

新疆超高产杂交棉的光合生产特征研究

杜明伟¹, 罗宏海¹, 张亚黎¹, 姚炎帝¹, 张旺锋¹, 夏东利², 马丽², 朱波³

(¹石河子大学农学院/新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003; ²新疆兵团农八师 149 团, 新疆石河子 832052;

³新疆兵团农五师农科所, 新疆博乐 833400)

摘要:【目的】研究超高产条件下棉花的光合生产特征, 总结超高产形成规律, 提出超高产的产量结构和光合生理指标, 对挖掘品种产量潜力, 构建超高产栽培技术体系具有重要意义。【方法】以杂交棉标杂 A₁ 为研究对象, 采取定向培育超高产试验示范田, 以一般产量水平条件下常规棉品种(系)为对照, 研究超高产条件下标杂 A₁ 产量形成过程中叶面积指数、叶绿素相对含量(SPAD 值)、光合速率和光合物质积累与分配等变化。【结果】与常规高产棉田相比, 标杂 A₁ 皮棉单产达到 3 500 kg·hm⁻² 时, 叶面积指数高且持续期长, 叶绿素 SPAD 值、单叶光合速率在盛铃期至初絮期显著高于对照; 群体光合速率峰值高且持续时间长, 群体呼吸速率占群体总光合的比例在生育中后期保持在较低水平, 初絮期显著低于常规高产棉田; 营养器官光合物质积累直线增长期起始时间早、积累持续时间长、物质积累量大, 群体总光合物质和生殖器官光合物质积累直线增长期及积累速率峰值出现较晚, 积累活跃期较长, 物质积累强度高。【结论】杂交棉标杂 A₁ 皮棉单产达到 3 500 kg·hm⁻² 的产量结构和生育期主要光合生理指标: 总铃数每公顷应大于 150 万个, 单铃重大于 5.5 g, 衣分不低于 44%; 叶面积指数在盛铃前期应达 4.9~5.2, 初絮期应维持在 3.3 以上; 叶绿素 SPAD 值在盛铃期达到 65.4~66.5, 初絮期仍在 64.8 以上; 单叶光合速率在盛蕾期至盛铃期保持在 32.2~36.5 μmol·m⁻²·s⁻¹, 初絮期应高于 22.2 μmol·m⁻²·s⁻¹; 群体光合速率盛铃前期达 43.4 μmol·m⁻²·s⁻¹, 初絮期在 16.3 μmol·m⁻²·s⁻¹ 以上; 总光合物质积累量达 26 345.4 kg·hm⁻², 经济系数不低于 31%。

关键词: 棉花; 标杂 A₁; 超高产; 光合生产特征; 新疆

Photosynthesis Characteristics of Super-High-Yield Hybrid Cotton in Xinjiang

DU Ming-wei¹, LUO Hong-hai¹, ZHANG Ya-li¹, YAO Yan-di¹, ZHANG Wang-feng¹,
XIA Dong-li², MA Li², ZHU Bo³

(¹Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crops, College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang; ²Regimental Farm 149, Agricultural Division 8 of Xinjiang Construction Crops, Shihezi 832052, Xinjiang; ³Institute of Agricultural Sciences, Agricultural Division 5 of Xinjiang Construction Crops, Bole 833400, Xinjiang)

Abstract: 【Objective】 To explore photosynthesis characteristics, summarize the principle of yield formation, and propose yield components and photosynthetic physiological indexes, experiments were conducted with super-high-yield cotton in field. It was of great significance to excavate yield potential and construct super-high-yield cultivation technique system. 【Method】 One hybrid cotton cultivar *Biaozha* A₁ and four traditional cultivars including *Xinluzao* 13, *Xinluzao* 26, *Wanshi* 217 and *Wanshi* 315 were selected as the experimental materials. Leaf area index, chlorophyll SPAD value, photosynthetic rate, photosynthate accumulation and distribution were measured at different growth stages. 【Result】 Compared to high yield traditional cultivar, super-high-yield hybrid cultivar (lint 3 500 kg·hm⁻²) had higher leaf area index, chlorophyll SPAD value and photosynthetic rate, all of which had longer duration during growth stage. Furthermore, the ratio of canopy respiration rate to total canopy apparent photosynthesis rate which

收稿日期: 2008-06-24; 接受日期: 2008-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(30260051)、国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD44B07)

作者简介: 杜明伟(1982-), 男, 山东泗水人, 硕士研究生, 研究方向为作物高产生理。E-mail: mingweilm@gmail.com。通信作者张旺锋(1965-), 男, 甘肃静宁人, 教授, 研究方向为作物高产生理生态。Tel: 0993-2057326; E-mail: Zhwf_agr@shzu.edu.cn

maintained at a low level at the middle and late growth stage, was significantly lower than that of high yield traditional cultivar especially at early boll opening stage. *Biaoza* A₁ had longer and earlier linear increase stage of vegetative organs photosynthate accumulation, which led to greater photosynthate accumulation. However, the linear increase stage of reproductive organs and total photosynthate accumulation and the peak of accumulation appeared comparatively later than those of high yield traditional cultivar.

【Conclusion】 The indexes of yield components and photosynthetic physiology of super-high-yield *Biaoza* A₁ (lint 3 500 kg·hm⁻²) were proposed, i.e., total number of bolls > 150×10⁴·hm⁻², boll weight > 5.5 g, lint percentage > 44%; leaf area index at early full bolling stage 4.9-5.2, at early boll opening stage above 3.3; chlorophyll SPAD value at full bolling stage 65.4-66.5, at early boll opening stage above 64.8; net photosynthetic rate at flowering and boll forming stage 32.2-36.5 μmol·m⁻²·s⁻¹, at early boll opening stage above 22.2 μmol·m⁻²·s⁻¹; canopy apparent photosynthesis rate at early full bolling stage approximately 43.4 μmol·m⁻²·s⁻¹, at early boll opening stage above 16.3 μmol·m⁻²·s⁻¹; total photosynthate accumulation approximately 26 345.4 kg·hm⁻², economic coefficient no less than 31%.

Key words: cotton; *Biaoza* A₁; super-high-yield; photosynthesis characteristics; Xinjiang

0 引言

【研究意义】探索作物高产新途径, 提高栽培管理技术水平, 最大限度的挖掘作物产量潜力, 一直是作物科学研究的重点和难点^[1-5]。作物杂种优势利用是实现产量突破的一种有效途径^[3]。近年来, 中国在棉花杂种优势的研究和利用方面取得了较大进展, 种植面积的逐年扩大, 显著提高了棉花产量水平^[4]。标杂 A₁ 是具有标志性状鸡脚叶形态的杂交棉品种^[5], 自 2001 年在新疆试验示范以来, 表现出较高的增产潜力, 2006 年新疆生产建设兵团农八师 149 团 1.14 公顷标杂 A₁ 棉田验收皮棉单产达到 4 189.5 kg·hm⁻², 打破了棉花单产 (3 702.0 kg·hm⁻²) 的全国记录^[6]。开展标杂 A₁ 超高产光合生产特征研究, 揭示超高产的光合生理机理, 对进一步挖掘杂交棉增产潜力, 制定相关栽培技术, 实现大面积高产超高产栽培意义深远。**【前人研究进展】**光合作用是作物产量形成的基础, 有关棉花光合特性的研究一直受到广泛关注^[7-17]。前人从叶面积指数^[7-8]、叶绿素含量^[9]、叶片光合效率^[10]、不同部位叶片光合能力^[11]、群体光合特性^[8,11-17]、光合物质积累与分配^[18]等不同角度对高产棉花的光合生产特征进行了研究, 提出了高产棉花应具有适宜的叶面积指数^[7-8], 较高的叶片叶绿素含量^[9], 较高的花铃期单叶光合速率和群体光合速率^[8,11-17]; 对高产品种的研究表明, 较早的库形成能力、较强的生殖生长势是高产品种的重要特征^[18-20]; 在花铃期增加水肥的投入有利于产量的提高^[17,21-23]。这些研究对高产棉花的育种和栽培起到了至关重要的指导和推动作用。**【本研究切入点】**然而, 以往研究大多是针对 3 000 kg·hm⁻² 产量水平以下的常规高产棉花品种开展的研究, 结合杂交棉品种, 对 3 500 kg·hm⁻² 产量水平条件下超高产棉花

光合生产特征的研究尚未见报道。新疆是中国棉花主产区, 但种植杂交棉的年限较短, 有关杂交棉超高产生理机理的研究开展较少, 如何发挥杂交棉品种的优良特性, 实现大面积超高产尚待研究。光合性能的研究是揭示作物超高产机理的突破口^[24-25]。**【拟解决的关键问题】**因此, 本研究以杂交棉标杂 A₁ 为研究对象, 4 个常规高产品种 (系) 为对照, 分析超高产标杂 A₁ 的光合生产特征, 提出实现皮棉单产 3 500 kg·hm⁻² 的产量结构和生育期主要光合生理指标, 以期对标杂 A₁ 大面积超高产高效栽培技术的制定提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

杂交棉品种选用标杂 A₁, 该品种为具有鸡脚叶标记性状的杂交棉品种。常规棉品种选用当地主栽品种新陆早 13 号以及新陆早 26 号、万氏 217 号和万氏 315 号 4 个新品种 (系)。

1.2 试验概况

研究采用大田创建超高产试验示范田和小区控制试验相结合的方法。2006 年在农五师 89 团 14 连 (44.92°N, 82.18°E) 8 号条田进行定向培育超高产试验示范田。棉田土质沙壤, 有机质 12.5 g·kg⁻¹, 全氮 0.8 g·kg⁻¹, 碱解氮 81.2 mg·kg⁻¹, 速效磷 13.7 mg·kg⁻¹, 速效钾 239 mg·kg⁻¹。播前造墒, 深施有机肥 1 800 kg·hm⁻², 4 月 10 日播种, 4 月 18 日补水出苗, 留苗密度为每公顷 15.5~16.0 万株, 6 月 28 日至 7 月 1 日打顶。全生育期滴灌 12 次, 滴灌总量 5 900 m³·hm⁻², 共施纯氮 519 kg·hm⁻², 30% 基施, 其余随水滴施; 化控 5 次, 缩节胺用量 300 g·hm⁻²。以相邻 9 号田相同品种为对照, 田间管理同一般大田管理。

2007 年在农八师 149 团 19 连 (45.11°N, 86.13°E)

1号、2号条田进行定向培育超高产试验示范田。棉田土质沙壤,有机质 $16.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $62.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $20.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $223\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。播前造墒,深施有机肥 $2\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,4月13日播种,4月19日补水出苗,留苗密度每公顷 $15.5\sim 16.5$ 万株,6月28日至30日打顶。全生育期滴灌12次,滴灌总量 $5\ 800\sim 6\ 200\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,共施纯氮 $510\sim 527\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,25%基施,其余随水滴施;化控5次,缩节胺用量 $280\sim 300\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。以种植常规品种的相邻6号田为对照,田间管理同一般大田管理。

小区试验两年均在石河子大学农学实验站(44.26°N , 85.95°E)进行。小区面积 60 m^2 ,随机区组排列,重复3次。试验地土质为中壤土,有机质 $15.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $54.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $19.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $194\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。播前造墒,深施有机肥 $1\ 800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,4月16日播种,4月18日补水出苗,留苗密度为每公顷 $15.5\sim 16.5$ 万株,7月2日至4日打顶。全生育期滴灌11次,滴灌总量 $5\ 400\sim 5\ 800\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,共施纯氮 $495\sim 512\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,30%基施,其余随水滴施。其他管理措施同一般大田管理。

1.3 测试项目及方法

1.3.1 叶面积指数 选择盛蕾期、盛花期、盛铃期、初絮期、盛絮期等关键生育时期,采用LAI-2000冠层仪(Li-cor, USA)测定叶面积指数,测定方法参照文献[26],先将探头水平放置于冠层上方,按下测定按钮,两声蜂鸣后将探头放入群体内地面上,仍保持水平,按下测定按钮,两声蜂鸣后水平均匀移动探头,选择冠层内不同位置测量,重复4次。

1.3.2 叶绿素相对含量(SPAD值) 采用SPAD-502叶绿素计(Minolta, JPN),在关键生育时期测定棉花功能叶(打顶前为倒四叶,打顶后为倒二叶)的叶绿素SPAD值,每个处理选15片叶,每片叶分别在主脉两侧测定2次。

1.3.3 单叶光合速率 采用Li-6400便携式光合作用系统(Li-cor, USA)测定关键生育时期的单叶光合速率,每次测定选择晴朗无云的天气于北京时间10:00~13:00时段进行,测定叶片部位与叶绿素SPAD值的相同。

1.3.4 群体光合和群体呼吸速率 群体光合速率采用同化箱法测定,测定方法参照文献[24]并有所改进。用GXH-305型红外线 CO_2 分析仪在田间直接测定。测定时选择晴天光强稳定在 $1\ 200\sim 1\ 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

(北京时间11:00~14:00)时进行。同化箱宽 0.7 m ,长 0.9 m ,高度依不同生育期株高而定,箱内装两个风扇搅拌气体,框架外罩透明聚脂薄膜。采用闭路系统,测定时每处理选取3个点,每点测定2次,每次测定时间为 60 s ,不同处理采用轮回测定的方法。用红布和黑绒布双层制作的布罩遮光后测定群体呼吸速率,并测定土壤呼吸以修正群体光合和群体呼吸的测定值。在群体结构相近的田地里,剪去与同化箱底大小相同面积地表上的植被后,测定土壤呼吸释放的 CO_2 ,测定方法同群体光合速率,计算群体呼吸占群体总光合的比例: $\text{CR}/\text{TCAP}=\text{CR}/(\text{CR}+\text{CAP})$ 。

1.3.5 光合物质积累 分别于出苗期、现蕾期、盛蕾期、初花期、盛花期、盛铃期、初絮期、盛絮期,在各棉田选3个样点取生长整齐一致的棉株6株,将植株分解为茎、叶、蕾铃等器官, 105°C 下杀青 30 min , 80°C 下烘干后称重;参照文献[8, 27]的方法,用Logistic方程 $y=a/(1+be^{-cx})$ 对棉株光合物质积累过程进行模拟。

1.4 数据统计及分析

试验数据用Microsoft Excel 2003和SPSS 11.0分析处理,Logistic方程通过CurveExpert 1.3进行拟合。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

通过对超高产试验示范田的测产和实收统计,两年3块条田皮棉产量均实现 $3\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的超高产水平,累计面积达到 21.8 hm^2 ,其中149团19连2-4条田2007年产量达到 $3\ 586\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,面积达 7.6 hm^2 。实现超高产的品种均为杂交棉标杂 A_1 (表1)。进一步分析产量构成因子可以看出,与 $3\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以下棉田以及文献报道 $2\ 250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平棉田相比^[13],实现 $3\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的产量,主要是单位面积总铃数的增加,增幅达 $16.4\%\sim 30.3\%$ 。当产量进一步提高到 $3\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的超高产水平,单铃重增加的同时,单位面积总铃数进一步提高,可以充分挖掘杂交棉的增产潜力。 $3\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的超高产棉田总铃数每公顷应大于150万个,单铃重大于 5.5 g ,衣分不低于 44% 。由此看出,选择早熟大铃品种,保证较高的单铃重,提高单位面积总铃数,是进一步提高棉花产量的有效途径。

2.2 叶面积指数(LAI)

LAI的大小直接影响作物对光能的截获,进而影响群体光合生产。研究表明(图1),不同棉花品种

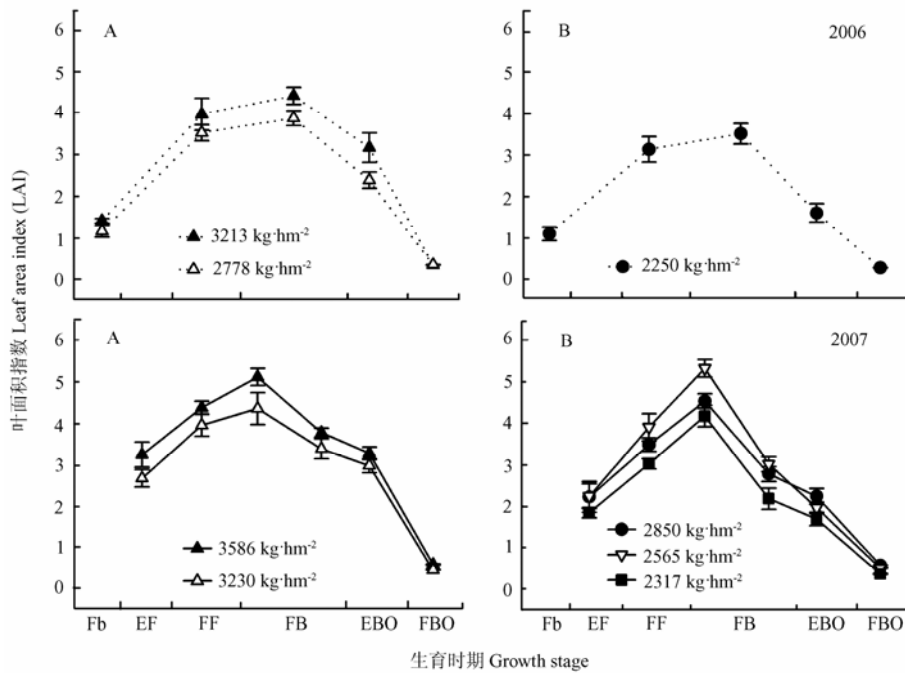
表 1 不同产量水平下棉花产量及产量构成

Table 1 The yield and components in cotton with different yields (2006-2007)

年份	品种	试验地点	株数	株铃数	总铃数	单铃重	衣分	皮棉产量
Year	Cultivars	Experimental spot	Plant No.	Boll No.	Total boll No.	Boll weight	Lint percentage	Lint yield
			(10 ⁴ plants/hm ²)	Per plant	(10 ⁴ /hm ²)	(g)	(%)	(kg·hm ⁻²)
2006	标杂 A ₁	89-14-8-3	15.9±0.58	8.2±0.34	130.4±6.62c	5.7±0.51a	44.0±1.54	3213±69.4b
	Biaoza A ₁	89-14-9-1	15.7±0.61	6.5±0.29	102.1±3.97f	5.7±0.45a	44.2±1.81	2557±82.6f
		试验站 Experimental station	16.3±0.57	7.1±0.63	115.7±4.56de	5.5±0.39a	44.4±1.34	2778±59.7e
	新陆早 13 号 Xinluzao 13	试验站 Experimental station	16.5±0.52	6.7±0.38	110.6±3.54e	4.9±0.34bc	41.8±2.07	2250±60.3h
2007	标杂 A ₁	149-19-2-4	16.2±0.69	9.3±0.41	150.7±6.88a	5.5±0.28a	44.1±2.11	3586±78.6a
	Biaoza A ₁	149-19-1-1	15.7±0.50	8.8±0.37	138.2±5.73b	5.4±0.42ab	44.2±1.83	3230±85.4b
		试验站 Experimental station	15.8±0.54	9.4±0.39	148.5±2.48a	4.7±0.35c	44.2±2.32	3074±68.4c
	新陆早 13 号 Xinluzao 13	试验站 Experimental station	15.6±0.67	8.3±0.43	129.5±5.19c	4.5±0.30c	43.6±1.64	2533±88.5f
	新陆早 26 号 Xinluzao 26	149-19-6-3-N	16.5±0.53	7.3±0.56	120.5±4.83d	5.6±0.46a	42.4±2.60	2850±97.3d
	万氏 315 号 Wanshi 315	149-19-6-4-N	16.2±0.65	6.9±0.51	111.7±6.71e	5.5±0.42a	42.2±2.39	2565±106.4f
	万氏 217 号 Wanshi 217	149-19-6-3	16.4±0.38	6.1±0.48	100.1±4.79f	5.6±0.39a	41.9±2.05	2317±85.7g

同一列不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著性, 具有相同字母的差异不显著

Value in same column followed by different letters are significant difference at 0.05 level and that of the same letters are no significant



Fb: 盛蕾期; EF: 初花期; FF: 盛花期; FB: 盛铃期; EBO: 初絮期; FBO: 盛絮期。A: 杂交棉品种; B: 常规棉品种。下同
 Fb: Full budding stage; EF: Early flowering stage; FF: Full flowering stage; FB: Full bolling stage; EBO: Early boll opening stage; FBO: Full boll opening stage. A: Hybrid cotton; B: Traditional cotton. The same as below

图 1 不同产量水平下棉花叶面积指数的生育期变化

Fig. 1 The changes of leaf area index at different growth stages in cotton with different yields (2006, 2007)

LAI 均表现为随生育期推移逐渐增大, 在盛花至盛铃期达最大值, 随后下降; 不同品种及同一品种不同

产量水平棉田 LAI 下降快慢不同。标杂 A₁ 在产量达到 3 200 kg·hm⁻² 条件下棉田 LAI 峰值为 4.3~4.5;

3 500 kg·hm⁻² 以上的棉田 LAI 在盛铃期高达 4.9~5.2, 初絮期仍维持在 3.3 左右, 较 3 200 kg·hm⁻² 左右的棉田高 4.1%, 较 2 250 kg·hm⁻² 棉田高 92.8%。常规棉万氏 315 号 LAI 虽在盛铃期也达到 5.0~5.4, 但生育后期下降过快, 初絮期已降至 1.9, 产量水平仅为 2 565 kg·hm⁻²。这可能是常规棉花品种 LAI 超过 5.0 以后, 叶片相互遮荫严重, 中下部叶片受光不足, 导致早衰、过早脱落, 光合有效面积减小, 产量难以达到较高水平; 杂交棉品种标杂 A₁ 也具有较高的 LAI, 但生育后期下降缓慢, 具有充足的光合面积, 容易实现超高产。因此, 棉花 LAI 高且持续期长, 叶片后期衰老缓慢, 保证充足的光合面积, 是实现超高产的关键。

2.3 叶绿素相对含量 (SPAD 值)

叶绿素在光合作用中对光能的吸收、传递和转化起着极为重要的作用。叶绿素 SPAD 值的大小可以直接反映出叶绿素含量的高低^[9]。研究表明 (图 2), 不同产量水平棉花叶绿素 SPAD 值在盛蕾期至盛铃期随生育进程推移逐渐增大, 随后开始降低。盛蕾期至盛铃期, 不同产量水平棉花叶绿素 SPAD 值无明显差异, 至初絮期产量水平较高的棉田显著高于产量较低的棉田 ($P<0.05$)。3 500 kg·hm⁻² 以上的超高产棉田叶绿素 SPAD 值在盛铃期维持在 65.4~66.5, 初絮期仍在 64.8 以上, 较 3 200 kg·hm⁻² 左右的棉田高 4.9%, 较 2 250 kg·hm⁻² 棉田高 22.7%。叶绿素 SPAD 值受品种特性影响较大, 尤其是盛铃期至初絮期, 杂交棉品种显著高于常规棉品种 ($P<0.05$), 超高产条件下杂交棉品种标杂 A₁ 叶绿素降解较为缓慢。

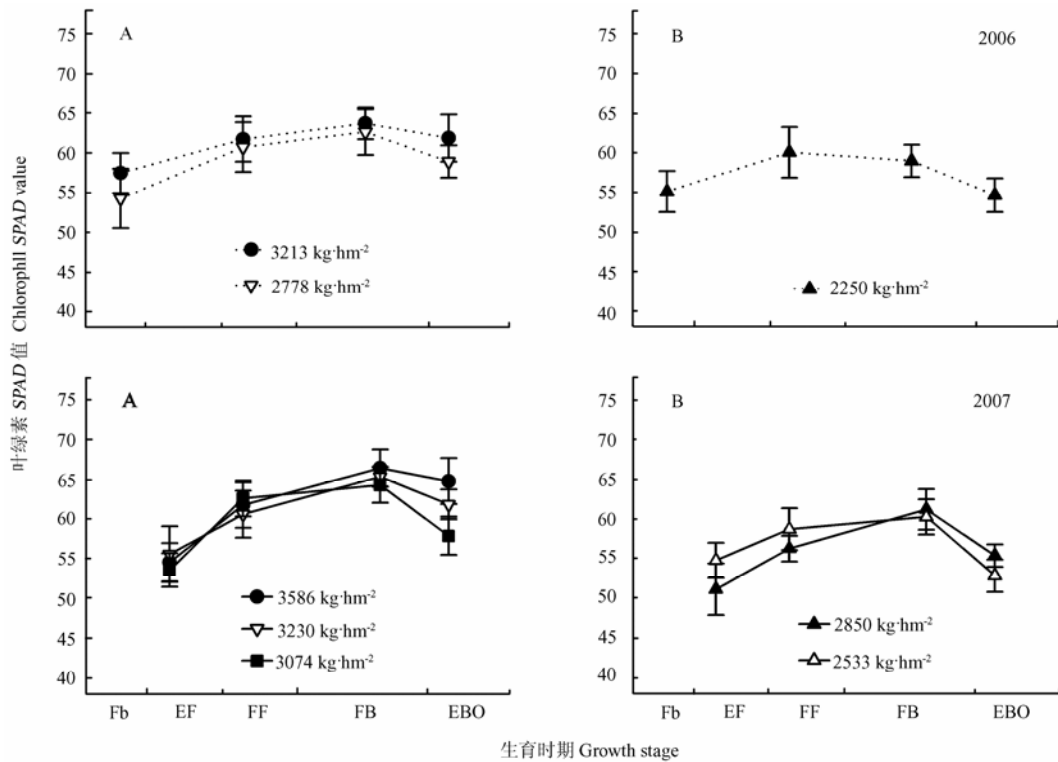


图 2 不同产量水平下棉花叶绿素 SPAD 值的生育期变化

Fig. 2 The changes of chlorophyll SPAD value at different growth stages in cotton with different yields (2006-2007)

2.4 光合速率

2.4.1 单叶光合速率 (P_n) 叶片具有较高的光合速率是作物获得高产的一个重要原因。研究表明 (图 3), 不同产量水平条件下棉花在盛蕾期至盛花期均具有较高的 P_n , 其值基本保持在 32.2~36.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 至

初絮期, 3 500 kg·hm⁻² 以上的超高产棉田 P_n 仍维持在 22.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 显著高于其它产量水平的棉田 ($P<0.05$), 较 3 200 kg·hm⁻² 左右的棉田高 27.5%, 较 2 250 kg·hm⁻² 棉田高 66.5%。

P_n 与叶片叶绿素 SPAD 值的相关性分析表明, 盛

蕾期至盛花期 P_n 与叶绿素 SPAD 值无显著相关性 ($P > 0.05$)，但盛铃期和初絮期相关性则达极显著水平 ($R=0.9346^{**}$, 0.9661^{**})。超高产棉田在盛蕾期至盛花期 P_n 无明显优势，盛铃期至初絮期，产量水平较高的棉田 P_n 较高。由此可见，超高产棉田在棉花生育后期叶片叶绿素的降解较为缓慢，延长了叶片的光合功能期，叶片的光合优势明显，能保证棉铃发育所需有机养料。

2.4.2 群体光合速率 (CAP) CAP 能准确的描述单位土地面积上的光合能力，而且综合了基因型效应、叶片形态、冠层结构等，因此作物产量与群体光合速率的关系较单叶光合速率更为紧密。研究表明(图 4)，在盛花期，2 500~3 200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 棉田 CAP 为 18.5~26.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而 3 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的超高产棉田 CAP 已达 38.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；棉株进入盛铃前期，不同产量水平棉田 CAP 均达最高值，3 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的

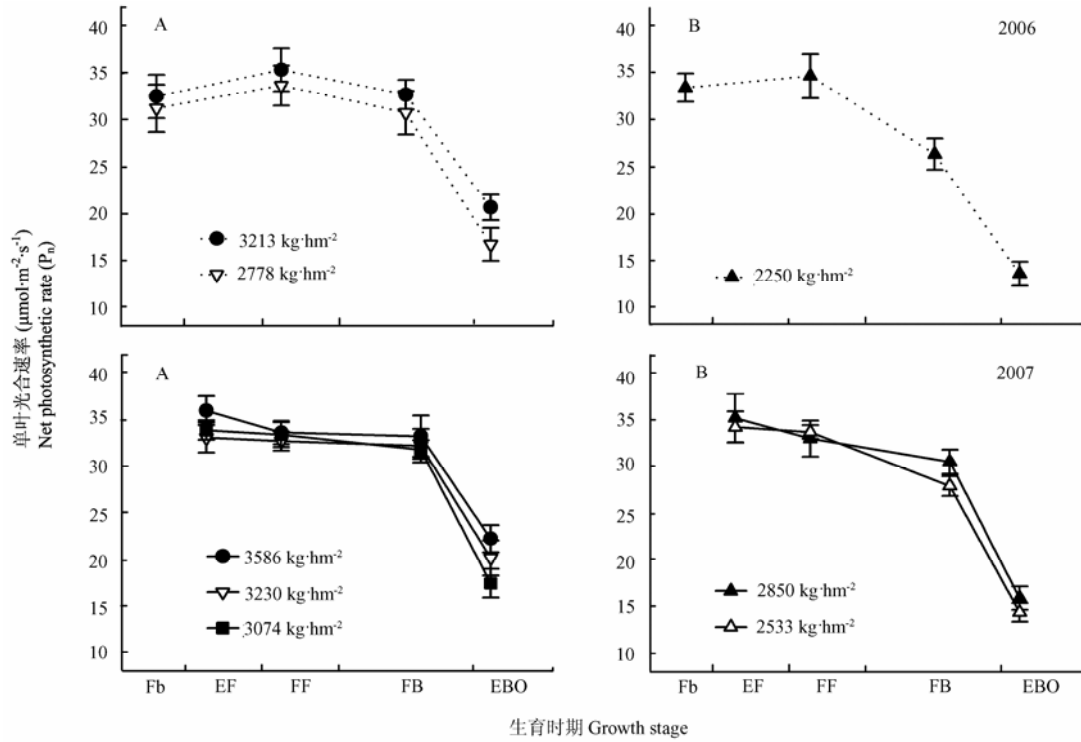
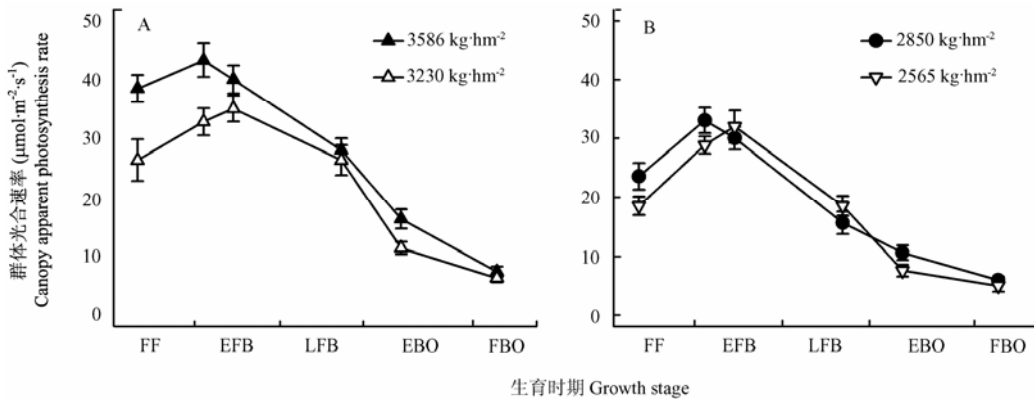


图 3 不同产量水平下棉花单叶光合速率的生育期变化

Fig. 3 The changes of net photosynthetic rate at different growth stages in cotton with different yields (2006-2007)



EFB: 盛铃前期; LFB: 盛铃后期。下同 EFB: Early full bolling stage; LFB: Later full bolling stage. The same as below

图 4 不同产量水平下棉花群体光合速率的生育期变化

Fig. 4 The changes of canopy apparent photosynthesis rate at different growth stages in cotton with different yields (2007)

超高产田为 $43.4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，较 $2\ 500\sim 3\ 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 棉田高 $23.6\%\sim 35.4\%$ ，较 $2\ 250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 棉田^[13]高 69.8% ；至初絮期， $3\ 500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的超高产田仍能保持在 $16.3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右，而其它产量水平棉田均已降至 $12.0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。这表明，超高产棉田不仅 CAP 峰值较高，而且高值持续时间长，这与棉株生育后期仍维持较高的叶面积指数和单叶光合速率较高有关。

2.4.3 群体呼吸速率 (CR) 不同产量水平棉田 CR 变化趋势同群体光合速率，在盛铃前期达最大值 (图 5)。初花期至盛铃后期，标杂 A₁ $3\ 500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上

的超高产棉田 CR 高于 $3\ 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右的棉田，但两种产量水平间群体呼吸速率占群体总光合的比例 (CR/TCAP) 无明显差异；至初絮期，标杂 A₁ 两种产量水平下的 CR 无明显差异，但 $3\ 500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的超高产田 CR/TCAP 显著低于 $3\ 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右的棉田 ($P<0.05$)。常规棉新陆早 26 号 $2\ 850 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 棉田在初花期至盛铃后期 CR 和 CR/TCAP 均显著低于万氏 315 号 $2\ 565 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 棉田 ($P<0.05$)。杂交棉 CR/TCAP 低于常规棉，特别是在初絮期差异达到显著水平，这可能是杂交棉标杂 A₁ 群体光合速率高值持续期长的重要原因之一。

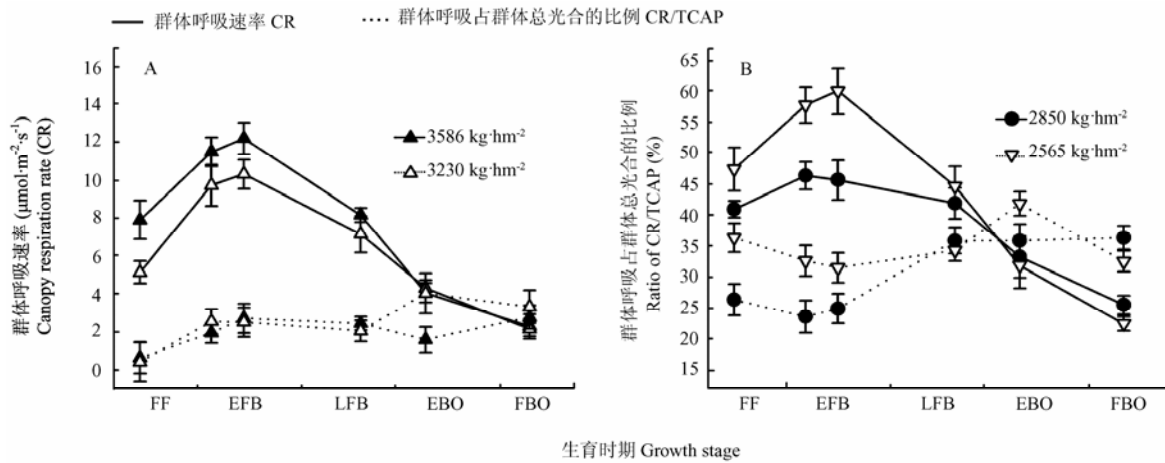


图 5 不同产量水平下棉花群体呼吸速率和群体呼吸速率占群体总光合比例的生育期变化

Fig. 5 The changes of canopy respiration rate and the ratio of canopy respiration rate to total canopy apparent photosynthesis rate at different growth stages in cotton with different yields (2007)

2.5 棉株光合物质积累与分配

对不同产量水平棉田棉株光合物质积累与分配的测定表明 (表 2)， $3\ 500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 超高产棉田总光合物质积累的直线增长期始于出苗后 80 d (7 月 15 日) 左右，止于 129 d (9 月 2 日) 左右，持续时间 49 d，最大增长速率出现于出苗后 105 d (8 月 9 日) 左右，物质积累最大增长速率 (V_{max}) 为 $393.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，比 $2\ 250\sim 3\ 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 棉田高 $26.4\%\sim 63.2\%$ ，物质积累活跃期 (P) 为 112 d，总光合物质积累量达 $26\ 345.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，比 $2\ 250\sim 3\ 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 高 $25.5\%\sim 117.3\%$ 。营养器官积累直线增长期开始较早，为出苗后 51 d (7 月 7 日) 左右，持续时间 38 d，比 $2\ 250\sim 3\ 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 多 15~19 d，虽然营养器官 V_{max} 仅为 $1\ 77.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，但 P 较长，比 $2\ 250\sim 3\ 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 多 42~57 d，因此，

营养器官总积累量达到了 $10\ 056.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。生殖器官物质积累直线增长期始于出苗后 94 d (7 月 29 日) 左右，止于 125 d (8 月 30 日) 左右，持续期较长 (32 d)，有利于棉铃的生长发育， V_{max} 可达 $391.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，生殖器官总积累量达 $16\ 259.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。但 $3\ 500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 超高产棉田经济系数并不高，为 30.8%，比 $2\ 250\sim 3\ 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 低 3.8~13.7 个百分点，这正反映了标杂 A₁ 具有较大的增产潜力。

3 讨论

3.1 标杂 A₁ 实现超高产的群体光合特性

叶面积是植物截获光能的物质载体^[27]，棉花群体适宜叶面积指数应保持在一定的范围，叶面积指数过大引起冠层中下部荫蔽，光合有效面积减小，群体光

表 2 不同产量水平下棉花光合物质积累与分配特征

Table 2 The photosynthate accumulation and distribution characteristics under different yield in cotton (2006-2007)

	产量水平 Yield level (kg·hm ⁻²)	拟合方程 Fitting equation	R	总积累量 TPA (kg·hm ⁻²)	T ₁ (d)	T ₂ (d)	T ₃ (d)	V _{max} (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	T ₀ (d)	P (d)
总光合物质 Total photosynthate	3500	y=29475.1/(1+272.5e ^{-0.0534x})	0.9951 ^{**}	26315.4	80	129	49	393.5	105	112
	3200	y=22759.7/(1+151.1e ^{-0.0547x})	0.9902 ^{**}	20974.5	68	116	48	311.2	92	109
	2800	y=16661.9/(1+130.5e ^{-0.0579x})	0.9795 ^{**}	17793.7	61	107	45	241.2	84	104
	2250	y=11485.4/(1+3725.8e ^{-0.1060x})	0.9976 ^{**}	12112.5	65	90	25	304.4	78	57
营养器官 Vegetative organs	3500	y=10166.3/(1+131.1e ^{-0.0697x})	0.9983 ^{**}	10056.3	51	89	38	177.1	70	86
	3200	y=7306.5/(1+12169.1e ^{-0.1374x})	0.9989 ^{**}	7551.0	59	78	19	251.0	68	44
	2800	y=6383.9/(1+520705.0e ^{-0.2041x})	0.9803 ^{**}	7068.4	58	71	13	325.7	64	29
	2250	y=6181.6/(1+40681.6e ^{-0.1511x})	0.9982 ^{**}	5784.0	62	79	17	233.5	70	40
生殖器官 Reproductive organs	3500	y=18875.5/(1+8784.5e ^{-0.0829x})	0.9978 ^{**}	16259.1	94	125	32	391.2	110	72
	3200	y=13577.4/(1+21556.8e ^{-0.0971x})	0.9967 ^{**}	13423.5	89	116	27	329.6	103	62
	2800	y=11495.7/(1+5794.6e ^{-0.0882x})	0.9983 ^{**}	10725.3	83	113	30	253.5	98	68
	2250	y=5973.9/(1+2585.3e ^{-0.0933x})	0.9952 ^{**}	6328.5	70	98	28	139.3	84	64

“***”是在 0.01 水平上检验达显著水平。T₁、T₂ 是光合物质积累增长直线期起止时间 (出苗后天数), T₃ 是持续天数, T₀ 是最大增长速率 (V_{max}) 出现的时间, P 是物质积累活跃期 (大约完成总积累量的 90%)

“***”means significantly at 0.01 level. In linear increase stage for photosynthate accumulation, T₁、T₂ were the beginning date and concluded date, T₃ was the lasting time, T₀ was the date appeared the highest velocity, P was the active stage of photosynthate accumulation (accomplished about 90% of the total photosynthate accumulation) respectively

合速率降低而导致减产^[7,13]。前人研究表明^[7-8,28], 2 550~3 000 kg·hm⁻² 高产棉花最大叶面积指数为 3.9~4.4, 不宜超过 4.5。本研究中具有普通叶形的常规棉花品种叶面积指数的变化与前人研究结果一致, 如新陆早 26 号产量达到 2 850 kg·hm⁻², 最大叶面积指数在 4.5 左右, 而万氏 315 号叶面积指数峰值达到 5.2 左右, 产量仅为 2 565 kg·hm⁻², 较新陆早 26 号下降 10%。而杂交棉标杂 A₁ 叶面积指数峰值也达 4.9~5.2, 仍可实现 3 500 kg·hm⁻² 以上的超高产水平, 这可能是由于杂交棉品种的杂种优势和鸡脚叶形所具有的良好透光性^[3-4,29]。因此, 杂交棉标杂 A₁ 实现超高产应保证具有较高的叶面积指数及较长的叶面积持续期, 盛铃前期达到 4.9~5.2, 初絮期应维持在 3.3 以上。

植物的光合色素在光合作用中对光能的吸收、传递和转化起着极为重要的作用^[30]。在作物高产栽培中, 生育后期叶片叶绿素含量是叶片质量性状的重要指标。对玉米^[27]和水稻^[31]的研究表明, 超高产品种生育后期叶绿素含量下降缓慢。本研究表明, 盛蕾期至盛花期棉花叶绿素含量与单叶光合速率无显著相关性, 而盛铃期至吐絮期叶绿素含量与单叶光合速率有极显著正相关关系。可见, 棉花在生育前期叶绿素含量高单叶光合速率不一定高, 但生育后期叶绿素降解慢是保持单叶光合能力的关键, 为延长光合功能期、

促进光合物质积累奠定了基础。杂交棉标杂 A₁ 能够实现超高产正是由于生育后期较高的叶绿素含量, 保证了光合作用的高效进行。

作物产量与群体光合速率的关系较单叶净光合速率更为紧密, 棉花群体光合速率与皮棉产量呈显著正相关^[13-15]。王克如等^[8]研究表明, 3 000 kg·hm⁻² 的棉花群体光合在盛铃期达最大值为 34.1 μmol·m⁻²·s⁻¹, 比 2 250 kg·hm⁻² 和 1 050 kg·hm⁻² 棉花^[7]分别高 33.3%、92.8%。本研究表明, 杂交棉标杂 A₁ 产量达到 3 500 kg·hm⁻² 以上的超高产水平时, 群体光合速率盛铃前期可达 43.4 μmol·m⁻²·s⁻¹, 较 2 500~3 200 kg·hm⁻² 的高 23.6%~35.4%; 至初絮期, 标杂 A₁ 3 500 kg·hm⁻² 以上的超高产田群体光合速率仍维持在 16.4 μmol·m⁻²·s⁻¹, 较 2 500~3 200 kg·hm⁻² 高 43.0%~113.8%, 这与其生育后期仍维持较高的叶面积指数和单叶光合速率较高有关。3 500 kg·hm⁻² 标杂 A₁ 整个生育期 CR/TCAP 均维持在 17%~23% 的较低水平, 特别是初絮期, 仅为 19.8%, 比 2 500~3 200 kg·hm⁻² 低 7.5~21.9 个百分点。较低的呼吸消耗有利于光合物质的累积, 这也是其生育后期群体光合速率高、物质积累量大的一个主要原因。

3.2 标杂 A₁ 实现超高产的光合物质累积与分配特征
产量的形成过程是光合物质积累与分配的过程。

资料表明, 2 250 kg·hm⁻² 棉田群体物质积累最大增长速率为 250.2~254.3 kg·hm⁻²·d⁻¹, 总生物量 12 657.7 kg·hm⁻², 经济系数 47.9%^[32]; 皮棉 3 000 kg·hm⁻² 高产棉田群体物质积累最大增长速率为 315.2 kg·hm⁻²·d⁻¹ 左右, 总生物量 19 747.8 kg·hm⁻², 经济系数 36.7%^[8]。本研究表明, 3500 kg·hm⁻² 以上的超高产标杂 A₁ 群体物质积累最大增长速率为 393.5 kg·hm⁻²·d⁻¹, 总生物量 26 345.4 kg·hm⁻², 经济系数 30.8%。可见, 杂交棉标杂 A₁ 最大积累速率高, 积累强度大, 实现 3 500 kg·hm⁻² 以上的超高产水平主要是由于总生物量的增加, 其经济系数并不高。可能的原因一是由于超高产棉田营养生长比较旺盛, 光合物质积累量大, 总生物量较大; 二是与 2007 年生育后期降温过早有关, 温度降低影响了标杂 A₁ 棉铃的发育, 铃重较正常年份有所下降^[33]。杂交棉标杂 A₁ 的总生物量大、经济系数较低也反映出该品种仍具有较大的增产潜力。

生育前期, 标杂 A₁ 3 500 kg·hm⁻² 以上的超高产棉田营养器官光合物质快速积累期起始时间早、积累活跃时间长、物质积累量大, 为生育中后期光合生理优势的发挥提供了保障, 是实现超高产的基本保证。群体总光合物质和生殖器官光合物质快速积累期持续时间较长, 有利于棉铃的生长发育, 但快速积累期起始时间相对于新疆光热资源优越期较晚, 对培育超高产田存在风险, 因此, 提早杂交棉标杂 A₁ 的生育进程是培育超高产的首要前提。根据标杂 A₁ 的生育特点, 可采取适期早播或育苗移栽的方式使其生育进程提前, 以充分利用丰富的光热资源, 在保证前期营养器官正常生长的基础上, 采取水肥后移或适当延长停水时间的措施, 保证生育后期生殖器官的生长发育, 促进光合物质向籽棉运转, 提高经济系数, 有利于充分挖掘杂交棉标杂 A₁ 的增产潜力。

4 结 论

与常规高产棉花品种相比, 标杂 A₁ 实现超高产叶面积指数高且持续期长, 叶绿素降解缓慢, 光合功能期长, 有利于光合物质积累; 营养器官快速积累期开始时间早, 积累活跃期长, 群体和生殖器官生长发育高峰期推后, 积累速率快, 积累量大, 但经济系数相对较低, 具有较大的增产潜力。因此, 可根据杂交棉标杂 A₁ 的生育特点, 采取适期早播或育苗移栽的方式使其生育进程提前, 以充分利用丰富的光热资源, 并采取水肥后移或适当延长停水时间的措施, 保证生育后期生殖器官的生长发育, 促进光合物质向籽棉运转,

提高经济系数, 有利于进一步挖掘杂交棉标杂 A₁ 的增产潜力。

通过对不同品种不同产量水平棉花光合生产特征的深入研究, 提出了实现杂交棉标杂 A₁ 皮棉单产 3 500 kg·hm⁻² 的产量结构和生育期主要光合生理指标: 总铃数每公顷应大于 150 万个, 单铃重大于 5.5 g, 衣分不低于 44%; 叶面积指数在盛铃前期达 4.9~5.2, 初絮期应维持在 3.3 以上; 叶绿素 SPAD 值在盛铃期达到 65.4~66.5, 初絮期仍在 64.8 以上; 单叶光合速率在盛蕾期至盛铃期保持在 32.2~36.5 μmol·m⁻²·s⁻¹, 初絮期应高于 22.2 μmol·m⁻²·s⁻¹; 群体光合速率盛铃前期达 43.4 μmol·m⁻²·s⁻¹, 初絮期维持在 16.3 μmol·m⁻²·s⁻¹ 以上; 总光合物质积累量达 26 345.4 kg·hm⁻², 经济系数不低于 31%。

References

- [1] 杨建昌, 杜 永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1336-1345. Yang J C, Du Y, Wu C F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1336-1345. (in Chinese)
- [2] 赵 明, 李建国, 张 宾, 董志强, 王美云. 论作物高产挖潜的补偿机制. 作物学报, 2006, 32(10): 1566-1573. Zhao M, Li J G, Zhang B, Dong Z Q, Wang M Y. The compensatory mechanism in exploring crop production potential. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(10): 1566-1573. (in Chinese)
- [3] 朱青竹, 赵国忠, 苏丽君, 张艳丽, 冯恒文. 棉花杂种优势与亲本表现的关系研究. 棉花学报, 2007, 19(4): 312-314. Zhu Q Z, Zhao G Z, Su L J, Zhang Y L, Feng H W. Studies on relationships of heterosis of F₁ hybrids with parental behaviour in upland cotton. *Cotton Science*, 2007, 19(4): 312-314. (in Chinese)
- [4] 汪若海, 李秀兰. 杂交棉的新进展及其深化研究. 中国农业科学, 2000, 33(6): 111-112. Wang R H, Li X L. Progresses on hybrid cotton and its further studies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 111-112. (in Chinese)
- [5] 罗景隆, 刘佳中, 王忠义. 多抗高产高效杂交棉标杂 A₁ 的选育. 河南农业科学, 1999, 4: 23-24. Luo J L, Liu J Z, Wang Z Y. Breeding of multi-resistant, high-productive and high-efficient cotton hybrid Biaoza A₁. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 1999, 4: 23-24. (in Chinese)
- [6] 胡兆璋. 加大杂交棉 F₁ 代及育苗移栽技术推广力度加快兵团现代农业发展步伐. 新疆农垦科技, 2007, 4: 3-6.

- Hu Z Z. Increaseing hybrid cotton F₁ and transplanting beet seedling technique, accelerating the development of crops modern agriculture. *State Farms Technology of Xinjiang*, 2007, 4: 3-6. (in Chinese)
- [7] 李蒙春, 张旺锋, 马富裕. 高产棉花生育规律及生理指标的研究. 石河子大学学报(自然科学版), 1997, 1(2): 87-90.
- Li M C, Zhang W F, Ma F Y. The physiological index and developing pattern of high yield cotton. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 1997, 1(2): 87-90. (in Chinese)
- [8] 王克如, 李少昆, 宋光杰, 陈刚, 曹栓柱. 新疆棉花高产栽培生理指标研究. 中国农业科学, 2002, 35(6): 638-644.
- Wang K R, Li S K, Song G J, Chen G, Cao S Z. Studies on cultivated physiological indexes for high-yielding cotton in Xinjiang. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(6): 638-644. (in Chinese)
- [9] 邬飞波, 许馥华, 金珠群. 利用叶绿素计对短季棉氮营养诊断的初步研究. 作物学报, 1999, 25(4): 483-488.
- Wu F B, Xu F H, Jin Z Q. A preliminary study on nitrogen nutrition diagnosis for short-season cotton with a chlorophyll meter. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4): 483-488. (in Chinese)
- [10] 郭连旺, 许大全, 沈允钢. 田间棉花叶片光合效率中午降低的原因. 植物生理学报, 1994, 20(4): 360-366.
- Guo L W, Xu D Q, Shen Y G. The causes of midday decline of photosynthetic efficiency in cotton leaves under field conditions. *Acta Phytophysiologia Sinica*, 1994, 20(4): 360-366. (in Chinese)
- [11] 李少昆, 张旺锋, 马富裕, 王克如, 慕自新. 北疆超高产棉花(皮棉 2000kg/hm²)生理特性研究. 作物学报, 2000, 26(4): 508-512.
- Li S K, Zhang W F, Ma F Y, Wang K R, Mu Z X. A study on physiological characteristics of super high-yield (lint 2000kg/hm²) cotton in North Xinjiang. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(4): 508-512. (in Chinese)
- [12] Wells R. Leaf pigment and canopy photosynthetic response to early flower removal in cotton. *Crop Science*, 2001, 41: 1522-1529.
- [13] 张旺锋, 勾玲, 李蒙春, 刘克贞, 李正尚, 李正河, 蔡红梅, 郭世明. 北疆高产棉田群体光合速率及与产量关系的研究. 棉花学报, 1999, 11(4): 185-190.
- Zhang W F, Gou L, Li M C, Liu K Z, Li Z S, Li Z H, Cai H M, Guo S M. Studies on the relationship between canopy apparent photosynthesis rate and yield in cotton in North Xinjiang. *Cotton Science*, 1999, 11(4): 185-190. (in Chinese)
- [14] Wells R, Meredith W R Jr, Williford J R. Canopy photosynthesis and its relationship to plant productivity in near-isogenic cotton lines differing in leaf morphology. *Plant Physiology*, 1986, 82: 635-640.
- [15] Bondada B R, Oosterhuis D M, Norman R J, Baker W H. Canopy photosynthesis growth yield and boll ¹⁵N accumulation under nitrogen stress in cotton. *Crop Science*, 1996, 36: 127-133.
- [16] Bauer P J, Frederick J R, Bradow J M, Sadler E J, Evans D E. Canopy photosynthesis and fiber properties of normal- and late-planted cotton. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 518-523.
- [17] 马富裕, 李蒙春, 杨建荣, 季新疆, 申屠向东, 陶会俊. 花铃期不同时段水分亏缺对棉花群体光合速率及水分利用效率影响的研究. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1467-1472.
- Ma F Y, Li M C, Yang J R, Ji X J, Shentu X D, Tao H J. A study of effect of water deficit of three period during cotton anthesis on canopy apparent photosynthesis and WUE. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1467-1472. (in Chinese)
- [18] Pace P F, Cralle H T, Cothren J T, Senseman S A. Photosynthate and dry matter partitioning in short- and long-season cotton cultivars. *Crop Science*, 1999, 39: 1065-1069.
- [19] Plaut Z, Mayoral M L, Reinhold L. Effect of altered sink: source ratio on photosynthetic metabolism of source leaves. *Plant Physiology*, 1987, 85: 786-791.
- [20] 纪从亮, 俞敬忠, 刘友良, 吴云康. 棉花高产品种的源库流特点研究. 棉花学报, 2000, 12(6): 298-301.
- Ji C L, Yu J Z, Liu Y L, Wu Y K. Study on source-sink characteristics of high-yielding cotton varieties. *Cotton Science*, 2000, 12(6): 298-301. (in Chinese)
- [21] 张旺锋, 王振林, 余松烈, 李少昆, 曹连莆, 任丽彤. 膜下滴灌对新疆高产棉花群体光合作用冠层结构和产量形成的影响. 中国农业科学, 2002, 35(6): 632-637.
- Zhang W F, Wang Z L, Yu S L, Li S K, Cao L P, Ren L T. Effect of under-mulch-drip irrigation on canopy apparent photosynthesis, canopy structure and yield formation in high-yield cotton of Xinjiang. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(6): 632-637. (in Chinese)
- [22] 张旺锋, 王振林, 余松烈, 李少昆, 曹连莆, 王登伟. 氮肥对新疆高产棉花群体光合性能和产量形成的影响. 作物学报, 2002, 28(6): 789-796.
- Zhang W F, Wang Z L, Yu S L, Li S K, Cao L P, Wang D W. Effect of nitrogen on canopy photosynthesis and yield formation in high-yielding cotton of Xinjiang. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(6): 789-796. (in Chinese)
- [23] 罗宏海, 张旺锋, 赵瑞海, 韩春丽, 施敏. 种植密度对新疆膜下滴灌棉花群体光合速率、冠层结构及产量的影响. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 112-114.
- Luo H H, Zhang W F, Zhao R H, Han C L, Shi M. Effects of planting densities on canopy apparent photosynthesis, canopy structure and yield of cotton drip-irrigated under the mulch in Xinjiang. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 112-114. (in Chinese)

- [24] 董树亭, 高荣岐, 胡昌浩, 王群瑛, 王空军. 玉米花粒期群体光合性能与高产潜力研究. 作物学报, 1997, 23(3): 318-325.
Dong S T, Gao R Q, Hu C H, Wang Q Y, Wang K J. Study of canopy photosynthesis property and high yield potential after anthesis in maize. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(3): 318-325. (in Chinese)
- [25] 郭兆武, 萧浪涛, 罗孝和, 李合松, 吴成春, 康朵兰, 史 齐. 超级杂交稻“两优培九”剑叶叶鞘的光合功能. 作物学报, 2007, 33(9): 1508-1515.
Guo Z W, Xiao L T, Luo X H, Li H S, Wu C C, Kang D L, Shi Q. Photosynthetic function of the flag leaf sheath for super hybrid rice Liangyoupeijiu. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(9): 1508-1515. (in Chinese)
- [26] Malone S, Herbert D A Jr, Holsouser D L. Evaluation of the LAI-2000 plant canopy analyzer to estimate leaf area in manually defoliated soybean. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 1012-1019.
- [27] 黄振喜, 王永军, 王空军, 李登海, 赵 明, 柳京国, 董树亭, 王洪军, 王军海, 杨今胜. 产量 15000 kg·ha⁻¹ 以上夏玉米灌浆期间的光合特性. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1898-1906.
Huang Z X, Wang Y J, Wang K J, Li D H, Zhao M, Liu J G, Dong S T, Wang H J, Wang J H, Yang J S. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15000 kg·ha⁻¹. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1898-1906. (in Chinese)
- [28] 罗宏海, 张亚黎, 朱 波, 张旺锋, 何在菊, 张宏芝. 北疆杂交棉标杂 A₁ 超高产光合特征研究. 新疆农垦科技, 2007, (4): 7-9.
Luo H H, Zhang Y L, Zhu B, Zhang W F, He Z J, Zhang H Z. Study on photosynthetic characteristics of super-high-yield hybrid cotton biaoza a₁ in North Xinjiang. *State Farms Technology of Xinjiang*, 2007, (4): 7-9. (in Chinese)
- [29] 朱 伟, 王学德, 华水金, 张小全, 蒋培东. 鸡脚叶标记的三系杂交棉光合特性的研究. 中国农业科学, 2005, 38(11): 2211-2218.
Zhu W, Wang X D, Hua S J, Zhang X Q, Jiang P D. Photosynthetic properties of CMS-based hybrid cotton (*Gossypium hirsutum* L.) with okra leaf. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(11): 2211-2218. (in Chinese)
- [30] 王 强, 张其德, 卢从明, 匡廷云, 李成荃. 超高产杂交稻不同生育期的光合色素含量、净光合速率和水分利用效率. 植物生态学报, 2002, 26(6): 647-651.
Wang Q, Zhang Q D, Lu C M, Kuang T Y, Li C Q. Pigments content, net photosynthesis rate and water use efficiency of two super high-yield rice hybrids at different developmental stages. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, 26(6): 647-651. (in Chinese)
- [31] 陈炳松, 张云华, 李 霞, 焦德茂. 超级杂交稻两优培九生育后期的光合特性和同化产物的分配. 作物学报, 2002, 28(6): 777-782.
Chen B S, Zhang Y H, Li X, Jiao D M. Photosynthetic characteristic and assimilate distribution in super hybrid rice Liangyoupeijiu at late growth stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(6): 777-782. (in Chinese)
- [32] 张旺锋, 李蒙春, 张煜星, 马富裕, 李正尚, 李正河, 王立生, 郭世明, 刘克贞, 李继军. 北疆高产棉花(2250 kg 皮棉/hm²)栽培生理模式探讨. 石河子大学学报(自然科学版), 1998(增刊): 58-64.
Zhang W F, Li M C, Zhang Y X, Ma F Y, Li Z S, Li Z H, Wang L S, Guo S M, Liu K Z, Li J J. Study on cultivating physiological model of high yield cotton (lint yield 2250 kg/hm²) in North Xinjiang. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 1998(Suppl.): 58-64. (in Chinese)
- [33] 张旺锋, 勾 玲, 王振林, 李少昆, 余松烈, 曹连莆, 李伟明. 不同生态棉区棉花单铃重的变化及与气象因子关系的研究. 中国农业科学, 2002, 35(7): 872-877.
Zhang W F, Gou L, Wang Z L, Li S K, Yu S L, Cao L P, Li W M. Changes of cotton single boll weight at different eco-region and correlation with meteorological factor. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(7): 872-877. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)