

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.01078

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

刘敬然 刘佳杰 孟亚利 王友华 陈兵林 张国伟 周治国*

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

摘 要: 大田播种期(4 月 25 日和 5 月 25 日)和植物生长调节剂(6-BA 和 ABA)试验于 2006 年在江苏南京(长江流域下游棉区)和河南安阳(黄河流域黄淮棉区)进行, 以科棉 1 号和美棉 33B 品种为材料, 研究外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉铃对位叶光合产物形成与运转的影响及其与产量品质的关系。结果表明: (1) 6-BA 显著提高棉铃对位叶蔗糖含量和转化率及淀粉含量, 而 ABA 则主要调节棉铃对位叶内源激素平衡。(2)不同播种期条件下(4 月 25 日和 5 月 25 日), 外源 6-BA 均可使棉花单铃重增加、纤维品质提高, 外源 ABA 在晚播(5 月 25 日, 南京试点和安阳试点棉铃发育期 MDT_{min} 分别为 20.9℃和 16.5℃)条件下可使棉花产量(安阳试点)和纤维主要品质指标下降幅度减小; 外源 6-BA 和 ABA 对棉籽主要品质性状的作用均不显著。(3)晚播条件下外源 6-BA 和 ABA 均可提高相对棉花主要品质指标, 但两者作用机制不同, 外源 6-BA 主要是提高棉铃对位叶光合产物含量和蔗糖转化率, 而 ABA 则主要是诱导棉株抗逆性。
关键词: 棉花(*Gossypium hirsutum* L.); 棉铃对位叶; 播种期; 6-BA; ABA; 光合产物

Effect of 6-BA and ABA Applications on Yield, Quality and Photosynthate Contents in the Subtending Leaf of Cotton with Different Planting Dates

LIU Jing-Ran, LIU Jia-Jie, MENG Ya-Li, WANG You-Hua, CHEN Bing-Lin, ZHANG Guo-Wei, and ZHOU Zhi-Guo*

Key Laboratory of Crop Physiology & Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture / Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: To study the effects of 6-BA and ABA applications on carbohydrate contents and endogenous hormones in subtending leaf, and their relationship to cotton yield and quality under different planting dates, we conducted a field experiment with two cotton cultivars Kemian 1 and NuCOTN 33B in the Lower Reaches of Yangtze River (Nanjing) and in the Yellow River Valley (Anyang), China. The cotton seeds were planted on Apr. 25th and May 25th, 2006, respectively, which could result in different growth temperatures for the bolls and their subtending leaves at the same site, and the growth regulators were sprayed at flowering stage. The results showed that the application of 6-BA significantly increased contents of sucrose and starch, and sucrose transformation rate in the subtending leaf, while the application of ABA only regulated the balance of endogenous hormones. The application of 6-BA increased boll weight and enhanced fiber qualities in cotton plants with planting dates of Apr. 25th and May 25th, whereas the decrease ranges of cotton yield and quality in Anyang were less for the application of ABA in cotton plants with planting date of May 25th, compared to those with planting date of Apr. 25th. However, the seed quality was not affected by the applications of 6-BA or ABA significantly. The application of 6-BA or ABA improved relative cotton quality of late planted cotton, whereas the action mechanisms were different. The application of 6-BA improved cotton yield and quality via enhancing the photosynthate contents and sucrose transformation rate. However, the application of ABA improved cotton yield and quality via increasing the stress resistance of cotton plants.

Keywords: Cotton (*Gossypium hirsutum* L.); Subtending leaf; Planting date; 6-BA; ABA; Photosynthate

温度是影响棉铃发育与纤维品质的主要生态因子^[1-2], 花铃期低温对棉花产量与纤维品质的影响尤

本研究由国家自然科学基金项目(30971735), 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-18-20)和国家公益性行业(农业)科研专项资金项目(200903003)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 周治国, E-mail: giscott@njau.edu.cn, Tel: 025-84396813

第一作者联系方式: E-mail: 2010201028@njau.edu.cn

Received(收稿日期): 2012-09-04; Accepted(接受日期): 2012-12-16; Published online(网络出版日期): 2013-02-22.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130222.1110.003.html>

为明显^[1,3], 其中花铃期平均日最低温^[4]与棉花产量和品质的关系最为密切。通常转 *Bt* 基因棉在盛花期之前, 根系功能与地上部发育的协调性并不差, 但进入盛花期后源器官的供应能力不足导致库源关系失调^[5], 使其在生长中后期过早衰老死亡。棉铃干物质(约 60%~87%)的主要来源是棉铃对位叶^[6-7], 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。

通过植物生长调节剂应用可调节叶片内源激素水平及各激素间平衡的变化, 调控叶片同化物输出和分配, 协调源库关系^[8-9], 改善纤维品质。ABA 是一种具有全面生理功能的激素, 在植物整个生长发育过程中, 有着多方面的调控作用, 对气孔开闭和水分调节、光合作用、衰老及抗旱、抗盐、抗寒等^[10-12]生理过程都有明显调控作用。高水平的 ABA 可以调节酸性磷酸酶的活性, 促进蔗糖向葡萄糖的转化, 有利于同化物及储存物的输出并向生殖器官分配, 加快棉铃的发育^[13]。Guinn 等^[14]认为棉花叶片细胞分裂素含量的下降和脱落酸含量的升高是棉花叶片衰老、光合性能降低的主要原因。6-BA (6-苄基腺嘌呤, $C_{12}H_{11}N_5$) 是一种较活跃的细胞分裂素, 喷施 6-BA 可促进植物生长, 增加棉花叶片叶绿素含量和可溶性蛋白含量, 延缓衰老^[15], 调控养分的运输和分配。6-BA 和 ABA 刺激光合产物自韧皮部卸出^[16-17]。在低温(棉纤维加厚发育期 20.0℃的日均温)条件下, 外施 6-BA 和 ABA 均可提高棉花铃重、增加纤维素沉积量^[18], 提高纤维比强度^[19]。但低温下外源生长调节剂(6-BA 和 ABA)对棉铃对位叶光合产物及内源激素含量变化的研究较少。本文基于异地大田分期播种试验, 使棉株相同果枝部位棉铃处于不同的温度下, 从棉铃对位叶中物质含量、内源激素水平变化和棉花产量、品质的角度研究 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉铃对位叶光合产物形成与运转的影响, 揭示植物生长调节剂调控棉铃对位叶光合产物形成与运转的生理机制, 为探索棉花高产、优质、培育环境友好型的新品系提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

为兼顾试验的重复性和生态区域性, 试验于 2006 年在江苏省农业科学院(江苏南京, 118°50'E, 32°02'N, 长江流域下游棉区)和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)同时进行, 供试土壤分别为黄棕壤土、沙壤土, 0~20 cm 土壤分别含有机质 17.8、14.7 g kg⁻¹, 全氮 0.90、0.94 g kg⁻¹, 速效氮 74.6、39.3 g kg⁻¹, 速效磷 37.1、23.6 g kg⁻¹, 速效钾 91.6、76.3 g kg⁻¹。

以科棉 1 号(Kemian 1, 高强纤维品种)和美棉 33B (NuCOTN 33B, 中强纤维品种)为材料, 采用异地分期播种方法以形成棉铃对位叶发育期的温度差异, 播期设置为 4 月 25 日和 5 月 25 日, 南京试点采用营养钵育苗, 两播期棉花分别于 5 月 15 日、6 月 12 日移栽; 安阳试点采用直播。随机区组设计, 行株距分别为 90 cm × 25 cm, 3 次重复, 其他田间管理均按高产栽培要求进行。

待棉花开花后, 两试点均对棉株第 6~8 果枝的第 1 和第 2 果节当日白花挂牌标记, 同时全株喷施一次 6-BA 和 ABA, 参考 Yang 等^[18]研究方法并结合预备试验结果每公顷喷施 600 L 浓度为 20 mg L⁻¹ 的 6-BA 和 ABA, 喷施时间为 17:00~18:00, 以喷施等量清水作对照。南京试点于花后 7、9、12、15、21、27、33 和 39 d, 安阳试点于花后 9 d 始至 51 d, 每 6 d 于上午 9:00~10:00 取生长发育一致的棉铃对位叶 10 片, 将叶片洗净擦干后, 用干净的剪刀去除主脉和边缘, 105℃杀青 30 min, 烘干称重粉碎后保存待测。待标记棉铃开始吐絮时, 每小区收取生长一致的棉铃 20 个, 风干后轧花测定纤维和棉籽品质。

1.2 测定内容与方法

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 4000 转 min⁻¹ 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℃冰箱保存以备测定碳水化合物(蔗糖和淀粉)含量^[20]。向提完糖的沉淀中加水 2 mL。搅拌均匀, 于 80℃水浴中使残留的乙醇蒸发, 再放入沸水浴糊化 15 min, 冷却后, 将离心管放入冰水浴, 加入 9.2 mol L⁻¹ 冷的高氯酸 2 mL, 不时搅拌, 提取 15 min 后加水 4 mL。混匀离心 10 min, 将上清液倾入 25 mL 容量瓶。再向沉淀中加入 4.6 mol L⁻¹ 高氯酸 2 mL, 搅拌提取 15 min 后加水 6 mL, 混匀离心 10 min, 收集上清液于容量瓶。然后用水洗沉淀 1~2 次, 离心, 合并离心液于 50 mL 容量瓶中用蒸馏水定容, 采用硫酸蒽酮显色法^[21]在 620 nm 处测定淀粉, 以不同浓度葡萄糖制定标线。

1.2.2 内源激素含量 用酶联免疫吸附检测法

(ELISA)测定脱落酸(ABA)、玉米素核苷(ZR)、生长素(IAA)和赤霉素(GA₃)含量,试剂盒由中国农业大学作物化学控制研究中心提供。

1.2.3 棉纤维品质性状 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 仪器测定棉纤维品质指标,并用 HVICC 校准。

1.2.4 棉籽品质性状 采用 Soxtec Avanti 2050 索式自动浸提系统(Soxtec Avanti 2050)测定棉籽脂肪含量^[22],凯氏定氮法^[23]测定棉籽全氮含量。棉籽蛋白质含量=6.25×全氮含量。

1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 处理数据及作图,

SPSS 17.0 统计分析软件进行方差分析, LSD 法检验显著性。分析各处理花铃期棉铃对位叶中蔗糖最大/最小蔗糖含量计算蔗糖转化率(4 月 25 日播种的棉铃对位叶中最大蔗糖含量为 $C_{\text{Suc},9\text{DPA}}$, 5 月 25 日播种的棉铃对位叶中最大蔗糖含量为 $C_{\text{Suc},24\text{DPA}}$; 2 个播种期最后一个取样点的蔗糖含量最小), 蔗糖转化率 $Tr(\%) = (\text{最大蔗糖含量} - \text{最小蔗糖含量}) / \text{最大蔗糖含量} \times 100$ 。

所用气象资料由江苏南京气象局和河南安阳气象局提供。表 1 展示了适宜播种期(4 月 25 日)和晚播(5 月 25 日)棉花棉铃发育期平均日最低温和 >15℃ 积温, 温度条件在两地差异较大。

表 1 花铃期不同播种期棉铃发育的气象条件

Table 1 Weather factors during boll development period with different planting dates

地点 Site	播种期 Planting date	开花日期 Anthesis date	吐絮日期 Boll opening date	平均日最低温 MDT _{min} (°C)	总积温 TAT (°C)
江苏南京 Nanjing, Jiangsu	Apr. 25, 2006	July 24th	Sept. 11th	24.7	676.25
	May 25, 2006	Aug. 15th	Oct. 7th	20.9	531.75
河南安阳 Anyang, Henan	Apr. 25, 2006	July 22th	Sep. 4th	21.1	469.08
	May 25, 2006	Aug. 17th	Oct. 8th	16.2	335.44

MDT_{min}: 平均日最低温; TAT: >15℃ 总积温。

MDT_{min}: daily minimum temperature; TAT: total accumulated temperature; TAT = (max. temp. + min. temp.)/2 - 15℃.

2 结果与分析

2.1 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉铃对位叶光合产物含量的影响

2.1.1 蔗糖含量 棉铃对位叶蔗糖含量在开花初期有较高的峰值,说明在棉花花铃初期有充足的蔗糖供应棉铃,随花后天数的增加不断降低(图 1)。与适宜播种期相比,播种期推迟(5 月 25 日,南京试点和安阳试点棉铃发育期 MDT_{min} 分别为 20.9℃ 和 16.5℃)使蔗糖含量有增加趋势,且在安阳试点播种期推迟使棉铃对位叶蔗糖含量由下降趋势变为单峰变化。外源 6-BA 对 2 个试点 2 个播种期棉铃对位叶蔗糖含量影响达显著水平($P < 0.05$),且随棉铃发育进程作用逐渐减少,至花后 33 d,处理与对照差异不显著。外源 ABA 对南京试点 2 个播种期棉铃对位叶蔗糖含量影响较小,适宜播种期(4 月 25 日,安阳试点棉铃发育期 MDT_{min} 分别为 21.1℃)条件下,外源 ABA 明显增加安阳试点棉铃对位叶蔗糖含量,但在棉铃发育后期作用不明显。安阳试点蔗糖含量显著高于南京试点,这可能是由于安阳试点温度偏低,棉株为抵御低温逆境而产生的自我调节反应。

进一步分析表 2 和表 3 可知,两试点棉铃对位

叶蔗糖转化率在品种间和生长调节剂间差异均达显著或极显著水平,仅南京试点蔗糖转化率在播种期间达显著水平。外源 6-BA 和 ABA 提高了不同播种期棉铃对位叶蔗糖转化率,说明在本试验处理的浓度范围内,外施生长调节剂有利于促进棉铃对位叶中蔗糖向库端的输送。

2.1.2 淀粉含量 棉铃对位叶淀粉含量随花后天数增加呈单峰曲线变化,峰值出现在花后 27~33 d (图 2)。随播种期推迟(5 月 25 日,南京试点和安阳试点棉铃发育期 MDT_{min} 分别为 20.9℃ 和 16.5℃),淀粉含量略有增加,峰值出现时间推迟。外源 6-BA 对两个播种期棉铃对位叶花后 9、15、21 和 27 d 淀粉含量影响均达显著水平($P < 0.05$),适宜播种期(4 月 25 日,南京试点和安阳试点棉铃发育期 MDT_{min} 分别为 24.7℃ 和 21.1℃)条件下,外源 ABA 对淀粉含量影响较小。晚播条件下(5 月 25 日,南京试点和安阳试点棉铃发育期 MDT_{min} 分别为 20.9℃ 和 16.5℃),外源 ABA 可提高棉铃对位叶淀粉含量,且对棉铃发育前期(花后 9~27 d)影响较大,其作用随花后天数的推进逐渐减小。两试点两个播种期(4 个温度梯度)条件下的结果均显示外源 6-BA 对棉铃对位叶淀粉含量的作用较为显著,而 ABA 对其影响较小。

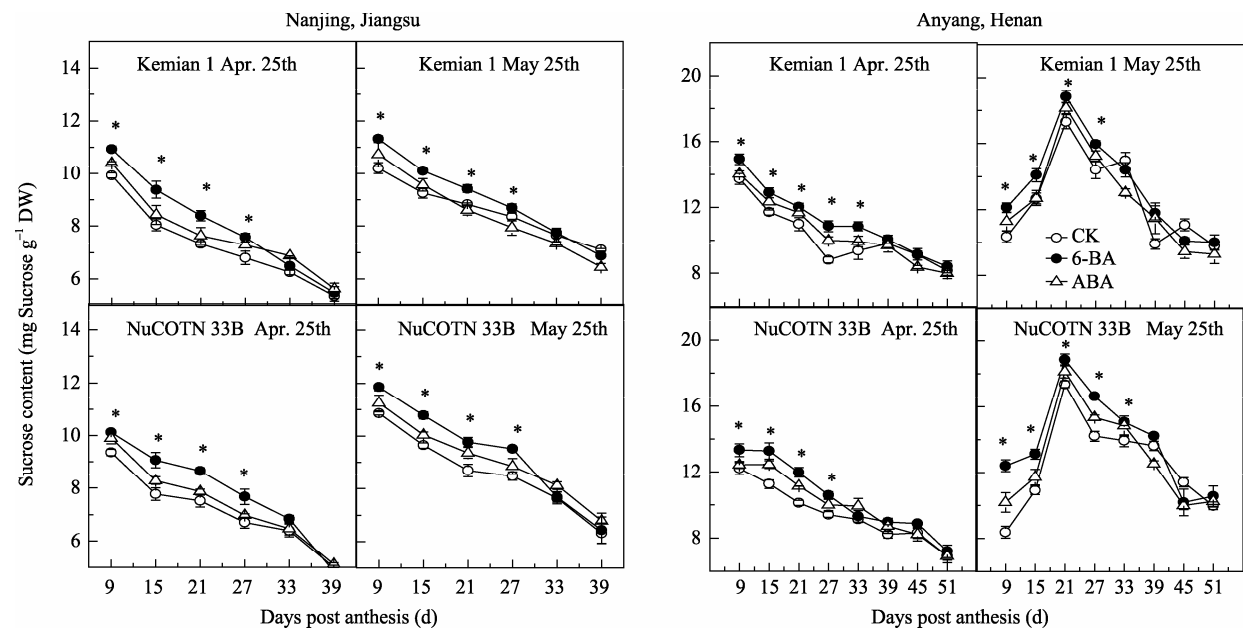


图 1 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉铃对位叶中蔗糖含量的影响
Fig. 1 Effect of 6-BA and ABA applications on sucrose content in the subtending leaf during boll development in cotton plant with different planting dates
Kemian1: 科棉 1 号; NuCOTN 33B: 美棉 33B。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。
* and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 2 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉铃对位叶蔗糖转化率(Tr, %)的影响
Table 2 Effect of 6-BA and ABA applications on sucrose transformation rate (Tr, %) in the subtending leaf of cotton plant with different planting dates

播种期 Planting date	生长调节剂 Plant growth regulator	江苏南京 Nanjing, Jiangsu		河南安阳 Anyang, Henan	
		科棉 1 号 Kemian 1	美棉 33B NuCOTN 33B	科棉 1 号 Kemian 1	美棉 33B NuCOTN 33B
Apr. 25th	对照 Control	46.17 ab	46.70 b	40.66 a	43.52 a
	6-BA	49.87 a	52.05 a	43.74 a	46.09 a
	ABA	45.85 b	48.32 b	42.89 a	44.99 a
May 25th	对照 Control	30.33 b	41.97 a	37.72 a	42.49 a
	6-BA	39.23 a	45.75 a	41.57 a	43.98 a
	ABA	39.74 a	39.75 a	43.40 a	43.36 a

同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。
Values followed by different letters in the same column are significantly different at the 0.05 probability level.

表 3 不同处理棉铃对位叶蔗糖转化率及棉花品质主要性状的方差分析
Table 3 Variance analysis of sucrose transformation rate and cotton quality

变异来源 Source of variance	蔗糖转化率 Tr (%)		长度 Length (mm)		比强度 Strength (cN tex ⁻¹)		麦克隆值 Micronaire values		籽指 Seed index (g 100-seed ⁻¹)		脂肪含量 Fat content (%)		蛋白质含量 Protein content (%)	
	NJ	AY	NJ	AY	NJ	AY	NJ	AY	NJ	AY	NJ	AY	NJ	AY
品种 Cultivar (C)	**	*	**	*	**	**	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
播期 Planting date (PD)	**	NS	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	*	**
生长调节剂 PGR	**	*	**	**	**	*	**	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
品种×播期 C×PD	*	NS	NS	NS	*	NS	**	NS	**	**	**	NS	NS	**
品种×调节剂 C×PGR	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	*	*	*	**
播期×调节剂 PD×PGR	NS	NS	NS	NS	NS	*	**	*	NS	NS	NS	NS	NS	**
品种×播期×调节剂 C×PD×PGR	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS	**	*	**	**

NJ: 江苏南京; AY: 河南安阳。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著; NS 表示在 0.05 水平上差异不显著。

PGR: plant growth regulator; NJ: Nanjing, Jiangsu; AY: Anyang, Henan。* and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively; NS: no significant difference (P>0.05)。

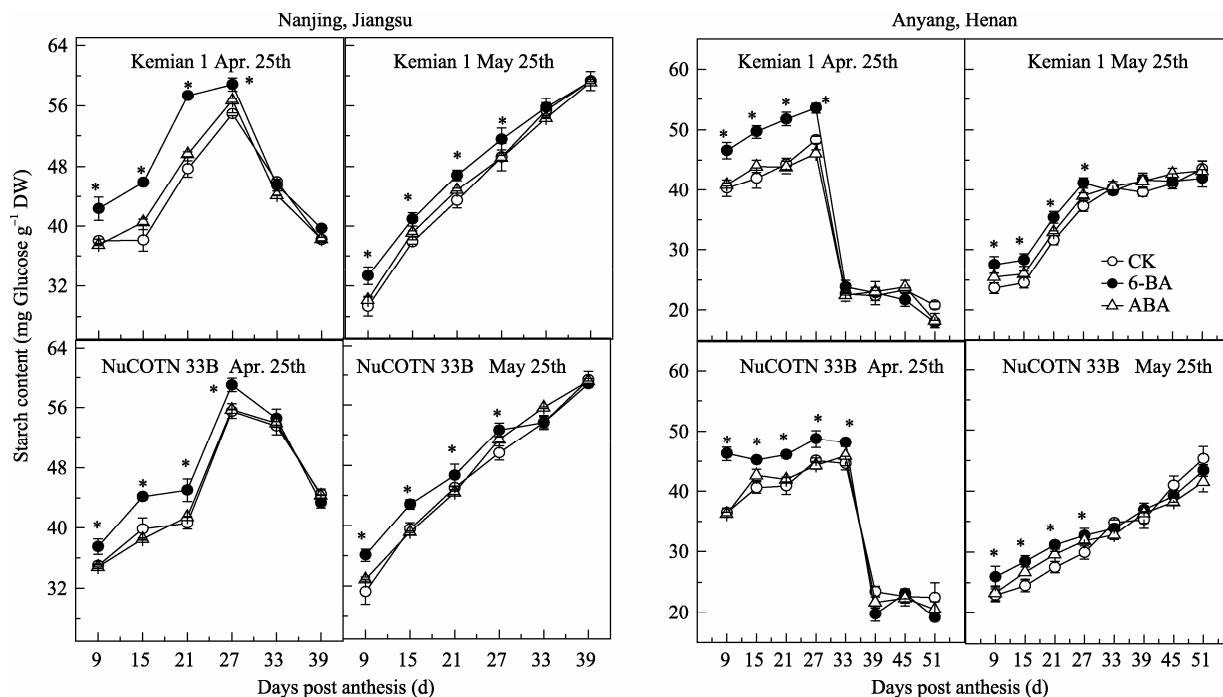


图 2 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期对位叶中淀粉含量的影响

Fig. 2 Effect of 6-BA and ABA applications on starch content in the subtending leaf during boll development at different planting dates

Kemian1: 科棉 1 号; NuCOTN 33B: 美棉 33B. *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。

* and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.2 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉铃对位叶内源激素含量的影响及其与光合产物含量的关系

2.2.1 内源激素含量 鉴于外源 6-BA 和 ABA 对花后 9、15、21 和 27 d 棉铃对位叶光合产物含量的影响较大, 故分析南京试点棉铃对位叶花后 9、15、21 和 27 d 内源激素含量的变化(安阳试点没有数据)。由表 4 可知, 适宜播种期(4 月 25 日)条件下, 外

源 6-BA 降低了棉铃对位叶内源 ABA 含量, 增加了内源 GA_3 、ZR 和 IAA 含量; 而外源 ABA 作用与 6-BA 相反, 降低了棉铃对位叶内源 GA_3 含量, 显著增加了内源 ABA 和 IAA 含量; 科棉 1 号和美棉 33B 变化趋势一致。播种期推迟(5 月 25 日, 南京试点棉铃发育期 MDT_{min} 为 $20.9^{\circ}C$), 外源 ABA 减小了棉铃对位叶内源 ABA 含量的增加幅度, 一定程度

表 4 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉铃对位叶中内源激素含量的影响(花后 9~27 d 均值比较, 江苏南京)

Table 4 Effect of 6-BA and ABA applications on endogenous hormone contents in the subtending leaf of cotton plant with different planting dates ($ng\ g^{-1}\ FW$)

PGR	科棉 1 号 Kemian 1								美棉 33B NuCOTN 33B							
	ABA	$\Delta\%$	GA_3	$\Delta\%$	ZR	$\Delta\%$	IAA	$\Delta\%$	ABA	$\Delta\%$	GA_3	$\Delta\%$	ZR	$\Delta\%$	IAA	$\Delta\%$
4 月 25 日播种 Planting on Apr. 25, 2006																
Control	49.7 b	—	5.2 ab	—	1.0 b	—	13.4 c	—	51.0 b	—	6.9 a	—	1.4 b	—	13.5 b	—
6-BA	46.5 b	-6.4	6.0 a	15.3	2.2 a	121.9	33.6 a	150.4	47.3 b	-7.2	7.4 a	7.1	1.8 a	28.9	23.4 a	73.4
ABA	63.8 a	28.3	4.9 b	-5.4	1.4 b	41.6	20.9 b	55.7	65.1 a	27.8	5.9 b	-14.9	1.4 b	0.6	18.5 ab	37.5
5 月 25 日播种 Planting on May 25, 2006																
Control	53.7 a	—	5.0 b	—	0.8 b	—	8.6 c	—	40.3 a	—	6.5 a	—	1.3 b	—	18.0 b	—
6-BA	44.2 b	-17.7	7.2 a	44.9	1.5 a	73.5	49.1 a	472.6	37.0 a	-8.2	6.6 a	0.3	1.8 a	43.7	26.0 a	44.7
ABA	56.7 a	5.5	2.8 c	-43.2	1.3 a	57.3	14.0 b	63.0	45.5 a	12.8	6.1 a	-6.9	1.7 ab	31.8	18.9 b	5.4

PGR: 生长调节剂; ABA: 脱落酸; GA_3 : 赤霉素; ZR: 玉米素核苷; IAA: 吲哚乙酸。同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

ABA: abscisic acid; GA_3 : gibberellin; ZR: zeatin riboside; IAA: 3-indoleacetic acid. Values followed by different letters in the same column are significantly different at the 0.05 probability level. $\Delta\% = [\text{treatment (6-BA or ABA)} - \text{Control}] \times 100 / \text{Control}$.

上减缓了叶片衰老; 外源 6-BA 和 ABA 对科棉 1 号棉铃对位叶 IAA 增加幅度和 ABA 含量的降低幅度更大, 且在晚播条件下作用更明显。

2.2.2 内源激素含量与光合产物含量的相关性分析

由表 5 可知, 棉铃对位叶蔗糖含量与内源 ABA 含量显著负相关, 与内源 GA_3 含量、 GA_3/ABA 、 $(GA_3+ZR)/ABA$ 和 IAA/ABA 显著正相关; 而棉铃对位叶淀粉含量与内源 ABA 含量、ZR 含量和 ZR/ABA 显著正相关, 与内源 GA_3 含量、 GA_3/ABA 和

$(GA_3+ZR)/ABA$ 显著负相关($P<0.01$)。

2.3 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉花产量及产量构成因素的影响

与适宜播种期相比, 播种期推迟(5 月 25 日, 南京试点和安阳试点棉铃发育期 MDT_{min} 分别为 20.9℃和 16.5℃)使棉花单株铃数、铃重、衣分和皮棉产量均明显下降, 外源 6-BA、ABA 对不同播种期棉花产量及产量构成的影响不同(表 6)。外源 6-BA 对不同播种期(4 月 25 日和 5 月 25 日)棉花单株铃数、

表 5 棉铃对位叶内源激素与光合产物含量的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between endogenous hormones and photosynthate contents in the subtending leaf

光合产物 Photosynthate	ABA	GA_3	ZR	IAA	GA_3/ABA	ZR/ABA	$(GA_3+ZR)/ABA$	IAA/ABA
蔗糖 Sucrose	-0.567**	0.390**	-0.040	0.226	0.589**	-0.280	0.588**	0.421**
淀粉 Starch	0.634**	-0.324*	0.380**	0.049	-0.578**	0.460**	-0.531**	-0.200

ABA: 脱落酸; GA_3 : 赤霉素; ZR: 玉米素核苷; IAA: 吲哚乙酸; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

ABA: abscisic acid; GA_3 : gibberellin; ZR: zeatin riboside; IAA: 3-indoleacetic acid. * and ** mean significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. $R_{0.05} = 0.576$, $R_{0.01} = 0.707$.

表 6 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉花产量及产量构成的影响和效应值分析

Table 6 Effect of 6-BA and ABA applications on cotton yield, and yield components in cotton plants with different planting dates and their effect indices (EI)

播种期 Planting date	生长调节剂 Plant growth regulator	江苏南京 Nanjing, Jiangsu				河南安阳 Anyang, Henan			
		单株铃数 Bolls per plant	铃重 Boll weight (g)	衣分 Lint percentage (%)	皮棉产量 Lint yield (kg hm ⁻²)	单株铃数 Bolls per plant	铃重 Boll weight (g)	衣分 Lint percentage (%)	皮棉产量 Lint yield (kg hm ⁻²)
科棉 1 号 Kemian 1									
Apr. 25th	Control	21.1 ab	5.37 b	41.3 a	1955 b	21.3 ab	5.61 b	37.8 a	2021 b
	6-BA	22.1 a	5.82 a	41.1 a	2206 a	22.4 a	6.04 a	37.2 a	2289 a
	ABA	20.5 b	5.48 b	41.4 a	1938 b	19.3 b	5.75 b	37.9 a	1912 b
	EI _{6-BA}	4.74	8.38	—	12.84	5.02	7.66	—	13.28
	EI _{ABA}	-2.84	2.05	—	-0.87	-9.53	2.50	—	-5.39
May 25th	Control	16.6 ab	5.16 b	43.2 a	1539 b	16.6 ab	5.45 b	38.1 a	1581 ab
	6-BA	17.0 a	5.32 a	42.3 b	1599 a	17.3 a	5.71 a	36.9 b	1681 a
	ABA	16.2 b	5.05 c	42.1 b	1438 c	15.7 b	5.21 c	36.0 b	1499 b
	EI _{6-BA}	2.41	3.10	—	3.90	4.40	4.77	—	6.29
	EI _{ABA}	-2.41	-2.13	—	-6.56	-5.42	-4.40	—	-5.19
美棉 33 NuCOTN 33B									
Apr. 25th	Control	19.6 a	4.81 c	38.4 a	1506 ab	19.0 ab	5.27 b	35.9 a	1536 b
	6-BA	19.9 a	5.18 a	36.9 b	1585 a	19.3 a	5.44 a	34.7 b	1705 a
	ABA	19.0 b	4.97 b	37.7 a	1486 b	18.3 b	5.34 ab	34.7 b	1386 c
	EI _{6-BA}	1.53	7.69	—	5.25	1.58	3.23	—	11.00
	EI _{ABA}	-3.06	3.33	—	-1.33	-3.69	1.33	—	-9.77
May 25th	Control	15.8 ab	4.46 b	39.7 a	1172 ab	14.0 b	5.06 b	37.6 a	1166 b
	6-BA	16.4 a	4.64 a	38.9 a	1230 a	16.2 a	5.22 a	36.3 b	1289 a
	ABA	15.2 b	4.41 b	40.4 a	1126 b	13.7 b	4.99 b	37.4 ab	1107 b
	EI _{6-BA}	3.80	4.04	—	4.95	15.71	3.16	—	10.55
	EI _{ABA}	-3.80	-1.12	—	-3.92	-2.36	-1.38	—	-5.06

效应因子 EI = [Treatment (6-BA 或 ABA) - Control] × 100 / Control, 当 EI > 0 时为正效应, 当 EI < 0 时为负效应, 且 EI 绝对值越大, 其影响程度越大。—: 表示未计算外施 6-BA 和 ABA 对棉花衣分的效应因子。同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

EI = [Treatment (6-BA 或 ABA) - Control] × 100 / Control; 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. “—” means no data in EI of cotton lint percentage. Values followed by different letters in the same column are significantly different at the 0.05 probability level.

铃重和皮棉产量的影响均为正效应, 而外源 ABA 对不同播种期棉花产量及产量构成因素的效应不一致: 适宜播种期下, 外源 ABA 对棉花单株铃数和皮棉产量影响为负效应, 对铃重的影响为正效应; 晚播低温条件下(5 月 25 日, 南京试点和安阳试点棉铃发育期 MDT_{min} 分别为 20.9℃和 16.5℃), 外源 ABA 对棉花产量构成三因素影响均表现为负效应, 但未达到显著水平($P>0.05$)。分析效应值的绝对值可知, 播种期推迟降低了外源 6-BA 对棉花产量构成三因素的促进作用和 ABA 对棉花单株铃数的抑制作用, 但播种期推迟使外施 ABA 对棉花铃重影响由促进转为抑制作用。两试点和两品种的研究结果趋势一致。此外, 外源 6-BA 和 ABA 对棉花产量和铃重的调节效应最大, 而产量与单株铃数、铃重和种植密度有关。品种间比较发现, 与中强纤维品种美棉 33B 相比, 高强纤维品种科棉 1 号产量、铃重在 6-BA 和 ABA 处理间变化幅度较大, 衣分变化幅度较小。

2.4 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉纤维主要品质性状的影响

品种、播种期和生长调节剂对棉纤维主要品质性状的影响均达显著或极显著水平(表 3 和表 7), 纤维比强度和麦克隆值受品种与播种期及播种期与生长调节剂互作效应的影响最大。外源 6-BA 和 ABA 对纤维整齐度的影响较小。进一步分析棉纤维长度、比强度和麦克隆值的变化发现(表 7), 随播种期推迟, 纤维长度和比强度降低, 麦克隆值升高。适宜播种期(4 月 25 日)条件下, 外源 6-BA、ABA 对纤维比强度和麦克隆值的影响较小, 但外源 6-BA 可增加纤维长度, 外源 ABA 的作用则相反。与适宜播种期(4 月 25 日)相比, 随播种期推迟, 清水对照、6-BA、ABA 处理的棉纤维比强度南京试点(棉铃发育期日均最低温由 24.7℃降为 20.9℃)分别下降 13.28%、6.01%和 10.92%, 安阳试点(棉铃发育期日均最低温由 21.1℃降为 16.2℃)分别下降 11.50%、8.73%和 9.15%; 棉纤维长度南京试点分别下降 2.34%、-0.43%和 3.68%, 安阳试点分别下降 3.21%、2.28%和 2.99%。同时, 外源 6-BA、ABA 降低了棉纤维麦克隆值, 使其接近 3.9~4.6 范围。因此, 晚播低温下外源 6-BA、ABA 可显著减小棉纤维比强度的降低幅度, 优化棉纤维麦克隆值, 外源 6-BA 还可减小棉纤维长度的降低幅度。品种间比较发现, 外源 6-BA 和 ABA 对高强纤维品种科棉 1 号棉纤维主要品质性状的影响程度较对中强纤维品种美棉 33B 大。两试点研究结

果一致。

2.5 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉籽主要品质性状的影响

播种期对棉籽主要品质性状的影响均达显著或极显著水平(表 3 和表 8)。籽指受品种与播种期互作效应影响较大, 棉籽蛋白质含量和脂肪含量受品种与生长调节剂及品种、播种期与生长调节剂三因素互作效应的影响最大, 且南京和安阳 2 个试点表现趋势一致。进一步分析棉籽籽指、蛋白质含量和脂肪含量发现, 随播种期推迟, 南京试点外源 6-BA 和 ABA 对两品种棉籽各品质性状的影响不显著。

3 讨论

棉花具有无限开花结铃习性, 生长后期低温影响了棉花产量和品质^[3]。为模拟自然低温对棉铃发育的影响, 许多种植棉区采用播种期代替人工气候室来研究温度对棉铃发育的影响^[3,24]。在众多气象因子中, 在棉纤维发育间主要受温度影响^[24], 且 MDT_{min} 在播种期间的变异幅度最大^[25], 可作为影响棉铃对位叶蔗糖代谢和棉花品质的主要环境影响因子。有关温度(播种期)对棉花品质的影响已有较多研究, 普遍认为低温影响棉纤维、棉籽生理代谢过程, 铃重降低, 棉纤维、棉籽品质变劣^[1,3,26]。化学调控是棉花优质高产栽培中的重要手段, 在低温下外源生长调节剂(6-BA 和 ABA)可使棉纤维素的快速累积起始时间和终止时间提前, 最终纤维比强度提高^[27]。然而棉铃发育所需的养分(约 60%~87%)主要来自棉铃对位叶^[6-7], 有关外源 6-BA 和 ABA 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。

植物生长调节剂在调控植物的光合作用、碳水化合物的运输与分配等方面都具有重要作用^[17,28]。本研究结果表明, 棉铃对位叶蔗糖含量与内源 ABA 含量显著负相关, 与内源 GA_3 含量、 GA_3/ABA 、 $(GA_3+ZR)/ABA$ 和 IAA/ABA 显著正相关; 而棉铃对位叶淀粉含量与内源 ABA 含量、ZR 含量和 ZR/ABA 显著正相关, 与内源 GA_3 含量、 GA_3/ABA 和 $(GA_3+ZR)/ABA$ 显著负相关($P<0.01$)。说明在棉铃对位叶光合同化物运转中, IAA 和 GA_3 能促进蔗糖合成并向韧皮部装载^[29], 而 ABA 有利于棉铃对位叶光合同化物的输出并向棉铃分配^[14]。这与前人的研究结果一致^[14,29]。

外源 6-BA 能够显著提高棉花叶片细胞分裂素

表 7 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉纤维品质主要性状的影响

Table 7 Effect of 6-BA and ABA applications on fiber properties in cotton plants with different planting dates

生长调节剂 Plant growth regulator	江苏南京 Nanjing, Jiangsu						河南安阳 Anyang, Henan					
	长度 Length (mm)		比强度 Strength (cN tex ⁻¹)		麦克隆值 Micronaire values		长度 Length (mm)		比强度 Strength (cN tex ⁻¹)		麦克隆值 Micronaire values	
	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B
4 月 25 日播种	Planting on Apr. 25, 2006											
Control	28.4 b	27.6 ab	35.5 a	32.7 a	4.3 a	3.9 a	29.9 ab	29.2 ab	34.1 a	30.5 b	4.3 ab	3.9 a
6-BA	29.5 a	28.0 a	35.1 a	32.9 a	4.6 a	4.1 a	31.2 a	30.2 a	34.1 a	33.7 a	4.5 a	4.0 a
ABA	27.9 b	26.9 b	35.5 a	32.6 a	4.2 a	3.9 a	28.3 b	28.6 b	33.0 a	32.3 a	4.2 b	3.9 a
5 月 25 日播种	Planting on May 25, 2006											
Control	28.0 ab	26.7 b	31.6 ab	29.0 ab	4.8 a	4.6 a	28.8 ab	28.4 b	33.9 a	31.7 a	4.8 a	4.5 a
6-BA	28.8 a	27.4 a	30.8 b	28.2 b	4.4 b	4.1 a	30.4 a	29.6 a	31.9 a	28.1 ab	4.4 ab	4.1 b
ABA	27.7 b	26.2 c	33.5 a	30.4 a	4.3 b	4.2 a	28.2 b	27.0 c	31.6 a	28.0 b	4.2 b	4.3 ab

Kemian 1: 科棉 1 号; NuCOTN 33B: 美棉 33B。同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Values followed by different letters in the same column are significantly different at the 0.05 probability level.

表 8 外源 6-BA 和 ABA 对不同播种期棉籽品质主要性状的影响

Table 8 Effect of 6-BA and ABA applications on cottonseed properties in cotton plants with different planting dates

生长调节剂 Plant growth regulator	江苏南京 Nanjing, Jiangsu						河南安阳 Anyang, Henan					
	籽指		脂肪含量		蛋白质含量		籽指		脂肪含量		蛋白质含量	
	Seed index (g 100-seed ⁻¹)		Fat content (%)		Protein content (%)		Seed index (g 100-seed ⁻¹)		Fat content (%)		Protein content (%)	
	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B	Kemian 1	NuCOTN33B
4 月 25 日播种	Planting on Apr. 25, 2006											
Control	11.67 a	11.91 b	20.08 a	18.62 b	27.46 a	23.27 b	11.84 a	11.27 a	15.22 ab	14.08 b	23.89 a	20.03 b
6-BA	11.61 a	11.82 b	18.20 b	20.12 ab	23.69 b	26.35 a	11.52 a	10.66 a	14.21 b	16.12 a	22.15 ab	23.58 a
ABA	11.12 b	12.77 a	18.42 b	21.52 a	23.29 b	26.92 a	11.49 a	11.33 a	15.63 a	14.31 ab	21.09 b	18.39 b
5 月 25 日播种	Planting on May 25, 2006											
Control	9.77 a	8.92 b	19.22 a	18.45 a	23.84 a	24.63 a	9.79 a	10.01 a	11.14 b	11.74 a	12.16 b	14.98 ab
6-BA	9.66 a	9.27 a	19.06 a	17.18 a	24.01 a	24.13 a	9.69 a	10.19 a	10.47 b	9.88 a	11.65 b	16.60 a
ABA	9.82 a	9.20 ab	18.71 a	17.58 a	24.16 a	23.96 a	10.05 a	10.16 a	12.41 a	10.54 a	18.68 a	14.44 b

Kemian 1: 科棉 1 号; NuCOTN 33B: 美棉 33B。同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Values followed by different letters in the same column are significantly different at the 0.05 probability level.

含量、降低 ABA 含量,与 GA_3 /ABA 显著正相关,使棉花叶片衰老缓慢,功能期较长,制造光合产物较多,蔗糖转化率高,棉铃中纤维素含量高^[27]。因此,外源 6-BA 处理的棉铃对位叶光合产物合成量较大,源库协调性较好,棉花产量较高,纤维和棉籽品质较好;而外源 ABA 虽然降低棉花叶片细胞分裂素含量、提高 ABA 含量,加快棉花叶片衰老^[30],但在本试验设置的剂量、浓度条件下,亦增加了棉铃对位叶蔗糖转化率,且外源 6-BA 使 2 个播种期棉花均增产。在植物生长发育过程中,任何一种生理过程往往不由某一种激素单独起作用,而是由多种激素相互作用,外源 6-BA 在促进植株生长的同时可降低其抗逆能力^[31],导致在适宜播种期条件下棉花增产效果更加明显。外源 6-BA 和 ABA 提高棉花铃重,这与前人研究结果相一致^[32-33]。也有研究表明外源 ABA 对小麦叶片蔗糖合成酶活性没有影响,但外源 6-BA 和 ABA 可降低小麦和葡萄叶片蔗糖含量、淀粉含量和蔗糖转化率^[33-34],水稻籽粒重也有所降低^[32],这可能是试验采用 6-BA 和 ABA 的浓度或喷施方式不同造成的。

本研究中,尽管晚播条件下外源 6-BA 和 ABA 均可提高棉铃对位叶蔗糖转化率和相对棉纤维品质,但两者的作用机制存在异同。相同之处是,在晚播低温条件下,外源 6-BA 和 ABA 均可提高棉铃对位叶蔗糖含量和淀粉含量,且作用随棉铃发育进程而不断减弱,在花后 33 d 后影响不显著;均可使棉花铃重和最终纤维比强度在晚播条件下降低幅度提高;均对两试点两品种棉籽主要品质(籽指、蛋白质含量和脂肪含量)的影响不显著。不同之处是,在试验设置的剂量、浓度条件下,6-BA 可显著提高棉铃对位叶蔗糖含量、蔗糖转化率和淀粉含量,而 ABA 主要协调内源激素平衡;外源 6-BA 使棉花单株铃数增加和皮棉产量提高,且在晚播条件下各指标增加幅度降低,而外源 ABA 则使棉花单株铃数和皮棉产量降低,且在晚播条件下各指标降低幅度减少;外源 6-BA 使棉纤维最终长度增加,而外源 ABA 则使棉纤维最终长度降低。细胞分裂素 6-BA 作为一种重要的生长促进类激素,在促进细胞呼吸代谢及“源”活性过程中作用显著^[35]。本研究表明,外源 6-BA 可显著提高介导叶片“源”活性的蔗糖转化率,且外源 6-BA 处理后棉花单铃重显著增加,因此,推测外源 6-BA 可通过提高棉铃对位叶“源”活性、增加蔗糖从源向库的运输从而提高晚播条件下的棉纤维品质。

ABA 作为最重要的逆境激素信号,可对各种逆境胁迫做出迅速反应^[36],本试验发现,晚播条件下 ABA 可显著提高棉铃对位叶中内源 ABA 含量,因此,推测晚播条件下 ABA 处理后纤维品质下降幅度减小主要是通过外源 ABA 调节内源激素平衡,从而提高了植株抗逆性。这一结果为探索低温下纤维品质的调控途径提供了很好的思路,对指导低温下的棉花高产优质生产具有重要意义,但由于 ABA 生产成本高、稳定性差,且在植物体内会快速代谢失活,对成功应用于生产上还有一定距离,有待研发 ABA 结构类似物应用于大田生产。

4 结论

晚播条件下外源 6-BA 显著提高棉铃对位叶蔗糖含量和转化率及淀粉含量,促进光合产物向棉铃及纤维的运输,从而提高棉花单铃重、产量及纤维品质,而外源 ABA 调节棉铃对位叶内源激素平衡并提高物质再利用能力从而相对促进棉花单铃的形成和纤维素的高效合成,降低棉纤维比强度的下降幅度。

References

- [1] Davidonis G H, Johnson A S, Landivar J A, Fernandez C J. Cotton fiber quality is related to boll location and planting date. *Agron J*, 2004, 96: 42–47
- [2] Shan S-H(单世华), Shi P(施培), Sun X-Z(孙学振), Zhou Z-G(周治国), Bian D-C(边栋材). Effect of anthesis date and fruiting branches on cotton fiber qualities and super-molecular structure. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2002, 35(2): 163–168 (in Chinese with English abstract)
- [3] Dong H, Li W, Tang W, Li Z, Zhang D, Niu Y. Yield, quality and leaf senescence of cotton grown at varying planting dates and plant densities in the Yellow River Valley of China. *Field Crops Res*, 2006, 98: 106–115
- [4] Haigler C H, Rao N R, Roberts E M, Huang J Y, Upchurch D R, Trolinder N L. Cultured ovules as models for cotton fiber development under low temperatures. *Plant Physiol*, 1991, 95: 88–96
- [5] Dong Z-Q(董志强), Shu W-H(舒文华), Zhai X-J(翟学军), Zhang B-M(张保明), Liu F(刘芳), Song G-Q(宋国琦). The change and relationship of several endogenesis hormone in different organs of cotton plant. *Acta Agric Nucl Sin* (核农学报), 2005, 19(1): 62–67 (in Chinese with English abstract)
- [6] Ashley D A. ¹⁴C-labeled photosynthate translocation and

- utilization in cotton plant. *Crop Sci*, 1972, 12: 69–74
- [7] Constable G, Rawson H. Carbon production and utilization in cotton: Inferences from a carbon budget. *Funct Plant Biol*, 1980, 7: 539–553
- [8] Else M A, Tiekstra A E, Croker S J, Davies W J, Jackson M B. Stomatal closure in flooded tomato plants involves abscisic acid and a chemically unidentified anti-transpirant in xylem sap. *Plant Physiol*, 1996, 112: 239–247
- [9] Wang Y Y, Zhou R, Zhou X. Endogenous levels of aba and cytokinins and their relation to stomatal behavior in dayflower (*Commelina communis* L.). *J Plant Physiol*, 1994, 144: 45–48
- [10] Battal P, Erez M E, Turker M, Berber I. Molecular and physiological changes in maize (*Zea mays*) induced by exogenous NAA, ABA and MaJA during cold stress. *Ann Bot Fenn*, 2008, 45: 173–185
- [11] Khadri M, Tejera N A, Lluch C. Sodium chloride-ABA interaction in two common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars differing in salinity tolerance. *Environ Exp Bot*, 2007, 60: 211–218
- [12] Kumar B, Pandey D M, Goswami C L, Jain S. Effect of growth regulators on photosynthesis, transpiration and related parameters in water stressed cotton. *Biol Plant*, 2001, 44: 475–478
- [13] Shen F-F(沈法富), Yu S-X(喻树迅), Fan S-L(范术丽), Li J(李静), Huang Z-M(黄祯茂). Changes of endogenous hormone in stem leaves of different short season cotton varieties in development processes. *Sci Agric Sin (中国农业科学)*, 2003, 36(9): 1014–1019 (in Chinese with English abstract)
- [14] Guinn G, Brummett D L. Leaf age, decline in photosynthesis, and changes in abscisic acid, indole-3-acetic acid, and cytokinin in cotton leaves. *Field Crops Res*, 1993, 32: 269–275
- [15] Zheng S-S(郑莎莎), Sun C-F(孙传范), Sun H-C(孙红春), Liu L-T(刘连涛), Zhao J-F(赵金峰), Li C-D(李存东). Effects of different exogenous hormones on physiological characteristics of main stem leaves at flower and boll stage in cotton. *Sci Agric Sin (中国农业科学)*, 2009, 42(12): 4383–4389 (in Chinese with English abstract)
- [16] Clifford P E, Offler C E, Patrick J W. Growth regulators have rapid effects on photosynthate unloading from seed coats of *phaseolus vulgaris* l. *Plant Physiol*, 1986, 80: 635–637
- [17] Brenner M L, Cheikh N. The Role of Hormones in Photosynthate Partitioning and Seed Filling. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995
- [18] Yang Y M, Xu C N, Wang B M, Jia J Z. Effects of plant growth regulators on secondary wall thickening of cotton fibres. *Plant Growth Regul*, 2001, 35: 233–237
- [19] Zhang X(张祥), Xiao J(肖建), Luan N(栾娜), Wang Y-H(王永慧), Yang Z-H(杨朝华), Chen Y(陈源), Chen D-H(陈德华). Characteristics of fiber quality in cotton development and its regulation by hormone in two natural colored-cotton cultivars *Acta Agron Sin (作物学报)*, 2009, 33(5): 907–913 (in Chinese with English abstract)
- [20] Hendrix D L. Rapid extraction and analysis of nonstructural carbohydrates in plant tissues. *Crop Sci*, 1993, 33: 1306–1311
- [21] Seifter S, Dayton S, Novic B, Muntwyler E. The estimation of glycogen with the anthrone reagent. *Arch Biochem*, 1950, 25: 191–200
- [22] Luque de Castro M D, Garcia-Ayuso L E. Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future. *Analyt Chim Acta*, 1998, 369: 1–10
- [23] Feil B M, Moser S B, Jampatong S, Stamp P. Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization. *Crop Sci*, 2005, 45: 516–523
- [24] Zheng M, Wang Y, Liu K, Shu H, Zhou Z. Protein expression changes during cotton fiber elongation in response to low temperature stress. *J Plant Physiol*, 2012, 169: 399–409
- [25] Shu H-M(束红梅), Zhao X-H(赵新华), Zhou Z-G(周治国), Zheng M(郑密), Wang Y-H(王友华). Physiological mechanisms of variation in temperature-sensitivity of cotton fiber strength formation between two cotton cultivars. *Sci Agric Sin (中国农业科学)*, 2009, 42(7): 2332–2341 (in Chinese with English abstract)
- [26] Li W F, Zhou Z G, Meng Y L, Xu N Y, Fok M. Modeling boll maturation period, seed growth, protein, and oil content of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in China. *Field Crops Res*, 2009, 112: 131–140
- [27] Wang Y-H(王友华), Liu J-J(刘佳杰), Chen B-L(陈兵林), Zhou Z-G(周治国). Physiological mechanisms of growth regulators 6-BA and ABA in mitigating low temperature stress of cotton fiber development. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 2011, 22(5): 1233–1239 (in Chinese with English abstract)
- [28] Ookawa T, Naruoka Y, Sayama A, Hirasawa T. Cytokinin effects on Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and nitrogen partitioning in rice during ripening. *Crop Sci*, 2004, 44: 2107–2115
- [29] Duan L-S(段留生). Effect of alteration of source-sink relationship on endogenous hormones in cotton leaves. *Acta Bot Boreal (西北植物学报)*, 1999, 19(6): 116–121 (in Chinese with English abstract)
- [30] Shen F-F(沈法富), Yu S-X(喻树迅), Fan S-L(范术丽), Li J(李

- 静), Huang Z-M(黄祯茂). The relationship between hormone and membrane lipid peroxidation in cotton leaf during senescence. *J Plant Physiol Mol Biol* (植物生理与分子生物学学报), 2003, 29(6): 589–592 (in Chinese with English abstract)
- [31] Bubán T. The use of benzyladenine in orchard fruit growing: a mini review. *Plant Growth Regul*, 2000, 32: 381–390
- [32] Yang J-C(杨建昌), Wang Z-Q(王志琴), Zhu Q-S(朱庆森), Su B-L(苏宝林). Regulation of ABA and GA to the grain filling of rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1999, 25(3): 341–348 (in Chinese with English abstract)
- [33] Huang W-D(黄卫东), Zhang P(张平), Li W-Q(李文清). The effects of 6-BA on the fruit development and transportation of carbon and nitrogen assimilates in grape. *Acta Horti Sin* (园艺学报), 2002, 29(4): 303–306 (in Chinese with English abstract)
- [34] Ahmadi A, Baker D A. Effects of abscisic acid (ABA) on grain filling processes in wheat. *Plant Growth Regul*, 1999, 28: 187–197
- [35] Zhang H-N(张海娜), Li C-D(李存东), Xiao K(肖凯). Regulation effects of exogenous 6-BA on photosynthesis and leaf senescence in cotton. *Cotton Sci* (棉花学报), 2007, 19(6): 467–471 (in Chinese with English abstract)
- [36] Neill S J, Desikan R, Clarke A, Hancock J T. Nitric oxide is a novel component of abscisic acid signaling in stomatal guard cells. *Plant Physiol*, 2002, 128: 13–16