

甘蔗高光效新品种筛选与光合潜力分析

安东升^{1,4}, 聂虎子², 刘 洋³, 赵宝山^{1,4}, 严程明^{1,4}, 孔 冉¹, 苏俊波^{1*}

1. 中国热带农业科学院亚热带作物研究所/广东省旱作节水农业工程技术研究中心, 广东湛江 524091; 2. 广东省农业技术推广中心, 广东广州 510515; 3. 嘉兴职业技术学院, 浙江嘉兴 314036; 4. 国家农业绿色发展长期固定观测湛江试验站, 广东湛江 524091

摘 要: 筛选高光效甘蔗新品种并评价其光合潜力可为糖料蔗高质量发展及维护食糖供给安全提供保障。本研究采用叶绿素荧光技术快速测定 3 个经典的商业主栽品种和 10 个甘蔗新品种的光反应和暗反应参数, 计算基于 Lake-model 的叶绿素荧光参数, 同时用光合电子流 (J) 对光响应的机理模型拟合光响应曲线, 对阴天和晴天下不同甘蔗品种光合电子传递特征参数进行比较分析。结果表明: 低光和高光下光能在光合电子传递与可调节性能量耗散 (Φ_{NPQ}) 之间达到平衡, 只有在中光下非调节性能量耗散 (Φ_{NO}) 在不同品种间出现差异, 但这并不代表出现光损伤, 而是由于不同甘蔗品种的能量分配在光合有效辐射 (PAR) 增加的过程中呈现出差异化的过渡模式。所有品种在阴天的初始光能利用率 (α_e) 均高于晴天, 但在相同 PAR 下阴天的光合电子流远低于晴天。热甘 16117 和热甘 1997 分别在阴天和晴天的光量子效率 (Φ_{II}) 最高, 热甘 16239 虽然在中、低光下光量子效率不及 ROC22 和热甘 1997, 但其中光下非调节性能量耗散最低, 且在高光下具有较强的饱和光强 (PAR_{sat}) 和最大电子传递速率 (J_{max}), 同时光量子效率与 ROC22、热甘 1997 差异不显著。而基于近 5 a 试验地阴天和晴天权重占比计算的总和光合电子传递能力指数由大到小依次为: 热甘 1997 (21.93)>ROC22 (21.43)>ROC16 (20.62)>热甘 16239 (20.27)>桂柳 05136 (19.43)>热甘 11713 (19.30)>热甘 1462 (19.29)>热甘 14291 (19.03)>热甘 16117 (18.94)>热甘 1339 (18.93)>热甘 1876 (18.08)>热甘 1 (17.41)>热甘 11559 (16.84)。综上, 热甘 1997 和热甘 16239 可作为甘蔗高光效新品种。

关键词: 甘蔗; 高光效; 新品种; 筛选; 光合潜力

中图分类号: S566.1

文献标识码: A

Screening of New Sugarcane Varieties with High Light Efficiency and Photosynthetic Potential Analysis

AN Dongsheng^{1,4}, NIE Huzi², LIU Yang³, ZHAO Baoshan^{1,4}, YAN Chengming^{1,4}, KONG Ran¹, SU Junbo^{1*}

1. South Subtropical Crop Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Guangdong Engineering Technology Research Center for Dryland and Water Saving Agriculture, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 2. Agro-Tech Extension Center of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510515, China; 3. Jiaxing Vocational and Technical College, Jiaxing, Zhejiang 314036, China; 4. Zhanjiang Experimental and Observation Station for National Long-term Agricultural Green Development, Zhanjiang, Guangdong 524091, China

Abstract: Screening new sugarcane varieties with high light efficiency could guarantee the high-quality development and sugar safety. Chlorophyll fluorescence parameters were measured and calculated from Lake-model for 3 commercial varieties and 10 new varieties to investigate the sugarcane photosynthetic potential under cloudy and sunny day through the mechanism model of photosynthetic electron flux (J) response to light. The results showed that light energy balanced between photosynthetic electron transport and regulated energy dissipation (Φ_{NPQ}) under low and high light, the ap-

收稿日期 2022-08-22; 修回日期 2022-10-30

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 320MS113); 农业农村部农业技术试验示范与服务支持项目 (No. 102125221-630050009026); 广东省农业农村厅省级乡村振兴战略专项资金项目“特色经济作物种植机械化技术示范推广”。

作者简介 安东升 (1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 热带旱作生理生态。*通信作者 (Corresponding author): 苏俊波 (SU Junbo), E-mail: junbosu@126.com。

pearance of increased non-regulated energy dissipation (Φ_{NO}) under middle light resulted from the different transition mode among each sugarcane varieties according to increasing photo active radiation (PAR) other than photo-damage. Compared with in sunny day, the initial light utilization rate (α_e) of all sugarcane varieties was significantly higher in cloudy day, but J showed sharp decrease at the same PAR level. RG16117 and RG 1997 exhibited the highest photo-quantum efficiency (Φ_{II}) in cloudy and sunny day respectively, which showed no significantly difference between RG16239 and RG1997 under high light. Φ_{II} of RG16239 was lower than ROC22 and RG1997 under low and middle light with the lowest Φ_{NO} , but the saturate PAR and maximum J were relatively high under high light. The photosynthetic electron transport capacity index (J_{PT}) based on the weight ratio of cloudy and sunny days in recent 5 years exposed as RG1997 (21.93)>ROC22 (21.43)>ROC16 (20.62)>RG16239 (20.27)>GL05136 (19.43)>RG11713 (19.30)>RG1462 (19.29)>RG14291 (19.03)>RG16117 (18.94)>RG1339 (18.93)>RG1876 (18.08)>RG1 (17.41)>RG11559 (16.84), which made RG1997 and RG16239 high light efficiency varieties.

Keywords: sugarcane; high light efficiency; new varieties; screening; photosynthetic potential

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.03.007

作为我国重要的农产品和战略物资, 糖料蔗的稳定与高质量发展是维护我国食糖供给安全的必要保障。由于品种单一、退化严重、单产波动大、机械化水平低而造成的甘蔗种植收益产出比低是甘蔗产业面临的主要问题^[1]。蔗糖产量主要靠新品种选育和栽培模式革新实现, 构成蔗糖产量的主要因素包括含糖量及由单茎重和有效茎数决定的蔗茎产量。在相同环境背景下, 有效茎形成主要受甘蔗品种分蘖率^[2]和宿根发株率^[3]等遗传背景影响; 单茎重和糖分的积累转运均由叶片光合作用相关的基因与蛋白反馈直接调控光合作用进程决定^[4]。

作物高光效种质的筛选指标分为理想株型指标、光合生理指标、群体光合能力指标和光合产物指标^[5]。高光效在粮、棉、油、糖等农业战略农作物中已有较为广泛研究。其中, 在主粮作物水稻^[6]、小麦^[7]、玉米^[8], 马铃薯^[9]和甘薯^[10]上均形成了较为系统的高光效种质筛选方法; 在棉花上, 综合株型特征、光合荧光特性、干物质生产与产量等系统阐释了不同基因型棉花高光效的生理基础^[11]; 在主要油料作物中, 通过气体交换参数对大豆开展光合、气孔、水分 3 个主成分分析, 明确适合育种需要的高光效大豆种质群类^[12], 同时在大豆光能高效利用的分子调控机制方面也有较为深入研究^[13], 通过光合特性与农艺株型联合分析为不同油菜和花生高光效品系的筛选奠定扎实的基础^[14-15]。

上述研究主要采用光合生理与光合株型指标, 部分研究配合叶绿素相对含量 (SPAD)、农艺性状等指标, 部分研究辅以产量和品质指标。针对甘蔗的研究主要集中在能源甘蔗群体光合生

产能力与重要株型参数的关系分析, 明确了不同甘蔗品种叶面积指数, 单位叶面积净同化速率与生长速率, 干物质重量之间的关系, 得出以作物生长率作为群体光合生产力的衡量指标^[16]; 刘杨杨^[17]等利用不同模型拟合并比较不同甘蔗品种 CO₂ 响应参数差异, 进而评价甘蔗光合作用潜力。作为光合作用的探针, 叶绿素荧光能够快速无损检测光合系统运转状况^[18], 光合电子流对光响应的机理模型被用于拟合典型 C₃ 植物光响应曲线^[19-21], 但在 C₄ 作物中的应用尚未见报道。

本研究采用叶绿素荧光技术, 对 3 个经典商业主栽品种和 10 个甘蔗新品种的光暗反应参数进行快速测定, 通过多点测量、曲线拟合的方式, 对阴天和晴天下不同甘蔗品种光合电子传递特征参数进行比较分析, 为高光效的甘蔗新品种的快速筛选提供理论与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为中国热带农业科学院南亚热带作物研究所自主选育的 10 个甘蔗新品种: 热甘 16117、热甘 1876、热甘 1997、热甘 1339、热甘 11713、热甘 1、热甘 1462、热甘 14291、热甘 16239、热甘 11559, 对照材料为新台糖 22 号 (ROC22)、新台糖 16 号 (ROC16) 和桂柳 05136。试验于 2021 年 9 月—2022 年 1 月在中国热带农业科学院南亚热带作物研究所甘蔗新品种选育综合试验基地进行 (21°08'N, 110°16'E, 海拔 16 m), 试验期间环境背景数据见图 1。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 2021 年 9 月 9 日布置桶栽试

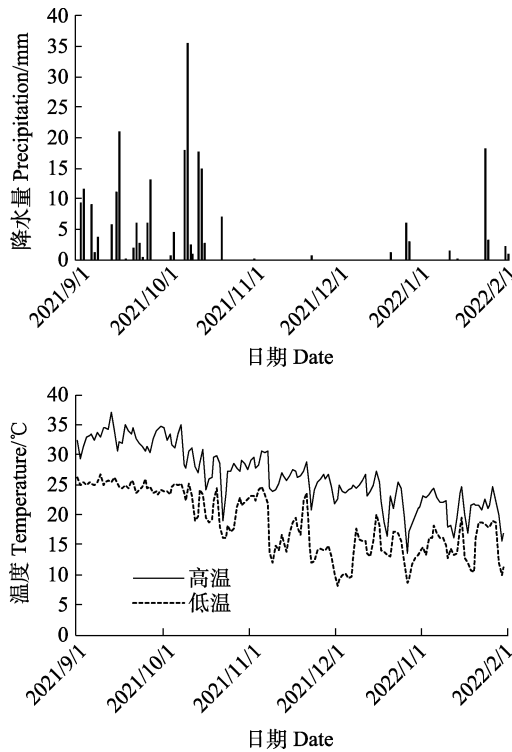


图1 试验期间日降水量、最高和最低气温

Fig. 1 Daily precipitation, highest and lowest temperature during experiment

验,栽培桶口径40 cm、底径30 cm、高45 cm,每桶种植4段,每段1个芽,每个品种种植12桶,置于硬化地面上,保证充分的水肥供应。基质配比为红壤:有机质=9:1,干容重为 1.24 g/cm^3 ,基质填充至桶内40 cm高度。

1.2.2 测定项目与方法 (1)待甘蔗生长至拔节初期,每个品种筛选长势均匀一致的3桶,采用便携式叶绿素荧光仪(MINI-PAM-II,德国WALS)分别测定上部正序3片完全展开叶在阴天(2022年1月14—15日)和晴天(2022年1月16—17日)上午不同时刻的光反应参数,稳态荧光(F_s)和饱和光下最大荧光(F_m'),计算光量子效率 $\Phi_{II}=(F_m'-F_s)/F_m'^{[22]}$;光合电子流 $J=\text{PAR} \times 0.84 \times 0.50 \times \Phi_{II}$,其中,0.84为经验性吸光系数,0.50为假设天线色素吸收的光能被2个光系统平均分配^[23],阴天采用人工光源测定PAR为26、46、66、92、128、195、292、430、641、835、1168 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光反应参数,每个梯度适应时间90 s;晴天测定上午不同时刻自然光下[PAR每跨越100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]至少包含1个测量点PSII达到稳定后的光反应参数,每个品种测24个点上用于曲线拟合。

(2)采用人工光源测定充分光适应后+1叶片

中部叶位低光[PAR为190 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、中光[PAR为625 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]和高光[PAR为1150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]下光反应参数,方法同1.2.2-(1),用黑布遮挡30 min后测定初始荧光(F_o)和饱和光强下最大荧光(F_m),计算潜在最大光能利用效率 $F_v/F_m=(F_m-F_o)/F_m$,非调节性能量耗散 $\Phi_{NO}=1/[\text{NPQ}+1+q_L(F_m/F_o-1)]$,其中, $q_L=(F_o'/F_s)(F_m'-F_s)/(F_m'-F_o')^{[22]}$, $\text{NPQ}=F_m/F_m'-1$,光反应下稳态最小荧光 $F_o'=F_o/[(F_v/F_m)+(F_o/F_m')]$ ^[24];可调节性能量耗散 $\Phi_{NPQ}=1-\Phi_{II}-\Phi_{NO}$ 。每个品种重复3次。

(3)参考叶子飘等^[21]研究结果,采用直角双曲线修正模型拟合 J 与PAR之间的关系,拟合初始光能利用效率(a_e)、饱和光强(PAR_{sat})及最大电子传递速率(J_{max}),详见式①~③。

$$J = a_e \times \frac{1 - \beta_e \times \text{PAR}}{1 + \gamma_e \times \text{PAR}} \times \text{PAR} \quad (1)$$

$$\text{PAR}_{\text{sat}} = \frac{\sqrt{(\beta_e + \gamma_e) / \beta_e} - 1}{\gamma_e} \quad (2)$$

$$J_{\text{max}} = a_e \times \left(\frac{\sqrt{\beta_e + \gamma_e} - \sqrt{\beta_e}}{\gamma_e} \right)^2 \quad (3)$$

式中, β_e 和 γ_e 代表植物天线色素分子参数。

利用PAR- J 拟合曲线与横坐标的面积衡量不同甘蔗品种在阴天[$b=400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $a=0$]、晴天[$b=1800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $a=0$]及总和光合电子传递能力指数 J_{PC} 、 J_{PS} 和 J_{PT} 。

$$J_P = \int_a^b a_e \times \frac{1 - \beta_e \times \text{PAR}}{1 + \gamma_e \times \text{PAR}} \times \text{PAR} \, d\text{PAR} \quad (4)$$

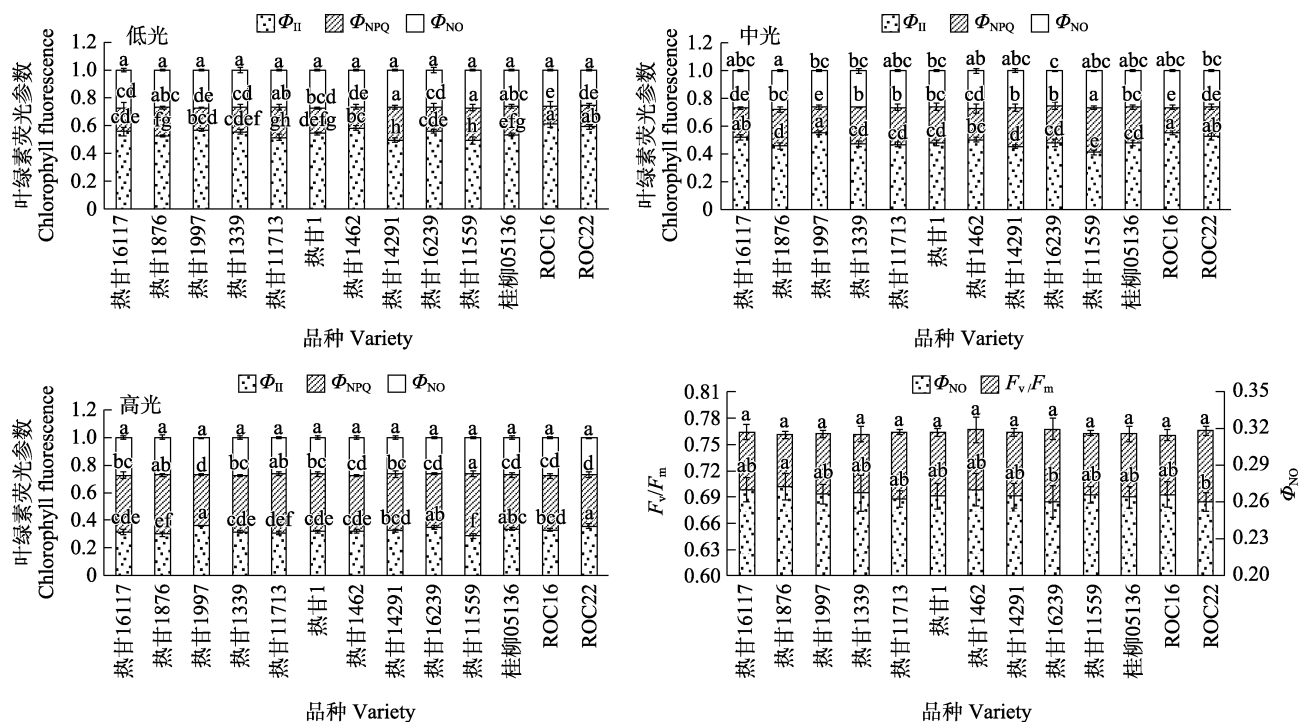
1.3 数据处理

采用Excel软件进行数据统计,利用Slide Write Plus for Windows (Version 7.0)软件将曲线与参数拟合。

2 结果与分析

2.1 不同甘蔗品种叶绿素荧光特性分析

基于Lake-model的叶绿素荧光参数对不同甘蔗品种在低光、中光、高光下叶片能量平衡分析图2,结果表明,低光条件下, Φ_{II} 最高和最低的3个品种分别为ROC16、ROC22、热甘1462和热甘14291、热甘11559、热甘11713,且ROC16的 Φ_{II} 显著高于除ROC22之外的其他品种,热甘14291和热甘11559的 Φ_{II} 则显著低于除热甘11713之外的其他品种; Φ_{NPQ} 在不同品种之间的变化趋



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

图 2 不同甘蔗品种叶绿素荧光特性

Fig. 2 Chlorophyll fluorescence characters of different sugarcane varieties

势与 Φ_{II} 相反, 热甘 14291 和热甘 11559 最高而 ROC16 最低; Φ_{NO} 在不同品种之间差异不显著。

中光条件下, Φ_{II} 最高和最低的 3 个品种分别为 ROC16、热甘 1997、ROC22 和热甘 11559、热甘 14291、热甘 1876, ROC16 和热甘 1997 的 Φ_{II} 显著高于除 ROC22 和热甘 16117 之外的其他品种, 热甘 11559 显著低于其他品种; Φ_{NPQ} 表现为热甘 11559 显著高于 ROC16 和热甘 1997, 而 Φ_{NO} 则表现为热甘 1876 和热甘 1462 显著高于热甘 16239。

高光条件下, Φ_{II} 最高和最低的 3 个品种分别为 ROC22、热甘 1997、热甘 16239 和热甘 11559、热甘 1876、热甘 11713, 且 ROC22 和热甘 1997 显著高于除热甘 16239 之外的其他品种, 热甘 11559 显著低于除热甘 1876 之外的其他品种; 热甘 11559、热甘 1876 和热甘 11713 的 Φ_{NPQ} 最高, 显著高于 ROC22 和热甘 1997, Φ_{NO} 在不同品种之间差异不显著。

F_v/F_m 在不同品种之间差异不显著, 说明不同甘蔗品种拥有相同的潜在最大光能利用效率。 Φ_{NO} 对光照强度的变化不敏感, 将不同光强下的 Φ_{NO} 汇总分析结果表明, 除热甘 1876 的显著高于热甘 16239 和 ROC22 外, 其余品种之间的差异并不显著。

2.2 不同甘蔗品种的光合潜力分析

阴天条件下, 所有品种的 PAR-J 响应曲线均表现为先上升后趋于稳定 (图 3)。对不同品种的 α_e 、 PAR_{sat} 和 J_{max} 的拟合结果表明, ROC16 和热甘 16117 分别具有最高的初始光能利用效率和最大电子传递速率, 总体上, 除 ROC22 之外初始光能利用效率高的品种, 其最大电子传递速率小。饱和光强代表品种能够承受环境光合能量输入的能力, ROC16 和热甘 14291 同时具备较高的初始光能利用效率及饱和光强。由于弱光环境下不需考虑光抑制的影响, 因此, 最大电子传递速率大, 且随着光照的增强越早达至最大电子传递速率的品种光合效率越高。可确定热甘 16117 和热甘 11713 的 J_{PC} 最高 (表 1), 可作为弱光下高光效品种。

晴天条件下, 所有品种的 PAR-J 响应曲线均呈现为先上升后下降 (图 3)。不同甘蔗品种在阴天和晴天下的光合特征参数见表 1。 α_e 最大的品种为 ROC16 ($\alpha_e=0.317$), 热甘 1997、热甘 1462、ROC22 次之 ($\alpha_e>0.28$); J_{max} 最大的品种为热甘 1997 [$182.2 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$], 热甘 16239、ROC16 和 ROC22 次之, 分别为 173.4 、 176.6 、 $178.7 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; PAR_{sat} 超过 $1300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的品种有热甘 1997

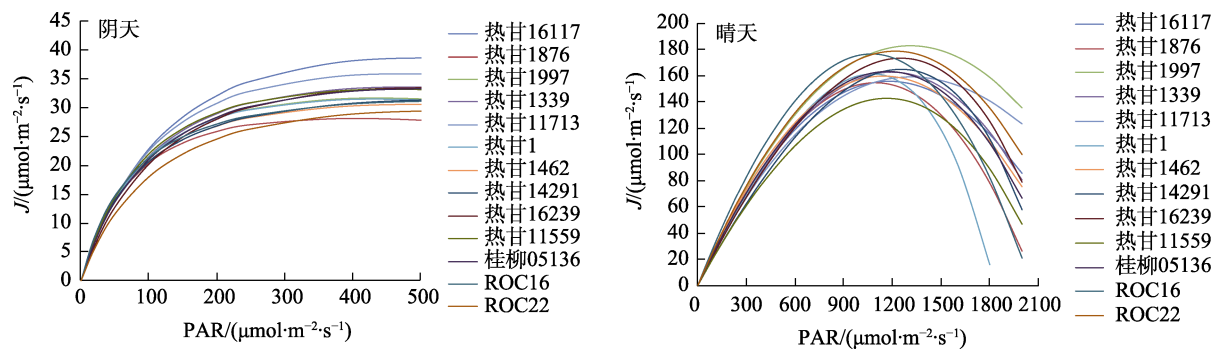


图 3 阴天和晴天下不同甘蔗品种 PAR-J 响应曲线（拟合曲线）
Fig. 3 PAR-J response curve of different varieties under cloudy and sunny day (Fitted curve)

表 1 不同甘蔗品种在阴天和晴天下的光合特征参数
Tab. 1 Photosynthetic parameters of different sugarcane varieties under cloudy and sunny day

品种 Variety	阴天 Cloudy				晴天 Sunny				$J_{PT}(\times 10^4)$
	α_c	$PAR_{sat}/$ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	$J_{max}/$ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	$J_{PC}(\times 10^4)$	α_c	$PAR_{sat}/$ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	$J_{max}/$ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	$J_{PS}(\times 10^4)$	
热甘 16117	0.377	509.3	38.7	1.15	0.270	1179.1	156.0	21.22	18.94
热甘 1876	0.436	399.3	28.1	0.93	0.269	1093.0	154.3	20.28	18.08
热甘 1997	0.405	438.3	31.7	1.01	0.285	1309.6	182.2	24.62	21.93
热甘 1339	0.394	489.5	33.7	1.04	0.263	1196.8	162.8	21.23	18.93
热甘 11713	0.395	478.4	35.9	1.10	0.259	1313.9	158.9	21.64	19.3
热甘 1	0.416	436.3	31.5	1.01	0.255	1076.1	161.0	19.52	17.41
热甘 1462	0.424	511.8	30.5	0.96	0.283	1145.1	159.6	21.65	19.29
热甘 14291	0.430	622.9	31.5	0.97	0.226	1252.6	164.7	21.36	19.03
热甘 16239	0.343	512.0	33.4	1.00	0.247	1252.6	173.4	22.74	20.27
热甘 11559	0.416	466.2	33.1	1.04	0.228	1165.4	142.7	18.87	16.84
桂柳 05136	0.385	524.4	33.2	1.02	0.267	1169.9	163.3	21.80	19.43
ROC16	0.472	586.7	31.2	0.98	0.317	1071.3	176.6	23.14	20.62
ROC22	0.321	558.2	29.5	0.89	0.288	1217.8	178.7	24.07	21.43

和热甘 11713 的, J_{max} 最高的品种分别为热甘 1997、热甘 16239、ROC16 和 ROC22。热甘 1997 的 J_{PS} 最高, 可做为强光下高光效品种。从 2018 年 1 月至 2022 年 4 月基地农田小气候数据统计阴天 180 d, 晴天 1400 d, 通过权重计算得出的不同甘蔗品种总和光合电子传递能力指数 (J_{PT}) 超过 20 的为热甘 1997、ROC22、ROC16 和热甘 16239。综上所述, 热甘 1997 和热甘 16239 可作为高光效新品种。

3 讨论

所有品种在阴天测定的初始光能利用效率均高于在晴天的测定结果, 这是由于不仅阴生作物对弱光的利用功能高于阳生作物^[25], 同种作物的光能利用效率在阴天条件下的日均值同样比晴天条件下高^[26-28]。低光环境下作物 Chla 和 Chlb

的含量相比高光环境下显著增加, 但与中光环境下相比叶绿体长宽和数量则显著下降^[28], 导致了本研究中尽管与晴天相比, 阴天下初始光能利用效率明显增加 (11.6%~90.4%), 但 PAR 在 200~500 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ 时光合电子流远低于晴天, 这也与杨虎等^[27]和李雨霏等^[29]的研究结论相一致。同时, 低光促进植物扩大类囊体膜面积, 通过高度聚集补光机构获取更多的光能满足自身生长发育的需要^[30], 阴生植物的光系统 II 补光复合体 LCHII 含量也同样高于阳生植物^[31]。

在低光和高光条件下, 能量平衡发生在光合电子传递与可调节性能量耗散之间; 但在中光条件下, 非调节性能量耗散在不同品种之间表现出显著差异, 说明不同甘蔗品种的能量分配在 PAR 增加的过程中呈现出差异化的过渡模式。例如, 与热甘 16239 相比, 热甘 1462 中光下的 Φ_{No} 显

著升高, Φ_{NPQ} 显著下降, 但在低光和高光下 Φ_{NO} 和 Φ_{NPQ} 在 2 个品种之间的差异均不显著, 这表明随着环境光强的增加, 热甘 1462 可调节性能量耗散的激活晚于热甘 16239, 而并非出现生理损伤^[32]。能量耗散在中光条件下的波动高于低光和高光, 可能是由于与高低光强相比, 中光下与热耗散密切相关的 *PsbB* 基因以及与叶绿体生物合成途径相关的 *HEMA*、*CHLI*、*CHLH*、*CHLG* 基因表达显著升高所致^[28, 33-34]。

随着光强的增加, 非光化学猝灭显著增加, 光化学猝灭和相对电子传递速率则显著下降^[29, 35], 这与本研究结果相一致。ROC16 和热甘 1997 分别在中、低光和中、高光下均具有较高的光量子效率, 热甘 16239 虽然在中、低光下光量子效率显著低于 ROC16 和 ROC22, 在中光下显著低于热甘 1997, 但在高光下却达到与 ROC22 和热甘 1997 相同水平; 且由于中光下热甘 16239 非调节性能量耗散最低, 说明与其他品种相比其光系统不易发生生理损伤^[32]。这也解释了晴天热甘 16239 具有较高的饱和光强与最大电子传递速率, 决定了其 J_{PT} 超过 20, 成为高光效品种。

本研究重点通过叶绿素荧光特性分析, 对不同甘蔗品种的光合效率进行快速鉴定。但高光效只能作为作物高产评价的重要因素之一, 除光合效率之外, 光合面积是决定干物质生产量的另一重要因素^[36]。分蘖率、宿根发株率、蔗茎产量和有效茎数的提升是甘蔗增产的关键因素^[3], 与甘蔗产量相关的最高产量构成因子是有效茎数, 其次则是单茎重, 分蘖率则与有效茎数呈显著正相关^[37], 分蘖率间接改变种植密度从而影响光合面积, 进而与光合效率共同决定有效茎数与单茎重^[38]。分蘖率和宿根性通过共同决定光合面积来影响当年及来年宿根蔗的产量构成^[3], 而分蘖最终能否长成为有效茎应作为下一步重点研究方向之一, 避免无效分蘖浪费农业资源。因此, 本研究结论尚需要进一步结合不同甘蔗品种新植及宿根的株型特点与最终产量建立模型, 方可对筛选出的高光效品种进行补充验证。

参考文献

- [1] 陈常兵, 张跃彬, 刘芳, 张哲, 王积军. 我国糖料产业发展现状及“十四五”趋势展望[J]. 中国农技推广, 2022(2): 5-9.
CHEN C B, ZHANG Y B, LIU F, ZHANG Z, WANG J J. The current situation of China's sugar industry and the prospect of the "Fourteenth Five Year Plan"[J]. China Agricultural Technology Extension, 2022(2): 5-9. (in Chinese)
- [2] MEBRAHTOM F, FIREW M, EYASU A. Multivariate analysis of sugar yield contributing traits in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in Ethiopia[J]. Afric Jounery of Plant Science, 2016, 10(8): 145-156.
- [3] 谭秦亮, 朱鹏锦, 程琴, 李佳慧, 吕平, 庞新华, 周全光. 不同甘蔗品种(系)的产量构成因素及品质比较[J]. 作物杂志, 2019(3): 49-54.
TAN Q L, ZHU P J, CHENG Q, LI J H, LYU P, PANG X H, ZHOU Q G. Comparison study on the yield components and quality of different sugarcane varieties (lines)[J]. Crops, 2019(3): 49-54. (in Chinese)
- [4] ANNELIE M, ROBERT J H, FREDERIK C B. Effect of sugar feedback regulation on major genes and proteins of photosynthesis in sugarcane leaves[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 158: 321-333.
- [5] 张耀文, 赵小光, 关周博, 侯君利, 王学芳, 董育红, 田建华, 李殿荣, 王竹云. 作物高光效种质筛选的研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(18): 1-11.
ZHANG Y W, ZHAO X G, GUAN Z B, HOU J L, WANG X F, DONG Y H, TIAN J H, LI D R, WANG Z Y. High photosynthetic-efficiency germplasm screening of crop: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(18): 1-11. (in Chinese)
- [6] 路龙祥, 冀占东, 刘志坚, 庄勇, 魏明, 李辉, 黄维藻, 汪德锋, 杜安平, 涂升斌. 高光效水稻鉴定筛选方法[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 358-364.
LU L X, JI Z D, LIU Z J, ZHUANG Y, WEI M, LI H, HUANG W Z, WANG D F, DU A P, TU S B. A method for screening and identification of rice varieties with high effective photosynthesis[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(2): 358-364. (in Chinese)
- [7] 茹振钢, 冯素伟, 李淦. 黄淮麦区小麦品种的高产潜力与实现途径[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3388-3393.
RU Z G, FENG S W, LI G. High-yield potential and effective ways of wheat in Yellow & Huai River Valley facultative winter wheat region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3388-3393. (in Chinese)
- [8] 蒙祖庆, 宋丰萍, 罗涛. 早熟西藏玉米地方种高光效品种的鉴定筛选[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1713-1719.
MENG Z Q, SONG F P, LUO T. Identification and screening of high photosynthetic efficiency germplasm in early maturing maize landraces selected from Tibet collection[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(8): 1713-1719. (in Chinese)
- [9] 许国春, 罗文彬, 李华伟, 许泳清, 纪荣昌, 张鸿, 邱思鑫, 汤浩. 马铃薯叶片光合效率遗传变异分析及高光效种质

- 筛选[J]. 园艺学报, 2021, 48(11): 2239-2250.
- XU G C, LUO W B, LI H W, XU Y Q, JI R C, ZHANG H, QIU S X, TANG H. Screening for genetic variation in photosynthesis and high photosynthetic efficiency germplasm in potato[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(11): 2239-2250. (in Chinese)
- [10] 苏春桃, 杨浩, 高秀梅, 朱宏波. 高光效甘薯种质筛选及光合特性分析[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2462-2466.
- SU C T, YANG H, GAO X M, ZHU H B. Screening of high-light-efficiency sweet potato germplasm and analysis of photosynthetic characteristics[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(12): 2462-2466. (in Chinese)
- [11] 薛惠云, 郭东炜, 付远志, 张志勇, 韩振甫, 范云思, 王清连. 不同基因型棉花品种高光效特性研究[J]. 中国棉花, 2019, 46(6): 5-9, 19.
- XUE H Y, GUO D W, FU Y Z, ZHANG Z Y, HAN Z F, FAN Y S, WANG Q L. Study on high photosynthetic efficiency of cotton varieties with different genotypes[J]. Chinese Cotton, 2019, 46(6): 5-9, 19. (in Chinese)
- [12] 牛宁, 李振侠, 金素娟, 赵璇, 付雅丽, 焦鑫, 王玉岭, 李占军. 黄淮海地区大豆光合特性及高光效种质筛选[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(4): 524-532.
- NIU N, LI Z X, JIN S J, ZHAO X, FU Y L, JIAO X, WANG Y L, LI Z J. Comparison of photosynthetic gas exchange parameters for 150 soybean germplasm from Huanghuaihai Region[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(4): 524-532. (in Chinese)
- [13] 娄璐岩, 杨素欣, 于慧, 冷建田, 张耀华, 冯献忠. 大豆光能高效利用的分子调控机制研究进展[J]. 土壤与作物, 2017, 6(2): 119-126.
- LOU L Y, YANG S X, YU H, LENG J T, ZHANG Y H, FENG X Z. Progress on molecular regulation mechanism of high light use efficiency in soybean[J]. Soil and Crops, 2017, 6(2): 119-126. (in Chinese)
- [14] 李海芬, 钟旋, 李杏瑜, 陈小平, 梁炫强. 不同花生品种(系)光合特性与农艺性状的相关性研究[J]. 天津农业科学, 2015, 2(6): 84-87.
- LI H F, ZHONG N, LI X Y, CHEN X P, LIANG X Q. Study on relationship between photosynthetic characters and agronomic characters in peanut (*Arachis hypogaea* L.)[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2015, 2(6): 84-87. (in Chinese)
- [15] 张耀文, 赵小光, 关周博, 王学芳, 候君莉, 田建华, 李殿荣, 卢从明. 油菜光合生理研究及高光效育种研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 44-51.
- ZHANG Y W, ZHAO X G, GUAN Z B, WANG X F, HOU J L, TIAN J H, LI D R, LU C M. A review on photosynthetic physiological research and high photosynthetic efficiency breeding of *Brassica napus*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(3): 44-51. (in Chinese)
- [16] 何水林, 陈如凯, 张腾云, 李宇. 能源甘蔗群体光合生产特性研究[J]. 甘蔗, 1996, 3(4): 12-17.
- HE S L, CHEN R K, ZHANG T Y, LI Y. Study on colony photosynthesis of sugarcane for energy resources[J]. Sugarcane, 1996, 3(4): 12-17. (in Chinese)
- [17] 刘杨杨, 李俊, 于强, 刘少春, 同小娟, 余凌翔. 甘蔗叶片光合 CO_2 响应参数分析及其品种间差异[J]. 中国农业气象, 2019, 40(10): 637-646.
- LIU Y Y, LI J, YU Q, LIU S C, TONG X J, YU L X. Sugarcane leaf photosynthetic CO_2 responses parameters and their difference among varieties[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(10): 637-646. (in Chinese)
- [18] BAKER N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 89-113.
- [19] YE Z P, ROBAKOWSKI P, SUGGETT J D. A mechanistic model for the light response of photosynthetic electron transport rate based on light harvesting properties of photosynthetic pigment molecules[J]. Planta, 2013, 237(3): 837-847.
- [20] YE Z P, SUGGETT J D, ROBAKOWSKI P, KANG H J. A mechanistic model for the photosynthesis-light response based on the photosynthetic electron transport of photosystem II in C_3 and C_4 species[J]. New Phytologist, 2013, 199(1): 110-120.
- [21] 叶子飘, 胡文海, 肖宜安, 樊大勇, 尹建华, 段世华, 闫小红, 贺俐, 张斯斯. 光合电子流对光响应的机理模型及其应用[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1241-1249.
- YE Z P, HU W H, XIAO Y A, FAN D Y, YI J H, DUAN S H, YAN X H, HE L, ZHANG S S. A mechanistic model of light-response of photosynthetic electron flow and its application[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(11): 1241-1249. (in Chinese)
- [22] KRAMER D M, JOHNSON G, KIIRATS O, EDWARDS G E. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes[J]. Photosynthesis Research, 2004, 79(2): 209-218.
- [23] SCHREIBER U, BILGER W, NEUBAUER C. Chlorophyll fluorescence as a non intrusive indicator for rapid assessment of *in vivo* photosynthesis[J]. Ecophysiology of Photosynthesis, 1994, 100: 49-70.
- [24] OXBOROUGH K, BAKER N R. Resolving chlorophyll a fluorescence images of photosynthetic efficiency into photochemical and non-photochemical components-calculation of qP and F_v/F_m' without measuring F_o [J]. Photosynthesis Research, 1997, 54: 135-142.
- [25] 张其德, 郭宗华. 光强度对植物光合器官和光合功能的影响

- 响[J]. 北京农学院学报, 1988, 3(3): 76-85.
- ZHANG Q D, GUO Z H. Effects of light intensity on photosynthetic organs and photosynthetic functions of plants[J]. Journal of Beijing Agricultural College, 1988, 3(3): 76-85. (in Chinese)
- [26] 郑元, 赵忠, 周慧, 周靖靖. 晴天和阴天对刺槐光合生理特性的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 60-67.
- ZHENG Y, ZHAO Z, ZHOU H, ZHOU J J. Effects of sunny and cloudy days on photosynthetic and physiological characteristics of black locust[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(5): 60-67. (in Chinese)
- [27] 杨虎, 戈长水, 应武, 杨京平, 李金文, 何俊俊. 遮荫对水稻冠层叶片 SPAD 值及光合、形态特性参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 580-587.
- YANG H, GE C S, YING W, YANG J P, LI J W, HE J J. Effect of shading on leaf SPAD values and the characteristics of photosynthesis and morphology of rice canopy[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(3): 580-587. (in Chinese)
- [28] ZHANG Y F, CHEN C, JIN Z X, YANG Z G, LI Y L. Leaf anatomy, photosynthesis, and chloroplast ultrastructure of *Heptacodium miconioides* seedlings reveal adaptation to light environment[J]. Environmental and Experimental Botany, 2022, 195: 104780.
- [29] 李雨霏, 郭鹏飞, 张小燕, 邓波. 遮荫对青钱柳苗期光合特性和生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(8): 6-10.
- LI Y F, GUO P F, ZHANG X Y, DENG B. Influence of shading on photosynthetic characteristics and growth of *Cyclocarya paliurus* seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(8): 6-10. (in Chinese)
- [30] CHECCHETTO V, TEARDO E, CARRARETTO L, FORMENTIN E, BERGANTINO E, GIACOMETTI G M, SZABO I. Regulation of photosynthesis by ion channels in cyanobacteria and higher plants[J]. Biophysical Chemistry, 2013, 182: 51-57.
- [31] CHOW W S, ANDERSON J M, MELIS A. The photosystem stoichiometry in thylakoids of some Australian shade adapted plant species[J]. Functional Plant Biology, 1990, 17(17): 665-674.
- [32] 安东升, 曹娟, 黄小华, 周娟, 窦美安. 基于 Lake 模型的叶绿素荧光参数在甘蔗苗期抗旱性研究中的应用[J]. 植物生态学报, 2015, 39(4): 398-406.
- AN D S, CAO J, HUANG X H, ZHOU J, DOU M A. Application of Lake-model based indices from chlorophyll fluorescence on sugarcane seedling drought resistance study[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(4): 398-406. (in Chinese)
- [33] NAGATA N, TANAKA R, SATOH S, TANAKA A. Identification of a vinyl reductase gene for chlorophyll synthesis in *Arabidopsis thaliana* and implications for the evolution of *Prochlorococcus* species[J]. Plant Cell, 2005, 17: 233-240.
- [34] YU Q, SHEN Y, WANG Q, WANG X, FAN L, WANG Y, ZHANG S, LIU Z, ZHANG M. Light deficiency and waterlogging affect chlorophyll metabolism and photosynthesis in *Magnolia sinostellata*[J]. Trees, 2019, 33: 11-22.
- [35] 吕程瑜, 刘艳红. 不同遮荫条件下梓叶槭幼苗生长与光合特征的种源差异[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2307-2314.
- LYU C Y, LIU Y H. Provenance difference in growth traits and photosynthetic characteristics of acer catalpifolium seedlings under different shading conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2307-2314. (in Chinese)
- [36] 黄家雍, 唐仕云, 李翔, 王伦旺, 方锋学, 许树宁, 黄海荣, 谭芳, 黎焕光. 高产栽培模式中能源甘蔗的光合能力和叶面积指数比较分析[J]. 南方农业学报, 2011, 42(1): 22-25.
- HUANG J Y, TANG S Y, LI X, WANG L W, FANG F X, XU S N, HUANG H R, TAN F, LI H G. Comparative analysis of energy sugarcane varieties for photosynthetic capacity and leaf area index in high yield cultivation model[J]. Journal of Southern Agriculture, 2011, 42(1): 22-25. (in Chinese)
- [37] 李佳慧, 程琴, 欧克纬, 谭秦亮, 庞新华, 周全光, 吕平, 宋奇琦, 唐毓玮, 朱鹏锦. 不同蔗区甘蔗品种(系)分蘖性状比较及其对产量和产量构成因子的影响[J]. 作物杂志, 2021(5): 79-86.
- LI J H, CHEN Q, OU K W, TAN Q L, PANG X H, ZHOU Q G, LYU P, SONG Q Q, TANG Y W, ZHU P J. Comparison of tiller characters of sugarcane varieties (lines) in different sugarcane regions and their effects on yield and yield components[J]. Crops, 2021(5): 79-86. (in Chinese)
- [38] 安东升, 严程明, 陈炫, 徐磊, 刘洋, 苏俊波, 孔冉, 窦美安. 季节性干旱下农艺节水措施对甘蔗生长和产量的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(4): 991-999.
- AN D S, YAN C M, CHEN X, XU L, LIU Y, SU J B, KONG R, DOU M A. Effect of agronomic water saving measures on growth and yield of sugarcane under seasonal drought[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(4): 991-999. (in Chinese)