

# 油菜高光效种质综合鉴定指标体系与方法

张耀文 侯君利 赵小光 关周博 李殿荣 田建华 董育红 王竹云

(陕西省杂交油菜研究中心/国家油料作物改良中心陕西油菜分中心, 712100, 陕西杨凌)

**摘要** 高光效种质是开展作物高光效育种的基础。在剖析油菜高光效种质筛选要求、面临困难、研究缺陷的基础上, 针对油菜超高产育种目标和生产实际需求, 构建出油菜高光效的综合筛选指标体系和方法, 对油菜种质进行数量化综合评价, 并开展定向选育和杂交改良。在实际应用中取得良好效果, 获得一批油菜高光效种质, 为利用“高光效+杂种优势”途径开展油菜高光效育种奠定了物质基础。

**关键词** 油菜; 高光效种质; 综合鉴定; 指标体系与方法; 筛选效果

我国 65% 以上的食用植物油依赖进口, 保障食用油供给安全任务日趋紧迫, 菜子油占油料作物产油量的 57.2%, 是国产食用植物油的第一大来源<sup>[1]</sup>, 发展油菜生产可有效缓解我国食用油安全危机。多年来我国油菜品种的产量水平一直未突破 3 750 kg/hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>, 产量水平低而不稳已成为限制我国油菜总产提高和产业发展的重要因素。因此, 挖掘产量潜力、培育高产品种已成为提高油菜总产、保障我国食用植物油供给安全的核心举措。

提高光能利用效率是提升作物产量水平的有效途径, 经过多年努力, 国内研究者选育出“黑农 41、黑农 51; 陇春 32、百农 4199; 亚优 210、中早 39”等一批水稻、大豆、小麦高光效品种, 在生产中取得了光合效率与产量、抗性同步提高的效果<sup>[3-8]</sup>。高光效种质是开展高光效育种的基础和前提条件, 本文在剖析油菜高光效种质筛选要求、面临困难、研究缺陷的基础上, 总结了油菜高光效研究团队构建的油菜高光效综合筛选指标体系和方法, 对油菜种质进行数量化综合评价与比较筛选的效果, 以期推动油菜高光效育种发展的进程。

## 1 油菜高光效品种选育对高光效种质筛选的要求

### 1.1 对油菜高光效品种的要求

当前生产上要求新育成的油菜品种应具备“优

质、高产、高抗、高效”且能适应机械化生产等特性<sup>[1,9]</sup>; 高光效育种旨在通过整合形态结构和光合生理来增强光合功能, 优化光合条件, 提高(群体)光合效率, 促进光合产物向子粒中转运进而选育出光合功能、产量、品质和抗性同步提高的超高产新品种<sup>[2,10]</sup>。因而, 油菜高光效品种应具备以下特性: (1) 生理高光效: 单位叶面积上光合色素、光合酶含量及活性较高; 叶片/角果具有较高的(群体)净光合速率; 对光温变化不敏感, 能适应较宽幅度的光、温变化; 耐光氧化和光抑制, 光合速率高值持续期长; 呼吸消耗少, 合成净物质量多。(2) 形态高光效: 株高 140~160 cm, 株型紧凑适于密植和机械化栽培; 有效光合面积较大; 冠层结构良好, 群体内光照分布合理, 群体光合能力较强; 具有较高向种子运转光合产物能力(经济系数在 0.30 左右); 产量比对照提高 5%~8% 且具有 10%~15% 增产潜力, 品质符合现代育种目标优质要求。

### 1.2 高光效种质应具备的特性

枝(叶)与主茎夹角较小, 叶片挺立、数目较多, 叶面积系数较大; 根系发达、茎秆粗壮抗倒伏能力强。具有较高的净光合速率, 光照/CO<sub>2</sub> 补偿点低、光呼吸消耗少, 对光、温变化不敏感, 抗光氧化能力强; 叶片栅栏组织发达且多层, 叶绿素含量、光合酶含量高、活性强。具备较好的一般配合力和特殊配合力, 可应用于杂交品种选育<sup>[2,10-11]</sup>。

## 2 油菜高光效种质筛选面临的困难

### 2.1 油菜光合表型准确比较难度较大

鉴定结果的可比性和一致性较差: 直接在田间开展全生育期实际光合效率的测定难度较大, 且受

作者简介: 张耀文, 副研究员, 主要从事油菜光合生理和高光效育种研究

基金项目: 陕西省重点研发计划: 油菜高光效育种核心亲本筛选及在高光效育种中的应用(2019NY-054); 国家重点研发计划: 西北及黄淮地区强优势油菜杂交种的创制及应用(2016YFD0101304)

收稿日期: 2018-12-29; 修回日期: 2019-06-17

作物基因型、生长状态、生理因素和环境因素等影响<sup>[12]</sup>, 不仅测定值与实际值间存在差异, 且不同时间点的测定结果差异较大。不同类型间光合特性差异较大: 由于地理起源、进化程度、遗传背景不同, 导致不同类型油菜(甘蓝型、白菜型和芥菜型)<sup>[13]</sup>、不同生态型(冬性、半冬性和春性)<sup>[14]</sup>间光合特性都有较大差异。不同光合器官的光合特性不同: 油菜3类主要光合器官(长柄叶、短柄叶和绿色角果皮)的生长环境及其对光照、温度等的反应不同, 光合特性各不相同<sup>[14-15]</sup>。株型结构复杂: 由不同空间着生状态的叶型(直立、半直立和匍匐)、分枝(上生、中生和下生)、角果(斜生、平生、垂生)<sup>[14]</sup>组成的油菜株型结构有多种变化。冠层结构阶段性变化明显: 不同时期(苗期、薹期、花期、角果期)冠层组成和结构、有效光合面积、光线在冠层中的分布有较大差异, 导致不同阶段冠层的光合效率差异较大。群体光合速率研究难度较大: 油菜的株高(1.6~2.0m)较高、种植密度(45万~60万株/hm<sup>2</sup>)较大; 叶片、分枝、角果均可向各个方向延伸生长, 在冠层内纵横交错、重叠干扰<sup>[14, 16-17]</sup>; 同时目前缺少适于开展油菜群体光合效率测定的仪器和方法。

## 2.2 对油菜种质光合能力的准确评价难度较大

目前大多数研究者对株型性状的选择主要以经验为主, 对株型优劣的判断缺乏系统理论解释和有效的筛选指标。对光合生理表型指标进行筛选和鉴定需要一定的设备和仪器, 且测定步骤繁琐、影响因素较多。同时受测定方法和仪器的限制, 测定的品种数量普遍偏少, 很难掌握油菜基因库(包含大量品种或品系的群体)中光合性能的遗传变异情况, 造成结果的代表性较差。

## 2.3 缺乏快速、高效的筛选方法和指标体系

油菜的种质资源有8 000多份<sup>[10, 13]</sup>, 其遗传背景、光合表型、产量、品质、抗性 etc 表型性状均有较大差异, 亟需建立快速、高效的方法开展高光效种质筛选。油菜的高光效育种不仅仅是光合速率的提高和株型结构的改良, 也包括对产量、品质和抗性的改良和提高, 最终选育出“高产、高效、高抗”杂交品种; 因此需要对光合表型、株型结构、产量结构、抗性、品质等表型及其遗传力、配合力等多个方面进行综合比较和筛选, 考

查性状较多, 亟需在研究测定结果的重现性、可比性的基础上, 采用科学的统计方法排除环境效应、基因型与环境互作效应影响, 对油菜种质资源进行数量化综合评价。

## 3 油菜高光效种质筛选中的缺陷

### 3.1 评价指标单一

片面追求光合特性的改良和提高, 筛选指标主要以特定时期单个或少数几个光合生理指标(净光合速率、光合酶含量或活性、叶绿素含量)及理想株型性状(叶片、分枝角度)指标为主, 缺少对光合性状的动态变化、群体光合性能、光合能力的适应性、光合能力与产量和抗性等方面的关联评价与比较, 导致筛选到种质虽具有某些高光效特性但总体光合能力持续发挥稳定性差, 经济产量(种子产量)低, 品质、抗性等综合性状差, 生产利用价值较低。

### 3.2 缺少对高光效种质育种价值的研究

过于注重对光合功能表型性状(净光合速率、叶绿素含量、叶片/分枝角度等)的研究, 忽视其遗传力、配合力、杂种优势及亲子关系的研究; 同时也缺少结合产量、抗性、品质等性状间的配合力、遗传效率等方面对高光效种质的育种价值、育种效率进行综合评价的研究, 导致筛选到的高光效种质虽具有高光效特性(光合生理和理想株型指标较好), 但在高光效育种中难以应用。

### 3.3 高光效种质的育种手段和方法的创新性不够

目前关于油菜光合生理、理想株型的遗传定位研究开展较少, 分子机理尚未阐明, 可供育种利用的紧密连锁分子标记较少; 受条件限制, 远缘杂交、转基因等方法尚不能普遍开展。大多数育种家只能依靠从田间表型性状进行比较筛选, 人工杂交创制中间材料; 结果易受客观条件、育种者经验和倾向性的影响, 盲目性大、周期长、效率低。

## 4 对油菜高光效种质进行综合筛选与评价

### 4.1 建立油菜高光效种质的筛选方法与技术

油菜高光效材料的初步筛选: 如图1所示, 从光合生理和理想株型2个方面对油菜种质资源进行初步筛选: 在苗期、薹期、花期、角果期进行叶片或分枝夹角、净光合速率、叶绿素含量等指标

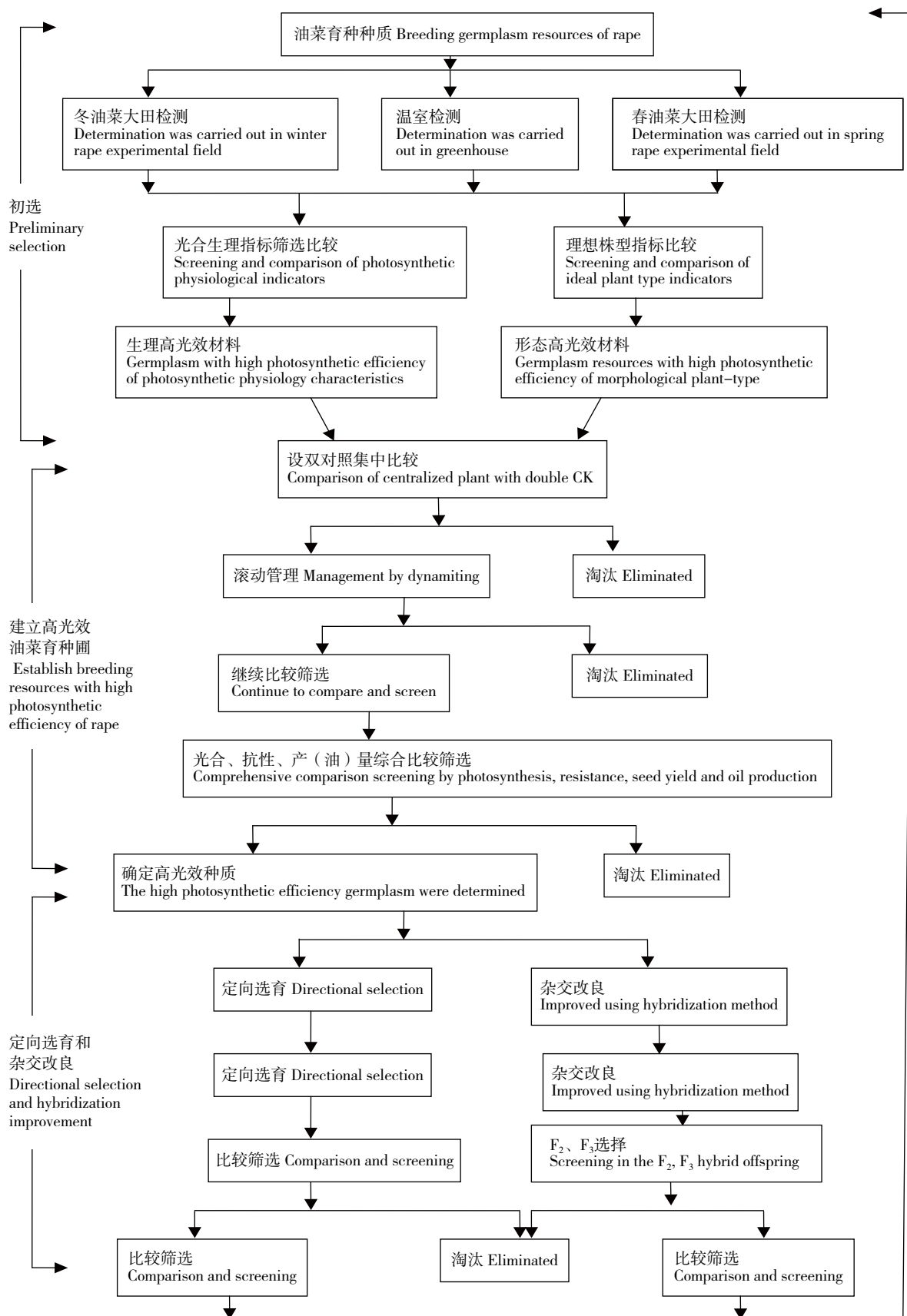


图 1 油菜高光效种质的筛选方法

Fig.1 The methods for screening the rape germplasm resources with high photosynthetic efficiency

的测定比较;挑选叶片或分枝夹角、净光合速率、叶绿素含量比对照及当日所测所有材料的日均值均高 10% 以上,且有显著性差异的材料。在高光效育种资源圃进一步筛选:将初选出的高光效材料集中种植在高光效育种资源圃,为便于继续测定比较,每 10 个材料间种 1 次对照(CK1 为 K407, CK2 为秦优 7 号)。高光效育种圃的滚动管理:在对高光效材料进行测定比较的同时测定对照材料,根据测定结果,选择叶片或分枝夹角、净光合速率、叶绿素含量等比 CK1 (K407) 高 10% 以上、比 CK2 (秦优 7 号) 高 5% 以上的材料继续种植。同时,每年测定 80~100 份高光效育种圃外的材料,同上,挑选高光效、高叶绿素含量材料补充进入高光效育种圃。综合比较筛选:对连续 2 年光合测定结果稳定一致的材料,进行株型性状、光合性状、产量、抗病性、抗倒性等方面的测定,根据测定结果对材料进行关联分析和综合评价。确定高光效材料:将连续 3 年以上叶片或分枝夹角、净光合速率、叶绿素含量等都比对照秦优 7 号高 5% 以上的材料定为高光效材料。对已确定的高光效材料我们采用“高光效×高光效、高叶绿素含量×高光效、高光效×高叶绿素含量、高光效×理想株型、理想株型×高光效、丰产和早熟×高光效”等方式进行光合特性、株型结构、产量、抗性等方面改良;在  $F_2$ 、 $F_3$  分离世代进行高光效材料的筛选。进行高光合速率、叶绿素含量、理想株型的定向选育:在初花期每个材料至少连续测定 15 个单株,按单株平均值进行比较,挑选 3~5 份高叶绿素含量单株套袋自交;在苗期、薹期、花期、角果期对叶型(夹角、面积)、分枝性状(夹角、长短)、角果的着生角度等性状进行比较,在盛花期选择 3~5 份综合性状优良的单株套袋自交;收获后,结合产量、品质结果选择 2~3 份继续种植鉴定,重复进行 4~5 代。油菜株型见封底图 I。

## 4.2 构建综合鉴定指标体系和方法,对油菜种质进行量化评价

4.2.1 构建综合鉴定指标体系 依据油菜高光效研究团队提出的筛选指标体系<sup>[2]</sup>,分别从光合气体交换参数、叶绿素荧光参数、光合生理结构、光合生理指标、群体光合指标等方面对光合能力进行量化比较;从单株、群体结构 2 个方面分别对

株型结构和产量结构进行量化比较;从抗倒伏能力和抗病、虫能力 2 个方面对抗性能力进行量化比较;从含油量、硫苷含量、芥酸含量 3 个方面对品质性状构建综合评价指标体系,对油菜种质进行量化比较。

4.2.2 量化比较的方法 将每个指标划分为 4 档,对可量化的指标按测定值进行归类划分,根据“得分值×与产量的偏相关系数”来计算加权得分;对不能量化的指标按记载标准划分;按照“1、2、3、4”对不同档位进行分值估算。各项性状指标之和为综合得分;综合得分与对照秦优 7 号进行比较。连续 2 年综合得分均比对照秦优 7 号高 10% 以上的材料即为高光效种质,低 10% 以上的材料则为低光效种质。

## 4.3 筛选油菜高光效育种核心亲本

4.3.1 遗传多样性检验 如图 2 所示,依据遗传背景、光合表型、产量、品质、抗性表型值(方差、标准差、变幅和平均数)及 SSR 分子标记等检测结果对油菜高光效种质进行遗传多样性和遗传结构分析;通过聚类、主成分分析对高光效种质进行合并归类,初步筛选出具有代表性的亲本种质。

4.3.2 育种效率和育种价值评价 利用选出的油菜高光效亲本种质配制杂交组合,通过解析高光效杂交组合、亲本的光合表型、产量、品质、抗性等表型性状的遗传效率,对油菜高光效种质进行配合力、育种价值和育种效率评价;进一步制定出油菜高光效育种方案,以减少育种工作的盲目性。

4.3.3 确立油菜高光效育种核心亲本种质 综合以上结果,对油菜高光效种质进行综合评价,筛选出油菜高光效育种骨干亲本种质。

## 5 油菜高光效种质的筛选效果

### 5.1 建立起冬或春生态型油菜的高光效育种圃

经过多年努力,我们通过对 4 000 余份油菜育种材料进行高光效表型鉴定,已获得一批具有形态高光效(苗-薹期叶型紧凑、叶面积较小,花期枝紧、叶紧,角果斜生、矮秆)、生理高光效(高光合速率、高叶绿素含量)、高经济系数、高产量等性状的种质材料。已在陕西、甘肃 2 个不同生态区分别建立油菜冬、春播条件下高光效育种圃,目前冬油菜(陕西)高光效育种圃种质稳定在

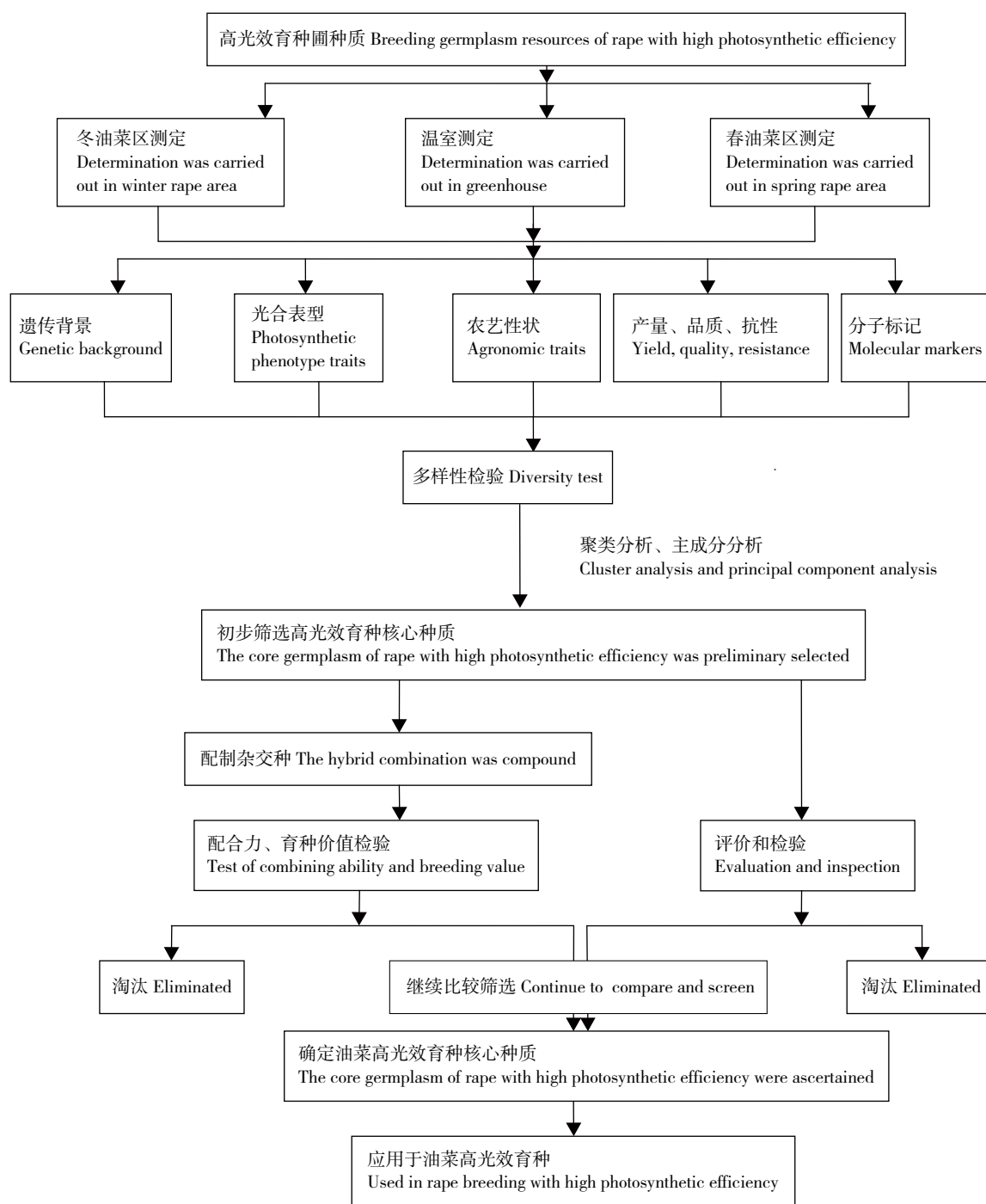


图 2 油菜高光效核心种质的筛选方法

Fig.2 The methods for screening rape core germplasm resources with high photosynthetic efficiency

400~500 份，春油菜（甘肃）高光效育种种质在 200~300 份。

## 5.2 油菜高光效种质定向选择效果

由表 1 可知，经过 2008–2014 年连续 6 年的定向选择，高光效种质“7792-95/772/772”的主要性状指标显著提高：光合性状中的叶绿素含量、净光合速率，产量构成性状中的单株角果数、单

株产量、收获系数和品质性状中含油量、油+蛋白质含量等 7 个指标极显著增加。光合性状中的叶绿素 a/b 值、水分利用效率、群体净光合速率，株型性状的叶面积系数，产量构成性状中的千粒重、单株生物量、角粒数等 8 个指标显著增加，而株型性状中的株高、分枝位/株高、分枝与主茎夹角、短柄叶与主茎夹角及品质性状中的蛋白质含量 5

表 1 “7792-95/772//772”的主要性状的选育效果 (2014 与 2008 年比较)  
Table 1 The effects of main traits of rape germplasm “7792-95/772//772” with high photosynthetic efficiency by directed breeding (comparison between 2014 and 2008)

性状 Trait		2014 年数值 The value in 2014	2014 与 2018 年比较 (%) Comparison between 2014 and 2008	
光合性状 Photosynthetic trait	叶绿素含量 (SPAD) Chlorophyll content	55.36 ± 3.71	5.53 <sup>**</sup>	
	叶绿素 a/b 值 Ratio of chlorophyll a content to chlorophyll b content	3.52 ± 0.02	2.46 <sup>*</sup>	
	净光合速率 [μmolCO <sub>2</sub> /(m <sup>2</sup> ·s)] Net photosynthetic rate	26.68 ± 2.03	8.32 <sup>**</sup>	
	水分利用效率 (μmolCO <sub>2</sub> /mmolH <sub>2</sub> O) Water use efficiency	3.96 ± 0.39	3.78 <sup>*</sup>	
	群体净光合速率 [g/(d·m <sup>3</sup> )] Net photosynthetic rate of population	2.42 ± 0.28	3.13 <sup>*</sup>	
株型性状 Plant-type trait	株高 (cm) Plant height	134.00 ± 7.35	-6.52 <sup>**</sup>	
	主序长/株高 (%) Ratio of main inflorescence length to plant height	45.11 ± 3.78	-2.68 <sup>*</sup>	
	分枝位/株高 (%) Ratio of branch position to plant height	35.55 ± 3.43	-5.22 <sup>**</sup>	
	分枝与主茎夹角 (° ) The angle of branches to main stem	22.60 ± 2.21	-7.61 <sup>**</sup>	
	短柄叶片与主茎夹角 (° ) The angle of short petiole leaf to main stem	30.26 ± 1.82	-6.18 <sup>**</sup>	
	叶面积系数 Leaf area index	1.48 ± 0.28	1.36 <sup>*</sup>	
	角果皮面积系数 Green silique area index	3.54 ± 0.36	-0.92	
	性状 Trait		2014 年数值 The value in 2014	2014 与 2018 年比较 (%) Comparison between 2014 and 2008
	产量构成性状 Yield component character	单株角果数 Siliques per plant	239.10 ± 52.24	6.25 <sup>**</sup>
单株分枝数 Branches per plant		6.30 ± 1.10	3.27 <sup>*</sup>	
千粒重 (g) 1000-seed weight		2.73 ± 0.04	1.24 <sup>*</sup>	
角粒数 Seeds per silique		30.22 ± 1.37	0.96 <sup>*</sup>	
单株生物量 (g) Weight of biomass per plant		52.88 ± 3.42	3.10 <sup>*</sup>	
单株产量 (g) Grain yield per plant		18.56 ± 9.76	4.21 <sup>**</sup>	
收获系数 Harvest index		0.35 ± 0.01	3.51 <sup>**</sup>	
品质性状 Quality trait		硫苷含量 (mg/g) Glucosinolates content	23.80 ± 1.92	-2.25
		蛋白质含量 (%) Protein content	22.92 ± 0.84	-11.18 <sup>**</sup>
		含油量 (%) Oil content	51.49 ± 0.90	3.23 <sup>**</sup>
	(油 + 蛋白质) 含量 (%) Content of oil and protein	75.42 ± 0.24	4.60 <sup>**</sup>	
		芥酸含量 (%) Erucic acid content	0.96 ± 0.09	-1.12

注: \*、\*\* 分别表示差异显著 ( $P<0.05$ )、极显著 ( $P<0.01$ )  
Note: \*, \*\* represent the significant difference ( $P<0.05$ ), extremely significant difference ( $P<0.01$ ) levels, respectively

个指标极显著降低, 表明定向选育具有良好效果。

由表 2 可知, 2006-2014 年 “7792-95/772//772” 的叶绿素含量、净光合速率与对照比较均逐年递增; 与 CK1 (K407) 相比较, 叶绿素含量、净光合速率 9 年间分别净增加 4.19、3.98 个百分点; “7792-95/772//772” 的叶绿素含量、净光合速率的年递增率在 2009-2014 期间分别为 0.50~0.70 和 0.35~0.73 个百分点, 明显大于 2006-2008 年间的递增量;

2009年以后我们采用双对照进行比较发现, 与 CK2 (秦优 7 号) 相比, 在 2009-2014 年 6 年间叶绿素含量、净光合速率分别净增加 2.59、2.57 个百分点, 说明定向选择对提高油菜叶绿素含量、净光合速率有明显效果。

5.3 利用获得的高光效育种核心亲本, 开展油菜高光效杂种选育  
在依据光合表型、产量、品质、抗性等表型值及遗传背景对油菜高

表 2 2006–2014 年对 “7792–95/772//772” 叶绿素含量、净光合速率逐年定向选择效果  
Table 2 The effects of chlorophyll content and net photosynthetic rate of rape with high photosynthetic efficiency germplasm "7792–95/772//772" from 2006 to 2014 by directional selection

年份 Year	叶绿素含量 Chlorophyll content					净光合速率 Net photosynthetic rate				
	测定值 (SPAD) The determination value			比较结果 (%) Result of comparison		测定值 [ $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] The determination value			比较结果 (%) Result of comparison	
	7792–95/ 772//772	CK1	CK2	与 CK1 比较 Compared with CK1	与 CK2 比较 Compared with CK2	7792–95/ 772//772	CK1	CK2	与 CK1 比较 Compared with CK1	与 CK2 比较 Compared with CK2
2006	52.52	47.47	–	10.63	–	23.62	21.70	–	11.84	–
2007	56.50	50.89	–	11.03	–	22.62	19.87	–	12.16	–
2008	54.08	48.74	–	10.96	–	24.63	23.34	–	12.37	–
2009	53.20	47.60	50.04	11.76	6.32	24.26	21.05	22.96	13.24	5.65
2010	54.70	48.64	51.01	12.46	7.23	25.25	21.75	23.65	13.88	6.53
2011	56.23	49.71	52.13	13.12	7.87	23.41	19.99	21.86	14.61	7.08
2012	52.96	46.60	48.90	13.66	8.31	24.01	20.39	22.34	15.11	7.49
2013	54.16	47.38	49.84	14.32	8.67	25.62	21.66	23.78	15.46	7.82
2014	55.36	48.21	50.83	14.82	8.91	26.68	22.46	24.75	15.82	8.22

注：“–”表示此处无数据  
Note: “–” means there is no data

光效种质进行遗传多样性和遗传结构分析的基础上，筛选到油菜高光效保持系（细胞质、细胞核雄性不育）65 份，恢复系 75 份，转育成高光效细胞质雄性不育系（CMS）10 份。筛选油菜高光效育种核心种质 15 份。经过在杨凌、汉中、肃南等基地多个环境种植，已筛选到强优势杂交组合 11 份（比秦优 7 号产量提高 8%、产油量增加 15% 以上）。油菜高光效育种见封底图 II。

6 小结

现阶段各种提高作物产量的措施都已在生产中发挥了较大作用，单纯依赖杂种优势利用来大幅度提高油菜产量水平的难度越来越大，通过运筹肥水、防治病虫害等措施来提高油菜产量的空间也越来越小，提高光能利用效率是油菜产量潜力的重要突破口，也是目前和今后油菜高产品种的重要内容。开展油菜高光效种质的筛选指标体系和技术流程构建研究，既能满足油菜高光效种质筛选的实际需求，也能为其他作物的高光效种质亲本选择提供有益参考。通过将高光效性状选择与产量、抗性、适于机械化的目标相结合，从光合生理、群体光合、理想株型、产量结构、抗性等方面对油菜种质进行综合评价与筛选比较；对光合性状表现稳定材料进行光合、理想株型、叶绿素含量、产量、抗性等方面的筛选与改良；从“高光效、高叶绿素含量、理想株型”等方面定向选

择，使筛选出的高光效种质具有较高利用价值，既能为高光效育种提供物质基础，也可促进种质资源的交流及优异基因的挖掘，同时也可作为光合机理研究、高光效基因定位等提供基因资源。

参考文献

[1]王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 613–617.  
[2]张耀文, 赵小光, 王学芳, 等. 油菜高光效育种的思路、方法与选育效果. 西北农业学报, 2017, 26(5): 647–656.  
[3]杜维广, 陈怡, 张桂茹, 等. 高脂肪和高光效的高产稳产抗病大豆新品种黑农41选育与推广. 黑龙江农业科学, 2003, 26(1): 1–4.  
[4]栾晓燕, 陈怡, 杜维广, 等. 超高产、抗病、广适应性大豆黑农51的选育研究. 黑龙江农业科学, 2012, 35(10): 8–12.  
[5]崔文娟, 倪建福, 欧巧明, 等. 春小麦新品种陇春32号选育报告. 甘肃农业科技, 2014, 40(12): 3–4.  
[6]丁位华, 冯素伟, 王丹, 等. 不同穗型小麦籽粒灌浆、干物质积累与转运特性及其与产量的关系. 河南农业科学, 2018, 47(6): 13–17, 97.  
[7]季芝娟, 曾宇翔, 梁燕, 等. 超级早籼稻“中早39”的高产育种研究. 中国生物工程杂志, 2017, 37(12): 21–26.  
[8]刘文炳, 张建新, 罗维禄, 等. 光身杂交稻选育研究进展. 杂交水稻, 2005, 20(1): 6–10.  
[9]王汉中, 殷艳. 我国油料产业形势分析与对策建议. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 414–421.  
[10]张耀文, 赵小光, 关周博, 等. 油菜高光效育种的难点及解决策略. 西北农业学报, 2018, 27(1): 1–9.  
[11]李俊. 油菜高光效生理特征体系的建立及其调控研究. 长沙: 湖南农业大学, 2014.  
[12]许大全. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 163–168.  
[13]王爱凡, 康雷, 李鹏飞, 等. 我国甘蓝型油菜远缘杂交和种质创新研究进展. 中国油料作物学报, 2016, 38(5): 691–698.  
[14]冷锁虎. 油菜的光合生理. //江苏农学会. 江苏油作科学. 南京: 江

苏科学技术出版社, 1995: 220–247.

[15] 张耀文, 赵小光, 关周博, 等. 功能相对稳定期内油菜3类主要光合器官间光合性状差异的比较. 西南农业学报, 2017, 30(2): 296–304.

[16] 王锐. 油菜群体冠层结构特性及光能利用率的研究. 武汉: 华中农业大学, 2012.

[17] 白桂萍. 密植条件下油菜理想冠层结构研究. 北京: 中国农业科学院, 2014.

# Comprehensive Identification and Selection System and Method for Rape Germplasm with High Photosynthetic Efficiency

Zhang Yaowen, Hou Junli, Zhao Xiaoguang, Guan Zhoubo,  
Li Dianrong, Tian Jianhua, Dong Yuhong, Wang Zhuyun

(Hybrid Rape Research Center of Shaanxi Province/Shaanxi Rape Branch of National  
Oil Crops Genetic Improvement Center, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract** High photosynthetic efficiency germplasm is the basis for the high photosynthetic efficiency breeding of crops. Based on the analysis of the requirements, despite the difficulties and research deficiencies of high photosynthetic efficiency germplasm screening in rape, our research team constructed a comprehensive screening index system and method for rape with high photosynthetic efficiency to meet the breeding objectives of super high yield rape and the practical production demand. Quantitative comprehensive evaluation of rape germplasm was conducted and directional breeding and crossbreeding improvement was developed. Practical application achieved good results and a number of high photosynthetic efficiency germplasms were obtained, which laid a material foundation for rape breeding with high photosynthetic efficiency by a way called high photosynthetic efficiency + heterosis.

**Key words** Rape; High photosynthetic efficiency germplasm; Comprehensive identification and selection; Index system and method; Effect of screening