

强光对小白菜光合作用能力的影响

赵颖[#], 张厂, 王旭^{*}

(海南大学热带农林学院, 海南海口 570228 中国)

摘要: 为探究强光对小白菜光合作用能力的影响, 本研究以海南地区主栽小白菜品种‘华王’和‘矮脚黄’为材料, 通过 LED 模拟强光 ($1\,500\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 探究强光对小白菜光合作用能力的影响。结果表明, 强光处理初期 (0 ~ 5 d), 两品种净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs) 和蒸腾速率 (Tr) 显著升高, 胞间 CO_2 浓度 (Ci) 下降; 但长期强光 (5 ~ 20 d) 导致 Pn、Gs、Tr 持续下降, Ci 趋于稳定。强光处理 10 d 的光响应曲线显示, ‘华王’和‘矮脚黄’两个品种小白菜叶片的最大净光合速率 (Pn_{max}) 均显著提升, 表观量子效率 AQY 显著下降。强光下两个品种的光系统 II (PS II) 最大光能转化效率 Fv/Fm 、实际光量子产量 $\Phi\text{PS II}$ 和光化学淬灭系数 (qP) 显著下降, ‘矮脚黄’降幅更大; 两个品种的非光化学淬灭系数 NPQ 在强光处理 5 d 时显著升高, 但长期强光处理下 NPQ 及调节性能量耗散量子产量 Y(NPQ) 下降, 而非调节性能量耗散量子产量 Y(NO) 持续上升; 此外, 强光下电子传递速率 ETR 在‘华王’中呈先升后降趋势, 而‘矮脚黄’持续下降。综合分析表明, ‘华王’在长期强光下的光系统修复能力表现出更强适应性, 而‘矮脚黄’虽短期响应迅速, 但光保护机制较弱。

关键词: 小白菜; 强光处理; 光合速率; 叶绿素荧光

中图分类号: S634.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674–7054(2026)04–0656–09

赵颖, 张厂, 王旭. 强光对小白菜光合作用能力的影响[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(4):

656–664. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250047 CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswwb.20250047



光照对植物体生长发育有着极其重要的影响, 光照强度直接影响植物的光合机构及光合特性。过高的光强会抑制植物光合作用甚至导致光合机构受损^[1]。在露地生产中, 植物育苗和栽培一定程度上会受到强光的胁迫, 进而影响植物生长发育^[2]。在对植物逆境响应机制进行研究的过程中, 通常会使用气体交换和叶绿素荧光来判断植株光合能力的强弱。叶绿素荧光动力学技术可以在不伤害植物的前提下, 快速测定植物对光能的吸收和转化、光能在植物体内的传递与分配、光反应中心的活性等, 是研究植物光合作用的一种快速、非侵入性的探针技术, 近年来在作物抗逆生理方面得到了广泛应用^[3]。小白菜 (*Brassica campestris* ssp. *chinensis*) 是十字花科芸薹属芸薹种白菜亚种, 又称不结球白菜、青菜、油菜等, 性喜冷凉, 是原产中国的重要蔬菜作物, 其生长期短, 适应性强, 在各地均可栽培。海南省位于中国的最南端,

属于海洋性热带季风气候, 常年光照较强, 年平均温度在 $22\sim 26\,^{\circ}\text{C}$, 小白菜作为海南地区栽培广泛的叶菜之一, 在夏季晴朗天气条件下, 植物叶片接收到的直射光强度可达 $1\,080\sim 1\,800\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 夏季的高温强光往往成为限制小白菜生长发育的主要因素。陈子义等^[4]发现, 光照强度在 $500\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时小白菜光合能力不能有效提升, 同时也不利于小白菜细胞壁果胶和可溶性膳食纤维 (SDF) 的积累。丁娟娟等^[5]发现, 光照强度在 $330\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时比在弱光 ($153\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 下更能够促进不结球白菜的生长发育; 而光照强度在 $545\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 会对十字花科叶菜幼苗产生轻度抑制^[6]。强光还会造成植物光抑制, 叶片的光系统因为无法吸收多余的光能而引起过激氧化还原反应, 进一步导致光合色素、光反应中心及光合作用的膜质系统被破坏^[7–10]。光照强度过高会造成植物叶片的 Fv/Fm 下降, NPQ 升高^[11–12]。徐

凯等^[13]发现, 强光下草莓叶片最大荧光(Fm)、Fv/Fm、AQY均呈现显著下降, 导致光抑制的发生。柴胜丰等^[14]发现随着强光胁迫的增强, 金花茶幼苗叶绿素含量和叶绿素荧光参数均显著降低, 光合作用受到抑制, 对植株的生长发育产生显著不利影响。林球等^[15]的研究结果表明, 光抑制期间, 苹果叶片净光合速率(Pn)显著降低, 但光呼吸速率(Pr)和NPQ均明显增强。高璐等^[16]运用叶绿素荧光技术对不同特性不结球白菜的光合作用及叶绿素荧光参数分析, 为不结球白菜优质品种选育提供了理论基础。目前关于小白菜在强光下的光合作用能力变化的研究相对较少, 本研究以海南地区种植较广泛的小白菜品种‘华王’和‘矮脚黄’为研究对象, 利用LED作光源, 采用室内水培的方式, 对小白菜进行光合参数和叶绿素荧光参数测定, 以期探究强光对小白菜光合作用能力的影响, 为缓解海南地区蔬菜夏秋季节供需矛盾^[17]提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 供试小白菜品种分别为‘矮脚黄’(AJH, 购自南京市蔬菜种子公司)和‘华王’(HW, 购自上海市种子公司)。(‘矮脚黄’的饱和光强为 $1\ 836.6\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, ‘华王’的饱和光强为 $1\ 663.6\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[18]。选取饱满且均匀一致的种子直接播于聚氨酯泡沫小方块($2\ \text{cm}\times 2\ \text{cm}\times 2\ \text{cm}$)中, 放置于塑料育苗盘中, $25\ ^\circ\text{C}$ 黑暗条件下进行催芽, 2 d后种子露白及时见光, 光照强度为 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光周期(光/暗)为12 h/12 h, 温度(光/暗)为 $25\ ^\circ\text{C}/18\ ^\circ\text{C}$, 湿度为 $(70\pm 5)\%$ 。两叶一心时, 将小苗分组移至栽培架进行不同光强下的水培种植: 对照光处理光照强度为 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (CK), 强光处理光照强度为 $1\ 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (HL), 其余条件保持一致。

1.2 测定指标和方法 从处理起始日开始, 每隔5 d对小白菜的各项光合参数进行1次测定, 每次检测时, 从每个处理组中随机选取3株小白菜作为样本。分别记录0、5、10、15和20 d的数据。采用美国Li-Cor公司的Li-6400便携式光合仪, 在晴天上午9:00—11:30测定植株从上向下数第3~4片完全展开叶的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、细胞间隙 CO_2 浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)。

测定时室内温度为 $(25\pm 1)\ ^\circ\text{C}$, 光量子通量密度与处理光强保持一致。在处理10 d于上午9:00—11:00测定第3片功能叶的光响应(Pn-PAR)曲线。采用德国Walz公司的PAM-2500便携式调制叶绿素荧光仪, 测定暗适应后的叶绿素荧光参数, 每5 d测1次数据至实验结束。

1.3 数据分析 数据采用Microsoft Excel进行整理, 采用SPSS v27.0进行单因素方差分析(one-way ANOVA), Duncan法进行多重比较, 用不同小写字母表示差异显著水平($P<0.05$), 并用Graphpad Prism v8作图。

2 结果与分析

2.1 强光对小白菜光合参数的影响 由表1可见, 正常光下‘华王’在处理15 d时Pn显著下降, Tr在处理10 d时显著增加, 15~20 d均显著降低, Gs在处理15~20 d均显著下降, Ci呈下降趋势; 强光处理下‘华王’的Pn、Gs、Tr均在处理5 d时显著高于对照组, 随后逐渐下降, Ci在处理0~5 d时变化不大, 处理10 d时显著下降, 处理10~20 d呈下降趋势, 这说明短时间内强光处理可能有利于光能利用效率的提升, 气孔开放以支持光能捕获, 但长期强光处理可能会导致光抑制加剧, 造成气孔保护性关闭。‘矮脚黄’在正常光下的Pn、Tr、Gs变化趋势与‘华王’呈现相似趋势, Ci变化不显著; 强光下‘矮脚黄’的Pn、Tr、Gs均在处理5 d时显著高于对照组, 与‘华王’的变化呈现相似趋势, 但Tr下降幅度比‘华王’更大, 这反映‘华王’可能通过增强蒸腾作用缓解光热胁迫, 而‘矮脚黄’因气孔调控能力较弱, 导致水分利用效率下降。强光处理后两品种小白菜叶片的Ci变化幅度较小, 而Pn和Gs的变化规律基本一致, 说明强光下小白菜叶片的Pn变化主要受气孔影响, 与叶肉细胞的光合能力无关。

2.2 强光对小白菜光响应曲线的影响 如图1, 用直角双曲线修正模型拟合强光对‘华王’和‘矮脚黄’净光合速率的光响应曲线。与正常光相比, 强光下‘华王’和‘矮脚黄’的净光合速率都呈现先增加后逐渐平缓的趋势。当光量子通量密度小于 $1\ 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 强光处理下‘华王’和‘矮脚黄’的净光合速率随着光合有效辐射的增加有较大幅度的升高, 其中, 强光处理下‘华王’的增幅在光

表 1 强光对小白菜光合特性的影响

Tab. 1 The effect of high light on the photosynthetic characteristics of bok choy

品种 Variety	光照强度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Light intensity	处理天数/d Treatment days	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Net photosynthetic rate	胞间CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) Intercellular CO ₂ concentration	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Transpiration rate	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Stomatal conductance
‘华王’ ‘Huawang’	300	0	14.45±0.70 ^e	389.57±0.18 ^a	1.28±0.02 ^e	0.19±0.004 ^{cd}
		5	14.38±0.28 ^e	384.51±3.36 ^a	1.35±0.01 ^e	0.19±0.002 ^c
		10	13.49±0.14 ^e	372.99±2.08 ^b	1.44±0.03 ^d	0.20±0.003 ^c
		15	12.35±0.21 ^f	364.20±9.59 ^b	1.28±0.016 ^e	0.18±0.004 ^d
		20	12.15±1.56 ^e	354.64±9.14 ^{bc}	1.20±0.37 ^f	0.15±0.020 ^f
	1 500	0	14.44±0.78 ^e	390.53±3.49 ^a	1.28±0.02 ^e	0.24±0.016 ^b
		5	33.14±1.79 ^a	356.55±2.39 ^{bc}	2.36±0.21 ^a	0.36±0.013 ^a
		10	26.84±3.08 ^b	342.73±13.13 ^{bc}	1.83±0.05 ^b	0.23±0.012 ^b
		15	20.08±1.91 ^c	344.12±14.70 ^{bc}	1.57±0.03 ^c	0.17±0.003 ^c
		20	17.76±0.34 ^d	305.39±9.71 ^d	1.34±0.09 ^d	0.14±0.003 ^f
‘矮脚黄’ ‘Aijiaohwang’	300	0	15.03±1.32 ^e	358.30±3.55 ^a	0.64±0.03 ^f	0.18±0.006 ^{cd}
		5	13.30±0.44 ^{cd}	344.44±16.59 ^a	0.75±0.02 ^e	0.19±0.004 ^c
		10	13.13±0.84 ^{cd}	373.19±14.24 ^a	0.81±0.02 ^e	0.20±0.002 ^c
		15	9.76±1.15 ^e	354.40±5.36 ^a	0.74±0.02 ^e	0.18±0.001 ^d
		20	8.94±0.60 ^e	335.87±3.37 ^b	0.70±0.03 ^e	0.14±0.03 ^{de}
	1 500	0	15.41±1.19 ^e	358.27±3.02 ^a	0.66±0.03 ^f	0.18±0.0106 ^{cd}
		5	32.92±2.40 ^a	347.62±21.94 ^a	2.18±0.12 ^a	0.33±0.023 ^a
		10	27.55±1.69 ^b	328.46±8.67 ^b	1.87±0.03 ^b	0.25±0.020 ^b
		15	17.19±1.83 ^c	320.86±19.53 ^b	1.62±0.17 ^c	0.15±0.010 ^e
		20	14.43±1.00 ^e	308.20±4.19 ^b	1.37±0.20 ^d	0.14±0.002 ^e

注: 不同小写字母表示同一品种处理间的差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments within the same variety ($P<0.05$). Similarly hereinafter.

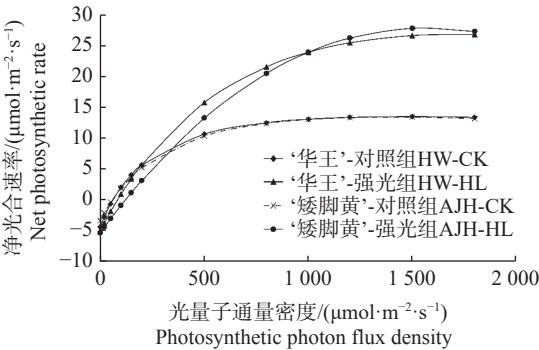


图 1 强光对小白菜光响应曲线的影响
Fig. 1 The effect of high light on the light response curve of bok choy

量子通量密度小于 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时略高于‘矮脚黄’, 在量子通量密度大于 1 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 略低于‘矮脚黄’。这表明在强光处理 10 d 时, ‘华王’比‘矮脚黄’在低光照强度下具有更高的光合速率, 能够更有效地利用可用的光能进行光合作用, 在高光照强度下, ‘华王’光合速率可能受到某些限制。

2.3 强光对小白菜光响应参数的影响 如表 2, 通过直角双曲线修正模型拟合光响应曲线后, 得出不同光强下小白菜的表观量子效率(AQY)、最大净光合速率($P_{n\text{max}}$)、光饱和点(LSP)、光补偿点

(LCP)、暗呼吸速率(R_d)。由表2可以看出强光下小白菜的表观量子效率(AQY)显著降低,与对照组呈现显著差异,其中‘华王’降低23.86%,‘矮脚黄’降低31.34%,‘矮脚黄’降低幅度略高于‘华王’。强光下‘华王’和‘矮脚黄’的最大净光合速率(Pn_{max})与对照相比均显著增加,‘华王’的增幅为49.70%,略低于‘矮脚黄’的增幅51.83%。强光下‘华王’和‘矮脚黄’的光饱和点(LSP)与对照组相比显著增加,光补偿点(LCP)和暗呼吸速率(R_d)与对照相比均显著增加。

2.4 强光对小白菜叶绿素荧光参数的影响 由表3可知,强光处理下‘华王’和‘矮脚黄’的Fv/Fm(PS II最大光能转化效率)呈下降趋势;与对照相比,强光处理下‘华王’和‘矮脚黄’的Fv/Fm显著降低,均在处理5 d时显著低于对照组,在处理20 d时达到最低值,处理20 d时,‘华王’的Fv/Fm与对照相比降低了12.82%,‘矮脚黄’的Fv/Fm与对照相比降低了19.44%。强光下‘华王’和‘矮脚黄’的实际光量子产量 $\Phi PS II$ 呈下降趋势,且在处理5~20 d时都显著低于对照组处理。‘矮脚黄’的整体变化规律虽然与‘华王’基本一致,但是下降幅度大于‘华王’,这表明两品种在强光下都受到了一定程度的光抑制,但‘矮脚黄’的光抑制程度略高于‘华王’,其光系统II(PS II)反应中心在强光下更易受损。

强光下‘华王’和‘矮脚黄’的非光化学猝灭系数NPQ先增加后降低,与对照相比,‘华王’和‘矮脚黄’在强光处理5 d的NPQ都显著高于对照组,强光处理10~20 d的NPQ虽然呈下降趋势但仍显著高于对照组。这表明两品种在强光处理初期均通过大幅提升NPQ耗散过剩光能,但‘矮脚黄’的NPQ增幅和后续降幅均更大,说明‘矮脚黄’的

光保护机制在长期光照中更易受到破坏。

强光下‘华王’和‘矮脚黄’的调节性能量耗散量子产量Y(NPQ)与NPQ变化基本一致,都呈现先增加后降低的趋势,与对照相比,‘华王’在强光处理5~10 d的Y(NPQ)显著高于对照组,处理10 d的与对照组相比差异不显著,处理20 d显著低于对照组;‘矮脚黄’的在强光处理下变化趋势与‘华王’基本一致。

强光处理下‘华王’和‘矮脚黄’的非调节性能量耗散量子产量Y(NO)都呈现增加趋势,与对照相比,在强光处理5~20 d时Y(NO)都显著高于对照组。‘矮脚黄’在强光处理下Y(NO)的增幅大于‘华王’,这表明‘矮脚黄’可能无法通过调节性机制有效平衡能量,容易导致光损伤积累。

强光下‘华王’和‘矮脚黄’的qP(光化学淬灭)均呈下降趋势,与对照相比,强光处理5~20 d两品种的qP均显著低于对照组。‘矮脚黄’在强光处理下的qP由0.75降至0.30,下降幅度约为60%,‘华王’由0.78降至0.45,下降幅度约为42.3%,‘矮脚黄’的下降幅度明显大于‘华王’,表明‘矮脚黄’PS II反应中心的开放比例显著降低,光能捕获能力受限。

‘华王’在强光处理下,ETR(电子传递速率)呈先增加后降低的趋势,在处理5 d时增加,在处理10~20 d逐渐降低。与对照相比,强光处理下‘华王’的ETR在处理5~10 d均显著高于对照组,在处理15~20 d显著低于对照组。‘矮脚黄’在强光处理下,ETR呈降低趋势,与对照相比,强光处理10 d的ETR显著低于对照组,在处理20 d时达到最低值。这表明‘华王’在强光处理初期通过短暂提升ETR增强光能利用,而‘矮脚黄’的ETR持续下降,表明‘矮脚黄’光合电子传递链在强光下受到

表2 强光对小白菜光响应参数的影响

Tab. 2 The effect of high light on the light response parameters of bok choy

品种 Variety	处理 Treatment	表观量子效率 AQY/(mol·mol ⁻¹)	最大净光合速率 Pn _{max} /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	光饱和点LSP/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	光补偿点LCP/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	暗呼吸速率R _d / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
‘华王’	CK-10d	0.088±0.002 ^a	13.52±0.2 ^b	1485.52±20.61 ^b	61.49±3.63 ^b	4.39±0.1 ^b
‘Huawang’	HL-10d	0.064±0.002 ^b	26.88±0.2 ^a	1716.23±20.34 ^a	83.51±3.01 ^a	5.03±0.1 ^a
‘矮脚黄’	CK-10d	0.067±0.002 ^a	13.44±0.3 ^b	1410.14±21.04 ^b	58.29±3.12 ^b	3.33±0.1 ^b
‘Aijiaohuang’	HL-10d	0.046±0.002 ^b	27.90±0.2 ^a	1574.91±20.37 ^a	121.20±3.68 ^a	5.29±0.2 ^a

表 3 强光对小白菜叶绿素荧光参数的影响

Tab. 3 Effects of high light on chlorophyll fluorescence parameters of bok choy

品种 Variety	光照强度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Light intensity	处理天数/d Treatment days	Fv/Fm	$\Phi\text{PS II}$	NPQ	Y(NPQ)	Y(NO)	qP	ETR
‘华王’ ‘Huawang’	300	0	0.82±0.01 ^a	0.62±0.02 ^a	0.35±0.03 ^b	0.25±0.02 ^b	0.10±0.01 ^b	0.78±0.01 ^a	120±5 ^a
		5	0.81±0.01 ^a	0.60±0.03 ^a	0.40±0.04 ^{ab}	0.30±0.03 ^{ab}	0.12±0.01 ^b	0.76±0.02 ^a	115±6 ^a
		10	0.80±0.02 ^a	0.58±0.04 ^{ab}	0.45±0.05 ^b	0.35±0.04 ^b	0.15±0.02 ^b	0.74±0.03 ^{ab}	110±7 ^{ab}
		15	0.79±0.02 ^a	0.55±0.05 ^b	0.50±0.06 ^a	0.40±0.05 ^a	0.18±0.03 ^{ab}	0.72±0.04 ^b	105±8 ^b
		20	0.78±0.03 ^a	0.53±0.06 ^b	0.48±0.05 ^{ab}	0.38±0.04 ^a	0.20±0.04 ^a	0.70±0.05 ^b	100±9 ^b
	1 500	0	0.82±0.01 ^a	0.62±0.02 ^a	0.35±0.03 ^b	0.25±0.02 ^b	0.10±0.01 ^b	0.78±0.01 ^a	120±5 ^a
		5	0.75±0.02 ^b	0.55±0.03 ^b	1.20±0.15 ^a	0.50±0.05 ^a	0.20±0.02 ^c	0.60±0.03 ^b	130±10 ^a
		10	0.72±0.03 ^b	0.50±0.04 ^c	1.00±0.12 ^b	0.45±0.04 ^b	0.25±0.03 ^b	0.55±0.04 ^c	115±12 ^b
		15	0.70±0.04 ^b	0.45±0.05 ^d	0.85±0.10 ^c	0.40±0.05 ^c	0.30±0.04 ^a	0.50±0.05 ^d	100±15 ^c
		20	0.68±0.05 ^b	0.40±0.06 ^c	0.70±0.08 ^d	0.35±0.04 ^d	0.35±0.05 ^a	0.45±0.06 ^c	90±18 ^d
‘矮脚黄’ ‘Aijiaohuang’	300	0	0.80±0.01 ^a	0.58±0.03 ^a	0.30±0.03 ^d	0.20±0.02 ^d	0.15±0.02 ^c	0.75±0.02 ^a	110±6 ^a
		5	0.78±0.02 ^{ab}	0.54±0.04 ^b	0.35±0.04 ^c	0.25±0.03 ^c	0.20±0.03 ^b	0.72±0.03 ^{ab}	100±7 ^b
		10	0.76±0.03 ^b	0.50±0.05 ^c	0.40±0.05 ^b	0.30±0.04 ^b	0.25±0.04 ^{ab}	0.68±0.04 ^b	90±8 ^c
		15	0.74±0.04 ^c	0.45±0.06 ^d	0.45±0.06 ^a	0.35±0.05 ^a	0.30±0.05 ^a	0.65±0.05 ^c	80±9 ^d
		20	0.72±0.05 ^c	0.40±0.07 ^c	0.42±0.05 ^{ab}	0.32±0.04 ^{ab}	0.35±0.06 ^a	0.62±0.06 ^c	75±10 ^d
	1 500	0	0.80±0.01 ^a	0.58±0.03 ^a	0.30±0.03 ^d	0.20±0.02 ^d	0.15±0.02 ^d	0.75±0.02 ^a	110±6 ^a
		5	0.70±0.03 ^b	0.45±0.04 ^b	1.50±0.20 ^a	0.60±0.06 ^a	0.30±0.03 ^c	0.50±0.04 ^b	100±10 ^b
		10	0.65±0.04 ^c	0.35±0.05 ^c	1.20±0.18 ^b	0.50±0.05 ^b	0.40±0.04 ^b	0.40±0.05 ^c	80±12 ^c
		15	0.62±0.05 ^d	0.25±0.06 ^d	0.90±0.15 ^c	0.40±0.06 ^c	0.50±0.05 ^a	0.35±0.06 ^d	60±15 ^d
		20	0.58±0.06 ^c	0.15±0.07 ^c	0.60±0.10 ^d	0.30±0.05 ^d	0.60±0.06 ^a	0.30±0.07 ^c	50±20 ^c

一定程度的损伤。

3 讨 论

过高的强光通常会导致植物的 Pn 下降、Ci 升高及 Tr 下降,这说明强光胁迫使植物光反应中心的光合作用效率下降,光反应中心可能因过剩光能累积而造成损伤,导致细胞间的正常气体交换受到干扰^[19–22]。一般情况下,如果强光胁迫导致 Gs 下降,同时 Ci 也降低,此时是由气孔因素造成的 Pn 下降;如果 Gs 降低,但 Ci 变化趋势与 Gs 相反,这种情况就是由非气孔因素造成的光合速率下降^[23–24]。强光处理后两品种小白菜叶片的 Ci 变化幅度较小,而 Pn 和 Gs 的变化规律基本一致,说明强光下小白菜叶片的 Pn 变化主要受气孔影响,与叶肉细胞的光合能力无关。

植物光响应曲线表征光合速率随光照强度的变化规律,具体表现在光响应参数方面,如表观量子效率(AQY)、最大净光合速率(Pn_{max})、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、暗呼吸速率(R_d)。表观量子效率是光合作用中光能转化为化学能的效率。表观量子效率可以反映植物利用弱光的能力,值越大,说明吸收与转换光能的色素蛋白复合体越多,在弱光下的适应能力越强^[25]。LCP 代表植物叶片对 CO₂ 的吸收与释放相等时的光照强度,其值越低,对弱光的适应能力越强,此外植物会通过降低 R_d 来维持弱光下的碳平衡;LSP 是植物 Pn 达到峰值时的光照强度,反映的是植物对强光的适应能力,LSP 越大,说明植物对强光的利用能力越强^[26]。在强光条件下,植物可能会通过增加表观量子效率来提高光能的利用效率。在本研究

中,通过拟合强光处理后 10 d 两品种小白菜的光响应曲线,发现强光处理后小白菜的表观量子效率有所下降,这说明长时间强光对小白菜产生了一定程度的光抑制,这与潘月等^[27]的研究结果一致。本研究中,强光处理后,两品种小白菜的 Pn_{max} 、LSP、LCP、 R_d 与对照相比均有所上升,这说明强光对小白菜的光响应特性有所影响,推测两品种在强光下通过上调光合关键酶活性或优化电子传递链来增强光合潜力,在强光处理后能够耐受更高强度的光照,但达到光饱和后,光合系统的电子传递速率或 Rubisco 羧化效率成为限制因子,强光下植物需投入更多能量用于维持代谢稳态和修复光损伤。

叶绿素荧光参数反映植物在逆境下对光能的吸收、传递和转换等特征,在植物受到强光胁迫时,可能会发生光合作用的抑制,导致叶绿素荧光参数的改变^[28-29]。环境胁迫可导致叶片气孔关闭,进而阻断 CO_2 到 O_2 的电子流并引起 PS II 反应中心能量转化效率的下降^[30],因此, NPQ 常被作为早期胁迫检测的敏感参数^[31-32]。这一现象表明在光抑制条件下,叶片能够通过增加热耗散的方式,有效维护光合机构的稳定性,防止其受到因光强而造成的破坏。在本研究中,两品种小白菜在强光处理后,与对照相比, Fv/Fm 整体呈下降趋势, NPQ 在 0 ~ 5 d 增加, 5 ~ 20 d 呈下降趋势, ‘矮脚黄’的 NPQ 增幅更大但后期降幅也更显著,表明 ‘矮脚黄’光保护机制在持续强光下较弱,更容易受到损伤。说明强光处理初期,植物通过热耗散机制耗散过剩光能, NPQ 显著升高说明过剩光能主要以热耗散形式消耗掉,而且发生 PS II 光保护生理过程,这也说明通过非光化学耗散激发能可在一定程度上减少传递到 PS II 反应中心的激发能,但长期胁迫可能导致叶黄素循环的失效,类囊体膜可能受到损伤,导致光反应的过剩光能并不能通过叶片自身的调节耗散掉。PS II 反应中心的氧化损伤会影响 PS II 的光化学效率和电子传递, $\Phi PS II$ 代表实际光合量子产量, ETR 表示电子传输速率,本实验中强光处理下 $\Phi PS II$ 的降低说明强光使小白菜叶片的 PSII 受损^[33],造成叶片光合系统中线性传递和转化过程受到影响^[34-35],导致小白菜叶片的 ETR 也有所下降。这说明实际光合量子产量的降低可能会引起类囊体膜蛋白磷酸化,促

进环式电子传递和跨膜质子动力势^[36],进而影响植物的正常光合作用。qP 表示光化学猝灭系数,能够反映 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的数量,即吸收光能可用于光化学电子传递的比例^[37]。强光下,两种小白菜 qP 显著下降,变化趋势与 $\Phi PS II$ 相同,说明 PS II 反应中心用于光化学电子传递的比例与实际光合量子产量是相匹配的^[38]。Y(NPQ)代表的是通过调节性的光保护机制耗散为热的能量(调节性能量耗散的量子产量),是光保护的重要指标; Y(NO)代表的是被动耗散为热量及发出荧光的能量(非调节性能量耗散的量子产量),是光损伤的重要指标^[38-39],主要由关闭态的光反应 II 中心贡献^[40]。Y(NPQ)升高表明植物受到了过剩的光强,而 Y(NO)的升高则说明光化学能量转换和保护性的调节机制(如热耗散)不足以将植物吸收的光能完全消耗掉^[41]。本研究中,两个品种的小白菜在强光下, Y(NPQ)与 Y(NO)都有所增加,说明强光会发生在 PSII 蛋白复合体的多个位点上^[42],高光可能使 PSII 反应中心被氧化损伤,从而导致 Y(NO)的升高,这一升高说明 PS II 复合体已经受损并且 D1 蛋白周转一定程度上被破坏,而 Y(NPQ)增加表明此时植株体内仍有光化学能量转换机制(如 NPQ 机制)或者光保护调控机制(如热耗散)进行吸收光能的耗散。

在本研究中,强光处理下 ‘华王’和 ‘矮脚黄’的 Pn 、Gs、Tr 均在第 5 d 显著高于对照组,随后逐渐下降, Ci 与对照相比变化不大,但也呈下降趋势。两个品种的变化呈现相似趋势,但 ‘矮脚黄’Tr 下降幅度比 ‘华王’大,这反映出 ‘华王’可能通过增强蒸腾作用缓解强光胁迫,而 ‘矮脚黄’因气孔调控能力较弱,导致水分利用效率下降。

光系统 II (PS II) 的动态修复能力对植物耐强光能力有重要影响^[43]。 ‘华王’在强光下 ETR 先升后降,说明 ‘华王’通过短暂增强电子传递缓解光抑制,同时激活 PSII 修复机制(如 D1 蛋白周转)。而 ‘矮脚黄’ETR 持续下降, Fv/Fm 和 $\Phi PS II$ 的降幅比 ‘华王’更大,推测 ‘矮脚黄’可能是由于 D1 蛋白合成受阻或降解加速,导致 PSII 反应中心无法及时修复。非光化学猝灭(NPQ)是光保护的核心机制。 ‘华王’在强光处理 5 d 时, NPQ 显著升高,表明 ‘华王’可能通过叶黄素循环有效耗散过剩光能;而 ‘矮脚黄’NPQ 比 ‘华王’的增幅更大,但后期降幅

更显著,推测‘矮脚黄’依赖 NPQ 的光保护机制更易饱和或受损。此外,‘华王’在强光处理 15~20 d, Y(NPQ)仍维持较高水平,而‘矮脚黄’Y(NPQ)呈现显著下降,表明‘华王’能持续激活调节性能量耗散,‘矮脚黄’则可能通过 Y(NO)进行耗散,导致光损伤积累,推测这一差异可能与叶黄素循环关键酶(如 VDE)的活性或基因表达有关。

4 结 论

强光处理初期,‘华王’和‘矮脚黄’的 Pn、Gs、Tr 升高,随后下降,Ci 呈下降趋势,表明短时光强利于光能利用,长期则导致光抑制。‘矮脚黄’Tr 下降幅度大,水分利用效率低,且 Pn 变化主要受气孔影响。通过测定两品种在 10 d 的光响应曲线,‘华王’和‘矮脚黄’净光合速率均呈现先增加后趋于平缓的趋势;强光处理下,‘华王’的净光合速率增长速度略低于‘矮脚黄’,两品种表观量子效率降低,最大净光合速率等参数增加。

强光下,两品种 Fv/Fm、ΦPS II 下降,‘矮脚黄’下降更明显,表明光系统 II 受损,‘矮脚黄’受光抑制更严重。两品种的调节性能量耗散量子产量 Y(NPQ)与 NPQ 变化基本一致,都呈现先增加后降低的趋势,与‘华王’相比,‘矮脚黄’的变化幅度较大。两品种的非调节性能量耗散量子产量 Y(NO)都呈现增加趋势,‘矮脚黄’在强光下 Y(NO)的增幅大于‘华王’。强光下两品种的 qP(光化学淬灭)均呈下降趋势,‘矮脚黄’在强光处理下的 qP 由 0.75 降至 0.30,下降幅度约为 60%,‘华王’由 0.78 降至 0.45,下降幅度约为 42.3%,‘矮脚黄’的下降幅度明显大于‘华王’。在强光处理下,‘华王’ETR(电子传递速率)呈先增加后降低的趋势,‘矮脚黄’ETR 则呈持续降低趋势。

综上所述,持续长时间强光下‘矮脚黄’的各项指标变化幅度较大,光系统更易受到损伤,选择在强光下种植的品种时‘华王’的光合维持和抗氧化后期激活可能更具优势,此外,环境因素如水分、温度等也会影响品种表现,需结合具体栽培条件判断。

参考文献:

- [1] 罗蛟,丁新宇,徐燕妮,等.生长光强对黄瓜叶片光合机构活性影响研究[J]. *植物生理学报*, 2022, 58(9): 1790–1800. <https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.100038>
- [2] 王玉卓,谷宇琛,巢建国,等.强光胁迫对茅苍术生长、生理生化及关键酶基因表达的影响[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2020, 26(10): 119–127. <https://doi.org/10.13422/j.cnki.syfx.20201011>
- [3] 陈建明,俞晓平,程家安.叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用[J]. *浙江农业学报*, 2006, 18(1): 51–55. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1524.2006.01.012>
- [4] 陈子义,赵硕,章竞瑾,等.光照强度对普通白菜生长特性及膳食纤维含量的影响[J]. *上海农业学报*, 2021, 37(6): 10–15. <https://doi.org/10.15955/j.issn1000-3924.2021.06.03>
- [5] 丁娟娟,杨振超,王鹏勃,等.LED 光强对不结球小白菜生长与光合特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 113–118. <https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwf.2015.03.007>
- [6] Samuolienė G, Brazaitytė A, Jankauskienė J, et al. LED irradiance level affects growth and nutritional quality of Brassica microgreens[J]. *Open Life Sciences*, 2013, 8(12): 1241–1249. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0246-1>
- [7] Schuster M, Yang G, Schöttler M A, et al. Limited responsiveness of chloroplast gene expression during acclimation to high light in tobacco[J]. *Plant Physiology*, 2019, 182(1): 424–435. <https://doi.org/10.1104/pp.19.00953>
- [8] Kim T W, Michniewicz M, Bergmann D C, et al. Brassinosteroid regulates stomatal development by GSK3-mediated inhibition of a MAPK pathway[J]. *Nature*, 2012, 482(7385): 419–422. <https://doi.org/10.1038/nature10794>
- [9] Vaistij F E, Goldschmidt-clermont M, Wostrikoff K, et al. Stability determinants in the chloroplast psbB/T/H mRNAs of *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. *The Plant Journal*, 2000, 21(5): 469–482. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3113x.2000.00700.x>
- [10] 李雯琳,郁继华,张国斌,等.LED 光源不同光质对叶用莴苣幼苗叶片气体参数和叶绿素荧光参数的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(1): 47–51. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-4315.2010.01.010>
- [11] 吴琼. 香果树对高光胁迫的生理响应及转录组分析[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023. doi:10.27801/d.cnki.gshyy.2023.000385
- [12] 付倩倩,李航霄,吴海龙,等.光强对缘管浒苔 (*Ulva linza*) 光合生理特性和短期温度效应的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(5): 967–974. <https://doi.org/10.11693/hyh20180400074>
- [13] 徐凯,郭延平,张上隆,等.草莓叶片光合作用对强光的响应及其机理研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 73–78.
- [14] 柴胜丰,韦霄,史艳财,等.强光胁迫对濒危植物金花茶幼苗生长和叶绿素荧光参数的影响[J]. *植物研究*, 2012, 32(2): 159–164.
- [15] 林绿,李志强,蔚露,等.苹果两种树形叶片对光强和 CO₂ 浓度互作的光合响应及光抑制特性[J]. *园艺学*

- 报, 2020, 47(11): 2073–2085. <https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0062>
- [16] 高璐, 李晓峰, 董言笑, 等. 不结球白菜光合作用及叶绿素荧光参数分析[J/OL]. 分子植物育种, 2023, 23: 1–8.
- [17] 庞强强, 孙晓东, 蔡兴来, 等. 海南夏秋季设施叶菜栽培技术[J]. 长江蔬菜, 2021(5): 27–28.
- [18] 黄俊, 郭世荣, 吴震, 等. 6个不结球白菜品种光合作用特性的研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(6): 1183–1189. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-4025.2006.06.015>
- [19] 秦舒浩, 王娜, 张文莉. 高温强光胁迫对西葫芦幼苗光合生理特性及荧光参数的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2011, 32(1): 26–29.
- [20] 邹琦, 许长成, 赵世杰, 等. 午间强光胁迫下 SOD 对大豆叶片光合机构的保护作用[J]. 植物生理学报, 1995, 21(4): 397–401.
- [21] 曾光辉. 杨梅光抑制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [22] 孙永娣, 王玉卓, 谷巍, 等. 强光胁迫对茅苍术光合荧光参数的影响[J]. 北方园艺, 2021(22): 112–116. <https://doi.org/10.11937/bfy.20211111>
- [23] 冯建灿, 张玉洁. 喜树光合速率日变化及其影响因子的研究[J]. 林业科学, 2002, 38(4): 34–39. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-7488.2002.04.006>
- [24] 王翼龙. 黄土高原半干旱区两典型林分主要树种光合耗水特性及影响因素研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [25] 王亚楠, 董丽娜, 丁彦芬, 等. 遮阴对4种紫萁属植物光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 769–777. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202003.004>
- [26] 高渐飞, 周玮, 孙燕, 等. 干旱胁迫对药用植物马比木叶片光合特性的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2022, 35(4): 549–556. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0972.2022.04.006>
- [27] 潘月, 张宪权, 叶康, 等. 不同八仙花品种对遮阴和强光处理的生理响应与评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(1): 36–48. [https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu\(nat.sci.\).2021.01.006](https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2021.01.006)
- [28] 冯建灿, 胡秀丽, 毛训甲. 叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用[J]. 经济林研究, 2002, 20(4): 14–18. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8981.2002.04.004>
- [29] Barták M, Hájek J, Vrábliková H, et al. High-light stress and photoprotection in *Umbilicaria antarctica* monitored by chlorophyll fluorescence imaging and changes in zeaxanthin and glutathione[J]. *Plant Biology*, 2004, 6(3): 333–341. <https://doi.org/10.1055/s-2004-820877>
- [30] Sáez P L, Bravo L A, Latsague M I, et al. Light energy management in micropropagated plants of *Castanea sativa*, effects of photoinhibition[J]. *Plant Science*, 2013, 201–202: 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.11.008>
- [31] 师生波, 陈文杰, 师瑞, 等. 青海香日德农业区春小麦旗叶 PS II 光化学效率及对强太阳光的适应[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2613–2622. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.20140618.004>
- [32] Osório M L, Osório J, Romano A. Photosynthesis, energy partitioning, and metabolic adjustments of the endangered Cistaceae species *Tuberaria major* under high temperature and drought[J]. *Photosynthetica*, 2013, 51(1): 75–84. <https://doi.org/10.1007/s11099-012-0080-0>
- [33] 杜尧东, 李键陵, 王华, 等. 高温胁迫对水稻剑叶光合和叶绿素荧光特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2541–2548. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2012.0365>
- [34] 宋旭丽, 胡春梅, 孟静静, 等. NaCl 胁迫加重强光胁迫下超大甜椒叶片的光系统 II 和光系统 I 的光抑制[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 681–686.
- [35] 卢广超, 许建新, 薛立, 等. 低温胁迫对4种幼苗的叶绿素荧光特性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(2): 44–49. <https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2014.02.014>
- [36] 路涛. 亚高温强光胁迫下番茄幼苗光抑制及光保护机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [37] Galvez-valdivieso G, Fryer M J, Lawson T, et al. The high light response in *Arabidopsis* involves ABA signaling between vascular and bundle sheath cells[J]. *The Plant Cell*, 2009, 21(7): 2143–2162. <https://doi.org/10.1105/tpc.108.061507>
- [38] Kitao M, Tobita H, Utsugi H, et al. Photosynthetic traits around budbreak in pre-existing needles of Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) seedlings grown under elevated CO₂ concentration assessed by chlorophyll fluorescence measurements[J]. *Tree Physiology*, 2012, 32(8): 998–1007. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps048>
- [39] Kramer D M, Johnson G, Kiirats O, et al. New fluorescence parameters for the determination of Q_A redox state and excitation energy fluxes[J]. *Photosynthesis Research*, 2004, 79(2): 209–218. <https://doi.org/10.1023/B: PRES.0000015391.99477.0d>
- [40] 师生波, 李天才, 李妙, 等. 土壤干旱和强光对高山嵩草叶片 PSII 反应中心非光化学猝灭的交互影响分析[J]. *植物生理学报*, 2015, 51(10): 1678–1686. <https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2015.1020>
- [41] Pallardy S G. Physiology of woody plants[M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [42] 娄永峰. 毛竹光保护及相关基因功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [43] Li A J, You T T, Pang X J, et al. Structural basis for an early stage of the photosystem II repair cycle in *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5211. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49532-2>

Effect of high light on the photosynthetic capacity of bok choy (*Brassica campestris* ssp. *chinensis*)

Zhao Ying[#], Zhang Chang, Wang Xu^{*}

(School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: Two main varieties of bok choy cultivated in Hainan, ‘Huawang’ and ‘Aijiaohuang’ were selected to investigate the effects of high light on their photosynthetic capacity. High light stress was simulated using LEDs at an intensity of $1500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. The results indicated that the high light treatment significantly increased the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), and transpiration rate (Tr) of both the bok choy varieties, ‘Huawang’ and ‘Aijiaohuang,’ at the initial stage (0 ~ 5 days), and decreased the intercellular CO₂ concentration (Ci). However, prolonged high light stress (5 ~ 20 days) led to a continuous decline in Pn, Gs, and Tr, and Ci tended to stabilize. The light response curve after 10 days of high light treatment showed that the maximum net photosynthetic rate (Pn_{max}) of the leaves in both the bok choy varieties was significantly increased, while the apparent quantum efficiency (AQY) significantly decreased. Under high light, both the bok choy varieties decreased significantly in maximum photochemical efficiency of photosystem II (PS II) represented by Fv/Fm, actual photochemical quantum yield (ΦPSII), and photochemical quenching coefficient (qP), with a greater decline observed in Aijiaohuang. The non-photochemical quenching coefficient (NPQ) of both the varieties significantly increased at 5 days of high light stress, but under prolonged high light stress, NPQ and the regulated energy dissipation quantum yield Y(NPQ) decreased, while the unregulated energy dissipation quantum yield Y(NO) continuously increased. Moreover, the electron transport rate (ETR) under high light showed an initial increase followed by a decrease in the bok choy variety Huawang, while the ETR continuously declined in Aijiaohuang. Overall analysis indicated that Huawang exhibited a higher adaptive capacity for photosystem repair under prolonged high light conditions, whereas Aijiaohuang responded rapidly in the short term but demonstrated a weaker photoprotection mechanism.

Keywords: bok choy; high light treatment; photosynthetic rate; chlorophyll fluorescence

(责任编辑:叶 静)