

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

薛晓萍^{1,2}, 王建国², 郭文琦¹, 陈兵林¹, 尤 军², 周治国^{1,*}

(1. 南京农业大学/农业部作物生长调控重点开放试验室, 南京 210095; 2. 山东省气候中心, 济南 250031)

摘要:在大田栽培条件下, 分别在长江流域下游棉区(江苏南京)和黄河流域黄淮棉区(河南安阳)设置棉花氮素水平试验, 定量研究氮素水平对花后棉株生物量、氮素累积特征及氮素累积利用率动态变化的影响, 结果表明: 棉株总生物量和氮素累积量随花后棉株生育进程的动态变化符合 S 型曲线, 安阳、南京试点分别以 $360\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $240\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮素水平的总生物量、氮素累积最多, 其动态累积模型的特征参数值最为协调, 皮棉产量最高。因此, 可以通过改变施肥量来调节初花后棉株生长特征值, 从而获得高产。棉株氮素累积利用率随初花后棉花生育进程的推进, 呈现为不规则的 S 型曲线变化趋势, 计算两试点的氮素累积利用率、瞬时利用率, 安阳试点以 $360\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施氮水平为最优, 南京以 $240\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 最高; 施肥过多不仅利用率低, 而且易造成营养器官比例加大, 棉株虽可获得较大的干物质和氮素累积, 但不能适时向生殖器官转移, 皮棉产量降低。

关键词: 氮素水平; 棉花; 生物量; 氮素累积; 氮素利用率

文章编号: 1000-0933(2006) 11-3631-10 中图分类号: S148 文献标识码: A

Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization recovery rate of cotton after initial flowering

XUE Xiao-Ping^{1,2}, WANG Jian-Guo², GUO Wen-Qi¹, CHEN Bing-Lin¹, YOU Jun², ZHOU Zhi-Guo^{1,*} (1. Key Laboratory of Crop Growth Regulation of the Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Shandong Province Climatic Centre, Jinan 250031, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3631 ~ 3640.

Abstract: Quantitative information regarding biomass accumulation, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency for cotton plant under varying environmental and growth conditions is required for the development of plant growth models and also for the assessment of the contribution of cotton to nitrogen balances in cotton cropping systems. In order to quantitatively study the dynamic characteristics of accumulations of dry matter, nitrogen uptake and nitrogen fertilization recovery rate of cotton plant after initial flowering, two field experiments with different levels of nitrogen application (0 , 120 , 240 , 360 , and $480\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) were carried out in Nanjing and Anyang, standing for the ecological conditions in the middle lower reaches of Yangtze River Valley and Yellow River Valley in China, respectively. The results show that the total dry matter and nitrogen accumulation of cotton were affected significantly by the application rate of nitrogen fertilizer throughout the growth period after initial flowering. With the increase of nitrogen application rate, the dry matter firstly increased, and then reached its highest value at $360\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in

基金项目: 农业部农业结构调整重大技术研究专项资助项目(2003-05-02B); 国家自然科学基金资助项目(30370831, 30571095); 江苏省自然科学基金资助项目(BK200219, BK2005091)

收稿日期: 2005-09-12; **修订日期:** 2006-06-08

作者简介: 薛晓萍(1964~), 女, 山东招远人, 博士生, 高工, 主要从事作物生态与农业气象预测研究. E-mail: xxp@sdan.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjscott@njau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Major Technological Research Programme for Agricultural Structure Adjustment of Chinese Department of Agriculture(No. 2003-05-02B); The National Natural Science Foundation of China(No. 30370831, 30571095); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No. BK200219, BK2005091)

Received date: 2005-09-12; **Accepted date:** 2006-06-08

Biography: XUE Xiao-Ping, Ph. D. candidate, mainly engaged in crop ecology and agrometeorology forecast. E-mail: xxp@sdan.com.cn

Anyang and $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Nanjing, and the nitrogen uptake amount reached its highest value at $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Anyang and Nanjing, respectively. However, the total dry matter (including roots) and nitrogen uptake amount continuously increased with the progress of plant growth after initial flowering, and the general pattern of crop growth followed a sigmoid function of time. The eigenvalues of the dynamic accumulation model with the nitrogen application level of $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for Anyang and Nanjing, respectively, were more harmonious than that with other treatments. The maximum nutrient uptake rate appeared earlier than did the dry matter in all treatments.

Cotton lint yield was significantly affected by the nitrogen rate of supply at the two experimental sites. Among the nitrogen treatments, lint yield was lower in the control plot ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) than in the fertilized plots. At the two experimental sites, the yield data shows that nitrogen application significantly increased yield. Lint yield increased with the increase of nitrogen application rate up to $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Anyang, and up to $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Nanjing, and the highest yield was $1789.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $1467.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. The relationship between lint yield and nitrogen application rate can be described with a quadratic equation.

The dynamic developments of nitrogen fertilization recovery rate behaved in a very similar way as the cotton yield did at the two experimental sites. The nitrogen recovery rate and momentary nitrogen recovery rate reached their highest value at the nitrogen application level of $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for Anyang and Nanjing, respectively. Excessive nitrogen delayed cotton maturity and increased the proportion of vegetative organs, thereby reduced there quality and lint yield.

Key words: nitrogen application levels; cotton; biomass; nitrogen accumulation; nitrogen recovery rate

氮素是作物生长所必需的营养元素之一,当前世界各产棉国在棉花施肥方面仍以氮肥为主^[1]。长期以来棉花产量大幅度增加是以氮素的高投入为基础。目前我国棉花氮素利用率较低,一般为 30%~40%,低于发达国家 20%~30%,导致棉花生产成本增加、资源浪费、环境污染,是我国棉花生产可持续发展的关键制约因素之一。棉花生产中氮素合理运筹可在提高棉花产量、品质的同时,提高氮素利用率,减少因过量施氮所造成的环境污染^[2]。

作物高产、优质是以较高的生物量为前提^[3~7],而生物量累积是以养分吸收为基础。陈德华等人^[8]研究表明,棉花群体干物质生产与产量密切相关,协调好棉花群体干物质生产是建立棉花高效群体结构最本质的基础。Bondada 等^[9]研究表明,土壤氮素含量显著影响棉花群体光合速率和产量。张旺峰等^[10]认为氮素用量对棉花群体光合性能和产量形成有一定控制作用。大量研究表明^[6,10~14],作物生物量累积、养分吸收的动态变化对氮素反应较为敏感,通常,氮素对其增长模型的基本形态影响较小,但对增长速率影响较大。关于棉花生产中氮素运筹问题,前人已从不同角度进行了研究,如棉花统计施肥模型^[15]、精确施肥技术^[16,17]、施肥管理专家系统^[18]以及特定栽培模式的施肥方案^[19,20]等,但上述研究多集中在几个主要生育时期,如苗期、蕾期、花铃期、吐絮期等,而且大多是研究棉株的物质累积,有关棉株氮素累积乃至氮素利用率的研究较少。棉花具有无限开花结铃习性,初花期以后生长期较长,是棉花产量和品质形成的关键时期,前人的研究多集中在花铃期和吐絮期两个比较重要的生育阶段。而初花后棉株干物质累积、养分吸收及肥料累积利用率的动态变化研究迄今少有报道,对棉花栽培中的关键措施——花铃肥的施用不能起到精确指导作用。

本研究旨在以经济产量和氮素利用效率双高为目标,在不同氮素水平的大田试验条件下,研究初花后棉花生物量增长、氮素累积及氮素累积利用率的动态特点与规律,为实施科学棉田管理技术、选择适宜的施肥时间、数量及提高经济效益提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

长江流域下游棉区和黄河流域黄淮棉区是我国两大主要棉区,其生态环境差异较大,为使试验既有重复性又有生态区域的代表性,试验于 2004 年分别在中国农业科学院棉花研究所(河南安阳,位于黄河流域黄淮棉区)和江苏省农业科学院(江苏南京,位于长江流域下游棉区)进行。安阳、南京试点分别为沙壤土、粘土,耕

层土壤有机质含量分别为 1.97 %、2.18 % ,全氮为 0.08 %、0.08 % ,碱解氮为 73.4、91.8 mg ·kg⁻¹ ,速效磷为 23.6、41.5 mg ·kg⁻¹ ,速效钾为 247.5、226.3 mg ·kg⁻¹ 。2 试点棉花全生长期内的月平均温度、总降水量、总日照时数分别为:安阳(4~10 月份)20.7 °C、455.3 mm、1283.4 h;南京(4~11 月份)21.7 °C、791.3 mm、1297.6 h。供试棉花品种为美棉 33B ,安阳、南京试点均在 4 月 25 日播种。

安阳、南京试点试验均设置 5 个氮素水平:0、120、240、360、480 kg ·hm⁻² ,分别以 N0、N1、N2、N3、N4 表示,其中 N0 为对照。氮素运筹均按基肥 40 %、花铃肥 60 %(初花期施用) ,3 次重复,随机区组排列,小区面积分别为 21m²、18m² ,行、株距分别为 75 cm ×25 cm 和 90 cm ×25 cm。田间管理按高产栽培要求进行。

1.2 测定内容与方法

2 试点均从初花期开始取样,取样时间分别为:安阳试点在初花后的第 1、14、20、34、52、60、71、86 天,南京试点在初花后第 1、10、26、41、54、72 天,每试验小区连续选取有代表性的棉株 5 株,按根、茎、果枝、主茎叶、果枝叶、蕾铃、壳和纤维等不同器官分样,在 105 °C 下杀青 30min ,80 °C 烘至恒重,测定其干物重,粉碎后用凯氏定氮法测定分器官的全氮含量,根据分器官的干物重计算棉花单株氮素累积量。成熟后分小区收获、测产。

1.3 有关计算方法

1.3.1 生物量、氮素累积特征值计算方法 棉株生物量和氮素累积量的增长符合 Logistic 曲线,其基本模型为:

$$W = \frac{W_m}{1 + ae^{bx}} \quad (1)$$

式中, W 为棉株生物量或棉株含氮量, W_m 为相应的理论最大值, t 为初花后的生长日数。

Logistic 模型蕴藏着很多生物生态学特性信息,利用这些信息参数能较好地解析棉株生物量或含氮量的增长特点,并使之定量化。分别对(1)式求 1 阶、2 阶和 3 阶导数,可得相应生长曲线的最快生长时段的起始时间(t_1)、终止时间(t_2)、最大相对生长速率(V_m) 及其出现时间(t_m), 其中:

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

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

$$t_m = - \frac{\ln a}{b} \quad (4)$$

$$V_m = - \frac{bW_m}{4} \quad (5)$$

1.3.2 氮素累积利用率计算方法 本研究所描述的氮素累积利用率是指棉株对施入的氮素吸收利用率,可按以下方法计算:

$$\text{氮素累积利用率} = (\text{施氮区吸氮量} - \text{无施氮区吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100$$

2 结果与分析

2.1 氮素水平对棉花产量的效应分析

依据 2 试点收获后各小区的单株铃数、铃重、衣分等产量构成要素的分析结果和种植密度,可得到其相应的皮棉产量(见表 1),在施氮量相对较少时,2 试点的产量均呈现为随施氮量增加而增加,但当施氮量达到一定水平后,其皮棉产量随施氮量的增加反而降低,其中安阳试点以 N3 处理产量最高,较对照高 110.5 kg ·hm⁻² ,南京试点则表现为 N2 处理产量最高,比对照高 360.2 kg ·hm⁻² ,其处理间产量差异均达到极显著(0.01 水平)。对两试点皮棉产量进行数值模拟,氮素水平对产量的效应为:

$$Y_{\text{安阳}} = - 0.001x^2 + 0.6589x + 1677.7 \quad R^2 = 0.9776^{**} \quad (6)$$

$$Y_{\text{南京}} = - 0.0048x^2 + 2.5396x + 1129.1 \quad R^2 = 0.9324^{**} \quad (7)$$

二者符合抛物线型(图 1),安阳、南京两试点的理论适宜施氮量分别为 329.5 kg ·hm⁻²、264.5 kg ·hm⁻² ,对

应的皮棉产量分别为 1786.2 kg·hm⁻²、1465.0 kg·hm⁻²。

由此可见,施氮水平对棉花产量有极显著影响,且产量水平并非与施氮量呈正相关,过多施肥将导致产量下降。

表 1 氮素水平对棉株生物量、氮素累积及产量的影响

处理	总生物量		氮素累积		生殖器官氮素累积		产量	
	Tb(kg·hm ⁻²)		Naa(kg·hm ⁻²)		Naaro(kg·hm ⁻²)		Yi(kg·hm ⁻²)	
	安阳 Anyang	南京 Nanjing	安阳 Anyang	南京 Nanjing	安阳 Anyang	南京 Nanjing	安阳 Anyang	南京 Nanjing
N0	8596.3eE	6685.1eE	173.0eE	103.9eE	90.1eE	53.3dC	1679.2eE	1106.9dD
N1	9096.8dD	8310.6dD	185.6dD	151.1dD	95.7dD	77.9bB	1740.8dD	1406.9bB
N2	9723.5cC	9939.8aA	201.8cC	214.0cC	109.1cC	87.5aA	1769.3bB	1467.1aA
N3	10327.3aA	9847.4bB	227.3aA	224.4aA	123.1aA	88.3aA	1789.7aA	1369.1cA
N4	10189.6bB	9696.6cC	213.2bB	219.1bB	113.1bB	76.7cB	1750.4cC	1262.9dD

Tb: 总生物量 Total biomass; Naa: 氮素累积 Nitrogen accumulation amount; Naaro: 生殖器官氮素累积 Nitrogen accumulation amount in reproductive organ; Yi: 产量 Yield

2.2 棉株生物量和氮素累积的动态变化

2.2.1 棉株生物量和氮素累积动态变化分析 由图 2 可见,安阳试点棉株总生物量随氮素水平的提高,表现为先增加后降低的趋势,以 N3 处理为最高。南京试点棉株总生物量,前期随氮素水平的升高而增加,到中期以后 N2 处理的总生物量迅速增加,与 N3、N4 处理差异相对较小,均显著高于 N1、N0。方差分析表明,2 试点处理间干物质累积量的差异均达极显著水平(见表 1),说明氮肥对棉株生物量累积影响显著。

由图 3 可见,安阳、南京 2 试点棉株氮素累积量均在一定施氮水平范围内随氮素水平的升高而增加,至 N3 水平时达最大值,之后随施氮量的增加而下降,处理间差异亦达到极显著水平(见表 1)。

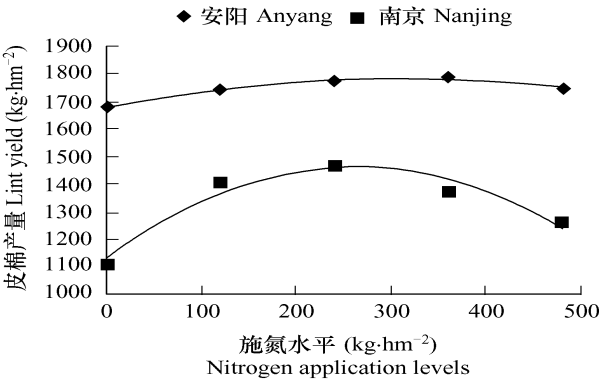


图 1 施氮素水平与皮棉产量的关系(安阳,南京)

Fig. 1 Relationship between lint yield and nitrogen application levels

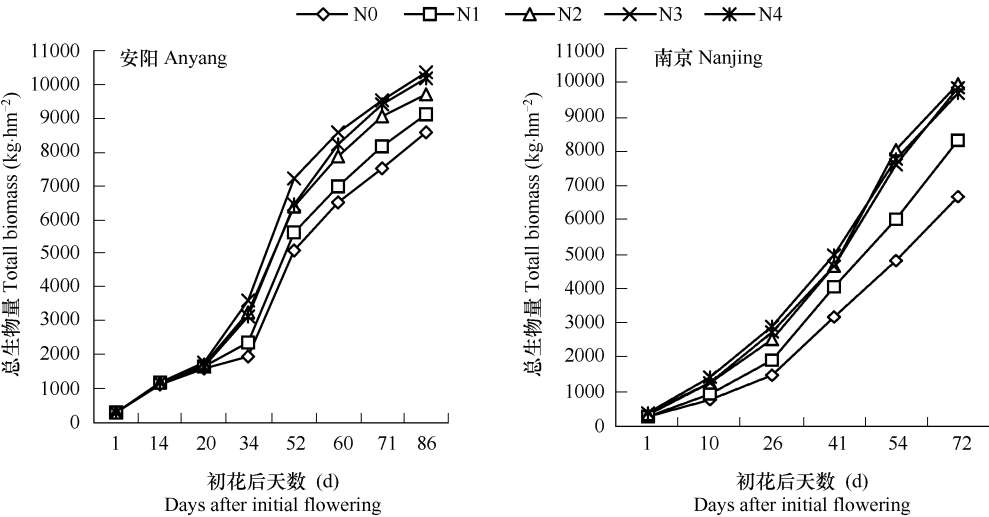


图 2 氮素水平对棉株总生物量动态变化的影响(安阳,南京)

Fig. 2 Effect of nitrogen levels on dynamic change of the total biomass of cotton plant (Anyang, Nanjing)

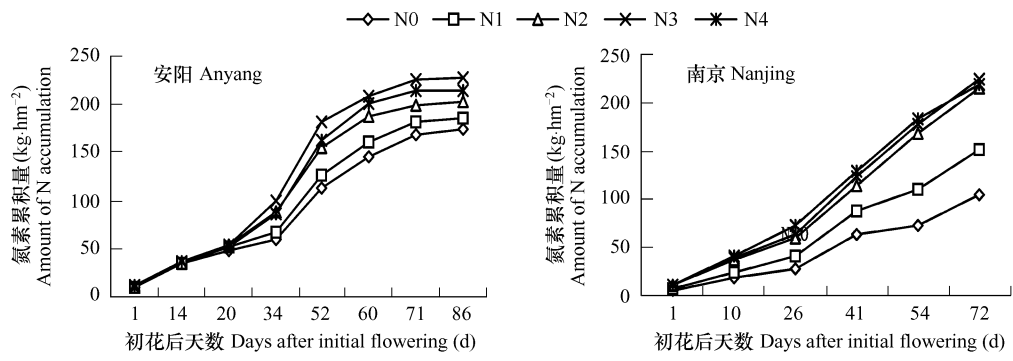


图3 氮素水平对棉花氮素累积量动态变化的影响(安阳,南京)
Fig.3 Effect of nitrogen levels on dynamic change of nitrogen accumulation amount of cotton plant (Anyang, Nanjing)

2.2.2 棉花生物量和氮素累积量动态模型的特征值分析 用模型(1)分别对棉株生物量和氮素累积量进行拟合,得到2试点各氮素水平下棉株生物量和氮累积量的动态变化模型(见表2、表3)。其中, W_{Nn} ($n=0,1,2,3,4$)代表棉株生物量, N_{Nn} ($n=0,1,2,3,4$)代表棉株氮素累积量, t 为生育进程,以日为步长。

表2 不同氮素水平下棉花总生物量累积的动态模型(安阳,南京)

处理 Treatments		Table 2 Dynamic models of total biomass accumulation of cotton under different nitrogen levels (Anyang, Nanjing)		
		安阳 Anyang	R^2	南京 Nanjing
N0	$W_{N0} = \frac{946.13}{1 + 24.3 \text{EXP}(-0.064t)}$		0.991 **	$W_{N0} = \frac{7998.1}{1 + 24.6 \text{EXP}(-0.067t)}$
				0.999 **
	$W_{N1} = \frac{9950.0}{1 + 23.9 \text{EXP}(-0.066t)}$		0.995 **	$W_{N1} = \frac{9592.3}{1 + 26.9 \text{EXP}(-0.072t)}$
				0.998 **
	$W_{N2} = \frac{10272.7}{1 + 25.6 \text{EXP}(-0.073t)}$		0.999 **	$W_{N2} = \frac{11362.5}{1 + 25.1 \text{EXP}(-0.073t)}$
N3	$W_{N3} = \frac{10690.3}{1 + 28.2 \text{EXP}(-0.078t)}$		0.999 **	$W_{N3} = \frac{1148.6}{1 + 22.5 \text{EXP}(-0.069t)}$
				0.995 **
N4	$W_{N4} = \frac{10822.7}{1 + 27.2 \text{EXP}(-0.072t)}$		0.999 **	$W_{N4} = \frac{10995.6}{1 + 19.7 \text{EXP}(-0.070t)}$
				0.995 **

安阳 $n=8, R^2_{0.01}=0.695$; 南京 $n=6, R^2_{0.01}=0.841$; W:干物重;下同 Anyang $n=8, R^2_{0.01}=0.695$; Nanjing $n=6, R^2_{0.01}=0.841$; W:Weight of dry matter, the same below **差异显著,下同 the difference is significant, the same below

表3 不同氮素水平下棉花氮素累积量的动态模型(安阳,南京)

处理 Treatments		Table 3 Dynamic models of nitrogen accumulation of cotton under different nitrogen levels (Anyang, Nanjing)		
		安阳 Anyang	R^2	南京 Nanjing
N0	$N_{N0} = \frac{194.4}{1 + 13.8 \text{EXP}(-0.059t)}$		0.985 **	$N_{N0} = \frac{119.7}{1 + 15.3 \text{EXP}(-0.063t)}$
				0.980 **
	$N_{N1} = \frac{203.0}{1 + 14.1 \text{EXP}(-0.063t)}$		0.989 **	$N_{N1} = \frac{174.1}{1 + 16.7 \text{EXP}(-0.065t)}$
				0.990 **
	$N_{N2} = \frac{210.1}{1 + 16.0 \text{EXP}(-0.075t)}$		0.995 **	$N_{N2} = \frac{247.7}{1 + 16.9 \text{EXP}(-0.066t)}$
N3	$N_{N3} = \frac{233.9}{1 + 18.5 \text{EXP}(-0.081t)}$		0.998 **	$N_{N3} = \frac{254.9}{1 + 16.9 \text{EXP}(-0.067t)}$
				0.995 **
N4	$N_{N4} = \frac{266.0}{1 + 16.3 \text{EXP}(-0.073t)}$		0.992 **	$N_{N4} = \frac{242.9}{1 + 14.4 \text{EXP}(-0.069t)}$
				0.994 **

N:氮素累积量 Nitrogen accumulation amount
(1) 棉花生物量 从表2中看出,氮素水平对2试点棉株总生物量理论最大值影响的表现不一致,在安阳试点为: $W_{N4} > W_{N3} > W_{N2} > W_{N1} > W_{N0}$,南京试点为: $W_{N3} > W_{N2} > W_{N4} > W_{N1} > W_{N0}$ 。

分析表2中模型的特征值,安阳试点各氮素水平下棉株生物量快速累积期持续时间分别为:41、40、36、

34、36d,且快速生长起始日在初花后的第25~29天,以N3处理最早,N2、N3、N4处理间差异较小,较N0、N1提前5d左右;棉株生物量快速增长期内平均速率处理间的差异表现为:N3>N4>N2>N1>N0,其以日为时间步长的累积速率随着生育进程的推进为一单峰形式(图4),最大速率出现日在初花后42~50d,N3处理出现最早;最大增长速率分别为152.0、163.5、187.0、208.5、195.5 kg·hm⁻²·d⁻¹,以N3处理最大,最大值出现后,增长速率又以N3处理下降最快。在南京试点,由于气候、土壤等基础条件的差异,氮素水平对棉花生物量累积的影响与安阳相比存在差异,各氮素水平下的快速增长期分别为39、37、36、38、37d,以N2处理为最短。快速生长起始日在初花后的24~28d,平均速率N2处理最大,N3次之,峰值出现在初花后43~48d之间(见图4),N4最早,N2次之,最大日累积量分别为:134.5、172.7、208.0、198.6、193.6 kg·hm⁻²,峰值后以N2处理下降最快。

由于高的经济产量以高的干物质为前提,故单从初花后棉株总生物量动态累积模型考虑,上述分析表明,安阳试点N3处理、南京试点N2处理的棉株总生物量动态累积特征参数的协调性优于其它处理,利于生物量的累积与产量形成。

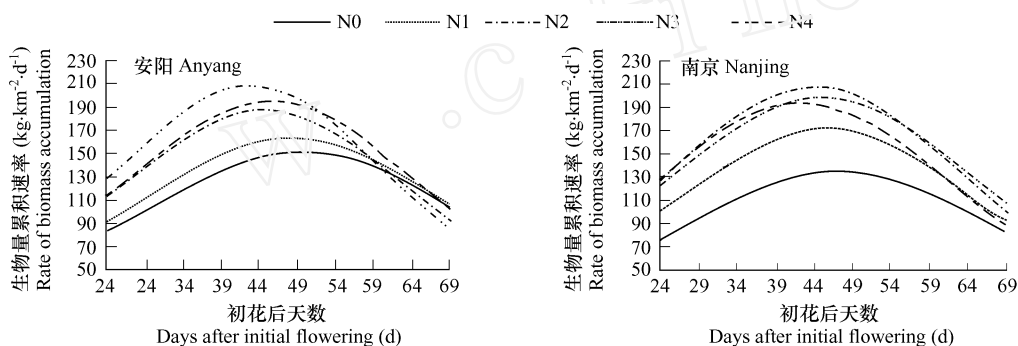


图4 氮素水平对棉花总生物量累积速率动态变化的影响(安阳,南京)

Fig. 4 Effect of nitrogen levels on dynamic change of the accumulative rate for total cotton biomass (Anyang, Nanjing)

(2) 棉株氮素累积量 分析表3中模型的特征值,安阳试点各氮素水平下棉株氮素快速累积的持续时间为32~45d,与生物量累积相近,以N3水平最短,N2次之;快速累积起始日分别为初花后的第22、21、20、20、20天,较生物量累积早5~7d;棉株氮素快速累积期内平均日增长速率以N3为最大,处理间差异表现为:N3>N4>N2>N1>N0,日累积量随生育进程呈抛物线形(图5),峰值出现日以N3最早,且下降速率最快。南京试点,棉株氮素快速累积持续时间为38~41d,以N4处理最短,N3次之;快速累积起始日分别为初花后的第22、23、23、23、20天,较生物量累积早4~6d;棉株氮素快速增长期内的平均日累积速率、最大速率分别为:1.67、2.49、3.57、3.78、3.68 kg·hm⁻²和1.90、2.84、4.07、4.31、4.20 kg·hm⁻²,最大值出现日的早晚顺序为:N4、N3、N2、N0、N1。

从棉株氮素累积动态模型特征值及其相互间的协调性分析,棉株氮素累积快速起始日均早于生物量累积,说明生物量的增长是以充足的养分吸收为基础,且2试点均以N3处理有利于棉株的氮素吸收累积。

2.3 棉株生殖器官氮素累积量的动态变化

从图6-A可以看出,随着生育进程的推移棉株生殖器官氮素动态累积仍符合Logistic模型。安阳、南京2试点棉株生殖器官氮素累积量在一定范围内随氮素水平的提高而增加,分别至N3、N2处理时达到最大,之后随施氮量的增加而下降。氮素在生殖器官中累积量的统计分析表明(表1),安阳试点处理间均存在极显著差异;南京试点,N2、N3处理无显著差异,N1、N4间达显著(0.05水平)差异,其它处理间为极显著差异。

从图6-B可以看出,不同氮素水平下氮素在棉株生殖器官的分配比例动态变化亦呈S形。安阳试点以N3处理的比例最大;南京试点则随氮素水平的升高而下降。表明氮素水平超过一定限度,养分向棉株营养体集中,向生殖器官的转移量相对降低,不利于棉花高产。南京N0、N1处理的比例相对较高,但由于其氮素在棉株与生殖器官中的累积量均较低(图3、图6-A),故不可能得到较高的产量。

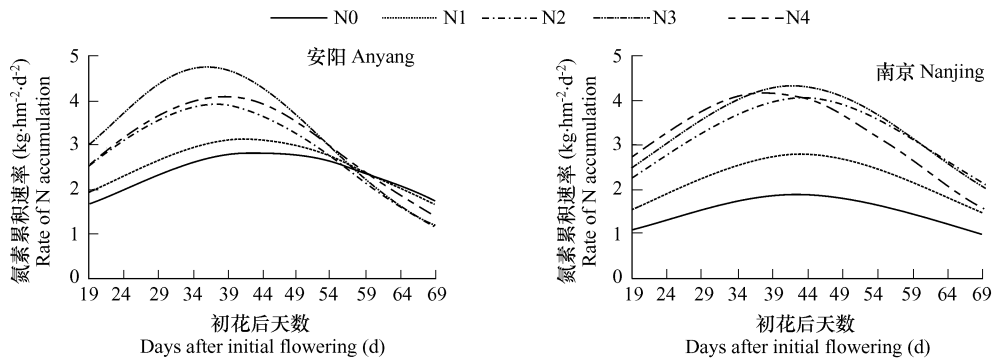


图5 氮素水平对棉株氮素累积速率动态变化的影响(安阳,南京)
Fig.5 Effect of nitrogen levels on dynamic change of nitrogen accumulation rate for cotton plant (Anyang, Nanjing)

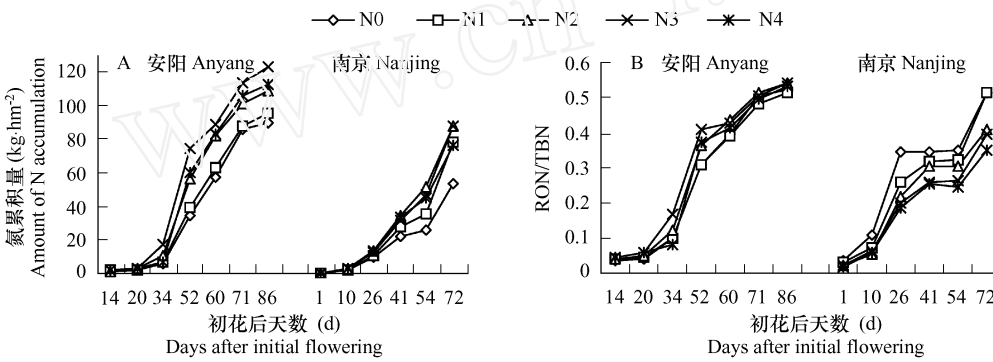


图6 棉株生殖器官氮素累积量及其氮素分配比例(安阳,南京)
Fig.6 Nitrogen accumulation amount of reproductive organ and proportion over total nitrogen accumulation amount of cotton plant (Anyang, Nanjing)
注:A,生殖器官氮素累积量,B,生殖器官氮素分配比例 A stand for the amount of nitrogen accumulation in reproductive organ, and B stand for the proportion of nitrogen in reproductive organ(ROn) over the total nitrogen accumulation amount (TBN) of cotton plant

2.4 棉花氮素累积利用率的动态变化

分析安阳、南京 2 试点各氮素水平下初花后棉花氮素累积量,以出苗至某一时段从肥料中吸收的氮素占施入氮素的百分比表示氮素累积利用率(以 $NAUE_{N1-N4}$ 表示),得到安阳试点以 N3、N2 处理的利用率最高,N4 最低;南京试点则以 N2、N1 最高,N4 最低,表明氮素累积利用率与施肥量并非成正比。试点间比较,南京试点的氮素累积利用率总体上高于安阳。

分别以 2 试点的 N0 处理为对照,建立各氮素水平下棉株氮素累积利用率的动态变化模型(表 4),从表 4 中可知,随着生育进程的推进其变化形式符合 S 型曲线,氮素累积利用率这一变化形式的形成,主要是由其不同时段内的阶段氮素利用率不同所致。不同氮素水平下的理论最大氮素累积利用率差异较大,其中安阳试点表现为: $N3 > N2 > N1 > N4$,南京试点则为: $N2 > N1 > N3 > N4$ 。试点间比较,南京试点的氮素累积利用率理论最大值同样也高于安阳。

若用棉花在某一时段内从肥料中吸收的氮素占施入氮素的百分比表示氮素瞬时利用率,图 7 为不同氮素水平下以日为单位的氮素瞬时利用率在初花后的动态变化曲线,可以看出,安阳试点 N3、N2 处理的瞬时利用率最大值明显大于 N1、N4 处理,N1 ~ N4 的瞬时最大值分别为:0.24 %、0.51 %、0.50 %、0.25 %。N2 在 8 月中旬以前、N3 在 8 月下旬以前的瞬时利用率均高于 N1、N4,这说明前两者在棉花生长的前、中期有较多的养分累积,利于后期的棉铃生长和纤维形成。南京试点,各氮素水平下的最大瞬时利用率分别为:0.90 %、1.04 %、0.76 %、0.55 %,均高于安阳试点相应处理,其中 N2 处理维持较高氮素瞬时利用率的时间最长,从图中可见,

N4 最大值出现日早于其它处理,主要是由于过多施肥造成棉株前期营养体生长茂盛,而以生殖生长为主的后期生长,因干物质、养分的转移量少,造成总生物量增长速率降低。2 试点中,安阳以 N2、N3 处理的瞬时利用率为最优,南京以 N2 处理最高。

表 4 棉花氮素累积利用率的动态模型(安阳,南京)

Table 4 Dynamic models of nitrogen accumulation recovery rate of cotton (Anyang, Nanjing)

处理 Treatments	安阳 Anyang	R ²	南京 Nanjing	R ²
N1	$NAUE_{N1} = \frac{16.4}{1 + 16.0\text{EXP}(-0.058t)}$	0.812 *	$NAUE_{N1} = \frac{50.9}{1 + 20.9\text{EXP}(-0.071t)}$	0.999 **
N2	$NAUE_{N2} = \frac{20.4}{1 + 36.0\text{EXP}(-0.100t)}$	0.769 *	$NAUE_{N2} = \frac{60.9}{1 + 18.7\text{EXP}(-0.068t)}$	0.979 **
N3	$NAUE_{N3} = \frac{22.0}{1 + 53.0\text{EXP}(-0.092t)}$	0.805 *	$NAUE_{N3} = \frac{43.7}{1 + 18.6\text{EXP}(-0.070t)}$	0.986 **
N4	$NAUE_{N4} = \frac{14.0}{1 + 32.5\text{EXP}(-0.072t)}$	0.762 *	$NAUE_{N4} = \frac{30.3}{1 + 13.7\text{EXP}(-0.073t)}$	0.975 **

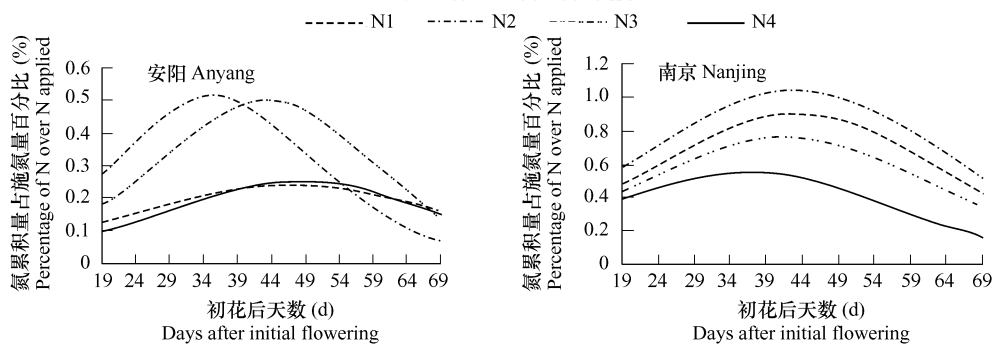


图 7 棉株氮素瞬时利用率的变化(安阳,南京)

Fig. 7 Change of momentary recovery rate of nitrogen of cotton plant. (Anyang, Nanjing)

3 结论与讨论

3.1 尽管 2 试点的生态条件不同,棉花初花后总生物量的动态累积曲线皆符合 Logistic 生长曲线,与张旺峰等^[13]的研究结论一致。气候、施肥等因子并不改变其生长模型,但可以影响特征参数。

Spyridon 等^[21]在对红花的研究得到,花期地上干物质与后期干物质向籽粒转移量呈线性相关,且年度间转移系数稳定性较好;Damish^[5]认为,小麦开花期生物量高利于提高收获指数;何萍等人^[22]对玉米的研究认为,干物质累积最大速率出现早,有利于营养生长向生殖生长转化,光合产物能有效地向籽粒转移。本研究结果表明,初花后棉花生长前期生物量累积对最终产量影响较大,生产中提高棉花花铃期前期干物质累积有利于棉花高产,同时也可以通过调整氮素的投入量来改善干物质增长参数,从而获得高产。本试验中,安阳、南京 2 试点分别以 360 kg·hm⁻²和 240 kg·hm⁻²氮素水平的棉株总生物量动态累积特征参数最为协调,有利于棉花前期生物量累积,产量最高。而南京的 360、480 kg·hm⁻²处理快速生长起始日和最大增长速率出现日均略早于 240 kg·hm⁻²氮素水平,主要是由于施氮过多造成前期营养生长过于旺盛所致,这与张旺峰^[10]等人关于氮肥对新疆高产棉花群体光合性能和产量形成影响的结论一致。

3.2 董钻^[23]在对大豆氮吸收动态及模式的研究中得出,大豆对养分的吸收速率及其最大值出现日均受施肥量的影响。张智猛等^[24]研究表明,肥料的用量及分配方式对玉米阶段氮累积有明显影响。本文的研究结果表明,棉株氮素累积的动态模式可用 Logistic 生长曲线描述,施氮量对其动态累积速率最大值及其出现日等特征值参数影响较大,施氮量可以通过影响这些参数而影响棉花氮素吸收,适宜的施氮水平可以获得大的养分吸收速率及早的最大速率出现日。安阳试点 360 kg·hm⁻²的氮素水平下,初花后棉株、生殖器官氮素累积动态特征参数最为协调,皮棉产量最高;在南京试点,从初花后棉株总氮累积量及动态累积特征参数看,360、480

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的氮素水平优于或接近于 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但氮素对生殖器官的分配比例远低于 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮素水平, 说明过多施氮棉株生物量、氮素累积主要集中在营养器官中, 导致营养体生长过旺, 生殖生长降低, 产量下降, 故南京试点以 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮水平下氮素吸收累积利于产量形成, 其产量最高。另外从生物量、养分累积的特征参数看, 养分的快速增长起始日较干物质早 4~7d, 说明棉株养分吸收是干物质累积的前提。

3.3 氮素累积利用率仅反映了一个最终结果, 张旺峰等^[29]对棉花氮素吸收的动态研究表明, 其表现为慢、快、慢 3 个阶段。本研究表明, 随着棉株生育进程的推进, 氮素累积利用率动态变化基本呈 S 型曲线, 亦存在快速增长阶段, 且累积利用率并非与施肥量呈正比。安阳试点以 360 、 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为最高, 而南京试点则以 240 、 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 最高, 其对应的产量也高于其它施氮水平, 且南京试点明显大于安阳, 说明棉株对氮素的吸收除了受自身生长需求的内在因素影响外, 包括施肥量、土壤基础条件、气象因子等外在环境条件对其亦有较大影响。

瞬时利用率反映的是棉花氮素利用率的动态过程, 在瞬时值最高时段内施肥宜于提高氮素吸收量。氮素累积利用率快速增长阶段内, 2 试点均以 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮水平的瞬时利用率平均值、最大值为最高, 安阳试点以 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮水平的特征值与 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相近。可见适宜施氮量安阳在 $240 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、南京为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时氮素利用率最高。

3.4 Hearn、Singh、Boquet 等^[25~27]研究表明, 不适宜的施氮将影响棉花的成熟期, 过量施用氮素将阻碍叶子的适时脱落, 导致棉花贪青晚熟, 增大营养器官比例, 同时提高烂铃率, 降低品质。李秀章^[28]等研究表明, 棉花干物重及各器官的含氮量与施氮量呈显著正相关, 但产量却未表现出相似的关系, 过多施氮不利于经济产量的增加。本研究表明, 南京试点在 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的氮素水平下, 虽然获得了较高的生物量和氮素累积量, 但由于营养体内氮积累过多, 营养生长旺盛, 干物质与养分向生殖器官转移较少, 生殖器官比例下降, 由此导致经济产量降低。

3.5 综合分析不同氮素水平下初花后棉株总生物量、氮素累积量及氮素累积利用率的动态变化特征值, 安阳试点棉田施氮量以 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜, 南京试点则为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本文关于施氮量对产量的效应分析表明, 2 试点施氮量分别为 329.5 、 $264.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量最高, 与前述分析基本吻合。由于为大田试验, 田间管理按高产栽培要求进行, 故对两地的实际生产有一定的代表性, 可直接用于指导实际生产。根据干物质最大累积速率或养分最大吸收速率的出现时期, 生产中可以有针对性地进行养分调控, 做到即能获得较高的产量, 又减少不必要的浪费。2 试点间产量、氮累积和氮素利用率的差异主要是由基础土壤和气候条件不同所致, 至于诸多生态因子中, 起主要作用的因子及其定量影响有待深入研究。

References:

- [1] Fu Q L, Yu J Y, Chen Y X. Effect of nitrogen applications on dry matter and nitrogen partitioning in rice and nitrogen fertilizer requirements for rice production. *Journal of Zhejiang University*, 2000, 26(4): 399~403.
- [2] Ling Q H. Crop population Quality. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000. 178~197.
- [3] Yang J P, Jiang N, Chen J. Analysis on dynamic simulation and fertilizer application optimum of effect of N levels on two rice yield. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1654~1660.
- [4] Shang G Z P, Li Y, Chen P Y. Adjust effect model of nitrogen fertilizer and soil moisture on photosynthetic matter accumulation of wheat. *Journal of Northwest Agriculture*, 1994, 3(2): 63~68.
- [5] Damisch W. Biomass yield — A topical issue in modern wheat breeding programmers. *Plant Breeding*, 1996, (107): 11~17.
- [6] Michael S, Watt, Peter W, et al. Above-ground biomass accumulation and nitrogen fixation of broom (*Cytisus scoparius* L.) growing with juvenile *Pinus radiata* on a dryland site. *Forest Ecology and Management*, 2003, (184): 93~104.
- [7] Shibu J, Sara M, Craig L, et al. Growth, nutrition, photosynthesis and transpiration responses of longleaf pine seedlings to light, water and nitrogen. *Forest Ecology and Management*, 2003, (180): 335~344.
- [8] Chen D H, Chen Y, Zhou G S, et al. Relationship between dry matter and yield and constitutes for high yield cotton in the reaches of Yangtze River Valley. *Cotton in China*, 2001, 28(10): 9~11.
- [9] Bondada B R, Oosterhuis D M, Norman R J. Canopy photosynthesis growth yield and boll 15N accumulation under nitrogen stress in cotton. *Crop Science*, 1996, 36(1): 127~133.

- [10] Zhang W F, Wang F L, Yu S L, *et al.* Effect of Nitrogen on Canopy Photosynthesis and Yield Formation in High-yielding Cotton of Xinjiang. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(6): 789 ~ 796.
- [11] Gayler S, Wang E, Priesack E, *et al.* Modeling biomass growth, Nuptake and phynological development of potato crop. *Geoderma*, 2002, (105): 367 ~ 383.
- [12] Zhang W F, Li M C, Gou L, *et al.* Study on the Nutrient Absorbion Characters of Cotton with Higher Productivity in North Xin jiang. *Acta Gossypii Sinica*, 1998, 10(2): 88 ~ 95.
- [13] Zhang W F, Li M C, Yang X J. Simulation of the High Yield Cotton Dry-Matter Accumulation in North Xinjiang. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 1998, 10(2): 88 ~ 95.
- [14] Meng Y L, Cao W X, Liu X W, *et al.* A Preliminary Study of Simulation on Shoot Dry Matter Partitioning in Rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(4): 376 ~ 381.
- [15] Jiang G Z, Dong S H, Wu T L. An optimal policy decision model on agronomic measures for cotton with high yield and high quality. *Acta Gossypii Sin*, 1990, 2(1): 51 ~ 57.
- [16] Lu X, Wei Y N, Li S K. Research on management of soil fertility information and fertilization decision support system in cotton. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(7): 883 ~ 887.
- [17] Yang L P, Liang C, Jin J Y. Study on site specific management in cotton field. *Sci Agric Sin*, 2000, 33(6): 66 ~ 72.
- [18] Lutrick M C, Peacock H A, Cornell J A. Nitrate monitoring for cotton lint production on a typic plaudit. *Agron J*, 1986, 78(3): 1042 ~ 1046.
- [19] Li J Y, Liu R R, Wang R Z. Studies on the model of equilibrated fertilization of cotton. *Acta Gossypii Sin*, 1990, 2(2): 58 ~ 65.
- [20] Rochhester I J, Peoples M B, Constable G A. Estimation of the N fertilizer requirement of cotton grown after legume crops. *Field Crop Research*, 2001, (70): 43 ~ 54.
- [21] Spyridon D, Koutroubas, Despo K, *et al.* Cultivar and seasonal effects on the contribution of pre-anthesis assimilates to safflower yield. *Field Crops Research*, 2004, (90): 263 ~ 274.
- [22] He P, Jin J Y, Lin B, *et al.* Dynamics of biomass and its components and models of nutrients absorption by spring maize under different nitrogen, phosphorous and potassium application rates. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2): 123 ~ 130.
- [23] Dong Z. Study on N, P and K assimilation dynamics and model of soybean. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(2): 155 ~ 160.
- [24] Zhang Z M, Dai L X. Effect of fertilizer application rate on fertilizer requirement rule of maize. *Maize Science*, 1995, 3(4): 56 ~ 61.
- [25] Hearn A B. Effect of preceding crop on the nitrogen requirements of irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) on a vertisol. *Field Crop Research*, 1986, (13): 159 ~ 175.
- [26] Singh V, Nagwekar S N. Effect of weed control and nitrogen levels on quality characters in cotton. *J. Indian Soc Cotton Improvement*, 1989, (14): 60 ~ 64.
- [27] Boquet D J, Breitenbeck G A, Coco A B, *et al.* Fertilizer nitrogen rates to optimize cotton yield and fiber quality. *Louisiana Agric*, 1991, (35): 10 ~ 11.
- [28] Li X Z, Chen X L, Xu L H, *et al.* Effects of the level of nitrogen application on nitrogen metabolism in the plants of transplanted cotton following wheat harvest. *Acta Gossypii Sinica*, 1994, 6(4): 223 ~ 228.

参考文献:

- [2] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000. 178 ~ 197.
- [3] 杨京平, 姜宁, 陈杰. 施氮水平对两种水稻产量影响的动态模拟及施肥优化分析. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1654 ~ 1660.
- [4] 上官周平, 李英, 陈培元, 等. 氮肥与底墒对小麦同化产物累积与运转的调节效应模型. *西北农业学报*, 1994, 3(2): 63 ~ 68.
- [8] 陈德华, 陈源, 周桂生, 等. 长江流域棉区高产棉花干物质生产与产量及群体构成的关系. *中国棉花*, 2001, 28(10): 9 ~ 11.
- [10] 张旺峰, 王振林, 余松烈, 等. 氮肥对新疆高产棉花群体光合性能和产量形成的影响. *作物学报*, 2002, 28(6): 789 ~ 796.
- [12] 张旺峰, 李蒙春, 勾玲, 等. 北疆高产棉花养分吸收特性的研究. *棉花学报*, 1998, 10(2): 88 ~ 95.
- [13] 张旺峰, 李蒙春, 杨新军. 北疆高产棉花干物质积累的模拟. *石河子大学学报(自然科学版)*, 1998, 2(2): 87 ~ 92.
- [14] 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 等. 水稻地上部干物质分配动态模拟的初步研究. *作物学报*, 2004, 30(4): 376 ~ 381.
- [16] 吕新, 魏亦农, 李少昆. 基于 GIS 的土壤肥力信息管理及棉花施肥推荐支持决策系统研究. *中国农业科学*, 2002, 35(7): 883 ~ 887.
- [17] 杨俐苹, 梁诚, 金继运. 棉田土壤养分精准管理初探. *中国农业科学*, 2000, 33(6): 66 ~ 72.
- [19] 李俊义, 刘荣荣, 王润珍. 棉花平衡施肥的研究. *棉花学报*, 1990, 2(2): 58 ~ 65.
- [20] 何萍, 金继运, 林葆, 等. 不同氮磷钾用量下春玉米生物产量及其组分动态与养分吸收模式研究. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 123 ~ 130.
- [21] 董钻. 大豆氮磷钾吸收动态及模式的研究. *作物学报*, 1995, 21(2): 155 ~ 160.
- [22] 张智猛, 戴良香. 施肥量对高产下玉米需肥规律的影响. *玉米科学*, 1995, 3(4): 56 ~ 61.
- [28] 李秀章, 陈祥龙, 徐立华, 等. 氮素营养水平对小麦后移栽棉氮代谢的影响. *棉花学报*, 1994, 6(4): 223 ~ 228.