用SPSS 26.0软件进行拟合分析,计算各模型的最大净光合速率($P_{n\text{max}}$)、表观量子效率(α)、暗呼吸速率(R_d)、光饱和点(I_c)以及光补偿点(I_{sat})等光响应特征参数,以决定系数(R^2)、均方误差(MSE)以及赤池信息量准则(AIC)作为拟合精准度的评价指标。选取拟合度最优的模型,计算不同光强下的光合速率。

2 结果与分析

2.1 光辐射模拟结果

2.1.1 光环境模拟验证结果

从表1可知,HOBO MX2022光照度传感器实测得到的点1、点2、点3及露天点的日均光辐射量分别为38.53、99.36、27.38、145.97 W/m^2 。根据光伏

方阵的部署参数,采用Ecotect软件进行光环境模拟,模拟结果如图2所示。根据模拟结果,在离地1.0 m处,从南到北的跨度方向取0.65、3.40、6.15 m及露天点4处,统计得到2023年7月1日至7月31日06:00—18:00的日均光辐射值分别为39.46、111.37、28.52、133.33 W/m^2 ,相对误差分别为2.41%、12.09%、4.16%、-8.66%,误差范围均在 $\pm 20\%$ 以内。尽管点2因光伏组件间隙透光及边缘反射等因素的影响,导致模拟误差相对较大,但整体上模拟结果与实测结果在空间分布趋势上保持一致,表现为露天区域光辐射最高,点2的次之,点1和点3因遮挡作用较强,辐射较低。这说明该模拟结果具有实际参考意义。

表1 光伏方阵板下日均辐射实测值与模拟值

Table 1 Measured and simulated daily average radiation

beneath the PV array

位置	实测值/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	模拟值/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	相对误差/%
露天点	145.97	133.33	-8.66
点1	38.53	39.46	2.41
点2	99.36	111.37	12.09
点3	27.38	28.52	4.16

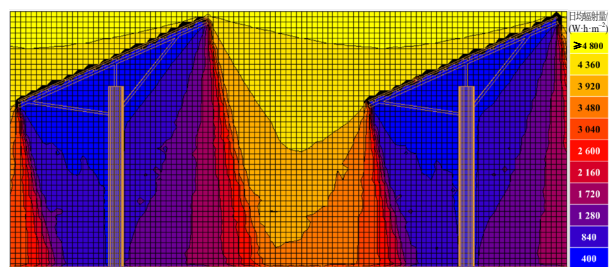


图2 农光互补基地的光伏方阵内光环境模拟结果

Fig. 2 Simulated light environment within the PV array of an agrivoltaic system

2.1.2 不同配置下光伏系统光环境模拟结果

完成模拟验证后,进一步基于Ecotect软件对不同配置参数下的光伏方阵内部进行光环境模拟与分析。从模拟结果(图3)中提取茶树冠层位置(离地1.5 m高度)的辐射数据,结果见表2。

从表2可知,在固定倾角和组件高度条件下,增大光伏组件间距可提升冠层接收的光辐射。例如,在倾角 24° 、高度2.5 m条件下,当间距从8 m增至10 m时,日均光合有效辐射由 $670.566\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 提高至 $705.717\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,增幅为5.2%,时均光合有效辐射由 $870.784\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加至 $915.010\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,增幅为5.1%;而在固定倾角和同一光伏组件间距

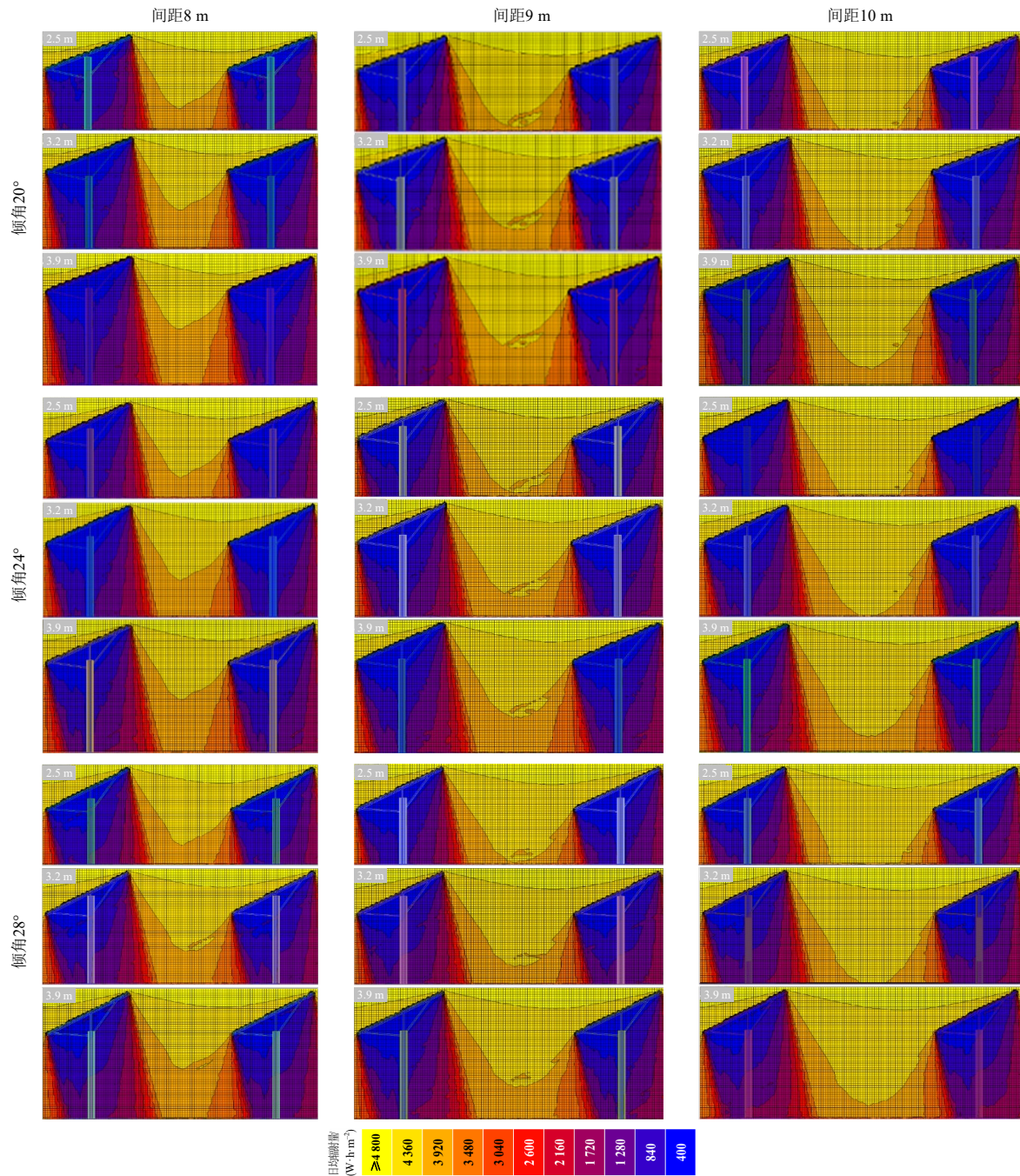


图3 不同参数组合光伏组件下农光互补基地的光伏方阵内日均光环境模拟结果

Fig. 3 Simulated daily average light environment in the PV array under different PV module parameters

表2 不同配置方案下的光环境参数及光合速率预测结果

Table 2 Predicted photosynthetic rates and light environment parameters for different configurations

倾角/ (°)	高度/ m	间距/ m	日均光合有效辐射/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	日均光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	日均光合 速率比	时均光合有效辐射/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	时均光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	时均光合 速率比
20	2.5	8	663.509	6.274	0.945	878.815	6.840	0.960
20	2.5	9	686.293	6.345	0.955	898.307	6.881	0.965
20	2.5	10	701.905	6.392	0.963	909.955	6.905	0.969
20	3.2	8	643.853	6.210	0.935	826.432	6.721	0.943
20	3.2	9	651.595	6.235	0.939	859.565	6.797	0.954
20	3.2	10	675.555	6.312	0.950	885.882	6.855	0.962
20	3.9	8	613.382	6.105	0.919	790.781	6.635	0.931
20	3.9	9	639.091	6.194	0.933	828.381	6.726	0.944
20	3.9	10	664.633	6.277	0.945	856.721	6.791	0.953

表2(续)

倾角/ (°)	高度/m	间距/m	日均光合有效辐射/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	日均光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	日均光合 速率比	日均光合有效辐射/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	日均光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	日均光合 速率比
24	2.5	8	670.566	6.296	0.948	870.784	6.822	0.957
24	2.5	9	687.215	6.348	0.956	892.972	6.870	0.964
24	2.5	10	705.717	6.403	0.964	915.010	6.915	0.970
24	3.2	8	641.071	6.200	0.934	830.361	6.731	0.944
24	3.2	9	661.461	6.267	0.944	871.089	6.823	0.957
24	3.2	10	682.588	6.334	0.954	885.793	6.855	0.962
24	3.9	8	623.105	6.139	0.924	810.027	6.682	0.938
24	3.9	9	644.126	6.211	0.935	843.823	6.762	0.949
24	3.9	10	669.937	6.294	0.948	858.691	6.795	0.953
28	2.5	8	672.539	6.303	0.949	882.715	6.848	0.961
28	2.5	9	690.836	6.359	0.958	890.422	6.864	0.963
28	2.5	10	709.596	6.415	0.966	914.666	6.915	0.970
28	3.2	8	650.080	6.230	0.938	846.757	6.769	0.950
28	3.2	9	669.086	6.292	0.947	872.640	6.826	0.958
28	3.2	10	687.886	6.350	0.956	895.799	6.876	0.965
28	3.9	8	624.421	6.143	0.925	814.039	6.692	0.939
28	3.9	9	647.562	6.222	0.937	847.194	6.769	0.950
28	3.9	10	670.638	6.297	0.948	872.407	6.826	0.958
对照组			793.257	6.641		1 028.560	7.127	

下,组件高度增加则会降低冠层光辐射,当倾角为24°、间距为8 m,高度从2.5 m升至3.9 m时,日均光合有效辐射由670.566 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 降低至623.105 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,降幅为7.1%,时均光合有效辐射由870.784 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 降低至810.027 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,降幅为7.0%;相比之下,倾角变化对光环境的影响相对较弱,在相同高度与间距条件下,倾角从20°增至28°,日均光合有效辐射提升0.7%~2.7%,而时均光合有效辐射无显著调控规律,这可能与太阳角度动态变化导致的阴影偏移有关。

2.2 光合作用拟合结果

由图4可知,各模型拟合的光响应曲线的变化

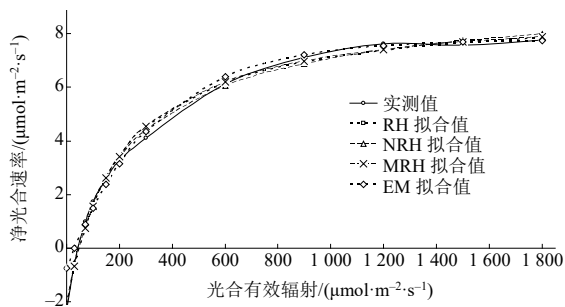


图4 实测与模型拟合的茶树光响应曲线

Fig. 4 Measured and model-fitted light response curves of the tea plants

趋势与实测曲线基本一致,均表现为随光合有效辐射的增加,净光合速率先快速上升后逐渐趋于饱和,呈现典型的光响应特征。相比之下,指数模型的拟合值和实测值差别相对较大,其余3个模型的拟合值均与实测值较为接近,具有较好的拟合效果。

结合评价指标和计算得到的光响应特征参数(表3)可知,4个模型拟合得到的 a 均在理论范围(0.010~0.125)之内,这说明各模型均可拟合茶树的光响应曲线;4个模型拟合的 P_{nmax} 均高于实测值,其中EM的 P_{nmax} 最接近实测值;除EM外,其他3个模型的 R_d 均与实测值接近,且 R^2 均大于0.99,其中,NRH的决定系数最大,为0.997 9;NRH的MSE和AIC最小。综合光响应特征参数及拟合评价指标, NRH在3个指标(R^2 、MSE、AIC)上均表现最优,且参数估计结果也符合生理实际,故选用非直角双曲线模型(NRH)为最优拟合模型。拟合公式为

$$P_n = \frac{0.077I + 11.81 - \sqrt{(0.077I + 11.81)^2 + 3.194I}}{-1.756} - 2.294$$

式中: I 为叶片的光合有效辐射。

表3 茶树光响应特征参数模拟拟合值与实测值

模型	α	$P_{nmax}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$R_d/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$I_{sa}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$I_j/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	R^2	MSE	AIC
RH	0.055	11.086	2.110	239.927	47.382	0.996 9	0.412	-4.64
NRH	0.077	11.810	2.294	411.851	43.28	0.997 9	0.275	-7.50
MRH	0.055	11.104	2.108	290.705	50.45	0.996 9	0.418	-2.46
EM	0.026	8.520	0.752	1 456.593	30.28	0.983 2	3.030	19.31
实测值		7.600	2.310	1 000	30~70			

注: NRH的快速光曲线曲率为-0.878; MRH的修正系数为0.000 001。

2.3 光合速率预测

2.3.1 茶树光合速率预测值对比验证结果

在2.2节拟合的光响应曲线模型的基础上,结合光环境模拟结果,对倾角24°、间距6.8 m的不同光伏组件高度条件下茶树光合速率进行理论预测,并与实测值进行对比分析,结果如表4所示。

表4 不同组件高度下茶树光合速率的实测值与预测值

高度/m	实测值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	预测值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差/%
2.5	7.108	6.783	-4.57%
3.2	6.972	6.667	-4.37%
3.9	6.826	6.573	-3.71%

从表4可知,不同光伏组件高度下茶树光合速率模拟值比实测值低3.71%~4.57%,但整体变化趋势基本一致,即随组件高度增加,茶树光合速率逐渐降低,误差可能源于空间采样的尺度差异,模拟数据采用立柱间2.5 m处、1 500 mm高度的线平均辐射量,而实测选择冠层中部优势植株,其光照条件优于区域平均状况。当前模型虽存在偏差,但能有效反映不同组件高度对茶树光合作用的梯度影响规律。

2.3.2 不同光伏配置下的光合速率预测结果

为进一步分析光伏系统对茶树光合速率的影响,结合光环境模拟结果与光响应曲线模型,对不同光伏配置条件下光环境参数及茶树光合速率进行模拟预测,结果见表2。

以露天环境作为对照,模拟结果表明,露天环境的日均光合有效辐射为793.257 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,对应茶树的日均光合速率为6.641 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;时均光合有效辐射为1 028.560 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,对应茶树的时均

光合速率为7.127 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。从表2还可知,在日均光照分析中,农光互补系统下茶树的日均光合速率较露天的降低3.40%~8.07%,其中,组件高度对日均光合速率的抑制作用最明显。当组件高度从2.5 m升至3.9 m时,日均光合速率降幅为1.70%~2.69%,其中,角度24°、间距10 m时,降幅最小;角度20°、间距8 m时,降幅最大。同时,组件间距由8 m增至10 m时,可使光合速率提升1.64%~2.82%。其中,角度20°、离地高度3.2 m时,提升幅度最小,角度20°、离地高度3.9 m时,提升幅度最大;而倾角的调整仅带来小于0.91%的变化。最优配置为倾角28°、高度2.5 m、间距10 m,其日均光合速率比达0.966,较最劣配置(倾角20°、高度3.9 m、间距8 m)提升5.1%。

在时均光照(09:00—11:00)分析中,农光互补系统下茶树光合速率较露天的降低2.97%~6.90%,各配置方案下的变化趋势与日均光照下的类似。组件高度增加导致时均光合速率下降1.29%~3.00%,其中,角度28°、间距10 m时,降幅最小;角度20°、间距8 m时,降幅最大。间距由8 m增至10 m可提升时均光合速率0.95%~2.35%。最优配置为倾角24°或28°、高度2.5 m、间距10 m,其时均光合速率比为0.970,较最劣配置(倾角20°、高度3.9 m、间距8 m)提升4.2%。综合日均光合速率比和时均光合速率比,最优配置为倾角28°、高度2.5 m、间距10 m,最劣配置为倾角20°、高度3.9 m、间距8 m。

3 结论与讨论

本研究中,将农光互补基地光伏方阵不同位置的实测光照数据与Ecotect光环境模拟结果进行对比,结果显示,模拟值与实测值之间的差异在20%以内,且模拟结果所反映的光照环境变化趋势与实测趋势一致,验证了模型的可靠性。这一结果与

CASTELLANO等^[11]的研究结果一致。

不同光响应模型拟合结果表明,非直角双曲线模型拟合茶树光强-光合响应曲线的效果最佳,其 R^2 最大,为0.997 9, MSE和AIC最小,拟合的暗呼吸速率和光补偿点与实测值最为接近;指数模型拟合的最大净光合速率与实测值最接近,但暗呼吸速率相差最大。

光伏组件结构参数对茶树光合速率具有一定的影响,其中组件高度和间距为主要调控因子,而倾角影响较小。在研究范围内,农光互补系统下的茶树日均、时均光合速率较露天的分别降低了3.40%~8.07%、2.97%~6.90%,随组件高度的增加呈下降趋势,随间距增大则呈上升趋势。时均光合速率降幅较小,这可能与09:00—11:00时段的光辐射已达到或接近茶树的光饱和点有关。其中,倾斜角20°、高度3.9 m、间距8 m的光伏配置,对茶树光合速率的影响最大,倾斜角28°、高度2.5 m、间距10 m的光伏配置,对茶树光合速率的影响最小。

光响应曲线一般是基于短期试验数据得到的结果,茶树作为多年生作物,在长期不同光照强度条件下可能逐步调整其光合作用机制。本研究预测的光合速率未考虑光伏组件对茶树光合作用的长期影响和不均匀光照对作物的影响,后续拟通过3~5个物候周期追踪光合参数,并结合模拟的光模拟数据解析光伏茶园的光合适应机制。此外,茶树光合作用受温度和光辐射的交互效应影响,未来将构建光-温双因子的预测模型,并通过2~3年的栽培试验验证其对鲜茶叶质量和产量的影响。

参考文献:

- [1] GOETZBERGER A, ZASTROW A. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation[J]. *International Journal of Solar Energy*, 1982, 1(1): 55-69.
- [2] WESELEK A, EHMANN A, ZIKELI S, et al. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2019, 39: 35.
- [3] PRAKASH V, LUNAGARIA M M, TRIVEDI A P, et al. Shading and PAR under different density agrivoltaic systems, their simulation and effect on wheat productivity[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 149: 126922.
- [4] GOMEZ-CASANOVAS N, MWEBAZE P, KHANNA M, et al. Knowns, uncertainties, and challenges in agrivoltaics to sustainably intensify energy and food production[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2023, 4(8): 101518.
- [5] 陈震古. 茶树高光效育种的探讨[J]. *茶叶*, 1979, 5(4): 42-44.
- [6] 陈佩. 茶园遮光效应及其对茶树光合作用和茶叶品质成分的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- [7] 蒋欢. 基于数值模拟的光伏茶园光环境分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [8] 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.
- [9] CASTELLANO S. Photovoltaic greenhouses: evaluation of shading effect and its influence on agricultural performances[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2014, 45(4): 168.
- [10] CASTELLANO S, SANTAMARIA P, SERIO F. Solar radiation distribution inside a monospan greenhouse with the roof entirely covered by photovoltaic panels[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 47: 485.
- [11] CASTELLANO S, TSIROGIANNIS I L. Daylight analysis inside photovoltaic greenhouses[C]// *Proceedings of the 43rd International Symposium on Agricultural Engineering*. Opatija, Croatia: University of Zagreb, 2015: 703-712.
- [12] BALY E C C. The kinetics of photosynthesis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1935, 117(804): 218-239.
- [13] THORNLEY J H M. *Mathematical models in plant physiology*[M]. London: Academic Press, 1976.
- [14] 叶子飘. 光合作用对光和CO₂响应模型的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 727-740.
- [15] PRADO C H B A, DE MORAES J A P V. Photosynthetic capacity and specific leaf mass in twenty woody species of Cerrado vegetation under field conditions[J]. *Photosynthetica*, 1997, 33(1): 103-112.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正