种植密度对新疆高产棉花群体光合作用、冠层结构及产量形成的影响

张旺锋^{1 2} 王振林³ 余松烈³ 李少昆⁴ 房建² 童文崧²

(1 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

(2 石河子大学新疆作物高产研究中心, 石河子 832003) (3 山东农业大学农学院, 泰安 271018)

(4 中国农业科学院作物育种栽培研究所农业部作物育种重点开放实验室, 北京 100081)

摘要 在新疆气候生态条件下, 研究了种植密度对棉花 (*Gossypium hirsutum*) 群体光合作用、冠层结构和产量形成的影响, 探讨了新疆棉花高产的生理机理及进一步提高产量的途径。结果表明: 群体光合速率在盛铃期以前随密度增加明显增强, 盛铃期以后, 低密度 6 万株·hm⁻² 的群体光合速率仍为最低, 高密度 30 万株·hm⁻² 群体光合速率迅速下降, 中密度 18 万株·hm⁻² 则保持较高水平。叶面积指数的变化与群体光合速率的变化相似, 其峰值出现在盛铃期。冠层结构各指标的变化表现为, 随密度增加平均叶簇倾角变大, 株型变紧凑, 但密度过大, 群体散射辐射与直射辐射透过系数小, 冠层结构不良, 造成生育后期群体光合速率较快下降。增加密度能增加单位面积总铃数, 但密度过高削弱了棉株个体发育, 生育后期群体光合速率下降早, 造成单铃重降低。群体总光合物质累积与群体光合速率在各生育时期呈显著正相关, 籽棉产量与群体光合速率仅在盛铃期和吐絮期呈显著正相关, 生产上要实现棉花高产及超高产, 应使棉花生育前期群体光合速率稳定上升, 至盛铃期达到高峰值, 吐絮期群体光合速率保持较高水平。

关键词 棉花 光合作用 冠层结构 种植密度 高产

EFFECTS OF PLANTING DENSITY ON CANOPY PHOTOSYNTHESIS, CANOPY STRUCTURE AND YIELD FORMATION OF HIGH-YIELD COTTON IN XINJIANG, CHINA

ZHANG Wang-Feng^{1 2} WANG Zhen-Lin³ YU Song-Lie³ LI Shao-Kun⁴ FANG Jiang² and TONG Weng-Song²

(1 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(2 Research Center of Xinjiang Crop High-Yield, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

(3 College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

(4 Institute of Crop Breeding and Cultivation Key Laboratory of Crop Genetic & Breeding, Ministry of Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract Cotton (*Gossypium hirsutum*) is an important crop in the Xinjiang Province in Northwest China, and high yields of high quality cotton can be produced under irrigation in the arid, continental climate of this region. In order to increase cotton yields in Xinjiang, we studied the effects of planting density (three treatments: 60 000 plants·hm⁻², 180 000 plants·hm⁻² and 300 000 plants·hm⁻²) on canopy photosynthetic rate, canopy structure and yield formation in two cotton varieties, 'Xinluzao 6' and 'Xinluzao 7'. Our results showed that canopy photosynthetic rates increased with planting density before full boll stage. Canopy photosynthetic rates of 'Xinluzao 6' and 'Xinluzao 7' at a planting density of 300 000 plants·hm⁻² were 29.58 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹ and 26.16 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹ respectively, which was 10.4% and 6.5% higher than that of the medium density treatment of 180 000 plant·hm⁻². In later growth periods after full boll stage, the canopy photosynthetic rate was maintained at a relatively high level in the medium density treatment, remained low in the low density treatment, but decreased rapidly in the high density treatment due to the decline of the leaf area index (LAI). LAI increased with planting density before full boll stage and attained maximum LAI at full boll stage. Generally, the canopy photosynthetic rate at each growth stage was significantly correlated with LAI ($R = 0.935^* - 0.998^*$, $n = 5$) except for the 'Xinluzao 6' in later full boll stage. The mean foliage angle of inclination, an important index for describing canopy structure, increased with planting density, whereas two other indices of canopy structure, the canopy transmission coefficient for radiation penetration and canopy transmission coefficient for diffuse penetration, decreased with planting density. Very high planting den-

sities negatively impacted the canopy structure, resulting in a rapid decline of canopy photosynthetic rate. The accumulation of colonial photosynthetic product increased with an increase in planting density during the growth period. In the high density treatment, colonial photosynthetic product accumulation of 'Xinluzao 6' and 'Xinluzao 7' was $13\ 700\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $13\ 153\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, which was 1.5% and 2.0% higher than that of the medium density treatment, and 34.3% and 54.6% higher than that of the low density treatment. The allocation of photosynthetic product to flower buds and bolls was enhanced from full flower stage to later full boll stage in the medium and high density treatments. Total boll number per unit area increased with planting density. Weight per boll in the medium density planting was 5.61 g and 5.48 g in the two varieties, which was 2.6% and 11.5% heavier than in the high density treatment for the two varieties and 8.7% and 13.5% heavier than in the low density treatments. The canopy photosynthetic rate at full flower stage and boll opening stage were significantly correlated with lint yield. Therefore, the enhancement of the canopy photosynthetic rates during the full boll and opening boll stage could lead to increased of yields of lint.

Key words *Gossypium hirsutum*, Photosynthesis, Canopy structure, Planting density, High yield

组成作物产量的干物质 90% ~ 95% 来源于光合作用(Nichiporovich & Strogonova, 1960), 光合作用是形成作物产量的基础。研究作物光合作用特征及其与环境条件的关系, 对于揭示作物生长发育规律, 指导作物高产优质栽培和培育高产品种具有重要的理论和实践意义。棉花光合特性的研究, 已有大量的报道(Sharkawy *et al.*, 1965; Constabl, 1980; Karma & Weaver, 1980; Wullschlegel & Oosterhuis, 1990; 潘学标等, 1990; Pettigrew, 1994), 但大多是以单叶为对象进行研究。棉花生产是田间条件下的群体生产, 不是单纯的个体总和, 由全部植株个体的单叶光合所构成的群体光合作用系统有自己独特的群体光合作用规律(邱晓等, 1988; Peng & Kerieg, 1991)。群体光合速率能准确地描述每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(Wells *et al.*, 1986); 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(Zelitch, 1982)。随着作物产量的不断提高, 以及群体光合作用测定仪器的改进(Garrity *et al.*, 1984; 董树亭, 1988), 在大田条件下, 作物群体光合作用的研究越来越受到人们的重视(胡昌浩等, 1993; 王庆成等, 1996)。

新疆位于欧亚大陆腹地, 属典型大陆性干旱气候, 绿洲灌溉植棉, 年降雨量少, 日照充足, 热量丰富, 具有鲜明的地区特色。20 世纪 90 年代初, 新疆植棉业有了飞跃发展, 播种面积、单产水平、总产量均跃居全国第一, 成为我国最大的商品棉生产基地。新疆棉区在栽培模式上实施与内地棉区不同的“密、早、矮、膜”综合技术(胡兆璋, 1991), 与黄河流域和长江流域棉区相比, 新疆棉花栽培技术最具特色的是种植密度, 高产田密度一般在 $15 \sim 24\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 最高可达 $30\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在高产栽培中采取了“适当发展群体, 控制个体”的技术路线, 种植密度由 20

世纪 60 ~ 70 年代的 $7.5 \sim 9.0\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 发展到 80 年代中期的 $12.0 \sim 13.5\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 90 年代初期, 密度增加到 $16.5 \sim 19.5\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。近年来, 随着宽膜植棉技术的推广和种植方式的改进, 密度增加到 $22.5 \sim 25.5\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。目前南北疆正在示范推广的超高密度栽培, 密度达到 $27.0 \sim 30.0\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 密植是新疆棉花增产的主要途径, 也是我国其它棉区棉花增产的基本途径(汪若海, 1995), 然而有关种植密度对棉花群体光合物质生产影响的研究报道较少(王本宣等, 1989)。本研究在新疆气候生态和高产条件下, 开展密度对棉花群体光合作用、冠层结构及产量形成的影响, 探讨新疆棉花高产的规律, 为更高产栽培提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验概况

试验于 1998 ~ 2000 年在石河子大学新疆作物高产研究中心试验站进行, 试验地前茬棉花, 土质重壤, 含有机质 1.963% , 碱解氮 $56.65\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $15.50\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $194.67\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试棉花(*Gossypium hirsutum*)品种为新疆北疆棉区光合特性不同的两个主栽品种‘新陆早 6 号’(cv. ‘Xinluzao 6’)和‘新陆早 7 号’(cv. ‘Xinluzao 7’), 两品种在田间自然条件下主要光合特性分别表现为: 新陆早 6 号‘叶片平展且较薄, 单个叶片面积大, 单位叶面积叶绿素含量低, 光合作用光补偿点和光饱和点低; 新陆早 7 号‘叶片皱褶多且较厚, 单个叶片面积小, 单位叶面积叶绿素含量高, 光合作用光补偿点和光饱和点高(李少昆等, 1998; 王登伟等, 2000)。本试验设 3 种密度处理: 低密度 $6.0\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ (代表内地棉区种植密度)、中密度 $18.0\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ (代表新疆一般高产棉田种植密度)、高密度 $30.0\ \text{万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ (代表

新疆目前推广的高密度种植)。4月中旬播种,采用宽膜覆盖栽培,先铺膜后点播,1膜4行,行距为(60+28+58+28)cm宽窄行,随机区组排列,重复3次,小区面积为40 m²。施肥按生产上2 250 kg·hm⁻²以上皮棉产量的用肥量,播前每公顷深施油渣4 500 kg,尿素156 kg,三料磷肥225 kg作基肥,见花期灌头水前追施尿素225 kg·hm⁻²,三料磷肥75 kg·hm⁻²,二水前追施尿素150 kg·hm⁻²,生育期灌水4次,喷施缩节安化学调控4次。7月15日左右打顶,其它田间管理措施按生产上高产田进行。

1.2 测试内容和方法

在各生育时期系统测定群体光合速率、冠层结构指标等。群体光合速率(CAP)的测定参照 Garrity 等(1984)和董树亨(1988)的方法,并加以改进(马富裕等,1998)。用 GXH-305 型红外线 CO₂ 分析仪(北京分析仪器厂)在田间直接测定。测定时选择晴天光强稳定在 1 200~1 400 μmol·m⁻²·s⁻¹(北京时间 12:00~15:00,乌鲁木齐时间 10:00~13:00)时进行。测定用的同化箱长 90 cm,宽 60 cm,高度依据不同时期的植株高度而定,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,当同化箱内 CO₂ 浓度开始稳定的下降后,迅速记录测定时间内 CO₂ 浓度的变化值,每处理重复 3 次。土壤呼吸另选拔除植株后的空白点进行测定,群体光合值应加上土壤呼吸所抵消的光合值。采用 CI-110 数字式植物冠层结构分析仪(美国 CID 公司)测定冠层结构指标(李少昆等,1997),于早晚没有强烈直射光时(张立桢等,1998),将安装有鱼眼探测头的观测棒分

别定点在宽行和窄行的行间中央,调好水平,每小区测定 4~6 个点。通过 CI-110 计算机图像数字化专用软件分析后,可得到叶面积指数(LAI)、平均叶簇倾角(MFIA)、散射辐射透过系数(TCDP)、直射辐射透过系数(TCRP)等参数。冠层直射辐射透过系数与群体结构类型和测定时的太阳天顶角有关,由于每次测定在 20:00~22:00,为计算简便取本地夏季太阳天顶角出现范围下的平均值为代表,天顶角每天变化造成的误差较小(潘学标等,2000)。用 CI-203 激光叶面积仪(美国 CID 公司)测定叶片面积。

2 结果与分析

2.1 不同种植密度对不同生育时期群体光合速率的影响

对两个品种不同密度处理群体光合速率(CAP)的测定结果表明(图 1),在整个生育期内,CAP 的动态变化呈单峰型曲线;不同处理间表现为在盛铃前期 CAP 到达峰值之前,随密度的增加,CAP 明显增强,不同处理间 CAP 的差异分别达到显著水平($p < 0.05$);高峰值过后,中密度 18.0 万株·hm⁻²的 CAP 高于 30.0 万株·hm⁻²的高密度和 6.0 万株·hm⁻²的低密度;新陆早 6 号'高密度与低密度间的 CAP 在盛铃后期差异不显著,至吐絮期和盛絮期各处理的差异达显著水平($p < 0.05$);新陆早 7 号'中、高密度间差异不显著,但两处理与低密度的差异达显著水平($p < 0.05$)。不同密度 CAP 高峰值也有差异,高密度处理的峰值最高,两品种分别达到 29.58 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹ 和 26.16 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹,较

图 1 密度对不同生育期群体光合速率(CAP)的影响

Fig.1 Effect of plant densities on canopy apparent photosynthetic rate(CAP) at different growth stages

FS:盛蕾期 Full squaring stage F:开花期 Flowering stage FF:盛花期 Full flowering stage PFB:盛铃前期 Prophase full boll stage LFB:盛铃后期 Later full boll stage BO:吐絮期 Boll opening stage FBO:盛絮期 Full boll opening stage FS, F, FF, PFB, LFB, BO and FBO are 40, 55, 70, 85, 95, 110, 125 days after emergence, respectively

a: 新陆早 6 号 'Xinluzao 6' b: 新陆早 7 号 'Xinluzao 7'

18.0 万株·hm⁻²分别高出 10.4%和 6.5%。6.0 万株·hm⁻²的 CAP 在整个生育期内始终处于较低水平。在峰值出现时间上；新陆早 7 号'各处理 CAP 峰值均在盛铃前期出现；新陆早 6 号'仅高密度处理 CAP 峰值在盛铃前期出现,而中密度与低密度处理则于盛铃后期出现。

进入吐絮期和盛絮期后；新陆早 6 号'18.0 万株·hm⁻²中密度的 CAP 衰退较晚,保持着较高水平,30.0 万株·hm⁻²的高密度使 CAP 衰退提早,而 6.0 万株·hm⁻²的低密度在整个生育期内 CAP 较低,其生育后期 CAP 的衰退也较快。'新陆早 7 号'中高密度间的 CAP 接近且明显高于低密度处理。

2.2 不同种植密度对叶面积指数的影响

盛铃期以前,随密度增加,叶面积指数(LAI)随之增大,以高密度的 LAI 最高(图 2);不同密度间盛蕾期差异较小,随棉株的生长发育,高、中密度间的差异更小,两者均与低密度差异加大。不同品种间表现出一些差异；新陆早 7 号'的高密度处理 LAI 在盛铃前期达最大值,中密度与低密度在盛铃后期达最大值。'新陆早 6 号'的各密度处理均在盛铃后期达最大值。进入吐絮期,两品种均以中密度条件下的较高,这表明高密度条件下个体发育不良,群体内部条件恶化,叶片衰老和光合功能衰退加快,但密度过低,在整个生育期内 LAI 一直处于较低水平,因此,中密度有利于维持生育后期的光合面积。

对不同生育时期 CAP 与 LAI 相关分析表明,除'新陆早 6 号'在盛铃后期外,两品种各密度处理的 CAP 与 LAI 均成显著正相关($R = 0.935 \sim 0.998, n = 5$)。表明 CAP 主要受 LAI 的影响,两者之间存在着相互制约的关系。'新陆早 6 号'在盛铃后期随 LAI 增大 CAP 增加较小,可能是由于 LAI 增加到一定程

度后,冠层光截获率达到最大值,使群体内部透光恶化,下部叶片光合潜力不能充分发挥所造成的影响。

2.3 不同种植密度对冠层结构指标的影响

棉花冠层截光量与群体光合速率有很好的线形关系,而冠层的截光量与群体的大小和冠层结构有密切关系(潘学标等,2000)。平均叶簇倾斜角是反映冠层结构状况的指标之一,叶倾角为叶轴和水平面之间的夹角($0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$),叶簇倾角愈大,叶片愈呈直立状;叶簇倾角愈小,叶片愈呈水平状。群体密度不同,使叶簇倾角发生了变化,叶簇倾角的变化反过来又影响着冠层对光能的截获,进而影响棉花群体光合生产。表 1 表明,两品种在不同密度条件下,随生育进程的推移,平均叶簇倾斜角度由小变大,盛蕾期植株较小,生长空间大,叶片较平展,平均叶簇倾角小；新陆早 6 号'不同密度间平均叶簇倾角为 $18.93^{\circ} \sim 34.94^{\circ}$ (宽行与窄行平均值)；新陆早 7 号'为 $25.72^{\circ} \sim 43.28^{\circ}$,随棉株的生长发育,平均叶簇倾角变大,叶片变直立,至吐絮期'新陆早 6 号'平均叶簇倾角为 $46.69^{\circ} \sim 59.22^{\circ}$ ；新陆早 7 号'为 $59.68^{\circ} \sim 73.42^{\circ}$ 。不同密度间表现为随密度增加,平均叶簇倾角有变大的趋势。不同品种间'新陆早 7 号'平均叶簇倾角大于'新陆早 6 号',这反映出'新陆早 7 号'叶片较直立,冠层透光较好,这可能是该品种群体光合速率和叶面积指数在全生育期均呈显著正相关的原因之一。

不同生育时期群体散射辐射透过系数的变化表现为(表 2),盛蕾期植株较小,各密度处理群体散射辐射透过系数较大,特别是低密度处理群体散射辐射透过系数大,漏光损失严重;进入盛花期,棉田窄行封垄,散射辐射透过系数降低,冠层透光能力减弱;至盛铃期,中高密度条件下散射辐射透过系数下

图 2 密度对不同生育时期叶面积指数(LAI)的影响
Fig.2 Effect of plant densities on leaf area index(LAI) at different growth stages
a, b, FS, FF, PFB, LFB, BO 同图 1 See Fig. 1

表 1 不同种植密度对棉花平均叶簇倾角度(*MFA*)的影响
Table 1 Effect of different plant densities on mean foliage inclination angle(*MFA*) in different growth stages of cotton

测定时期 Measuring date	种植密度 Planting density (10 ⁴ ·hm ⁻²)	‘新陆早 6 号’ Xinluzao 6 ’		‘新陆早 7 号’ Xinluzao 7 ’	
		窄行 Narrow-row	宽行 Wide-row	窄行 Narrow-row	宽行 Wide-row
盛蕾期 Full squaring	6.0	27.27 ± 2.20	10.58 ± 2.12	35.69 ± 2.72	15.74 ± 1.21
	18.0	25.35 ± 2.98	40.23 ± 2.78	30.54 ± 2.68	55.27 ± 2.47
	30.0	15.58 ± 1.31	54.27 ± 2.41	27.00 ± 2.50	59.55 ± 3.45
盛花期 Full flowering	6.0	37.46 ± 2.78	36.09 ± 2.25	23.21 ± 2.51	47.58 ± 2.87
	18.0	24.36 ± 2.51	45.05 ± 2.74	30.50 ± 2.70	47.50 ± 3.09
	30.0	29.54 ± 2.47	49.45 ± 3.21	35.96 ± 2.89	55.84 ± 3.54
盛铃期 Full boll	6.0	30.55 ± 2.72	40.48 ± 2.20	35.97 ± 2.83	45.84 ± 3.01
	18.0	24.36 ± 2.71	67.06 ± 4.48	27.48 ± 2.54	65.05 ± 3.25
	30.0	19.55 ± 1.91	59.44 ± 2.28	29.18 ± 2.52	65.65 ± 3.15
见絮期 Boll opening	6.0	49.58 ± 3.11	43.80 ± 2.75	78.95 ± 4.41	67.88 ± 3.45
	18.0	32.53 ± 2.74	85.91 ± 4.25	58.91 ± 4.19	60.45 ± 3.53
	30.0	41.15 ± 2.67	66.45 ± 3.15	58.39 ± 3.81	72.39 ± 4.47

表 2 不同种植密度对棉花群体散射辐射(*TCDP*)和直射辐射透过(*TCRP*)系数的影响
Table 2 Effect of different densities on canopy transmission coefficient for diffuse penetration(*TCDP*) and transmission coefficient for radiation penetration(*TCRP*) in different growth stages of cotton

测定时期 Measuring date	种植密度 Planting density (10 ⁴ ·hm ⁻²)	群体散射辐射透过系数 <i>TCDP</i>				群体直射辐射透过系数 <i>TCRP</i>			
		‘新陆早 6 号’ ‘Xinluzao 6’		‘新陆早 7 号’ ‘Xinluzao 7’		‘新陆早 6 号’ ‘Xinluzao 6’		‘新陆早 7 号’ ‘Xinluzao 7’	
		窄行	宽行	窄行	宽行	窄行	宽行	窄行	宽行
		Narrow-row	Wide-row	Narrow-row	Wide-row	Narrow-row	Wide-row	Narrow-row	Wide-row
盛蕾期 Full squaring	6.0	0.640 ± 0.074	0.465 ± 0.034	0.316 ± 0.022	0.582 ± 0.036	0.705 ± 0.085	0.535 ± 0.047	0.455 ± 0.038	0.655 ± 0.061
	18.0	0.299 ± 0.025	0.477 ± 0.056	0.298 ± 0.027	0.534 ± 0.041	0.335 ± 0.032	0.505 ± 0.065	0.390 ± 0.033	0.560 ± 0.055
	30.0	0.252 ± 0.021	0.110 ± 0.021	0.146 ± 0.015	0.243 ± 0.021	0.325 ± 0.042	0.205 ± 0.033	0.155 ± 0.027	0.390 ± 0.041
盛花期 Full flowering	6.0	0.192 ± 0.019	0.381 ± 0.045	0.177 ± 0.032	0.447 ± 0.035	0.255 ± 0.015	0.275 ± 0.012	0.140 ± 0.021	0.455 ± 0.044
	18.0	0.155 ± 0.014	0.310 ± 0.022	0.150 ± 0.019	0.350 ± 0.023	0.180 ± 0.037	0.240 ± 0.041	0.205 ± 0.019	0.245 ± 0.011
	30.0	0.133 ± 0.021	0.264 ± 0.031	0.161 ± 0.028	0.272 ± 0.025	0.175 ± 0.011	0.210 ± 0.033	0.150 ± 0.021	0.190 ± 0.017
盛铃期 Full boll	6.0	0.122 ± 0.011	0.587 ± 0.056	0.216 ± 0.024	0.575 ± 0.051	0.105 ± 0.014	0.610 ± 0.051	0.305 ± 0.033	0.610 ± 0.122
	18.0	0.096 ± 0.015	0.255 ± 0.021	0.133 ± 0.018	0.367 ± 0.033	0.120 ± 0.021	0.285 ± 0.049	0.130 ± 0.021	0.435 ± 0.117
	30.0	0.068 ± 0.022	0.203 ± 0.016	0.087 ± 0.008	0.222 ± 0.021	0.065 ± 0.018	0.255 ± 0.032	0.025 ± 0.011	0.290 ± 0.059
见絮期 Boll opening	6.0	0.322 ± 0.042	0.255 ± 0.021	0.432 ± 0.021	0.532 ± 0.061	0.285 ± 0.043	0.185 ± 0.037	0.330 ± 0.045	0.585 ± 0.044
	18.0	0.271 ± 0.032	0.515 ± 0.037	0.270 ± 0.013	0.537 ± 0.044	0.170 ± 0.021	0.490 ± 0.053	0.185 ± 0.031	0.515 ± 0.031
	30.0	0.254 ± 0.021	0.371 ± 0.043	0.312 ± 0.021	0.380 ± 0.031	0.285 ± 0.013	0.350 ± 0.048	0.315 ± 0.044	0.390 ± 0.046

降到最低,冠层透光状况较差;见絮期散射辐射透过系数变大,宽行和窄行的差异变小,这可能与后期叶片脱落有关。同一生育时期不同处理间表现为随密度增大,尽管平均叶簇倾角有变大、叶片变直立趋势,但由于单位面积上植株增加较多,其散射辐射透过系数变小。

不同生育时期群体直射辐射透过系数的变化与散射辐射透过系数变化相似(表 2),表现为盛蕾期较高,盛铃期降低,至见絮期又升高。处理间表现为随密度增加,群体直射辐射透过系数降低,特别是高密度盛铃期窄行下降得更多。品种间总的趋势表现为‘新陆早 7 号’群体直射辐射透过系数大于‘新陆早 6 号’,说明前者适宜密植。高密度条件下,虽然平均叶簇倾角变小,但密度过大,将引起冠层内光照恶化,植株中下部的叶片由于照光不足,呼吸消耗作

用上升,最终造成群体光合速率的降低。盛铃期测定各处理间群体呼吸速率;‘新陆早 6 号’高、中、低密度间分别为 12.98 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹、10.25 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹、9.03 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹;因此,高密度条件下‘新陆早 6 号’在盛铃期群体光合速率的急剧下降与群体呼吸速率的上升有关(张旺锋, 2001)。呼吸速率的上升可能与 *LAI* 大、叶倾角较小,影响了冠层内部的透光,群体光合作用下降。低密度条件下棉花叶倾角变小,但由于株数少,群体散射辐射透过系数和直射辐射透过系数较大,造成漏光损失严重,影响了群体光合作用。

2.4 不同种植密度对群体光合物质积累与分配的影响

不同密度条件下群体总光合物质积累量(图 3)

表现为随密度增加而增加,盛花期以前,高密度群体总光合物质积累量较中密度与低密度处理明显高,进入盛花期以后,中密度处理光合物质的积累速率加快,至吐絮期和收获后,高密度处理群体光合物质积累量最高,但与中密度间差异不大。可以看出,由于棉株间的竞争生长,群体内部的自动调节及栽培措施的调控,至收获期高、中密度群体光合物质积累量相近;而 6.0 万株·hm⁻²低密度光合物质积累量始终处于很低水平。

对各生育阶段群体光合物质积累量与 CAP 的相关分析表明,某一生育时期 CAP 均与同期群体光合物质积累量呈显著正相关($R = 0.925 \sim 0.998, n = 5$),表明 CAP 越高,光合物质累积越多,所以适当增加密度,可增加 CAP,保证有足够的群体光合物质积累量,是实现棉花高产的基础之一。

不同处理间群体光合物质分配动态(图 4)表现为:‘新陆早 7 号’在盛花期群体总光合物质分配到蕾铃的比例为 22.2%~26.2%,高于‘新陆早 6 号’(16.2%~22.2%)特别是 6.0 万株·hm⁻²低密度表现明显,前期有较多的光合产物向蕾铃分配;但‘新

陆早 6 号’中高密度从盛花期到盛铃后期分配到生殖器官的光合物质比例增加较快,至吐絮期仅略低于‘新陆早 7 号’。收获期测定‘新陆早 6 号’达到 2 250 kg·hm⁻²产量水平条件下,棉花营养器官与生殖器官的比例为 1:1.6,经济系数为 0.45,这较新疆一般棉田产量以及全国其它棉区 0.35~0.40 的经济系数高,因此要取得棉花高产不但要增加总光合物质的积累量,而且要合理解决分配问题,维持器官之间的正常比例关系。

2.5 不同种植密度对产量及产量结构的影响

两个品种不同密度处理,棉花皮棉产量以中密度条件下的最高,其中‘新陆早 6 号’皮棉产量达 2 258.4 kg·hm⁻²,其次为高密度处理,低密度条件下的产量最低(表 3),表明密度过高或过低均难以获得高产。进一步考察其产量构成因素,单株铃数随密度的增加而明显减少,但单位面积上的总铃数显著增加,30.0 万株·hm⁻²高密度单位面积总铃数最高,但铃重有所降低。这表明密度过大,植株个体生长受到抑制,生育后期群体光合速率下降快,影响了光合物质的生产及向棉铃的运输。然而密度过低

图 3 不同种植密度对群体光合物质积累量的影响
Fig.3 Effect of different plant densities on accumulation of colonial photosynthetic product at different growth stages of cotton
a, b, FS, FF, PFB, LFB, BO 同图 1 See Fig. 1 HS: 收获期 Harvest stage

图 4 密度对群体光合物质在生殖器官分配比率的影响
Fig.4 Effect of plant densities on reproduction to total photosynthate ratio at different growth stages
a, b, FS, FF, PFB, LFB, BO 同图 1 See Fig. 1

表 3 不同密度条件下棉花产量及产量构成因素的变化
Table 3 Yield and yield components at different plant densities of cotton

品 种 Varieties	种植密度 Planting density ($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	单株铃数 Boll numbers per plant	总铃数 Boll numbers per unit area ($\text{boll} \cdot \text{hm}^{-2}$)	单铃重 Boll weight (g)	衣分 Lint percentage (%)	实收籽棉产量 Seed cotton yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	折合皮棉 产量 Lint yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
‘新陆早 6 号’ ‘Xinluzao 6’	30.0	4.16	1 097 804	5.03 ^b	41.0	5 101.2 ^B	2 091.5
	18.0	7.55	1 048 695	5.61 ^a	41.0	5 508.3 ^A	2 258.4
	6.0	13.85	769 506	5.47 ^{ab}	41.0	4 305.8 ^C	1 765.4
‘新陆早 7 号’ ‘Xinluzao 7’	30.0	4.43	1 169 055	4.83 ^b	39.0	5 124.4 ^B	1 998.5
	18.0	7.65	1 062 585	5.48 ^a	39.0	5 451.8 ^A	2 126.2
	6.0	14.01	778 395	5.04 ^{ab}	39.0	4 005.0 ^C	1 561.9

表中不同大、小写字母分别代表 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ The different capital and small letters stand for $p < 0.01$ and $p < 0.05$

($6.0 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$) ,对植株个体而言 ,其光照、土壤养分等条件较好 ,个体发育健壮 ,但由于在新疆干旱气候生态条件及“矮、密、早、膜”模式栽培的管理下 ,低密度棉花始终未能形成正常的群体冠层 ,在整个生育期群体光合速率较低 ,使铃重较中密度的轻。

对各处理群体光合速率与产量及产量构成因子进行相关分析表明 ;新陆早 7 号 ‘在各生育时期群体光合速率与单位面积总铃数的相关达显著或极显著水平 ;新陆早 6 号 ‘在见花期至盛花结铃期相关达显著水平 ,表明增加密度 ,提高了群体光合速率 ,能增加单位面积总铃数。然而在本试验条件下 ,由于密度差异较大 ,虽然高密度叶面积指数高 ,提高了群体光合速率 ,但削弱了个体发育 ,所以单铃重和群体光合速率在生育前期为负相关 ,仅在生育后期呈正相关 ,但不显著。群体光合速率与籽棉产量的关系表现为 ;新陆早 7 号 ‘在盛花结铃期以后达显著 ,而‘新陆早 6 号 ‘在盛铃期以后达显著 ,这主要是由于不同处理条件下光合产物的分配不同所致 ;在盛铃期和吐絮期 ,群体光合速率与籽棉产量呈显著正相关 ,说明盛铃期以后的群体光合同化量决定着棉花产量的高低。在生产上要实现棉花高产及超高产 ,应使棉花生育前期群体光合速率稳定上升 ,至盛铃期达到高峰值 ,吐絮期群体光合速率保持较高水平。

3 结论与讨论

种植密度对棉花群体光合作用具有明显影响 ,在盛铃期以前 ,随种植密度的增加 ,叶面积指数增大 ,冠层对光能的截获率增加 ,群体光合速率明显增强。至盛铃期群体光合速率达到最大值以后 , $30 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 高密度由于单叶光合速率和叶面积指数的明显下降 ,群体光合速率衰退较早 ,这时 $18 \text{ 万株} \cdot$

hm^{-2} 中密度群体光合速率较高 ,皮棉产量也最高。这与盛铃期 ~ 吐絮期中密度叶片光合速率下降较为平稳、叶面积指数适宜、冠层结构优良 ,有较高的群体光合速率有关。 $18 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 中密度生育后期群体光合速率高 ,光合物质累积多 ,保证了较多的光合产物分配到经济产量器官中。

密度主要是解决群体与个体这一对矛盾 ,密度过低($6 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$) ,虽然单个植株生长条件较好 ,个体得到发展 ,但群体不足 ,群体光合速率低 ,光合物质累积少 ,产量水平低 ;密度过高($30 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$) ,群体过大 ,虽然生育前期有较高的群体光合速率 ,光合物质累积多 ,但个体生长受到限制 ,发育不良 ,对环境条件响应敏感 ,生育后期叶片光合速率衰退快 ,叶面积指数下降早 ,植株较早衰老 ,也难以获得高产。合理密植能协调好群体与个体的关系 ,使个体发育健壮而不早衰 ,又保证了一定数量的群体 ,单位面积株数、单株结铃数、单铃重得到协调发展。在本试验条件下 ,中密度生育后期群体光合速率高 ,达到了较高产量水平 ,就是在现有栽培模式下能协调好群体和个体的关系。因此通过合理密植 ,协调群体与个体的关系 ,既保证有足够群体 ,又培育健壮个体 ,确保盛铃期至吐絮期有较高的群体光合速率 ,才能实现棉花高产。

密度对棉花群体光合速率的调控主要表现在生育前期 ,高密度条件下 ,叶面积指数上升快 ,群体光合速率较早增强 ,生育前期光合物质累积多。因此在新疆一些热量条件较差、生长期较短的特早熟棉区 ,采用高密度栽培 ,通过喷施植物生长调节剂 ,采取化学调控棉株生长 ,控制群体的发展 ,保证足够的群体光合物质累积 ,在此基础上实现棉花早熟 ,达到一定的产量水平。但将高密度栽培向新疆高产区 (中早熟和早熟棉区)推广 ,还需要深入研究高密度

栽培引起的一系列问题, 否则在现有栽培措施下, 仅通过增加种植密度是难以实现棉花高产优质高效的。

参 考 文 献

- Constabl, G. A. 1980. Effect of leaf position expansion and age on photosynthesis transpiration and water use efficiency of cotton. *Australia Journal of Plant Physiology*, **7**: 89 ~ 100.
- Dong, S. T. (董树亭). 1988. Research and determining method of crop canopy apparent photosynthesis under field condition. *Tillage and Cultivation (耕作与栽培)*, **8**: 62 ~ 64. (in Chinese)
- Garrrity, D. P., Y. S. Charles & D. G. Watts. 1984. Rapidly determining sorghum canopy photosynthetic rates with a mobile field chamber. *Agronomy Journal*, **76**: 163 ~ 166.
- Hu, C. H. (胡昌浩), S. T. Dong (董树亭), R. Q. Gao (高荣岐) & Q. Y. Wang (王群瑛). 1993. Studies on the relationship between canopy apparent photosynthesis rate and grain yield in high yielding summer corn (*Zea mays* L.). *Acta Agronomica Sinica (作物学报)*, **19**: 63 ~ 69. (in Chinese with English abstract)
- Hu, Z. Z. (胡兆璋). 1991. Planting sciences of 2 250 kg lint/ha about high yield cotton. *China Cotton (中国棉花)*, **18**: 5 ~ 6. (in Chinese)
- Karma, E. & J. B. Weaver. 1980. Dry-matter production, yield, photosynthesis, chlorophyll content and specific leaf weight of cotton in relation to leaf shape and color. *Journal of Agriculture Science*, **94**: 281 ~ 286.
- Li, S. K. (李少昆) & C. T. Wang (王崇桃). 1997. The methods of obtaining and expressing information of crop plant shape and population structure. *Journal of Shihezi University (Natural Science Edition) (石河子大学学报 (自然科学版))*, **1**: 250 ~ 256. (in Chinese with English abstract)
- Li, S. K. (李少昆), F. Y. Ma (马富裕), M. C. Li (李蒙春), J. Yan (闫洁), Z. X. Mu (慕自新) & W. F. Zhang (张旺锋). 1998. Comparison of photosynthesis characteristics between 'Xinluzao 4' and 'Xinluzao 7'. *Xinjiang Agricultural Science (新疆农业科学)*, **30**: 113 ~ 117. (in Chinese)
- Ma, F. Y. (马富裕) & W. F. Zhang (张旺锋). 1998. Research and determining method of cotton canopy apparent photosynthesis. *Journal of Shihezi University (Natural Science Edition) (石河子大学学报 (自然科学版))*, **2**: 46 ~ 50. (in Chinese with English abstract)
- Nichiporovich, A. A. & L. A. Strogonova (translated by Xi, Y. L. (奚元龄), H. Z. Yin (殷宏章) & Z. W. Wang (汪宗文)). 1960. Photosynthesis and problems of crop yield. In: Nichiporovich, A. A. ed. *The physiological basis of variation in crop yield*. Beijing: Science Press. 29 ~ 50. (in Chinese)
- Pan, X. B. (潘学标), M. X. Liu (刘明孝) & G. Z. Jiang (蒋国柱). 1990. Meteorological and genotypical controls of cotton photosynthesis. *Acta Agronomica Sinica (作物学报)*, **16**: 317 ~ 322. (in Chinese with English abstract)
- Pan, X. B. (潘学标), Y. Q. Wang (王延琴) & X. W. Cui (崔秀稳). 2000. Studies on relationships between cotton population composition and transfer characteristic of PAR. *Acta Agronomica Sinica (作物学报)*, **26**: 333 ~ 340. (in Chinese with English abstract)
- Peng, S. B. & D. R. Kerieg. 1991. Single leaf and canopy photosynthesis response to plant age in cotton. *Agronomy Journal*, **83**: 704 ~ 708.
- Pettigrew, W. T. 1994. Leaf gas exchange parameters among cotton genotypes. *Crop Science*, **34**: 700 ~ 705.
- Qiu, X. (邱晓) & Y. Bei (裴炎). 1988. Study on canopy photosynthesis characteristics of cotton. *Acta Agronomica Sinica (作物学报)*, **14**: 315 ~ 320. (in Chinese)
- Sharkawy, M. E., J. Hesketh & H. Muramoto. 1965. Leaf photosynthetic rates and other growth characteristics among 26 species of *Gossypium*. *Crop Science*, **5**: 173 ~ 175.
- Wang, B. X. (王本宣) & B. S. Chen (陈布圣). 1989. Photosynthetic rates of cotton population under different rates of nitrogen application and plant densities. *Journal of Huazhong Agricultural University (华中农业大学学报)*, **8**: 213 ~ 217. (in Chinese with English abstract)
- Wang, Q. C. (王庆成) & Z. X. Wang (王忠孝). 1996. Advances in crop canopy photosynthesis research. In: Zou, Q. (邹琦) & X. C. Wang (王学臣) eds. *Advances in physiology research for crop high yield and high efficiency*. Beijing: Science Press. 25 ~ 34. (in Chinese)
- Wang, D. W. (王登伟) & C. Y. Huang (黄春燕). 2000. Study on cotton canopy photosynthesis characteristics in the north of Xinjiang. *Journal of Xinjiang Agricultural University (新疆农业大学学报)*, **23**: 66 ~ 70. (in Chinese with English abstract)
- Wang, R. H. (汪若海). 1995. The gateway of basic sciences about cotton increasing yield is planting density in China. *China Cotton (中国棉花)*, **22**: 2 ~ 3. (in Chinese)
- Wells, R., W. R. Meredith & J. R. Williford. 1986. Canopy photosynthesis and its relationship to plant productivity in nearisogenic cotton lines differing in leaf morphology. *Plant Physiology*, **82**: 635 ~ 640.
- Wullschlegel, S. D. & D. M. Oosterhuis. 1990. Photosynthesis of individual field-grown leaves during ontogeny. *Photosynthesis Research*, **23**: 163 ~ 170.
- Zelitch, I. 1982. The close relationship between net photosynthesis and crop yield. *BioScience*, **32**: 706 ~ 802.
- Zhang, L. Z. (张立桢), X. B. Pan (潘学标), Y. B. Li (李亚兵), Y. Q. Wang (王延琴), C. Peter & H. J. Li (李红娟). 1998. The canopy factor image analysis on different cotton masses. *Acta Gossypii Sinica (棉花学报)*, **10**: 140 ~ 145. (in Chinese)
- Zhang, W. F. (张旺锋). 2001. Study on photosynthesis characteristics and its regulation of high-yield cotton in Xinjiang. Ph.D. dissertation of Shandong Agricultural University. 51 ~ 52. (in Chinese with English abstract)