

李 梁, 叶 君, 李 娟, 等. 油莎豆种质资源光合特性分析[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(9): 1594-1606.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.09.003

## 油莎豆种质资源光合特性分析

李 梁<sup>1</sup>, 叶 君<sup>1,2,3</sup>, 李 娟<sup>1,3</sup>, 路战远<sup>1,2,3</sup>, 李存东<sup>3</sup>, 刘文景<sup>1</sup>, 张德健<sup>1</sup>,  
赵小庆<sup>1,2</sup>, 王登云<sup>4</sup>, 段 锐<sup>4</sup>, 史学芬<sup>5</sup>, 赵 贤<sup>6</sup>

(1. 内蒙古大学生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特 010031; 3. 河北农业大学农学院, 河北 保定 071001; 4. 磴口县农牧业技术推广中心, 内蒙古 磴口 015200; 5. 鄂尔多斯市农牧业科学研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 6. 巴彦淖尔市现代农牧事业发展中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

**摘要:** 为鉴定油莎豆高光效优异种质, 以 40 份油莎豆种质资源为试验材料, 测定油莎豆叶片气体交换参数、叶绿素荧光参数以及叶绿素含量等光合参数, 利用相关性分析和主成分分析等多种统计学方法, 综合评价与分析油莎豆种质资源光合特性。结果表明, 20 个光合参数的变异系数为 1.23%~48.51%, 总性能指数 ( $PI_{total}$ , 光系统 II、光系统 I 和系统间电子传递链的整体功能活性) 的变异系数最大。  $PI_{total}$  与  $F_v/F_m$  ( $t=0$  时, 原初光化学反应最大量子产率)、 $S_m$  (受体库容量)、 $RE_o/RC$  (单个活性反应中心传递至光合系统 I 末端电子受体使其还原的电子通量)、 $psi(E_o)$  [开始照明时, 由活性反应中心捕获的单个激子驱动除还原辅酶 A (QA) 外的电子传递的效率]、 $phi(E_o)$  (开始照明时, 还原辅酶 A 至除还原辅酶 A 外的电子传递链电子受体电子传递的量子效率)、 $delta(R_o)$  (开始照明时, 由活性反应中心捕获的单个激子驱动单个电子由 QA 经电子传递链至 PS I 受体侧末端电子受体的效率)、 $phi(R_o)$  (光系统 I 受体侧末端电子受体还原的量子效率)、 $RE_o/CS_m$  ( $t=t_{F_m}$ , 单个活性反应中心传递至 PSI 末端电子受体使其还原的能量通量)、 $PI_{abs}$  (以吸收光能为基础的性能参数) 呈现显著正相关, 与  $ABS/RC$  (单位反应中心吸收的光能)、 $DI_o/RC$  (单个活性反应中心耗散的总能量)、 $TR_o/RC$  (单位反应中心捕获的用于还原辅酶 A 的能量) 呈现极显著负相关。主成分最小数据组分析得出,  $PI_{total}$ 、 $ET_o/RC$  (单位反应中心传递的能量)、 $ET_o/CS_m$  (达到荧光测量最大值时, 单位叶面积用于电子传递的能量)、净光合速率 ( $P_n$ ) 和气孔导度 ( $G_s$ ) 可作为油莎豆高光效种质资源鉴定的重要指标。聚类分析结果表明, 40 份种质资源可划分为 3 类。其中, 第 I 类群有 16 份种质, 主要表现为  $P_n$ 、 $G_s$  显著高于其他 2 个类群。第 II 类群有 13 份种质, 主要表现为  $PI_{total}$  显著高于其他 2 个类群, 第 I 类群和第 II 类群的  $ET_o/RC$ 、 $ET_o/CS_m$  显著高于第 III 类群。第 III 类群有 11 份种质, 各参数均低于其他 2 个类群。不同粒型种质间差异分析结果显示, 圆粒型种质的  $ET_o/RC$  极显著高于长粒型种质, 而长粒型种质综合得分显著高于圆粒型种质。本研究模型评价结果表明, XJ8、JL7、HE9 综合表现较好, 可作为高光效资源材料, 为油莎豆种质资源的进一步创新和利用提供重要的参考。

**关键词:** 油莎豆; 种质资源; 气体交换参数; 叶绿素荧光参数

**中图分类号:** S565.9; Q945.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2024)09-1594-13

收稿日期: 2023-11-10

基金项目: 内蒙古“草原英才”工程领军人才项目; 内蒙古自治区 2022 年科技领军人才团队项目 (2022LJRC0010); 内蒙古农牧业创新基金项目 (2022CXJJN05); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2024MS03007)

作者简介: 李 梁 (1998-), 男, 山东阳信人, 硕士研究生, 研究方向为植物学。 (E-mail) 2806424860@qq.com。叶君为共同第一作者。

通讯作者: 路战远, (E-mail) lzhy281@163.com; 李 娟, (E-mail) lijuan198644@163.com

## Analysis on photosynthetic characteristics of *Cyperus esculentus* L. germplasm resources

LI Liang<sup>1</sup>, YE Jun<sup>1,2,3</sup>, LI Juan<sup>1,3</sup>, LU Zhanyuan<sup>1,2,3</sup>,  
LI Cundong<sup>3</sup>, LIU Wenjing<sup>1</sup>, ZHANG Dejian<sup>1</sup>,  
ZHAO Xiaoqing<sup>1,2</sup>, WANG Dengyun<sup>4</sup>, DUAN Rui<sup>4</sup>,  
SHI Xuefen<sup>5</sup>, ZHAO Xian<sup>6</sup>

(1.School of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2.Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 3.College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 4.Dengkou County Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Dengkou 015200, China; 5.Ordos Agricultural and Animal Husbandry Science Research Institute, Ordos 017000, China; 6.Bayannur Modern Animal Husbandry Business Development Center, Bayannur 015000, China)

**Abstract:** In order to select excellent germplasm with high photosynthetic efficiency from *Cyperus esculentus* L., 40 *C. esculentus* L. germplasm resources were used as experimental materials to measure photosynthetic parameters such as gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence parameters, and chlorophyll content in *C. esculentus* L. leaves. Multiple statistical methods such as correlation analysis and principal component analysis were used to comprehensively evaluate and analyze the photosynthetic characteristics of *C. esculentus* L. germplasm resources. The results showed that the coefficients of variation of 20 photosynthetic parameters ranged from 1.23% to 48.51%. The highest coefficient of variation was found in  $PI_{total}$  (the overall functional activity of photosynthetic system II, photosynthetic system I and electron transport chain between systems).  $PI_{total}$  was in significant positive correlation with  $F_v/F_m$  (when  $t=0$ , the maximum quantum yield of the initial photochemical reaction was obtained),  $S_m$  (receptor library capacity),  $RE_o/RC$  (the flux of electrons from a single active reaction center to the electron acceptor at the I end of the photosynthetic system for reduction),  $\psi(E_o)$  (efficiency of electron transfer driven by a single exciton, except for the reductive coenzyme A (QA)),  $\phi(E_o)$  (at the start of illumination, the quantum efficiency of electron transferred from reductive coenzyme A to the electron acceptors of the respiratory chain other than reductive enzyme A),  $\delta(R_o)$  (efficiency of a single exciton captured by an active reaction center to drive a single electron from the QA electron transport chain to the end of the electron acceptor on the PSI receptor side at the start of illumination),  $\phi(R_o)$  (quantum efficiency of electron acceptor reduction at the end of photosystem I receptor),  $RE_o/CS_m$  ( $t=t_{F_m}$ , the energy flux from a single active reaction center to the electron acceptor at the end of the PS I to reduce it),  $PI_{abs}$  (performance parameters based on absorption of light energy), and was in highly significant negative correlation with  $ABS/RC$  (light energy absorbed per reaction center),  $DI_o/RC$  (the total energy dissipated by a single active reaction center), and  $TR_o/RC$  (energy captured by a unit reaction center for the reduction of coenzyme A). The principal component minimum data set analysis showed that  $PI_{total}$ ,  $ET_o/RC$  (energy transferred per reaction center),  $ET_o/CS_m$  ( $t=t_{F_m}$ , the amount of energy used for electron transfer per unit leaf area), net photosynthetic rate ( $P_n$ ), and stomatal conductance ( $G_s$ ) could be important indicators for the selection of high photosynthetic efficiency germplasm resources in *C. esculentus* L. Results of cluster analysis showed that 40 germplasm resources could be divided into three categories. Among them, there were 16 germplasms in group I, mainly manifested as  $P_n$  and  $G_s$  significantly higher than the other two categories. There were 13 germplasms in group II, mainly manifested as  $PI_{total}$  significantly higher than the other two categories,  $ET_o/RC$  and  $ET_o/CS_m$  of the group I and group II were significantly higher than those of group III. The group III had 11 germplasms, and all parameters were lower than the other two groups. Analysis of differences between germplasms with different grain types showed that the  $ET_o/RC$  of round grain type germplasm was significantly higher than that of long grain type germplasm, while the comprehensive score of long grain type germplasm was significantly higher than that of round grain type germplasm. The evaluation results of this research model shows that XJ8, JL7, and HE9 have good comprehensive performance and can be used as high light efficiency resource materials, which can provide important references for further innovation and utilization of *C. esculentus* L. germplasm resources.

**Key words:** *Cyperus esculentus* L.; germplasm resources; gas exchange parameters; chlorophyll fluorescence parameters

油莎豆(*Cyperus esculentus* L.)是莎草科莎草属的草本植物。油莎豆作为一种特色经济作物,在美洲、非洲以及欧洲均有种植<sup>[1]</sup>。20世纪60年代初,中国引种和繁育成功。根据杨向东等<sup>[2]</sup>的报道,全国油莎豆种植面积由2017年的2 400 hm<sup>2</sup>增加到2019年的13 300 hm<sup>2</sup>,种植区域覆盖20多个省份。目前,油莎豆已被科学技术部和农业农村部作为重

要的新兴油源作物进行推广<sup>[3]</sup>。油莎豆作为特色油料作物,含有多不饱和脂肪酸,是优质的食用油原料<sup>[4]</sup>。由于油莎豆具有抗旱性强、适应性好的特点,因此可作为开发利用边际土地的优良物种<sup>[5]</sup>。但目前油莎豆生产存在品种单一、产量低等一系列问题,不能满足日益发展的市场需求<sup>[6]</sup>。

种质间光合作用差异是造成产量差异的重要因

素之一。前人研究发现,作物干物质中九成以上的有机物由植株通过光合作用提供<sup>[7-8]</sup>。研究结果表明,光合特性可稳定遗传,不同种质资源存在显著差异<sup>[9]</sup>。因此,种质资源光合特性评价是挖掘光合丰产潜力、培育高光效新品种的重要途径<sup>[10-11]</sup>。在油菜、大豆等作物上已有关于高光效种质鉴定的大量研究<sup>[12-14]</sup>,王弼琨<sup>[15]</sup>对 724 份大豆核心种质资源进行光合特性评价后认为,高光效品种除了具有较高的净光合速率外,光系统 II (PS II) 光能转化能力更强,光能利用效率更高。李俊<sup>[16]</sup>在油菜高光效育种研究中发现高光效基因型油菜光合速率高,且具有较长的持续期,同时对高温、高光照度环境的耐受性更强。

目前,油莎豆光合特性的研究集中于耕作方式和非生物胁迫处理对单一品种的影响<sup>[17-18]</sup>,关于不同种质资源光合特性的差异性分析的研究较少,特别是油莎豆高光效种质资源的鉴定更是鲜见报道。因此,本研究拟以来源于全国 4 个省份的 40 份油莎豆种质资源为研究对象,测定叶绿素荧光参数 (CF-Ps)、气体交换参数、叶绿素含量等指标,利用变异性分析、相关性分析、主成分分析 (PCA) 和最小数据组 (MDS) 以及聚类分析 (CA) 对油莎豆种质资源进行系统研究,通过模型进行综合评价,鉴定出高光效种质资源,以期为油莎豆种质资源的进一步创新和利用提供重要的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究以课题组收集的 40 份油莎豆种质资源为试验材料。油莎豆种质资源来源于内蒙古、河北、新疆与吉林 4 个省份,粒型分为圆粒和长粒,粒色包括黄色和褐色,具体信息见表 1。

### 1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,3 次重复,于 2023 年在内蒙古自治区农牧业科学院托克托基地 (40°30'03"N, 111°23'14"E) 开展。试验地点属于中温带大陆性季风气候,年均气温 7.1 °C,年均降水量 357 mm。播前土壤 (0~20 cm) 有机质含量 6.18 g/kg,全氮 (N) 含量 0.52 g/kg,全磷 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 含量 0.38 g/kg,全钾 (K<sub>2</sub>O) 含量 22.68 g/kg,速效磷含量 2.12 mg/kg,速效钾含量 89.70 mg/kg,土壤 pH 值 7.9。

表 1 油莎豆种质资源信息

Table 1 Information of the germplasm resources of *Cyperus esculentus* L.

序号	名称	来源	粒型	粒色
1	IM1	内蒙古	圆粒	黄色
2	IM2	内蒙古	圆粒	黄色
3	IM3	内蒙古	圆粒	黄色
4	IM4	内蒙古	长粒	褐色
5	IM5	内蒙古	长粒	褐色
6	IM6	内蒙古	长粒	褐色
7	HE1	河北	圆粒	黄色
8	HE2	河北	圆粒	黄色
9	HE3	河北	圆粒	黄色
10	HE4	河北	圆粒	黄色
11	HE5	河北	圆粒	黄色
12	HE6	河北	圆粒	黄色
13	HE7	河北	长粒	褐色
14	HE8	河北	长粒	褐色
15	HE9	河北	长粒	褐色
16	XJ1	新疆	圆粒	黄色
17	XJ2	新疆	圆粒	黄色
18	XJ3	新疆	圆粒	黄色
19	XJ4	新疆	圆粒	黄色
20	XJ5	新疆	圆粒	黄色
21	XJ6	新疆	圆粒	黄色
22	XJ7	新疆	圆粒	黄色
23	XJ8	新疆	圆粒	黄色
24	XJ9	新疆	圆粒	黄色
25	XJ10	新疆	圆粒	黄色
26	XJ11	新疆	圆粒	黄色
27	XJ12	新疆	长粒	褐色
28	JL1	吉林	圆粒	黄色
29	JL2	吉林	圆粒	黄色
30	JL3	吉林	圆粒	黄色
31	JL4	吉林	圆粒	黄色
32	JL5	吉林	圆粒	黄色
33	JL6	吉林	圆粒	黄色
34	JL7	吉林	长粒	褐色
35	JL8	吉林	长粒	褐色
36	JL9	吉林	长粒	褐色
37	JL10	吉林	长粒	褐色
38	JL11	吉林	长粒	褐色
39	JL12	吉林	长粒	褐色
40	JL13	吉林	长粒	褐色

试验小区设置行距 0.5 m,株距 0.1 m,3 行区,行长 8.0 m,单个小区面积为 12 m<sup>2</sup>。播种时间为 5 月 10 日,人工点播,出苗后定苗,每穴留苗 1 株。田间管理措施同大田,施肥参照曹秭琦等<sup>[19]</sup>的方案,尿素 225 kg/hm<sup>2</sup>,过磷酸钙 240 kg/hm<sup>2</sup>,硫酸钾 180 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 气体交换参数的测定 参照王润润<sup>[3]</sup>对油莎豆生育期的划分,选择在油莎豆块茎形成盛期天气晴朗的9:00–11:30用 Li-6800 光合测定仪测定油莎豆植株主茎最大展开叶片气体交换参数。测定时,设定气流流速为 750 mL/min,CO<sub>2</sub>浓度设为 380 μmol/(m<sup>2</sup>·s),相对湿度为 60%;选用内置光源,光强度设为1 200 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。气体交换参数详见表 2。

表 2 本研究相关的测定指标

Table 2 Test parameters in this study

参数	缩写	表征意义
气体交换参数	$T_r$	蒸腾速率
	$P_n$	净光合速率
	$C_i$	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度
	$G_s$	气孔导度
叶绿素荧光参数	$F_v/F_m$	$t=0$ 时,原初光化学反应最大量子产率
	$S_m$	受体库容量
	$ABS/RC$	单位反应中心吸收的光能
	$DI_o/RC$	单个活性反应中心耗散的总能量
	$TR_o/RC$	单位反应中心捕获的用于还原辅酶 A (QA) 的能量
	$ET_o/RC$	单位反应中心传递的能量
	$RE_o/RC$	单个活性反应中心传递至光合系统 I (PSI) 末端电子受体使其还原的电子通量
	$\phi(E_o)$	开始照明时,由活性反应中心捕获的单个激子驱动除还原辅酶 A 外的电子传递的效率
	$\phi(E_o)$	开始照明时,QA 至除 QA 外的电子传递链电子受体电子传递的量子效率
	$\delta(R_o)$	开始照明时,由活性反应中心捕获的单个激子驱动单个电子由 QA 经电子传递链至 PSI 受体侧末端电子受体的效率
	$\phi(R_o)$	PSI 受体侧末端电子受体还原的量子效率
	$ET_o/CS_m$	达到荧光测量最大值时( $t=t_{F_m}$ ),单位叶面积用于电子传递的能量
	$RE_o/CS_m$	$t=t_{F_m}$ 时,单个活性反应中心传递至 PSI 末端电子受体使其还原的能量通量
	$PI_{abs}$	以吸收光能为基础的性能参数
	$PI_{total}$	PSII、PSI 和系统间电子传递链的整体功能活性
叶绿素含量	SPAD	叶绿素相对含量

1.3.2 叶绿素荧光参数及叶绿素含量的测定 参照王润润<sup>[3]</sup>对油莎豆生育期的划分,选择在油莎豆块茎形成盛期天气晴朗的9:00–11:30,用 Pocket PEA 植物效率仪在经过遮光处理 0.5 h 的健康叶片 1/2 处测定油莎豆植株叶绿素荧光参数,3 次重复;用 SPAD-502 Plus 在叶片同一位置测定叶绿素含量(使用 SPAD 表征法)。叶绿素荧光参数详见表 2。

### 1.4 数据统计分析

参考张磊磊等<sup>[20]</sup>的方法,用 Excel 对种质资源光合参数进行统计分析。采用  $CV = (SD/M) \times 100\%$  计算遗传变异系数。其中,SD 为相应参数的标准差,M 为单个参数的平均值。Shannon's 信息指数( $H'$ )计算公式为  $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 。其中, $P_i$  表示第  $i$  种参数出现的频率,依据极差分级公式可分为 10 级。

使用 Organic pro 2021 计算 Pearson 相关系数,检验光合参数相关性以及 0.05 水平(双侧)上的显著性,并绘制相关性热图。利用 SPSS 22.0 将原始数据进行标准化处理,并进行主成分分析。利用最小数据组方法对每个主成分中最主要的变量进行筛选,以减少参数间的相关性对分析结果的影响<sup>[21]</sup>。筛选标准为,各个主成分中得分最高的参数列入最小数据组,其他与得分最高参数的差小于最高参数的 10%,且与得分最高参数无显著相关性的参数可纳入最小数据组。利用 Organic pro 2021 对原始数据进行标准化,采用组内联接法进行系统聚类。

## 2 结果与分析

### 2.1 油莎豆种质资源描述性统计分析

从表 3 可知,气体交换参数中,气孔导度( $G_s$ )的变异系数最大,为 33.25%;胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )的多样性指数最大,为 2.16。叶绿素荧光参数中, $PI_{total}$ [光系统 II (PS II)、光系统 I (PS I) 和系统间电子传递链的整体功能活性] 变异系数最大,为 48.51%; $\phi(R_o)$  (PS I 受体侧末端电子受体还原的量子效率)、 $RE_o/CS_m$  (达到荧光测量最大值时,单个活性反应中心传递至 PSI 末端电子受体使其还原的能量通量)的多样性指数最大,为 2.21。叶绿素含量变异系数为 7.15%,多样性指数为 2.09。

### 2.2 不同光合参数的相关性分析

如图 1 所示,油莎豆种质资源的 20 项光合参数相关程度较高,各参数间相互影响较大。对于气体



表 3 种质资源光合参数的描述性统计分析

Table 3 Descriptive statistical analysis of photosynthetic parameters of germplasm resources

参数	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数(%)	多样性指数
$P_n$	27.67	11.88	19.93	3.9	19.54	2.13
$G_s$	0.28	0.08	0.16	0.05	33.25	2.09
$C_i$	476.95	273.47	376.73	57.93	15.38	2.16
$T_r$	5.82	1.77	3.60	1.12	31.03	2.06
$F_v/F_m$	0.80	0.76	0.78	0.01	1.23	2.16
$S_m$	39.25	17.99	25.82	5.37	20.81	2.09
$ABS/RC$	1.93	1.38	1.57	0.13	8.21	2.15
$DI_o/RC$	0.47	0.30	0.35	0.04	11.25	2.07
$TR_o/RC$	1.46	1.07	1.22	0.09	7.57	2.14
$ET_o/RC$	0.97	0.72	0.84	0.05	6.46	2.07
$RE_o/RC$	0.47	0.17	0.33	0.07	20.89	2.05
$psi(E_o)$	0.76	0.58	0.69	0.05	6.64	2.19
$phi(E_o)$	0.60	0.44	0.54	0.04	7.46	2.15
$delta(R_o)$	0.58	0.20	0.39	0.08	19.82	2.14
$phi(R_o)$	0.32	0.09	0.21	0.05	23.92	2.21
$ET_o/CS_m$	13 397.00	8 072.67	10 850.11	1 425.84	13.14	2.17
$RE_o/CS_m$	6 353.00	1 905.00	4 262.23	1 016.69	23.85	2.21
$PI_{abs}$	8.44	2.23	5.37	1.52	28.26	2.20
$PI_{total}$	8.38	0.57	3.96	1.92	48.51	2.20
$SPAD$	48.43	33.10	42.42	3.03	7.15	2.09

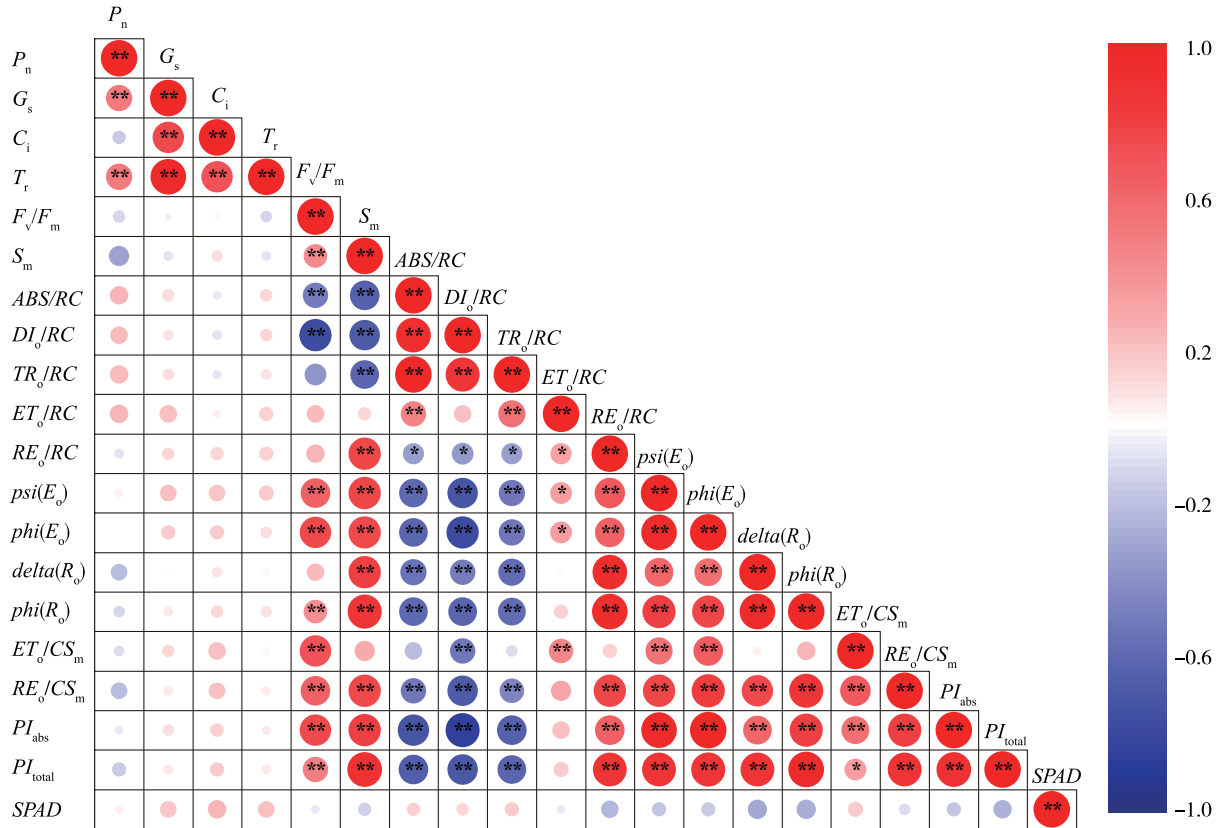
表中参数的表征意义见表 2。

交换参数,净光合速率( $P_n$ )与  $G_s$ 、蒸腾速率( $T_r$ )呈现极显著正相关; $G_s$ 与  $C_i$ 、 $T_r$ 呈现极显著正相关; $C_i$ 与  $T_r$ 呈现极显著正相关。对于叶绿素荧光参数, $F_v/F_m$ ( $t=0$ 时,原初光化学反应最大量子产率)与  $S_m$ (受体库容量)、 $psi(E_o)$ (开始照明时,由活性反应中心捕获的单个激子驱动除还原辅酶 A 外的电子传递的效率)、 $phi(E_o)$ (开始照明时,还原辅酶 A 至除还原辅酶 A 外的电子传递链电子受体电子传递的量子效率)、 $phi(R_o)$ 、 $ET_o/CS_m$ (达到荧光测量最大值时,单位叶面积用于电子传递的能量)、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ (以吸收光能为基础的性能参数)、 $PI_{total}$ 呈现极显著正相关,与  $ABS/RC$ (单位反应中心吸收的光能)、 $DI_o/RC$ (单个活性反应中心耗散的总能量)呈现极显著负相关; $S_m$ 与  $RE_o/RC$ (单个活性反应中心传递至 PSI 末端电子受体使其还原的电子通量)、 $psi(E_o)$ 、 $phi(E_o)$ 、 $delta(R_o)$ (开始照明时,由活性反应中心捕获的单个激子驱动单个电子由 QA 经电子

传递链至 PSI 受体侧末端电子受体的效率)、 $phi(R_o)$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著正相关,与  $ABS/RC$ 、 $DI_o/RC$ 、 $TR_o/RC$ 呈现极显著负相关; $ABS/RC$ 与  $DI_o/RC$ 、 $TR_o/RC$ (单位反应中心捕获的用于 QA 的能量)、 $ET_o/RC$ (单位反应中心传递的能量)呈现极显著正相关,与  $psi(E_o)$ 、 $phi(E_o)$ 、 $delta(R_o)$ 、 $phi(R_o)$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著负相关; $DI_o/RC$ 与  $TR_o/RC$ 呈现极显著正相关,与  $psi(E_o)$ 、 $phi(E_o)$ 、 $delta(R_o)$ 、 $phi(R_o)$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著负相关; $TR_o/RC$ 与  $ET_o/RC$ 呈现极显著正相关,与  $psi(E_o)$ 、 $phi(E_o)$ 、 $delta(R_o)$ 、 $phi(R_o)$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著负相关; $RE_o/RC$ 与  $psi(E_o)$ 、 $phi(E_o)$ 、 $delta(R_o)$ 、 $phi(R_o)$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著正相关; $psi(E_o)$ 与  $phi(E_o)$ 、 $delta(R_o)$ 、 $phi(R_o)$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著正相关; $phi(E_o)$ 与  $delta(R_o)$ 、 $phi(R_o)$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著

正相关; $\Delta(R_o)$ 与 $\phi(R_o)$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著正相关; $\phi(R_o)$ 与 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著正相关; $ET_o/CS_m$ 与 $RE_o/CS_m$ 呈现极显

著正相关; $RE_o/CS_m$ 与 $PI_{abs}$ 、 $PI_{total}$ 呈现极显著正相关; $PI_{abs}$ 与 $PI_{total}$ 呈现极显著正相关。 $SPAD$ 与其他参数无显著相关性。



图中参数的表征意义见表2。

图1 种质资源光合指标的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of photosynthetic parameters of germplasm resources

### 2.3 不同种质资源光合特性的主成分分析

本研究采用KMO检验和Bartlett球形检验来评估数据是否适合进行主成分分析。主成分分析结果显示,KMO值大于0.500(0.756),符合进行主成分分析的要求。KMO取样适当性数为0.756(>0.700),Bartlett的球形检验近似卡方为1813.15且 $P<0.01$ ,表明各个变量在一定程度上存在相互独立关系,可采用主成分分析的方法对数据进行分析。

由表4可知,第一主成分的贡献率为48.378%, $F_v/F_m$ 、 $S_m$ 和 $RE_o/RC$ 、 $\psi(E_o)$ 、 $\phi(E_o)$ 、 $\Delta(R_o)$ 、 $\phi(R_o)$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 都具有较强的正载荷, $ABS/RC$ 、 $TR_o/RC$ 具有较强的负载荷,该主成分主要反映叶绿素荧光参数的情况;第二主成分的贡献率为15.565%, $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ 具有较强的正载

荷,该主成分主要反映了气体交换参数的情况。主成分分析共提取到的5个主成分,总贡献率为90.707%,说明所选参数满足主成分分析的要求。

为进一步研究各主成分因子的贡献率,通过最小数据组分析,筛选5个主成分代表性参数。由表4知,在第一主成分中, $PI_{total}$ 得分最高,可选入最小数据组, $\phi(R_o)$ 、 $\psi(E_o)$ 、 $\phi(E_o)$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 与 $PI_{total}$ 得分之差小于最高因子的10%,但是 $\phi(R_o)$ 、 $\psi(E_o)$ 、 $\phi(E_o)$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$ 与 $PI_{total}$ 相关性较高。同理,经过筛选, $PI_{total}$ 、 $G_s$ 、 $ET_o/RC$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $P_n$ 符合要求,进入最小数据组。

将光合参数标准化后,根据各主成分的特征值计算不同种质资源的各主成分贡献率,并根据各主成分贡献率及对应的权重线性加权求和,构建模型,

评价 40 个油莎豆种质资源的光合特性。综合评分模型： $F = 0.533 \times PCA1 + 0.172 \times PCA2 + 0.118 \times PCA3 + 0.108 \times PCA4 + 0.069 \times PCA5$ ， $PCA1$ 、 $PCA2$ 、 $PCA3$ 、 $PCA4$ 、 $PCA5$  分别表示主成分 1、主成分 2、主成分 3、主成分 4、主成分 5。从评分结果(表 5)看，XJ8、JL7、HE9 综合得分排名前三，表现较好。

表 4 20 个光合指标主成分分析结果前 5 个主成分所对应的特征向量及方差解释

Table 4 Top five principal components corresponding characteristic vector and variance interpretation of principal component analysis of 20 photosynthesis indexes

参数	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	共同度
$P_n$	-0.173	0.500	-0.063	0.124	<b>-0.756</b>	0.872
$G_s$	0.088	<b>0.915</b>	-0.320	-0.141	-0.081	0.975
$C_i$	0.253	0.645	-0.363	-0.230	0.463	0.880
$T_r$	0.087	0.907	-0.296	-0.233	-0.078	0.979
$F_v/F_m$	0.661	-0.015	-0.107	0.632	0.069	0.853
$S_m$	0.810	-0.174	0.191	-0.238	0.110	0.792
$ABS/RC$	-0.768	0.315	0.534	0.056	0.129	0.994
$DI_o/RC$	-0.822	0.256	0.432	-0.199	0.060	0.971
$TR_o/RC$	-0.712	0.333	0.566	0.156	0.149	0.984
$ET_o/RC$	0.132	0.562	<b>0.703</b>	0.368	0.019	0.963
$RE_o/RC$	0.805	0.136	0.426	-0.342	0.018	0.965
$psi(E_o)$	0.920	0.162	0.075	0.180	-0.164	0.937
$phi(E_o)$	0.914	0.154	0.049	0.280	-0.124	0.956
$delta(R_o)$	0.805	-0.042	0.248	-0.489	0.022	0.951
$phi(R_o)$	0.912	0.022	0.200	-0.334	-0.017	0.985
$ET_o/CS_m$	0.512	0.178	-0.017	<b>0.690</b>	0.319	0.871
$RE_o/CS_m$	0.914	0.066	0.190	0.007	0.177	0.907
$PI_{abs}$	0.935	0.024	-0.064	0.248	-0.110	0.952
$PI_{total}$	<b>0.939</b>	0.005	0.139	-0.222	-0.026	0.951
$SPAD$	-0.146	0.236	-0.352	0.009	0.450	0.404
特征值	9.676	3.113	2.135	1.967	1.251	

参数的表征意义见表 2。加粗的数据为选入最小数据组的数据。主成分 1~主成分 5 的贡献率分别为 48.378%、15.565%、10.674%、9.834%、6.255%，累计贡献率分别为 48.378%、63.944%、74.618%、84.452%、90.707%。

表 5 种质资源主成分得分及排序

Table 5 Principal component scores and ranking of germplasm resources

排名	种质资源	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	综合得分
1	XJ8	5.62	0.04	-0.42	0.61	1.02	3.09
2	JL7	4.26	1.25	0.09	1.18	-0.09	2.62
3	HE9	3.94	2.89	0.19	-0.94	0.26	2.54
4	XJ9	4.19	0.00	0.58	-0.83	0.07	2.22
5	JL12	4.05	-0.19	-0.71	0.66	1.10	2.19
6	JL8	4.42	-0.68	0.95	-3.13	0.65	2.06
7	IM4	3.17	2.13	-2.31	-0.11	0.02	1.77
8	JL11	2.71	-0.33	0.51	0.90	-1.10	1.47
9	XJ12	3.21	-2.70	0.56	-0.47	-0.19	1.25
10	JL9	1.99	-1.60	-0.07	2.66	1.54	1.17
11	JL10	1.90	-1.63	1.48	2.38	-0.35	1.14
12	HE6	0.94	2.78	-0.93	1.89	-0.12	1.07

续表5 Continued5

排名	种质资源	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	综合得分
13	JL1	2.39	-1.23	-1.59	1.36	-1.72	0.91
14	HE5	0.91	0.55	1.20	1.79	-1.72	0.80
15	JL4	2.02	-0.85	0.28	-2.02	0.74	0.79
16	IM2	0.60	0.18	0.31	1.30	2.07	0.67
17	HE8	-0.70	4.45	1.69	-0.17	0.01	0.57
18	IM1	0.65	-1.73	1.72	1.35	-0.48	0.36
19	JL2	0.62	1.03	1.68	-3.26	-1.41	0.26
20	XJ11	1.48	-2.48	0.46	-0.53	-2.07	0.22
21	JL6	1.71	-2.45	-0.93	-1.51	-1.06	0.14
22	JL13	-0.19	-1.05	0.88	1.73	1.15	0.09
23	XJ2	-0.19	0.27	0.91	-0.05	-0.58	0.01
24	XJ1	-1.22	2.77	0.83	0.66	0.11	0.00
25	HE4	-1.44	1.67	1.72	0.34	-0.11	-0.25
26	JL3	-0.34	1.46	-0.75	-2.20	-0.84	-0.31
27	XJ10	-1.15	1.30	0.52	-0.83	-0.58	-0.46
28	IM6	-0.74	-1.77	-2.18	-1.03	2.58	-0.89
29	XJ3	-1.65	-1.34	-2.04	0.06	1.15	-1.26
30	HE3	-2.38	1.13	-1.63	-1.55	1.30	-1.35
31	HE2	-3.07	1.89	-0.77	-0.25	0.19	-1.42
32	HE7	-3.56	2.34	-1.33	1.33	-0.85	-1.56
33	XJ6	-3.70	-1.68	3.57	-1.05	1.12	-1.88
34	IM5	-2.70	-1.73	-2.43	0.42	-0.09	-1.99
35	JL5	-2.17	-2.36	-1.81	-1.54	-1.18	-2.02
36	XJ4	-3.68	-0.72	0.30	-0.21	-0.82	-2.13
37	IM3	-4.81	-1.11	1.69	-0.10	1.63	-2.45
38	HE1	-4.82	1.34	-1.80	-0.57	0.86	-2.55
39	XJ5	-4.14	-0.70	-2.47	1.02	-2.00	-2.65
40	XJ7	-8.14	-1.15	2.08	0.71	-0.23	-4.23

种质资源的详细信息见表1。

## 2.4 不同种质资源光合特性的聚类分析

基于最小数据组得到的5个主效参数对油莎豆种质资源进行聚类分析,结果(图2)表明,40份油莎豆种质资源可分为3个类群(I~III)。该结果通过主成分分析(图3)得到再次验证。

第I类群有16份种质资源,包括HE1、HE6、IM2、IM4、JL4、JL7、JL8、JL9、XJ1、XJ3、XJ4、XJ5、XJ6、XJ7、XJ8、XJ9,占据总资源数的40.0%。第II类群有13份种质资源,包括HE2、HE3、HE4、IM1、IM3、IM5、IM6、JL10、JL12、JL13、JL3、JL5、JL6,占据总资源数的32.5%。第III类群有11份种质资源,包括HE5、HE7、HE8、HE9、JL1、JL11、JL2、XJ10、XJ11、XJ12、XJ2,占据总资源数的27.5%(图2)。

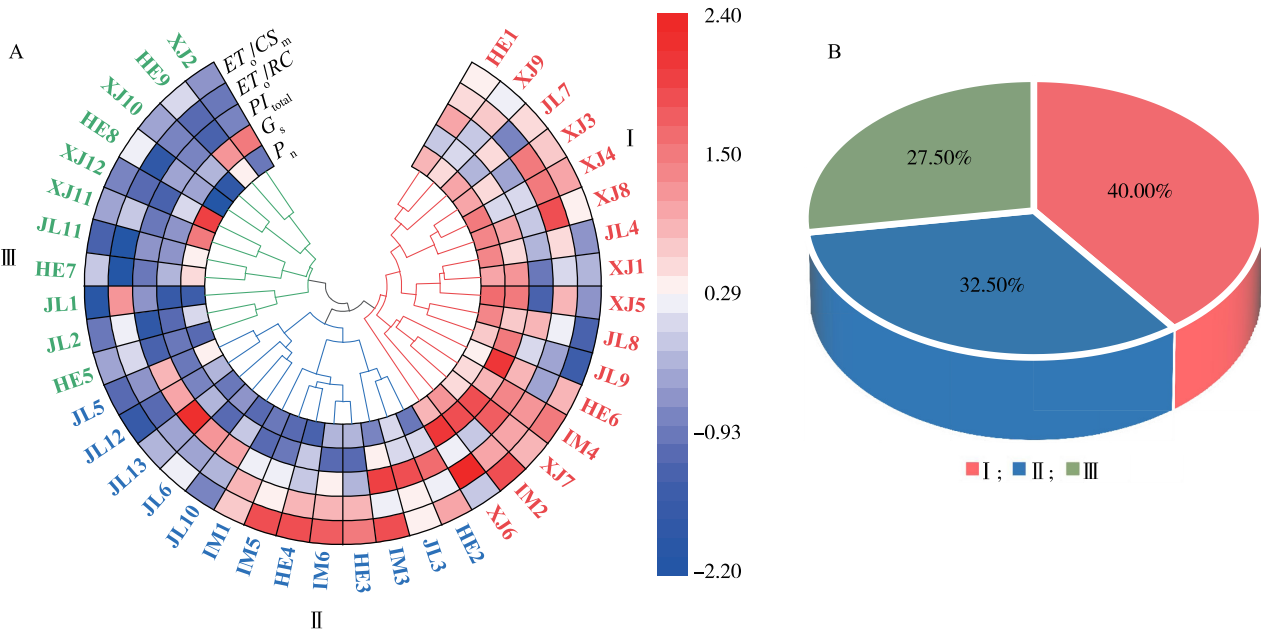
对各个类群最小数据组参数( $PI_{total}$ 、 $ET_o/RC$ 、

$ET_o/CS_m$ 、 $P_n$ 和 $G_s$ )进行差异分析。第I类群的 $P_n$ 、 $G_s$ 显著高于其他2个类群,第I类群和第II类群的 $ET_o/RC$ 、 $ET_o/CS_m$ 显著高于第III类群。第II类群的 $PI_{total}$ 显著高于其他2个类群。第III类群的各个指标均处于较低水平(图4)。

## 2.5 不同粒型油莎豆间光合特性的差异

40份油莎豆种质中包含26份圆粒种质和14份长粒种质,对2种类型种质的 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $ET_o/RC$ 、 $PI_{total}$ 以及主成分分析综合得分进行差异显著性分析。结果(图5)显示,综合得分在圆粒种质和长粒种质间的差异达到了显著水平,长粒种质显著高于圆粒种质。 $ET_o/RC$ 在圆粒种质和长粒种质间的差异达到了极显著水平,圆粒种质极显著高于长粒种质。 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $PI_{total}$ 在2类种质间差异未达到显著水平。

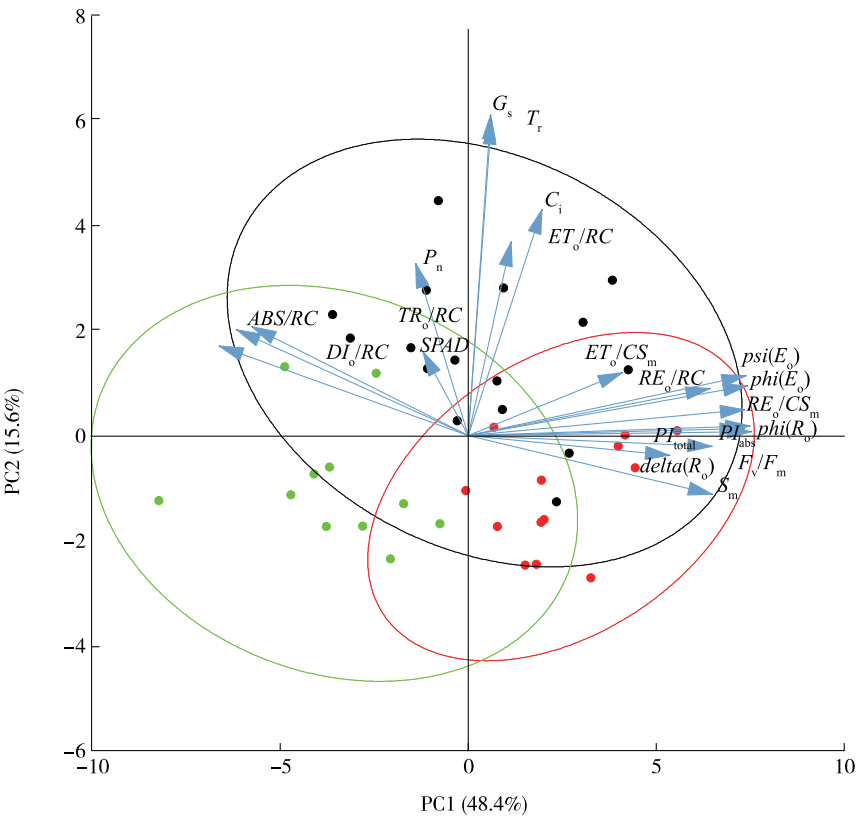




$PI_{total}$ 、 $ET_o/RC$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $P_n$  和  $G_s$  见表 2。

图 2 基于最小数据组的聚类分析

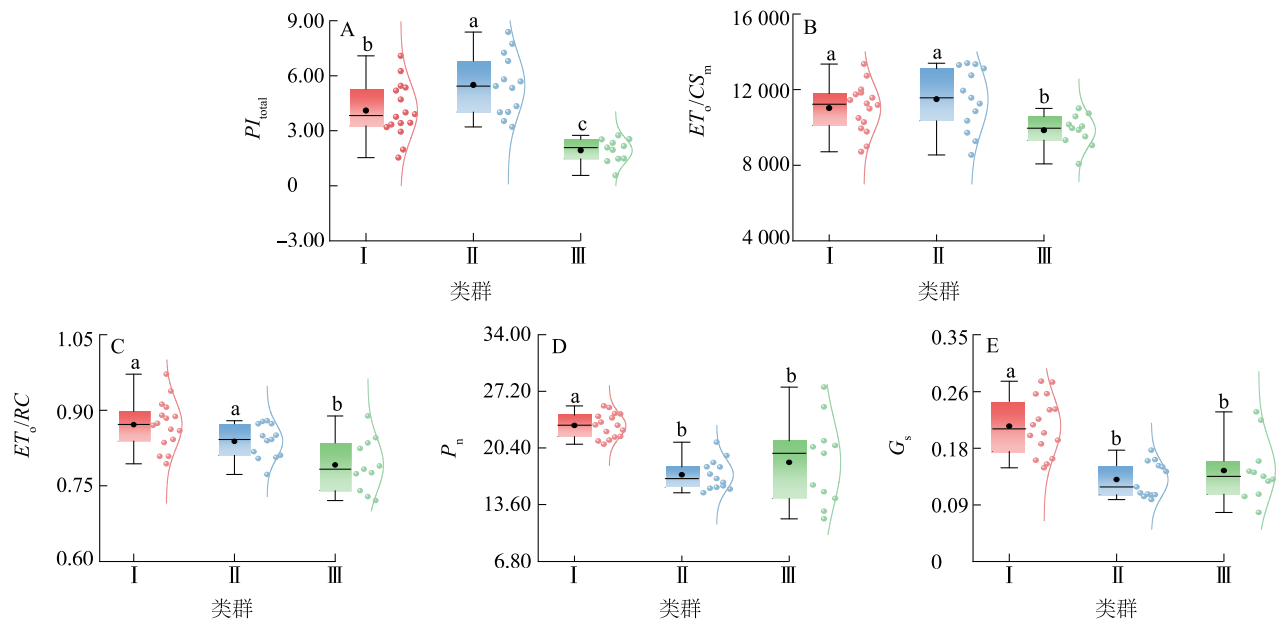
Fig.2 Clustering analysis based on the smallest set of data



图中参数的表征意义见表 2。

图 3 种质资源 20 个性状的主成分分析 (PCA) 图

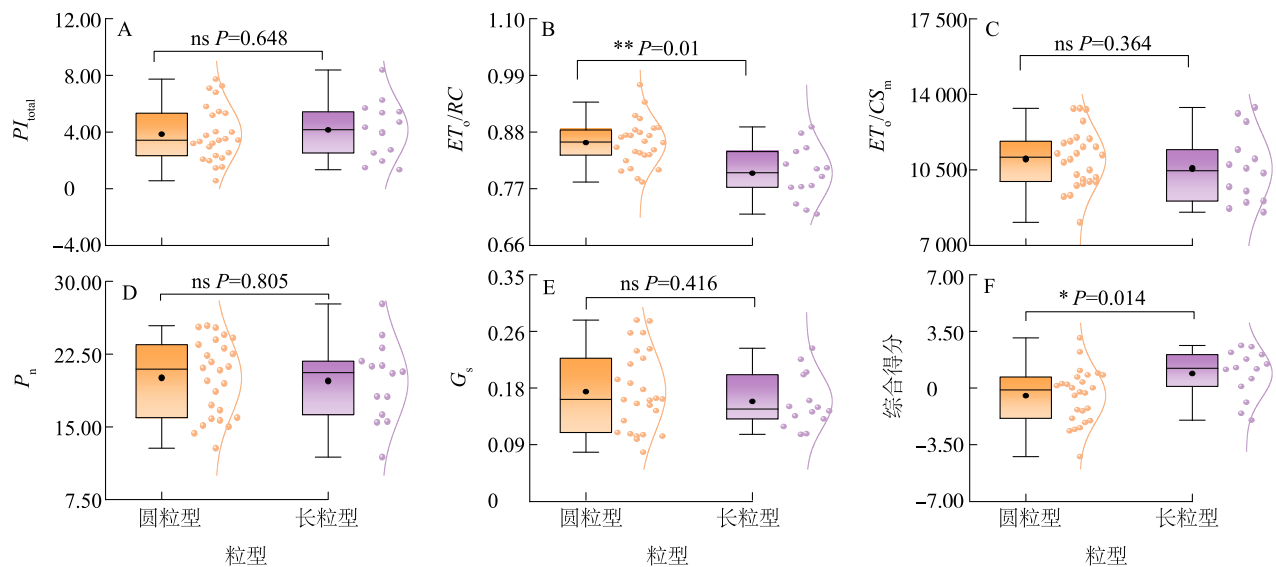
Fig.3 Principal component analysis (PCA) scatter map of 20 traits in germplasm resources



左侧为箱线图,右侧为正态分布图。 $PI_{total}$ 、 $ET_o/RC$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $P_n$  和  $G_s$  见表 2。

图 4 不同类群  $PI_{total}$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $ET_o/RC$ 、 $P_n$ 、 $G_s$  的差异性分析

Fig.4 Difference analysis of  $PI_{total}$ ,  $ET_o/CS_m$ ,  $ET_o/RC$ ,  $P_n$ , and  $G_s$  of different groups



左侧为箱线图,右侧为正态分布图。ns 表示差异不显著; \* 表示差异显著; \*\* 表示差异极显著。 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $ET_o/RC$ 、 $PI_{total}$  见表 2。

图 5 不同粒型种质  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $ET_o/RC$ 、 $PI_{total}$ 、综合得分的差异显著性分析

Fig.5 Significant analysis of differences of  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $ET_o/CS_m$ ,  $ET_o/RC$ ,  $PI_{total}$  and comprehensive scores of germplasms with different grain types

### 3 讨论与结论

光合作用在作物生长与产量形成中起到重要的作用<sup>[22-27]</sup>。已有研究表明,不同基因型种质资

源光合能力不尽相同<sup>[28]</sup>。因此,明确油莎豆种质资源光合特性差异,筛选优异高光效种质资源,是选育高产油莎豆新品种的重要途径。

本研究结果表明,20 项光合参数在油莎豆种

质资源间差异较大,变异幅度在 1.23%~48.51%,种质资源呈多样化。气体交换参数中, $G_s$  变异系数最大, $C_i$  变异系数最小,该结果与前人对澳洲坚果<sup>[29]</sup>、大豆<sup>[30]</sup>等作物种质资源的研究结果一致,表明  $C_i$  指标在种质资源间差异不明显, $G_s$  是衡量不同种质光合潜力的重要指标。叶绿素荧光参数中, $PI_{total}$  的变异系数最大,表明油莎豆种质资源间整体的活性存在显著差异; $F_v/F_m$  的变异系数最小,表明不同油莎豆种质资源最大光化学效率无显著差异,反映了油莎豆不同种质资源 PS II 中心原初光能的转化能力相近,这与对不同葡萄品种的研究结果一致<sup>[31]</sup>。已有研究结果表明,大田试验中叶片的 SPAD 与叶片叶绿素真实含量呈现极显著正相关<sup>[32]</sup>,在 40 份油莎豆种质资源中使用 SPAD 表征叶绿素含量,SPAD 变异系数为 7.15%,其变化范围(33.10~48.43)与于馥榕等<sup>[33]</sup>的研究结果相一致。

以往的研究结果表明, $P_n$  与  $C_i$  存在显著相关性<sup>[34-35]</sup>,但此类研究多数集中在非生物胁迫条件下。本研究中,在不同油莎豆种质间  $P_n$  与  $C_i$  相关性不显著,表明气孔因素可能不是油莎豆种质资源间光合作用强弱差异的影响因素。种质资源间光合作用的差异受到多因素控制。在对甜高粱种质资源的研究中,冯国郡等<sup>[36]</sup>也发现  $P_n$  与  $C_i$  相关性不显著。本试验中,SPAD 与其他光合参数没有显著相关性。一方面,这可能与作物种类有关,表明在一些作物中叶绿素含量并不是导致种质资源光合参数差异的关键因子<sup>[37-38]</sup>。另一方面,这也可能与光照度有关,强光下,光合速率不会因为叶绿素含量变化而表现出明显差异<sup>[39]</sup>。

本研究通过主成分分析结合最小数据组方法,筛选得到  $PI_{total}$ 、 $ET_o/RC$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $P_n$  和  $G_s$  等代表性参数,可有效反映不同油莎豆种质资源的光合特性。同时,这些参数在其他作物的研究中也体现了重要的参考价值。综合性能参数  $PI_{total}$  在光系统间的电子传递活性及光系统 I 的相关性能的研究中被广泛应用,赵欣<sup>[40]</sup>对紫花苜蓿的研究结果表明, $PI_{total}$  的高低可以很好地反映植株对光能的吸收、转化及电子传递的效率。 $ET_o/RC$  在油菜的研究中被认为与种子产量和品质具有较高的相关性<sup>[41]</sup>。 $ET_o/CS_m$  在小麦高产基因型中明显升高,在低产基因型中显著降低,这种现象被广泛用于小麦高产品

种的选育<sup>[42]</sup>。最小数据组筛选得到的代表性参数还包括重要的气体交换参数  $P_n$  和  $G_s$ 。在对大豆<sup>[43]</sup>、甜菜<sup>[44]</sup>等的研究中,发现  $P_n$  与作物的产量有显著相关性。同样,在对小麦<sup>[45]</sup>、大麦<sup>[46]</sup>品种和种质资源的研究中, $G_s$  被认为是生长潜力评估的关键参数。此外,很多育种者选择  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $PI_{total}$  等光合性状表现较好的亲本来培育高光效品种<sup>[47-49]</sup>。

本研究分析了不同籽粒形状油莎豆种质间的差异,发现不同粒型种质间  $ET_o/RC$  存在极显著差异,圆粒型种质  $ET_o/RC$  极显著高于长粒型种质。 $ET_o/RC$  是反映 PS II 活性的重要指标,结果表明圆粒型种质具有高于长粒型种质的 PS II 反应中心活性。干旱胁迫会导致植株部分 PS II 反应中心失活,增加剩余活性反应中心的负担,具有较高的反应中心活性可以较好地抵御干旱对于植株光合作用的影响<sup>[50]</sup>。麻剑南等<sup>[1]</sup>推测圆粒型油莎豆比长粒型油莎豆更适合在干旱地区种植,本研究从光合特性角度解释了圆粒型油莎豆耐旱性强的原因。本研究还发现长粒型油莎豆种质综合得分显著高于圆粒型油莎豆种质,表明长粒型油莎豆种质整体的光合效率显著高于圆粒型油莎豆种质。造成这一现象的原因可能是因为长粒型种质为窄叶,圆粒型种质为宽叶。高钿惠等<sup>[51]</sup>认为窄叶种质光合特性优于宽叶种质的更深层原因可能是窄叶能更高效地截获光合有效辐射。另外,张兴惠<sup>[52]</sup>在大豆的研究中也发现窄叶种质比宽叶种质具有更高的光合效率。

本研究以 40 份油莎豆种质资源为试验材料,测定叶片光合参数,利用相关性分析和主成分分析等多种分析方法进行数据分析。结果表明, $PI_{total}$  的变异系数最大。 $PI_{total}$  与  $F_v/F_m$ 、 $S_m$ 、 $RE_o/RC$ 、 $psi(E_o)$ 、 $phi(E_o)$ 、 $delta(R_o)$ 、 $phi(R_o)$ 、 $RE_o/CS_m$ 、 $PI_{abs}$  呈现显著正相关,与  $ABS/RC$ 、 $DI_o/RC$ 、 $TR_o/RC$  呈现极显著负相关。主成分最小数据组分析结果表明, $PI_{total}$ 、 $ET_o/RC$ 、 $ET_o/CS_m$ 、 $P_n$  和  $G_s$  可作为油莎豆高光效种质资源鉴定的重要参考指标。聚类分析结果表明,40 份种质可划分为 3 个类群。通过模型评价得出,XJ8、JL7、HE9 综合表现较好,可作为高光效种质资源,为油莎豆种质资源的进一步创新和利用提供重要参考。不同粒形种质间光合参数差异分析结果表明,圆粒型种质的  $ET_o/RC$  极显著高于长粒型种质,长粒型种质的主成分综合得分显著高于圆粒型种质。

## 参考文献:

- [1] 麻剑南,单成彬,冯 旭,等. 油莎豆茎叶代谢物与块茎形态的关联研究[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(1):62-71.
- [2] 杨向东,李子勇. 我国油莎豆产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报,2022,44(4):712-717.
- [3] 王润润. 种植密度和化学调控对油莎豆农艺性状及产量的影响[D]. 石河子:石河子大学,2021.
- [4] VEGA-MORALES T, MATEOS-DÍAZ C, PÉREZMACHÍN R, et al. Chemical composition of industrially and laboratory processed *Cyperus esculentus* rhizomes [J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124896.
- [5] 张鑫彤,吴秀芹. 内蒙古边际土地油莎豆种植及生产潜力评估[J]. 农业工程学报,2022,38(2):289-295.
- [6] 赵 勇. 氮肥形态对油莎豆生长和养分吸收的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
- [7] YOSHIDA S. Physiological aspects of grain yield[J]. Annual Review Plant Physiology, 1972, 23:437-464.
- [8] CALVIN M. Photosynthesis as a resource for energy and materials [J]. American Scientist, 1976, 23(6):425-444.
- [9] BASU U, BAJAJ D, SHARMA A, et al. Genetic dissection of photosynthetic efficiency traits for enhancing seed yield in chickpea [J]. Plant Cell & Environment, 2019, 42(1):158.
- [10] 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.
- [11] 张耀文,赵小光,关周博,等. 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.
- [12] WANG C L, YANG J L, CHEN W J, et al. Screening and identification of waterlogging tolerance in *Brassica napus* germplasm resources [J]. Agricultural Biotechnology, 2019, 8(1):17-20.
- [13] LI D Y, ZHANG Z A, ZHENG D J, et al. Comparison of net photosynthetic rate in leaves of soybean with different yield levels[J]. Journal of Northeast Agricultural University (English Edition), 2012, 3(19):14-19.
- [14] SHAMIM M J, KAGA A, TANAKA Y, et al. Analysis of physiological variations and genetic architecture for photosynthetic capacity of Japanese soybean germplasm[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:910527.
- [15] 王弼琨. 东北大豆核心种质的株型性状评价及高光合速率品种光合相关性状研究[D]. 延边:延边大学,2022.
- [16] 李 俊. 油菜高光效生理特征体系的建立及其调控研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2014.
- [17] 谢 锐,董 琦,任永峰,等. 油莎豆不同生育时期叶片光合特性变化规律分析[J]. 北方农业学报,2021,49(6):51-57.
- [18] 钟 鹏,苗丽丽,刘 杰,等. 种植密度和方式对油莎豆块茎生长期光合特性和产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2021,43(6):1099-1107.
- [19] 曹琦琦,任永峰,路战远,等. 氮磷钾配施对油莎豆产量及肥料利用效率的影响[J]. 中国油料作物学报,2023,45(2):368-377.
- [20] 张磊磊,范阿棋,洪 梅,等. 647 份海岛棉种质资源遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(1):307-324.
- [21] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2010, 159: 99-108.
- [22] 杨 勇,陈 成,阎永齐,等. 不同树形对桃冠层叶片光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):158-165.
- [23] 郭 伟,韩 秀,张 利,等. 青檀扦插苗对不同氮素水平的形态、光合生理响应和转录组分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(5):87-96.
- [24] 依文莲,李秀芳,吴世清,等. 咸水灌溉下生物炭对玉米光合特性及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(6):605-613.
- [25] 王露露,耿兴敏,宦智群,等. 1-MCP 预处理对杜鹃花高温胁迫下光合特性及相关基因表达的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(4):103-113.
- [26] 黄志午,俞亦章,徐志刚,等. 冬季设施补光对苏州地区岩棉培番茄生长的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(4):1034-1041.
- [27] 朱 和,田军仓,杨 凡,等. 水肥气热耦合对枸杞光合作用和产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(5):511-518.
- [28] ZHANG X L, TANG M Y, WANG H, et al. Analysis of photosynthetic differences of rice germplasm in southeast Asia based on leaf-tissue structure, physiology, and iTRAQ [J]. Agronomy, 2022, 12(12):3207.
- [29] 宫丽丹,马 静,贺熙勇,等. 澳洲坚果种质资源光合特性的比较研究[J]. 西南农业学报,2019,32(5):1045-1050.
- [30] 陈文杰,郭小红,汤复跃,等. 不同生育时期大豆叶片光合特性变化及相关性研究[J]. 中国油料作物学报,2017,39(3):360-365.
- [31] 吴久赞,廉苇佳,刘志刚,等. 不同葡萄品种叶绿素荧光参数的高温响应及其耐热性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(6):80-88.
- [32] XIONG D L, CHEN J, YU T T, et al. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics [J]. Scientific Reports, 2015, 5:13389.
- [33] 于馥榕,李毅丹,程云清,等. 油莎豆种质资源苗期耐盐性鉴定与评价[J]. 干旱地区农业研究,2023,41(2):1-10,85.
- [34] 王宣璎,张 翼,范秀华. 氮沉降对蒙古栎幼苗生长及光合特性的影响[J]. 森林与环境学报,2023,43(3):280-286.
- [35] 卢绍辉,袁国军,龚东风,等. 欧洲山毛榉不同月份光合特性研究[J]. 中国野生植物资源,2022,41(9):36-43.
- [36] 冯国郡,章建新,李宏琪,等. 甜高粱高光效种质的筛选和生理生化指标的比较[J]. 吉林农业大学学报,2013,35(3):260-268,277.
- [37] 李庆亮,尹 琦,赵 硕,等. 常规早粳超级稻品种‘中组 143’和‘中组 53’的光合生理特性[J]. 植物生理学报,2023,59(8):1607-1615.
- [38] 王 标,虞木奎,孙海菁,等. 盐胁迫对不同种源麻栎叶片光合特征的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(8):1817-1824.

- [39] 许大全. 光合作用学[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [40] 赵欣. 硅添加对高温胁迫下紫花苜蓿生长的影响及其生理生态机制研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.
- [41] XU H X, CEN H Y, MA Z H, et al. Assessment of seed yield and quality of winter oilseed rape using chlorophyll fluorescence parameters of pods [C]//2018 Annual International Meeting. Detroit: American Society of Agricultural and Biological Engineers. DOI:10.13031/aim.201800765.
- [42] GAUTAM A, AGRAWAL D, SAIPRASAD S V, et al. A quick method to screen high and low yielding wheat cultivars exposed to high temperature[J]. *Physiol Mol Biol Plants*, 2014, 20:533-537.
- [43] 牛宁,李振侠,金素娟,等. 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.
- [44] HETHERINGTON A M, WOODWARD F I. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. *Nature*, 2003, 424:901-908.
- [45] GUTIÉRREZ-RODRIGUEZ M, REYNOLDS M, LARQUÉ-SAAVEDRA A, et al. Photosynthesis of wheat in a warm, irrigated environment: II. Traits associated with genetic gains in yield[J]. *Field Crops Research*, 2000, 66:51-62.
- [46] JIANG Q, ROCHE D, MONACO T, et al. Stomatal conductance is a key parameter to assess limitations to photosynthesis and growth potential in barley genotypes[J]. *Plant biology (Stuttgart, Germany)*, 2006, 8:515-521.
- [47] 张耀文,赵小光,田建华,等. 甘蓝型油菜正反交后代叶片净光合速率和叶绿素含量的比较[J]. *华北农学报*, 2015, 30(5):135-140.
- [48] LI F C, TAO Z Q, LIU P, et al. Increased grain yield with improved photosynthetic characters in modern maize parental lines[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 9(14):1735-1744.
- [49] 冯希环,刘倩倩,周春雨,等. 乌塌菜新种质的抗冻性鉴定[J]. *中国瓜菜*, 2016, 29(12):48-50, 54.
- [50] 李红杰,刘佳,赵成凤,等. 干旱胁迫及复水处理对玉米苗期叶片光化学活性的影响[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(5):997-1005.
- [51] 高钊惠,尚佳州,宋立婷,等. 小叶杨叶片光合特性与解剖结构对干旱及复水的响应[J]. *中国水土保持科学*, 2021, 19(6):18-26.
- [52] 张兴惠. 氮密互作对不同叶形夏大豆品种光合特性与产量的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2023.

(责任编辑:陈海霞)