

棕色棉和白色棉纤维发育相关酶活性的比较研究

陈允峰,王亚男,林毅*,蔡永萍,李廷春,李正鹏,樊洪泓

(安徽农业大学生命科学学院,合肥 230036)

摘要:选择深棕、中棕、浅棕 3 个棕色棉品系,以白色棉品种为对照,测定棉铃发育各阶段纤维发育相关酶的活性变化,探讨纤维发育相关酶对棕色棉纤维品质的影响。结果表明,棕色棉的绒长、衣指、衣分低于白色棉;纤维发育过程中,棕色棉纤维伸长速率低于白色棉,纤维伸长停止早(30 DPA 左右),而白色棉纤维伸长期较长(35 DPA 左右);纤维发育期棕色棉纤维素累积速率低于白色棉,快速累积期短(25 DPA),纤维素含量低于白色棉;纤维发育前期(20 DPA),棕色棉的蔗糖合成酶(SS)活性显著低于白色棉,而过氧化物酶(POD)和吲哚乙酸氧化酶(IAAO)活性高于白色棉;纤维发育后期(25 DPA),棕色棉的 β -1,3-葡聚糖酶、POD 活性显著低于白色棉。

关键词:棕色棉;纤维品质;蔗糖合成酶; β -1,3-葡聚糖酶;过氧化物酶

中图分类号:S562.01 **文献标识码:**A

文章编号:1002-7807(2010)03-0236-06

Comparison of Relative Enzymes Activities during Fiber Development Period between Brown and White Fiber Cotton Cultivars

CHEN Yun-feng, WANG Ya-nan, LIN Yi*, CAI Yong-ping, LI Ting-chun, LI Zheng-peng, FAN Hong-hong
(Life Science School, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: This experiment was carried out to study the effect of relative enzymes activities on brown cotton fiber qualities, three kinds of brown cottons (dark brown, mid-brown and light brown) were used to detect the dynamics of relative enzymes activities in contrast with one white cotton. The results showed that the length of fiber, lint weight and lint percentage of brown cotton were lower than white cotton. During the fiber development, the elongation rate of brown cotton was lower and the elongation term was shorter than white cotton. Comparing with white cotton, brown cotton had shorter term, lower cellulose accumulation rate and cellulose content for fiber. At the early periods of fiber development, SS activity was lower in brown fiber, while POD and IAAO activities were higher. At the later periods of fiber development, β -1, 3-glucanase and POD activities were lower in brown fiber.

Key words: brown cotton; fiber quality; SS; β -1, 3-glucanase; POD

棕色棉是指棉纤维本身具有天然棕色的棉花,在深加工过程中不需要漂白染色,具有较高的经济和生态效益。与白色棉相比较,棕色棉纤维素含量低,半纤维素含量高,表现为纤维长度短,强度偏低,克隆值、整齐度、灰分率等都低于白色棉^[1]。由于棕色棉品质较差,纺纱过程中落棉率较高,纺纱原料消耗高,因而直接影响到生产成本。从棕色棉与白色棉的形态差异推断,棕色棉在纤维发育过程中伴随有色素物质的合成,

纤维在发育过程中,用于合成纤维素的一部分物质被用于色素的形成与积累,所以棕色棉纤维素的积累不充分^[2]。

有研究者对棕色棉和白色棉的纤维发育进行了比较,发现棕色棉的纤维伸长期短,伸长速率较低,伸长停止早,这是棕色棉纤维短的主要原因之一^[3]。还有研究表明,白色棉发育到开花后 20 d 左右,纤维素大量合成并积累,而棕色棉在这一时期,纤维素合成的同时伴有色素物质的积

累,其增加速率明显不如白色棉快,导致棕色棉纤维素含量低^[4]。

在纤维素的生物合成中,蔗糖合成酶(SS)可降解蔗糖,为纤维素的合成提供底物^[5-6]。棉纤维加厚发育起始期,纤维素大量累积的同时,非纤维素物质 β -1,3-葡聚糖的含量也急剧增加,两者的合成竞争相同底物。棉纤维加厚发育中后期,绝大部分 β -1,3-葡聚糖在 β -1,3-葡聚糖酶的作用下被降解转化,产生的物质可用于纤维素的合成,即 β -1,3-葡聚糖对纤维素的合成和累积有一定的调节作用^[7-9]。棉纤维原始细胞突起和伸长发育与激素水平紧密联系,吲哚乙酸氧化酶(IAAO)分解生长素抑制纤维的伸长。过氧化物酶(POD)活性是促进细胞壁伸展的重要因素^[10]。因而两者对纤维素合成、纤维伸长及次生壁加厚发育等生理过程都具有一定的调控作用^[11]。

目前,对棕色棉产量较低,品质较差的机理研究较少,也有一些关于棉纤维发育相关酶动态变化的报道^[12-14],但关于棕色棉方面的研究报道仍很少见。本研究通过棕色棉纤维发育过程中相关酶活性动态变化的研究,分析棕色棉品质较差的原因,以期为探究棕色棉品质形成的机理提供一定的参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验以深棕 ANL-1,中棕 ANL-1,浅棕 ANL-2 三种棕色棉品系为材料(中棕 ANL-1,浅棕 ANL-2 是深棕 ANL-1 自交选育出来的近等基因型),以白色棉品种泗棉 3 号为对照。大田种植,常规管理。2009 年 7 月 5—20 日期间的下午 3:00—5:00,根据每个品种发育进程,选择发育正常、无病虫害植株的中上部果枝,对当日开花棉桃进行挂牌,每个品种从小区随机选取不同单株在 3 d 内挂牌。挂牌后第 5 d 起开始取样,以后每隔 5 d 取一次,每次选取大小均匀的棉铃 10 个,保存于 -70°C 冰箱用于以下测定。

1.2 测定项目及方法

样品制备:取出棉铃待稍稍解冻后,解剖棉铃取出胚珠,放置培养皿于冰浴中。5 DPA(花后天数,days post anthesis)的棉纤维较幼嫩,用镊子

轻轻夹住合点端,再用钝刀片从种子上刮取。10 DPA 之后的棉纤维用镊子小心分离拔取。快速称取后用于以下测定。每次测定重复 3 次。

1.2.1 蔗糖合成酶(SS)活性的测定。参照上海植物生理学会的方法^[15]提取和测定。称取 0.5 g 纤维,加 4 倍量提取缓冲液($100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl, $\text{pH}7.0$; $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2 ; $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA; 2% 乙二醇; $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 巯基乙醇)冰浴研磨,低温离心取上清粗酶液,用果糖和 UDPG 比色法测定蔗糖的生成。以不同浓度的蔗糖所测得的结果,绘制蔗糖标准曲线以计算酶反应中蔗糖形成的数量,蔗糖合成酶的活力均以每克鲜重纤维中每分钟生成 1 mmol 蔗糖表示。

1.2.2 β -1,3-葡聚糖酶活性的测定。参照史益敏^[15]和余永廷的方法^[16]进行。将 0.5 g 纤维加 5 倍量 $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的乙酸钠缓冲液($\text{pH}5.0$)冰浴研磨,低温离心取上清粗酶液,采用 DNS 法测定从昆布多糖中释放出的还原糖。一个酶活单位为每克鲜重纤维中每分钟分解底物昆布多糖产生 $1\text{ }\mu\text{mol}$ 葡萄糖的酶量。

1.2.3 吲哚乙酸氧化酶(IAAO)活性的测定。参照李秉真^[17]的方法,将 0.5 g 纤维加 5 倍量 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷酸缓冲液($\text{pH}6.1$)冰浴研磨,低温离心取上清粗酶液(注意避光),用 $\text{FeCl}_3\text{-HClO}_4$ 试剂显色测定与酶反应后的 IAA 残余量。结果以每克鲜重纤维中每小时反应消耗的 IAA 为一个酶活单位。

1.2.4 过氧化物酶(POD)活性的测定。采用愈创木酚比色法^[18],结果以每分钟在 470 nm 处吸光度的变化值作为一个酶活单位,相对蛋白含量用考马斯亮蓝法测定。

1.2.5 纤维长度的测定。采用流水冲洗法^[19],将 20 DPA 以后的棉铃胚珠从棉铃中取出,放入无离子水中煮 2~5 min,每 100 mL 水中加入 4 滴盐酸。待胚珠分开后立即转入冷水中。随机取分离开的胚珠,放在表玻璃的凸面上,用细流水冲洗,纤维顺水面开后量出长度取其平均值。

1.2.6 棕色素含量的测定。参照詹少华^[20]的方法提取棕色素粗提液,溶于 $\text{pH}10$ 的 $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$ 缓冲溶液中,在 510 nm 下测定吸光度值,对照棕色素标准曲线计算色素含量。

2 结果与分析

2.1 棉纤维品质的比较

表1比较了不同基因型棉花的纤维品质,可以看出,白色棉的绒长、衣指、衣分均高于棕色

棉,子指略低于棕色棉。不同基因型棕色棉中,深棕 ANL-1 的绒长、衣指、衣分值最小,色素含量最大;中棕 ANL-1 的衣指、衣分值最大,子指最小。统计分析表明;白色棉与棕色棉各个品质指标均呈显著差异,不同基因型棕色棉间差异也显著。

表1 棕色棉纤维品质的比较

Table1 The comparison of the qualities of brown cotton fiber

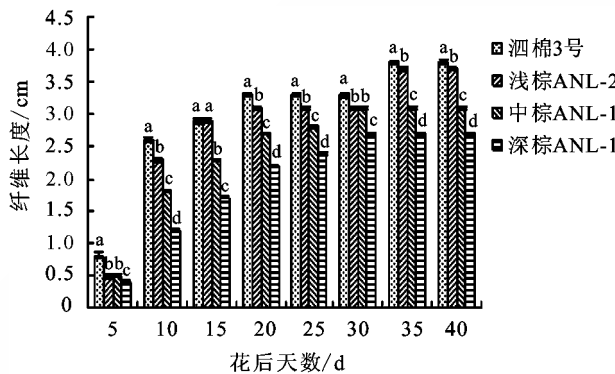
品种	绒长/cm	衣指/g	子指/g	衣分/%	色素含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
泗棉3号	5.72±0.02 a	5.74±0.02 a	10.65±0.04 c	35.02±0.02 a	0 d
浅棕 ANL-2	4.83±0.01 b	3.59±0.03 c	11.23±0.02 b	24.22±0.03 c	262.70±0.22 c
中棕 ANL-1	4.46±0.02 c	4.13±0.02 b	9.48±0.02 d	30.35±0.03 b	289.60±0.34 b
深棕 ANL-1	3.51±0.02 d	2.86±0.03 d	11.73±0.03 a	19.60±0.02 d	304.31±0.20 a

注:不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 棉铃发育期棉纤维长度与纤维素含量的变化

由图1可以看出,棉纤维伸长主要集中在20 DPA前,白色棉与浅棕棉纤维伸长期较长(35 DPA左右),中棕棉与深棕棉伸长停止早(30 DPA左右)。各时期白色棉纤维伸长速率要高于棕色棉,成熟时棉纤维长度也优于棕色棉。不同基因型棕色棉,其纤维伸长速率和纤维长度都表现为:浅棕 ANL-2 > 中棕 ANL-1 > 深棕 ANL-1。

从各时期纤维素累积过程来看(图2),白色棉纤维素累积速率高于棕色棉,纤维素的快速累积时期也较长(30 DPA),而棕色棉的快速累积期约25 DPA。白色棉纤维素含量高于棕色棉,不同基因型棕色棉的纤维素含量表现为:浅棕 ANL-2 > 中棕 ANL-1 > 深棕 ANL-1。经统计分析,相同时期白色棉的纤维伸长速率和纤维素含量与棕色棉差异显著,不同基因型棕色棉间的纤维伸长速率和纤维素含量也呈显著差异。



注:相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著($P=0.05$),下同。

图1 棉纤维发育过程中纤维长度的变化

Fig.1 The length of fiber during cotton fiber development

2.3 棉铃发育期纤维中蔗糖合成酶(SS)的变化

棉纤维中SS活性的动态变化,总体上表现为先升后降的规律(图3)。20 DPA时SS活性达到最大,随后迅速下降,30 DPA时SS活性很低。20 DPA以前,白色棉纤维中SS活性显著高于棕色棉,25 DPA以后白色棉与棕色棉SS活性差异

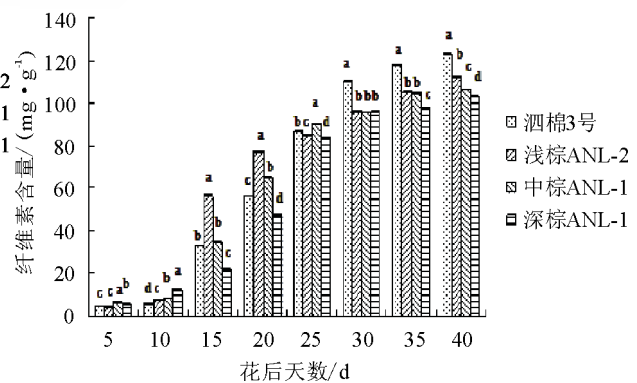


图2 棉纤维发育过程中纤维素含量的变化

Fig.2 The contents of cellulose during cotton fiber development

不大。不同基因型棕色棉纤维中SS活性的动态规律基本相似,但在纤维发育前期,深棕 ANL-1 的SS活性较其它棕色棉低。

2.4 棉铃发育期纤维中 β -1,3-葡聚糖酶的变化

图4表示棉纤维中 β -1,3-葡聚糖酶的活性变化,总体上表现为先上升后下降的动态规律。

白色棉纤维中该酶的活性在 25 DPA 时达到最大,而棕色棉在 30 DPA 时达到最大。5 DPA 时,白色棉纤维中 β -1,3- 葡聚糖酶的活性低于棕色棉,10 DPA 以后白色棉纤维中的酶活性开始上

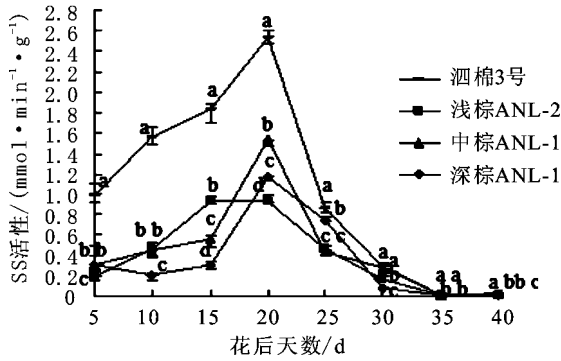


图 3 棉纤维中蔗糖合成酶活性变化的比较

Fig. 3 The comparison of sucrose synthase activities in cotton fiber

2.5 棉铃发育期纤维中过氧化物酶(POD)的变化

由图 5 可见,棉铃发育后期纤维中 POD 活性显著高于其它各时期,白色棉纤维中 POD 活性高峰出现在 30 DPA 时,浅棕 ANL-2 和中棕 ANL-1 的 POD 活性在 20 DPA 时达到最大,而整个纤维发育过程中,深棕 ANL-1 的 POD 活性一直处于较低水平。

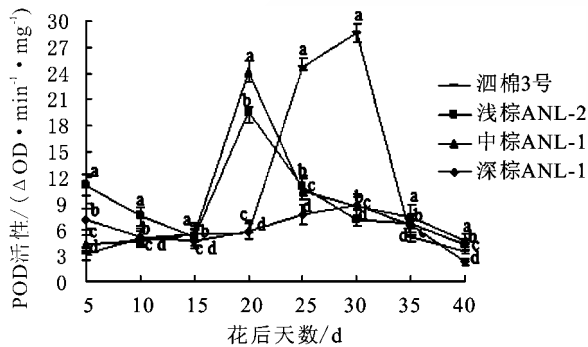


图 5 棉纤维中过氧化物酶活性变化的比较

Fig.5 The comparison of peroxidase activities in cotton fiber

IAAO 活性,白色棉的 IAAO 活性低于棕色棉。

2.7 棉纤维发育相关酶及纤维素含量与纤维长度间的回归分析

根据棉铃发育期 SS、 β -1,3- 葡聚糖酶、POD 和 IAAO 的活性及纤维长度与纤维素含量,分别以 SS 活性 (X_1)、 β -1,3- 葡聚糖酶活性(X_2)、POD 活性(X_3)、IAAO 活性(X_4)、纤维素含量(X_5)为自变量,纤维长度(Y)为依变量,进行多元逐步回归,建

立回归方程。升,20~35 DPA 显著高于棕色棉。在纤维发育过程中,不同基因型棕色棉纤维中 β -1,3- 葡聚糖酶的活性表现为:中棕 ANL-1 > 深棕 ANL-1 > 浅棕 ANL-2。

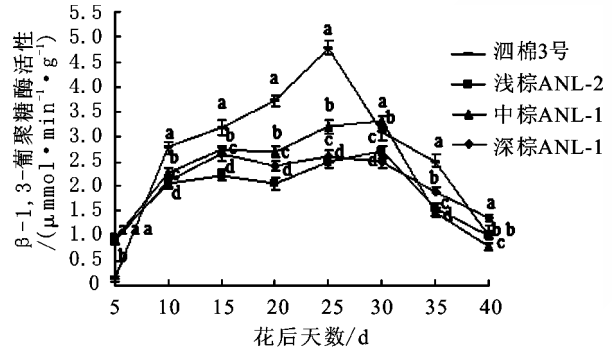


图 4 棉纤维中 β -1,3-葡聚糖酶活性变化的比较

Fig. 4 The comparison of β -1, 3-glucanase activities in cotton fiber

2.6 棉铃发育期纤维中吲哚乙酸氧化酶(IAAO)的变化

从图 6 可以看出,随着生育期的延长,棉纤维中 IAAO 活性逐渐降低。白色棉的 IAAO 活性在 5 DPA 到 10 DPA 期间略有上升,随后呈下降趋势,而棕色棉的 IAAO 活性从 5 DPA 开始一直呈下降变化。比较各时期不同基因型棉纤维中

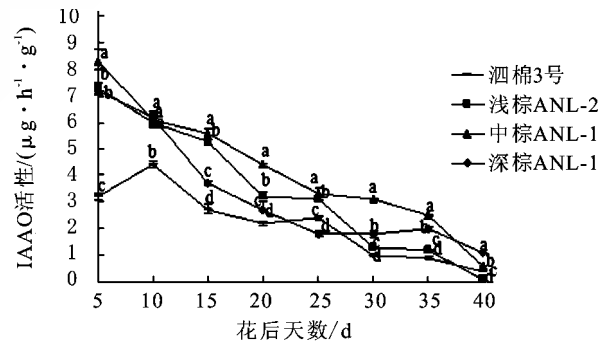


图 6 棉纤维中吲哚乙酸氧化酶活性变化的比较

Fig.6 The comparison of Indoleacetic Acid Oxidase activities in cotton fiber

立回归方程。

泗棉 3 号: $Y = -0.2028 + 0.1251X_1 + 0.2696X_2 - 0.0485X_3 + 0.3723X_4 + 0.0290X_5$
($r^2 = 0.9091, F = 4.0012$);

($t_1 = 0.1612, t_2 = 0.5472, t_3 = -1.4404, t_4 = 0.4205, t_5 = 0.9114$).

浅棕 ANL-2: $Y = 3.0593 + 0.9519X_1 + 0.4379X_2 - 0.0281X_3 - 0.3633X_4 + 0.0032X_5$

($r^2 = 0.9401, F = 6.2749$);

($t_1 = 1.0452, t_2 = 1.2026, t_3 = -0.6069, t_4 = -1.0200, t_5 = 0.1577$)。

中棕 ANL-1: $Y = 3.1024 + 0.1731X_1 + 0.2735X_2 - 0.0015X_3 - 0.3340X_4 + 0.0012X_5$

($r^2 = 0.9586, F = 9.2698$);

($t_1 = 0.0971, t_2 = 1.5677, t_3 = -0.0118, t_4 = -1.5389, t_5 = 0.0635$)。

深棕 ANL-1: $Y = 0.8841 + 0.0229X_1 + 0.3822X_2 - 0.0569X_3 - 0.0666X_4 + 0.0153X_5$

($r^2 = 0.9764, F = 16.5136$);

($t_1 = 0.0660, t_2 = 1.2575, t_3 = -0.7041, t_4 = -0.2628, t_5 = 0.1842$)。

比较不同基因型棉花品种建立的回归方程可以发现,白色棉纤维素含量对纤维长度的回归斜率 t_5 值最大,对纤维长度的贡献最大。棕色棉 t_5 值较小,对纤维长度的贡献要小于相关酶的 t 值,如深棕棉和中棕棉 t_5 值小于 β -1, 3- 葡聚糖酶活性 t_2 值,浅棕棉 t_5 值小于 SS 活性 t_1 值和 β -1, 3- 葡聚糖酶活性 t_2 值,这可能是由于棕色棉纤维素累积过程伴随有色素沉积,因而棕色棉纤维素累积不够充分,从而影响到纤维的伸长发育。上述统计分析表明,纤维长度与纤维发育相关酶及纤维素含量相关,说明纤维伸长发育是以纤维素含量累积为基础,是纤维发育相关酶共同作用的结果。纤维伸长发育同时也是纤维素含量累积的过程,因而 SS 与 β -1, 3- 葡聚糖酶活性对纤维伸长有积极作用。同时,回归方程还表明了 POD 与 IAAO 活性影响纤维长度,抑制了纤维伸长发育。

3 结论与讨论

棉纤维的伸长及纤维素累积方式是影响纤维品质的主要原因^[5,12]。本试验中棕色棉的纤维伸长停止早,历时短,纤维素累积速率低,快速累积时期短,从而造成包括绒长、衣指、衣分等纤维品质劣于白色棉。这可能与棕色棉发育过程中伴随有色素合成有关,与前人研究有相似之处^[2,4]。

棉纤维的发育以光合产物积累为基础,同时受到多种酶的调控^[5,7,11],是一个有序而复杂的过程。本研究通过对棕色棉和白色棉品种纤维发育相关酶活性的比较发现,相关酶活性动态变化的

差异是导致棕色棉与白色棉纤维素累积特性及纤维品质差异的重要生理原因之一。综合比较纤维发育过程中相关酶活性变化,发现 SS 与 IAAO 的活性高峰期在 β -1,3- 葡聚糖酶和 POD 的活性高峰期前。纤维伸长前期 POD 活性保持较低水平,纤维发育后期 POD 活性出现高峰,而且白色棉活性高峰持续时间长于棕色棉。

从纤维发育和纤维素沉积的过程分析,棉纤维发育经历纤维伸长期和次生壁加厚期两个重要阶段^[6,21]。纤维伸长期主要完成纤维初生壁的延展,为次生壁沉积奠定基础,而次生壁加厚期是纤维素累积的主要时期,这个时期可能对衣指、衣分具有重要影响。本试验测定发现,棉纤维前期较低的 POD 活性可能有利于纤维伸长发育,与前人认为高 POD 活性直接或间接抑制长绒和短绒的突起和伸长的结论一致^[10,22],而后期较长的活性高峰期可能更有利于纤维素累积和棉纤维次生壁加厚,这尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 程明,柯娜. 彩棉与白棉结构和性能的比较[J]. 中国纤检, 2006(3): 29-30.
CHENG Ming, Ke Na. Comparison of the structures and properties of colored cotton and white cotton[J]. China Fiber Inspection, 2006(3): 29-30.
- [2] 詹少华,林毅,蔡永萍. 彩色棉棉铃生长发育动态研究简报[J]. 棉花学报, 2005, 17(2): 127-128.
ZHAN Shao-hua, Lin Yi, Cai Yong-ping. Study on developmental dynamics characteristics of the bolls of naturally-colored cotton[J]. Cotton Science, 2005, 17(2): 127-128.
- [3] 董合忠,李维江,唐薇,等. 2个彩色棉材料的农艺性状和纤维发育特点研究[J]. 山东农业科学, 2002(4): 6-9.
DONG He-zhong, Li Wei-jiang, Tang Wei, et al. Study on agronomic characters and fiber development of two materials of naturally colored cotton[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2002(4): 6-9.
- [4] 王学德,李悦有. 彩色棉纤维发育的特性研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2002, 28(3): 237-242.
WANG Xue-de, Li Yue-you. Study on characteristics of colored cotton fiber development[J]. Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci, 2002, 28(3): 237-242.
- [5] 胡宏标,张文静,王友华,等. 棉纤维加厚发育相关物质对纤维比强度的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(4): 726-733.
HU Hong-biao, Zhang Wen-jing, Wang You-hua, et al. Matters related with cotton fiber thickening development and fiber

- strength[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(4): 726-733.
- [6] 武耀廷, 张恒木, 刘进元. 棉纤维细胞发育过程中纤维素的生物合成[J]. *棉花学报*, 2003, 15(3): 174-179.
- WU Yao-ting, Zhang Heng-mu, Liu Jin-yuan. Cellulose biosynthesis in developing cotton fibers [J]. *Cotton Science*, 2003, 15(3): 174-179.
- [7] 张文静, 胡宏标, 陈兵林, 等. 棉纤维加厚发育生理特性的基因型差异及对纤维比强度的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(4): 531-538.
- ZHANG Wen-jing, Hu Hong-biao, Chen Bing-lin, et al. Genotypic differences in some physiological characteristics during cotton fiber thickening and its relationship with fiber strength[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 531-538.
- [8] HSIEH Y, Hu Xiao-ping, Wang An-jia. Single fiber strength variations of developing cotton fibers-strength and structure of *G. hirsutum* and *G. barbadense*[J]. *Textile Research Journal*, 2000, 70(8): 682-690.
- [9] OKUDA K, Li Li-kun, Kudlicka K, et al. β -Glucan synthesis in the cotton fiber I. Identification of β -1,4- and β -1,3-glucans synthesized *in vitro*[J]. *Plant Physiology*, 1993, 101:1131-1142.
- [10] 单世华, 王明林, 汪建民, 等. 不同开花期 IAA、GA₃ 和 POD 对棉纤维伸长发育的影响[J]. *棉花学报*, 2001, 13(2): 100-104.
- SHAN Shi-hua, Wang Ming-lin, Wang Jian-min, et al. Research on effect of IAA, GA₃ and POD on cotton fiber elongation development on different anthesis dates[J]. *Cotton Science*, 2001, 13(2): 100-104.
- [11] 张文静, 胡宏标, 王友华, 等. 棉纤维发育相关酶活性的基因型差异与纤维比强度的关系[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2177-2184.
- ZHANG Wen-jing, Hu Hong-biao, Wang You-hua, et al. Fiber strength and enzyme activities of different cotton genotypes during fiber development[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2177-2184.
- [12] 束红梅, 王友华, 张文静, 等. 两个棉花品种纤维发育关键酶活性变化特征及其与纤维比强度的关系[J]. *作物学报*, 2008, 34(3): 437-446.
- SHU Hong-mei, Wang You-hua, Zhang Wen-jing, et al. Activity changes for enzymes associated with fiber development and relation to fiber strength in two cotton cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(3): 437-446.
- [13] 卞海云, 王友华, 陈兵林, 等. 低温条件下相关关键酶活性对棉纤维比强度形成的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(4): 1235-1241.
- BIAN Hai-yun, Wang You-hua, Chen Bing-lin, et al. Effects of the key enzymes activity on the fiber strength formation under low temperature condition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(4): 1235-1241.
- [14] 苏翔, 孙旭, 李廷春, 等. 抗氧化酶对棕色棉色泽的影响[J]. *棉花学报*, 2009, 21(6): 448-455.
- SU Xiang, Sun Xu, Li Ting-chun, et al. Effect of antioxidases on color of brown cotton[J]. *Cotton Science*, 2009, 21(6): 448-455.
- [15] 中国科学院上海植物生理研究所. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Institute of Plant Physiological & Ecology, Shanghai Institute for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences. Contemporary plant physiological experiment manual [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [16] 余永廷, 谢媛媛, 黄丽丽, 等. 不同碳氮源组合对小麦全蚀病菌产生胞外 β -1,3-葡聚糖酶的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(2): 110-114.
- YU Yong-ting, Xie Yuan-yuan, Huang Li-li, et al. Effects of different combinations of carbon and nitrogen sources in MS medium on activities of extra cellular β -1,3-glucanase produced by take-all pathogen[J]. *Journal of Northwest A & F University: Nat Sci Ed*, 2007, 35(2): 110-114.
- [17] 李秉真. 苹果梨叶片中 IAA 氧化酶的测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2001, 21(6): 837-839.
- LI Bing-zhen. The measurement of IAA oxidase in "Ping Guo Li" leaves[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2001, 21(6): 837-839.
- [18] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- WANG Xue-kui. Experiment principles and techniques for plant physiology and biochemistry [J]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [19] 董合忠. 测量未成熟纤维长度的几种方法[J]. *中国棉花*, 1987(1): 22.
- DONG He-zhong. Several methods of measuring unfledged fiber length[J]. *China Cotton*, 1987(1): 22.
- [20] 詹少华, 林毅. 天然彩棉棕色素定量测定方法的建立[J]. *分子植物育种*, 2005, 3(3): 439-444.
- ZHAN Shao-hua, Lin Yi. Establishment of a new determination method for the pigment of natural colorful cotton[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2005, 3(3): 439-444.
- [21] 华水金, 王学德, 赵向前, 等. 棕色棉纤维发育过程中碳水化合物和色素的变化特征[J]. *棉花学报*, 2008, 20(3): 239-240.
- HUA Shui-jin, Wang Xue-de, Zhao Xiang-qian, et al. Dynamics of carbohydrate and pigment content during fiber development in Brown-colored Cotton[J]. *Cotton Science*, 2008, 20(3): 239-240.
- [22] 刘康, 张天真, 潘家驹. 棉纤维初始发育过程中过氧化物酶和吡哆乙酸氧化酶的活性[J]. *植物生理学通讯*, 1998, 34(3): 175-177.
- LIU Kang, Zhang Tian-zhen, Pan Jia-ju. Peroxidase and IAA oxidase activities during fiber initiation in upland cotton[J]. *Plant Physiology Communications*, 1998, 34(3): 175-177. ●