

## 陆海杂交种纤维品质和产量相关性状的鉴定与分析

李腾宇<sup>1,2Ψ</sup>, 许超<sup>3Ψ</sup>, 李耀明<sup>1</sup>, 苟成飞<sup>1</sup>, 洪铸<sup>1</sup>, 丁明全<sup>1,2</sup>, 孙晨栋<sup>1,2\*</sup>

(1. 浙江农林大学农业与食品科学学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江省农作物品质改良技术研究重点实验室, 浙江 临安 311300; 3. 浙江农林大学林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:**【目的】深入研究棉花陆海杂交种纤维品质和产量相关性状杂种优势遗传规律, 为培育高产优质陆海杂交种奠定理论基础。【方法】使用 12 份陆地棉材料和 5 份海岛棉材料配制陆海杂交种, 对海南三亚和浙江临安种植的亲本及 F<sub>1</sub> 进行纤维品质和产量性状测定。【结果】陆海杂交种纤维长度、纤维强度普遍具有显著的中亲优势, 部分杂交组合具有较强的超亲优势, 纤维长度性状在两地间变异系数较小, 可以稳定遗传; 在产量方面, 部分陆海杂交种籽棉产量、皮棉产量和衣分等性状具有中亲优势, 但仍显著低于陆地棉亲本。【结论】获得 2 个 5A 级优质长绒棉杂交组合 T035 和 T044, 筛选到 1 个海岛棉骨干亲本塔 10-280, 可为探讨陆海杂交种棉纤维品质杂种优势遗传规律提供有价值数据。

**关键词:** 棉花; 陆海杂交种; 杂种优势; 纤维品质; 产量相关性状

## Identification and Analysis of Fiber Quality and Yield Related Traits of Interspecific (*Gossypium hirsutum* L. × *G. barbadense* L.) Hybrids

Li Tengyu<sup>1,2Ψ</sup>, Xu Chao<sup>3Ψ</sup>, Li Yaoming<sup>1</sup>, Gou Chengfei<sup>1</sup>, Hong Zhu<sup>1</sup>, Ding Mingquan<sup>1,2</sup>, Sun Chendong<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Agriculture and Food Science, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 2. The Key Laboratory for Quality Improvement of Agricultural Products of Zhejiang Province, Lin'an, Zhejiang 311300, China, 3. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to study the hereditary of heterosis of fiber quality and yield-related traits in the upland-island interspecific hybrids, and breed new interspecific hybrid varieties with high yield and fine fiber quality. [Method] In this study, 12 upland cotton materials and 5 sea-island cotton materials were selected to determine the fiber quality and yield traits of their parents and F<sub>1</sub> in Lin'an, Zhejiang and Sanya, Hainan. [Result] It was found that fiber length and fiber strength of F<sub>1</sub> (*Gossypium hirsutum* × *G. barbadense*) generally had significant mid-parent heterosis (MPH), some hybrid combinations showed strong over-parent heterosis (OPH), fiber length had a small coefficient of variation between the two places and could be stably inherited. And in terms of yield, seed cotton weight, lint weight, and lint percentage of some upland-island hybrids had MPH, but they were still significantly lower than those of upland cotton parents. [Conclusion] Two long-staple cotton hybrid combinations T035 and T044 with 5A grade high-quality were obtained, and an excellent material of *G. barbadense* Ta10-280 was screened. This study provides valuable data for the genetic law of fiber quality heterosis of upland-island hybrid cotton.

**Keywords:** cotton; *G. hirsutum* L. × *G. barbadense* L. hybrid; heterosis; fiber quality; yield traits

杂种优势一般是指杂种一代在生物量、株高、生长速率和育性等方面高于其双亲的现象<sup>[1]</sup>。杂种优势利用已在水稻、玉米等重要粮食作物上取得巨大成功, 为解决人类温饱和提高生活质量

做出了重要贡献<sup>[2-3]</sup>。棉花育种工作者也试图利用杂种优势来提高产量和改善品质, 为此开展了大量研究并取得了一定进展。陆地棉杂交组合较多, 在棉花生产上发挥了重要作用, 但也只局限

收稿日期: 2019-12-17 第一作者简介: 李腾宇 (1995—), 硕士研究生, tengyuli18@163.com; Ψ 同等贡献。\* 通信作者: 1005505919@qq.com

基金项目: 国家重点研发项目——棉花杂种优势利用技术与强优势杂交种创制 (2016YFD0101417); 浙江省自然科学基金 (LQ19C020006); 棉花生物学国家重点实验室开放课题 (CB2019A02); 浙江农林大学人才启动项目 (2018FR038)

于陆地棉种内杂种优势的研究<sup>[4-5]</sup>,陆海种间杂种优势的利用仍然匮乏。

陆地棉占棉花总种植面积的 90%以上,是最重要的栽培种<sup>[6]</sup>。海岛棉由于纤维长、品质优,在生产上也有一定面积的种植。陆地棉和海岛棉均为异源四倍体棉种,二者杂交后代是研究多倍体杂种优势的优良材料。棉花陆海杂交种(*Gossypium hirsutum* L. × *G. barbadense* L.) 具有很大的产量和品质提升潜力,但由于亲缘关系较远,存在遗传不亲和、营养生长旺盛、棉铃小、衣分低等问题<sup>[7]</sup>,目前仍没有棉花陆海杂交种在生产中得以应用。为了解陆海杂交种生产上存在的问题和相关优势机理,国内外进行了一些研究,如张天真等<sup>[8]</sup>发现海陆杂交种在株高、开花期、果节数等农艺性状以及纤维强度等品质性状方面都有明显的杂种优势。Yu 等<sup>[9]</sup>用种间 BC<sub>1</sub> 群体构建遗传连锁图谱时,发现 Chr2、Chr16 和 Chr18 这 3 条染色体上 99.9% 的标记偏分离,且都为杂合型。任立华等<sup>[10]</sup>对 7 个陆海置换系的产量、纤维品质等性状研究发现第一果枝节位、铃重和衣分等性状都与 Chr16 连锁。贾赵东等<sup>[11]</sup>对 7 个陆海置换系和渐渗系的农艺性状分析发现产量性状主要受加性效应和显性效应共同控制,纤维长度和马克隆值存在显著的加性×加性上位性效应。Tian 等<sup>[12]</sup>通过海陆渐渗系研究,发现陆海杂交种存在大量能使杂种增产的超显性优势位点。上述研究只在陆海回交群体和置换系中进行了产量和品质数量性状位点 (Quantitative trait loci, QTL) 定位的相关研究,而陆海杂交种杂种优势及相关的遗传基础研究较少<sup>[13-14]</sup>。

近年利用水稻籼粳亚种间杂交成功选育出产量显著高于籼稻的亚种间杂交稻,为利用亲缘关系较远的亚种间甚至种间杂种优势,选育高产优质杂交种提供了成功的案例<sup>[15]</sup>。合理利用遗传距离较大的陆海亲本,克服种间杂交困难,创制出优势显著的陆海杂交种,无论是对探索种间棉花杂交种选育的途径和方法,还是对于杂种优势产生机理的研究都具有非常重要的理论和现实意义。本研究使用 12 份陆地棉材料和 5 份海岛棉材料为亲本配制杂交组合,对陆海种间杂种优势进行鉴定与分析,明确陆海杂交种产量和品质

的杂种优势,为深入研究种间杂种优势的遗传规律奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料与田间试验

本研究选取 12 份陆地棉材料 (A01~12,母本, *G.h*) 和 5 份海岛棉材料 (B01~05,父本, *G.b*) (表 1), 所有材料均来自于中国农业科学院棉花研究所中期种质资源库,浙江省农作物品质改良技术研究重点实验室自交多代。2017 年 4 月中旬种植于浙江农林大学小西门实验农场 (浙江临安, 30°23' N, 119°73' E), 盛花期人工去雄授粉配制杂交组合。2017 年 10 月—2018 年 4 月将 53 份 F<sub>1</sub> 材料及其亲本种植于海南三亚南山试验农场 (18°09' N, 108°56' E)。采用随机区组设计, 设 3 个小区重复, 双粒直播。双行区, 宽窄行, 行长 5 m, 行距 0.5 m, 株距 0.3 m, 每行 16 株。2018 年 5—11 月, 根据优质棉纤维分级<sup>[16]</sup>, 选择三亚种植

表 1 杂交组合所用亲本材料名称  
Table 1 The materials used in hybridization combinations

亲本编号 Parent numbers	材料 Materials	亲本编号 Parent numbers	材料 Materials
A01	TM-1	A10	豫棉 19 Yumian 19
A02	邯 0904 Han0904	A11	川农 72318 Chuannong72318
A03	华中 97-5017 Huazhong97-5017	A12	SF06
A04	晋棉 35 号 Jinmian 35	B01	海 7124 Hai7124
A05	辽棉 14 号 Liaomian 14	B02	新海 10 号 Xinhai 10
A06	鲁原 343 Luyuan343	B03	阿长 599 Achang599
A07	巴州 5628 Bazhou5628	B04	苏联棉 B69 Sulian B69
A08	肖县 133 Xiaoxian133	B05	塔 10-280 Ta10-280
A09	新陆早 7 号 Xinluzao 7		

的、纤维品质达到 4A 级以上的 11 个组合重复播种于浙江临安,试验设计与上述相同。按当地大田生产栽培技术进行管理。

## 1.2 性状测定

**1.2.1 产量相关性状测定。**待大田棉花正常收获时,每小区取中间 5 株,去除僵桃、坏桃,测定有效铃数(Boll number per plant,BN)。采收测定棉株的中部铃 50 个,晒干后统计籽棉质量(Seed cotton weight,SCW)和皮棉质量(Lint weight,LW),并计算衣分(Lint percentage,LP)。轧花后的种子选取百粒称量,4 次重复,计算籽指(Seed index,SI)。

**1.2.2 成熟纤维品质性状测定。**每个材料从皮棉中随机称取纤维样品 20 g,送农业农村部棉花品质监督检验测试中心(河南,安阳)进行纤维长度(Fiber length,FL)、断裂比强度(Breaking tenacity,BT)、长度整齐度指数(Uniformity index,UI)、断裂伸长率(Breaking elongation,BE)和马克隆

值(Micronaire,MIC)的测定。

## 1.3 数据统计分析

用 MS Excel 和 SPSS 22.0 软件进行数据分析,差异显著性分析使用独立样本 T 检验,其中中亲优势(Mid-parent heterosis,MPH)及超亲优势(Over-parent heterosis,OPH)计算方法参照许如根等<sup>[7]</sup>。F<sub>1</sub> 为杂交后代表现,MP(Mid-parent)为 2 个亲本表型测定均值,HP(High parent)为高值亲本表型均值,中亲优势(MPH)=(F<sub>1</sub>-MP)/MP×100%,超亲优势(OPH)=(F<sub>1</sub>-HP)/HP×100%。

## 2 结果与分析

### 2.1 陆海杂交种的纤维品质性状分析

配制的杂交组合中,有 7 个组合没有收到足够多的杂交种,所以只有 53 个组合进行试验。对三亚种植的 53 个陆海杂交种进行纤维品质分析,结果(表 2)表明,所有杂交组合的纤维长度均

表 2 陆海杂交棉纤维品质性状分析(三亚)

Table 2 Analysis of fiber quality related traits in *G. hirsutum*×*G. barbadense* hybrid (Sanya)

组合编号 Combinations numbers	组合 Combinations	纤维长度 FL		断裂比强度 BT		长度整齐度指数 UI		马克隆值 MIC		断裂伸长率 BE	
		数值 Value/ mm	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ (cN·tex <sup>-1</sup> )	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ %	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ %	中亲 优势值 MPH/%
T001	A01/B01	34.9**	15.56	37.6**	19.37	85.5**	4.01	3.0*	-0.10	5.3*	-13.82
T002	A02/B01	36.0**	8.43	35.9*	1.89	85.0	0.53	3.3**	-0.18	5.3*	-7.83
T003	A03/B01	34.8**	7.74	36.8	0.59	84.7	-0.59	3.4**	-0.14	5.4	-6.09
T004	A04/B01	35.0**	13.45	37.5**	15.74	85.0	0.18	3.3*	-0.13	5.2*	-11.11
T005	A06/B01	35.2**	5.07	35.7*	1.52	84.0	-0.59	3.2	-0.09	6.6*	10.92
T006	A07/B01	34.4**	7.50	37.7**	7.67	83.7*	-1.53	3.5*	-0.04	6.7*	13.56
T007	A08/B01	33.5*	1.82	34.8**	-2.75	83.0	-0.54	3.2**	-0.15	6.7*	17.54
T008	A09/B01	32.8**	12.91	39.9**	21.89	85.0**	3.41	3.0**	-0.23	5.5**	-7.56
T009	A10/B01	32.2**	5.06	33.6	0.00	81.8	-0.12	3.3**	-0.21	5.7	-4.20
T010	A11/B01	32.4**	5.88	36.6**	13.72	84.6*	2.98	3.1*	-0.06	6.4	6.67
T011	A12/B01	33.2**	6.24	40.7**	16.50	85.3	1.19	3.2**	-0.24	5.7	-5.00
T012	A01/B02	34.0**	11.48	33.9**	10.66	84.3**	1.69	3.1	-0.02	5.1**	-17.07
T013	A02/B02	37.3**	11.34	37.7**	9.69	85.8*	0.65	3.2*	-0.16	5.0*	-13.04
T014	A03/B02	33.8*	3.68	36.1*	1.06	84.1**	-2.10	3.4*	-0.09	6.5*	13.04
T015	A04/B02	35.4**	13.64	38.0**	20.50	83.6*	-2.28	3.4*	-0.06	5.5	-5.98
T016	A05/B02	36.4**	13.57	38.7**	20.43	87.2*	2.89	3.2**	-0.20	6.2	1.64
T017	A06/B02	35.7**	5.62	38.4**	11.95	86.7	1.76	3.3	0.00	8.0**	34.45
T018	A07/B02	35.8**	10.84	31.5**	-7.76	84.6*	-1.28	3.2*	-0.07	6.7*	13.56
T019	A08/B02	35.9**	8.13	30.8**	-11.80	84.7**	0.65	3.2**	-0.10	5.9	3.51

表 2 (续)  
Table 2 (Continued)

组合编号 Combinations numbers	组合 Combinations	纤维长度 FL		断裂比强度 BT		长度整齐度指数 UI		马克隆值 MIC		断裂伸长率 BE	
		数值 Value/ mm	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ (cN·tex <sup>-1</sup> )	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ %	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ %	中亲 优势值 MPH/%
T020	A09/B02	33.2**	13.12	35.6**	11.70	85.2**	2.77	3.0*	−0.19	5.8	−2.52
T021	A10/B02	36.1**	16.64	35.7**	9.06	82.8	0.24	3.4*	−0.15	6.7*	12.61
T022	A11/B02	33.9**	9.71	35.8**	14.30	83.9*	1.27	3.2	0.03	5.7	−5.00
T023	A12/B02	36.7**	16.32	34.8*	2.14	86.4**	1.65	3.4**	−0.15	6.8*	13.33
T024	A02/B03	37.1**	11.75	32.6*	−2.98	83.8*	−0.89	3.7	−0.01	6.2	−1.59
T025	A03/B03	33.3*	3.10	39.6**	13.30	84.6	−0.70	3.6	−0.03	5.0**	−20.63
T026	A05/B03	36.0**	13.39	41.5**	32.31	87.3**	3.87	2.9**	−0.27	5.1	−23.31
T027	A08/B03	39.3**	19.45	47.4**	40.51	86.9**	4.13	3.6	0.03	6.8*	8.80
T028	A09/B03	32.9**	13.25	36.1**	16.08	85.8**	4.38	3.2*	−0.12	6.7	3.08
T029	A10/B03	36.0**	17.46	40.3**	26.08	85.7**	4.64	2.9	−0.27	6.8	4.62
T030	A11/B03	35.7**	16.67	40.4**	32.24	86.4**	5.17	3.2	0.05	6.5	−0.76
T031	A12/B03	34.9**	11.68	35.7**	7.21	84.4	0.12	3.7*	−0.06	6.6	0.76
T032	A01/B04	35.6**	16.72	37.7**	24.22	85.9**	5.40	3.4**	0.13	5.4**	−12.20
T033	A02/B04	36.8**	9.85	39.9**	17.06	85.9*	2.44	3.5	−0.04	6.9*	20.00
T034	A03/B04	36.8**	12.88	36.9*	4.13	85.3	0.95	3.5	−0.03	6.7*	16.52
T035	A04/B04	37.6**	20.71	40.6**	29.92	84.2	0.06	3.7	0.70	6.8*	16.24
T036	A05/B04	37.8**	17.94	37.6**	18.05	87.8**	5.34	3.2**	−0.17	5.7	−6.56
T037	A06/B04	37.7**	11.54	36.8**	8.19	86.8*	3.58	3.2	0.02	6.3	5.88
T038	A07/B04	36.5**	13.00	35.6**	5.12	82.7**	−1.90	3.4	0.03	7.0**	18.64
T039	A08/B04	35.7**	7.53	34.5	−0.39	83.9*	1.39	3.0**	−0.12	6.5*	14.04
T040	A09/B04	33.9**	15.50	34.8*	10.18	87.1**	6.87	3.4	−0.04	7.3**	22.69
T041	A10/B04	34.9**	12.76	35.0**	7.86	82.4*	1.48	3.3*	−0.14	6.7*	12.61
T042	A11/B04	35.0**	13.27	35.1**	13.10	83.0*	1.90	3.6**	0.22	6.7*	11.67
T043	A12/B04	36.8**	16.64	39.3**	16.32	84.3	0.84	3.3**	−0.14	7.3*	21.67
T044	A02/B05	37.5**	13.46	39.8**	13.00	87.0**	2.53	3.7	−0.03	6.7*	14.53
T045	A03/B05	35.4**	10.11	39.3**	7.47	85.0*	−0.58	3.6	−0.04	5.3	−9.40
T046	A04/B05	37.9**	23.45	46.3**	42.97	85.0	−0.18	3.3*	−0.08	6.6*	10.92
T047	A05/B05	35.7**	12.97	40.3**	22.18	85.0*	0.77	3.6*	−0.10	7.0**	12.90
T048	A06/B05	38.1**	14.24	46.5**	33.67	87.8	3.54	3.1	−0.06	5.9	−2.48
T049	A07/B05	35.0**	9.89	37.6**	7.43	84.1*	−1.41	3.5	0.01	6.6	10.00
T050	A09/B05	33.1**	13.84	33.9**	3.61	82.6	0.12	3.1**	−0.16	6.8*	12.40
T051	A10/B05	36.6**	20.00	41.5**	23.57	85.0*	3.41	3.4**	−0.15	6.7	10.74
T052	A11/B05	33.6**	10.34	36.9**	14.70	83.8**	1.64	3.6**	0.16	6.6	8.20
T053	A12/B05	34.1**	9.65	39.6**	13.40	84.3	−0.35	3.4**	−0.15	6.5	6.56

注: \* 和 \*\* 分别表示杂交 F<sub>1</sub> 与中亲值差异显著 ( $P<0.05$ )、极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: \* and \*\* mean the significant difference from MPH at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.



表现出显著或极显著的中亲优势;除了杂交组合 T003、T009、T039 外,断裂比强度也具有显著或极显著的中亲优势;60%以上杂交组合的马克隆值具有显著的负向中亲优势;50%以上杂交种的长度整齐度指数具有显著或极显著的正向中亲优势,40%杂交组合的断裂伸长率具有显著或极显著的正向中亲优势。

参照棉花纤维品质评价方法<sup>[17]</sup>,可将 53 个陆海杂交种进行纤维品质分级,其中杂交组合 T006、T025、T027、T033、T034、T045、T047、T049、T052 为 4A 级优质长绒棉;T035 和 T044 为 5A 级优质长绒棉,这为下一步研究陆海种间杂种优

势提供了优异的杂交后代材料。

为进一步明确杂种优势的稳定性,将上述 11 个组合在浙江临安再次进行种植。结果显示,11 个杂交种的纤维长度和断裂比强度都较三亚略下降(表 3),但仍保持在 4A 级以上,且均呈现出显著或极显著的中亲优势。

结合两地纤维品质数据发现,11 个杂交组合中有 5 个组合的父本均为海岛棉品种塔 10-280。进一步分析,发现以塔 10-280 作为亲本配制的杂交种纤维长度与断裂比强度分别高于 33 mm 和 33 cN·tex<sup>-1</sup>,说明塔 10-280 可以作为骨干亲本应用于纤维品质改良育种。

表 3 陆海杂交棉纤维品质性状分析(临安)

Table 3 Analysis of fiber quality traits in *G. hirsutum*×*G. barbadense* hybrid (Lin'an)

组合编号 Combinations numbers	组合 Combinations	纤维长度 FL		断裂比强度 BT		长度整齐度指数 UI		马克隆值 MIC		断裂伸长率 BE	
		数值 Value/ mm	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ (cN·tex <sup>-1</sup> )	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ %	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ %	中亲 优势值 MPH/%
T006	A07/B01	33.7**	11.59	36.1**	13.88	83.5	-0.60	3.6*	7.93	6.8*	13.56
T025	A03/B03	33.9**	13.45	35.9**	20.57	83.3	0.85	3.6	2.03	6.8*	8.80
T027	A08/B03	35.5**	23.05	38.7**	27.28	85.0	1.49	3.6	-0.04	6.9**	22.69
T033	A02/B04	35.8**	14.38	39.3**	18.86	84.7	0.89	4.3	-0.04	6.8*	20.00
T034	A03/B04	33.5**	18.17	38.0**	23.32	85.8	2.51	3.7*	-0.19	6.9	-2.52
T035	A04/B04	37.0**	16.32	37.7**	15.86	85.0	0.41	3.8	-0.01	6.9	-1.59
T044	A02/B05	37.1**	20.85	41.9**	28.48	86.6*	3.22	4.0	0.07	7.0*	16.24
T045	A03/B05	34.0*	12.55	36.9**	14.01	84.4	0.96	3.7**	0.22	6.9*	11.67
T047	A05/B05	35.2*	12.10	40.1**	21.48	85.7	1.90	3.9*	-0.10	7.0**	12.90
T049	A07/B05	34.8*	10.30	37.1**	11.53	84.7	1.81	3.6**	-0.12	6.8*	14.04
T052	A11/B05	35.4**	12.38	39.9**	14.61	84.5	-0.29	3.9	0.02	6.9	5.88

注:\* 和 \*\* 分别表示与中亲值差异显著(P<0.05)、极显著(P<0.01)。

Note: \* and \*\* mean the significant difference from MPH at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.2 陆海杂交棉产量性状分析

对三亚种植的 53 个杂交种及其亲本进行产量相关性状测定,结果(表 4)表明,60%杂交组合的有效铃数都具有中亲优势,30%具有显著或极显著中亲优势;70%以上组合的籽棉质量和皮棉质量具有中亲优势,其中所有杂交种的籽棉质量均具有显著或极显著的中亲优势,皮棉质量也几乎全部达到显著或极显著水平;56%组合的衣分具有显著或极显著中亲优势。

对浙江临安的 11 个杂交种进行产量性状测

定,结果(表 5)表明,组合间有效铃数差异较大,8 个组合具有正向的显著或极显著中亲优势;80%以上组合的籽棉重和皮棉重为负向中亲优势;约 50%杂交种的衣分具有正向中亲优势,但只有 3 个组合具有显著或极显著的中亲优势;仅 T035 的籽指表现显著的中亲优势,另外有 7 个组合具有正向杂种优势,但并不显著。

比较 11 个杂交种两地产量性状数据发现,除有效铃数外,其余 4 个产量相关性状在临安的 中亲优势均显著低于三亚;三亚种植时籽棉质

表 4 陆海杂交棉产量性状杂种优势(三亚)  
Table 4 Analysis of field traits in *G. hirsutum*×*G. barbadense* hybrid (Sanya)

组合编号 Combina- tions numbers	组合 Combina- tions	有效铃数 BN		籽棉质量 SCW		皮棉质量 LW		衣分 LP		籽指 SI	
		数值 Value	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/g	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/g	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ %	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/ g	中亲 优势值 MPH/%
T001	A01/B01	13.3*	28.69	200.40**	−11.82	54.35**	−31.96	27.12**	−21.74	12.15	14.14
T002	A02/B01	16.0*	21.49	208.25**	19.60	71.55**	13.48	34.36	−3.86	15.13*	24.17
T003	A03/B01	14.3	11.41	179.55*	−1.87	70.40**	14.05	39.21**	15.87	13.48	11.45
T004	A04/B01	19.0	9.60	133.35**	−20.46	63.25	1.73	47.43**	29.77	13.36	20.20
T005	A06/B01	12.3	11.82	175.70**	11.96	71.50**	16.54	40.69	5.63	13.86	14.36
T006	A07/B01	12.7	5.83	146.90**	15.46	71.05**	56.76	48.37**	34.89	14.15*	25.00
T007	A08/B01	12.0*	−21.75	158.55**	15.79	81.10**	65.26	51.15**	42.54	12.76	9.39
T008	A09/B01	22.3**	63.13	168.76**	14.34	75.05**	46.65	44.47**	28.51	12.32	13.29
T009	A10/B01	14.3*	26.16	186.25**	−5.60	55.45**	−34.22	29.77**	−26.69	13.19	16.98
T010	A11/B01	16.0	9.07	155.75	−0.78	70.15**	18.60	45.04**	20.91	12.67*	28.04
T011	A12/B01	14.3	−7.74	169.30**	10.10	64.10*	−3.68	37.86**	−10.77	11.77	3.16
T012	A01/B02	7.3**	−40.82	213.05**	−12.22	78.60**	−5.36	36.89*	10.14	14.13*	24.00
T013	A02/B02	15.3	0.86	196.25**	3.53	67.05	1.25	34.17	−1.19	15.20**	17.51
T014	A03/B02	15.3	3.13	216.25**	9.00	76.55**	17.95	35.40*	8.32	14.75*	14.83
T015	A04/B02	16.0*	−17.25	121.05**	−33.88	60.90**	−6.81	50.31**	42.16	13.58	14.45
T016	A05/B02	9.7**	−41.21	222.90**	36.87	68.75**	17.22	30.84**	−14.92	13.98	8.92
T017	A06/B02	17.0**	30.77	184.65**	7.14	70.23**	8.84	38.03	1.79	14.44	12.20
T018	A07/B02	12.0	−14.29	128.90**	−9.64	82.30**	69.69	63.85**	84.01	13.80	14.33
T019	A08/B02	24.5**	41.33	184.70**	21.23	81.70**	56.36	44.23**	27.37	12.18	−1.89
T020	A09/B02	13.3*	−15.12	170.40**	4.52	79.25**	45.81	46.51**	39.06	11.11	−4.43
T021	A09/B02	16.3*	22.23	143.90**	−32.35	64.55**	−26.21	44.86**	13.71	12.89	7.19
T022	A11/B02	21.0**	25.97	164.35**	−4.67	70.40**	12.96	42.84**	18.70	12.14	14.04
T023	A12/B02	12.7**	−27.43	212.65**	25.68	70.95	1.76	33.36**	−19.17	12.96	6.58
T024	A02/B03	17.0**	39.69	214.55**	32.01	66.20**	17.01	30.86*	−7.89	15.46*	25.84
T025	A03/B03	14.3*	20.83	206.45**	20.47	70.15**	26.97	33.98*	7.51	15.75*	29.15
T026	A05/B03	15.3	13.33	221.15**	62.82	59.23**	20.88	26.78**	−23.87	14.84*	21.79
T027	A08/B03	11.3*	−21.17	178.30**	42.27	62.90**	47.65	35.28	4.84	13.16	11.86
T028	A09/B03	12.7	0.24	170.95**	25.70	63.05**	41.05	36.88**	13.93	14.14*	28.84
T029	A10/B03	11.3	9.34	173.85**	−6.38	71.60**	−8.00	41.18*	7.31	12.85	12.97
T030	A11/B03	13.3	−2.71	176.80**	21.62	60.55**	14.95	34.25	−2.18	14.15**	41.57
T031	A12/B03	16.0	10.34	173.25**	21.86	74.05**	23.26	42.74*	6.33	13.24	15.03
T032	A01/B04	15.0*	26.74	206.25**	−7.09	57.95**	−25.13	28.10**	−17.61	14.68*	29.51
T033	A02/B04	11.7*	−20.25	193.15**	14.39	64.65*	8.43	32.44*	−7.81	13.01	1.05
T034	A03/B04	12.7	−11.41	176.05	−0.93	66.15**	11.65	37.57**	12.86	14.35	12.24
T035	A04/B04	19.3	2.47	158.90*	−2.14	70.50**	18.09	44.37**	23.25	13.85	17.32
T036	A05/B04	21.3**	33.13	160.55**	12.94	74.35**	40.28	46.31**	25.64	13.05	2.15
T037	A06/B04	18.7**	49.60	209.80**	38.34	59.60	1.23	28.41**	−25.18	12.68	−1.01

表 4 (续)  
Table 4 (Continued)

组合编号 Combina- tions numbers	组合 Combina- tions	有效铃数 BN		籽棉质量 SCW		皮棉质量 LW		衣分 LP		籽指 SI	
		数值 Value	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/g	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/g	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/%	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/g	中亲 优势值 MPH/%
T038	A07/B04	14.7	8.89	134.30**	10.13	56.25**	31.27	41.88**	18.61	13.58	13.07
T039	A08/B04	9.3**	—44.76	147.95**	12.38	56.15**	20.49	37.95*	7.40	13.13	6.27
T040	A09/B04	11.3**	—25.51	179.15**	25.87	69.80**	43.33	38.96**	14.40	13.73	18.72
T041	A10/B04	11.7	—8.84	216.55**	12.77	67.40**	—17.63	31.12**	—22.32	13.77	15.09
T042	A11/B04	14.7	—9.09	212.10**	39.82	70.80**	24.92	33.38*	—9.05	14.16*	33.77
T043	A12/B04	13.3*	—21.76	197.30**	32.86	87.80**	37.03	44.50*	6.26	13.69	13.14
T044	A02/B05	13.0	6.82	177.95**	4.95	83.70**	34.91	47.04**	30.16	13.50	6.85
T045	A03/B05	9.7	—18.04	184.60**	3.48	70.85**	16.69	38.38**	12.09	14.38	14.63
T046	A04/B05	15.3	—6.34	181.55**	11.33	70.15**	14.69	38.64	4.57	14.78*	27.80
T047	A05/B05	19.0**	40.74	218.05**	52.64	76.90**	41.19	35.27*	—6.72	14.88*	18.71
T048	A06/B05	16.7**	67.00	209.20**	37.32	60.30	—0.07	28.82**	—25.95	14.18	12.81
T049	A07/B05	9.3	—15.45	190.95**	55.69	87.35**	97.11	45.74**	26.14	13.48	14.53
T050	A09/B05	9.0	—28.97	162.55**	13.65	77.10**	53.69	47.43**	35.49	10.92	—3.58
T051	A10/B05	15.0**	45.14	186.40**	—3.28	56.95**	—31.62	30.55**	—25.51	13.24	12.92
T052	A11/B05	19.7**	44.11	192.50**	26.31	75.10**	29.17	39.01	3.61	12.18	17.74
T053	A12/B05	19.7**	35.86	182.40**	22.25	82.55**	25.95	45.26*	5.67	13.58	14.50

注：\* 和 \*\* 分别表示与中亲值差异显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )。  
Note: \* and \*\* mean the significant difference from MPH at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 5 陆海杂交棉产量性状杂种优势(临安)  
Table 5 Analysis of field traits in *G. hirsutum* × *G. barbadense* hybrid (Lin'an)

组合编号 Combina- tions numbers	组合 Combina- tions	有效铃数 BN		籽棉质量 SCW		皮棉质量 LW		衣分 LP		籽指 SI	
		数值 Value	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/g	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/g	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/%	中亲 优势值 MPH/%	数值 Value/g	中亲 优势值 MPH/%
T006	A07/B01	14**	47.37	114.59**	—25.97	36.81**	—25.02	32.12*	7.64	10.48	—2.96
T025	A03/B03	10*	33.33	115.29**	—27.14	39.29**	—12.42	34.08**	32.71	10.55	—4.87
T027	A08/B03	6*	—29.41	133.27	12.54	33.67	3.66	25.26	—8.18	12.79	20.09
T033	A02/B04	15**	50.00	160.09	1.08	55.82	—1.53	34.87	4.32	9.62	—9.25
T034	A03/B04	13**	85.71	141.05**	16.10	38.24**	20.10	27.11	4.37	11.41	5.80
T035	A04/B04	13**	18.18	142.87**	—8.13	44.95**	—25.97	31.46**	—12.05	13.97*	28.05
T044	A02/B05	16**	68.42	148.62	—0.58	50.87**	—11.09	34.23	—3.17	11.51	11.96
T045	A03/B05	6**	—50.00	120.19**	—21.47	36.7**	—32.52	30.53*	—8.39	11.86	13.82
T047	A05/B05	13**	52.94	154.98**	10.80	50.07*	—5.71	32.31**	—11.43	11.87	12.62
T049	A07/B05	4**	—57.90	120.12**	—21.17	32.14**	—33.42	26.76**	—12.51	11.85	4.82
T052	A11/B05	15**	87.50	116.32**	—19.00	40.61	—1.37	34.91**	22.68	12.06	8.16

注：上标 \* 和 \*\* 分别表示与中亲值差异显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )。  
Note: Superscript \* and \*\* mean the significant difference from MPH at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

量、皮棉质量和衣分都具有显著或极显著的正向中亲优势,但在临安种植时,只有衣分具有正向中亲优势,籽棉质量和皮棉质量具有负向中亲优势,这可能是临安地区的降雨量多于三亚地区,但日照比三亚少造成的。

2.3 纤维品质及产量相关性状表型变异

纤维品质相关性状方差分析(表 6)表明,三亚种植时陆海杂交棉纤维品质相关性状的变异系数(Coefficient of variation,CV)为 1.69%~11.07%,其中变异系数最小的性状为长度整齐度指数,变幅 81.8%~87.8%,平均为 84.9%,然后为纤维长度,变幅 32.2~39.3 mm,平均为 35.4 mm,变异系数最大的为断裂伸长率,变幅 5.0%~

8.0%,平均 6.3%。临安种植时,各纤维品质性状的 CV 为 1.09%~10.17%,除马克隆值外,其余纤维品质性状的 CV 都低于 5%,变异幅度较小;马克隆值的 CV 为 10.17%,变异幅度较大;纤维长度变异系数 3.22%,纤维长度范围为 33.5~37.1 mm,平均为 35.0 mm。

陆海杂交棉在三亚种植时产量相关性状的 CV 为 7.66%~24.68%,其中变异系数最小的性状为籽指,不同组合间衣分变异系数较大,为 18.94%,产量性状中变异系数最大的为铃数;在临安种植时,产量相关性状的变异系数为 10.08%~36.98%,与三亚一样,籽指变异系数最小,铃数变异系数最大(表 6)。

表 6 2 个试验点纤维品质及产量性状的表型变异分析  
Table 6 Phenotypic variation of the fiber quality and field traits at the two trial sites

试验点 Trial sites	性状类型 Trait types	性状 Traits	最大值 Maxi- mum	最小值 Mini- mum	平均值 Aver- age	方差 Vari- ance	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	偏度 Skew- ness	峰度 Kurto- sis
三亚 Sanya	纤维品质性状 Fiber quality traits	纤维长度 FL/mm	39.3	32.2	35.39	2.73	1.65	4.67	0.01	-0.59
		断裂比强度 BT/(cN·tex <sup>-1</sup> )	47.4	30.8	37.60	11.24	3.35	8.91	0.84	1.50
		长度整齐度指数 UI/%	87.8	81.8	84.92	2.06	1.43	1.69	0.12	-0.44
		马克隆值 MIC	3.7	2.9	3.32	0.05	0.21	6.43	0.04	-0.69
	产量性状 Yield traits	断裂伸长率 BE/%	8.0	5.0	6.27	0.48	0.69	11.07	-0.24	-0.58
		铃数 BN	24.5	7.3	14.68	3.62	13.13	24.68	0.48	0.15
		籽棉质量 SCW/g	222.9	121.05	181.80	25.61	655.78	14.09	-0.37	-0.43
		皮棉质量 LW/g	87.8	54.35	69.57	8.45	71.46	12.15	0.16	-0.55
		衣分 LP/%	63.85	26.78	39.05	7.40	54.71	18.94	0.59	0.90
		籽指 SI/g	15.75	10.92	13.55	1.04	1.08	7.66	-0.29	0.11
临安 Lin'an	纤维品质性状 Fiber quality traits	纤维长度 FL/mm	37.1	33.5	34.99	1.13	1.27	3.22	0.29	-0.59
		断裂比强度 BT/(cN·tex <sup>-1</sup> )	41.95	35.9	38.34	1.86	3.46	4.85	0.50	-0.28
		长度整齐度指数 UI/%	86.6	83.3	84.84	0.97	0.93	1.14	0.12	0.03
		马克隆值 MIC	4.8	3.5	3.86	0.39	0.16	10.17	1.54	2.37
	产量性状 Yield traits	断裂伸长率 BE/%	7.0	6.8	6.88	0.08	0.01	1.09	0.33	-0.88
		铃数 BN	16.0	4.0	11.36	4.20	17.66	36.98	-0.80	-0.94
		籽棉质量 SCW/g	160.09	114.59	133.40	16.98	288.23	12.73	0.29	-1.59
		皮棉质量 LW/g	55.82	32.14	41.74	7.67	58.78	18.37	0.66	-0.70
		衣分 LP/%	34.91	25.26	31.24	3.45	11.90	11.04	-0.67	-0.96
		籽指 SI/g	13.97	9.62	11.63	1.17	1.38	10.08	0.26	0.80



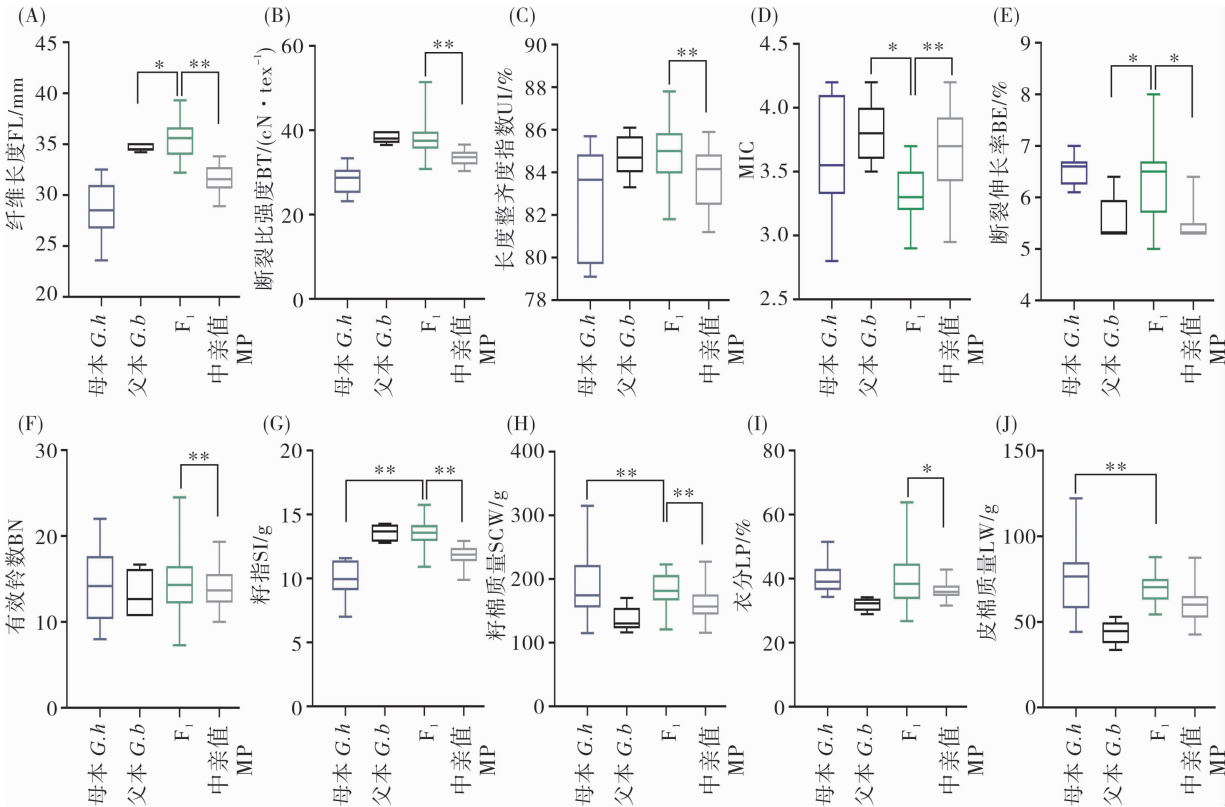
陆海杂交种与陆地棉、海岛棉亲本之间纤维品质相关性状的差异显著性分析(图 1)表明,纤维长度和马克隆值具有显著的超亲优势;纤维断裂比强度和长度整齐度指数不具有显著的超亲优势,但具有极显著的中亲优势;断裂伸长率具有显著的中亲优势。从整体上看,F<sub>1</sub> 代纤维品质性状都表现出显著的中亲或超亲优势。

而在产量相关性状中,虽然铃数、籽棉质量和籽指具有极显著的中亲优势,衣分具有显著的

中亲优势,但籽棉质量和皮棉质量较陆地棉母本都具有负向的极显著杂种优势,铃数、衣分与陆地棉母本无显著差异。

2.4 陆海杂交棉纤维品质性状的相关性分析

利用 SPSS22.0 软件分析杂交种纤维品质各性状之间的相关性,结果表明长度整齐度指数与纤维长度、长度整齐度指数与断裂比强度都存在极显著的正相关(表 7),纤维长度与断裂比强度间也存在极显著正相关,这为后续筛选优势杂交



\*: 差异显著 ( $P<0.05$ ); \*\*: 差异极显著 ( $P<0.01$ ).  
\* and \*\* mean the significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

图 1 F<sub>1</sub> 与亲本纤维品质、产量相关性状的差异显著性分析

Fig. 1 Significant difference analysis of fiber quality and yield traits between F<sub>1</sub> hybrids and parents

表 7 陆海杂交棉纤维品质性状相关性分析

Table 7 Correlation analysis of fiber quality traits of *G. hirsutum* × *G. barbadense* hybrid cotton

性状 Traits	纤维长度 FL	断裂比强度 BT	长度整齐度指数 UI	马克隆值 MIC	断裂伸长率 BE
纤维长度 FL	1.000				
断裂比强度 BT	0.460**	1.000			
长度整齐度指数 UI	0.469**	0.496**	1.000		
马克隆值 MIC	0.230	0.066	-0.167	1.000	
断裂伸长率 BE	0.170	0.011	-0.072	0.270	1.000

注:\*\* 表示相关性极显著。

Note: Superscript \*\* means significant correlation at the 0.01 probability level, respectively.

组合提供了理论基础。对陆海杂交种产量性状相关性分析(表 8)发现,籽棉质量与籽指呈显著正相关,与衣分呈极显著负相关关系;籽指与衣分呈显著负相关关系。

表 8 陆海杂交棉产量指标相关性分析

Table 8 Correlation analysis of yield traits of *G. hirsutum* × *G. barbadense* hybrid cotton

性状 Traits	籽指 SI	有效铃数 BN	籽棉质量 SCW	皮棉质量 LW	衣分 LP
籽指 SI	1.000				
铃数 BN	−0.075	1.000			
籽棉质量 SCW	0.383*	−0.067	1.000		
皮棉质量 LW	−0.100	0.026	0.024	1.000	
衣分 LP	−0.331*	0.067	−0.769**	0.601**	1.000

注:\* 和 \*\* 表示相关程度达到 0.05 和 0.01 水平。  
Note: \* and \*\* mean significant correlation at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

纤维品质影响纺纱质量,是纺织工业最为关注的因素之一。因此,纤维品质遗传改良一直是棉花育种者们致力研究的方向。近些年对陆地棉纤维品质相关性状的研究较多<sup>[18-19]</sup>,但关于陆海杂交种纤维品质相关的报道非常少。本研究选取 12 份陆地棉材料和 5 份海岛棉材料配制 F<sub>1</sub> 进行纤维品质性状和产量性状测定,发现纤维长度和纤维强度普遍具有显著的中亲优势,部分杂交组合具有较强的超亲优势;这与前人的研究结果<sup>[20-21]</sup>一致。同时发现不同组合间纤维品质性状差异较小,尤其是纤维长度和长度整齐度指数变异系数较小,在不同环境条件下变异系数基本保持一致,可以稳定遗传,这为选育优质棉奠定了理论基础。

部分陆海杂交种在产量性状中具有中亲优势,这一结论也与前人研究结果<sup>[22-23]</sup>一致,但产量性状的表现显著低于陆地棉亲本。虽然纤维品质性状普遍存在中亲优势,但营养生长过于旺盛、铃室少、产量低等问题,限制了陆海种间杂种优势的应用。因而在挑选陆海杂交亲本时,要注意扩大亲本选择范围,选择纤维品质优、遗传距离较近、配合力高、丰产性好的陆海亲本,以进一步解决种间杂交出现的问题,便于在生产上应用。

水稻<sup>[2, 24]</sup>和拟南芥<sup>[25]</sup>杂种优势机理研究取得的进展,为全基因组水平上研究杂种优势提供了新的思路,但异源四倍体的棉花相较于二倍体的

水稻和拟南芥,杂种优势产生的分子机理更加复杂。本研究获得 2 个 5A 级优质长绒棉组合 T035、T044,在三亚和临安种植时的纤维品质杂种优势均表现稳定,为利用杂种优势、研究多倍体杂种优势产生的分子机理提供了良好的种质材料。

4 结论

通过对 53 个杂交组合及其亲本表型的鉴定与分析发现,陆海杂交棉纤维品质相关性状普遍存在显著的中亲优势,尤其是纤维长度和断裂比强度,获得骨干亲本塔 10-280,获得 4A 级长绒棉杂交组合 9 个(T006、T025、T027、T033、T034、T045、T047、T049、T052),5A 级优质长绒棉组合 2 个(T035、T044);而各组合间产量性状差异较大,籽棉质量和皮棉质量远低于陆地棉亲本,无法直接应用于生产实践。

致谢:

浙江农林大学戎均康、中国农业科学院棉花研究所张永山和褚丽、陕西安康学院田洪云、中国农业科学院棉花研究所南繁育种中心张霞等人对本研究中杂交组合配制及表型鉴定做出重要贡献,特表感谢。

参考文献:

[1] Chen Z J. Molecular mechanisms of polyploidy and hybrid vigor [J]. Trends in Plant Science, 2010, 15 (2): 57-71. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.12.003>

- [2] Huang X H, Yang S H, Gong J Y, et al. Genomic architecture of heterosis for yield traits in rice[J]. *Nature*, 2016, 537(7622): 629-633. <https://doi.org/10.1038/nature19760>
- [3] Frank H, Jutta A. B. Heterosis in plants[J]. *Current Biology*, 2018, 28(18): 1089-1092. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.06.041>
- [4] Shang L G, Liang Q Z, Wang Y M, et al. Epistasis together with partial dominance, over-dominance and QTL by environment interactions contribute to yield heterosis in upland cotton[J]. *Theoretical & Applied Genetics*, 2016, 129(7): 1429-1446. <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2714-2>
- [5] Li C, Yu H R, Li C, et al. QTL mapping and heterosis analysis for fiber quality traits across multiple genetic populations and environments in upland cotton[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018(9): 1364. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01364>
- [6] Sun F D, Zhang J H, Wang S F, et al. QTL mapping for fiber quality traits across multiple generations and environments in upland cotton[J]. *Molecular Breeding*, 2012, 30(1): 569-582.
- [7] Basbag S, Gencer O. Investigation of some yield and fibre quality characteristics of interspecific hybrid (*Gossypium hirsutum* L. × *G. barbadense* L.) cotton varieties[J]. *Hereditas* 2007, 144(1): 33-42. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0018-0661.01962.x>
- [8] 张天真, 靖深蓉. 棉花雄性不育杂交种选育的理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 25-30.
- Zhang Tianzhen, Jing Shenrong. Theory and practice of cotton male sterile hybrid breeding[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 25-30.
- [9] Yu Y, Yuan D, Liang S, et al. Genome structure of cotton revealed by a genome-wide SSR genetic map constructed from a BC<sub>1</sub> population between *Gossypium hirsutum* and *G. barbadense* [J]. *BMC Genomics*, 2011, 12(1): 15. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-15>
- [10] 任立华, 张天真. 陆地棉七个置换系的遗传评价[J]. 作物学报, 2001, 27 (6): 993-999. <https://doi.org/CNKI:SUN:XBZW.0.2001-06-049>
- Ren Lihua, Zhang Tianzhen. Genetic evaluation of seven substitution lines in upland cotton[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 993-999.
- [11] 贾赵东, 孙敬, 张天真. 利用 7 个置换系和渐渗系的双列杂交研究海陆杂种的数量性状遗传[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(2): 6-10. <http://dx.doi.org/10.7685/j.issn.1000-2030.2006.02.002>
- Jia Zhaodong, Sun Jing, Zhang Tianzhen. Diallel analysis of quantitative traits of hybrid between *Gossypium barbadense* L. and *G. hirsutum* L. using 7 substitution and introgression lines [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(2): 6-10.
- [12] Tian S H, Xu X L, Zhu X F, et al. Overdominance is the major genetic basis of lint yield heterosis in interspecific hybrids between *G. hirsutum* and *G. barbadense*[J]. *Heredity*, 2019, 123 (3): 384-394. <https://doi.org/10.1038/s41437-019-0211-5>
- [13] Guo X, Guo Y, Ma J, et al. Mapping heterotic loci for yield and agronomic traits using chromosome segment introgression lines in cotton[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2013, 55(8): 759-774. <https://doi.org/10.1111/jipb.12054>
- [14] Imran M, Shakeel A, Azhar F M, et al. Combining ability analysis for within-boll yield components in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2012, 11 (3): 2790-2800. <https://doi.org/10.4238/2012.August.24.4>
- [15] 姜元华, 许俊伟, 赵可, 等. 甬优系列粳籼杂交稻根系形态与生理特征[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 89-99. <http://dx.chinadoi.cn/10.3724/SP.J.1006.2015.00089>
- Jiang Yuanhua, Xu Junwei, Zhao Ke, et al. Root system morphological and physiological characteristics of *Indica-japonica* hybrid rice of Yongyou series[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 89-99.
- [16] 中华人民共和国农业部. 棉花纤维品质评价方法: NY/T 1426—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 6.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Evaluation method of cotton fiber quality: NY/T 1426—2007 [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 6.
- [17] 许如根, 吕超, 祝丽, 等. 大麦杂种优势利用研究 I. F<sub>1</sub> 杂种的离中亲优势和超优亲优势[J]. 作物学报, 2004, 30(7): 668-674.
- Xu Rugen, Lü Chao, Zhu Li, et al. Studies on the heterosis of barley (*Hordeum vulgare* L.) I. Superiority of hybrid F<sub>1</sub> from mid-parent or over better-parent[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(7): 668-674.
- [18] Fang L, Wang Q, Hu Y, et al. Genomic analyses in cotton identify signatures of selection and loci associated with fiber quality and yield traits[J]. *Nature Genetics*, 2017, 49(7): 1089-1098. <https://doi.org/10.1038/ng.3887>
- [19] Ma Z Y, He S P, Wang X F, et al. Resequencing a core collection of upland cotton identifies genomic variation and loci influencing fiber quality and yield[J]. *Nature Genetics*, 2018, 50 (6): 803-813. <https://doi.org/10.1038/s41588-018-0119-7>
- [20] 崔秀珍, 李哲, 常俊香, 等. 棉花海陆种间杂交品质性状杂种优势及配合力分析[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(6): 44-46. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.0439-8114.2008.06.011>
- Cui Xiuzhen, Li Zhe, Chang Junxiang, et al. Analysis of heterosis and combining ability for fiber quality traits in F<sub>1</sub> hybrid from *G. barbadense* and *G. hirsutum*[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2008, 47(6): 44-46.
- [21] 王巧玲, 李哲. 棉花海陆杂交 F<sub>1</sub> 代纤维品质杂种优势及配合力分析[J]. 河南科技学院学报, 2013, 41(3): 12-18. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1008-7516.2013.03.003>

- Wang Qiaoling, Li Zhe. Heterosis and combining ability analysis of fiber quality traits of sea-island hybrid  $F_1$  generation[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology, 2013, 41(3): 12-18.
- [22] 张香桂, 周宝良, 陈松, 等. 陆地棉与海岛棉种间杂种优势研究[J]. 江西棉花, 2003, 25(5): 25-30. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.2095-3143.2003.05.006>
- Zhang Xianggui, Zhou Baoliang, Chen Song, et al. Study on interspecific heterosis between *G.hirsutum* and *G.barbadense* [J]. Jiangxi Cotton, 2003, 25(5): 25-30.
- [23] Rajeev S, Patil S S, Manjula S M, et al. Studies on heterosis in cotton interspecific heterotic group hybrids (*G.hirsutum*  $\times$  *G.barbadense*) for seed cotton yield and its components[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2018, 7(10): 3437-3451. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.710.399>
- [24] Lin S, Feng X, Xu C H, et al. Patterns of genome-wide allele-specific expression in hybrid rice and the implications on the genetic basis of heterosis[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(12): 5653-5658. <https://doi.org/10.1073/pnas.1820513116>
- [25] Yang M, Wang X C, Ren D Q, et al. Genomic architecture of biomass heterosis in *Arabidopsis*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(30): 8101-8106. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705423114>
-