

张小红, 鄢 铮, 魏广彪. 不同弱光耐受性甘薯在弱光下的光合和荧光特性分析[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(10): 1787-1793.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.10.002

不同弱光耐受性甘薯在弱光下的光合和荧光特性分析

张小红, 鄢 铮, 魏广彪

(福州市农业科学研究所, 福建 福州 350018)

摘要: 本研究以耐弱光品种榕薯 109 和不耐弱光品种榕薯 756 为材料, 采用自然光照(CK)和遮光 50% 处理, 遮光 60 d 后测定甘薯叶片的光合作用和叶绿素荧光特性相关指标。结果表明, 遮光 50% 处理的 2 个甘薯品种净光合速率(P_n)、最大净光合速率(P_{max})、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)均显著低于对照($P < 0.05$)。自然光照和遮光 50% 处理榕薯 109 的 P_n 、 P_{max} 、 LSP 均高于榕薯 756, LCP 、暗呼吸速率(R_d)低于榕薯 756。自然光照和遮光 50% 处理 2 个甘薯品种对 CO_2 响应情况不同, 榕薯 109 的最大羧化速率(V_{cmax})、最大电子传递速率(J_{max})均高于榕薯 756, CO_2 补偿点(CCP)低于榕薯 756。光合诱导过程中, 2 个甘薯品种对高光诱导的响应存在差异, 榕薯 109 反应速度较快。遮光 50% 处理 2 个甘薯品种非光化学淬灭系数(NPQ)均显著高于对照($P < 0.05$), 暗适应下最大光化学量子效率(F_v/F_m)、光适应下 PS II 最大光化学量子效率(F'_v/F'_m)、表观电子传递速率(ETR)显著低于对照($P < 0.05$)。自然光照和遮光 50% 处理榕薯 109 的 F'_v/F'_m 、 $\Delta F/F'_m$ 、 ETR 、 NPQ 均不低于榕薯 756。遮光 50% 处理 2 个甘薯品种的 PS II 实际光化学效率(ϕ_{PSII})均显著低于对照, 非光化学淬灭耗散比例(ϕ_{NPQ})、荧光耗散比例(ϕ_{fd})显著高于对照。遮光 50% 处理榕薯 109 产量下降幅度低于榕薯 756。综上所述, 耐弱光品种榕薯 109 对弱光适应性更强, 在弱光胁迫下能维持较高水平的净光合速率、光诱导反应速度和非光化学热耗散能力, 产量下降幅度较小。

关键词: 甘薯; 弱光耐受性; 遮光处理; 光合特性; 叶绿素荧光; 产量

中图分类号: S531 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)10-1787-07

Photosynthetic and fluorescence characteristics of sweet potatoes with different low light tolerance under low light

ZHANG Xiaohong, YAN Zheng, WEI Guangbiao

(Fuzhou Institute of Agricultural Sciences, Fuzhou 350018, China)

Abstract: In this study, low-light tolerant variety Rongshu 109 and low-light sensitive variety Rongshu 756 were used as materials. The photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of sweet potato leaves were measured after treatments of natural sunlight (CK) and 50% shading for 60 days. The results showed that the net photosynthetic rate (P_n), the maximum net photosynthetic rate (P_{max}), the light saturation point (LSP) and the light compensation point (LCP) of the two sweet potato varieties treated with 50% shading were significantly lower than those of the control ($P < 0.05$). The P_n , P_{max} and LSP of Rongshu 109 were higher than those of Rongshu 756 under nature light and 50% shading treatments, while LCP and R_d were lower than those of Rongshu 756. Two sweet potato varieties showed different responses to CO_2 under natural light and 50% shading treatments, the maximum carboxylation rate (V_{cmax}) and maximum electron

transfer rate (J_{max}) of Rongshu 109 were higher than those of Rongshu 756, the CO_2 compensation point (CCP) was lower than Rongshu 756. In the process of photosynthesis induction, the response of two sweet potato varieties to the high light induction was different, and the response speed of Rongshu 109 was faster. The non-photochemical

收稿日期: 2023-12-13

基金项目: 福建省科技厅引导性项目(2019N0037)

作者简介: 张小红(1979-), 女, 福建厦门人, 硕士, 副研究员, 主要从事作物良种选育与栽培生理、配套技术研究。(E-mail) ahjane@163.com

quenching coefficient (NPQ) of two sweet potato varieties under 50% shading treatment was significantly higher than that of the control ($P < 0.05$), the maximum photochemical quantum efficiency (F_v/F_m) under dark adaptation, the maximum PS II photochemical quantum efficiency (F'_v/F'_m) under light adaptation and apparent electron transfer rate (ETR) were significantly lower than those of the control ($P < 0.05$). Under natural light and 50% shading treatments, the F'_v/F'_m , $\Delta F/F'_m$, ETR , NPQ of Rongshu 109 were not lower than those of Rongshu 756. The actual photochemical efficiency of PS II in the light (ϕ_{PSII}) of two sweet potato varieties under 50% shading treatment was significantly lower than that of the control, and the non-photochemical quenching dissipation ratio (ϕ_{NPQ}) and fluorescence dissipation ratio ($\phi_{f,d}$) were significantly higher than those of the control. The reduction of yield of Rongshu 109 was lower than that of Rongshu 756 under 50% shading treatment. In conclusion, the low-light tolerant variety Rongshu 109 is more adaptable to low light, and can maintain a higher level of net photosynthetic rate, light-induced reaction rate and non-photochemical heat dissipation ability under low-light stress, and the reduction of yield of Rongshu 109 is low.

Key words: sweet potato; low-light tolerance; shading treatment; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence; yield

甘薯是中国 4 大粮食作物之一,2020 年种植面积占全球总面积的 30.40%,总产量占全球总产量的 54.97%^[1]。甘薯是一种短日照作物,甘薯植株内部的叶片分布紧凑,通风、透光和透气性差,导致甘薯光能利用率较低。生产上,山地阴面种植、大棚设施栽培、与高秆作物套种时,甘薯都不同程度地受到弱光胁迫。因此,选育高光效、耐弱光的甘薯新品种,以及研究弱光胁迫对甘薯生长发育、光合效能的影响具有重要意义。

前人已研究了弱光胁迫对甘薯农艺性状、产量、品质、光合作用及抗氧化防御系统等的影响。遮阴处理会导致甘薯蔓长与节间数变长、叶面积指数增大^[2-4]、茎变细、分枝数减少、根长缩短^[5-6],以及块根产量、品质和干物质率降低,耐弱光甘薯品种的相应指标则下降幅度较小^[7-9]。赵习武等^[10]研究了遮阴处理对甘薯的光响应曲线、净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度等光合特性指标的影响。侯夫云等^[11]研究了遮阴处理对甘薯的过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)等抗逆性指标的影响。

目前国内外关于弱光胁迫对作物光合作用影响的研究主要集中在马铃薯^[12-14]、大豆^[15-17]、玉米^[18-19]、小麦^[20]、花生^[21]、魔芋^[22-23]等作物,关于甘薯的研究鲜见报道。在本试验前期,进行了遮阴处理对 60 个甘薯品种生长、产量和品质的影响,以及不同遮光率(25%、50%、75%)、遮阴持续时间(30 d、60 d、90 d、120 d)对甘薯生长的影响对比试验,从中筛选出榕薯 109(耐弱光)和榕薯 756(不耐弱光)2 个不同弱光耐受性的甘薯品种作为试验材料。本

研究分析了遮光 50% 处理的不同弱光耐受性甘薯的叶绿素荧光特性、光合特性及产量差异,为耐弱光甘薯新品种选育以及弱光环境栽培的甘薯品种选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试甘薯品种为榕薯 109(耐弱光)和榕薯 756(不耐弱光),均为福州市农业科学研究所自主选育的品种。遮阳网为黑色聚乙烯遮阳网,遮光率为 50%。

1.2 试验方法

2021–2022 年在福州市农业科学研究所试验田开展试验,试验田土质为乌泥土,0~20 cm 土层 pH 值为 6.5,碱解氮含量为 92.8 mg/kg,速效磷含量为 28.9 mg/kg,速效钾含量为 81.7 mg/kg,有机质含量为 1.87%。试验采用双因素随机区组排列设计,第一因素为光照,设置自然光照(CK)和遮光 50% 处理(T);第二因素为甘薯品种,2 个甘薯品种为榕薯 109(耐弱光)和榕薯 756(不耐弱光);设置 3 次重复。每个小区种植两行,每行种植 50 株,行距 0.90 m,株距 0.20 m,小区面积 18 m²。6 月上旬将薯苗栽插定植,待薯苗成活后,搭建拱棚,拱棚上全覆盖遮阳网,全生育期拱棚四周封闭遮阴。肥水和病虫害防治按照常规田间管理进行。

1.3 测定指标及方法

遮阴 60 d 后,于 8 月上旬采用 LI-6400XT 便携式光合测定仪(美国 LI-COR 公司产品)测定各项参数,选择生长正常的植株顶端往下第 4 张功能叶进

行测定。各项指标均重复测定 3 次。

1.3.1 光合作用气体交换参数测定 在天气晴朗的上午 9:00–11:30 测定净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间二氧化碳浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r)、水汽压亏缺 (VPD)。

1.3.2 光响应曲线 采用 CO_2 注入系统,控制叶室内的 CO_2 浓度为 400 $\mu mol/mol$,采用红蓝光源设置光合有效辐射的梯度为 2 000 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、1 500 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、1 200 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、1 000 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、800 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、600 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、400 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、200 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、100 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、75 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、50 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、25 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、0 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。根据 Webb 等^[24]的方法拟合 P_n -PPFD(光响应曲线),计算出最大净光合速率(P_{max})、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、暗呼吸速率(R_d)、表观量子产额(AQY)。

1.3.3 CO_2 响应曲线 参比室的 CO_2 浓度梯度设置为 400 $\mu mol/mol$ 、300 $\mu mol/mol$ 、200 $\mu mol/mol$ 、100 $\mu mol/mol$ 、80 $\mu mol/mol$ 、50 $\mu mol/mol$ 、40 $\mu mol/mol$ 、400 $\mu mol/mol$ 、600 $\mu mol/mol$ 、800 $\mu mol/mol$ 、1 000 $\mu mol/mol$ 、1 200 $\mu mol/mol$ 、1 500 $\mu mol/mol$ 、1 800 $\mu mol/mol$ 、2 000 $\mu mol/mol$ ^[12],光合有效辐射为 1 500 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。参考许大全^[25]的方法,将 P_n - C_i 响应曲线的直线部分进行拟合,拟合后计算出羧化效率(CE)、 CO_2 补偿点(CCP)、最大羧化速率(V_{cmax})、最大电子传递速率(J_{max})。

1.3.4 光合诱导曲线 测定的前 1 d 先将待测叶片用黑布包裹,遮光处理。测定时,设置光合有效辐射为 0~1 500 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。参考 Tausz 等^[26]的方法,计算 $T_{50\%P}$ (净光合速率达到最大净光合速率 50%所需的时间)、 $T_{90\%P}$ (净光合速率达到最大净光合速率 90%所需的时间)、 IS_{1min} (光诱导 1 min 时净光合速率占最大净光合速率的百分比)、 IS_{5min} (光诱导 5 min 时净光合速率占最大净光合速率的百分比)、 IS_{10min} (光诱导 10 min 时净光合速率占最大净光合速率的百分比)。

1.3.5 叶绿素荧光参数 测定光合作用气体交换参数当天晚上,植株经过充分暗适应,于第 2 d 3:00–5:00 测定叶绿素荧光参数。暗适应 30 min 后测定 F_o (初始荧光)、 F_m (最大荧光)、 F_v/F_m (暗适应下最大光化学量子效率)。打开光源,测定光适应

条件下的 F_s (稳态荧光)、 F'_m (最大荧光)、 F'_o (最小荧光)。参照 Demmig-Adams 等^[27-28]的方法计算光适应下 NPQ (非光化学淬灭系数)、 qP (光化学淬灭系数)、 $\Delta F/F'_m$ (PS II 实际光化学量子效率)、 F'_v/F'_m (光适应下 PS II 最大光化学量子效率)、 ETR (表观电子传递速率),按照 Hendrickson 等^[29]的方法计算 $\phi_{f,d}$ (荧光耗散比例)、 ϕ_{NPQ} (非光化学淬灭耗散比例)、 ϕ_{PSII} (PS II 实际光化学效率)。

1.3.6 产量测定 种植 140 d 后,将各小区的薯块收获称重,按照小区面积折算为每公顷鲜薯产量。

1.4 数据统计与分析

取 2021 和 2022 年 2 年所测数据的平均值,利用 Microsoft Excel 2010 进行统计分析,利用 SPSS20.0 进行差异显著性分析,利用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 遮阴对甘薯光合特性指标的影响

2.1.1 对光合作用气体交换参数的影响 如表 1 所示,T 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 P_n 、 G_s 和 T_r 均显著低于对照($P<0.05$)。与对照相比,T 处理榕薯 109 的 P_n 、 G_s 和 T_r 分别显著降低 20.47%、14.04%、27.76%($P<0.05$),T 处理榕薯 756 的 P_n 、 G_s 和 T_r 分别显著降低 40.91%、17.86%、50.90%($P<0.05$),榕薯 756 的 P_n 、 G_s 和 T_r 下降幅度均高于榕薯 109。T 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 C_i 均显著高于对照,与对照相比,T 处理榕薯 109 的 C_i 显著升高 5.24%,T 处理榕薯 756 的 C_i 显著升高 8.13%。T 处理榕薯 109、榕薯 756 的 VPD 与对照相比无显著差异($P>0.05$)。对照和 T 处理榕薯 109 的 P_n 、 G_s 、 T_r 、 VPD 均高于榕薯 756, C_i 低于榕薯 756。

2.1.2 对光响应参数的影响 如表 1 所示,T 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 P_{max} 、 LSP 、 LCP 均显著低于对照($P<0.05$)。与对照相比,T 处理榕薯 109 的 P_{max} 、 LSP 、 LCP 分别显著降低 15.57%、26.19%、6.67%($P<0.05$),T 处理榕薯 756 的 P_{max} 、 LSP 、 LCP 分别显著降低 21.54%、36.63%、13.71%($P<0.05$)。T 处理榕薯 109 的 R_d 和 AQY 与对照相比无显著差异($P>0.05$)。与对照相比,T 处理榕薯 756 的 R_d 显著升高 31.13%($P<0.05$),T 处理榕薯 756 的 AQY 与对照相比无显著差异($P>0.05$)。对照和 T 处理榕薯 109 的 P_{max} 、 LSP 均高于榕薯 756, LCP

和 R_d 均低于榕薯 756。

2.1.3 对 CO_2 响应参数的影响 如表 1 所示, T 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 CE 与对照相比无显著差异 ($P>0.05$)。T 处理榕薯 109 的 CCP 与对照相比无显著差异 ($P>0.05$); 与对照相比, T 处理榕薯 756 的 CCP 显著降低 12.26% ($P<0.05$)。与对照相比, T 处理榕薯 109 的 V_{cmax} 、 J_{max} 分别显著降低 19.87%、26.35% ($P<0.05$), T 处理榕薯 756 的 V_{cmax} 、 J_{max} 分别显著升高 36.10%、34.32% ($P<0.05$)。对照和 T 处理榕薯 109 的 V_{cmax} 和 J_{max} 均高于榕薯 756。

表 1 遮光处理不同甘薯品种光合特征参数

Table 1 Photosynthetic characteristics of different sweet potato varieties under shading treatment

光合特征参数	榕薯 109		榕薯 756	
	CK	T	CK	T
P_n [($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	28.43	22.61 *	21.39	12.64 *
G_s [($\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	1.14	0.98 *	0.84	0.69 *
C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	339.67	357.46 *	353.88	382.64 *
T_r [($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	6.88	4.97 *	5.54	2.72 *
VPD (kPa)	1.06	0.90	0.68	0.61
P_{max} [($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	28.52	24.08 *	26.23	20.58 *
LSP [($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	2 230.27	1 646.22 *	2 186.12	1 385.35 *
LCP [($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	53.96	50.36 *	63.37	54.68 *
R_d [($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	3.11	3.32	3.63	4.76 *
AQY ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	0.05	0.06	0.06	0.07
CE (mol/mol)	0.10	0.09	0.07	0.08
CCP ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	56.82	56.61	66.95	58.74 *
V_{cmax} [($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	131.88	105.67 *	68.12	92.71 *
J_{max} [($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]	397.63	292.86 *	188.57	253.29 *

CK: 自然光照; T: 遮光 50%。 P_n : 净光合速率; G_s : 气孔导度; C_i : 胞间二氧化碳浓度; T_r : 蒸腾速率; VPD : 水汽压亏缺; P_{max} : 最大净光合速率; LSP : 光饱和点; LCP : 光补偿点; R_d : 暗呼吸速率; AQY : 表观量子产额; CE : 羧化效率; CCP : CO_2 补偿点; V_{cmax} : 最大羧化速率; J_{max} : 最大电子传递速率。* 表示同一品种甘薯对照和遮光 50% 处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 遮阴对甘薯光合诱导指标的影响

如表 2 所示, T 处理榕薯 109 的 $T_{50\%P}$ 、 $T_{90\%P}$ 显著高于对照 ($P<0.05$), T 处理榕薯 756 的 $T_{50\%P}$ 、 $T_{90\%P}$ 显著低于对照 ($P<0.05$)。榕薯 109 和榕薯 756 的 $IS_{1\text{min}}$ 、 $IS_{5\text{min}}$ 、 $IS_{10\text{min}}$ 均显著低于对照 ($P<0.05$)。对照和 T 处理榕薯 109 的 $T_{50\%P}$ 、 $T_{90\%P}$ 均低于榕薯 756, 对照和 T 处理榕薯 109 的 $IS_{1\text{min}}$ 、 $IS_{5\text{min}}$ 均高于榕薯 756。

表 2 遮光处理不同甘薯品种光合诱导参数

Table 2 Photosynthetic induction parameters of different sweet potato varieties under shading treatment

光合特征参数	榕薯 109		榕薯 756	
	CK	T	CK	T
$T_{50\%P}$ (s)	120.39	151.75 *	360.18	275.22 *
$T_{90\%P}$ (s)	380.37	465.93 *	1 352.16	873.23 *
$IS_{1\text{min}}$ (%)	6.81	3.26 *	5.25	2.39 *
$IS_{5\text{min}}$ (%)	29.08	20.17 *	25.08	19.97 *
$IS_{10\text{min}}$ (%)	26.15	17.64 *	26.86	18.02 *

CK: 自然光照; T: 遮光 50%。 $T_{50\%P}$: 净光合速率达到最大净光合速率 50% 所需的时间; $T_{90\%P}$: 净光合速率达到最大净光合速率 90% 所需的时间; $IS_{1\text{min}}$: 光诱导 1 min 时净光合速率占最大净光合速率的百分比; $IS_{5\text{min}}$: 光诱导 5 min 时占最大净光合速率的百分比; $IS_{10\text{min}}$: 光诱导 10 min 时净光合速率占最大净光合速率的百分比。* 表示同一品种甘薯对照和遮光 50% 处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 遮阴对甘薯叶绿素荧光指标的影响

如表 3 所示, T 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 F_o 、 F_m 、 NPQ 均显著高于对照 ($P<0.05$), F_v/F_m 、 F'_v/F'_m 、 $\Delta F/F'_m$ 、 ETR 、 qP 均显著低于对照 ($P<0.05$)。对照榕薯 109 的 F_o 、 F_m 、 $\Delta F/F'_m$ 、 ETR 、 qP 均高于榕薯 756; T 处理榕薯 109 的 F_o 、 F_m 、 F'_v/F'_m 、 $\Delta F/F'_m$ 、 ETR 、 NPQ 、 qP 均高于榕薯 756。

表 3 遮光处理不同甘薯品种叶绿素荧光指标

Table 3 Chlorophyll fluorescence index of different sweet potato varieties under shading treatment

叶绿素 荧光指标	榕薯 109		榕薯 756	
	CK	T	CK	T
F_o	196.39	243.28 *	190.57	235.96 *
F_m	1 132.51	1 219.82 *	1 131.37	1 188.94 *
F_v/F_m	0.83	0.80 *	0.83	0.80 *
F'_v/F'_m	0.55	0.52 *	0.55	0.50 *
$\Delta F/F'_m$	0.30	0.19 *	0.27	0.17 *
ETR	200.09	129.83 *	181.53	125.92 *
NPQ	1.73	1.77 *	1.73	1.75 *
qP	0.56	0.45 *	0.50	0.37 *

CK: 自然光照; T: 遮光 50%。 F_o : 初始荧光; F_m : 最大荧光; F_v/F_m : 暗适应下最大光化学量子效率; F'_v/F'_m : 光适应下 PS II 最大光化学量子效率; $\Delta F/F'_m$: PS II 实际光化学量子效率; ETR : 表观电子传递速率; NPQ : 非光化学淬灭系数; qP : 光化学淬灭系数。* 表示同一品种甘薯对照和遮光 50% 处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 遮阴对甘薯吸收光能分配的影响

如表 4 所示, T 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 ϕ_{PSII} 均显著低于对照 ($P<0.05$), 与对照相比, T 处理榕薯 109 的 ϕ_{PSII} 显著降低 39.39% ($P<0.05$), T

处理榕薯 756 的 ϕ_{PSII} 显著降低 33.33% ($P<0.05$)。T 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 ϕ_{NPQ} 、 $\phi_{f,d}$ 均显著高于 CK ($P<0.05$)。与对照相比, T 处理榕薯 109 的 ϕ_{NPQ} 、 $\phi_{f,d}$ 分别显著升高 19.05%、20.00% ($P<0.05$), T 处理榕薯 756 的 ϕ_{NPQ} 、 $\phi_{f,d}$ 分别显著升高 15.91%、11.54% ($P<0.05$)。

表 4 遮光处理不同甘薯品种光能分配参数

Table 4 Light energy distribution parameters of different sweet potato varieties under shading treatment

光能分配参数	榕薯 109		榕薯 756	
	CK	T	CK	T
ϕ_{PSII}	0.33	0.20 *	0.30	0.20 *
ϕ_{NPQ}	0.42	0.50 *	0.44	0.51 *
$\phi_{f,d}$	0.25	0.30 *	0.26	0.29 *

CK: 自然光照; T: 遮光 50%。 ϕ_{PSII} : PS II 实际光化学效率; ϕ_{NPQ} : 非光化学淬灭耗散比例; $\phi_{f,d}$: 荧光耗散比例。* 表示同一品种甘薯对照和遮光 50% 处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 遮阴对甘薯产量的影响

如表 5 所示, T 处理榕薯 109 和榕薯 756 的产量均显著低于对照 ($P<0.05$)。与对照相比, 榕薯 109 产量显著降低 32.97% ($P<0.05$), 榕薯 756 产量显著降低 78.94% ($P<0.05$), 榕薯 109 产量下降幅度低于榕薯 756。

表 5 遮光处理不同甘薯品种的产量

Table 5 Yield of different sweet potato varieties under shading treatment

品种	处理	产量 (kg/hm ²)
榕薯 109	CK	39 056.89
	T	26 178.12 *
榕薯 756	CK	39 097.26
	T	8 235.32 *

CK: 自然光照; T: 遮光 50%。* 表示同一品种甘薯对照和遮光 50% 处理差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

弱光影响植物的形态结构、生理生化、基因表达, 植物感知、转导和适应弱光胁迫信号是植物适应弱光环境的表现^[30], 不同品种甘薯对弱光的适应性有差异。本研究中, 与自然光照相比, 遮光 50% 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 P_n 、 G_s 、 T_r 、 P_{max} 、 LSP 、 LCP 及产量均显著下降 ($P<0.05$), 说明弱光降低了甘薯的光合作用能力, 导致产量下降, 这与前人在甘薯上

的研究结论^[2,5,10]一致。耐弱光品种榕薯 109 的 P_n 、 G_s 、 T_r 、 VPD 、 P_{max} 、 LSP 及遮光 50% 处理的产量均高于不耐弱光品种榕薯 756, 而榕薯 109 的 C_i 、 LCP 、 R_d 则低于榕薯 756。说明在弱光条件下, 耐弱光品种榕薯 109 维持了较高的光合水平, 同时降低了呼吸速率, 使干物质能够稳定积累, 从而促进甘薯植株的正常生长和产量提高。 P_{max} 是表征植物最大光合作用能力、光合潜力的重要参数, LSP 反映了植物对强光的适应性; LCP 、 R_d 反映植物利用弱光的能力^[31], LCP 较低说明植物能利用较低浓度的 CO_2 进行光合作用, R_d 降低则可以减少有机物的损耗, 有利于积累有机物^[32-34]。有研究结果表明, LSP 较高且 LCP 、 R_d 较低的植物光适应性较强, 具有更强的耐弱光能力^[10,12,35], 这与本研究结论一致。

V_{cmax} 、 J_{max} 是在饱和光照强度下限制植物光合速率的重要因素, CCP 可反映植物对 CO_2 的利用能力^[36]。有研究发现, 弱光下花生^[21] 和橡胶树^[37] 的 V_{cmax} 、 J_{max} 显著降低, 马铃薯^[13] 和草莓^[38] 的 CCP 升高, 魔芋的 CCP 降低^[22]。本研究中, 与自然光照相比, 遮光 50% 处理榕薯 109 的 V_{cmax} 、 J_{max} 显著下降 ($P<0.05$), CCP 和对照相比无显著差异 ($P>0.05$)。与自然光照相比, 榕薯 756 的 V_{cmax} 、 J_{max} 则显著升高 ($P<0.05$), CCP 显著降低 ($P<0.05$)。这可能是由于不同作物叶片结构不同, 在弱光下对 CO_2 响应机制有所不同, 其机制有待进一步研究。自然光照和遮光 50% 处理榕薯 109 的 V_{cmax} 、 J_{max} 均高于榕薯 756, CCP 则低于榕薯 756。耐弱光甘薯品种的 V_{cmax} 、 J_{max} 高于不耐弱光甘薯品种, 净光合速率高于不耐弱光甘薯品种, 推测与耐弱光甘薯品种光合作用过程中 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶的活性较高有关^[39]。耐弱光甘薯品种的 CCP 较低, 说明其在弱光下也能较好地利用低浓度 CO_2 进行光合作用, 促进甘薯块根的生长发育。

叶绿素荧光参数是评价植物弱光耐受性的一个重要指标^[40-41]。本研究中, 与自然光照相比, 遮光 50% 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 F_o 、 F_m 显著升高 ($P<0.05$), $\Delta F/F'_m$ 、 ETR 、 qP 显著降低 ($P<0.05$), 这与前人在马铃薯^[12]、黄瓜^[42-43] 上的研究结论一致。与自然光照相比, 遮光 50% 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 F_v/F_m 显著降低, 这与前人在黄瓜^[42-43]、辣椒^[44]、小麦^[45] 上的研究结论一致。而花

生^[21]、大豆^[16]、槭树^[46]、猕猴桃^[47]、白英^[48]、望天树^[49]、雪茄^[50]等作物遮阴处理后叶片 F_v/F_m 升高; 吴亚男^[33]认为短期遮阴处理玉米 F_v/F_m 提高, 长期遮阴处理则玉米 F_v/F_m 下降。不同作物遮阴处理后 F_v/F_m 的变化不一致, 说明遮阴程度、遮阴时期和持续时间、作物种类等因素都会影响作物对弱光的响应机制。 F_v/F_m 用于反映植物受到逆境胁迫的程度, 与自然光照相比, 遮光 50% 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 F_v/F_m 显著下降 ($P < 0.05$), 可能是因为叶片受到弱光胁迫。与自然光照相比, 遮光 50% 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 F'_v/F'_m 、 $\Delta F/F'_m$ 、 ETR 、 qP 均显著降低 ($P < 0.05$), NPQ 显著升高 ($P < 0.05$), 可能是由于弱光胁迫导致叶片对 CO_2 同化能力下降, 对叶绿体中的腺嘌呤核苷三磷酸 (ATP)、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸 (NADP) 需求减少, 导致对 PS II 的反馈氧化还原作用增强, 同时 PS II 的原初光化学反应下调了光合电子传递, 表现为 qP 下降; 非光化学淬灭增加 (NPQ 增加), 减少了激发能的光化学利用, 避免了质体醌 Q_A 的过分还原^[43]。

光合作用吸收的光能可通过 3 种方式消耗: 热能耗散、荧光发射以及促进光化学反应, 这 3 种方式消耗光能的比例可用作检测光合作用变化情况的探针^[12]。本研究中, 与对照相比, 遮光 50% 处理榕薯 109 和榕薯 756 的 ϕ_{PSII} 显著下降 ($P < 0.05$), ϕ_{NPQ} 、 $\phi_{f,d}$ 显著上升 ($P < 0.05$), 表明热能耗散的光能增加, 这与在黄瓜上的研究结论^[43]一致。遮阴处理后甘薯通过降低叶片的 LSP 抵御弱光胁迫^[12], 提高热能耗散比例, 减少 PS II 和电子转移链的过度还原, 防止过剩光能破坏光合机构^[43]。

4 结 论

本研究从大量甘薯品种中筛选出耐弱光甘薯品种榕薯 109 和不耐弱光甘薯品种榕薯 756, 探究弱光胁迫对不同弱光耐受性甘薯光合作用、叶绿素荧光特性和产量的影响。结果表明, 榕薯 109 的 P_{max} 和 LSP 较高, LCP 和 R_d 较低, 在弱光胁迫下能维持较高水平的净光合速率、光诱导反应速度和非光化学热耗散能力, 产量下降幅度较小, 对弱光适应性较强。榕薯 109 可用作选育耐弱光甘薯品种的亲本材料, 也可用于山地阴面种植、大棚设施栽培、与高秆作物套种。植物的弱光耐受性是具有遗传特性的, 下一步可对耐弱光基因进行挖掘与克隆转化, 选育

出更耐弱光的甘薯新品种。

参考文献:

- [1] 李 强, 赵 海, 靳艳玲, 等. 中国甘薯产业助力国家粮食安全的分析与展望[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6): 1484-1491.
- [2] 蒋 亚. 甘薯耐荫性评价及其对弱光的生理响应[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [3] GRACE S, ANDREW C, PHILEMON N, et al. Effects of light on sweet potato (*Ipomoea batatas* L.), cowpea (*Vigna unguiculata* L.) and pineapple (*Ananas comosus* L.) [J]. Journal of Life Sciences, 2010, 4(6): 39-45.
- [4] WANG Q M, HOU F Y, DONG S X, et al. Effect of shading on the photosynthetic capacity, endogenous hormones and root yield in purple-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) [J]. Plant Growth Regulation, 2014, 72(2): 113-122.
- [5] 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(自然科学版), 2019, 45(3): 288-295.
- [6] 李韦柳, 唐秀桦, 韦民政, 等. 遮阴对淀粉型甘薯生长发育及生理特性的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(2): 258-263.
- [7] WON P, MI N C, SANG-SILK N, et al. Evaluation of the growth and yield of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) at different growth stages under low light intensity [J]. Korean Journal of Crop Science, 2021, 66(2): 146.
- [8] 张瑞明. 气象条件对甘薯栽培和品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2007.
- [9] 王庆美, 侯夫云, 汪宝卿, 等. 遮阴处理对紫甘薯块根品质的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 192-200.
- [10] 赵习武, 王晨静, 周雅倩, 等. 不同遮阴处理对四种观赏甘薯光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2013(24): 55-59.
- [11] 侯夫云, 董顺旭, 张海燕, 等. 遮荫条件下紫心甘薯的抗氧化防御系统研究[J]. 山东农业科学, 2013, 45(6): 48.
- [12] 李彩斌, 郭华春. 耐弱光基因型马铃薯在遮阴条件下的光合和荧光特性分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1181-1189.
- [13] 秦玉芝, 邢 铮, 邹剑锋. 持续弱光胁迫对马铃薯苗期生长和光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(3): 537-545.
- [14] 黄承建, 赵思毅, 王季春. 马铃薯/玉米不同行数比套作对马铃薯光合特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1443-1450.
- [15] 李 瑞, 文 涛, 唐艳萍. 遮阴对大豆幼苗光合和荧光特性的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(6): 198-206.
- [16] 宋艳霞, 杨文钰, 李卓玺, 等. 不同大豆品种幼苗叶片光合及叶绿素荧光特性对套作遮荫的响应[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(4): 474-479.
- [17] 范元芳, 杨 峰, 何知舟. 套作大豆形态、光合特征对玉米荫蔽及光照恢复的响应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 608-617.
- [18] 李冬梅, 赵奎华, 王延波. 不同耐密性玉米品种光合特性对弱

- 光响应的差异[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 52-56.
- [19] 杜成凤, 李潮海, 刘天学. 遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6633-6640.
- [20] 张元帅, 冯伟, 张海艳. 遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1177-1184.
- [21] 焦念元, 杨萌珂, 宁堂原. 玉米花生间作和磷肥对间作花生光合特性及产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(11): 1010-1017.
- [22] 付忠, 谢世清, 徐文果. 不同光照强度下谢君魔芋的光合作用及能量分配特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1177-1188.
- [23] 付忠, 谢世清, 徐文果. 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.
- [24] WEBB W L, NEWTON M, STARR D. Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*: a mathematical model[J]. Oecologia, 1974, 17(4): 281.
- [25] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
- [26] TAUSZ M, WARREN C R, ADAMS M A. Dynamic light use and protection from excess light in upper canopy and coppice leaves of *Nothofagus cunninghamii* in an old growth, cool temperate rainforest in Victoria, Australia[J]. The New Phytologist, 2005, 165(1): 143-155.
- [27] DEMMING-ADAMS B, ADAMS W I, LOGAN B, et al. Xanthophyll cycle-dependent energy dissipation and flexible photosystem II efficiency in plants acclimated to light stress[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1995, 22(2): 249-260.
- [28] DEMMING-ADAMS B, ADAMS W W, BARKER D H, et al. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation[J]. Physiologia Plantarum, 1996, 98(2): 253-264.
- [29] HENDRICKSON L, FURBANK R T, CHOW W S. A simple alternative approach to assessing the fate of absorbed light energy using chlorophyll fluorescence[J]. Photosynthesis Research, 2004, 82(1): 73-81.
- [30] 翁忙玲, 程慧林, 姜卫兵. 弱光对园艺植物光合特性及生长发育影响研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(3): 279-282.
- [31] 许国春, 罗文彬, 李华伟, 等. 彩色马铃薯光合光响应曲线模拟及其特征参数分析[J]. 福建农业学报, 2020, 35(7): 691-698.
- [32] 李国良, 林赵森, 许泳清, 等. 不同类型甘薯光合光响应曲线拟合及比较分析[J]. 福建农业学报, 2018, 33(7): 687-690.
- [33] 吴亚男. 不同玉米品种耐阴性评价及高产群体结构[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
- [34] 潘妃, 邢铮, 秦玉芝, 等. 几种特色甘薯叶片光合作用特征的研究[J]. 湖南农业科学, 2013, 21: 26-28.
- [35] 董然, 李金鹏, 金雪花, 等. 遮阴对金头饰玉簪光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(5): 251-253.
- [36] LONG S P, BERNACCHI C J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis procedures and sources of error[J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(392): 2393-2401.
- [37] 田耀华, 原慧芳, 龙云峰. 生长光强对六个橡胶树品种幼苗光合特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(3): 270-276.
- [38] 刘卫琴, 汪良驹, 刘晖. 遮阴对丰香草莓光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 果树学报, 2006, 23(2): 209-213.
- [39] HARLEY P C, THOMAS R B, REYNOLDS J F, et al. Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated CO₂[J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(3): 271-282.
- [40] 宫丽丹, 魏丽萍, 倪书邦. 持续干旱对油棕幼苗叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(13): 1-6.
- [41] 梁文华, 刘嘉翔, 杨露, 等. 遮阴对紫叶风箱果快速叶绿素荧光特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(1): 59-63.
- [42] 熊宇, 杨再强, 薛晓萍. 遮光处理对温室黄瓜幼龄植株叶片光合参数的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 222-230.
- [43] 周艳虹, 黄黎锋, 喻景权. 持续低温弱光对黄瓜叶片气体交换、叶绿素荧光猝灭和吸收光能分配的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(2): 153-160.
- [44] 颜建明, 郁继华, 黄高宝, 等. 低温温和低变温弱光对辣椒光合作用的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(6): 39-43.
- [45] 刘霞, 尹燕桦, 姜春明, 等. 花后不同时期弱光和高温胁迫对小麦旗叶荧光特性及籽粒灌浆进程的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2117-2121.
- [46] 韦金河, 闻婧, 张俊. 夏季遮光对3种槭树PS II叶绿素荧光参数的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(1): 172-179.
- [47] 韦兰英, 莫凌, 袁维圆, 等. 不同遮阴强度对猕猴桃“桂海4号”光合特性及果实品质的影响[J]. 广西科学, 2009, 16(3): 326-330.
- [48] 吕洪飞, 皮二旭, 王岚岚, 等. 遮阴处理的白英光合作用和叶绿素荧光特性研究[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2009, 32(1): 1-6.
- [49] 黄菁, 魏丽萍, 周会平, 等. 遮阴对望天树生长和生理生化特性的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(2): 74-79.
- [50] 时向东, 文志强, 刘艳芳, 等. 遮阴对雪茄外包皮烟生长和光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(8): 1718-1721.

(责任编辑: 成纾寒)