



赵雅杰,温蕊,贾祎明,等.谷子不同叶色亲本和F₂光合特性及产量相关性状研究[J].黑龙江农业科学,2025(12):30-36.

谷子不同叶色亲本和F₂光合特性 及产量相关性状研究

赵雅杰¹,温蕊¹,贾祎明¹,刘敏¹,贾晓清¹,张永虎¹,于立霞²

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院,内蒙古呼和浩特 010031; 2. 蒙草生态环境(集团)股份有限公司,内蒙古呼和浩特 010070)

摘要:为了探究不同叶色谷子的光合能力,促进高光效、高产量谷子新品种的培育,以黄绿色叶片的谷子品种金苗 K1 为母本,绿色叶片的豫谷 18 为父本,通过杂交获得 F₂ 分离群体,分析不同叶色谷子的叶绿素含量、光合特性及产量构成因子。结果表明,孕穗期绿色叶片的豫谷 18 和 F₂ 绿色叶片(F₂L)的叶绿素含量(SPAD 值)(49.2 和 44.7)显著高于黄绿色叶片的金苗 K1 和 F₂ 黄绿色叶片(F₂H)(36.9 和 33.9)。在苗期和孕穗期,黄绿色叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著高于绿色叶片,但其光合效率较低,表现为光系统 II 的最大光化学速率(F_v/F_m)较低。尽管黄绿色叶片的 F₂H 在株高、穗长等农艺性状上表现较好,但其单穗重、单穗粒重和出谷率显著低于双亲。相关性分析显示, F_v/F_m 与株高、穗长、穗粗、千粒重和出谷率呈正相关,表明光合效率对产量有重要影响。谷子叶色通过影响叶绿素积累与光系统 II 功能,调控光合效率及生育期光合特性动态,进而影响产量形成。绿色叶片材料因较高的光合效率,在产量相关性状上表现更优。

关键词:谷子;叶色;光合特性;荧光参数;产量

谷子(*Setaria italica* Beauv.)起源于中国,古时又称粟,五谷之一,属禾本科狗尾草属,作为我国的原产作物,至今仍是旱作生态农业的主栽作物^[1],在食物多样性和种植业结构调整中具有不可或缺的作用,我国谷子种植面积约占世界谷子种植面积的 80%,产量占世界谷子总产量的 90%^[2]。谷子是二倍体($2n=2x=18$)自花授粉作物,基因组较小(≈ 515 Mb),具有突出的抗旱、耐瘠薄和高光效特性,是极具发展潜力的旱生 C₄ 禾谷类模式作物^[3],被誉为“五谷之首”,现广泛种植于温带和亚热带地区,是我国北方干旱、半干旱地区种植的主要粮食作物^[4]。

叶片是高等植物光合作用的主要场所,对植物的生长发育起至关重要的作用,然而叶片颜色常常发生变化。叶片颜色的变化是植物生长中一种常见的现象,通常会影响植物的光合效率及植株生长能力^[5]。谷子叶片颜色会影响植株的光合作用以及产量等,因此在培育新品种时,叶色也是重要的选择性状^[6]。叶绿素是植物进行光合作用的色素,绿色植物通过叶绿素对光能的捕获及传递,能够将太阳能转化为稳定的化学能,为植物的生命活动提供能量,叶片中的叶绿素代谢途径及

叶绿体的发育过程出现变化,都可能导致叶色发生明显变化。研究发现,不同叶色植物的叶绿素代谢及叶绿体发育的变异存在差异,其对光合作用的影响也各不相同。一般情况下,叶绿素缺乏会导致光合作用的捕光效率降低,从而减小天线系统的大小^[7]。叶绿素缺乏对光合效率的影响也有所差异^[8]。目前,在谷子中公开研究报道的叶色突变体非常少,Luo 等^[9]鉴定出 14 个具有异常“花环型”结构的叶色突变体,可用于今后“花环型”结构发育和 C₄ 作物光合作用研究相关基因的定位和克隆。

与拟南芥、水稻和玉米等相比,目前,关于谷子叶色及叶绿体相关的进展不能满足对其 C₄ 光合和叶绿体发育机制的研究。本研究以黄绿色叶片金苗 K1 为母本,绿色叶片豫谷 18 为父本进行杂交,获得 F₂ 分离群体,根据 F₂ 群体分离情况测定其亲本及 F₂ 群体的叶绿素值、光合气体交换参数、叶绿素荧光动力学参数及产量构成因子等,期为后续评定其高代品系及新品种选育奠定基础并明确研究方向,对谷子基础研究和谷子生产具有重要意义。

收稿日期:2025-08-27

基金项目:国家现代农业产业技术体系(CARS-06-14.5-B11)。

第一作者:赵雅杰(1996—),女,硕士,助理研究员,从事谷子育种与栽培研究。E-mail:ZYJ19960916@163.com。

通信作者:张永虎(1986—),男,博士,副研究员,从事谷子育种与栽培研究。E-mail:zhangyonghu0815@126.com。

1 材料与方法

1.1 材料

以叶片黄绿色的金苗 K1 为母本,叶片绿色的豫谷 18 为父本进行杂交,收获 F₁ 种子,种植后通过表型鉴定 F₁ 真杂种,种植得到 F₂ 种子,于 2023 年种植双亲本和 F₂ 群体。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验材料均在 2024 年种植于内蒙古自治区农牧业科学院试验基地,田间采用顺序排列设计,每种材料种植 4 行,行长 4.0 m,行距 50 cm,株距 10 cm,试验地土壤肥力中等,灌溉方式为喷灌,间苗时 F₂ 分离群体苗色黄绿(F₂H)、绿色(F₂L)各留一半,其他田间管理同当地大田。

1.2.2 测定项目及方法 农艺性状观察与测定:幼苗期至成熟期记录所有材料生长情况,成熟后,每重复中间行随机连续选 5 株,田间调查主茎长度、主茎直径、旗叶长度、旗叶宽度;收获样株,室内调查主穗长度、主穗直径、主穗重、主穗粒重、千粒重等,所有性状考察均按照《谷子农艺性状形态特征鉴定标准》进行。

光合特性的测定:(1)叶绿素相对含量(SPAD 值)测定。在苗期、孕穗期、开花期对双亲本及 F₂ 黄绿色叶片、F₂ 绿色叶片运用 SPAD-502 Plus 叶绿素仪(日本)测定 SPAD 值。

(2)光合气体交换参数测定。在苗期、孕穗期、开花期,选择晴朗无风的天气,于上午 09:00—11:00,使用 TARGAS-1 便携式光合作用测定系

统,测定谷子双亲及 F₂ 黄色叶片、F₂ 绿色叶片植株顶端功能叶片光合气体交换参数,记录净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)及胞间 CO₂ 浓度(C_i)。

(3)叶绿素荧光动力学参数测定。在苗期、孕穗期、开花期,运用 Pocket PEA 植物效率分析仪测定谷子双亲及 F₂ 黄色叶片、F₂ 绿色叶片叶绿素荧光动力学参数,在测定过程中,首先用暗适应夹,夹住叶片中部,使叶片充分暗适应 20 min。待暗适应结束后,将分析探头置于叶夹上,然后打开叶夹遮光片,使叶片暴露在饱和脉冲光下,测定并导出暗适应后的最小荧光(F_o)、最大荧光(F_m)及光系统 II (PS II)最大量子产率(F_v/F_m)等各项参数,同时测定光反应下各项指标,用于计算光化学淬灭系数(q_P)、非光化学淬灭系数(q_N)等。

1.2.3 数据分析 用 Excel 2016 软件进行初步统计,用 SPSS 23.0 软件进行方差分析,用 GraphPad Prism 9 作图。

2 结果与分析

2.1 不同叶色谷子双亲及 F₂ 在不同时期 SPAD 值的变化

由图 1 可知,苗期至开花期,绿色叶片材料(豫谷 18、F₂L)的叶绿素相对含量(SPAD 值)均极显著高于黄绿色叶片材料(金苗 K1、F₂H),孕穗期差异最突出,豫谷 18(49.2)、F₂L(44.7)极显著高于金苗 K1(36.9)、F₂H(33.9);F₂ 群体内不同叶色间 SPAD 值差异也均达极显著水平。

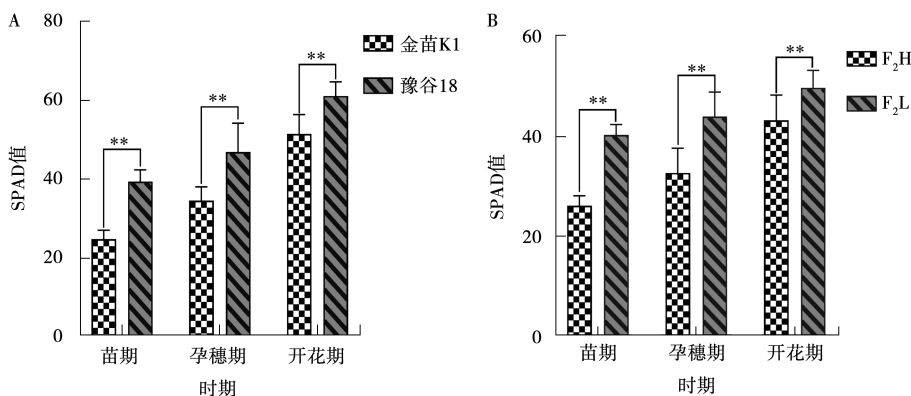


图 1 不同叶色谷子双亲(A)及 F₂(B)在不同时期 SPAD 值的差异性分析
注: * 表示两两比较差异显著($P \leq 0.05$); ** 表示两两比较差异极显著($P \leq 0.01$)。

2.2 不同叶色谷子双亲及 F₂ 在不同时期光合气体交换参数的变化

由表 1 可知,金苗 K1 和豫谷 18 的净光合速

率(P_n)在苗期、孕穗期、开花期分别为 15.69, 22.60, 21.36 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 6.98, 12.19 和 8.88 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 苗期至孕穗期,黄绿色材

料(金苗 K1、F₂H)的净光合速率(*P_n*)、蒸腾速率(*T_r*)、气孔导度(*G_s*)普遍高于绿色材料(豫谷 18、F₂L),但开花期 F₂H 的 *P_n*、*T_r*、*G_s* 低于 F₂L;所有材料 *P_n* 均呈“苗期至孕穗期上升、孕穗期至开花期下降”的规律,表明黄绿色材料虽特定时期

气体交换活性高。*C_i* 在所有材料间始终保持相对稳定,未随上述光合参数的动态变化出现显著差异,表明谷子胞间 CO₂ 浓度不受叶色变异及 *P_n*、*T_r*、*G_s* 变化的显著调控。

表 1 不同叶色谷子双亲及 F₂ 在不同时期光合气体交换参数的变化

时期	名称	净光合速率(<i>P_n</i>)/ [$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]	蒸腾速率(<i>T_r</i>)/ [$\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]	气孔导度(<i>G_s</i>)/ [$\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]	胞间 CO ₂ 浓度(<i>C_i</i>)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
苗期	金苗 K1	15.69 bc	4.59 c	179 c	239 c
	豫谷 18	6.98 a	1.54 a	47 a	176 b
	F ₂ H	17.65 c	2.97 b	89 b	107 a
	F ₂ L	13.97 b	2.95 b	82 b	110 a
孕穗期	金苗 K1	22.60 b	3.57 b	142 b	83 a
	豫谷 18	12.19 a	2.11 a	77 a	145 b
	F ₂ H	22.99 b	3.69 b	147 b	106 ab
	F ₂ L	9.29 a	2.05 a	53 a	71 a
开花期	金苗 K1	21.36 c	2.99 c	160 d	147 a
	豫谷 18	8.88 a	1.13 a	48 b	92 a
	F ₂ H	14.20 b	1.88 b	90 b	114 a
	F ₂ L	16.86 b	2.68 c	120 c	143 a

注:不同小写字母表示相同时期不同材料间在 $P\leq 0.05$ 水平差异显著。

2.3 不同叶色谷子双亲及 F₂ 在不同时期叶绿素荧光动力学参数分析

由表 2 可知,在苗期金苗 K1 与豫谷 18 的 *F_o*、*F_m*、*F_v*、NPQ 均存在显著性差异,F₂H 与 F₂L 的 *F_o*、*F_m*、*F_v*、*F_v*/*F_m*、*F_v*/*F_o*、NPQ 存在显著性差异;在孕穗期与开花期亲本与 F₂ 各项叶绿素荧光动力学参数虽然差异不显著,但综合来看,所有生育时期中,黄绿色叶片材料(金苗 K1、

F₂H)的 *F_o* 均低于绿色叶片材料(豫谷 18、F₂L);*F_v*/*F_m* 和 NPQ 在 3 个生育时期均表现为黄绿色叶片材料普遍低于绿色叶片材料,其中苗期差异显著,孕穗期、开花期差异不显著,提示黄绿色叶片材料的光合效率(PS II 功能稳定性)及光保护能力(热耗散效率)整体弱于绿色叶片材料,且该差异在苗期最为突出。

表 2 不同时期双亲及 F₂ 代不同叶色叶绿素荧光动力学参数分析

时期	名称	初始荧光 (<i>F_o</i>)	最大荧光 (<i>F_m</i>)	可变荧光 (<i>F_v</i>)	最大光化学速率 (<i>F_v</i> / <i>F_m</i>)	PS II 潜在活性 (<i>F_v</i> / <i>F_o</i>)	光化学淬灭 系数(<i>qP</i>)	非光化学淬灭 系数(<i>NPQ</i>)
苗期	金苗 K1	2078 a	6363 a	4285 a	0.6694 a	2.0728 a	0.6890 a	0.4482 ab
	豫谷 18	2875 c	10131 b	7256 b	0.7148 ab	2.5288 a	0.6518 a	1.1757 c
	F ₂ H	2034 a	6525 a	4491 a	0.6840 a	2.2526 a	0.6785 a	0.1119 a
	F ₂ L	2630 b	11063 b	8432 c	0.7618 b	3.2082 b	0.6403 a	0.7974 bc
孕穗期	金苗 K1	2597 a	8861 ab	6264 a	0.7000 a	2.4188 a	0.6446 a	0.4161 a
	豫谷 18	3028 ab	10227 b	7199 a	0.7034 a	2.4772 a	0.6839 ab	0.9489 a
	F ₂ H	2365 a	8099 a	5734 a	0.6142 a	2.4992 a	0.6895 ab	0.7759 a
	F ₂ L	3507 b	9384 ab	5876 a	0.6930 a	1.8256 a	0.7157 b	1.0640 a
开花期	金苗 K1	3186 a	10221 ab	7036 ab	0.2663 a	2.3062 a	0.6971 a	0.6379 a
	豫谷 18	3205 a	12183 b	8978 b	0.3346 a	2.8886 a	0.6987 a	0.7941 a
	F ₂ H	2651 a	9906 ab	7256 ab	0.2701 a	2.7324 a	0.6685 a	0.6215 a
	F ₂ L	2936 a	8688 a	5752 a	0.3387 a	1.9880 a	0.7089 a	0.6955 a

注:不同小写字母表示相同时期不同材料间在 $P\leq 0.05$ 水平差异显著。

2.4 不同叶色谷子双亲及 F₂ 田间农艺性状及产量构成因子分析

2.4.1 农艺性状 由表 3 可知, 成熟期金苗 K1 株高(108.88 cm)、穗长(25.32 cm)高于豫谷 18 的株高(106.94 cm)和穗长(25.08 cm), 但二者差异不显著。F₂H 的株高、穗长、穗粗、叶长和叶宽分别为 122.44 cm、28.22 cm、32.69 mm、41.88 cm、3.40 cm, F₂L 的株高、穗长、穗粗、叶长和叶宽分别为 115.16 cm、26.24 cm、24.61 mm、31.30 cm 和 2.96 cm, F₂H 的株高、穗长、穗粗、叶长、叶宽高于 F₂L, 同时也高于金苗 K1。

F₂ 群体中, 黄绿色植株(F₂H)的各项农艺性状均高于绿色植株(F₂L), 其中, F₂H 的穗粗、叶长、叶宽显著高于 F₂L, 体现出 F₂ 群体中叶色与农艺性状的关联性, 黄绿色植株在营养生长及株型扩展上更具优势。

F₂ 群体中黄绿色植株(F₂H)的株高、穗长均高于双亲, 叶长接近金苗 K1、低于豫谷 18, 穗粗与金苗 K1 接近、显著低于豫谷 18, 叶宽高于金苗 K1、低于豫谷 18; 而 F₂ 绿色植株(F₂L)的株高、穗长高于双亲, 穗粗、叶长、叶宽均低于双亲, 表明 F₂ 代群体在农艺性状上存在分离, 且黄绿色植株更易继承并超越双亲的株型优势。

表 3 不同叶色谷子双亲及 F₂ 田间农艺性状分析

名称	株高/cm	穗长/cm	穗粗/mm	叶长/cm	叶宽/cm
金苗 K1	108.88 a	25.32 a	32.08 b	40.10 b	3.14 ab
豫谷 18	106.94 a	25.08 a	38.89 c	47.76 c	3.88 c
F ₂ H	122.44 a	28.22 a	32.69 b	41.88 bc	3.40 b
F ₂ L	115.16 a	26.24 a	24.61 a	31.30 a	2.96 a

注: 不同小写字母表示不同材料间在 $P \leq 0.05$ 水平差异显著。

2.4.2 产量构成因子 由表 4 可知, 黄绿色亲本(金苗 K1)的单穗重(46.35 g)、单穗粒重(37.21 g)、出谷率(80%)均显著高于绿色亲本(豫谷 18)。而

千粒重则表现为金苗 K1(2.81 g)显著低于豫谷 18(2.98 g)。F₂ 群体中, 黄绿色植株 F₂H 单穗重(19.74 g)、单穗粒重(14.26 g)、千粒重(2.86 g)均高于 F₂L(17.14 g)、单穗粒重(10.97 g)、千粒重(2.86 g), 但差异不显著; 出谷率(73%)显著高于 F₂L(64%)。

F₂ 植株(F₂H、F₂L)的单穗重、单穗粒重均显著低于双亲, 出谷率小于双亲, 千粒重则处于双亲水平之间, 且差异显著。

综上所述可以看出, 双亲和后代因叶色差异, 在产量形成的关键物质积累与转化指标上呈现显著分化, 黄绿色亲本金苗 K1 在单穗物质积累量与籽粒转化率上更具优势, 而绿色亲本豫谷 18 在籽粒饱满度上表现更优。同时 F₂ 群体在产量构成的核心指标(单穗质量、单穗籽粒质量、出谷率)上存在显著的世代间衰退现象, 仅千粒重保持与双亲相近的水平。

表 4 不同叶色谷子双亲及 F₂ 产量构成因子分析

名称	单穗重/g	单穗粒重/g	出谷率/%	千粒重/g
金苗 K1	46.35 c	37.21 c	80 c	2.81 a
豫谷 18	25.93 b	20.01 b	77 b	2.98 c
F ₂ H	19.74 a	14.26 a	73 ab	2.86 b
F ₂ L	17.14 a	10.97 a	64 a	2.82 a

注: 不同小写字母表示不同材料间在 $P \leq 0.05$ 水平差异显著。

2.5 开花期各光合指标与田间农艺性状及产量构成因子相关性分析

由表 5 可知, F₀ 与株高、穗长均呈显著负相关; 光合速率、胞间 CO₂ 浓度与 F_v/F_m 呈显著负相关关系; SPAD 值与 F₀、F_v/F_m、NPQ 呈正相关关系; F_v/F_m 与株高、穗长、穗粗、千粒重、出谷率、SPAD 值均呈正相关关系; NPQ 与株高、穗长、穗粗、光合速率、胞间 CO₂ 浓度均呈负相关关系。

表 5 开花期各光合指标与田间农艺性状及产量构成因子相关性分析

项目	株高	穗长	穗粗	千粒重	出谷率	SPAD	P _n	C _i	F ₀	F _v /F _m	NPQ
株高	1										
穗长	0.986*	1									
穗粗	-0.420	-0.266	1								
千粒重	-0.176	-0.154	-0.031	1							
出谷率	-0.568	-0.422	0.943	0.279	1						
SPAD	-0.782	-0.797	0.064	0.709	0.369	1					
P _n	-0.204	-0.250	0.023	-0.911	-0.206	-0.358	1				
C _i	-0.253	-0.300	0.035	-0.889	-0.182	-0.310	0.999**	1			
F ₀	-0.989*	-0.985*	0.336	0.297	0.525	0.863	0.095	0.146	1		
F _v /F _m	0.328	0.402	0.104	0.798	0.270	0.165	-0.970*	-0.978*	-0.244	1	
NPQ	-0.454	-0.513	-0.321	0.819	0.010	0.900	-0.542	-0.506	0.579	0.326	1

3 讨论

光合作用是作物产量形成的物质基础^[10-11],叶色的变化会直接影响叶片的光合速率^[12]。目前,在谷子上已发现多种类型的叶色突变体,导致发育异常甚至死苗^[13]。本研究以黄绿叶品种金苗 K1 和绿叶品种豫谷 18 及其杂交 F₂ 分离群体为材料,系统比较了不同叶色谷子材料在关键生育期的光合特性及产量性状差异。结果表明,尽管黄绿叶材料在部分气体交换参数上表现出优势,但其光系统 II 的实际光能转化效率(F_v/F_m)较低,最终导致其产量显著低于绿叶材料。这一发现揭示了叶色作为可见表型标记背后所隐含的深刻生理学机制,并为谷子高光效育种提供了重要的理论与实践依据。

叶绿素在绿色植物光系统 I (PS I) 和光系统 II (PS II) 中的光能量收集和电荷分离中发挥关键作用,是光合作用中的重要色素^[14]。叶绿素含量、净光合速率等是反映植物生长发育状况的重要指标^[15]。黄绿叶材料金苗 K1 和 F₂H 的 SPAD 值显著低于绿叶材料,这与多数作物中叶色突变体的研究结果一致^[16]。黄叶材料在苗期和孕穗期表现出较高的 P_n 、 T_r 和 G_s ,这可能与其叶绿素含量较低、光合同化产物积累较少所引发的“补偿效应”有关,类似现象在水稻^[17-18]和大豆^[19]中亦有报道。 F_v/F_m 值持续偏低,表明光系统 II 反应中心存在损伤或抑制,光能转化效率受限。说明在评价光合性能时,不能仅依赖气体交换参数,更应关注荧光参数所反映的光合机构内在状态。

F_0 为光系统 II 反应中心全部开放时的荧光水平,与叶绿素含量密切相关,分析叶绿素含量减少是导致 F_0 降低的主要原因^[20-21]。在苗期,黄绿色叶片的金苗 K1 和 F₂H 的初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v)和非光化学淬灭系数(NPQ)均显著低于绿色叶片的豫谷 18 和 F₂L。 F_v/F_m (光系统 II 的最大量子产率)在黄绿色叶片材料中普遍较低,表明其光合效率较低,PS II 天线色素吸收的光能以热形式耗散较少。

本研究进一步发现,尽管黄叶材料在株高、穗长等营养生长性状上表现良好,但其单穗重、单穗籽粒重及出谷率均较低,说明其“形态优势”未能转化为“产量优势”。这一结果凸显了光合效率在

产量形成中的决定性作用。相关性分析表明, F_v/F_m 与多个产量构成因子呈显著正相关,进一步证实了光系统 II 稳定性对籽粒产量的重要贡献。这一发现与 Li 等^[22]在玉米中的研究和 Wang 等^[23]在小麦中的结论相呼应,说明光合性能优化是作物高产育种的重要方向。

在谷子育种中,应综合考虑光合效率和产量的关系^[23]。NPQ 值较低表明黄叶材料的热耗散能力较弱,在光胁迫下更易发生光抑制^[24]。叶色突变往往与叶绿素合成酶基因、血红素加氧酶基因或核质信号转导基因的突变有关^[25-26]。因此,利用分子手段深入研究这些材料的遗传背景,将有助于揭示叶色-光合-产量之间的内在联系。

本研究对谷子育种实践具有重要启示。首先,后续谷子育种中,叶色可作为早期选择高光效材料的可见标记,优先选择 F_v/F_m 较高的绿色叶片材料,但需结合荧光参数进行综合评价;其次,在追求理想株型的同时,应注重光合性能的改善,避免“高耗低效”的生理类型。同时结合 SPAD 值与千粒重、出谷率的关联特征,协同改良光合效率与产量构成因子,以培育高光效、高产量的谷子新品种;最后,利用 F₂ 分离群体中出现的叶色分离,可进一步构建基因定位群体,挖掘调控叶色和光合效率的关键基因。

4 结论

绿色叶片的豫谷 18 和 F₂ 绿色叶片材料(F₂L)的叶绿素含量(SPAD 值)显著高于黄绿色叶片的金苗 K1 和 F₂ 黄绿色叶片材料(F₂H)。在苗期和孕穗期,黄绿色叶片材料的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著高于绿色叶片,全生育期黄绿色叶片材料 F_v/F_m 更低,光合效率弱;F₂H 农艺性状较优,但 F₂ 单穗重、单穗粒重等产量因子显著低于双亲;相关性分析显示, F_v/F_m 与株高、穗长、穗粗、千粒重和出谷率呈正相关。 P_n 、 C_i 与 F_v/F_m 、千粒重负相关,光合效率对产量起关键作用。

参考文献:

- [1] 贾冠清,刁现民. 谷子(*Setaria italica* (L.) P. Beauv.) 作为功能基因组研究模式植物的发展现状及趋势[J]. 生命科学, 2017, 29(3): 292-301.
- [2] 王海岗,温琪汾,穆志新,等. 山西谷子核心资源群体结构及主要农艺性状关联分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 4088-4099.

- [3] 穆彩琴,张瑞娟,屈聪玲,等.基于 RNA-Seq 技术的谷子新基因发掘及基因结构优化[J].植物生理学报,2016,52(7):1066-1072.
- [4] 秦娜,朱灿灿,宋迎辉,等.一个谷子新耐旱性突变体(drm)光合特性与抗旱性能分析[J].植物科学学报,2023,41(1):53-62.
- [5] 徐明远,何鹏,赖伟,等.植物叶色变异分子机制研究进展[J].分子植物育种,2021,19(10):3448-3455.
- [6] JANINA A, KENJI N, JUDITH S, et al. Posttranslational control of ALA synthesis includes GluTR degradation by Clp protease and stabilization by GluTR-Binding protein [J]. *Plant Physiology*, 2016, 170(4):2040-2051.
- [7] 吕典华,宗学风,王三根,等.两个水稻叶色突变体的光合特性研究[J].作物学报,2009,35(12):2304-2308.
- [8] 薛芳婷,刘新亮,刘玉华,等.芽变黄叶银杏光合和叶绿素荧光特性[J].西部林业科学,2023,52(4):129-136.
- [9] LUO M Z, ZHANG S, TANG C J, et al. Screening of mutants related to the C(4) photosynthetic kranz structure in foxtail millet [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1650.
- [10] ESTRADA-CAMPUZANO G, MIRALLES D J, SLAFER G A. Yield determination in *Triticale* as affected by radiation in different development phases [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(4): 597-605.
- [11] JAHAN M S, GUO S R, SUN J, et al. Melatonin-mediated photosynthetic performance of tomato seedlings under high-temperature stress [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 167: 309-320.
- [12] 商彩丽.花生叶片颜色 QTLs 定位研究[D].济南:山东师范大学,2021.
- [13] 连世超,韩康妮,杜晓芬,等.谷子黄绿叶突变体 ygl7 的精细定位及候选基因分析[J].华北农学报,2024,39(2):27-38.
- [14] OHASHI S, IEMURA T, OKADA N, et al. An overview on chlorophylls and quinones in the photosystem I-type reaction centers [J]. *Photosynthesis Research*, 2010, 104(2): 305-319.
- [15] 李津,张建甫,鲍佳雪,等.种植密度对不同居群豆茶决明生长、光合特性及粒重的影响[J/OL].山东农业科学,2025;1-10 [2025-09-04]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=AGRI20250904002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [16] ZHANG H, LI Y Y, ZHU J K. Developing naturally stress-resistant crops for a sustainable agriculture [J]. *Nature Plants*, 2018, 4(12): 989-996.
- [17] CHEN T, ZHANG Y, ZHAO L, et al. Physiological characterization and gene mapping of a chlorophyll-deficient mutant in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(4): 759-769.
- [18] 龚红兵,陈亮明,刁立平,等.水稻叶绿素 b 减少突变体的遗传分析及其相关特性[J].中国农业科学,2001,34(6):686-689.
- [19] LIU B, LI Y, ZHANG X, et al. A chlorophyll-deficient soybean mutant with improved photosynthetic efficiency and yield potential [J]. *Field Crops Research*, 2021, 273: 108297.
- [20] GREEN B R, DURNFORD D G. The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1996, 47: 685-714.
- [21] 曾译欧.光照对植物枝叶生长和生物量的影响研究进展[J].农业技术与装备,2022(12):57-59.
- [22] LI H, WANG Y, XIAO J, et al. Genetic basis of photosynthetic efficiency in maize revealed by genome-wide association study [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(19): 5893-5905.
- [23] WANG Z, LI W, QI J, et al. Genetic dissection of photosynthetic efficiency in wheat under drought stress [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2022, 135(3): 897-911.
- [24] POGSON B J, ALBRECHT V. Genetic dissection of chloroplast biogenesis and development: an overview [J]. *Plant Physiology*, 2011, 155(4): 1545-1551.
- [25] RUBAN A V. Evolution under the Sun: optimizing light harvesting in photosynthesis [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(1): 7-23.
- [26] HU Z, ZHANG H, YANG J, et al. Molecular cloning and characterization of a gene related to chlorophyll biosynthesis in rice [J]. *Plant Cell Reports*, 2020, 39(4): 525-537.

Research on Photosynthetic Characteristics and Yield-Related Traits of Parents and F₂ Generation with Different Leaf Colors in Foxtail Millet

ZHAO Yajie¹, WEN Rui¹, JIA Yiming¹, LIU Min¹, JIA Xiaoqing¹, ZHANG Yonghu¹, YU Lixia²

(1. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Huhhot 010031, China; 2. Mengcao Ecological Environment (Group) Co., Ltd., Huhhot 010070, China)

Abstract: In order to explore the photosynthetic capacity of foxtail millet with different leaf colors and promote the breeding of new foxtail millet varieties with high photosynthetic efficiency and high yield, this study used

the yellow-green leaf variety Jinmiao K1 as the female parent and the green leaf variety Yugu 18. The F_2 segregated population were obtained through hybridization, and the chlorophyll content, photosynthetic characteristics, and yield components of foxtail millet with different leaf colors were systematically analyzed. The results showed that the chlorophyll content (SPAD values) of the green-leaf Yugu 18 and F_2 green-leaf (F_2L) plants (49.2 and 44.7, respectively) were significantly higher than those of the yellow-green leaf Jinmiao K1 and F_2 yellow-green leaf (F_2H) plants (36.9 and 33.9, respectively). At the seedling and booting stages, the net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of yellow-green leaves were significantly higher than those of green leaves, but their photosynthetic efficiency was lower, manifested as a lower maximum quantum yield of photosystem II (F_v/F_m). Although the yellow-green leaf F_2H performed better in agronomic traits such as plant height and panicle length, its panicle weight, grain weight per panicle, and millet yield rate were significantly lower than those of the green-leaf F_2L and both parents. Correlation analysis revealed that F_v/F_m was positively correlated with plant height, panicle length, panicle diameter, 1000-grain weight, and millet yield rate, indicating that photosynthetic efficiency has a significant impact on yield. Leaf color of foxtail millet regulates photosynthetic efficiency and the dynamics of photosynthetic characteristics during the growth period by affecting chlorophyll accumulation and photosystem II function, thereby influencing yield formation. Green-leaf materials exhibit better performance in yield-related traits due to their higher photosynthetic efficiency.

Keywords: foxtail millet; leaf color; photosynthetic characteristics; fluorescence parameters; yield

(上接第 29 页)

Screening of High Nitrogen Efficiency Evaluating Indicators for Different Genotypes of Wheat at Seedling Stage

ZHANG Xinbo¹, ZHENG Wutong¹, FENG Wujian¹, SHU Xiaowei¹, GAO Feng¹, ZHANG Yanxia², QIANG Chengkui¹

(1. College of Agricultural and Forestry Engineering, Xuzhou Vocational College of Bioengineering / Xuzhou Key Laboratory of Modern Agricultural Biotechnology, Xuzhou 221006, China; 2. Xuzhou Jiahe Agricultural Technology Co., Ltd., Xuzhou 221200, China)

Abstract: In order to select suitable wheat varieties for cultivation in the Xuzhou Region, 16 wheat varieties were selected as samples at the 6-leaf stage. Through methods such as principal component analysis and systematic clustering analysis, the differences in root structure, dry matter weight, nitrogen content, and nitrogen accumulation among different genotypes of wheat varieties under nitrogen application levels were studied. The nitrogen efficiency of different genotypes of wheat seedlings was also comprehensively evaluated. The results showed that under nitrogen application conditions, there were differences in 12 trait indicators affecting nitrogen efficiency among different wheat varieties. Through principal component analysis, the 12 individual indicators were converted into 4 independent comprehensive indicators, with a cumulative contribution rate of 97.44%. Through cluster analysis of the comprehensive evaluation value of nitrogen efficiency (F value), the tested varieties could be clustered into 3 major categories at a euclidean distance of 5. Eight nitrogen-efficient varieties were preliminarily selected. By constructing the optimal equation for nitrogen efficiency in the wheat seedling stage, five indicators such as root surface area, root volume, root-to-shoot ratio, root nitrogen content, and plant nitrogen accumulation had significant importance for nitrogen efficiency in wheat. In addition, the GS and GOGAT activities of the nitrogen-efficient wheat varieties were significantly higher than those of nitrogen-inefficient varieties, and the expression of the *TaGS* gene also showed this trend, but the expression of the *TaGOGAT* gene did not show a consistent pattern

Keywords: wheat; nitrogen-efficient related traits; principal component analysis; cluster analysis