

不同光生境模式下珠芽黄魔芋光合特征及产量的比较研究

原慧芳¹, 李金威¹, 徐素素², 阮彦伟¹, 陈明惠¹, 岩香甩^{1*}

1. 云南省天然橡胶可持续利用研究重点实验室/云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100; 2. 云南农业大学, 云南昆明 650201

摘要: 为探究不同光生境模式下珠芽黄魔芋 (*Amorphophallus muelleri*) 光合特征及产量的变化特征, 设置 3 种魔芋间作模式 7 种光生境处理: 修剪橡胶树间作模式 T₁[林中心 (T_{1M}) 和林边缘 (T_{1S})]、巨菌草行间作模式 T₂[林中心 (T_{2M}) 和林边缘 (T_{2S})]、搭建 50%透光率遮荫网下单作模式 (T_{3M})、无修剪橡胶树为对照 (CK) [林中心 (CK_M)、林边缘 (CK_S)], 观测不同光生境内光照强度 (Lux) 和光合有效辐射 (PAR) 的日变化规律情况, 并测定不同光生境处理下珠芽黄魔芋 3 个时期 (换头期、膨大期、成熟期) 的光合参数[净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间二氧化碳浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r)]、叶绿素荧光参数[最大光化学效率 (F_v/F_m)、实际光化学量子产量 (YII)、最大电子传递速率 (ETR_{max})、半饱和光强 (I_k)]、光合色素参数[叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b)、总叶绿素 (Chl a+b)、叶绿素 a/b (Chl a/b)], 比较各光生境模式下球茎产量的变化。结果表明: 各光生境模式下 Lux 和 PAR 的日变化规律基本一致, 均呈“单峰型”。各光生境模式处理的光合参数 (P_n 、 G_s 、 T_r 、 C_i) 差异显著, 与 CK 处理相比较, 3 个时期 T_{3M} 处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 均显著最高, 其次换头期和膨大期 T₁、T₂ 处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 均显著高于 CK 处理; 各光生境模式处理的叶绿素荧光参数 (F_v/F_m 、YII、 ETR_{max} 和 I_k) 均显著高于 CK 处理; 各光生境模式处理的光合色素参数 (Chl a、Chl b、Chl a+b、Chl a/b) 变化不规律, 3 个时期 T₂、CK 处理的 Chl a、Chl b、Chl a+b 均高于 T₁ 和 T₃ 处理, 各处理的 Chl a/b 均显著高于 CK 处理。从各间作模式处理下林中心和林边缘的光照强度及产量比较来看, 林中心高于林边缘。经比较, 各间作模式处理均提高了魔芋光合特性及产量, 而修剪橡胶树模式 T₁ 处理最明显, 达到了人工搭建遮荫网下单作相近的效果。因此, 生产中针对橡胶林或巨菌草行间种植魔芋, 需要对橡胶树树冠采取修剪或其他措施改善光照条件, 同时, 巨菌草行间作模式需要增加施肥量及合理配置作物种植距离和方向, 才能有效缓解日光直射对魔芋植株的灼伤, 并有效促进魔芋生长和提高光合效率, 进而提高作物产量和土地利用率。

关键词: 光生境模式; 橡胶林; 间作模式; 珠芽黄魔芋; 光合特征; 产量

中图分类号: S632.3; S562 文献标志码: A

Photosynthetic Characteristics and Yield of *Amorphophallus muelleri* in Different Light Conditions

YUAN Huifang¹, LI Jinwei¹, XU Susu², RUAN Yanwei¹, CHEN Minghui¹, YAN Xiangshuai^{1*}

1. Yunnan Key Laboratory of Sustainable Utilization Research on Rubber Tree / Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong, Yunnan 666100, China; 2. Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China

Abstract: The study was aimed to explore the photosynthetic characteristics and yield underground corm of *Amorphophallus muelleri* under different light conditions. Three intercrop modes of *A. muelleri*, pruned rubber tree intercrop mode T₁ [forest center (T_{1M}) and forest edge (T_{1S})], interrow mode of pueraria T₂ [forest center (T_{2M}) and edge (T_{2S})], 50% light transmittance shade mode T_{3M}, no pruning rubber tree (CK) [forest center (CK_M) and edge (CK_S)] were used. The light intensity (Lux) and photosynthetically active radiation (PAR) in different light conditions were measured. The daily variation pattern of *A. muelleri*, photosynthetic parameters [net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s),

收稿日期 2025-01-13; 接受日期 2025-03-16

基金项目 云南省农业基础研究联合专项 (No. 202101BD070001-102); 省所热带作物科技创新专项 (No. RF2025)。

作者简介 原慧芳 (1978—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 热带植物生理生态。*通信作者 (Corresponding author): 岩香甩 (YAN Xiangshuai), E-mail: 3099663576@qq.com。

intercellular carbon dioxide concentration (C_i), transpiration rate (T_r), chlorophyll fluorescence parameters [maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), actual photochemical quantum yield (YII), maximum electron transfer rate (ETR_{max}), half-saturation light intensity (I_k)], photosynthetic pigment parameters [chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b), total chlorophyll (Chl a+b), chlorophyll a/b (Chl a/b)] were measured at three stages (head changing stage, corm expansion stage, maturity stage). The yield of underground corm under different light conditions was compared. The results showed that daily variations of Lux and PAR were basically consistent under light conditions, showing “unimodal” modes. There were significant differences in the photosynthetic parameters (P_n , G_s , T_r , and C_i) among different light conditions. Compared with CK, P_n , G_s , and T_r of the T_{3M} were the significantly highest in all three stages. During the head changing and corm expansion stages, P_n , G_s , T_r of the T_1 and T_2 were significantly higher than those of CK; The chlorophyll fluorescence parameters (F_v/F_m , YII, ETR_{max} , I_k) of each light conditions were significantly higher than those of CK; The changes in photosynthetic pigment parameters (Chl a, Chl b, Chl a+b, Chl a/b) of various conditions were irregular. The Chl a, Chl b, Chl a+b of T_2 and CK were higher than those of T_1 and T_3 at all three stages, and Chl a/b of all treatments was significantly higher than those of CK. From the comparison of light intensity and yield between the forest center and edge under conditions, it can be seen that the forest center is higher than the forest edge. After comparing the implementation effects of various intercropping modes, it can be seen that all treatments have improved the photosynthetic characteristics and yield of *A. muelleri*, while the pruned rubber tree modes T_1 treatment is most obvious, and achieved the similar effect of single cropping under artificial shade. Therefore, in rubber tree production, pruning measures or other measures is needed to improve the light conditions and replace monoculture artificial shade for planting *A. muelleri*. The intercrop mode of puelia requires increase in fertilizer application and a reasonable allocation of crop distance direction to effectively alleviate the burns caused by direct sunlight on *A. muelleri* plants, and improve photosynthetic efficiency, thereby increasing crop yield and land use efficiency.

Keywords: different light conditions; rubber forest; intercrop mode; *Amorphophallus muelleri*; photosynthetic characteristics; yield

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.06.014

魔芋是天南星科 (Araceae) 魔芋属 (*Amorphophallus* Blume) 的多年生变态地下茎草本植物。因魔芋叶片怕高温烈日暴晒, 喜温暖和高湿, 喜散射光和弱光, 是一种典型的喜阴作物^[1-2]。人工搭建遮荫棚种植魔芋需要高成本的投入, 且目前面临着非粮化和土地紧缺危机。而热带雨林非常适宜珠芽黄魔芋的生长, 这恰好与热区橡胶树生长环境相互补。西双版纳州光热资源条件丰富, 具备发展复合式农林业的自然和生态条件。因此, 针对当地种植规模最大的人工橡胶林, 发展林下耐荫经济作物有非常大的发展空间。然而一般常规模式的橡胶树定植 3~4 a 后就持续封行出现阴蔽环境, 致使林下间作物往往因光照不足而长势不佳^[3-4]。光是作物进行光合作用的能量来源, 既为作物生长提供能量, 又是调节作物生长发育各项进程的信号。研究发现, 间作模式引起光时、光强、光质等冠层微环境变化, 进而影响作物形态建成和光合生理特性的改变^[5-6]。前期不少研究结果也表明, 间作模式中树种搭配、种植密度和喜阴喜阳习性等均是影响作物生产的关键因素, 其区域内冠层结构的合理搭配, 树种、行向、株行距受光分布情况不同而直接影响作物的光合特

性, 进而决定着作物产量的高低^[7-8]。就橡胶林下间作魔芋的研究结果表明, 3 a 树龄橡胶林下魔芋的净光合速率高于 4 a 和 5 a 树龄, 胶园宽窄行比常规模式更利于魔芋产量、品质及抗倒伏能力的提高^[9-10]。可见, 光环境是作物生长发育的重要生态环境因素之一, 而太阳辐射又是决定作物光合作用和产量的关键因素之一^[11-12]。所以, 了解其生境光照的合理分布情况, 得出最佳的配置模式, 对提高间作物产量具有重要意义。

近年来, 西双版纳州等多地为增加土地利用效率进行了橡胶林下经济作物种植的研究, 因珠芽黄魔芋 (以下简称“魔芋”) 生长优势较明显, 受到当地广泛种植推广。部分学者在云南景洪市和海南儋州市的胶园林下也进行了魔芋种植及球茎产量的比较研究。结果发现, 由于光照条件的影响, 5 a 比 12 a 树龄胶园更有利于提高魔芋球茎产量。成龄胶园树冠下光照强度较弱, 直射光减少, 而散射光、折射光增多, 不利于光合产物的合成和分配, 致使魔芋产量和品质明显下降^[13-15]。黄坚雄等^[16]在宽窄行模式的胶园内选择种植直立型橡胶树品种, 以减轻成龄胶园宽行中的区域出现持续阴蔽环境而影响作物生长, 研究结果证实, 虽

然该措施比常规胶园内的光照条件得到明显改善,但还是发现更适宜间作阳生作物。因此,针对人工林采取修剪措施显得非常必要,不仅可减轻间作物的遮光胁迫,还能提高间作物的光合速率,进而保证间作物产量的稳定^[17-18]。岩所等^[19]的研究结果表明,将魔芋间作在喜温暖和强光的高秆玉米行间,可为矮秆魔芋起到一定遮荫效果,促进了魔芋生长。但玉米的播期和生长周期是影响魔芋生物性状的主要限制因素。本研究在前期研究的基础上作进一步改进,对宽行密植的成龄橡胶树采取修剪措施和采用生长高于玉米且周期长的巨菌草下间作魔芋,观测对比不同光生境模式下魔芋叶片的光合参数、叶绿素荧光参数、叶绿素含量及球茎产量的变化,摸清不同生境模式下光照强度和光合特征及产量之间的相互关系,比较不同间作模式处理与人工搭建遮荫网下单作魔芋处理的差距。结合魔芋种植成为当地扶贫特色产业主推项目的基础上,同时比较分析不同光生境模式下魔芋 3 个关键时期光合特性及产量的

变化规律,进一步解析复合系统的光能利用效率情况,为后续魔芋林下推广种植产业的快速发展提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2021—2022 年在云南省景洪市云南省热带作物科学研究所五队试验示范基地(22°00'49"N, 100°45'51"E)进行。该地海拔 570 m,属于北热带西南季风气候,一年中有明显的旱季(11 月至次年 4 月)和雨季(5—10 月),年平均气温为 18.6~21.9 °C,年平均降水量为 1200~1700 mm,年平均日照为 1800~2300 h,相对湿度 80%~86%,≥10 °C 的年平均积温 5062~8000 °C,土壤基础理化性状为有机质(organic matter, OM)、全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)、全钾(total kalium, TK)、碱解氮(available nitrogen, AN)、有效磷(available phosphorus, AP)、有效钾(available kalium, AK)含量见表 1^[20]。

表 1 试验地土壤基础理化性状

Tab. 1 Physical and chemical properties of soil foundation in experimental sites

土层 Soil layer/cm	pH	OM/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	TK/(g·kg ⁻¹)	AN/(mg·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)	AK/(mg·kg ⁻¹)
0~20	4.34	21.27	1.86	0.42	11.04	88.09	12.03	212.16
20~40	4.20	17.75	1.71	0.39	12.27	83.12	10.25	202.93

1.2 方法

1.2.1 试验设计 采用随机区组设计,设置 3 种魔芋间作模式 7 种光生境处理:修剪橡胶树间作模式 T₁[林中心(T_{1M})、林边缘(T_{1S})],巨菌草行间间作模式 T₂[林中心(T_{2M})、林边缘(T_{2S})],搭建 50%透光率遮荫网下单作模式(T_{3M}),以 1985 年定植的宽行密株(20 m×2 m)无修剪南北行向橡胶林为对照(CK)[林中心(CK_M)、林边缘(CK_S)]。每处理重复 3 次,共选 21 个小区,每小区面积约 62 m²(长 16 m×宽 1.3 m×3 垄)。魔芋种植与橡胶树、巨菌草的距离分别为 2.5 m 和 30 cm。T₁处理按行间种植魔芋 12 垄,林中心选在第 5~8 垄,林边缘选在第 1~4 垄和第 9~12 垄;T₂处理按平地种植 1 带(宽 1 m,)巨菌草行内间作魔芋 3 垄,依次排序,林中心选第 2 垄,林边缘选第 1、3 垄;CK 处理同上行间种植魔芋 12 垄,林中心选在第 5~8 垄,林边缘选在第 1~4 垄和第 9~12 垄。魔芋的种植行向与橡胶树或巨菌草树带均一致。每小区选取长势相近、充分伸展、

无病虫害的健康叶 3 片进行标注,测定各项指标,重复 3 次。

以珠芽黄魔芋栽培种弥勒魔芋(*Amorphophallus muelleri*)的叶面珠芽(规格为 1~2 g/颗)为试种材料;在橡胶林和巨菌草行间进行平行起垄种植,垄面 1 m,垄高 30 cm,沟宽 30 cm,魔芋种植按株行距 20 cm×25 cm,深度 10 cm 进行播种;巨菌草种植于魔芋种植前半年,将截取含有 1~2 个隐头芽的茎段,按行距 50 cm 横向(放置至未起垄 1 m 预留位置的正中间,覆土压实,依次按上面种植 1 带巨菌草茎段间作魔芋 3 垄顺序。间作和单作魔芋的株行距及管理方式均一致。

1.2.2 指标测定 (1)不同光生境下光照强度测定。利用 HR-450 植物照明检测仪(台湾海博特)测定各光生境模式下光谱(380~780 nm)的光照强度(Lux)和光合有效辐射(PAR)。每个处理测 3 个点,8:00—18:00 每个测定地点 2 h 测定 1 次,每次取 3 个值,连续观测 3 d。每个光生境测定高度一致(模拟魔芋生长高度),并且在相同

时段进行连续测定。

(2) 光合气体交换参数的测定。分别在魔芋换头期(7月)、膨大期(9月)和成熟期(11月)。采用 Li-6400 便携式光合测定仪(LI-COR, 美国)对主干顶蓬完全展开健康叶片进行标记测定:净光合速率(Net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(Stomatal conductance, G_s)、蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)和胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 concentration, C_i)。使用开放气路, 空气流速为 $500 \mu\text{mol/s}$, 叶温 28°C , 相对湿度 80%, CO_2 浓度设定在 $400 \mu\text{mol/mol}$, 光强 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$, 每处理选 9 株, 3 次重复。测定时间选择在晴天上午 8:30—12:00(下同)。

(3) 叶绿素荧光参数的测定。3 个时期采用 PAM-2500 便携式荧光仪(WALZ, 德国)对以上标记的健康叶暗适应 20 min 后再进行测定:最大光化学效率(Maximum photochemical efficiency, F_v/F_m)和实际光化学量子产量(Actual photochemical quantum yield, Y_{II})。每次测定前将叶片后设置 14 个[0、6、40、88、140、196、276、380、509、666、872、1110、1376、1642 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]梯度光化学强度, 每个梯度持续时间 30 s, 经软件 WinControl-3.25 自动拟合可得到快速光响应曲线的最大电子传递速率(Maximum electron transfer rate, $\text{ETR}_{\max}$)和半饱和光强(Half-saturation light intensity, I_k)等参数。

(4) 叶绿素含量参数的测定。测定完上述各项指标后, 选早上 8:30 左右对各光生境处理标记的健康叶片剪至密封袋中, 迅速带回室内采用直接浸提法^[21]进行叶绿素含量(Chl)测定。用 UV-2300 型可见光光度计(上海天美)对 95% 乙醇提取液在 663 nm 和 645 nm 的光照吸光度下进行测定。并计算求出叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、总叶绿素(Chl a+b)、叶绿素 a/b(Chl a/b)。

(5) 球茎产量测定。于 12 月魔芋倒苗两周后, 将魔芋地下球茎挖出, 每处理选 30 株进行称重, 3 次重复, 最后统计结果。

1.3 数据处理

利用 SPSS 22.0 统计软件对试验数据进行处理和统计分析, 采用 Duncan's 法进行方差多重比较($P < 0.05$), 使用 Sigmaplot 12.0 软件完成绘图。结果以平均值 $\pm$ 标准误显示。

2 结果与分析

2.1 不同光生境模式下光照强度和光合有效辐射日变化比较

不同光生境模式处理下光照强度(Lux)和光合有效辐射(PAR)的日变化趋势均呈“单峰型”(表 2)。Lux 和 PAR 从早上 8:00 开始不断升高, 至 12:00 出现峰值后下降, 至 16:00—18:00 降至全天的最小值, 5 个时段差异显著, 其时段高低顺序依次为 12:00—14:00 > 10:00—12:00 > 14:00—16:00 > 8:00—10:00 > 16:00—18:00; 同一时段不同处理的 Lux 和 PAR 差异显著, 8:00—10:00、10:00—12:00、16:00—18:00 时段 T_2 处理均显著最高, 而在 12:00—14:00、14:00—16:00 时段 T_3 处理显著最高, 其次是所有时段的 T_1 处理, 而所有时段内 CK 处理均显著最低; 从间作模式处理中林中心和林边缘的 Lux 和 PAR 相比较来看, 各生境处理间变化趋势不一致, 林中心 T_1 处理在 8:00—10:00、10:00—12:00 和 12:00—14:00 时段均高于林边缘, 而 14:00—16:00 和 16:00—18:00 时段则相反, 林中心均低于林边缘。 T_2 处理除 8:00—10:00 时段为林中心低于林边缘外, 其他时段均为林中心高于林边缘。

2.2 不同光生境模式下魔芋叶片光合参数比较

不同光生境模式处理下 3 个时期魔芋叶片的光合参数(P_n 、 G_s 、 T_r 、 C_i)变化趋势相类似(表 3)。同一时期不同处理的光合参数差异显著, 3 个时期 T_{3M} 处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 均显著最高, 其次换头期和膨大期时 T_1 、 T_2 处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 均显著高于 CK 处理, 而成熟期 T_1 、 T_2 处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 显著低于 CK 处理。3 个时期各处理的 C_i 差异不显著, T_{2S} 和 CK_S 处理的 C_i 显著高于其他处理, 但处理间差异不显著。可见, 随着生育期的推进, 除了成熟期 CK 处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 高于其他处理外, 换头期和膨大期各处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 均高于 CK 处理; 同一处理下不同时期的各光合参数差异显著, 换头期叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r 均显著最高, 其次是膨大期, 而成熟期显著最低。换头期的 C_i 显著低于膨大期和成熟期, 而膨大期和成熟期处理间差异不显著。从各间作模式处理的林中心和林边缘的光合参数相比较来看, 除了换头期和膨大期 T_1 和 T_2 处理的 P_n 、 G_s 和 T_r 表现为林中心稍低于林边缘的值外, 而其他间作模式处理的 P_n 、 G_s 、

表 2 不同光生境模式下光照强度 (Lux) 和光合有效辐射 (PAR) 日变化特征
Tab. 2 Diurnal changes of light intensity (Lux) and photosynthetically active radiation (PAR) under different light conditions

参数 Parameter	测定时段 Measurement time	处理 Treatment							
		CK _M	CK _S	T _{1M}	T _{1S}	T _{2M}	T _{2S}	T _{3M}	
Lux	8: 00—10: 00	1152.12±64.62 ^{Ce}	2366.15±106.81 ^{Dd}	3622.42±288.51 ^{Ce}	2410.67±56.21 ^{Bd}	5416.05±198.35 ^{Cb}	6147.68±464.14 ^{CDa}	2936.80±195.50 ^{Cd}	
	10: 00—12: 00	2583.17±38.68 ^{Be}	5753.56±344.96 ^{Bd}	8821.26±400.26 ^{Ac}	7042.77±726.45 ^{Acld}	19 674.65±1311.99 ^{Aa}	12 343.79±1594.86 ^{Bb}	16 673.51±505.28 ^{Bb}	
	12: 00—14: 00	5012.45±229.60 ^{Ad}	7380.95±555.17 ^{Acld}	9936.48±400.75 ^{Abc}	8535.13±715.52 ^{Ac}	21 415.55±1032.68 ^{Aa}	16 017.15±1088.43 ^{Ab}	23 829.28±460.19 ^{Aa}	
	14: 00—16: 00	2498.95±101.15 ^{Bd}	4694.31±254.16 ^{Cd}	5407.93±687.74 ^{Bcd}	8416.33±876.38 ^{Abc}	11 357.02±208.41 ^{Bb}	8470.65±1528.30 ^{Cc}	21 779.73±2440.79 ^{Aa}	
	16: 00—18: 00	598.79±23.11 ^{Dd}	1467.87±66.19 ^{De}	1565.71±23.09 ^{De}	1777.60±83.24 ^{Cc}	3447.26±26.15 ^{Ca}	2982.86±239.51 ^{Pb}	2713.67±90.02 ^{Cb}	
PAR/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	8: 00—10: 00	34.24±2.08 ^{Cd}	60.39±2.45 ^{Dcd}	91.84±7.57 ^{Pb}	61.25±1.28 ^{Bcd}	128.49±5.02 ^{Ca}	135.38±10.69 ^{Bc}	83.10±20.48 ^{Cbc}	
	10: 00—12: 00	72.71±1.84 ^{Bd}	145.93±7.93 ^{Bc}	216.96±9.30 ^{Bc}	176.85±16.67 ^{Ac}	472.03±29.75 ^{Aa}	302.12±37.02 ^{Ab}	386.45±11.47 ^{Bb}	
	12: 00—14: 00	137.24±5.83 ^{Ac}	189.28±12.54 ^{Ade}	248.77±9.37 ^{Abc}	219.49±19.99 ^{Acld}	514.32±23.64 ^{Aa}	381.43±50.38 ^{Ab}	549.66±10.37 ^{Aa}	
	14: 00—16: 00	69.36±2.29 ^{Bd}	119.26±5.94 ^{Cd}	135.50±15.97 ^{Ccd}	217.70±19.75 ^{Ab}	273.31±4.75 ^{Bb}	206.20±35.31 ^{Bbc}	503.93±56.46 ^{Aa}	
	16: 00—18: 00	16.72±0.54 ^{Pf}	37.34±1.73 ^{Ecd}	39.36±1.60 ^{Fde}	44.93±1.95 ^{Be}	84.35±1.49 ^{Ca}	75.79±5.58 ^{Cb}	64.77±2.08 ^{Cc}	

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示测定时间段差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), different capital letters indicate significant differences in the measurement period ($P<0.05$).

表 3 不同光生境模式下 3 个时期魔芋叶片光合参数比较

Tab. 3 Comparison of photosynthetic parameters of *A. muelleri* leaves at three stages under different light conditions

处理 Treatment	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			$G_p/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		
	换头期	膨大期	成熟期	换头期	膨大期	成熟期
	Head-changing stage	Corm expansion stage	Maturaty stage	Head-changing stage	Corm expansion stage	Maturaty stage
CK _M	12.28±0.29 ^{Ac}	6.05±0.22 ^{Bd}	6.54±0.26 ^{Bb}	0.07±0.006 ^{Be}	0.05±0.001 ^{Cd}	0.12±0.004 ^{Aab}
CK _S	12.05±0.44 ^{Ac}	4.93±0.16 ^{Be}	5.77±0.28 ^{Bc}	0.10±0.006 ^{Ad}	0.04±0.005 ^{Be}	0.11±0.003 ^{Ab}
T _{1M}	14.63±0.19 ^{Ab}	9.18±0.49 ^{Bbc}	5.21±0.16 ^{Cc}	0.14±0.005 ^{Ac}	0.11±0.004 ^{Bb}	0.06±0.002 ^{Cc}
T _{1S}	13.75±0.55 ^{Ab}	9.99±0.41 ^{Bb}	4.09±0.37 ^{Cd}	0.18±0.002 ^{Ab}	0.09±0.002 ^{Bc}	0.03±0.003 ^{Cd}
T _{2M}	12.20±0.42 ^{Ac}	8.18±0.38 ^{Bc}	4.18±0.35 ^{Cd}	0.24±0.007 ^{Aa}	0.14±0.006 ^{Ba}	0.03±0.002 ^{Cd}
T _{2S}	11.69±0.58 ^{Ac}	8.72±0.21 ^{Bc}	3.10±0.21 ^{Cd}	0.17±0.009 ^{Ab}	0.12±0.003 ^{Bb}	0.07±0.009 ^{Cc}
T _{3M}	17.53±0.35 ^{Aa}	11.28±0.32 ^{Ba}	9.78±0.19 ^{Ca}	0.18±0.002 ^{Ab}	0.14±0.005 ^{Ba}	0.13±0.004 ^{Ba}

处理 Treatment	$T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			$C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$		
	换头期	膨大期	成熟期	换头期	膨大期	成熟期
	Head-changing stage	Corm expansion stage	Maturaty stage	Head-changing stage	Corm expansion stage	Maturaty stage
CK _M	1.10±0.068 ^{Bf}	0.67±0.01 ^{Cd}	1.35±0.017 ^{Ab}	161.64±4.04 ^{Cd}	202.23±5.01 ^{Bd}	289.67±5.15 ^{Aa}
CK _S	1.30±0.064 ^{Ac}	0.51±0.06 ^{Be}	1.26±0.029 ^{Ab}	170.98±10.15 ^{Bd}	301.46±18.62 ^{Aa}	299.91±2.84 ^{Aa}
T _{1M}	1.91±0.047 ^{Ad}	1.25±0.03 ^{Bb}	0.80±0.027 ^{Cc}	209.69±9.47 ^{Cc}	238.50±6.07 ^{Bc}	273.07±9.05 ^{Aab}
T _{1S}	2.21±0.026 ^{Abc}	1.12±0.03 ^{Bc}	0.77±0.031 ^{Cc}	245.11±5.01 ^{Ab}	204.79±10.03 ^{Bd}	151.99±24.42 ^{Cd}
T _{2M}	2.78±0.043 ^{Aa}	1.47±0.03 ^{Ba}	1.36±0.027 ^{Bb}	294.07±2.26 ^{Aa}	277.19±9.32 ^{ABb}	238.24±13.93 ^{Bc}
T _{2S}	2.17±0.081 ^{Ac}	1.27±0.01 ^{Bb}	0.47±0.08 ^{Cd}	256.34±2.29 ^{Ab}	259.03±5.07 ^{Abc}	286.37±19.01 ^{Aa}
T _{3M}	2.36±0.017 ^{Ab}	1.55±0.04 ^{Ca}	1.64±0.028 ^{Ba}	200.05±4.81 ^{Bc}	241.77±3.66 ^{Ac}	249.24±5.67 ^{Bc}

注：同列数据后不同大写字母表示不同时期差异显著 ($P<0.05$)，同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: The capital letters in the same column indicate significant difference in different stages ($P<0.05$); The lowercase letters in the same column data indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$).

T_r 在各时期均为林中心高于林边缘，而 CK 处理的 C_i 则相反，均为林中心低于林边缘， T_1 和 T_2 处理的 C_i 变化差异不显著。

2.3 不同光生境模式下魔芋叶片叶绿素荧光参数比较

不同光生境模式处理下 3 个时期魔芋叶片的叶绿素荧光参数 (F_v/F_m 、YII、ETR_{max} 和 IK) 变化趋势相类似 (表 4)。同一时期不同处理的荧光参数差异显著，3 个时期各处理的 F_v/F_m 和 YII 均显著高于 CK 处理，而其他处理间差异不显著。3 个时期 T_1 和 T_3 处理的 ETR_{max} 和 IK 显著最高，其次为 T_2 处理，而 CK 处理显著最低。随着生育期的推进， T_1 和 T_3 处理的 F_v/F_m 和 YII 变化趋势相似，且处理间差异显著，其高低顺序处理依次为 $T_3>T_1>T_2>CK$ ；同一处理不同时期的 F_v/F_m 、YII、ETR_{max}、IK 均差异显著，换头期的 F_v/F_m 、YII、ETR_{max}、IK 均显著最高，其次是膨大期，而成熟期显著最低；从各间作模式处理的林中心和林边缘的 F_v/F_m 、YII、ETR_{max} 和 IK 相比较来看，换头期和膨大期各间作模式处理的 F_v/F_m 为林中心低于林边缘，而各处理的 YII、ETR_{max} 和

IK 在林中心和林边缘间无规律变化，且变化幅度不大。

2.4 不同光生境模式下魔芋叶片光合色素参数比较

不同光生境模式处理下 3 个时期魔芋叶片的光合色素参数 (Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Chl a/b) 变化趋势稍不同 (表 5)。同一时期不同处理的各参数差异显著，3 个时期 T_2 和 CK 处理的 Chl a、Chl b、Chl a+b 均高于 T_1 和 T_3 处理，各处理的 Chl a/b 均显著高于 CK 处理，除了 T_{2M} 处理的 Chla/b 显著高于 T_{1S} 外，其他处理间差异不显著。3 个时期各处理的 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 Chl a/b 无规律变化，且其间差异不显著；同一处理不同时期的光合色素参数差异显著，随着生育期的推进，膨大期各处理的 Chl a、Chl b、Chl a+b 呈上升趋势，而成熟期又呈下降趋势。各时期的 Chl a+b 均差异显著，各处理的 Chl a/b 为膨大期显著低于换头期和成熟期，而换头期和膨大期的 Chl a、换头期和成熟期的 Chl b 和 Chl a/b 间均差异不显著；从各间作模式处理的林中心和林边缘的光合色素参数比较来看，3 个时期各处理的 Chl a、

表 4 不同光生境模式下 3 个时期魔芋叶片叶绿素荧光参数比较

Tab. 4 Comparison of chlorophyll fluorescence parameters of *A. muelleri* leaves at three stages under different light conditions

处理 Treatment	F_v/F_m			YII		
	换头期 Head-changing stage	膨大期 Corm expansion stage	成熟期 Maturaty stage	换头期 Head-changing stage	膨大期 Corm expansion stage	成熟期 Maturaty stage
CK _M	0.789±0.002 ^{Ab}	0.779±0.010 ^{Ab}	0.733±0.020 ^{Bb}	0.586±0.010 ^{Ac}	0.522±0.045 ^{ABb}	0.371±0.073 ^{Bb}
CK _S	0.794±0.001 ^{Aab}	0.785±0.003 ^{Aab}	0.747±0.010 ^{Bb}	0.570±0.003 ^{Ac}	0.561±0.023 ^{Ab}	0.342±0.016 ^{Bb}
T _{1M}	0.800±0.003 ^{Aa}	0.791±0.006 ^a ^{Ab}	0.763±0.004 ^{Bab}	0.647±0.015 ^{Aab}	0.647±0.028 ^{Aa}	0.476±0.050 ^{Bab}
T _{1S}	0.802±0.004 ^{Aa}	0.796±0.002 ^{Aab}	0.780±0.011 ^{Aa}	0.645±0.008 ^{Aab}	0.629±0.005 ^{Aa}	0.527±0.058 ^{Ba}
T _{2M}	0.796±0.008 ^{Aab}	0.791±0.004 ^{Aab}	0.761±0.017 ^{Bab}	0.627±0.013 ^{Ab}	0.631±0.011 ^{Aa}	0.595±0.036 ^{Ba}
T _{2S}	0.797±0.001 ^{Aab}	0.794±0.005 ^{Aab}	0.778±0.009 ^{Aa}	0.655±0.006 ^{Aab}	0.652±0.009 ^{Aa}	0.606±0.014 ^{Ba}
T _{3M}	0.789±0.003 ^{ABb}	0.800±0.006 ^{Aa}	0.767±0.014 ^{Bab}	0.670±0.004 ^{Aa}	0.685±0.003 ^{Aa}	0.568±0.037 ^{Ba}
处理 Treatment	ETR _{max} /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			IK/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	换头期 Head-changing stage	膨大期 Corm expansion stage	成熟期 Maturaty stage	换头期 Head-changing stage	膨大期 Corm expansion stage	成熟期 Maturaty stage
CK _M	70.97±2.32 ^{Ad}	59.80±7.68 ^{ABd}	38.40±10.23 ^{Bc}	176.30±6.91 ^{Ad}	142.93±20.47 ^{ABc}	88.47±24.62 ^{Bb}
CK _S	80.20±1.78 ^{Ad}	66.60±4.47 ^{Bcd}	35.00±2.15 ^{Cc}	212.03±5.67 ^{Ad}	159.10±15.88 ^{Bc}	84.97±5.46 ^{Cb}
T _{1M}	115.00±4.48 ^{ABb}	128.67±16.18 ^{Aa}	103.20±11.51 ^{Ba}	333.57±21.83 ^{ABb}	365.17±49.52 ^{Aa}	300.50±36.98 ^{Ba}
T _{1S}	132.10±6.85 ^{Aa}	100.67±5.58 ^{Babc}	101.23±4.06 ^{Bab}	397.43±31.54 ^{Aa}	270.90±16.82 ^{Bab}	306.33±17.22 ^{Ba}
T _{2M}	94.73±1.43 ^{Ac}	94.43±11.05 ^{ABc}	49.07±9.35 ^{Bc}	245.93±9.65 ^{Ac}	247.60±40.25 ^{ABc}	135.36±25.70 ^{Bb}
T _{2S}	94.27±3.32 ^{Ac}	90.17±3.58 ^{ABcd}	61.97±9.04 ^{Bc}	242.40±16.22 ^{Ac}	226.63±12.68 ^{ABbc}	154.42±19.11 ^{Bb}
T _{3M}	111.43±4.41 ^{Ab}	117.07±16.08 ^{Aab}	68.20±10.06 ^{Bbc}	300.87±15.31 ^{ABb}	316.67±50.341 ^{Aab}	184.57±25.79 ^{Bb}

注：同列数据后不同大写字母表示不同时期间差异显著（ $P<0.05$ ），同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: The capital letters in the same column indicate significant difference in different stages ($P<0.05$); The lowercase letters in the same column data indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$).

表 5 不同光同光生境模式处理下 3 个时期魔芋叶片光合色素参数比较

Tab. 5 Comparison of photosynthetic pigment parameters of *A. muelleri* leaves at three stages under different light conditions

处理 Treatment	Chl a/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)			Chl b/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)		
	换头期 Head-changing stage	膨大期 Corm expansion stage	成熟期 Maturaty stage	换头期 Head-changing stage	膨大期 Corm expansion stage	成熟期 Maturaty stage
CK _M	1.20±0.07 ^{Ab}	1.28±0.03 ^{Aa}	1.09±0.14 ^{Aa}	0.56±0.03 ^{Ba}	1.03±0.11 ^{Aa}	0.48±0.08 ^{Ba}
CK _S	1.24±0.05 ^{Ab}	1.27±0.02 ^{Aa}	1.20±0.05 ^{Aa}	0.59±0.05 ^{Ba}	0.97±0.06 ^{Aab}	0.54±0.04 ^{Ba}
T _{1M}	1.13±0.11 ^{Ab}	1.12±0.12 ^{Ab}	0.99±0.06 ^{Aa}	0.46±0.07 ^{Aab}	0.55±0.12 ^{Ad}	0.40±0.03 ^{Aa}
T _{1S}	1.21±0.04b ^{AB}	1.26±0.02 ^{Aab}	0.96±0.12 ^{Ba}	0.49±0.03 ^{Bab}	0.79±0.04 ^{ABc}	0.40±0.05 ^{Ba}
T _{2M}	1.64±0.06 ^{Aa}	1.28±0.03 ^{Ba}	1.14±0.03 ^{Ca}	0.50±0.04 ^{Bab}	0.88±0.03 ^{Aabc}	0.48±0.03 ^{Ba}
T _{2S}	1.17±0.07 ^{ABb}	1.24±0.02 ^{Aab}	1.02±0.06 ^{Ba}	0.49±0.05 ^{Aab}	0.69±0.06 ^{Ac} ^d	0.42±0.02 ^{Aa}
T _{3M}	1.08±0.05 ^{ABb}	1.25±0.03 ^{Aab}	0.99±0.08 ^{Ba}	0.41±0.03 ^{Bb}	0.72±0.04 ^{Ac} ^d	0.40±0.04 ^{Ba}
处理 Treatment	Chl a+b/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)			Chl a/b		
	换头期 Head-changing stage	膨大期 Corm expansion stage	成熟期 Maturaty stage	换头期 Head-changing stage	膨大期 Corm expansion stage	成熟期 Maturaty stage
CK _M	1.76±0.09 ^{Bb}	2.31±0.12 ^{Aa}	1.57±0.23 ^{Ba}	2.15±0.06 ^{Ac}	1.27±0.14 ^{Bd}	2.32±0.13 ^{Aab}
CK _S	1.83±0.10 ^{Bab}	2.23±0.07 ^{Aab}	1.74±0.09 ^{Ba}	2.11±0.09 ^{Ac}	1.32±0.07 ^{Bcd}	2.21±0.07 ^{Ab}
T _{1M}	1.59±0.18 ^{ABb}	1.67±0.22 ^{Ac}	1.40±0.07 ^{Ba}	2.48±0.13 ^{ABc}	2.12±0.26 ^{Ba}	2.46±0.03 ^{Aa}
T _{1S}	1.70±0.06 ^{ABb}	2.05±0.04 ^{Aab}	1.36±0.17 ^{Ba}	2.47±0.06 ^{ABc}	1.61±0.09 ^{Bbcd}	2.43±0.05 ^{Aa}
T _{2M}	2.14±0.08 ^{Aa}	2.16±0.06 ^{Aab}	1.62±0.05 ^{Ba}	3.32±0.26 ^{Aa}	1.46±0.05 ^{Cbcd}	2.38±0.04 ^{Bab}
T _{2S}	1.67±0.06 ^{ABb}	1.93±0.05 ^{ABc}	1.44±0.09 ^{Ba}	2.40±0.12 ^{ABc}	1.83±0.16 ^{Bab}	2.44±0.05 ^{Aa}
T _{3M}	1.49±0.08 ^{Bb}	1.97±0.06 ^{Aabc}	1.39±0.12 ^{Ba}	2.67±15.31 ^{Ab}	1.75±0.09 ^{Babc}	2.48±0.06 ^{Aa}

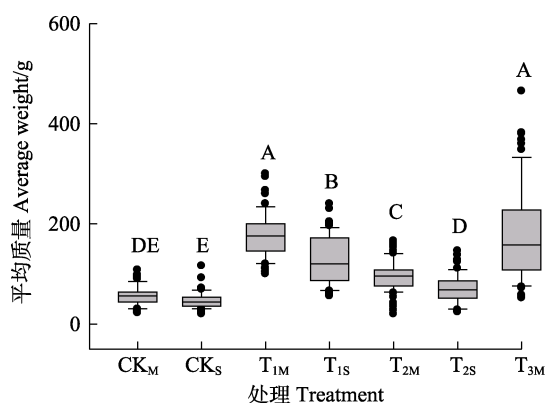
注：同列数据后不同大写字母表示不同时期间差异显著（ $P<0.05$ ），同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: The capital letters in the same column indicate significant difference in different stages ($P<0.05$); The lowercase letters in the same column data indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$).

Chl b、Chl a+b 和 Chl a/b 在林中心和林边缘无规律变化,且其间差异不显著。

2.5 不同光生境模式下魔芋球茎产量比较

不同光生境模式下魔芋球茎产量比较结果见图1。各处理的球茎平均质量均显著高于CK_M和CK_S(82 g和69 g),T_{3M}、T_{1M}处理的球茎平均质量(260 g和255 g)均显著最高,其次是T_{1S}和T_{2M}处理的球茎平均质量(194 g和142 g),而T_{2S}处理的球茎平均质量(103 g)显著最低。各间作模式处理的林中心和林边缘的球茎平均质量比较,除T_{3M}处理的球茎平均质量最高外,各处理林中心的球茎平均质量均高于林边缘。经各间作模式处理的球茎平均质量与对照相比,T_{1M}、T_{1S}处理的增产效果最明显,比对照分别提高200%和140%以上,其次为T_{2M}和T_{2S}处理,比对照分别提高70%和25%,各生境处理下球茎平均质量高低顺序依次为T_{3M}>T_{1M}>T_{1S}>T_{2M}>T_{2S}>CK_M>CK_S。



不同大写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图1 不同光生境模式下魔芋地下球茎产量比较
Fig. 1 Comparison of yield of underground corm of *A. muelleri* under different light conditions

3 讨论

3.1 不同光生境模式下光照强度和光合有效辐射日变化

因受太阳照射角度与树冠透光程度的不同,往往引起不同生境模式(林中心和林边缘)区域内的日变化光照强度和光合有效辐射表现明显差异^[22]。本研究发现,随着时间的推移,不同光生境模式下光照强度和光合有效辐射均逐渐上升,至12:00—14:00为全天最高值,约为8:00—10:00的2倍以上,在下午14:00—16:00又逐渐下降,呈现出明显的全天单峰曲线。各

处理在全天不同时间段下光照强度和光合有效辐射也发生明显变化,如T₂处理在8:00—10:00和16:00—18:00时间段均显著最高,而T₃处理在12:00—14:00、14:00—16:00时间段均最高,其次是T₁处理明显高于CK处理,说明间作系统中冠层的光拦截程度不同,改变了入射光质量或光合有效辐射,使作物平面受光时间状态不同,从而导致各处理的光照强度和光合有效辐射也发生相应变化。这与张雯等^[23]和田阳等^[24]研究结果中的间作区域光照强弱不仅与上层树冠截光密切相关,而且树形结构对间作区域光环境也有不同影响的结论相同。T₂处理在早上和下午均高,而在中午12:00—16:00时间段低于T₃处理,说明间作区域内光照强度和光合有效辐射随太阳在天空中的位置出现动态位移现象,使强光生境区域内存在明显的时空异质性。而T₃处理是搭建固定遮荫网使其透光率较均匀,进而使光照高峰期时段较其他间作生境模式内光照强度相比有所升高,而在其他时间段与T₁处理的光照强度相近,表明T₁处理的光环境可达到遮荫网下相近的光环境效果,较适宜魔芋生长的光环境。这与王兴祥等^[25]的研究结果中间作系统中作物产量的高低,不仅与种植距离有关,而且与采取修剪措施后提高了光合有效辐射强度,进而使间作物产量得到提高的结论相类同。可见,同一时间点,魔芋距间作物的不同距离点,使区域内的光照强度和光合有效辐射变化幅度不同,且与环境参数等因素共同决定作物的生长发育。

3.2 不同光生境模式下魔芋叶片光合参数

光合作用的过程较为复杂,既受到植物自身结构的调节,也受到外界环境因素的影响^[26-27]。本研究中,不同光生境模式下魔芋换头期和膨大期叶片的光合参数差异显著,T₃处理魔芋叶片的光合参数表现最高,其次是T₁处理,然后是T₂处理,而CK处理均最低。因T₁处理是通过采取修剪措施后使橡胶林内光照强度升高,光合有效辐射也相应增强,与T₃处理相比,尽管光照分布也不均匀,但为最接近魔芋叶片光合作用的适宜光生境,这与云雷等^[28]的研究结果相同。黄坚雄等^[17]的研究结果显示,宽行密株模式的橡胶林内光照强度条件远优于常规模式的橡胶林,且明显增加了胶乳产量。可见,适当修剪措施有助于改善橡胶树林下光照和光质,明显提高了间作系统内作物的光捕获和利用效率。对于T₂处理和CK

处理的光合参数均低,表明不管是强光或弱光生境均不利于魔芋叶片的光合作用,通常间作区域内光照强度变化动态受太阳运行轨迹和树冠遮荫度的共同影响^[29]。因受太阳照射角度与树冠透光程度的影响,使 T_{2M} 和 T_{2S} 处理区域内魔芋受光照强度及光照持续时间不同,进而引起魔芋叶片的光合参数也呈不稳定状态。随着生育期的推进,成熟期魔芋叶片生长减慢,其光合速率也随之降低,但 CK 处理叶片的光合参数均高于其他处理,表明高遮荫度延缓了魔芋叶片的衰老速度,加之遮荫会引起土壤水分蒸腾速率降低,使魔芋叶片能量获取速度减慢,进而延长了弱光环境下的捕光能力,并提高光能利用率以应对弱光环境^[30-31]。可见,魔芋可在光环境幅度较大的范围中正常生长,但因光生境差异引起了光合速率的不同,进而使光合产物积累也明显不同。经比较,适度遮荫(50%~70%)促进魔芋的光合作用。对各间作魔芋模式光生境内林中心和林边缘光合参数相比较,魔芋叶片因受光空间和时间的不同而不同,使魔芋叶片的光合参数也相应发生变化。总体来看,离树体越近,光照强度和光合速率呈下降趋势。与郭佳欢等^[32]研究的两行枣树间作冬小麦的种植模式,其间作巷道内冠层光合有效辐射截获量及产量均显著高于两侧,使遮荫区域冬小麦的光合物质受到明显抑制的结论相类似。

3.3 不同光生境模式下魔芋叶片叶绿素荧光和光合色素参数

光合作用机理的生理状况变化可由叶绿素荧光参数反映。而光合色素又是绿色植物光合作用的基础,其含量的高低直接反映了叶片对光能的吸收和利用速率状况^[33-35]。本研究中,各间作模式魔芋叶片的 F_v/F_m 、YII、ETR_{max}、IK 均高于 CK 处理,而 T_1 和 T_3 处理高于 T_2 处理。可见,随着遮荫度增加,魔芋叶片的 PSII 反应中心光合电子传递速率呈下降趋势,这进一步证明了适度遮光更利于魔芋叶片的光合作用^[36],与魔芋的球茎产量密切相关。各光生境模式的叶绿素含量参数(Chl a、Chl b 和 Chl a+b 和 Chl a/b)变化差异不显著, T_2 和 CK 处理的 Chl a、Chl b 和 Chl a+b 均显著高于 T_1 和 T_3 ,这证明了遮荫增加可促进叶绿素合成,植物在弱光环境中会诱导产生更多的叶绿素,而在强光环境中会加剧叶绿素分解的结论。如巨菌草间作魔芋区域内的受光截获量或辐

射利用效率不均匀或较低,使魔芋叶片光合色素也发生了不规律变化。这与多个研究结果^[37-38]相似,种植距离或冠层光照分布等交互作用原因使弱光环境下作物叶片的叶绿素含量显著高于自然光照下的单作模式。可见,作物叶片的叶绿素含量高低比例变化是为调整对光能的吸收和利用,以能维持叶片正常光合作用所需的能量。本研究中,魔芋不同时期的光合作用及光合色素对环境的光照时间长短、光强强弱、光照方向的变化也表现出适应性的反应,但光照过强或过弱都对魔芋造成或多或少的不利影响,而适量的光照可以明显促进魔芋叶片叶绿素的合成,提高光合速率和实际光化学效率。

3.4 不同光生境模式下地下球茎产量

通常农林间作模式中光能的竞争是导致作物产量下降的主要原因之一^[39],因此,作物产量的高低取决于光能截获量和光能利用率^[40]。本研究中, T_3 处理和 T_1 处理的地下球茎产量均高于 T_2 处理和 CK 处理 3 倍以上,说明适度遮荫明显促进了魔芋光合产物的积累,提高了球茎产量。而 T_2 和 CK 处理的地下球茎产量均低,这可能是因为在实际生产中这 2 种模式下的光照强度分布过强或过弱所致明显影响产量的积累。另一方面因巨菌草为喜阳的禾本科作物,其生长旺盛,存在与魔芋争肥争水的因素。本研究中 T_3 处理的地下球茎产量虽然最高,但需人工搭建遮荫网,不仅费工费力,使生产成本投入较高。虽然 T_1 处理也存在费工费力问题,但若生产中大规模种植可统一采取机械化操作,可节约大量成本。因此,在生产中宽行密植的橡胶林下实施间作魔芋模式,推荐采取合理的修剪措施及保持树体种植距离,以减少光能竞争,提高间作物的产量,进而增加复合系统的产值。因农林间作系统中光能的竞争是影响作物产量高低的关键因素,提高林内的光合有效辐射是提高林下作物产量的关键,光线经过透射、吸收、反射通过叶幕层,到达冠层底部后辐射强度发生不可逆转的降低^[23]。但极端光环境或持续时间长短均明显影响魔芋的光合能力,进而导致产量降低。如 CK 处理的魔芋植株也正常生长,但因遮荫郁闭过高且持续时间长,导致魔芋的光合有效辐射和产量显著下降。这与多个研究结果^[41-42]中弱光导致作物籽粒干物质积累降低,粒重和产量均受到较大影响的结果相似。进

一步验证了林下作物光合速率的高低决定着光合产物积累的多少的结论^[43-44]。通过比较各间作模式处理的实施效果,各处理对魔芋叶片光合特性及产量的提高均有促进效应,而 T₁ 处理最明显,达到了人工搭建遮荫网下单作相近的效果。因此,针对橡胶林或巨菌草行间种植魔芋,需要对橡胶树树冠采取修剪措施或其他措施得以改善光照条件。同时,巨菌草行间间作模式需要增加施肥量及合理配置作物种植距离和方向,才能有效缓解日光直射对魔芋植株的灼伤,并有效促进魔芋生长和提高光合效率,进而提高作物产量和土地利用效率。

参考文献

- [1] 刘佩瑛. 魔芋学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
LIU P Y. Konjacology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 张盛林, 刘佩瑛. 中国魔芋资源和开发利用方案[J]. 西南大学学报自然科学版, 1999(3): 215-219.
ZHANG S L, LIU P Y. Resources of chinese germplasm of amorphophallus and utilization[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1999(3): 215-219. (in Chinese)
- [3] 黄坚雄, 潘剑, 周立军, 陈俊明, 李娟, 郑定华, 袁淑娜, 林位夫. 全周期间作模式胶园中间作大豆和玉米的生产力及其抗逆生理特性[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 57-65.
HUAN J X, PAN J, ZHOU L J, CHEN J M, LI J, ZHENG D H, YUAN S N, LIN W F. Productivity and physiology of stress tolerance of soybean and maize inter-cropping in rubber plantation with paired row planting system[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(5): 57-65. (in Chinese)
- [4] 李珍, 谢世清, 徐文果, 岩所, 李建, 吴诗斌, 陈军文. 套种于不同树龄橡胶林下谢君魔芋(*Amorphophallus xiei*)的光合特性研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 241-246.
LI Z, XIE S Q, XU W G, YAN S, LI J, WU S B, CHEN J W. Photosynthetic characteristics of *Amorphophallus xiei* inter-cropped to rubber plantation with different ages[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(2): 241-246. (in Chinese)
- [5] 孟畅, 赵杨, 杨菊, 王秀荣, 刘堡森, 张幸福. 光质对皂荚幼苗生长发育、光合特性及相关生理指标的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(10): 1961-1972.
MENG C, ZHAO Y, YANG J, WANG X R, LIU B S, ZHANG X F. Effects of light quality on growth and chlorophyll fluorescence parameters of *Gleditsia sinensis* seedlings[J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(10): 1961-1972. (in Chinese)
- [6] 黄高宝. 集约栽培条件下间套作的光能利用理论发展及其应用[J]. 作物学报, 1999, 25(1): 16-24.
HUANG G B. Development of light utilization theory for wheat/corn intercropping in condition of intensive cultivation[J]. Acta Agronomica Sinica, 1999, 25(1): 16-24. (in Chinese)
- [7] 崔亮, 苏本营, 杨峰, 杨文钰. 不同玉米-大豆带状套作组合条件下光合有效辐射强度分布特征对大豆光合特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1489-1501.
CUI L, SU B Y, YANG F, YANG W Y. Effects of photo-synthetically active radiation on photosynthetic characteristics and yield of soybean in different maize/soybean relay strip intercropping systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8): 1489-1501. (in Chinese)
- [8] 彭晓邦, 张硕新. 商洛低山丘陵区农林复合生态系统光能竞争与生产力[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2691-2698.
PENG X B, ZHANG S X. Competition for light and crop productivity in an agro-forestry system in the hilly region, shangluo, china[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2692-2698. (in Chinese)
- [9] 梁艳丽, 李建, 岩对, 吴诗斌, 罗成进, 岩罕龙, 谢庆华, 谢世清, 赵庆云. 橡胶树与魔芋间作对魔芋净光合速率及产量的影响[J]. 长江蔬菜, 2010, (24): 35-38.
LIANG Y L, LI J, YAN D, WU S B, LUO C J, YAN H L, XIE Q H, XIE S Q, ZHAO Q Y. Effects of konjac inter-cropped in rubber plantation on net photosynthetic rate and yield[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2010, (24): 35-38. (in Chinese)
- [10] 李娟, 涂寒奇, 王秀全. 不同橡胶园类型间作珠芽魔芋的种植密度[J]. 热带生物学报, 2022, 13(1): 81-87.
LI J, TU H Q, WANG X Q. Planting density of *Amorphophallus bulbifer* intercropped in different planting systems of rubber plantations[J]. Journal of Tropical Biology, 2022, 13(1): 81-87. (in Chinese)
- [11] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 申孝军. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1248-1254.
GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, SHEN X J. Light environment characteristics in maize-soybean strips in tercropping system[J]. Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1248-1254. (in Chinese)
- [12] 冯晓敏, 杨永, 任长忠, 胡跃高, 曾昭海. 豆科-燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1426-1434.
FENG X M, YANG Y, REN C Z, HU Y G, ZENG Z H. Effects of legumes intercropping with oat on photosynthesis

- characteristics of and grain yield[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(9): 1426-1434. (in Chinese)
- [13] 李娟, 蒋晓云, 潘剑, 王秀全. 不同生境下珠芽魔芋叶形态指标、单株产量变化特征及其相关性分析[J]. *中国热带农业*, 2021(1): 86-89, 9.
LI J, JIANG X Y, PAN J, WANG X Q. Leaf morphological indexes, yield variation characteristics per of plant and correlation analysis of *Amorphophallus Bulbifer* in different habitats[J]. *China Tropical Agriculture*, 2021(1): 86-89, 9. (in Chinese)
- [14] 许战斌, 董红梅, 罕丽丽, 白小丽, 陈云发. 胶园林下种植珠芽魔芋[J]. *中国热带农业*, 2017, 76(3): 48-50.
XU Z B, DONG H M, HAN L L, BAI X L, CHEN Y F. *Amorphophallus bulbifer* under the under the rubber plantation[J]. *China Tropical Agriculture*, 2017, 76(3): 48-50. (in Chinese)
- [15] 张东华, 汪庆平. 珠芽魔芋热区(橡胶)林下套种模式展望[J]. *热带农业工程*, 2016, 40(3): 21-27.
ZHANG D H, WANG Q P. Perspective estimation of *Amorphophallus bulbifer* plantation under rubber trees in tropical areas[J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2016, 40(3): 21-27. (in Chinese)
- [16] 黄坚雄, 潘剑, 周立军, 袁淑娜, 林位夫. 光照亏缺对橡胶-作物农林复合系统中作物生产力的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(5): 680-689.
HUANG J X, PAN J, ZHOU L J, YUAN S N, LIN W F. Effect of light deficiency on productivity of intercrops in rubber-crop agroforestry system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(5): 680-689 (in Chinese)
- [17] 孙尚伟, 夏新莉, 刘晓东, 尹伟伦, 陈森锐. 修枝对复合农林系统内作物光合特性及生长的影响[J]. *生态学报*, 2008(7): 3185-3192.
SUN S W, XIA X L, LIU X D, YIN W L, CHEN S K. Effect of different pruning intensity on photosynthetic characters, growth yield of crops in agroforestry[J]. *Acta Ecologica sinica*, 2008(7): 3185-3192. (in Chinese)
- [18] 徐立军, 傅大平, 郑连阁, 温克勤. 修枝对杨粮间作系统中光照及作物产量和生物量的影响[J]. *河北林果研究*, 2002, 17(1): 1-6.
XU L J, FU D P, ZHENG L G, WEN K Q. Effect of pruning on light density, yield and biomass of crops in poplar-crop intercropping system[J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2002, 17(1): 1-6. (in Chinese)
- [19] 岩所, 段雪甜, 谢明, 杨玲聪, 徐文果. 玉米播期和密度对间作魔芋农艺性状及产量的影响[J]. *热带生物学报*, 2020, 11(3): 324-330.
YAN S, DUAN X T, XIE M, YANG L C, XU W G. Effects of maize sowing date and planting density on agronomic traits and yields of konjac intercropped with maize[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2020, 11(3): 324-330. (in Chinese)
- [20] 原慧芳, 岩香甩, 李金威, 田耀华. 地膜覆盖对胶园间种珠芽黄魔芋光合生理特性及产量的影响[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(1): 134-143.
YUAN H F, YAN X S, LI J W, TIAN Y H. Effects of plastic film mulching treatments on photosynthetic characteristics and yield of *Amorphophallus muelleri* intercropped in rubber plantations[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(1): 134-143. (in Chinese)
- [21] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
GAO J F. Experimental guidance on plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [22] 杜听, 董雪, 谷会岩, 陈祥伟. 阔叶红松林下幼苗、幼树定植生境散射辐射特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(6): 145-156.
DU X, DONG X, GU H Y, CHEN X W. Characteristics of scattered radiation in the understory environment for planting seedlings and saplings in broad-leaved red pine forests[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2024, 48(6): 145-156. (in Chinese)
- [23] 张雯, 谢辉, 张平, 钟海霞, 张付春, 庄红梅, 杨磊, 徐叶挺, 龚鹏, 卢春生. 扁桃||冬小麦间作模式下树冠结构对间作区域光环境的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(6): 753-761.
ZHANG W, XIE H, ZHANG P, ZHONG H X, ZHANG F C, ZHUANG H M, YANG L, XU Y T, GONG P, LU C S. Effect of tree canopy structure on light condition in almond-winter wheat inter-cropping systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(6): 753-761. (in Chinese)
- [24] 田阳, 云雷, 毕华兴, 王莉莉, 陈金焕, 高路博, 王宝宝, 杨佳奇. 晋西黄土区果农间作光竞争研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 288-292.
TIAN Y, YUN L, BI H X, WANG L L, CHEN J H, GAO L B, WANG B B, YANG J Q. Research on light competition of fruit-crop intercropping system in the loess region of western shanxi province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(4): 288-292. (in Chinese)
- [25] 王兴祥, 张斌, 王明珠, 张桃林, 何圆球. 低丘红壤复合农林系统光能竞争与生产力: 以花生南酸枣间作为例[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(4): 1-5.
WANG X X, ZHANG B, WANG M Z, ZHANG T L, HE Y Q. Competition for light and crop productivity in agro-forestry systems in hilly red soil region: a case study of cherospondias axillaris intercropping with arachis hypogaea[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(4): 1-5. (in Chinese)

- [26] 任毛飞, 毛桂玲, 刘善振, 王慰亲, 郑华斌, 唐启源. 光质对植物生长发育、光合作用和碳氮代谢的影响研究进展[J]. 植物生理学报, 2023, 59(7): 1211-1228.
REN M F, MAO G L, LIU S Z, WANG W Q, ZHENG H B, TANG Q Y. Research progress on the effects of light quality on plant growth and development, photosynthesis, and carbon and nitrogen metabolism[J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(7): 1211-1228. (in Chinese)
- [27] 彭祥燕, 马慧慧, 何雨婷, 刘燃, 梁红艳, 朱永兴, 朱学栋, 刘奕清. 生姜||柑橘间作对盛夏生姜生长及光合特性与产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(4): 675-686.
PENG X Y, MA H H, HE Y T, LIU R, LIANG H Y, ZHU Y X, ZHU X D, LIU Y Q. Effects of ginger-citrus intercropping on ginger growth, photosynthesis traits and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 675-686. (in Chinese)
- [28] 云雷, 毕华兴, 田晓玲, 崔哲伟, 周晖子, 高路博, 刘李霞. 晋西黄土区果农间作的种间主要竞争关系及土地生产力[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1225-1232.
YUN L, BI H X, TIAN X L, CUI Z W, ZHOU H Z, GAO L B, LIU L X. Main interspecific competition and land productivity of fruit-crop intercropping in Loess Region of West Shanxi[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1225-1232. (in Chinese)
- [29] 李猛, 段文标, 陈立新. 红松阔叶混交林林隙光量子通量密度的时空分布格局[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 880-884.
LI M, DUAN W B, CHEN L X. Spatiotemporal distribution pattern of photosynthetic photon flux density in forest gaps of Korean pine broadleaved mixed forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 880-884. (in Chinese)
- [30] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 李正中, 付小军. 作物间套作群体光能截获和利用机理研究进展[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1057-1066.
WANG Z K, WU P T, ZHAO X N, LI Z Z, FU X J. A Review of light interception and utilization by intercropped canopies[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 1057-1066. (in Chinese)
- [31] 程彬, 刘卫国, 王莉, 许梅, 覃思思, 卢俊吉, 高阳, 李淑贤, RAZA A, 张熠, AHMAD I, 敬树忠, 刘然金, 杨文钰. 种植密度对玉米-大豆带状间作大豆光合、产量及茎秆抗倒的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(19): 4084-4096.
CHENG B, LIU W G, WANG L, XU M, QIN S S, LU J J, GAO Y, LI S X, RAZA A, ZHANG Y, AHMAD I, JING S Z, LIU R J, YANG W Y. Effects of planting density on photosynthetic characteristics, yield and stem lodging resistance of soybean in maize-soybean strip intercropping system[J]. Chinese Agricultural Science, 2021, 54(19): 4084-4096. (in Chinese)
- [32] 郭佳欢, 潘存德, 冯会丽, 王世伟, 李星. 枣麦间作系统中冬小麦的冠层光分布特征及产量研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 183-191.
GUO J H, PAN C D, FENG H L, WANG S W, LI X. Canopy light distribution and yield of winter wheat in jujube-wheat strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(2): 183-191. (in Chinese)
- [33] 范虹, 殷文, 柴强. 间作优势的光合生理机制及其冠层微环境特征[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(11): 1750-1761.
FAN H, YIN W, CHAI Q. Research progress on photo-physiological mechanisms and characteristics of canopy microenvironment in the formation of intercropping advantages[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(11): 1750-1761. (in Chinese)
- [34] 李红, 闻高娜, 杨永红, 王世伟, 李星. 光质对臭参幼苗生长及光合特性的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(5): 1101-1107.
LI H, WEN G N, YANG Y H, WANG S W, LI X. Effect of light quality on the growth and photosynthetic characteristics of *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf. Var. *volubilis* (Nannf.) seedlings[J]. Southwest Agricultural Journal, 2022, 35(5): 1101-1107. (in Chinese)
- [35] 付忠, 谢世清, 徐文果, 岩所, 陈军文. 3种光强环境下白魔芋生长旺盛期的光合和叶绿素a荧光特征[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(3): 446-454.
FU Z, XIE S Q, XU W G, YAN S, CHEN J W. Characteristics of photosynthesis and chlorophyll a fluorescence in *Amorphophallus albus* during vigorous growth under different light intensity[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(3): 446-454. (in Chinese)
- [36] 李理渊, 李俊, 同小娟, 孟平, 张劲松, 张静茹. 不同光环境下栓皮栎和刺槐叶片光合光响应模拟[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2295-2306.
LI L Y, LI J, TONG X J, MENG P, ZHANG J S, ZHANG J R. Simulation of photosynthetic light-response of leaves of *Quercus variabilis* and *Robinia pseudoacacia* under different light conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2295-2306. (in Chinese)
- [37] 任梦露, 刘卫国, 刘小明, 方萍, 杨文钰. 荫蔽信号对大豆幼苗生长和光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 499-505.
REN M L, LIU W G, LIU X M, FANG P, YANG W Y. Effect of shading signal on the growth and photosynthetic characteristics of soybean seedlings[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2016, 24(4): 499-505. (in Chinese)
- [38] 雷雲翔, 陆思豪, 应晓成, 沈新平, 蒋敏. 不同间作方式对玉米/大豆的光合性能、产量和土壤微生态特征的影响

- 响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 610-618.
- LEI Y X, LU S H, YING X C, SHEN X P, JIANG M. Effects of different intercropping methods on photosynthetic performance, yield, and soil microecological characteristics of maize and soybean[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(3): 610-618. (in Chinese)
- [39] 董明, 张谦, 王燕, 王树林, 冯国艺, 梁青龙, 祁虹, 赵贵元. 棉-粮-油菜宽带轮作提升作物产量和光能利用率[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(7): 1159-1169.
- DONG M, ZHANG Q, WANG Y, WANG S L, FENG G Y, LIANG Q L, QI H, ZHAO G Y. Broadband crop rotation of cotton-grain-rape improved crop yield and light utilization efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(7): 1159-1169. (in Chinese)
- [40] 周也莹, 谢子文, 钟培阁, 李双伟, 马韞韬. 基于功能-结构模型的玉米大豆间作不同行向辐射分布研究[J]. 中国农业科学, 2024, 57(10): 1882-1899.
- ZHOU Y Y, XIE Z W, ZHONG P G, LI S W, MA Y T. Quantification of row orientation effects on radiation distribution in Maize-Soybean intercropping based on functional-structural plant model[J]. Chinese Agricultural Science, 2024, 57(10): 1882-1899. (in Chinese)
- [41] 彭方丽, 汪灿, 周棱波, 高杰, 张国兵, 赵强, 陈思宇, 邵明波. 糯高粱间作大豆不同带宽配置对糯高粱光合特性、干物质和养分积累及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2023, 54(7): 1966-1976.
- PENG F L, WANG C, ZHOU L B, GAO J, ZHANG G B, ZHAO Q, CHEN S Y, SHAO M B. Effects of different width configurations on photosynthetic characteristics, dry matter and nutrients accumulation, and yield of waxy sorghum in waxy sorghum-soybean intercropping system[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(7): 1966-1976. (in Chinese)
- [42] 李南林, 牛义, 蒋学宽, 刘海利, 张盛林. 不同光质对白魔芋生长及产量的影响[J]. 长江蔬菜, 2015, 2: 32-35.
- LI N L, NIU Y, JIANG X K, LIU H L, ZHANG S L. Effects of different light qualities on growth and yield of *Amorphophallus albus*[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2015, 2: 32-35. (in Chinese)
- [43] 王甜, 庞婷, 杜青, 陈平, 张晓娜, 周颖, 汪锦, 杨文钰, 雍太文. 田间配置对间作大豆光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 107-116.
- WANG T, PANG T, DU Q, CHEN P, ZHANG X N, ZHOU Y, WANG J, YANG W Y, YONG T W. Effects of different field collocation patterns on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and yield in intercropping soybean[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(2): 107-116. (in Chinese)
- [44] 劳承英, 黄渝岚, 李艳英, 周佳, 周灵芝, 韦本辉, 李素平, 申章佑. 木薯/大豆间作行距对作物产量和效益的影响[J]. 南方农业学报, 2023, 54(7): 2005-2014.
- LAO C Y, HUANG Y L, LI Y Y, ZHOU J, ZHOU L Z, WEI B H, LI S P, SHEN Z Y. Effects of intercropping row spaces between cassava and soybean on crop yields and economic profit[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(7): 2005-2014. (in Chinese)