

朱红芳,李晓锋,奚丹丹,等.紫菜薹新组合 19-520 的光合作用能力分析[J].上海农业学报,2021,37(1):28-34.

紫菜薹新组合 19-520 的光合作用能力分析

朱红芳,李晓锋,奚丹丹,高璐,沈海斌,朱玉英*

(上海市农业科学院设施园艺研究所,上海市设施园艺技术重点实验室,上海 201403)

摘要: 为了探讨和评价新创制的紫菜薹组合 19-520 的光合能力,以紫菜薹新组合 19-520 及其亲本以及普通菜薹为试验材料,于播种后 75 d 进行菜薹叶片的叶绿素、花青素等色素指数以及光合作用和叶绿素荧光参数等指标的分析。结果表明:紫菜薹新组合 19-520 叶片的花青素指数(Anth)显著高于普通菜薹(对照),而叶绿素指数(Chl)与对照相当;光合作用指标中,新组合 19-520 的 T_r 、 P_n 和 G_s 均高于对照,而 C_i 低于对照;在暗反应指标中,新组合 19-520 的初始荧光(F_o)、暗适应后的最大荧光值(F_m)、可变荧光 F_v 均高于对照;在光反应指标中,新组合 19-520 的 PS II 实际光合效率($\Phi PS II$)和表观电子传递速率(ETR)显著高于其亲本及对照,而用于热量耗散能量的 PS II 调节性能量耗散比例[$Y(NPQ)$]和 PS II 非调节性能量耗散比例[$Y(NO)$]低于对照。此外,Chl 和 F_o 与光合作用呈显著正相关。紫菜薹新组合 19-520 表现优良,在利用光能进行光合作用方面具有较强的潜力,可进一步在生产中推广示范和应用。

关键词: 菜薹;光合特性;叶绿素荧光参数;色素指数

中图分类号: S634.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3924(2021)01-028-07

Analysis of photosynthetic capacity of a new combination 19-520 of purple flowering Chinese cabbage

ZHU Hongfang, LI Xiaofeng, XI Dandan, GAO Lu, SHEN Haibin, ZHU Yuying*

(Protected Horticultural Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences; Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology, Shanghai 201403, China)

Abstract: In order to explore and evaluate the photosynthetic capacity of the new purple flowering Chinese cabbage combination 19-520, the combination 19-520, its parents and common flowering Chinese cabbage were used as experimental materials. The chlorophyll, anthocyanin and other pigment indexes, photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of flowering Chinese cabbage leaves were analyzed 75 days after sowing. The results showed that the anthocyanin index(Anth) of the new combination 19-520 was significantly higher than that of the control, while the chlorophyll index(Chl) was similar to that of the control. Among the photosynthesis indexes, T_r , P_n and G_s of the new combination 19-520 were higher than those of the control, while C_i was lower than that of the control. Among the dark reaction indexes, the initial fluorescence (F_o), the maximum fluorescence(F_m) and the variable fluorescence(F_v) of the new combination 19-520 were higher than those of the control. Among the light reaction indexes, the actual photosynthetic efficiency ($\Phi PS II$) and apparent electron transfer rate(ETR) of PS II of the new combination 19-520 were significantly higher than those of its parents and the control, while the regulatory energy dissipation ratio[$Y(NPQ)$] and non-regulatory energy dissipation ratio [$Y(NO)$] of PS II for heat dissipation were lower than those of the control. In addition, Chl and F_o were significantly positively correlated with photosynthesis. The new combination 19-520 of purple flowering Chinese cabbage had good performance, and had strong potential in the use of light energy for photosynthesis, which could be further promoted and applied in production.

收稿日期:2020-03-09

基金项目:上海市科委重点科技攻关项目(18391900700);上海市绿叶蔬菜产业技术体系[沪农科产字(2020)第02号]

作者简介:朱红芳(1980—),女,博士,副研究员,研究方向为叶菜栽培与育种。E-mail:zhf334480@126.com

*通信作者,E-mail:yy5@saas.sh.cn

Key words: Purple flowering Chinese cabbage; Photosynthetic characteristics; Chlorophyll fluorescence parameters; Pigment index

光合作用是植物利用光能,合成有机物并释放氧气的过程^[1]。光合作用是植物生长发育的生理基础,作物中90%以上的干物质直接来源于光合作用,因此光合作用的强弱是决定作物产量高低的最重要因素之一。光合作用的过程包括光反应(原初光化学反应)和碳反应(卡尔文循环)两个进程,叶绿素荧光反映光反应进程^[2]。叶绿素荧光能准确反映光能吸收和传递的过程,在测定电子传递速率、建立质子梯度及合成ATP的过程中发挥重要的作用。叶绿素荧光技术可在不伤害植物叶片的条件下,快速对其光能的分配进行准确分析^[3],是研究植物光合作用机理和生理状况的理想工具^[4],并在预测作物增产潜能^[5]、抗逆生理^[6]等方面得到了广泛应用。

紫菜薹又名红菜薹,为十字花科芸苔属亚种变种之一,原产于我国,为长江流域中部地区的特产蔬菜,以其肥嫩多汁、色泽鲜亮的花茎为主要食用器官^[7]。近几年来,紫菜薹因其特殊的食用部位及营养丰富等特点,作为优质高档蔬菜在全国范围内引种栽培。目前,紫菜薹产品已供应至北京、上海、广州等我国各大城市^[8]。紫菜薹的商品品质受多个因素的影响,如口感、色泽及产量等,其中色泽主要与其花青素含量相关。普通紫菜薹的表型特征为叶片绿色,叶柄、主脉及花薹表皮为紫红色,叶片和花薹表皮的花青素含量平均为 $24.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $64.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶片中的花青素含量约为花薹表皮的 $1/3$ ^[9]。本课题组针对叶片中花青素含量相对较少的情况,选择叶片中花青素含量较高的紫色不结球白菜与菜薹进行亚种间的杂交、回交转育,获得了叶片、叶柄和花薹均为紫色的亲本及紫菜薹新组合19-520。本试验对紫菜薹新组合19-520的色素含量、光合特性、叶绿素荧光参数等指标进行测定,分析该组合的光合作用特征特性,以期为该组合在利用光能方面提供更精细的数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试紫菜薹为上海市农业科学院设施园艺研究所选育的紫菜薹新组合19-520,其属于晚熟类型,叶片、叶柄、叶脉和花薹均为紫色,花薹略带蜡粉;亲本P1,属于中晚熟类型,叶片、叶柄、叶脉和花薹均为紫色,花薹无蜡粉;亲本P2,属于晚熟类型,叶片、叶柄、叶脉和花薹均为紫色,花薹略带蜡粉。对照(CK)为湖北地区普遍栽培的普通菜薹品种‘紫福’,叶片为绿色,叶柄和主叶脉为紫色,花薹紫色,略带蜡粉。

1.2 试验处理

于2019年8月10日将籽粒饱满、整齐一致的菜薹种子播种在以蛭石为基质的穴盘中,播种后30d进行大棚定植,定植45d后每个材料选择5株大小一致的植株,每株选取第3片功能叶进行各项指标的测定。

1.3 测定项目与方法

利用植物多酚-叶绿素测量计对植株进行实时非破坏性测量,获得植物叶片叶绿素(Chl)、叶片表层类黄酮(Flav)和花青素(Anth)指数等指标,并评估植物氮的状态,即氮平衡指数($\text{NBI} = \text{Chl}/\text{Flav}$)。

利用便携式光合测量系统(GFS-3000,上海泽泉科技股份有限公司)于上午9:00—11:00测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等光合作用参数,测定时光照强度约 $14\,000 \text{ lx}$,温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$, CO_2 浓度为 $(400 \pm 10) \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[10]。

叶绿素荧光参数测定^[11]使用德国Walz公司生产的便携式叶绿素荧光仪PAM-2500调制荧光成像系统。叶片暗适应30min后测定荧光参数,先用弱光照射测定初始荧光(F_0),然后用饱和脉冲光照射0.7s,测得最大荧光(F_m),打开饱和脉冲之前的荧光值为 F 。以植物的生长环境光强为作用光,测得实际生长光强下的荧光值(F_s);再次打开饱和脉冲光0.7s,测得最大荧光(F_m');再暗适应几秒后,打开远红光5s后测最小荧光(F_0')。计算其他相关参数^[12],其中,可变荧光 $F_v = F_m - F_0$,PS II最大光量子产量 $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$,光化学猝灭系数 $qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_0')$,非光化学猝灭系数 $NPQ = (F_m - F_m')/F_m' = F_m/F_m' - 1$,PS II实际光合效率 $\Phi_{\text{PS II}} = Y(\text{II}) = \Delta F/F_m' = (F_m' - F)/F_m'$,表观电子传递速率ETR,PS II调节性能量耗散比例 $Y(NPQ) = F/F_m' - F/F_m$,PS II非调节性能量耗散比例 $Y(NO) = F/F_m$ 。利用Origin 2018软件中Platt^[13]的双指数方程拟合快速光响应曲线(RLC)。

1.4 产量分析

菜薹的产量在上海市农业科学院引种中心试验基地测定,8月中旬播种,9月中旬露地定植,每个材料的定植面积约 30 m²,11月6日至翌年2月10日间采收,将每次的采收量相加计算总产量。

1.5 统计分析

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA),用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验($P < 0.05$)以及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 菜薹色素指标的比较

由图 1 可见,紫菜薹新组合 19-520 叶片的叶绿素指数(Chl)为 35.82,显著高于其亲本,分别高 17.56% 和 22.04%;比 CK 高 2.87%。花青素是赋予水果、蔬菜和花卉等植物颜色的主要天然色素,新组合 19-520 的花青素指数(Anth)为 0.43,显著高于 CK,是 CK 的 8.37 倍,但比亲本分别低 19.90% 和 4.38%。新组合 19-520 的 Flav 和 NBI 分别为 1.40 和 25.50,略高于其亲本,比 P1 分别高 5.61% 和 11.31%,比 P2 分别高 12.81% 和 8.18%;与 CK 基本一致,分别高 2.62% 和 0.24%。可见,紫菜薹新组合 19-520 不仅富含花青素,光合色素指数及氮的利用率也略高于其亲本和对照,具有较强的杂种优势。

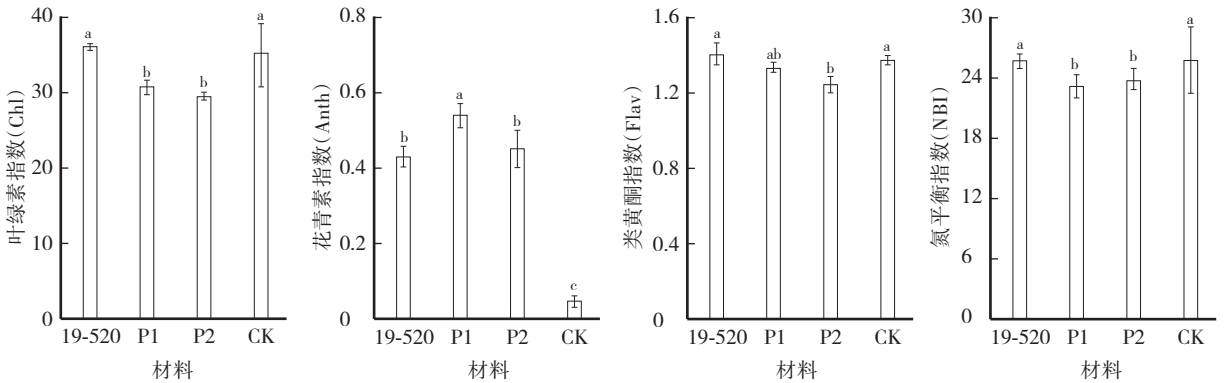


图 1 菜薹色素指标 Chl、Anth、Flav 和 NBI 的比较

Fig. 1 Comparison of pigment indexes of Chl, Anth, Flav, NBI in flowering Chinese cabbage

2.2 菜薹光合特性的比较

由图 2 可见,紫菜薹新组合 19-520 叶片的净光合速率(P_n)为 19.44 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,显著高于其亲本和对照,分别高 28.95%、38.48% 和 7.88%。气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)与 P_n 的趋势基本一致,新组合 19-520 的 G_s 和 T_r 分别为 377.38 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 5.80 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,分别比 CK 高 9.50% 和 21.02%,分别比 P1 高 28.57% 和 34.24%,分别比 P2 高 74.59% 和 123.29%。新组合 19-520 的胞间 CO_2 (质量)浓度(C_i)为 346.79 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比 CK 低 13.93%,比 P1 和 P2 分别低 18.04% 和 20.22%。综上,紫菜薹新组合 19-520 的光合能力比其亲本和对照均强,具有较强的杂种优势。

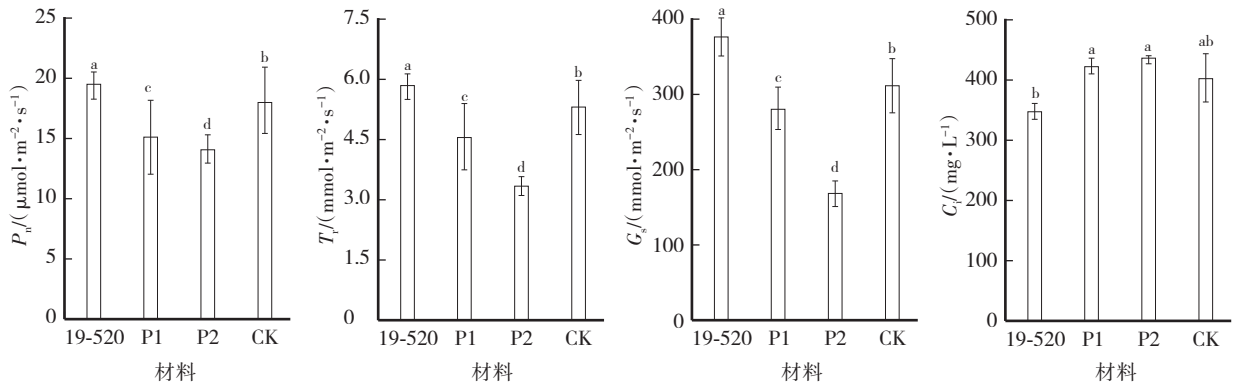


图 2 菜薹光合特性 G_s 、 P_n 、 T_r 、 C_i 的比较

Fig. 2 Comparison of photosynthetic characteristics of G_s , P_n , T_r , C_i in flowering Chinese cabbage

2.3 菜薹叶绿素荧光参数的比较

由表1可见,在暗反应条件下,紫菜薹新组合 19-520 的 F_o 为 0.194,比 CK、P1、P2 分别显著高 43.70%、42.65%、57.72%。新组合 19-520 的 F_m 为 1.038,比 CK、P1、P2 分别显著高 58.47%、55.39%、46.40%。新组合 19-520 的 F_v 为 0.844,比 CK、P1、P2 分别显著高 62.31%、58.64%、30.57%。新组合 19-520 的 F_v/F_m 为 0.831,与 CK、P1、P2 无显著差异。以上结果说明,紫菜薹新组合 19-520 在光系统 II (PS II) 反应中心捕获能量的效率高于其亲本及普通菜薹。

表1 暗反应下菜薹叶绿素荧光参数的比较

Table 1 Comparison of chlorophyll fluorescence parameters of flowering Chinese cabbage under dark reaction

材料	F_o	F_m	F_v	F_v/F_m
19-520	0.194 a	1.038 a	0.844 a	0.813 a
P1	0.136 b	0.668 b	0.532 b	0.796 a
P2	0.123 b	0.709 b	0.586 b	0.827 a
CK	0.135 b	0.655 b	0.520 b	0.809 a

注:同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平,下同。

由表2可见,在光反应条件下,紫菜薹新组合 19-520 的 F_o' 为 0.173,比 CK、P1、P2 分别显著高 38.60%、60.19%、46.67%。新组合 19-520 的 $\Phi PS II$ 为 0.618,比 CK、P1、P2 分别显著高 34.93%、16.16%、29.83%。新组合 19-520 的 ETR 为 117.0,比 CK、P1、P2 分别显著高 36.20%、43.73%、29.71%。新组合 19-520 的 qP 为 0.538,比 CK、P2 分别显著高 66.45%、33.27%,与 P1 差异不显著。新组合 19-520 的 NPQ 为 0.338,比 CK、P1、P2 分别显著低 26.04%、27.93%、31.44%。新组合 19-520 的 $Y(NPQ)$ 为 0.112,比 CK、P1、P2 分别显著低 47.42%、42.27%、50.00%。四个菜薹材料间的 $Y(NO)$ 差异较小。以上结果说明,紫菜薹新组合 19-520 的光合电子传递能力、转化效能和光利用效率均较高,并且非光合猝灭、以热量和荧光耗散的光能以及保护机制耗散的能量低于普通菜薹。

表2 光反应下菜薹叶绿素荧光参数的比较

Table 2 Comparison of chlorophyll fluorescence parameters of flowering Chinese cabbage under light reaction

材料	F_o'	F_m'	qP	NPQ	$\Phi PS II$	ETR	$Y(NPQ)$	$Y(NO)$
19-520	0.173 a	0.634 a	0.538 a	0.338 b	0.618 a	117.0 a	0.112 b	0.270 b
P1	0.108 b	0.387 b	0.506 a	0.469 a	0.532 b	81.4 b	0.194 a	0.273 b
P2	0.118 b	0.395 b	0.359 b	0.493 a	0.476 b	90.2 b	0.224 a	0.300 ab
CK	0.125 b	0.504 a	0.324 b	0.457 a	0.458 b	85.9 b	0.213 a	0.328 a

由图3可知,随着光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)的逐渐增加,4个菜薹材料的 ETR 过程可分为2个阶段:当 PAR 在 0—400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,斜率较大,ETR 随着 PAR 的增加呈直线迅速上升趋势,光合作用机构快速运转;当 PAR 在 400—1 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,斜率逐渐变小,ETR 增幅随 PAR 增加达到饱和,其中紫菜薹新组合 19-520 的 ETR 高于其亲本及普通菜薹。

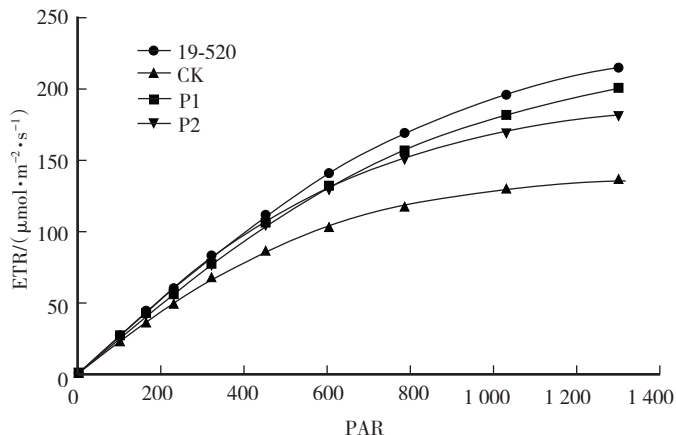


图3 菜薹的快速光响应曲线

Fig.3 Rapid light response curve (RLC) of flowering Chinese cabbage

2.4 紫菜薹光合色素与光合系数间的相关性分析

相关性分析表明,Chl 与 T_r 、 G_s 、 P_n 呈正相关,皮尔逊相关系数(下同)分别为 0.780、0.760 和 0.726,均达到极显著水平。Flav 与 NBI、 C_i 呈负相关,相关系数分别是 -0.730 和 -0.649,分别达到极显著和显著水平;Flav 与 T_r 、 G_s 、 P_n 、 F_o 呈显著或极显著正相关,相关系数分别为 0.759、0.650、0.584 和 0.704。Anth 和 qP 呈显著正相关,相关系数为 0.639。NBI 与 F_o 和 qP 呈显著负相关,相关系数分别为 -0.654 和 -0.580。 T_r 与 G_s 、 P_n 和 F_o 呈正相关,相关系数分别为 0.957 ($P < 0.01$)、0.848 ($P < 0.01$)、0.646 ($P < 0.05$),与 C_i 呈显著负相关,相关系数为 -0.622。 G_s 与 P_n 呈极显著正相关,相关系数为 0.839。 P_n 与 C_i 和 F_o 分别呈显著负相关和显著正相关,相关系数分别为 -0.597 和 0.634。 C_i 与 F_o 和 ETR 呈显著负相关,相关系数分别为 -0.815 ($P < 0.05$) 和 -0.653 ($P < 0.05$)。 F_o 与 ETR 和 qP 呈正相关,相关系数分别为 0.775 ($P < 0.01$) 和 0.623 ($P < 0.05$)。

表 3 紫菜薹色素与光合参数的相关性

Table 3 Correlation between pigment and Photosynthesis in purple flowering Chinese cabbage variety

指标	Chl	Flav	Anth	NBI	T_r	G_s	P_n	C_i	F_o	Fv/Fm	$\Phi PS II$	ETR	qP
Chl	1												
Flav	0.523	1											
Anth	-0.416	-0.216	1										
NBI	-0.021	-0.730**	-0.211	1									
T_r	0.780**	0.759**	-0.333	-0.455	1								
G_s	0.760**	0.650*	-0.211	-0.401	0.957**	1							
P_n	0.726**	0.584*	-0.377	-0.180	0.848**	0.839**	1						
C_i	-0.493	-0.649*	0.093	0.574	-0.622*	-0.496	-0.597*	1					
F_o	0.518	0.704*	0.122	-0.654*	0.644*	0.646*	0.634*	-0.815**	1				
Fv/Fm	0.313	-0.344	-0.251	0.493	-0.200	-0.169	-0.041	-0.087	0.062	1			
$\Phi PS II$	0.697	-0.180	0.350	-0.256	-0.496	-0.532	-0.473	0.063	0.022	-0.093	1		
ETR	0.332	0.296	0.130	-0.417	0.311	0.331	0.264	-0.653*	0.775**	0.495	0.178	1	
qP	0.187	0.273	0.639*	-0.580*	0.249	0.371	0.070	-0.328	0.623*	-0.118	0.064	0.473	1

注: * 在 0.05 水平上显著相关, ** 在 0.01 水平上极显著相关。

2.5 紫菜薹新组合 19-520 的产量分析

经测产可得,紫菜薹新组合 19-520、CK、P1、P2 的小区产量分别为 75.26 kg、72.31 kg、68.15 kg 和 66.12 kg,分别折合为 25 086.6 kg·hm⁻²、24 100 kg·hm⁻²、22 716.7 kg·hm⁻² 和 22 040 kg·hm⁻²。紫菜薹新组合 19-520 分别比 CK、P1、P2 增产 4.04%、10.44%、13.82%,表现出良好的杂种优势。

3 讨论与结论

叶绿素是植物进行光合作用的重要物质,对光能进行吸收、传递、转化,影响着植物光合作用的强弱,是反映叶片光合能力的重要指标^[14]。本试验中紫菜薹新组合 19-520 与普通菜薹的叶绿素指数差异不大,说明两者具有相似的光合能力。

花青素是仅次于叶绿素的第二大类植物色素类型,为水溶性色素,贮藏在植物细胞的液泡中。它赋予了植物的叶片、花朵和果实各种颜色,吸引昆虫和鸟类进行花粉和种子的传播^[15]。花青素虽然不是光合色素^[16],但能调节光合色素叶绿素分子对光量子的吸收^[17],并通过对光的过滤^[18]、衰减^[19]和反射作用^[20]对光合作用进行调节。本试验中紫菜薹新组合 19-520 的花青素指数显著高于普通菜薹,具有更高的花青素含量,较高的花青素含量能够更好地抑制强光,起到保护和防御作用^[16];但是新组合 19-520 的花青素指数却低于亲本,推测其原因是由于新创制的全紫色菜薹亲本 P2,其紫色性状来源于紫色不结球白菜,紫色不结球白菜进入生殖生长期,即抽薹后,存在叶片中花青素转运受到限制及叶片紫色褪去的现象,造成菜薹成熟期叶片中花青素指数降低。

光合作用是植物生长的基础,是植物生物量递增所必需的生理过程,光合作用的场所在叶片的叶绿体中,因此叶绿素含量的高低是评价光合能力的重要因素之一,植株叶片叶绿素含量升高,则叶片光合能力增强^[21]。 P_n 是表示光合作用强弱的一个重要指标,气孔是 CO₂ 进入细胞的组织,也具有将植物水分向

外蒸腾的作用,因此 G_s 也是衡量植物光合作用的一个重要指标,如果 G_s 降低,就会使进入叶片的 CO_2 减少, T_r 受到一定程度制约,致使 P_n 下降^[22]。对果树作物樱桃^[23]、葡萄^[24]和梨^[25]的研究也表明, G_s 降低,叶片的 T_r 和 P_n 均降低。本研究中,新组合 19-520 的叶绿素指数较高,虽然叶片 C_i 值较小,但 G_s 、 T_r 和 P_n 均高于其亲本和对照,说明紫菜薹新组合 19-520 的光合能力强于普通菜薹。

光合特性反映光合作用的表现特性,而叶绿素荧光动力参数则反映光合作用的内在变化,能有效反映 PS II 对光能的吸收、分配和耗散^[26]。 F_o 是 PS II 的初始荧光值,反映可以用于吸收和热耗散的能量大小。 F_v/F_m 是 PS II 反应中心最大的光能转换效率,在吸收和转换光能的过程中起着重要的作用^[27]。本试验中,在暗反应阶段,紫菜薹新组合 19-520 的 F_o 高于其亲本和普通菜薹,这与 Hughes 等^[28]对红叶阔叶树的研究结果一致。Manetas^[29]研究也证实红色叶片的植物能依赖花青素的光破坏防御功能,提高光合作用。

在 PS II 反应中心, qP 反映了反应中心开放程度和原初电子受体的还原状态, $\Phi PS II$ 反映实际利用所捕获光的能力,ETR 则反映了能量转化效率和量子效率, qP 、 $\Phi PS II$ 和 ETR 越高,则光合效率越大。 NPQ 反映了耗散 PS II 反应中心天线色素吸收过量光能的能力, NPQ 越大,电子传递活性越小,净光合速率降低^[30]。 $Y(NPQ)$ 代表通过调节性的光保护机制耗散为热的能量, $Y(NO)$ 代表被动耗散为热量和发出荧光的能量,主要由关闭态的 PS II 反应中心贡献^[31],且 $\Phi PS II + Y(NPQ) + Y(NO) = 1$ 。在油菜叶绿素荧光参数的研究中发现,具有光能利用优势的品种(组合) qP 、 $\Phi PS II$ 和 ETR 参数系数值较高,而 NPQ 较小^[32-33]。本试验中紫菜薹新组合 19-520 的 qP 、 $\Phi PS II$ 和 ETR 的参数系数均高于其亲本和普通菜薹,而 NPQ 、 $Y(NPQ)$ 和 $Y(NO)$ 小于对照,说明紫菜薹新组合 19-520 的 PS II 反应中心能充分捕获并利用光能,具有较强的光能转化率和量子效率,而用于其他热耗散和非辐射光能的耗散程度较低,能充分地进行光合作用。

叶绿素荧光-快速光响应曲线是在传统的荧光淬灭分析技术实践基础上发展起来的一种便捷、无损、快速、灵敏的检测手段,能更准确地反映荧光 PS II 光响应的过程^[34],体现植物光合作用活性和 PS II 电子传递速率的特点,以及光合器官对瞬时和长期光照的响应,已广泛应用于植物生理研究中^[35-36]。本试验中,ETR 随着 PAR 的逐渐增加先迅速增加后变得平缓直到达到饱和;其中紫菜薹新组合 19-520 的 ETR 高于其亲本及普通菜薹。

综上所述,紫菜薹新组合 19-520 具有较高的花青素和叶绿素含量,且光合作用能力强于其亲本及对照,具有良好的生长优势,可进一步推广运用。

参 考 文 献

- [1] 曹际玲,朱建国,曾青,等. 对流层臭氧浓度升高对植物光合特性影响的研究进展[J]. 生物学杂志,2012,29(1):66-70.
- [2] 王兰兰,李琦,宋晓卉,等. 环境条件对植物叶绿素荧光参数影响研究进展[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版),2019,37(4):362-367.
- [3] SCHREIBER U, BILGER W, NEUBAUER C. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of *in vivo* photosynthesis[J]. *Ecophysiology of Photosynthesis*, 1995, 100:49-70.
- [4] 张永平,陈幼源,杨少军,等. 外源水杨酸对镉胁迫甜瓜幼苗生长与光合气体交换和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报,2014,34(4):778-785.
- [5] 魏滢,孟繁美,李晶,等. 不同密度下玉米叶绿素荧光参数分析和产量差异比较[J]. 东北农业大学学报,2013,44(10):1-5.
- [6] 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.
- [7] 王春梅,辛复林,朱大社,等. 红菜薹新品种佳红 1 号的选育及应用[J]. 长江蔬菜,2009,1(8):20-21.
- [8] 聂启军,邱正明,朱凤娟,等. 新品种鄂红 5 号的选育[J]. 湖北农业科学,2017,56(24):4828-4829.
- [9] 刘进,梅家琴,钱伟. 紫菜苔叶片和茎秆花青素含量的遗传分析[J]. 西北农林科技大学学报,2018,46(3):1-9.
- [10] 李伟,黄金丽,睦晓蕾,等. 黄瓜幼苗光合及荧光特性对弱光的响应[J]. 园艺学报,2008,35(1):119-122.
- [11] 钱永强,周晓星,韩蕾,等. Cd^{2+} 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响[J]. 生态学报,2011,31(20):6134-6142.
- [12] 孙永江,付艳东,杜远鹏,等. 不同温度/光照组合对‘赤霞珠’葡萄叶片光系统 II 功能的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(6):1191-1200.
- [13] PLATT T, GALLEGOS C L, HARRISON W G. Photo inhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton[J]. *Journal of Marine Research*, 1980,38(4):687-701.

- [14] STINTZING F C, CONRAD J, KLAIBER I, et al. Structural investigations on betacyanin pigments by LC NMR and 2D NMR spectroscopy[J]. *Phytochemistry*, 2004, 65(4):415-422.
- [15] TROTTER C M, DYMOND J R, GOULDING C J. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(10):2209-2223.
- [16] 王良再, 胡彦波, 张会慧, 等. 植物叶片花青素的光破坏防御机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3):835-841.
- [17] KYTRIDIS V P, KARAGEORGOU P, LEVIZOU E, et al. Intra-species variation in transient accumulation of leaf anthocyanins in *Cistus creticus* during winter; evidence that anthocyanins may compensate for an inherent photosynthetic and photoprotective inferiority of the red-leaf phenotype[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(9):952-959.
- [18] PIETRINI F, IANNELLI M A, MASSACCI A. Anthocyanin accumulation in the illuminated surface of maize leaves enhances protection from photoinhibitory risks at low temperature, without further limitation to photosynthesis[J]. *Plant Cell and Environment*, 2002, 25:1251-1259.
- [19] HUGHES N M, SMITH W K. Attenuation of incident light in *Galax urceolata* (Diapensiaceae): concerted influence of adaxial and abaxial anthocyanic layers on photoprotection[J]. *American Journal of Botany*, 2007, 94(5):784-790.
- [20] LEE D W, LOWRY J B, STONE B C. Abaxial anthocyanin layer in leaves of tropical rainforest plants; enhancer of light capture in deep shade[J]. *Biotropica*, 1979, 11(1):70-77.
- [21] 龙芳, 邹瑜, 何海旺, 等. 不同品种两性花毛葡萄光合性能的研究[J]. *种子*, 2019, 38(12):20-24, 29.
- [22] 高照全, 魏钦平, 王小伟, 等. 果树光合作用数学模拟的研究进展[J]. *果树学报*, 2003, 20(5):338-344.
- [23] 杨江山, 常永义, 种培芳. 3个樱桃品种光合特性比较研究[J]. *园艺学报*, 2005, 32(5):773-777.
- [24] 于咏, 孟江飞, 惠竹梅, 等. 反光膜和摘叶处理对“红地球”葡萄光合特性及果实品质的影响[J]. *北方园艺*, 2017(11):33-40.
- [25] 黄凯, 刘汉云, 田时敏, 等. 早巴梨和玉露香梨光合特性比较研究[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(1):18-22.
- [26] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. *植物学通报*, 1999, 16(4):444-448.
- [27] SCHREIBER U, BILGER W, NEUBAUER C. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of *in vivo* photosynthesis[M]// *Ecophysiology of Photosynthesis*. Berlin; Springer Press, 1995.
- [28] HUGHES N M, MORLEY C B, SMITH W K. Seasonal photosynthesis and anthocyanin production in 10 broadleaf evergreen species[J]. *Functional Plant Biology*, 2008, 34(12):1072-1079.
- [29] MANETAS Y. Why some leaves are anthocyanic and why most anthocyanic leaves are red? [J]. *Flora*, 2006, 201(3):163-177.
- [30] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
- [31] SAMSON G, BONIN L, MAIRE V. Dynamics of regulated YNPQ and non-regulated YNO energy dissipation in sunflower leaves exposed to sinusoidal lights[J]. *Photosynthesis Research*, 2019, 141(3):315-330.
- [32] 肖文娜, 官春云. 不同油菜品种角果光合特性及叶绿素荧光参数的差异[J]. *中国油料作物学报*, 2009, 31(3):316-321.
- [33] 肖华贵, 杨煊文, 饶勇, 等. 甘蓝型油菜黄化突变体的光合特性及叶绿素荧光参数分析[J]. *作物学报*, 2013, 39(3):520-529.
- [34] 刘泽彬, 程瑞梅, 肖文发, 等. 不同淹水时间下中华蚊母树光响应特征及其模型比较[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4):1083-1090.
- [35] 胡文海, 张斯斯, 肖宜安, 等. 两种杜鹃花属植物对长期遮阴后全光照环境的生理响应及其光保护机制[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(11):1093-1100.
- [36] RALPH P J, GADEMANN R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity[J]. *Aquatic Botany*, 2005, 82(3):222-237.

(责任编辑: 闫其涛)