

## 陆地棉棉铃对位叶碳氮变化特征与其生物量关系的研究

赵新华<sup>1,2</sup>, 屈磊<sup>1</sup>, 陈兵林<sup>1</sup>, 周治国<sup>1\*</sup>

(1. 南京农业大学 / 农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 南京 210095; 2. 中国农业科学院棉花研究所, 河南 安阳 455000)

**摘要:**在大田栽培条件下, 选用科棉 1 号和美棉 33B 两个棉花品种, 于江苏南京、徐州进行施氮量(0、240、480 kg·hm<sup>-2</sup>)试验, 研究棉铃对位叶碳氮变化特征与棉铃(棉子、纤维)生物量的关系。结果表明: 棉铃对位叶全碳、全氮含量变化可用函数  $Y=at^2+bt+c$  ( $Y$ (%): 全碳或全氮含量,  $t$ (d): 铃龄,  $a, b, c$ : 参数)拟合, 碳氮比变化可用 Logistic 方程拟合。进一步分析棉铃对位叶碳氮变化的特征值发现: (1) 棉铃对位叶全碳含量达到最小值的时间早、最小含量值高, 则可提高棉铃、棉子、纤维生物量快速累积持续期间的平均速率, 但缩短了棉铃和纤维生物量快速累积持续期, 延长了棉子生物量快速累积持续期。(2) 棉铃对位叶全氮含量达到最小值的时间晚, 则可延长棉铃和纤维生物量快速累积持续期; 全氮最小含量值高, 则可延长棉子生物量快速累积持续期。(3) 棉铃对位叶碳氮比快速增长持续期长、快速增长平均速率小, 则可延长棉铃及纤维生物量快速累积持续期。可见, 棉铃对位叶碳氮变化特征与棉铃生物量的关系密切, 可通过调控棉铃对位叶碳氮含量及其比值促进棉铃发育。

**关键词:** 陆地棉; 棉铃对位叶; 碳氮变化特征; 棉铃; 生物量

**中图分类号:** S562.01 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-7807(2010)03-0209-08

## Changes of Carbon and Nitrogen in the Subtending Leaf of Cotton Boll and Its Relationship to Biomass of Cotton Boll, Seed and Fiber

ZHAO Xin-hua<sup>1,2</sup>, QU Lei<sup>1</sup>, CHEN Bing-lin<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-guo<sup>1\*</sup>

(1. Nanjing Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology & Ecology, Ministry of Agriculture, Nanjing 210095, China; 2. Cotton Research Institute of CAAS, Anyang, Henan 455000, China)

**Abstract:** Two cotton cultivars (KC-1, AC-33B) were used, with three nitrogen application rates (0, 240, 480 kg·hm<sup>-2</sup>), standing for low, moderate and high nitrogen levels, respectively, in field experiments in Nanjing (118°50'E, 32°02'N, middle lower reaches of Yangtze River Valley) and Xuzhou (117°11'E, 34°15'N, Yellow River Valley), Jiangsu Province, which stand for the different ecological conditions, to investigate the relationship between the changes of carbon and nitrogen in the subtending leaf of cotton boll and biomass of cotton boll. The results showed that the changes of total carbon and total nitrogen content in subtending leaf of cotton boll could be simulated with quadratic:  $Y=at^2+bt+c$  ( $Y$  stands for the total carbon or total nitrogen content (%),  $t$  stands for boll age (d)). And the changes of C/N ratio could be simulated with Logistic equation. Correlation analysis indicated: (1) The average rate of cotton boll, seed and fiber biomass during the speedy accumulation period could be improved, the duration of cotton boll and fiber biomass could be shortened and the duration of the seed biomass speedy accumulation could be prolonged when the date of reaching the minimum content of the total carbon was earlier and the minimum content of the total carbon was higher. (2) The period of cotton boll and fiber biomass speedy accumulation could be prolonged as the date of reaching the minimum content of the total nitrogen was later. And the minimum content of total nitrogen was higher, which resulted in prolonging the cotton seed biomass speedy accumulation period. (3) The duration for cotton boll and fiber biomass speedy accumulation could be prolonged by lengthening the speedy increasing duration and slowing the average rate of C/N ratio increase

**收稿日期:** 2010-03-05 **作者简介:** 赵新华(1968-), 男, 博士研究生; \* 通讯作者, [giscott@njau.edu.cn](mailto:giscott@njau.edu.cn)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(30771279), 高校博士点基金(200803070017), 农业部农业行业计划项目(nyhyzx07-005)

during the speedy increasing period. Therefore, the changes of carbon and nitrogen in the subtending leaf of cotton boll is tightly related to the cotton boll biomass, boll development could be improved by adjusting the content of carbon and nitrogen and the C/N ratio in the subtending leaf.

**Key words:** *Gossypium hirsutum* L.; subtending leaf of cotton boll; changes of carbon and nitrogen; cotton boll; biomass

碳氮代谢是作物生长发育和产量、品质形成的最基本且又密切相关的两个生理代谢过程,采取适宜的调控措施可以协调作物碳氮代谢,提高作物的产量与品质<sup>[1-3]</sup>。研究表明<sup>[4-11]</sup>,水稻、小麦和玉米子粒形成期间积累的有机碳主要来自其功能叶同化的光合产物,有机氮主要来源于茎叶中氮素的再转移,其功能叶的碳氮代谢能力显著影响光合产物向子粒的运输及在子粒的累积,进而影响产量与品质的形成。针对棉花的研究发现<sup>[12-14]</sup>,棉铃对位叶是棉铃发育的主要源器官,棉铃发育所需物质的 85%以上来自其对位叶,其碳氮代谢状况直接影响棉铃生物量的累积。有研究表明<sup>[13-17]</sup>,维持棉铃对位叶相对较高的碳代谢活性,有利于增加棉铃生物量的累积量,进而影响棉花产量与品质的形成。同时,棉铃是由铃壳、棉子和纤维组成的多元有机体,棉铃对位叶提供的碳、氮在棉子、纤维中的累积是一个复杂的变化过程,明确棉铃对位叶碳氮变化特征及其与棉铃生物量的关系,对生产中采取适宜的调控措施,协调棉铃对位叶碳、氮代谢,提高棉花产量,改善纤维品质具有重要意义。

本文基于棉花不同施氮量所形成的棉铃对位叶碳氮代谢差异,研究其与棉铃(棉子、纤维)生物量的关系,旨在为生产中调控棉花碳氮代谢、提高棉花产量与品质提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

为兼顾试验的重复性和生态区域性,试验于2005年在江苏南京(118° 50' E, 32° 02' N,长江流域下游棉区)、徐州(117° 11' E, 34° 15' N,黄河流域黄淮棉区)进行。南京、徐州试点土壤分别为黄棕壤土和黏土,0~20 cm 土壤分别含有有机质 2.05%、1.92%,全氮 0.07%、0.04%,碱解氮 83.4 mg·kg<sup>-1</sup>、71.5 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 43.6 mg·kg<sup>-1</sup>、31.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 246.8 mg·kg<sup>-1</sup>、183.4 mg·kg<sup>-1</sup>。

选用科棉 1 号和美棉 33B 设置棉花施氮量试验。施氮量设 0、240、480 kg·hm<sup>-2</sup> 3 个水平<sup>[18]</sup>,分别代表零氮(N<sub>0</sub>)、中氮(N<sub>240</sub>)和高氮(N<sub>480</sub>)。所用氮肥为尿素,基施 50%、初花期追施 50%,另外基施氯化钾 225 kg·hm<sup>-2</sup>、过磷酸钙 750 kg·hm<sup>-2</sup>。试验采取裂区设计,以品种为主区,氮素为副区。试验共 6 个处理组合,4 次重复,随机区组排列,小区面积为 54 m<sup>2</sup>(9 m×6 m)。于 4 月 25 日营养钵育苗,5 月 18 日移栽,行距 0.75 m,株距 0.25 m。田间其它管理均按高产栽培要求进行。

待棉株 6~8 果枝第 1、2 果节开花时,挂牌标记当日白花。对挂牌标记铃,从铃龄 10 d 开始直至吐絮,每 7 d 在 9:00—10:00 取生长发育一致的棉铃 8~10 个,同时取棉铃对位叶。将棉铃分为铃壳、棉子和纤维三部分。上述样品 105℃杀青 30 min、70℃下烘干至恒重称重。最后将棉铃对位叶粉碎后测定全碳和全氮含量,并将全碳与全氮含量的比值作为棉铃对位叶的碳氮比(C/N)。

### 1.2 测定项目与方法

用重铬酸钾-硫酸氧化法<sup>[19]</sup>测定全碳含量,用凯氏定氮法<sup>[20]</sup>测定全氮含量。

### 1.3 统计分析方法

采用 Excel 2003 软件完成全部数据处理和作图,SPSS 11.5 统计软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 棉铃对位叶碳氮变化特征

**2.1.1 全碳(全氮)含量。**棉铃对位叶全碳(或全氮)含量变化均随铃龄呈先下降后上升的趋势(图略)。不同施氮处理间差异明显,全碳含量随施氮量的升高而降低,全氮含量则表现相反趋势。

棉铃对位叶全碳(或全氮)含量的变化可用函数  $Y=at^2+bt+c$  进行拟合[ $Y(\%)$ :全碳(或全氮)含量, $t(d)$ :铃龄, $a$ 、 $b$ 、 $c$ :参数],其变化特征值可用理论最小值( $Y_{\min}$ )以及达到最小值的时间( $t_{\min}$ )表示,计算公式如下:

$$Y_{\min} = -\frac{b^2 - 4ac}{4a} \quad (1)$$

$$t_{\min} = -\frac{b}{2a} \quad (2)$$

分析棉铃对位叶全碳(或全氮)含量变化的

特征值发现(表 1),全碳含量的  $Y_{\min}$  随施氮量的增加降低,全氮含量的  $Y_{\min}$  则相反;在 3 个施氮量处理中,全碳含量的  $t_{\min}$  均随施氮量的增加而提前到达,全氮含量的  $t_{\min}$  则以  $N_{240}$  最迟、 $N_0$  最早。

表 1 棉铃对位叶全碳(或全氮)含量随铃龄变化的拟合方程(南京,徐州)

Table 1 Dynamic equations of the total carbon or total nitrogen content in the subtending leaf of cotton boll along with boll age in Nanjing and Xuzhou

	试点	品种	氮素水平	方程	R <sup>2</sup>	Y <sub>min</sub> /%	t <sub>min</sub> /d
全碳含量	南京	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	Y = 0.0009t <sup>2</sup> - 0.0394t + 37.5756	0.9531**	37.14	21.90
			N <sub>240</sub>	Y = 0.0004t <sup>2</sup> - 0.0164t + 37.2515	0.9316**	37.08	20.44
			N <sub>480</sub>	Y = 0.0012t <sup>2</sup> - 0.0489t + 37.2297	0.9365**	36.74	19.88
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	Y = 0.0008t <sup>2</sup> - 0.0330t + 37.5581	0.8884*	37.21	20.91
			N <sub>240</sub>	Y = 0.0009t <sup>2</sup> - 0.0355t + 37.3560	0.8743*	37.02	19.09
			N <sub>480</sub>	Y = 0.0008t <sup>2</sup> - 0.0275t + 37.1408	0.9556**	36.91	16.77
	徐州	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	Y = 0.0024t <sup>2</sup> - 0.1724t + 38.0736	0.9563**	35.03	35.33
			N <sub>240</sub>	Y = 0.0022t <sup>2</sup> - 0.1503t + 37.4879	0.9608**	34.93	34.00
			N <sub>480</sub>	Y = 0.0019t <sup>2</sup> - 0.1148t + 36.5948	0.9458**	34.82	30.86
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	Y = 0.0038t <sup>2</sup> - 0.2335t + 38.6264	0.9802**	35.04	30.72
			N <sub>240</sub>	Y = 0.0038t <sup>2</sup> - 0.2251t + 38.9136	0.8665*	35.56	29.78
			N <sub>480</sub>	Y = 0.0030t <sup>2</sup> - 0.1618t + 36.9157	0.9170**	34.73	27.06
全氮含量	南京	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	Y = 0.0009t <sup>2</sup> - 0.0752t + 4.9858	0.9822**	3.45	40.86
			N <sub>240</sub>	Y = 0.0007t <sup>2</sup> - 0.0605t + 5.1002	0.9254**	3.71	45.82
			N <sub>480</sub>	Y = 0.0005t <sup>2</sup> - 0.0392t + 4.9666	0.9346**	4.18	39.98
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	Y = 0.0011t <sup>2</sup> - 0.0873t + 5.1353	0.9792**	3.35	40.81
			N <sub>240</sub>	Y = 0.0012t <sup>2</sup> - 0.0913t + 5.3569	0.9690**	3.55	39.69
			N <sub>480</sub>	Y = 0.0010t <sup>2</sup> - 0.0819t + 5.3422	0.9612**	3.60	42.65
	徐州	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	Y = 0.0008t <sup>2</sup> - 0.0730t + 4.6371	0.9403**	2.99	45.07
			N <sub>240</sub>	Y = 0.0006t <sup>2</sup> - 0.0665t + 4.8786	0.9613**	3.15	51.98
			N <sub>480</sub>	Y = 0.0007t <sup>2</sup> - 0.0707t + 5.0628	0.8303*	3.33	49.07
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	Y = 0.0007t <sup>2</sup> - 0.0566t + 4.6535	0.9623**	3.42	43.52
			N <sub>240</sub>	Y = 0.0006t <sup>2</sup> - 0.0548t + 4.7675	0.9853**	3.52	45.65
			N <sub>480</sub>	Y = 0.0070t <sup>2</sup> - 0.0587t + 4.9695	0.9474**	3.66	44.48

注: Y<sub>min</sub>: 棉铃对位叶全碳(或全氮)含量最小值, t<sub>min</sub>: 棉铃对位叶全碳(或全氮)含量达最小值的时间; \* 和 \*\* 分别表示方程决定系数在 0.05 和 0.01 水平上显著(n=7, P<sub>0.05</sub>=0.7763, P<sub>0.01</sub>=0.9000)。

2.1.2 C/N。棉铃对位叶 C/N 在南京、徐州试点均符合“S”型变化曲线(图略), 不同施氮处理间差异明显, 均随施氮量的增加而下降。

棉铃对位叶 C/N 的变化在南京、徐州试点的动态变化可用 Logistic 方程拟合,

$$C/N = \frac{CN_m}{1 + ae^{bt}} \quad (3)$$

式中, C/N: 棉铃对位叶碳氮比值, t (d): 铃龄, CN<sub>m</sub>: 棉铃对位叶碳氮比的理论最大值, a, b: 参数。对(3)式求二阶导数, 可得棉铃对位叶 C/N 快速增长期的起始时期(t<sub>1</sub>)和终止时期(t<sub>2</sub>),

$$t_1 = \frac{1}{b} \ln \frac{2 + \sqrt{3}}{a} \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{1}{b} \ln \frac{2 - \sqrt{3}}{a} \quad (5)$$

计算(4)式可知, 其一阶导数 t<sub>1</sub> 为负值, 表明棉铃对位叶 C/N 在棉花开花前已经开始快速增长。棉花开花当日的铃龄 t=0, 可得花后棉铃对位叶 C/N 快速增长持续期 T<sub>CN</sub> (T<sub>CN</sub>=t<sub>2</sub>); 将 t=0、(5)式分别代入(3)式即得 t=0、t<sub>2</sub> 时的 C/N 值 C/N<sub>t=0</sub> 和 C/N<sub>t=2</sub>, 进一步可得花后棉铃对位叶 C/N 快速增长期内的平均增长速率 V<sub>CN</sub> [V<sub>CN</sub> = (C/N<sub>t=2</sub> -

$C/N_{t_0}/T_{CN}$ ](表2)。

分析表2可知,南京试点的 $T_{CN}$ 随施氮量的增加而延长, $V_{CN}$ 随施氮量的增加而减小;徐州试

点的 $T_{CN}$ 则以 $N_{240}$ 最长, $N_0$ 最短, $V_{CN}$ 以 $N_{240}$ 最小、 $N_0$ 最大。

表2 棉铃对位叶C/N随铃龄变化的拟合方程(南京,徐州)

Table 2 Dynamic equations of the C/N ratio in the subtending leaf of cotton boll along with boll age in Nanjing and Xuzhou

试点	品种	氮素水平	方程	R <sup>2</sup>	$T_{CN}$ /d	$V_{CN}$ /d <sup>-1</sup>
南京	科棉1号	$N_0$	$C/N=12.3066/(1+0.7251e^{-0.0536t})$	0.9764**	18.56	0.14
		$N_{240}$	$C/N=11.6809/(1+0.6992e^{-0.0516t})$	0.9890**	18.61	0.13
		$N_{480}$	$C/N=11.8599/(1+0.6220e^{-0.0354t})$	0.9775**	23.78	0.09
	美棉33B	$N_0$	$C/N=12.1052/(1+0.8676e^{-0.0877t})$	0.9959**	13.39	0.23
		$N_{240}$	$C/N=11.0981/(1+0.7713e^{-0.0781t})$	0.9923**	13.54	0.18
		$N_{480}$	$C/N=11.1980/(1+0.5764e^{-0.0494t})$	0.9966**	15.50	0.11
徐州	科棉1号	$N_0$	$C/N=11.9970/(1+0.5834e^{-0.0482t})$	0.9923**	16.14	0.12
		$N_{240}$	$C/N=12.4916/(1+0.6808e^{-0.0455t})$	0.9694**	20.52	0.11
		$N_{480}$	$C/N=12.4404/(1+0.6923e^{-0.0464t})$	0.9735**	20.47	0.12
	美棉33B	$N_0$	$C/N=11.8627/(1+0.5647e^{-0.0503t})$	0.9883**	14.81	0.12
		$N_{240}$	$C/N=12.4801/(1+0.5970e^{-0.0343t})$	0.9818**	23.36	0.09
		$N_{480}$	$C/N=11.4743/(1+0.5809e^{-0.0496t})$	0.9947**	15.60	0.11

注: $T_{CN}$ :棉铃对位叶C/N快速增长期持续时间, $V_{CN}$ :C/N快速增长期平均速率;\*\*表示方程决定系数在0.01水平上显著( $n=7, P_{0.01}=0.7653$ )。

## 2.2 棉铃生物量

棉铃、棉子、纤维生物量的变化符合“S”型曲线,可用Logistic方程拟合:

$$W = \frac{W_m}{1 + ae^{-bt}} \quad (6)$$

式中, $W(g)$ :生物量, $t(d)$ :铃龄, $W_m(g)$ :生物量的理论最大值, $a, b$ :参数。对(6)式求二阶导数,可得生物量的快速累积期的起始时期( $t_1$ )和终止时期( $t_2$ ),计算公式同式(4)、(5)。

将(4)、(5)式分别代入(6)式即得 $t_1, t_2$ 时生物量 $W_{t_1}$ 和 $W_{t_2}$ 。由 $t_1, t_2$ 可得生物量快速累积持续时间 $T(T=t_2-t_1)$ ,进一步可得快速增长期内生物量的平均累积增长速率 $V_T$  [ $V_T = (W_2 - W_1)/T$ ](表3)。

分析表3可知,南京、徐州试点棉铃的 $t_1, t_2$ 均随施氮量的增加而推迟,棉子、纤维的 $t_1, t_2$ 则以 $N_{240}$ 最迟, $N_0$ 最早;棉铃的 $T$ 值随施氮量的增加而延长,棉子、纤维则以 $N_{240}$ 最长、 $N_0$ 最短;棉铃的 $V_T$ 值以 $N_{240}$ 最大,而棉子、纤维则以 $N_{240}$ 最大, $N_0$ 最小。

## 2.3 棉铃对位叶碳氮变化特征与棉铃生物量的关系

对棉铃对位叶碳氮变化特征值与棉铃、棉子、纤维生物量变化特征值进行相关性分析(表4),结果表明,棉铃对位叶全碳含量达到最小值的时间与棉铃、棉子生物量快速累积持续期平均速率显著负相关( $P < 0.05$ ),与纤维生物量快速累积持续期平均速率极显著负相关( $P < 0.01$ ),说明棉铃对位叶全碳含量达到最小值的时间早,则可提高棉铃、棉子、纤维生物量快速累积持续期的平均速率;棉铃对位叶全碳含量达到最小值的时间与棉子生物量快速累积期持续时间极显著负相关( $P < 0.01$ ),与纤维生物量快速累积期持续时间极显著正相关( $P < 0.01$ ),说明棉铃对位叶全碳含量达到最小值的时间早,虽可延长棉子生物量快速累积持续期,但缩短了纤维生物量快速累积期的持续时间。棉铃对位叶全碳含量最小值与棉铃、纤维生物量快速累积持续期平均速率极显著正相关( $P < 0.01$ ),说明棉铃对位叶全碳含量最小值高,可提高棉铃、纤维生物量快速累积持续期

表 3 棉花单铃、棉子、纤维生物量随铃龄变化的拟合方程

Table 3 Biomass dynamic equations of the cotton boll, seed and fiber along with boll age

	试点	品种	氮素水平	方程	R <sup>2</sup>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	T	V <sub>T</sub>
						/d	/d	/d	/g·d <sup>-1</sup>
棉铃	南京	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	$W=6.5648/(1+19.5822e^{-0.1267t})$	0.9809**	13.08	33.87	20.79	0.18
			N <sub>240</sub>	$W=8.0645/(1+20.6479e^{-0.1152t})$	0.9859**	14.85	37.70	22.86	0.20
			N <sub>480</sub>	$W=7.8111/(1+20.5721e^{-0.1146t})$	0.9676**	14.89	37.88	22.98	0.19
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	$W=5.6965/(1+22.1287e^{-0.1338t})$	0.9913**	13.31	33.00	19.69	0.17
			N <sub>240</sub>	$W=6.4380/(1+25.2363e^{-0.1281t})$	0.9911**	14.92	35.47	20.55	0.18
			N <sub>480</sub>	$W=6.6004/(1+24.3142e^{-0.1232t})$	0.9902**	15.22	36.60	21.38	0.18
	徐州	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	$W=6.1060/(1+21.0879e^{-0.1268t})$	0.9933**	13.65	34.42	20.77	0.16
			N <sub>240</sub>	$W=7.1457/(1+19.4125e^{-0.1117t})$	0.9774**	14.76	38.34	23.58	0.17
			N <sub>480</sub>	$W=6.5057/(1+19.3725e^{-0.1103t})$	0.9700**	15.16	39.04	23.88	0.16
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	$W=5.8116/(1+19.9868e^{-0.1162t})$	0.9773**	14.44	37.12	22.67	0.14
			N <sub>240</sub>	$W=6.2358/(1+21.7224e^{-0.1104t})$	0.9895**	15.95	39.81	23.85	0.15
			N <sub>480</sub>	$W=5.5870/(1+18.7642e^{-0.1109t})$	0.9778**	14.56	38.30	23.74	0.14
棉子	南京	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	$W=3.1874/(1+9.9050e^{-0.0876t})$	0.9728**	11.15	41.23	30.08	0.061
			N <sub>240</sub>	$W=4.0236/(1+14.0214e^{-0.0870t})$	0.9809**	15.21	45.47	30.26	0.076
			N <sub>480</sub>	$W=3.8892/(1+14.9708e^{-0.0854t})$	0.9723**	14.97	45.82	30.85	0.073
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	$W=2.5200/(1+14.8342e^{-0.1116t})$	0.9867**	12.36	35.96	23.60	0.062
			N <sub>240</sub>	$W=3.7117/(1+16.3880e^{-0.0896t})$	0.9896**	16.52	45.92	29.40	0.073
			N <sub>480</sub>	$W=3.4668/(1+16.9077e^{-0.0952t})$	0.9892**	15.88	43.56	27.68	0.072
	徐州	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	$W=2.4004/(1+12.7493e^{-0.1187t})$	0.9537**	10.35	32.55	22.20	0.062
			N <sub>240</sub>	$W=2.9504/(1+15.2073e^{-0.1026t})$	0.9641**	13.69	39.37	25.67	0.066
			N <sub>480</sub>	$W=2.6000/(1+16.0714e^{-0.1148t})$	0.9829**	12.72	35.67	22.95	0.065
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	$W=2.4036/(1+20.4754e^{-0.1055t})$	0.9790**	14.83	37.78	22.95	0.060
			N <sub>240</sub>	$W=2.6974/(1+20.1343e^{-0.1055t})$	0.9808**	15.97	40.94	24.96	0.062
			N <sub>480</sub>	$W=2.5389/(1+16.3788e^{-0.1072t})$	0.9665**	13.80	38.36	24.57	0.060
纤维	南京	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	$W=1.8039/(1+123.4253e^{-0.1764t})$	0.9959**	19.84	34.78	14.94	0.070
			N <sub>240</sub>	$W=2.4320/(1+108.6062e^{-0.1541t})$	0.9943**	21.88	38.98	17.10	0.082
			N <sub>480</sub>	$W=2.2102/(1+134.2037e^{-0.1630t})$	0.9936**	21.98	38.15	16.16	0.079
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	$W=1.6421/(1+153.3775e^{-0.1814t})$	0.9982**	20.49	35.01	14.52	0.065
			N <sub>240</sub>	$W=2.0928/(1+165.9401e^{-0.1730t})$	0.9979**	21.94	37.17	15.23	0.079
			N <sub>480</sub>	$W=1.9834/(1+143.7469e^{-0.1771t})$	0.9915**	20.62	35.49	14.87	0.077
	徐州	科棉 1 号	N <sub>0</sub>	$W=1.8192/(1+93.5028e^{-0.1554t})$	0.9896**	20.73	37.68	16.95	0.062
			N <sub>240</sub>	$W=2.0967/(1+77.0568e^{-0.1447t})$	0.9959**	20.92	39.12	18.20	0.067
			N <sub>480</sub>	$W=1.9818/(1+72.9369e^{-0.1467t})$	0.9895**	20.27	38.23	17.96	0.064
		美棉 33B	N <sub>0</sub>	$W=1.6366/(1+116.4818e^{-0.1595t})$	0.9749**	21.57	38.08	16.51	0.057
			N <sub>240</sub>	$W=1.8226/(1+136.6405e^{-0.1540t})$	0.9869**	23.38	40.48	17.10	0.062
			N <sub>480</sub>	$W=1.6642/(1+112.0754e^{-0.1588t})$	0.9984**	21.43	38.02	16.59	0.058

注: t<sub>1</sub>: 生物量快速累积期起始时间, t<sub>2</sub>: 生物量快速累积期终止时间, T: 生物量快速累积期持续时间, V<sub>T</sub>: 生物量快速累积期平均累积速率; \*\* 表示方程决定系数在 0.01 水平上显著 (n=7, P<sub>0.01</sub>=0.7653)。

的平均速率; 棉铃对位叶全碳含量最小值与棉铃、纤维生物量快速累积期的持续时间显著和极显著负相关 ( $P<0.05$ ,  $P<0.01$ ), 与棉子生物量快速累积期的持续时间极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 说明棉铃对位叶全碳含量最小值高, 可延长棉子生物量的快速累积持续期, 但缩短了棉铃、纤维生物量快速累积期的持续时间。

棉铃对位叶全氮含量达到最小值的时间与棉铃、纤维生物量快速累积期的持续时间显著和极显著正相关 ( $P<0.05$ ,  $P<0.01$ ), 表明棉铃对位叶全氮含量达到最小值的时间晚, 可延长棉铃和纤维生物量快速累积期的持续时间。棉铃对位叶全氮含量最小值与棉子生物量快速累积期的持续时间显著正相关 ( $P<0.05$ ), 表明棉铃对位叶全氮

含量最小值高,可延长棉子生物量快速累积期的持续时间。

棉铃对位叶 C/N 快速增长期持续时间与棉铃生物量快速累积期的持续时间显著正相关 ( $P<0.05$ ),棉铃对位叶 C/N 快速增长期平均速率与棉铃、纤维生物量快速累积期的持续时间极显

著和显著负相关 ( $P<0.01, P<0.05$ ),表明棉铃对位叶 C/N 快速增长期持续时间长,可延长棉铃生物量快速累积期持续时间,棉铃对位叶 C/N 快速增长期平均速率小,可延长棉铃、纤维生物量快速累积期持续时间。

表 4 棉铃对位叶碳氮变化特征值与棉铃(棉子、纤维)生物量累积变化特征值间的相关性

Table 4 Correlationship between the eigenvalues of carbon and nitrogen dynamic changes along with boll age in the subtending leaf of cotton boll and the eigenvalues of cotton boll biomass dynamic changes along with boll age

		棉铃				棉子				纤维			
		$t_{1C}$	$t_{2C}$	$T_C$	$V_{1C}$	$t_{1S}$	$t_{2S}$	$T_S$	$V_{1S}$	$t_{1F}$	$t_{2F}$	$T_F$	$V_{1F}$
全碳含量	$t_{Cmin}$	-0.169	0.235	0.426	-0.682*	-0.425	-0.733**	-0.740**	-0.610*	0.004	0.537	0.759**	-0.750**
	$Y_{Cmin}$	0.051	-0.436	-0.623*	0.814**	0.218	0.635*	0.733**	0.554	-0.056	-0.567	-0.759**	0.767**
全氮含量	$t_{Nmin}$	-0.001	0.475	0.647*	-0.317	-0.135	-0.378	-0.434	-0.148	-0.045	0.595*	0.879**	-0.334
	$Y_{Nmin}$	0.429	0.372	0.233	0.408	0.576*	0.761**	0.686*	0.532	0.431	0.064	-0.253	0.539
碳氮比	$T_{CN}$	0.247	0.600*	0.659*	0.123	0.097	0.225	0.247	0.142	0.352	0.581*	0.542	0.122
	$V_{CN}$	-0.441	-0.761**	-0.754**	0.184	-0.199	-0.130	-0.056	-0.043	-0.336	-0.602*	-0.585*	0.085

注:  $t_{Cmin}$ 、 $t_{Nmin}$ : 棉铃对位叶全碳、全氮含量到达最小值的时间,  $Y_{Cmin}$ 、 $Y_{Nmin}$ : 棉铃对位叶全碳、全氮含量最小值,  $T_{CN}$ : 棉铃对位叶 C/N 快速增长期,  $V_{CN}$ : C/N 快速增长期平均速率,  $t_{1C}$ 、 $t_{1S}$ 、 $t_{1F}$ : 棉铃、棉子、纤维生物量快速累积期起始时间,  $t_{2C}$ 、 $t_{2S}$ 、 $t_{2F}$ : 棉铃、棉子、纤维生物量快速累积期终止时间,  $T_C$ 、 $T_S$ 、 $T_F$ : 棉铃、棉子、纤维生物量快速累积期持续时间,  $V_{1C}$ 、 $V_{1S}$ 、 $V_{1F}$ : 棉铃、棉子、纤维生物量快速累积期平均累积速率。\* 和 \*\* 分别表示相关系数在 0.05 和 0.01 水平上显著 ( $n=12, R_{0.05}=0.576, R_{0.01}=0.707$ )。

### 3 讨论

棉铃对位叶全碳、全氮含量及两者比值是衡量其碳氮代谢的重要指标,其动态变化反映了棉铃发育过程中对叶片光合产物的需求状况。前人研究表明<sup>[18,21]</sup>,棉铃对位叶全氮含量随铃龄呈前期快、后期慢的下降趋势,本研究结论与之相符。另外,本研究发现,在棉铃发育后期,棉铃对位叶全氮含量有稍微上升趋势,因此,本研究利用函数  $Y=at^2+bt+c$  能够较好地拟合棉铃对位叶全氮含量动态变化进行拟合。作物叶片全碳含量变化在棉花方面研究较少,对水稻的研究表明,水稻叶片全碳含量随生育期的推进先下降后上升,但变化幅度相对较小<sup>[22]</sup>,本研究结果与此类似,并以函数  $Y=at^2+bt+c$  对其进行拟合。本研究表明,棉铃对位叶全碳与全氮含量比值随铃龄呈“S”型变化曲线,可用 Logistic 方程拟合,与韩锦峰等对烟草叶片的研究结果一致<sup>[23]</sup>。薛利红等<sup>[22]</sup>对水稻的研究也认为,叶片全碳与全氮含量比值随生育期的推进呈上升趋势。但胡宏标<sup>[14]</sup>等对棉铃对位

叶可溶性糖与氨基酸含量的比值研究表明,其比值随铃龄呈先下降后上升趋势,符合函数  $Y=at^2+bt+c$  [ $Y$ : 碳氮比,  $t$  (d): 铃龄,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ : 参数] 所描述的规律,分析其原因,可能是不同研究中 C/N 所用指标不同所致。

棉铃对位叶碳氮变化特征与棉铃(棉子、纤维)的生物量密切相关<sup>[24]</sup>。作物叶片碳代谢可显著影响作物体内有机物的合成、转运和积累<sup>[25]</sup>。本研究表明,棉铃对位叶全碳含量到达最小值的时间越早,全碳含量最小值越高,棉铃、纤维生物量快速累积持续期平均速率就越大(表 4)。其主要原因可能是叶片碳代谢相对旺盛,其碳水化合物供应能力较强,从而提高了叶片碳水化合物向棉铃的转运能力<sup>[3,26-27]</sup>。另外,棉铃对位叶全碳含量到达最小值的时间较早以及具有较高的最小含量值,则不利于棉铃、纤维生物量快速累积持续期的延长。这可能是因为作物碳、氮代谢密切相关,两者需要共同的还原力、ATP 和碳骨架<sup>[28]</sup>,当棉铃对位叶碳代谢过于旺盛时,其氮代谢则会相对较

弱,缩短棉铃对位叶生理功能期<sup>[29]</sup>。

植物叶片全氮含量对其光合速率、光能利用率以及生物量的形成有直接影响<sup>[30-31]</sup>。相关研究表明,作物叶片全氮含量高,氮代谢能力强,叶片生理功能期持续时间长,从而延长了叶片向库单位输送营养物质的时间<sup>[13,29]</sup>。本研究表明,棉铃对位叶全氮含量到达最小值的时间越迟、全氮含量最小值越高,越有利于棉铃、纤维、棉子生物量快速累积持续期的延长。这可能是因为棉铃对位叶全氮含量最小值到达时间迟、全氮量最小值高,表示叶片氮代谢较旺盛,延长了其生理功能持续期。

$C/N$  是衡量植株碳氮代谢平衡、营养生长和生殖生长平衡的重要指标,与植株生物量的分配关系密切<sup>[31]</sup>。本研究发现,棉铃对位叶  $C/N$  随铃龄变化趋势符合 Logistic 生长曲线,与棉铃生物量累积动态变化趋势一致,能够更好地反映棉铃对位叶碳氮变化与棉铃生物量的关系。本研究中,棉铃对位叶  $C/N$  快速增长持续期较长、其快速增长长期平均速率较小,可延长棉铃及纤维生物量快速累积持续期,可能是因为棉铃对位叶  $C/N$  快速增长持续期长、其快速增长长期平均速率较小,表明棉铃对位叶生理功能期长,碳氮代谢较为协调。

#### 4 结论

棉铃对位叶全碳、全氮含量变化可用函数  $Y=at^2+bt+c$  拟合,其  $C/N$  动态变化与棉铃(棉子、纤维)生物量动态变化趋势一致,符合 Logistic 生长曲线。棉铃对位叶碳氮变化特征与棉铃生物量的关系密切。延迟棉铃对位叶全氮含量到达最小值的时间,延长  $C/N$  的快速增长持续期,降低棉铃对位叶  $C/N$  的快速增长长期平均速率,则可增加棉铃及纤维的生物量累积量。

#### 参考文献:

- [1] MOLL R H, Jackson W A, Mikkelsen R L. Recurrent selection for maize grain yield: dry matter and nitrogen accumulation and partitioning changes[J]. *Crop Sci*, 1994, 34: 874-881.
- [2] PAN W L, Camberato J J, Moll R H. Altering source-sink relationships in prolific maize hybrids: consequences for nitrogen uptake and remobilization[J]. *Crop Sci*, 1995, 35: 836-845.
- [3] UHART S A, Andrade F H. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source sink ratios[J]. *Crop Sci*, 1995, 35: 183-190.
- [4] 张 祥,张 丽,王书红,等. 棉花源库调节对铃叶光合产物运输分配的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(5): 843-848.  
ZHANG Xiang, Zhang Li, Wang Shu-hong, et al. Effect of source-sink regulation on the transportation and allocation of boll-leaf photosynthetic products in cotton [J]. *Acta Agron Sin*, 2007, 33(5): 843-848.
- [5] 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 Hong-chun, Feng Li-xiao, Xie Zhi-xia, et al. Physiological characteristics of boll-leaf system and boll weight space distributing of cotton under different nitrogen levels[J]. *Sci Agri Sin*, 2007, 40(8): 1638-1645.
- [6] ZHANG Yao-hong, Fan Jian-bo, Zhang Ya-li, et al. N accumulation and translocation in four japonica rice cultivars at different N rates[J]. *Pedosphere*, 2007, 17: 792-800.
- [7] 王绍华,曹卫星,丁艳锋,等. 库大小对水稻不同叶位叶片氮代谢的影响[J]. *作物学报*, 2004, 30(8): 739-744.  
WANG Shao-hua, Cao Wei-xing, Ding Yan-feng, et al. Effects of sink size on nitrogen metabolism in different position leaves of rice[J]. *Acta Agron Sin*, 2004, 30(8): 739-744 .
- [8] GORNY A G, Garczynski S, Banaszak Z. Genetic variation in the efficiency of nitrogen utilization and photosynthetic activity of flag leaves among the old and modern germplasm of winter wheat[J]. *J Appl Genet*, 2006, 47: 231-237.
- [9] 金继运,何 萍. 氮钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响[J]. *中国农业科学*, 1999, 32(4): 55-62.  
JIN Ji-yun, He Ping. Effect of N and K nutrition on post metabolism of carbon and nitrogen and grain weight formation in maize[J]. *Sci Agri Sin*, 1999, 32(4): 55-62 .
- [10] SINCLAIR T R, Pinte P J, Kimball B A, et al. Leaf nitrogen concentration of wheat subjected to elevated  $[CO_2]$  and either water or N deficits[J]. *Agri Eco and Environ*, 2000, 79: 53-60.
- [11] 马新明,王志强,王小纯,等. 不同形态氮肥对不同专用小麦叶片氮代谢及籽粒蛋白质的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1076-1080.  
MA Xin-ming, Wang Zhi-qiang, Wang Xiao-chun, et al. Effects of different types of nitrogen fertilizer on leaves N-metabolism and grain protein of wheat cultivars with specialized end-uses [J]. *Sci Agri Sin*, 2004, 37(7): 1076-1080.
- [12] POZO A D, Pérez P, Gutiérrez D. Gas exchange acclimation to elevated  $CO_2$  in upper-sunlit and lower-shaded canopy leaves in relation to nitrogen acquisition and partitioning in wheat grown in field chambers[J]. *Environ Exp Bot*, 2007, 59: 371- 380
- [13] HE Ping, Osaki M, Takebe M. Comparison of whole system of

- carbon and nitrogen accumulation between two maize hybrids differing in leaf senescence[J]. *Photosynthetica*, 2003, 41(3): 399-405.
- [14] 胡宏标, 张文静, 陈兵林, 等. 棉铃对位叶 C/N 的变化及其与棉铃干物质积累和分配的关系[J]. *作物学报*, 2008, 34(2): 254-260.
- HU Hong-biao, Zhang Wen-jing, Chen Bing-lin, et al. Variability of C/N ratio in cotton boll subtending leaf and its relationship to cotton boll dry matter accumulation and distribution[J]. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(2): 254-260.
- [15] ZHAO Du-li, Oosterhuis D M. Dynamics of non-structural carbohydrates in developing leaves, bracts and floral buds of cotton[J]. *Environ and Exp Bot*, 2000, 43: 185-195.
- [16] JOHN J R, Raja R, Johnie N J. Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition[J]. *Eur J Agron*, 2006, 24: 282-290.
- [17] 黄骏麒. 中国棉作学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998.
- HUANG Jun-qi. *China cotton farming* [M]. Beijing: China Agricultural Sci & Tech Press, 1998.
- [18] 薛晓萍, 王建国, 郭文琦, 等. 氮素水平对初花后棉株生物量、氮素累积特征及氮素利用率动态变化的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3631-3639.
- XUE Xiao-ping, Wang Jian-guo, Guo Wen-qi, et al. Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization recovery rate of cotton after initial flowering[J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(11): 3631-3639.
- [19] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京: 化工出版社, 2007: 64-67.
- ZHANG Jia-en. *Experiment study methods and technique of bionomics*[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2007: 64-67.
- [20] 李西开. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 272.
- LI You-kai. *Routine analysis methods of soil agrochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1983: 272.
- [21] 马溶慧, 许乃银, 张传喜, 等. 氮素调控棉花纤维蔗糖代谢及纤维比强度的生理机制[J]. *作物学报*, 2008, 34(12): 2143-2151.
- MA Rong-hui, Xu Nai-yin, Zhang Chuan-xi, et al. Physiological mechanism of sucrose metabolism in cotton fiber and fiber strength regulated by nitrogen[J]. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(12): 2143-2151.
- [22] 薛利红, 杨林章, 范小晖. 基于碳氮代谢的水稻氮含量及碳氮比光谱估测[J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 430-435.
- XUE Li-hong, Yang Lin-zhang, Fan Xiao-hui. Estimation of nitrogen content and C/N in rice leaves and plant with canopy reflectance spectra[J]. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(3): 430-435.
- [23] 韩锦峰, 史宏志, 官春云, 等. 不同施氮水平和氮素来源烟叶碳氮比及其与碳氮代谢的关系[J]. *中国烟草学报*, 1996, 3(1): 19-25.
- HAN Jin-feng, Shi Hong-zhi, Guan Chun-yun, et al. C/N of tobacco leaf and its relationship with carbon and nitrogen metabolism as related to nitrogen level and source[J]. *China Tobacco Sci*, 1996, 3(1): 19-25.
- [24] 马溶慧, 许乃银, 张传喜, 等. 氮素水平对棉铃干物质积累分配和纤维品质性状的影响[J]. *棉花学报*, 2009, 21(2): 115-120.
- MA Rong-hui, Xu Nai-yin, Zhang Chuan-xi, et al. Effects of nitrogen rates on dry matter accumulation and distribution of bolls and fiber quality characteristics in cotton [J]. *Cotton Science*, 2009, 21(2): 115-120.
- [25] NAKAMURA Y, Yuki K, Park S Y. Carbohydrate metabolism in the developing endosperm of rice grains[J]. *Plant and Cell Physiol*, 1989, 30(6): 833-839.
- [26] 高松洁, 王文静, 郭天财, 等. 不同穗型冬小麦品种灌浆期旗叶碳氮代谢特点及籽粒淀粉积累动态[J]. *作物学报*, 2003, 29(3): 427-431.
- GAO Song-jie, Wang Wen-jing, Guo Tian-cai, et al. C-N metabolism characteristics in flag leaf and starch accumulating developments in seed during grain filling stage in two winter wheat cultivars with different spike type[J]. *Acta Agron Sin*, 2003, 29(3): 427-431.
- [27] 赵会杰, 邹琦, 张秀英. 两个不同穗型小麦品种生育后期碳水化合物代谢的比较研究[J]. *作物学报*, 2003, 29(5): 676-681.
- ZHAO Hui-jie, Zou Qi, Zhang Xiu-ying. Comparison between two wheat varieties with different spike type in carbohydrate metabolism during late growth period[J]. *Acta Agron Sin*, 2003, 29(5): 676-681.
- [28] 史瑞和. 植物营养原理[M]. 南京: 江苏科学出版社, 1989.
- SHI Rui-he. *Theory of plant nutrition*[M]. Nanjing: Jiangsu Science Press, 1989.
- [29] 张文静, 胡宏标, 陈兵林, 等. 棉铃对位叶生理特性的基因型差异及其与铃重形成的关系[J]. *棉花学报*, 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]. *Cotton Sci*, 2007, 33(4): 531-538.
- [30] 李永庚, 蒋高明, 杨景成. 温度对小麦碳氮代谢、产量及品质影响[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 164-169.
- LI Yong-geng, Jiang Gao-ming, Yang Jing-cheng. Effects of temperature on carbon and nitrogen metabolism, yield and quality of wheat[J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, 27(2): 164-169.
- [31] GRINDLAY D J. Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area[J]. *Agri Sci*, 1997, 128: 377-396. ●