

优质半鸡脚叶棉花种质—ZKY-1 的选育及其特性研究

郭 伊, 赵漪柔, 祝水金

(浙江大学农业与生物技术学院农学系, 杭州 310058)

摘要: 以天然陆海种间杂交株为材料, 采用株行杂交方法, 打破不良连锁, 选育优质半鸡脚叶棉花种质—ZKY-1。同时以 ZKY-1 为研究材料, 探究其农艺和品质性状、生理生化特性以及半鸡脚叶性状的遗传特点, 为该种质的利用与推广提供理论依据。研究结果表明, ZKY-1 产量略低于陆地棉对照品种中棉所 49, 但纤维品质优异, 纤维长度为 34.5 mm, 断裂比强度为 38.4 cN/tex。ZKY-1 的优异纤维品质性状遗传力强, 用 ZKY-1 与不同类型陆地棉品种杂交得到的杂种, 其纤维品质性状如断裂比强度和纤维长度均表现出较大的中亲优势, 个别组合甚至有较大的超亲优势。ZKY-1 叶片的裂口指数为 0.75 ± 0.01 , 为半鸡脚叶, 与正常叶型陆地棉杂交得到的 F_1 叶型为中间类型, F_2 出现分离, 卡方检测结果表明, 半鸡脚叶性状符合一对显性基因控制的分离比。ZKY-1 的发芽率和发芽势等明显高于对照。净光合速率在蕾期和铃期与对照无明显差异, 在花期显著低于对照。叶绿素总量在蕾期和花期与对照无显著差异, 铃期显著高于对照。在蕾期和花期, ZKY-1 的 SOD 和 POD 活性均显著高于对照, MDA 含量无显著差异; 在铃期, ZKY-1 的 POD 活性显著低于对照, MDA 含量显著高于对照, SOD 的活性无显著差异。ZKY-1 具有特有的稳定遗传的半鸡脚叶叶型和优异的纤维品质, 是棉花纤维品质改良和高光效育种的种质资源。

关键词: 棉花; 半鸡脚叶; 选育; 优异种质

Breeding and Characterization of a Semi-okra Cotton Germplasm, ZKY-1

GUO Yi, ZHAO Yi-rou, ZHU Shui-jin

(College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: In this study, the hybrid of the interspecific cross between *Gossypium barbadense* L. and *Gossypium hirsutum* L. were employed as materials. The introgression line-to-line plants were crossed to break the undesirable linkage for breeding the semi-okra cotton germplasm which was called the ZKY-1. To provide theoretical data for further using the new germplasm ZKY-1 in breeding program, the agronomical character, fiber quality, physiological, biochemical and genetic characteristics of the semi-okra germplasm were evaluated. The result showed that the yield of ZKY-1 is slightly lower than the upland cotton varieties CCRI49 which was chosen as the control because of its wide application in production. The fiber quality of ZKY-1 was better improved, with the fiber length of 34.5 mm and the breaking tenacity of 38.4 cN/tex. The hereditary capacity for fiber quality of ZKY-1 was high, the hybrids obtained by crossing ZKY-1 with different upland cotton germplasms shown a relatively strong mid-parent heterosis in fiber quality traits such as the fiber length and breaking tenacity, and some combinations shown significant over-parental heterosis. The leaf lobe index of ZKY-1 obtained in this study was 0.75 ± 0.01 , indicating the leaf type was semi-okra. The leaf type of the F_1 hybrids between ZKY-1 and normal leaf-type upland cotton was intermediate form and the character segregation happened among F_2 , in accordance with the rule of the segregation ratio controlled by a dominant gene by Chi Square test. Besides,

收稿日期: 2018-11-28 修回日期: 2018-12-18 网络出版日期: 2019-01-18

URL: <http://www.doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20181128001>

第一作者研究方向为棉花遗传育种, E-mail: guoyi123@zju.edu.cn

通信作者: 祝水金, 研究方向为棉花遗传育种与生物技术, E-mail: shjzhu@zju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0101400); 国家自然科学基金(31501342); 现代农业产业技术体系专项(CARS-18-25); 江苏省现代作物生产协同创新中心

Foundation project: National Key R&D Program of China (2016YFD0101400), National Natural Science Foundation of China (31501342), Chinese Agricultural Research System (CARS-18-25), Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production

germination rate and germination potential were all higher than the CCRI49. There was no significant difference between the ZKY-1 and the CCRI49 in the net photosynthetic rate at the square stage and boll period, although the ZKY-1 was significantly lower than the CCRI49 at the flowering stage. For the total content of chlorophyll, no significant difference between the ZKY-1 and CCRI49 was detected at the square stage and flowering stage, but at the boll period in which the total content of chlorophyll of the ZKY-1 was significantly higher than the CCRI49. In addition, the activity of SOD and POD in the ZKY-1 were significantly higher than the CCRI49 at the square stage and flowering stage while no significant difference was found for the content of MDA. At the boll period, the activity of POD in the ZKY-1 was significantly lower than the CCRI49, and the content of MDA was significantly higher than the CCRI49 while no significant difference was found for SOD activity. Overall, stable inheritance of semi-okra and excellent quality of fiber were identified in the hybrid crossed by ZKY-1, indicating that the ZKY-1 could be used as an excellent germplasm resource for improving fiber quality and breeding high photosynthetic efficiency germplasm.

Key words: cotton; semi-okra cotton; breeding; germplasm

棉花 (*Gossypium* spp.) 是世界各地天然纤维的重要来源之一,也是重要的油料作物。栽培品种陆地棉和海岛棉为异源四倍体 ($2n=4x=52$, AADD), 其供体种可能是二倍体亚洲棉 ($2n=4x=26$, AA) 和雷蒙德氏棉 ($2n=2x=26$, DD) [1], 或其他 A 基因组和 D 基因组棉种。

世界主要作物都是通过叶片进行光合作用获得物质积累,棉花叶片形状对棉株的影响早已引起国内外育种家的关注,通过利用鸡脚叶位点来改变棉花品种的叶型 [2]。棉花有 4 种主要叶型: 正常叶、半鸡脚叶、鸡脚叶和超鸡脚叶 (图 1A) [3]。控制鸡脚叶型的 $L-D_1$ 位点位于 D 染色体组 15 号染色体短臂上 [4-5], 在近端粒端 5.4 cM 的位置 [6], 与鸡脚叶在形态学上相似的条裂叶叶型基因位于 A 染色体组的 $L-A_1$ 位点上 [7], $D15$ 和 $A1$ 是部分同源染色体, 两个位点上的等位基因对棉花叶型具有相互作用。Andres 等 [3] 鉴定了 *LATE MERISTEM IDENTITY1* (*GhLMII-D1b*) 基因是控制棉花 $L-D_1$ 位点叶片形状差异的主要决定因素。Chang 等 [8] 和 Zhu 等 [9] 也分别鉴定了叶型控制基因。

棉花的叶型可以影响其冠层结构、产量、胁迫耐受性、抗虫性和其他重要农艺性状 [10-11]。我国育种家对棉花鸡脚叶叶型亦早有关注,曾育成超鸡脚叶品种川简 3 号、鸡脚紫絮棉和鸡脚德字棉;安徽省淮北市黄淮海低酚棉研究开发中心育成淮杂 2 号 [12];河南省农业科学院育成转基因抗虫杂交春棉品种一标杂 A_3 , 为半鸡脚叶低酚棉;河北省石家庄市农业科学院与河南省农业科学院植保所育成的标杂 A_1 和河北省农业科学研究院培育的标记杂交棉一号在我国有较大的种植面积,具有较好的增产

潜力。

农作物种质资源是作物品种遗传改良的重要物质基础 [13], 也是种质创新的突破口。2004 年中棉所 49 群体内发现 1 株陆海天然杂交株, 经过连续 20 代的定向回交转育, 于 2015 年选到纤维品质优良并具有稳定半鸡脚叶特性的棉花种质系—ZKY-1。该种质具有陆地棉的特性, 带有部分海岛棉叶型和纤维品质性状的特点, 在棉花品质改良中具有重要的利用价值。本研究重点介绍该种质的选育过程, 探究优质半鸡脚叶新品种的遗传特性, 阐明其农艺学性状及相关生理生化指标、产量和纤维品质的表现, 为棉花品质改良提供材料与依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

ZKY-1 是由本实验室以天然陆海杂交株为对象, 通过后代分离类群间的多次杂交和回交而选育的优质半鸡脚叶棉花种质系。中棉所 49 是 ZKY-1 的亲本及轮回亲本之一, 具有综合性状良好、丰产性好、纤维品质优良、抗病性强等特点, 在新疆大面积推广种植, 本试验所用对照品种, 由中国农业科学院棉花研究所提供。其他材料包括 H124、慈溪 2012、杂优 2012、彩 0558、鄂抗棉 10 号等用作与 ZKY-1 杂交的亲本, 由本实验室自交保存。

1.2 种子发芽试验

采用纸卷法进行发芽试验。每个处理 3 个重复, 每个重复 100 粒种子。试验棉花种子置于发芽盒中, 于 30 °C 恒温箱中发芽, 光处理 10 h, 暗处理 14 h, 连续培养, 每天统计种子萌发数, 第 7 天统计

发芽率,并计算发芽率、发芽势、发芽指数和平均发芽时间。以胚根长度为种子长度的 1/2 作为种子萌发标志。

在发芽第 7 天,每种试验材料随机取 5 株,用直尺测定其上胚轴长度、下胚轴长度和子叶的长宽,并统计须根数。同时,每种试验材料随机选择 5 株测定其鲜重,后移至烘箱中,105 °C 条件下杀青 30 min,然后经 70 °C 恒温烘干至恒重,称其干物质质量。

1.3 田间试验

于 2017-2018 年在浙江大学紫金港西区农业试验站进行,试验为 3 行区,小区面积为 0.03 亩,重复 3 次,于 4 月底直播,栽培管理措施与普通大田管理措施相同。在各个生长期对试验材料进行调查、测定、测产和取样。同时,对 ZKY-1 与其他品种配制的 F₁ 进行田间试验,并计算中亲优势、超亲优势与竞争优势,考察其作为杂交棉亲本的利用价值,以及一般配合力情况。

中亲优势(MPH%)=(F₁-中亲值)/中亲值×100;

超亲优势(OPH%)=(F₁-高值亲本)/高值亲本×100;

竞争优势(CH%)=(F₁-对照值)/对照值×100。

在田间调查试验材料的生育期。在花期,每种材料取 5 株测定叶片裂口指数,即裂刻到叶片尖端的长度与整片叶长度的比值。根据李瑞祥^[14]的方法划分叶型,其中正常叶的裂口指数为 0.51±0.04,鸡脚叶的裂口指数为 0.92±0.01,半鸡脚叶的裂口指数介于两者之间,为 0.51~0.92。

1.4 生理生化测定

1.4.1 光合速率测定 利用 Li-6400 便携式光合测定仪测定叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度以及叶片的蒸腾速率,并将数据导入到 Li-6400 便携式光合测定系统。选择 LED 红蓝光源,2×3 叶室,光强设置为 PAR=1800。在测量时,选择温度适宜且晴朗无云的 10:00-11:00 之间进行光合测定,选择干净无水珠、表面完整、无病虫害和缺刻的叶片进行测定,测量时尽量不改变叶片的自然着生角度。在蕾期、花期和铃期,每种试验材料选取 3 片生长状况较一致的倒 4 叶进行测定,取平均值。

1.4.2 叶绿素含量测定 在蕾期、花期和铃期,每种试验材料摘取 3 片生长状况较一致的倒 4 叶,选择表面完整、无病虫害和缺刻的叶片。试验中避开叶片大叶脉部分,利用打孔器进行取样,称取

等质量叶片进行测定。叶绿素含量测定采用混合液法。

1.4.3 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和丙二醛(MDA)含量测定 在蕾期、花期和铃期,每种试验材料摘取 3 片生长状况较一致的倒 4 叶,分别装入自封袋中液氮速冻,之后转移至 -80 °C 冰箱保存,待测定。SOD 活性测定:采用氮蓝四唑(NBT)光下还原法,以抑制 NBT 光还原反应 50% 所需要的酶量为一个酶活性单位。POD 活性测定:采用愈创木酚法测定,以愈创木酚为底物,通过分光光度法间接测定 POD 活性,以 OD 值每分钟平均变化量表示 POD 活性的相对大小。MDA 含量测定:丙二醛含量测定参考赵氏杰的硫代巴比妥酸(TBA)法^[15]。

1.5 统计分析方法

试验数据利用 Microsoft Excel 和 Origin 软件对数据进行处理、分析与作图,采用 SPSS Statistics 25.0 统计软件进行统计检测与方差分析。

2 结果与分析

2.1 ZKY-1 的选育过程及其产量和纤维品质表现

2004 年在新疆阿拉尔塔里木河种业股份有限公司中棉所 49 的良繁基地中发现 1 株陆海杂交单株,2004 年冬将单株后代种于三亚崖城进行南繁扩种,群体出现疯狂分离,其中 5 株不育或育性低下;12 株完全是海岛棉类型,为三室铃;11 株为陆地棉类型;5 株为陆海杂交中间类型。将 16 株陆地棉类型或中间类型单株收获,于 2005 年种于杭州浙江大学实验农场,所有株行仍出现巨大分离,特别是中间类型材料。对各株行纤维品质测定结果显示,陆地棉类型的株行纤维品质未有显著提高,而中间类型材料有明显提高。2005 年冬在海南三亚,将不同类型当选单株株行种植,并将 3 种类型的株行选株进行互交,杂交后代继续选单株,测定单株的形态性状、产量和纤维品质,根据测定结果分类种植,再次互交,直至群体为陆地棉类型且不再分离,于 2014 年选到 9 行陆地棉类型的株行。2015-2016 年,对 9 种材料进行多点鉴定,最后获得产量、纤维品质和株型符合综合性状优良的棉花种质系 ZKY-1(表 1)。ZKY-1 的营养生长优势强,株高、果枝始节位和单株果枝数均高于对照中棉所 49。

表 1 陆海杂交后代的产量和纤维品质测定结果 (2015-2016 年, 杭州)

Table 1 The yield and fiber quality for the materials derived from interspecific hybridization (2015-2016, Hangzhou)

品系 Lines	籽棉产量 (kg/667 m ²) Seed cotton yield	与 CK 相比 (%) Percentage with CK	皮棉产量 (kg/667 m ²) Lint yield	与 CK 相 比 (%) Percentage with CK	衣分 (%) Lint percentage	铃重 (g) Boll weight	纤维品质 Fiber quality		
							长度 (mm) Length	断裂比强度 (cN/tex) Breaking tenacity	马克隆值 Micronaire
ZKY-1	312.3	99.7	123.0	97.7	39.4 ± 1.2a	5.1 ± 0.12a	34.5 ± 0.7a	38.4 ± 1.0a	4.6 ± 0.1ab
ZKY-2	288.5	92.1*	115.7	91.9*	40.1 ± 1.3a	4.8 ± 0.12a	33.4 ± 0.6a	37.1 ± 1.1a	4.5 ± 0.1b
ZKY-3	276.3	88.2*	111.3	88.4*	40.3 ± 1.3a	4.6 ± 0.13a	31.3 ± 0.4ab	36.3 ± 1.2ab	5.2 ± 0.1a
ZKY-4	301.2	96.1	115.7	91.9*	38.4 ± 1.3a	4.8 ± 0.11a	30.3 ± 0.6b	35.3 ± 1.3ab	4.8 ± 0.1ab
ZKY-5	310.4	99.1	110.5	87.8*	35.6 ± 0.9b	5.4 ± 0.10a	34.4 ± 0.7a	33.3 ± 1.3b	4.5 ± 0.1b
ZKY-6	288.5	92.1	113.7	90.3*	39.4 ± 1.0a	4.6 ± 0.13a	34.1 ± 0.6a	34.3 ± 1.7b	4.5 ± 0.1b
ZKY-7	298.3	95.2	114.5	91.0*	38.4 ± 1.2a	4.8 ± 0.13a	33.1 ± 0.8a	32.3 ± 1.8b	4.7 ± 0.1ab
ZKY-8	289.3	92.3*	114.0	90.5*	39.4 ± 1.1a	4.6 ± 0.12a	32.2 ± 0.7ab	32.3 ± 1.2b	4.7 ± 0.1ab
ZKY-9	304.3	97.1	111.1	88.2*	36.5 ± 0.8b	4.6 ± 0.11a	31.4 ± 0.8ab	33.2 ± 1.2b	4.5 ± 0.1b
中棉所 49	313.3	100.0	125.9	100.0	40.2 ± 0.9a	5.0 ± 0.10a	28.9 ± 0.9b	29.2 ± 1.3c	5.1 ± 0.1a

产量结果为 2 年平均值, * 表示与对照相比差异达显著水平; 产量以外的结果为平均值 ± 标准差, 同一列相同字母为差异未达显著水平

The yield results are the mean value of two-year yield, * indicate a significant difference from the control group. All the results are presented as mean ± SD, and the same alphabet in the same column indicates the results do not reach a significant level

2.2 ZKY-1 的产量和纤维品质性状的遗传表现

ZKY-1 与不同类型陆地棉品种的杂种 F₁ 产量和纤维品质见表 2。用不同亲本材料与 ZKY-1 配制 6 个杂交组合, 籽棉产量 288.1~323.3 kg/667 m², 皮棉产量为 117.1~129.1 kg/667 m², 除中棉所 49 × ZKY-1 与鄂抗棉 10 号 × ZKY-1 组合外, 其余组合的籽棉产量均低于中棉所 49, 中棉所 49 × ZKY-1、鄂抗棉 10 号 × ZKY-1 和彩 0558 × ZKY-1 组合产量高于 ZKY-1。ZKY-1 可与其他陆地棉进行杂交, 无种间生殖隔离现象, 其产量表现因组合不同而不同, 但大多数组合的纤维品质优良, 所有杂交组合纤维长度均高于其陆地棉亲本与中棉所 49, 但均低于 ZKY-1。除杂优 2012 × ZKY-1 组合外, 各组合断裂比强度均高于其陆地棉亲本与中棉所 49, 其中中棉所 49 × ZKY-1 和彩 0558 × ZKY-1 组合断裂比强度高于 ZKY-1。可见 ZKY-1 优异的纤维品质性状遗传力强, 该种质对于改良陆地棉纤维品质具有重要意义。

2.3 ZKY-1 叶型的遗传表现

ZKY-1 的叶型见图 1B, 经测定其裂口指数

为 0.75 ± 0.01, 处于鸡脚叶 (0.92 ± 0.01) 和正常叶 (0.51 ± 0.04) 之间, 其裂口指数显著高于正常叶对照品种中棉所 49 (0.51 ± 0.01)。

根据叶片裂口指数进行统计划分, ZKY-1 群体全部为半鸡脚叶型, 无正常叶和鸡脚叶分离, 且与正常叶亲本杂交 F₁ 全部为半鸡脚叶叶型 (表 3), 说明为显性基因控制的遗传。与 ZKY-1 杂交得到的 6 个组合, F₂ 植株叶型出现正常叶与半鸡脚叶的分离, 没有鸡脚叶分离。经卡方检测, 有 95% 以上的概率分离比符合 3:1, 即符合一对等位基因控制的表型分离比例。可见, ZKY-1 的半鸡脚叶性状与一般陆地棉鸡脚叶与正常叶杂交 F₁ 出现的半鸡脚叶不同, 控制该性状的为一对显性基因。

2.4 ZKY-1 种子萌发与幼苗生长特性

对 ZKY-1 和中棉所 49 分别进行为期 7 d 的种子发芽试验 (表 4)。ZKY-1 和中棉所 49 在发芽指数和平均发芽时间之间并无显著性差异, 但是 ZKY-1 的发芽率和发芽势极显著高于中棉所 49。

表 2 ZKY-1 产量和纤维品质性状的杂种优势表现
Table 2 The yield and fiber quality among hybrid F_1 between ZKY-1 and upland cotton

材料 Materials	籽棉 Seed cotton				皮棉 Lint			纤维品质 Fiber quality			
	产量 (kg/667 m ²) Yield	中亲优势 Mid- parent heterosis	超亲优势 Over- parent heterosis	产量 (kg/667 m ²) Yield	竞争优势 Competitive heterosis	超亲优势 Over- parent heterosis	衣分 (%) Lint percentage	铃重 (g) Boll weight	长度 (mm) Length	断裂比强度 (cN/tex) Breaking tenacity	马克隆值 Micronaire
H124 × ZKY-1	293.0	-11.8	-16.83	127.7	27.2	-4.6	43.6 ± 0.9a	4.2 ± 0.12b	29.3	37.2	5.6
慈溪 2012 × ZKY-1	288.1	-13.6	-18.82	128.2	27.7	-5.9	44.5 ± 1.5a	4.4 ± 0.09b	32.2	36.8	5.1
杂优 2012 × ZKY-1	293.5	5.3	-6.02	129.1	28.6	5.0	44.0 ± 1.0a	4.3 ± 0.11b	31.8	35.5	4.8
中棉所 49 × ZKY-1	323.3	15.0	3.52	120.6	20.1	-2.0	37.3 ± 1.5b	4.3 ± 0.13b	33.1	40.7	4.8
鄂抗棉 10 号 × ZKY-1	314.7	-1.2	-3.17	126.8	26.3	-2.7	40.3 ± 0.4ab	4.7 ± 0.15a	29.8	34.3	5.3
彩 0558 × ZKY-1	313.2	13.3	0.29	117.1	16.6	-4.8	37.4 ± 0.5b	4.3 ± 0.05b	31.0	39.7	4.8
H24	352.3	—	—	133.9	—	—	38.0 ± 0.5b	4.1 ± 0.07b	24.7	29.5	6.4
慈溪 2012	354.9	—	—	136.3	—	—	38.4 ± 1.3b	4.6 ± 0.14ab	27.5	29.6	4.9
杂优 2012	245.3	—	—	96.9	—	—	39.5 ± 1.1b	4.2 ± 0.11b	30.3	36.5	4.6
中棉所 49	313.3	—	—	125.9	—	—	40.2 ± 0.9ab	5.0 ± 0.10a	28.9	29.2	5.1
鄂抗棉 10 号	325.0	—	—	130.3	—	—	40.1 ± 1.0ab	5.0 ± 0.06a	25.6	24.7	5.2
彩 0558	240.5	—	—	95.9	—	—	35.8 ± 1.5b	4.7 ± 0.13a	28.5	35.2	4.4
ZKY-1	312.3	—	—	123.0	—	—	39.4 ± 1.2b	5.1 ± 0.12a	34.5	38.4	4.6

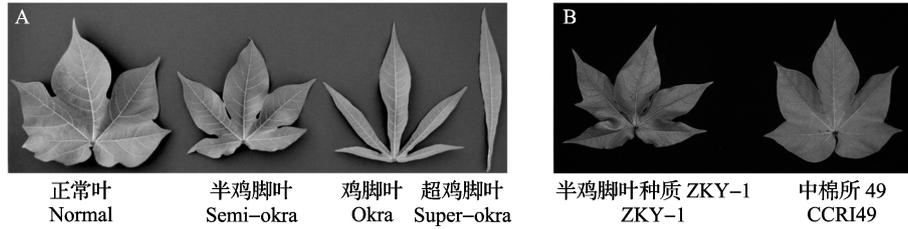


图 1 棉花叶型的形态学表现
Fig.1 Morphometric patterns of cotton leaf shapes

表 3 F₁ 和 F₂ 群体的叶型分离情况

Table 3 Segregation of F₁ and F₂ populations in leaf shape

群体 Populations	项目 Item	半鸡脚叶型 Semi-okra	正常叶 Normal
F ₁	观察值 Observed	66	0
	期望值 Expected	66	0
F ₂	观察值 Observed	94	25
	期望值 Expected	89.2	29.8
	卡方 Chi-square	0.2073	0.6205

在发芽试验第 7 天,测定试验材料的幼苗表型数据和干物质量(表 5)。结果表明,ZKY-1 和中棉所 49 在子叶长、子叶宽、根长、须根数、鲜重和干重方面无显著差异,但 ZKY-1 的上胚轴长度显著短于中棉所 49。

表 4 ZKY-1 种子的发芽情况

Table 4 The seed germination of ZKY-1

材料 Materials	发芽指数 Germination index	平均发芽时间 (d) Mean germination time	发芽率 (%) Germination rate	发芽势 (%) Germination potential
ZKY-1	80.64 ± 0.50	2.06 ± 0.02	100.00 ± 0**	100.00 ± 0**
中棉所 49	78.23 ± 0.94	1.98 ± 0.44	95.33 ± 0.67	94.67 ± 0.67

* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平的差异显著性,下同
* and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively.The same as below

表 5 ZKY-1 的幼苗特性和生物量

Table 5 Seedling characters and biomass of ZKY-1

材料 Materials	子叶长 (cm) Cotyledon length	子叶宽 (cm) Cotyledon width	上胚轴长 (cm) Epicotyl length	根长 (cm) Root length	须根数 Fibrous root	鲜重 (g/plant) Fresh weight	干重 (mg/plant) Dry weight
ZKY-1	2.77 ± 0.13	1.09 ± 0.02	7.15 ± 0.18**	13.99 ± 0.25	46.67 ± 1.76	0.52 ± 0.02	53 ± 4
中棉所 49	2.75 ± 0.05	1.23 ± 0.06	8.55 ± 0.03	12.87 ± 0.34	46.33 ± 1.86	0.54 ± 0.02	52 ± 3

2.5 ZKY-1 的光合特性与生理生化特性

2.5.1 光合特性与叶绿素含量 蕾期、花期和铃期叶片光合速率的测定结果表明(表 6),ZKY-1 在蕾期和铃期的净光合速率与中棉所 49 无显著差异,但

在花期显著低于中棉所 49。在各生育时期 ZKY-1 和中棉所 49 之间在气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率方面无明显差异。

表 6 ZKY-1 光合性状表现

Table 6 Performance of photosynthetic characters of ZKY-1

项目 Item	材料 Materials	蕾期 Square stage	花期 Flowering stage	铃期 Boll period
净光合速率 (μmolCO ₂ /m ² ·s) Pn	ZKY-1	17.64 ± 1.49	25.98 ± 0.28 **	17.39 ± 1.50
	中棉所 49	17.89 ± 0.91	30.13 ± 0.24	16.29 ± 0.43
气孔导度 (mol/m ² ·s) Gs	ZKY-1	0.32 ± 0.02	0.41 ± 0.01	0.27 ± 0.01
	中棉所 49	0.30 ± 0.01	0.40 ± 0.02	0.22 ± 0.01
胞间 CO ₂ 浓度 (μmol/mol) Ci	ZKY-1	267.30 ± 6.30	225.22 ± 12.19	286.25 ± 16.31
	中棉所 49	254.45 ± 8.14	203.05 ± 6.31	268.72 ± 1.36
蒸腾速率 (mmolCO ₂ /m ² ·s) Tr	ZKY-1	5.30 ± 0.18	11.54 ± 0.20	3.38 ± 0.12
	中棉所 49	5.37 ± 0.18	11.22 ± 0.31	3.04 ± 0.07

不同生育期功能叶中叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素总量测定结果表明(表 7), ZKY-1 在蕾期和花期叶绿素含量与中棉所 49 无显著差异,

但在铃期, ZKY-1 的叶绿素 a 含量和叶绿素总量显著高于中棉所 49, 但两者叶绿素 b 含量无明显差异。

表 7 ZKY-1 的叶绿素含量

Table 7 Chlorophyll content in functional leaves of ZKY-1

项目 Item	材料 Materials	蕾期 Square stage	花期 Flowering stage	铃期 Boll period
叶绿素 a (mg/g) Chlorophyll a	ZKY-1	0.78 ± 0.04	1.80 ± 0.06	0.50 ± 0.02*
	中棉所 49	0.77 ± 0.04	1.85 ± 0.08	0.43 ± 0.02
叶绿素 b (mg/g) Chlorophyll b	ZKY-1	0.27 ± 0.02	1.05 ± 0.01	0.14 ± 0.01
	中棉所 49	0.31 ± 0.03	1.03 ± 0.04	0.13 ± 0.07
叶绿素总量 (mg/g) Total chlorophyll	ZKY-1	1.05 ± 0.06	2.86 ± 0.07	0.64 ± 0.02**
	中棉所 49	1.08 ± 0.07	2.88 ± 0.08	0.56 ± 0.03

2.5.2 SOD 和 POD 活性 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)是植物细胞内自由基清除系统中的关键酶,可协同作用防御活性氧或其他过氧化物自由基对细胞膜系统的损伤,对于维持细胞膜的结构和功能具有重要意义。SOD 活性测定结果表明(图 2A), ZKY-1 和中棉所 49 的 SOD 活性变化趋势基本相似,均为花期达到最大,铃期有所降

低。在蕾期和花期, ZKY-1 的 SOD 活性均显著高于中棉所 49, 在铃期二者没有明显差异。ZKY-1 和中棉所 49 的 POD 活性随生育进程而逐渐增高。在蕾期和花期, ZKY-1 的 POD 活性显著高于中棉所 49, 而在铃期中棉所 49 的 POD 活性显著高于 ZKY-1(图 2B)。

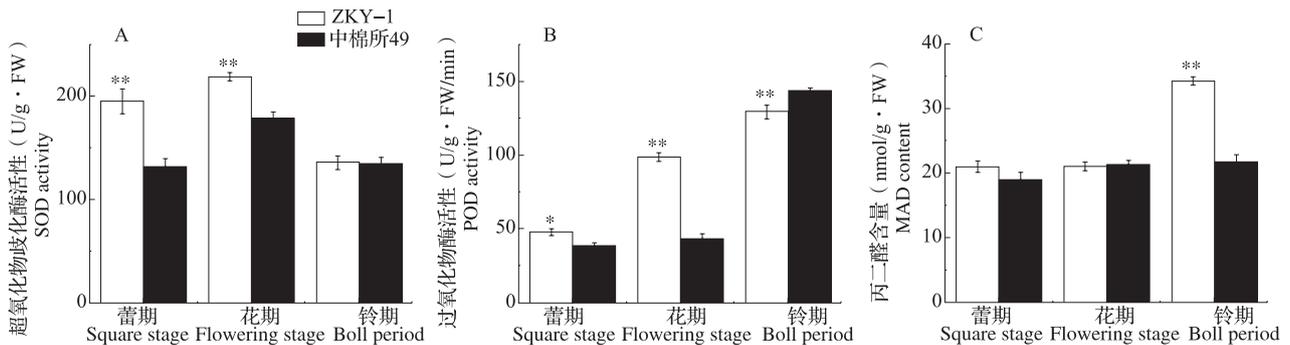


图 2 不同生育时期 SOD、POD 活性以及 MDA 的含量

Fig.2 SOD, POD activity and MDA content in different growing periods between ZKY-1 and CCRI49

2.5.3 MDA 含量 受外界不良影响的影响, 植株对活性氧清除能力下降, 从而促使有毒物质的积累, 启动膜脂过氧化造成膜的损伤, MDA 含量是反映膜脂过氧化程度的重要指标^[16]。随着生育的进程, ZKY-1 和中棉所 49 的 MDA 含量均有一定程度增加, 但在铃期 ZKY-1 的 MDA 含量显著高于中棉所 49, 蕾期和花期两者无显著差异。

3 讨论

棉花是世界上第一大纤维作物, 棉纤维是纺织工业中最重要的天然和可再生资源, 随着现代纺纱工业技术的不断革新, 对棉纤维品质的要求也在不

断提升^[17]。我国普遍种植的陆地棉适应性强、产量高、强度低, 而海岛棉品种纤维细长且强度高, 是纺织中的佳品, 也是理想的育种材料。因此, 以优良品种为平台, 创制的中间材料为桥梁^[18], 培育纤维品质优异的陆地棉种质资源是棉花育种的主要方向之一。但是海岛棉与陆地棉种间杂交后代疯狂分离, 给育种工作带来较大困难。本试验为远缘杂交育种提供了一种新方法, 阐明可以采用不同类型间的株行杂交方法, 克服远缘杂交不亲和, 打破不良连锁, 培育优异的新种质, 为利用海岛棉改良陆地棉性状奠定了重要基础。同时, 本试验选育的 ZKY-1 生殖生长优势强, 纤维品质优异, 又有其独特的半鸡脚叶

型,可用于陆地棉品种改良的供体材料;以 ZKY-1 作为杂交亲本,在保持高配合力和广适应性等特点的基础上,将其与常规品种进行杂交,可以育成有中亲优势的 F_1 ,筛选出综合性状好、纤维品质优良的杂交种投入到实际生产中。

农作物主要通过光合作用来完成光合产物的积累,而光合产物是棉花经济产量形成的物质基础,在生育后期光合产物向生殖器官转运,充足的光合产物能使棉花群体多结铃、结优质铃。在不同的研究中,棉花不同叶型对光合作用的影响不一致^[11],吴巧娟等^[19]研究表明,鸡脚叶光合作用强度在吐絮期前高于普通叶型,光合强度测定结果与叶绿素含量的变化趋势一致。而马宗斌等^[20]对不同叶型叶片的光合速率进行比较,发现正常叶高于鸡脚叶,可能由于正常叶棉株上层叶面积指数高,其干物质积累主要依靠冠层叶片的光合作用^[19]。半鸡脚叶由于其特殊叶型,介于正常叶与鸡脚叶之间,与正常叶相比增大透光率,增强了中下层光合有效辐射量,与鸡脚叶相比减少漏光率,充分利用光能,是一种理想的棉花育种材料,但是现有半鸡脚叶的遗传不稳定(杂种),无法直接应用于生产。因此,培育半鸡脚叶种质资源对于进一步提高棉花产量有着重要的意义。本研究培育的半鸡脚叶种质资源 ZKY-1 透光率好,叶绿素含量在铃期显著高于正常叶陆地棉品种中棉所 49,但在花期,半鸡脚叶品种的净光合速率低于正常叶品种,这可能是由于正常叶棉株中下部荫蔽,干物质积累依靠冠层叶片^[21],而半鸡脚品种透光率好,中部叶片对全株的干物质积累贡献率较高,而本研究全部选择功能叶倒 4 叶进行测定,便于比较分析。

叶片的形状会随植物的进化和环境的变化而改变,了解叶片形态建成的遗传学基础能够改造叶片进而提高生产力^[22-23]。在外观上,ZKY-1 的叶色深,叶裂缺口不平整,有折叠,叶裂比正常叶更深,但叶面积较陆地棉的半鸡脚叶品种更高,与普通陆地棉半鸡脚品种有直观的区别。在遗传方面有研究指出,仅在陆地棉正常型叶片的 *GhLMII-D1b* 外显子附近发现 8-bp 的缺失,在 *GhLMII-D1b* 翻译起始位点上游所有超鸡脚叶和鸡脚叶等位基因均存在 133-bp 的串联复制,但在所有正常叶型和半鸡脚叶等位基因中不存在此重复^[3]。陆地棉半鸡脚叶性状普遍是鸡脚叶与正常叶的杂交后代,为不稳定遗传,而 ZKY-1 来源于海岛棉,与陆地棉杂交得到的 F_1 根据裂口指数划分全部为半鸡脚叶叶型,半鸡

脚叶性状为稳定遗传, F_2 叶型分离比为 3:1,因此与陆地棉品种的半鸡脚叶性状可能为不同基因所控制。

参考文献

- [1] Wendel J F, Brubaker C, Alvarez I, Cronn R, Stewart J M. Evolution and natural history of the cotton genus//Paterson A H. Genetics and Genomics of Cotton. Berlin: Springer, 2009: 3-22
- [2] Stephens S G. A genetic survey of leaf shape in new world cottons-A problem in critical identification of alleles. Journal of Genetics, 1945, 46(2-3): 313-330
- [3] Andres R J, Coneva V, Frank M H, Tuttle J R, Samayoa L F, Han S W, Kaur B, Zhu L, Fang H, Bowman D T, Rojas-Pierce M, Haigler C H, Jones D C, Holland J B, Chitwood J B, Kuraparthy V. Modifications to a *LATE MERISTEM IDENTITY1* gene are responsible for the major leaf shapes of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(1): e57-e66
- [4] Endrizzi J E, Brown M S. Identification of monosomes for six chromosomes in *Gossypium hirsutum*. American Journal of Botany, 1964, 51(2): 117-120
- [5] Endrizzi J E, Kohel R J. Use of telosomes in mapping three chromosomes in cotton. Genetics, 1966, 54(2): 535-550
- [6] Andres R J, Bowman D T, Kaur B, Kuraparthy V. Mapping and genomic targeting of the major leaf shape gene (*L*) in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). Theoretical and Applied Genetics, 2014, 127(1): 167-177
- [7] Kaur B, Andres R, Kuraparthy V. Major leaf shape genes, *Laciniata* in diploid cotton and okra in polyploid upland cotton, map to an orthologous genomic region. Crop Science, 2016, 56(3): 1095-1105
- [8] Chang L J, Fang L, Zhu Y J, Wu H T, Zhang Z Y, Liu C X, Li X H, Zhang T Z. Insights into interspecific hybridization events in allotetraploid cotton formation from characterization of a gene-regulating leaf shape. Genetics, 2016, 204(2): 799-806
- [9] Zhu Q H, Zhang J, Liu D X, Stiller W, Liu D J, Zhang Z S, Llewellyn D, Wilson I. Integrated mapping and characterization of the gene underlying the okra leaf trait in *Gossypium hirsutum* L.. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(3): 763-774
- [10] Nawab N N, Mehmood A, Jeelani G, Farooq M, Khan T N. Inheritance of okra leaf type, gossypol glands and trichomes in cotton. Journal of Animal and Plant Sciences, 2014, 24(2): 526-533
- [11] Andres R J, Bowman D T, Jones D C, Kuraparthy V. Major leaf shapes of cotton: Genetics and agronomic effects in crop production. The Journal of Cotton Science, 2016, 20(4): 330-340
- [12] 张雪林, 韩世杰, 彭凡嘉, 周德桂, 巩养仓. 鸡脚叶陆地棉育种研究进展. 中国棉花, 2016, 43(10): 17-20
Zhang X L, Han S J, Peng F J, Zhou D G, Gong Y C. Breeding progress in okra-leaf in upland cotton. China Cotton, 2016, 43(10): 17-20
- [13] 张爱民, 阳文龙, 方红曼, 吕慧颖, 邓向东, 葛毅强, 魏珣, 杨维才. 作物种质资源研究态势分析. 植物遗传资源学报, 2018,

- 19(3): 377-382
Zhang A M, Yang W L, Fang H M, Lv H Y, Deng X D, Ge Y Q, Wei X, Yang W C. Current status of research on crop genetic germplasms. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(3): 377-382
- [14] 李瑞祥. 鸡脚叶陆地棉在棉花育种工作中的利用价值. *辽宁农业科学*, 1985(5): 39-41
Li R X. Breeding utilization value of okra-leaf in upland cotton. *Liaoning Agricultural Sciences*, 1985(5): 39-41
- [15] 越世杰, 许长成, 邹琦, 孟庆伟. 植物组织中丙二醛测定方法的改进. *植物生理学通讯*, 1994(3): 207-210
Yue S J, Xu C C, Zou Q, Meng Q W. Improvements of method for measurement of Malondialdehyde in plant tissues. *Plant Physiology Communications*, 1994(3): 207-210
- [16] 刘连涛, 李存东, 孙红春, 贾蕾. 棉花叶片衰老生理研究进展. *中国农学通报*, 2006, 22(7): 316-321
Liu L T, Li C D, Sun H C, Jia L. Advances of research on cotton leaf senescence physiology. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(7): 316-321
- [17] Wilkins T A, Rajasekaran K, Anderson D M. Cotton Biotechnology. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2000, 19(6): 511-550
- [18] 郭海萍, 周敬霄, 肖付明, 王涛, 任文仲. 冀豆 4 号的选育与创新利用. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(3): 644-647
Guo H P, Zhou J X, Xiao F M, Wang T, Ren W Z. Breeding and innovative use of Jidou 4. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(3): 644-647
- [19] 吴巧娟, 肖松华, 刘剑光. 鸡脚叶对陆地棉光合特性的影响. *江西棉花*, 2007, 29(5): 11-13
Wu Q J, Xiao S H, Liu J G. Effect of chicken-paw leaf to upland cotton photosynthetic. *Jiangxi Cotton*, 2007, 29(5): 11-13
- [20] 马宗斌, 李伶俐, 房卫平, 谢德意. 正常叶与鸡脚叶杂交棉光合和叶绿素荧光参数的比较. *棉花学报*, 2006, 18(3): 150-154
Ma Z B, Li L L, Fang W P, Xie D Y. Comparative studies on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters with okra leaf and normal leaf hybrid cotton cultivars. *Cotton Science*, 2006, 18(3): 150-154
- [21] 唐钱虎. 不同叶型棉花群体光合特性研究. 石河子: 石河子大学, 2009
Tang Q H. Studies on canopy photosynthesis characteristic of cotton with different leaf-type. Shihezi: Shihezi University, 2009
- [22] Nicotra A B, Leigh A, Boyce C K, Jones C S, Niklas K J. The evolution and functional significance of leaf shape in the angiosperms. *Functional Plant Biology*, 2011, 38(7): 535-552
- [23] Chitwood D H, Sinha N R. Evolutionary and environmental forces sculpting leaf development. *Current Biology*, 2016, 26(7): R297-R306