植物营养与肥料学报 2015,21(4):951-961 doi: 10.11674/zwyf.2015.0414
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

施氮量与播种期对棉花产量和品质及棉铃对位叶光合产物的影响

刘敬然[1,2], 赵文青[1], 周治国[1*], 董合林[2], 赵新华[2], 孟亚利[1]
(1 南京农业大学农学院,农业部南方作物生理生态重点开放实验室,江苏南京 210095;
2 中国农业科学院棉花研究所,棉花生物学国家重点实验室,河南安阳 455000)

摘要:【目的】本研究旨在揭示施氮量调控不同播种期棉铃对位叶光合产物形成与运转的生理机制,以期为棉花的合理氮肥运筹提供理论依据。**【方法】**试验于2005和2007年在中国农业科学院棉花研究所(河南安阳,黄河流域黄淮棉区)进行,以科棉1号和美棉33B品种为材料,设置大田不同播种期(4月25日和5月25日)和不同施氮量[低氮 N 0 kg/hm^2(N_0)、适氮 N 240 kg/hm^2(N_{240})、高氮 N 480 kg/hm^2(N_{480})]处理,研究施氮量对不同播种期棉花产量和品质及棉铃对位叶光合产物的影响。**【结果】**1)4月25日播种条件下,随施氮量的增加棉铃对位叶中蔗糖含量先升高后降低,淀粉含量增加;随播种期的推迟,N_{240}、N_{480}处理下的棉铃对位叶蔗糖和淀粉含量差异不明显,但均显著高于N_0处理;花后24~45 d,棉铃对位叶中蔗糖含量与叶氮浓度呈显著正相关,且相关系数随花后天数的增加而降低;花后17~24 d,蔗糖转化量与叶氮浓度呈显著负相关,至花后31~52 d,反而呈显著正相关($P<0.01$)。表明棉铃对位叶中适宜叶氮浓度有利于碳水化合物的累积。2)4月25日播种条件下,N_0、N_{480}处理对棉花单株铃数、铃重和皮棉产量影响为负效应,对纤维长度和麦克隆值影响较小;晚播低温条件下,N_{480}处理的棉花铃重、皮棉产量、纤维比强度均有所提高,麦克隆值得以优化。因此,施氮量与播种期对纤维比强度和麦克隆值的影响存在补偿效应,晚播棉花增加施氮量可减小因低温而造成的纤维比强度降低的幅度,优化麦克隆值。**【结论】**本试验条件下,播种期(温度)和施氮量对棉铃对位叶光合产物含量、棉花产量和品质存在互作效应,其主导因素是播种期(温度),施氮量对其有补偿效应。随播种期的推迟,施氮量 N 240 kg/hm^2 时棉花单铃重、产量及纤维品质降低的主要原因是晚播低温使棉铃对位叶中的光合产物(蔗糖和淀粉含量)增加,抑制了光合产物向棉铃及纤维的运输。晚播低温条件下,适量追施氮肥可调节棉铃对位叶中的氮浓度并提高光合产物再利用的能力,促进棉花单铃的形成,降低棉纤维比强度的下降幅度,优化麦克隆值。

关键词: 棉花(*Gossypium hirsutum* L.); 棉铃对位叶; 播种期; 施氮量; 光合产物; 产量和品质
中图分类号: S562.062.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-0951-011

Effects of nitrogen rates and planting dates on yield, quality and photosynthate contents in the subtending leaves of cotton boll

LIU Jing-ran[1,2], ZHAO Wen-qing[1], ZHOU Zhi-guo[1*], DONG He-lin[2], ZHAO Xin-hua[2], MENG Ya-li[1]
(*1 College of Agriculture, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology & Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture, Nanjing 210095, China; 2 Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Cotton Biology, Anyang, Henan 455000, China*)

Abstract:【Objectives】The aim for this study was to elucidate physiological mechanism on photosynthate synthesis and transport of subtending leaves of cotton boll (SLCB) under cool temperature for nitrogen fertilizer, and provide theoretical support for reasonable nitrogen application.**【Methods】**To study effect of nitrogen rates on photosynthate contents and nitrogen concentrations in subtending leaves of cotton boll (SLCB) and their relationship to cotton yield and quality under different planting dates, a field experiment is conducted with two cotton cultivars, Kemian 1

收稿日期: 2014-05-23 **接受日期:** 2014-07-19 **网络出版日期:** 2015-06-04
基金项目: 农业部公益性行业科研专项计划(201203096);国家自然科学基金(31171487);江苏省三新工程[SXGC(2013)334]项目资助。
作者简介: 刘敬然(1986—),女,河北石家庄人,博士,助理研究员,主要从事植物营养与分子生物学研究。
Tel: 0372-2562225, E-mail: liujingran_66@163.com。 * 通信作者 Tel: 025-84396813, E-mail: giscott@njau.edu.cn

and NuCOTN 33B, in the Yellow River Valley (Anyang), China. The cotton seeds were sowed on 25-Apr and 25-May in 2005 and 2007, which could result in different growth temperatures for the boll and its SLCB at the same fruiting branches, and three N levels, N 0, 240 and 480 kg/hm^2, standing for low, medium and high nitrogen level (N_0, N_{240} and N_{480}), were applied at the flowering-boll development stage. 【**Results**】1) The sucrose contents in the SLCB have a single trend following increasing nitrogen rates, and the starch contents in the SLCB are increased in the 25-Apr planting date. With the delayed planting date, the differences of the sucrose and starch contents between N_{240} and N_{480} are non-significant, but their contents are significantly higher than those of N_0. In the present research, the sucrose content of the SLCB at 24-45 days after anthesis (DAA) has a significantly positive correlation with nitrogen concentration, and the correlation coefficient is decreased with the increase of DAA. In addition, the transport capacity of sucrose (Tn) has a significantly negative correlation with the nitrogen concentration at 17-24 DAA, and has a positive correlation with the nitrogen concentration at 31-52 DAA ($P < 0.01$). These results indicate that an optimal leaf nitrogen concentration is favorable for carbon accumulation and export. 2) In the 25-Apr planting date, boll number, the boll weight and lint yield are decreased in N_0 and N_{480}, and non-significant differences are observed in the two treatments. However, in the late planting date of 25-May, the boll weight and lint yield in the treatment of N_{480} is improved as well as fiber strength, and micronaire values is optimized, thus suggesting that nitrogen application has a compensatory effect on cool temperature due to late planting. 【**Conclusions**】In this study, there is an interaction on cool temperature due to the late planting and nitrogen application for carbohydrate, cotton yield and quality. The planting date is the dominant factor, and nitrogen fertilizer has a compensatory effect on cool temperature. With the delayed planting date, the boll weight, lint yield and fiber quality under the treatment of N 240 kg/hm^2 are declined, which is mainly due that sufficient non-structural carbohydrates (such as sucrose, hexose and starch) are stored in the SLCB, and carbohydrate might not be exported efficiently to cotton boll. Through increasing the nitrogen application, the decreased degree of fiber strength is less and the micronaire value is optimized, mainly due to the regulated nitrogen concentration and the improved recycling capacity of carbohydrate.

Key words: cotton (*Gossypium hirsutum* L.); subtending leaves of cotton boll; planting date; nitrogen rate; photosynthate; yield and quality

棉铃干物质(约60%～87%)的主要来源是棉铃对位叶[1-3],其同化物输出与分配是否协调是决定棉花对位蕾铃能否发育成长的关键。通常转 *Bt* 基因棉进入盛花期后源器官的供应能力不足导致库源关系失调[4],使其在生长中后期过早衰老死亡。

温度是影响棉铃发育与纤维品质形成的主要生态因子,花铃期低温对棉花产量与纤维品质的影响尤为明显[5-6]。研究表明,晚播低温条件下,棉铃对位叶中净光合速率和磷酸蔗糖合成酶活性较低,蔗糖转化率下降,导致铃重降低[7],进而引起棉花产量和品质下降。

施氮是调控棉花产量形成的重要栽培措施之一[8]。研究表明,施氮量过高或过低均会造成叶片 CO_2 同化能力降低,光合产物的积累与运输受阻,影响纤维比强度的形成[9-10]。适量追加氮肥可改善棉花叶片的光合性能[11];氮不足可导致棉花衰老进程的加剧[12]和抵抗外界胁迫能力的降低,显著减少光合产物在叶片的分配,进而导致棉花产量和品质下降[13]。

温度和氮素作为影响棉花生长的重要因子,其协同互作会影响棉花的产量和品质。赵文青等研究发现,在低温下增加施氮量可减小因低温而造成的纤维长度和比强度降低的幅度[14-15],但很少研究两个因子的互作效应对棉铃对位叶光合产物形成与分配的影响。本文基于大田分期播种试验,研究施氮量对不同播种期棉铃对位叶光合产物形成与运转的影响,揭示施氮量调控不同播种期棉铃对位叶光合产物形成与运转的生理机制,以期为棉花的合理氮肥运筹提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2005年和2007年在中国农业科学院棉花研究所(河南安阳,114°13′E,36°04′N,黄河流域

黄淮棉区)进行,供试品种为科棉 1 号(Kemian 1,低温敏感性品种)和美棉 33B(NuCOTN 33B,低温适度敏感性品种)。供试土壤为沙壤土,两年供试土壤(0—20 cm)分别含有机质 19.7、14.7 g/kg,全氮 0.94、0.94 g/kg,速效氮 57.8、39.3 mg/kg,速效磷 23.6、25.6 mg/kg,速效钾 71.2、76.3 mg/kg。

试验设播种期和施氮量两个处理因子。采用分期播种以形成棉铃发育期温度差异的方法,播种期设置为适宜播种期(4 月 25 日)和晚播(5 月 25 日),采用直播。4 月 25 日和 5 月 25 日播种的棉花,其棉铃发育期的日均最低温以及大于 15℃ 总积温差异较大(表 1),达到了设计要求。

表 1　花铃期不同播种期棉铃发育期的气象条件

Table 1　Weather factors at the boll development period with different planting dates

年份 Year	播种期 Planting date	开花日期 Anthesis date	吐絮日期 Boll opening date	日均最低温(℃) MDT_{min}	>15℃ 总积温(℃) TAT
2005	25-Apr	25-Jul	14-Sep	19.3	503.78
	25-May	25-Aug	13-Oct	14.9	272.08
2007	25-Apr	30-Jul	17-Sep	19.1	490.55
	25-May	25-Aug	13-Oct	15.0	276.07

注(Note): 所用气象资料由安阳气象局提供 Weather data in Anyang were provided by Anyang meteorological information center. MDT_{min}—Daily minimum temperature; >15℃ TAT—Total accumulated temperature; TAT = (max. temp. + min. temp.)/2 −15℃.

根据薛晓萍等[16]认为施氮 N 240 kg/hm² 是棉花高产的适宜施氮量,本试验设置 3 个施氮量水平,即低氮,N 0 kg/hm² (N_0);适氮,N 240 kg/hm² (N_{240});高氮,N 480 kg/hm² (N_{480})。试验小区面积为 15 m × 4 m,行株距 100 cm × 25 cm,每处理 3 次重复,随机区组排列。氮肥为尿素,按基施 50%、花铃肥 50% 比例施入,基肥于移栽前施用,花铃肥在始花期(7 月 15 日)追施,追肥采用穴施法。田间其他管理均按高产栽培要求进行。

待棉花开花后,对棉株第 7 ~ 9 果枝的第 1、2 果节当日白花挂牌标记,在花后 5、10、17、24、31、38、45、52 天上午 9:00 ~ 10:00 取生长发育一致的棉铃对位叶 10 片(2007 年从花后 10 d 开始每隔 7 d),将叶片洗净擦干后,用干净的剪刀去除叶片样品的主脉和边缘,于 105℃ 杀青 30 min,烘干称重,粉碎后保存,用于测定物质含量。待标记棉铃开始吐絮时,每个小区收取生长一致的棉铃 20 个,风干后轧花测定纤维品质和棉子品质。

1.2　测定项目与方法

1.2.1 蔗糖和淀粉含量　取烘干棉铃对位叶 0.1 g 放入 10 mL 离心管,加 80% 酒精 5 mL 后 80℃ 提取 30 min,然后在于 4000 r/min 离心 5 min,将上清液倾入 25 mL 容量瓶。重复提取 2 次,收集上清液于容量瓶,合并离心液于 25 mL 容量瓶中,用蒸馏水定容后转至 −80℃ 冰箱保存,用以测定碳水化合物(蔗糖和淀粉)含量[17]。蔗糖转化量用 $Tn = (C_{n-4} - C_{n+3})/7$ 公式计算[18]。其中,n 表示开花后的天数,Tn 表示第 n 天的单叶蔗糖转化量,C_{n-4} 表示第 n −4 d 的单叶蔗糖积累量,C_{n+3} 表示第 n +3 d 的单叶蔗糖积累量。

1.2.2 棉铃对位叶氮浓度　粉碎已烘干的棉铃对位叶,过 0.38 mm 筛,用凯氏定氮法测定叶片全氮含量[19],并计算其氮浓度(%)。

1.2.3 棉纤维品质性状　棉纤维品质指标在中国农业科学院棉花研究所农业部棉花纤维检测中心用 HVI 900 仪器测定,并用 HVICC 校准。

1.2.4 棉子品质性状　采用 SoxtecTM Avanti 2050 索式自动浸提系统(SoxtecTM Avanti 2050)测定棉子脂肪含量[20];采用凯氏定氮法测定棉子全氮含量[19],棉子蛋白质含量 = 6.25 × 全氮含量。

1.3　数据处理

采用 Origin 8.1 对试验数据进行处理及作图,SPSS 17.0 统计分析软件进行方差分析,LSD 法检验显著性。

2　结果与分析

2.1　施氮量与播种期对棉铃对位叶氮浓度的影响

随花后天数的增加,棉铃对位叶中氮浓度呈降低趋势;随施氮增加和播种期推迟,棉铃对位叶氮浓度增加(图 1),其关系可用幂函数方程 $Y_N = \alpha \times$

$DAA^{-\beta}$拟合，式中：Y_N 为棉铃对位叶氮浓度（%），DAA 为花后天数（d），α、β 为参数。各处理拟合度均达极显著水平（表2）。随施氮量的增加和播种期推迟，叶氮浓度下降速率（β）降低。品种间比较，美棉33B棉铃对位叶的氮浓度稍高于科棉1号。

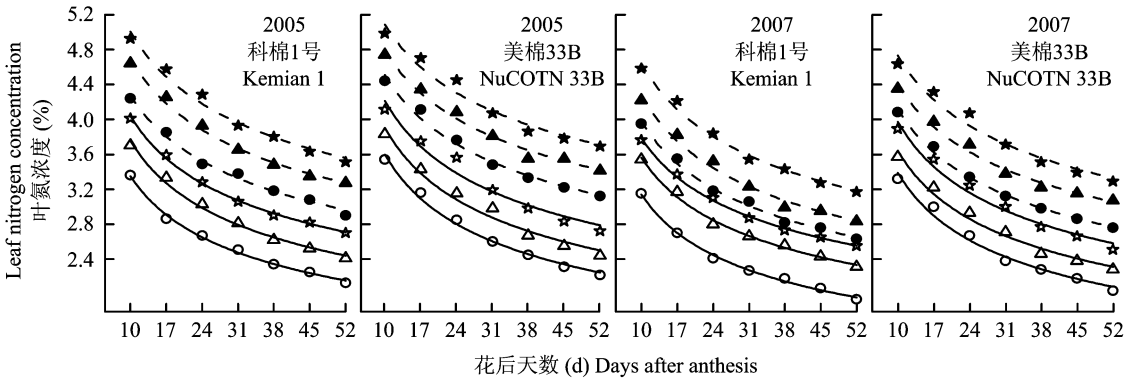

图1 棉铃对位叶氮浓度对氮素的响应

Fig. 1 Effect of N rates on nitrogen concentration in the subtending leaves of cotton boll

［注（Note）：空心符号表示4月25日各处理 Hollow symbol indicate in 25-Apr，○— N0 kg/hm²；△—N 240 kg/hm²；☆—N 480 kg/hm².
实心符号表示5月25日各处理 Solid symbol indicate in 25-May，●—N 0 kg/hm²；▲—N 240 kg/hm²；★—N 480 kg/hm².］

表2 施氮量与播种期对棉铃对位叶氮浓度变化特征的影响

Table 2 Effect of N rates on changing characteristics of nitrogen concentration in the subtending leaves of cotton with different planting dates

品种 Cultivar	播种期 Planting date	施氮量 N rate (kg/hm²)	2005 方程 Equation	2005 R^2	2007 方程 Equation	2007 R^2
科棉1号 Kemian 1	25-Apr	0	$Y_N = 6.19 \times DAA^{-0.27}$	0.995**	$Y_N = 6.05 \times DAA^{-0.28}$	0.996**
		240	$Y_N = 6.84 \times DAA^{-0.26}$	0.990**	$Y_N = 6.42 \times DAA^{-0.26}$	0.992**
		480	$Y_N = 7.03 \times DAA^{-0.24}$	0.997**	$Y_N = 6.55 \times DAA^{-0.24}$	0.996**
	25-May	0	$Y_N = 7.13 \times DAA^{-0.22}$	0.989**	$Y_N = 7.03 \times DAA^{-0.25}$	0.991**
		240	$Y_N = 7.77 \times DAA^{-0.22}$	0.990**	$Y_N = 7.58 \times DAA^{-0.25}$	0.984**
		480	$Y_N = 8.06 \times DAA^{-0.21}$	0.978**	$Y_N = 7.85 \times DAA^{-0.23}$	0.987**
美棉33B NuCOTN 33B	25-Apr	0	$Y_N = 6.94 \times DAA^{-0.29}$	0.990**	$Y_N = 6.68 \times DAA^{-0.29}$	0.980**
		240	$Y_N = 7.26 \times DAA^{-0.27}$	0.975**	$Y_N = 6.86 \times DAA^{-0.27}$	0.980**
		480	$Y_N = 7.49 \times DAA^{-0.25}$	0.959**	$Y_N = 7.25 \times DAA^{-0.26}$	0.977**
	25-May	0	$Y_N = 7.49 \times DAA^{-0.22}$	0.984**	$Y_N = 7.17 \times DAA^{-0.24}$	0.995**
		240	$Y_N = 7.65 \times DAA^{-0.20}$	0.983**	$Y_N = 7.31 \times DAA^{-0.22}$	0.984**
		480	$Y_N = 7.90 \times DAA^{-0.19}$	0.957**	$Y_N = 7.72 \times DAA^{-0.21}$	0.965**

注（Note）：Y_N（%）— 棉铃对位叶氮浓度 N concentration of subtending leaves；DAA（d）—花后天数 Days after anthesis. ** — 方程决定系数在0.01水平上显著 Significant difference at the 0.01 probability level（$n = 7$，$R^2_{0.01} = 0.7653$）.

2.2 施氮量与播种期对棉铃对位叶光合产物含量的影响及与叶氮浓度的关系

2.2.1 光合产物含量 从图2可以看出，棉铃对位叶中蔗糖含量随花后天数的增加而降低，前期降低幅度大于后期。随施氮量的增加，蔗糖含量呈先增加后降低的趋势；与适宜播种期相比，推迟播种期（5月25日，2005、2007年棉铃发育期的日均最低温 MDT_{min} 约为15℃）蔗糖含量有增加趋势，且棉铃

对位叶蔗糖含量由下降趋势变为单峰变化。与 N_{240} 相比,N_{480} 处理的棉铃对位叶蔗糖含量在晚播低温条件下差异较 N_0 处理小。说明晚播低温条件下,增加施氮量可促进棉铃对位叶中蔗糖的运输。年际间和品种间的变化趋势一致。

棉铃对位叶中淀粉含量随花后天数的增加呈单峰曲线,峰值出现在花后 38 ～45 d(图 3),随施氮量增加和播种期推迟,淀粉含量略有增加,且晚播低

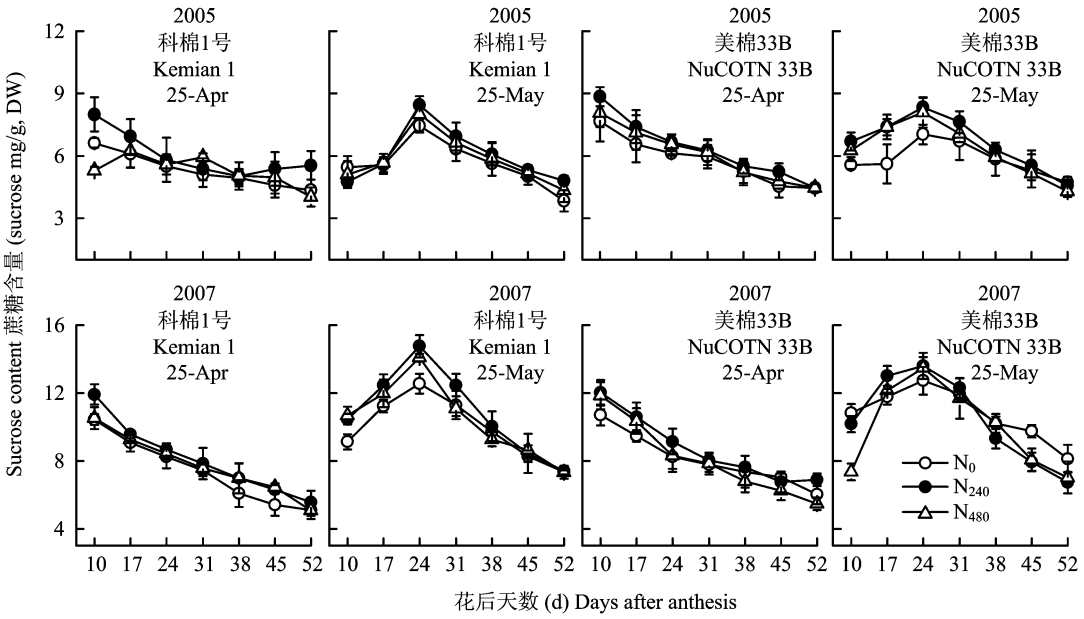

图 2　施氮量与播种期对棉铃对位叶中蔗糖含量的影响

Fig. 2　Effect of N rates on sucrose content in the subtending leaves of cotton boll during boll development with different planting dates

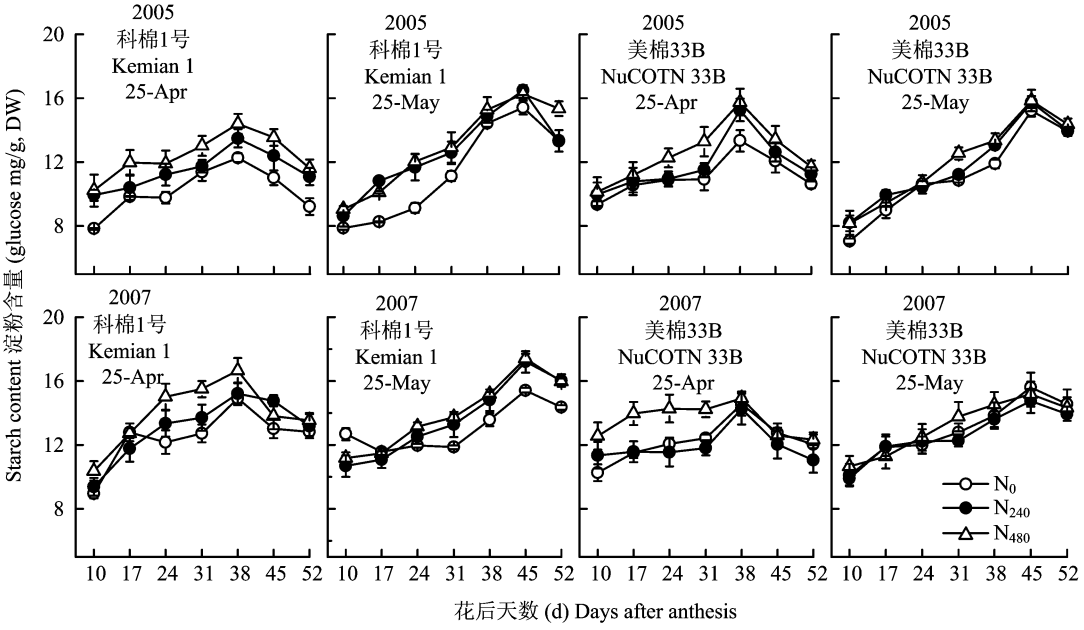

图 3　施氮量与播种期对棉铃对位叶中淀粉含量的影响

Fig. 3　Effect of N rates on starch content in the subtending leaves of cotton boll during boll development with different planting dates

温条件下棉铃对位叶的淀粉含量峰值出现时间推迟。与 N_{240} 相比，N_{480} 处理的棉铃对位叶淀粉含量在晚播低温条件下差异较 N_0 处理小。年际间和品种间的变化趋势一致。

2.2.2 光合产物含量与叶氮浓度的相关性分析　蔗糖和淀粉是表征叶片"源"活性的重要指标。考虑到两品种的变化趋势相同，将品种作为重复分析棉铃对位叶碳水化合物含量、蔗糖转化量与叶氮浓度之间的关系。

由表3可知，花后24～45 d，棉铃对位叶中蔗糖含量与叶氮浓度呈显著正相关；花后17～24 d，蔗糖转化量与叶氮浓度呈显著负相关，至花后31～52 d，反而呈显著正相关（$P<0.01$），表明只有在适宜叶氮浓度下蔗糖转运量才能达到最高。棉铃对位叶中淀粉含量与叶氮浓度的相关性在花后17～38 d未达显著水平，仅在花后45～52 d显著正相关。

表3　棉铃对位叶蔗糖含量、蔗糖转化量和淀粉含量与叶氮浓度的相关性分析

Table 3　Correlation coefficients (r) between sucrose content, transport capacity of sucrose (Tn), starch content and N concentration in the subtending leaves of cotton boll at various days after anthesis

年份 Years	项目 Item	花后天数 Days after anthesis(d)					
		17	24	31	38	45	52
2005	蔗糖 Sucrose	−0.050	0.881**	0.875**	0.843**	0.604*	−0.130
	蔗糖转化量 Tn	−0.742**	−0.701*	0.661*	0.708**	0.595*	0.592*
	淀粉 Starch	−0.270	0.230	0.330	0.140	0.949**	0.951**
2007	蔗糖 Sucrose	0.864**	0.826**	0.804**	0.760**	0.707*	0.602*
	蔗糖转化量 Tn	−0.824**	−0.703*	0.697*	0.646*	0.652*	0.585*
	淀粉 Starch	−0.350	0.060	0.190	−0.160	0.716**	0.724**

注(Note)：Tn—Transport capacity of sucrose．*，**分别表示在0.05和0.01水平上显著 Indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively($n=12$, $r_{0.05}=0.576$, $r_{0.01}=0.707$).

2.3　施氮量与播种期对棉花产量及产量构成因素的影响

播种期推迟使棉花单株铃数、铃重和皮棉产量均明显下降，N_0 和 N_{480} 处理对不同播种期棉花产量及产量构成因素的影响不同（表4）。N_0 处理对不同播种期棉花单株铃数、铃重和皮棉产量的影响均为负效应，而 N_{480} 处理对不同播种期棉花产量及产量构成因素的效应不一致：4月25日播种条件下，N_{480} 处理对棉花单株铃数、铃重和皮棉产量的影响为负效应；晚播低温条件下，N_{480} 处理对棉花产量构成三因素的影响均表现为正效应，且铃重和皮棉产量达到显著水平（$P<0.05$）。年际间和品种间的变化趋势一致。此外，N_{480} 处理对棉花铃重和皮棉产量的调节效应最大。品种间比较发现，晚播低温条件下，与低温弱敏感性品种科棉1号相比，N_{480} 处理对低温适度敏感性品种美棉33B产量、铃重的调控幅度较大，对衣分调控幅度较小。

2.4　施氮量对晚播棉纤维主要品质性状的影响

品种、播种期和施氮量对棉纤维长度和比强度的影响均达极显著水平（表5、表6），播种期对麦克隆值的影响达到显著水平，纤维比强度和麦克隆值受播种期与施氮量的互作效应的影响最大。进一步分析棉纤维长度、比强度和麦克隆值的变化发现（表5），随播种期的推迟，纤维长度、比强度和麦克隆值均呈降低趋势。

4月25日播种条件下，施氮量对纤维长度和麦克隆值的影响较小，而 N_{240} 处理下纤维比强度显著高于 N_0 和 N_{480} 处理（$P<0.05$）。晚播棉花纤维品质各指标在 N_{240}、N_{480} 处理下显著高于 N_0 处理（表5）。与4月25日播种棉花相比，晚播条件下 N_0、N_{240}、N_{480} 处理的棉纤维比强度分别降低了30.1%、25.0%和22.5%；棉纤维长度分别降低了9.9%、8.4%和8.2%。因此，增加施氮量可对晚播低温进行补偿，有利于高强纤维的形成。品种间比较发现，施氮量对低温弱敏感性品种科棉1号棉纤维长度和比强度的影响程度较低温适度敏感性品种美棉33B大。年际间的变化趋势一致。

表 4　施氮量与播种期对棉花产量及产量构成因素的影响和效应值分析

Table 4　Effect of N rates on cotton yield, and yield components in cotton plant with different planting dates and their effect indices (EI)

播种期 Planting date	施氮量 N rate (kg/hm^2)	2005 单株铃数 Bolls per plant (No./plant)	2005 铃重 Boll wt. (g)	2005 衣分(%) Lint percentage	2005 皮棉产量 Lint yield (kg/hm^2)	2007 单株铃数 Bolls per plant (No./plant)	2007 铃重 Boll wt. (g)	2007 衣分(%) Lint percentage	2007 皮棉产量 Lint yield (kg/hm^2)
				科棉 1 号 Kemian 1					
25 – Apr	0	17.6 b	5.7 b	38.7 a	1613 c	17.0 b	5.6 b	39.1 a	1562 b
	240	19.1 a	6.1 a	40.1 a	1950 a	18.7 a	5.9 a	39.6 a	1848 a
	480	18.1 b	5.8 ab	39.3 a	1772 b	18.4 a	5.7 ab	39.5 a	1742 a
	EI0	8.20	6.64	nd	17.30	9.02	5.91	nd	15.43
	EI480	5.32	3.49	nd	9.15	1.48	4.11	nd	5.70
25 – May	0	16.6 b	5.1 c	38.2 a	1347 c	15.9 b	4.9 b	38.4 a	1268 b
	240	17.4 ab	5.4 b	38.8 a	1539 b	17.5 a	5.1 ab	39.8 a	1504 a
	480	18.1 a	5.6 a	40.1 a	1717 a	17.8 a	5.3 a	38.6 a	1511 a
	EI0	4.56	6.69	nd	12.46	9.12	3.83	nd	15.71
	EI480	–4.12	–3.94	nd	–11.57	–1.33	–2.61	nd	–0.49
				美棉 33B NuCOTN 33B					
25 – Apr	0	18.1 b	5.2 c	38.3 a	1503 c	17.5 b	5.1 b	38.7 a	1446 b
	240	19.5 a	5.7 a	38.4 a	1786 a	19.6 a	5.5 a	39.2 a	1767 a
	480	18.7 ab	5.5 b	37.7 a	1625 b	19.3 a	5.3 ab	40.6 a	1739 a
	EI0	7.26	9.00	nd	15.85	10.39	7.70	nd	18.19
	EI480	4.15	3.27	nd	8.98	1.14	4.22	nd	1.62
25 – May	0	15.9 b	4.9 b	36.5 a	1188 c	15.9 b	4.5 b	37.2 a	1117 b
	240	16.3 ab	5.1b	37.2 a	1289 b	17.0 a	4.6 b	38.0 a	1243 ab
	480	17.0 a	5.4 a	36.9 a	1418 a	17.3 a	5.1 a	37.3 a	1392 a
	EI0	2.05	4.07	nd	7.79	6.46	1.77	nd	10.13
	EI480	–4.77	–5.94	nd	–10.08	–1.76	–11.85	nd	–11.97

注(Note): 效应因子 $EI = [(N_0 或 N_{480}) - N_{240}] \times 100/N_{240}$,当 $EI > 0$ 时为负效应,$EI < 0$ 时为正效应,且 EI 绝对值越大,其影响程度越大 $EI = [(N_0 或 N_{480}) - N_{240}] \times 100/N_{240}$. It is a positive effect if EI > 0 and vice versa, and following increasing the absolute value of EI, effect of PGR on cotton increases. "nd"表示未计算 N_0 或 N_{480} 处理对棉花衣分的效应因子 Means no data in EI of cotton lint percentage. 同列数值后不同字母表示不同施氮量间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among N rates at the 0.05 probability level.

2.5　施氮量与播种期对棉子主要品质性状的影响

播种期、品种与施氮量的互作对棉子主要品质性状的影响均达显著或极显著水平(表 6、表 7)。子指受品种与播种期及播种期与施氮量的互作效应影响较大,棉子蛋白质含量和脂肪含量受品种与施氮量的互作效应的影响最大,且年际间变化趋势一致。随播种期的推迟,施氮量对两个品种棉子各品质性状的影响不显著。

表5 施氮量与播种期对棉纤维主要品质性状的影响

Table 5 Effect of N rates on fibre quality characteristics in cotton plant with different planting dates

播种期 Planting date	施氮量 N rate (kg/hm^2)	2005 长度 Fiber length (mm)	2005 比强度 Specific strength (cN/tex)	2005 麦克隆值 Micronaire	2007 长度 Fiber length (mm)	2007 比强度 Specific strength (cN/tex)	2007 麦克隆值 Micronaire
			科棉1号 Kemian 1				
25-Apr	0	32.0 a	32.3 ab	4.7 a	31.8 a	32.2 ab	4.5 a
	240	32.3 a	33.5 a	4.6 a	32.1 a	33.3 a	4.5 a
	480	32.4 a	31.2 b	4.4 a	32.2 a	30.9 b	4.3 a
25-May	0	28.6 a	21.8 b	3.1 b	28.3 a	21.6 b	2.9 b
	240	29.7 a	24.6 a	3.4 a	29.5 a	24.4 a	3.3 a
	480	29.4 a	24.9 a	3.3 a	29.2 a	24.7 a	3.2 a
			美棉33B NuCOTN 33B				
25-Apr	0	30.5 b	28.8 b	4.6 a	30.3 a	28.6 b	4.5 a
	240	31.6 a	31.3 a	4.6 a	31.4 a	31.2 a	4.4 a
	480	31.4 a	30.1 ab	4.4 a	31.2 a	29.9 ab	4.3 a
25-May	0	27.8 b	21.0 b	2.9 b	27.6 a	20.8 b	2.8 b
	240	28.9 a	24.1 a	3.1 a	28.6 a	23.9 a	3.1 a
	480	29.2 a	23.8 a	3.0 ab	28.9 a	23.5 a	3.0 a

注(Note)：同列数据后不同字母表示不同施氮量间在0.05水平上差异显著($P<0.05$) Values followed by different letters in the same column are significantly different among different N rates at the 0.05 probability level.

表6 不同处理下棉花主要纤维和棉子品质性状的方差分析

Table 6 Variance analysis of quality characteristics of fibre and seed

变异来源 Source of variance	纤维长度 Fiber length (mm)		比强度 Specific strength (cN/tex)		麦克隆值 Micronaire		子指 Seed weight (g)		脂肪含量 Fat content (%)		蛋白质含量 Protein content (%)	
	2005	2007	2005	2007	2005	2007	2005	2007	2005	2007	2005	2007
品种 Cultivar (C)	**	**	**	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
播期 Planting date(PD)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**
施氮量 N rate(N)	**	**	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C × PD	NS	NS	*	**	**	NS	**	**	**	NS	NS	**
C × N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	*	*	*	*	**
PD × N	NS	NS	*	**	*	*	*	*	NS	NS	NS	**
C × PD × N	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

注(Note)：*，**—分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively; NS—表示不显著 NS denotes no significant difference ($P>0.05$).

表 7　施氮量与播种期对棉子主要品质性状的影响

Table 7　Effect of N rates on seed quality characteristics in cotton plant with different planting dates

播种期 Planting date	施氮量 N rate (kg/hm^2)	2005 子指 Seed weight (g)	2005 脂肪含量 Fat content (%)	2005 蛋白质含量 Protein content (%)	2007 子指 Seed weight (g)	2007 脂肪含量 Fat content (%)	2007 蛋白质含量 Protein content (%)
科棉 1 号 Kemian 1							
25 – Apr	0	11.12 b	18.20 a	23.29 b	11.52 b	15.21 a	21.09 b
	240	12.67 a	18.42 a	23.69 b	12.49 a	15.22 a	21.95 ab
	480	11.21 b	19.08 a	25.46 a	11.84 b	15.63 a	22.89 a
25 – May	0	9.66 a	16.71 a	18.84 b	9.69 a	10.42 b	14.65 b
	240	9.77 a	17.06 a	20.01 a	9.79 a	11.14 b	17.16 a
	480	9.82 a	17.22 a	20.16 a	10.05 a	12.31 a	18.68 a
美棉 33B NuCOTN 33B							
25 – Apr	0	11.91 b	18.62 b	23.17 a	11.27 b	14.08 b	19.39 b
	240	12.77 a	20.12 ab	24.35 a	12.33 a	16.12 a	20.03 ab
	480	11.82 b	21.52 a	24.92 a	11.66 b	14.31 ab	21.58 a
25 – May	0	8.92 b	15.85 a	19.96 a	10.01 a	11.74 a	15.44 a
	240	9.27 a	16.18 a	20.13 a	10.19 a	9.88 a	15.98 a
	480	9.20 ab	16.18 a	20.63 a	10.16 a	10.54 a	16.60 a

注(Note): 同列数值后不同字母表示不同施氮量间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among different N rates at the 0.05 probability level ($P<0.05$).

3　讨论

前人研究表明,温度是影响棉铃对位叶蔗糖代谢和棉花品质的主要环境因子,且不同播种期棉花在花铃期主要受温度(尤其是 MDT_{min})的影响[7,21-22]。有关温度(播种期)对棉花品质的影响已有较多研究,普遍认为低温会影响棉纤维、棉子的生理代谢过程,使铃重降低,棉纤维、棉子品质变劣[6,23],但增加施氮量可减小因低温而造成的纤维长度和比强度降低的幅度[14-15]。然而棉铃发育所需的养分(约 60% ～ 87%)主要来自棉铃对位叶[1-2],有关施氮量对不同播种期棉铃对位叶光合产物组分与棉花最终产量和品质关系的研究甚少。

氮素是作物生长发育最重要的营养物质,其营养状况调控叶片碳代谢[24]。SPAD 值、氨基酸含量和叶氮浓度是表征作物氮素营养状况的常用指标[25],高相彬等[26]研究发现棉铃对位叶氮浓度较 SPAD 值和氨基酸含量能更准确反映棉株氮素营养状况。本试验条件下,花后 24 ～45 d 棉铃对位叶蔗糖含量与叶氮浓度显著正相关,且相关系数随花后天数的增加而降低;蔗糖转化量与叶氮浓度在花后 17 ～24 d 显著负相关,花后 31 ～52 d 显著正相关($P<0.01$),表明棉铃对位叶中存在有利于碳水化合物累积的适宜叶氮浓度,且随棉铃发育进程而变化,过高与过低的叶氮浓度均导致碳水化合物含量降低。其原因可能是:叶氮浓度过高时,将合成较多的氨基酸和蛋白质,大量的碳骨架被消耗而导致含量降低[27];叶氮浓度过低时,叶片光合作用受到抑制,光合产物含量降低[28]。棉铃对位叶中淀粉含量与叶氮浓度的相关性在花后 17 ～38 d 未达显著水平,仅在花后 45 ～52 d 显著正相关,这可能是因为淀粉是棉花叶片碳水化合物的主要存储形式,仅当叶片蔗糖耗尽(供小于求)时,叶片淀粉才被降解为蔗糖运输在库器官[29]。

正常播种条件下,与对照相比,225 ～ 300 kg/hm^{2}的施氮量范围有利于显著提高棉花叶片光合生理活性,延长高光合持续期,显著提高棉花产量、纤维长度和纤维比强度[30-31]。晚播低温条件

下,棉铃对位叶中净光合速率和磷酸蔗糖合成酶活性较低,蔗糖转化率下降,导致铃重降低[7],进而引起棉花产量和品质下降(数据未发表)。作为影响棉花最为重要的两个生长因素,温度和氮素协同互作影响棉铃对位叶光合产物形成、分配和碳、氮代谢。赵文青等[14-15]研究发现,在低温下增加施氮量可减小因低温而造成的纤维长度和比强度降低的幅度。本试验条件下,4月25日播种条件下,N_{240}处理的棉铃对位叶中蔗糖含量高于N_0、N_{480}处理,淀粉含量随施氮量的增加而增加;晚播低温条件下N_{480}处理的棉花铃重、皮棉产量、纤维比强度均有所提高,麦克隆值得以优化。说明在适宜温度下,适宜施氮使棉铃对位叶碳、氮代谢较协调,光合产物的积累与运输流畅,利于棉铃的生长发育,棉花铃重、皮棉产量和纤维品质最优,过量施氮增加了棉株的蒸腾失水量,可加重棉株受干旱胁迫的程度,降低棉花产量和品质;晚播低温条件下,施氮量与播种期对棉花的影响存在补偿效应,适量追施氮肥使棉花叶片Rubisco活性和光合速率均有增加[32],促进棉铃对位叶中光合产物向棉铃中的分配,从而提高棉花产量和品质。

4 结论

本试验条件下,播种期(温度)和施氮量对棉铃对位叶光合产物含量、棉花产量和品质的影响存在互作效应,其中主导因素是播种期(温度),施氮量对其有补偿效应。随播种期推迟,施氮量N 240 kg/hm^{2}时棉花单铃重、产量及纤维品质降低,主要原因是晚播低温使棉铃对位叶中光合产物(蔗糖和淀粉)含量增加,抑制了光合产物向棉铃及纤维的运输。晚播低温条件下,适量追施氮肥可调节棉铃对位叶中的氮浓度并提高光合产物再利用能力,从而相对促进棉花单铃的形成,降低棉纤维比强度的下降幅度,优化麦克隆值。

参 考 文 献:

[1] Constable G, Rawson H. Carbon production and utilization in cotton: Inferences from a carbon budget[J]. Functional Plant Biology, 1980, 7(5): 539-553.

[2] Ashley D A. ^{14}C - labeled photosynthate translocation and ultilization in cotton plant[J]. Crop Science, 1972, 12(1): 69-74.

[3] Wullschleger S D, Oosterhuis D M. Photosynthetic carbon production and use by developing cotton leaves and bolls[J]. Crop Science, 1990, 30(6): 1259-1264.

[4] 董志强, 舒文华, 翟学军, 等. 棉株不同器官中几种内源激素的变化及相关关系[J]. 核农学报, 2005, 19(01): 62-67.
Dong Z Q, Shu W H, Zhai X J *et al*. The change and relationship of several endogenesis hormone in different organs of cotton plant [J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2005, 19(1): 62-67.

[5] Davidonis G H, Johnson A S, Landivar J A *et al*. Cotton fiber quality is related to boll location and planting date[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(1): 42-47.

[6] Dong H, Li W, Tang W *et al*. Yield, quality and leaf senescence of cotton grown at varying planting dates and plant densities in the Yellow River Valley of China[J]. Field Crops Research, 2006, 98(2-3): 106-115.

[7] Liu J R, Ma Y N, Lü F J *et al*. Changes of sucrose metabolism in leaf subtending to cotton boll under cool temperature due to late planting[J]. Field Crops Research, 2013, 144(C): 200-211.

[8] Salvagiotti F, Miralles D J. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat [J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(3): 282-290.

[9] Reddy K R, Koti S, Davidonis G H *et al*. Interactive effects of carbon dioxide and nitrogen nutrition on cotton growth, development, yield, and fiber quality[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(4): 1148-1157.

[10] 孙红春, 冯丽肖, 谢志霞, 等. 不同氮素水平对棉花不同部位—铃叶系统生理特性及铃重空间分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1638-1645.
Sun H C, Feng L X, Xie Z X *et al*. Physiological characteristics of boll-leaf system and boll weight space distributing of cotton under different nitrogen levels[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(8): 1638-1645.

[11] 勾玲, 闫洁, 韩春丽, 等. 氮肥对新疆棉花产量形成期叶片光合特性的调节效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 488-493.
Gou L, Yan J, Han C L *et al*. Effects of nitrogen rates on photosynthetic chaxracteristics and yield of high-yielding cotton in Xinjiang[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(05): 488-493.

[12] Fernaandez C J, McInnes K J, Cothren J T. Water status and leaf area production in water-and nitrogen-stressed cotton[J]. Crop Science, 1996, 36(5): 1224-1233.

[13] 马宗斌, 严根土, 刘桂珍, 等. 施氮量对黄河滩区棉花叶片生理特性、干物质积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 849-857.
Ma Z B, Yan G T, Liu G X *et al*. Effects of nitrogen application rates on main physiological characteristics of leaves, dry matter accumulation and yield of cotton cultivated in the Yellow River bottomlands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(04): 849-857.

[14] 赵文青, 孟亚利, 陈美丽, 等. 棉株果枝部位, 温光复合因子及施氮量对纤维伸长的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(6): 1077-1086.
Zhao W Q, Meng Y L, Chen M L *et al*. Effects of fruiting branch

position, temperature-light factors and nitrogen rates on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) fiber elongation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(6): 1077-1086.

[15] 赵文青，孟亚利，陈兵林，等. 棉株果枝部位，温光复合因子及施氮量对纤维比强度形成的影响[J]. 中国农业科学，2011，44(18)：3721-3732.
Zhao W Q, Meng Y L, Chen B L *et al*. Effects of fruiting-branch position, temperature-light factors and nitrogen rates on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) fiber strength formation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 48(18): 3721-3732.

[16] 薛晓萍，周治国，张丽娟，等. 棉花花后临界氮浓度稀释模型的建立及在施氮量调控中的应用[J]. 生态学报，2006，26(6)：1781-1791.
Xue X P, Zhou Z G, Zhang L J *et al*. Development and application of critical nitrogen concentration dilution model for cotton after flowering[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1781-1791.

[17] Lightfoot D, Orford S, Timmis J. Identification and characterisation of cotton boll wall-specific gene promoters for future transgenic cotton varieties[J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2013, 31(1): 174-184.

[18] 刘霞，姜春明，郑泽荣，等. 藁城 8901 和山农 1391 淀粉合成酶活性和淀粉组分积累特征的比较[J]. 中国农业科学，2005，38(5)：897-903.
Liu X, Jiang C M, Zheng Z R *et al*. Activities of the enzymes involved in starch synthesis and starch accumulation in grains of wheat cultivars GC8901 and SN1391[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 897-903.

[19] Feil B M, Moser S B, Jampatong S *et al*. Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization[J]. Crop Science, 2005, 45(2): 516-523.

[20] Luque de Castro M D, García-Ayuso L E. Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future[J]. Analytica Chimica Acta, 1998, 369(1-2): 1-10.

[21] Zheng M, Wang Y H, Liu K *et al*. Protein expression changes during cotton fiber elongation in response to low temperature stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2012, 169(4): 399-409.

[22] 束红梅，赵新华，周治国，等. 不同棉花品种纤维比强度形成的温度敏感性差异机理研究[J]. 中国农业科学，2009，42(7)：2332-2341.
Shu H M, Zhao X H, Zhou Z G *et al*. Physiological mechanisms of variation in temperature-sensitivity of cotton fiber strength formation between two cotton cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(7): 2332-2341.

[23] 刘敬然，刘佳杰，孟亚利，等. 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉花产量和品质及其棉铃对位叶光合产物的影响[J]. 作物学报，2013，(6)：1078-1088.
Liu J R, Liu J J, Meng Y L *et al*. Effect of 6-BA and ABA applications on yield, quality and photosynthate contents in the subtending leaf of cotton with different planting dates[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(6): 1078-1088.

[24] Wang S H, Zhu Y, Jiang H D *et al*. Positional differences in nitrogen and sugar concentrations of upper leaves relate to plant N status in rice under different N rates[J]. Field Crops Research, 2006, 96(2-3): 224-234.

[25] Chen D, Ye G, Yang C *et al*. Effect after introducing *Bacillus thuringiensis* gene on nitrogen metabolism in cotton[J]. Field Crops Research, 2004, 87(2-3): 235-244.

[26] Gao X B, Wang Y H, Zhou Z G *et al*. Response of cotton fiber quality to the carbohydrates in the leaf subtending the cotton boll[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(1): 152-160.

[27] Invers O, Kraemer G P, Pérez M *et al*. Effects of nitrogen addition on nitrogen metabolism and carbon reserves in the temperate seagrass *Posidonia oceanica*[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 303(1): 97-114.

[28] Boussadia O, Steppe K, Zgallai H *et al*. Effects of nitrogen deficiency on leaf photosynthesis, carbohydrate status and biomass production in two olive cultivars 'Meski' and 'Koroneiki'[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 123(3): 336-342.

[29] Hendrix D L, Grange R I. Carbon partitioning and export from mature cotton leaves[J]. Plant Physiology, 1991, 95(1): 228-233.

[30] 李伶俐，房卫平，谢德意，等. 施氮量对杂交棉光合生理特性及产量、品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(5)：1183-1189.
Li L L, Fang W P, Xie D Y *et al*. Effects of nitrogen application rates on photosynthetic and physiological characteristics and yield and quality of hybrid cotton[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(05): 1183-1189.

[31] 高相彬，王友华，陈兵林，等. 棉(*Gossypium hirsutum* L.)纤维发育相关酶和纤维比强度对棉铃对位叶氮浓度变化的响应研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(5)：1227-1236.
Gao X B, Wang Y H, Chen B L *et al*. Effects of nitrogen concentration in subtending leaves of boll on related enzymes and strength formation of cotton fiber[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1227-1236.

[32] Reddy A R, Reddy K R, Padjung R *et al*. Nitrogen nutrition and photosynthesis in leaves of Pima cotton[J]. Journal of Plant Nutrition, 1996, 19(5): 755-770.