

棉花蕾花铃生物量、氮累积特征及 临界氮浓度稀释模型

薛晓萍^{1,2}, 沙奕卓³, 郭文琦¹, 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;

3. 中国气象局大气探测技术中心, 北京 100081)

摘要:在大田栽培条件下,于河南安阳(黄河流域黄淮棉区)和江苏南京(长江流域下游棉区)设置了棉花氮素水平试验,对不同氮素水平条件下棉花蕾花铃的生物量、氮素累积及氮浓度的动态变化进行分析,并依据 Justes 的临界氮浓度稀释模型确定方法,研究棉花蕾花铃临界氮浓度稀释模型。结果表明:棉花蕾花铃的生物量增长和氮吸收累积均受氮素水平的影响,其动态变化符合 S 型曲线,氮累积的快速起始时间较生物量早 1~5d;氮浓度过高或过低均不利于产量形成,蕾花铃等器官存在氮奢侈消费现象;氮浓度随施氮量的增加而升高、随生育进程的推移而降低,其生物量累积量与氮浓度间符合幂函数关系,两试点蕾花铃氮稀释曲线模型形式相同,但模型参数 a 不同,不同生态区存在独立的临界氮稀释曲线模型。由于临界稀释模型具有明确的生物学意义,可以作为定量诊断蕾花铃氮营养动态变化的指标之一。

关键词:棉花;蕾花铃;生物量;氮累积;临界氮浓度;氮稀释模型

文章编号:1000-0933(2008)12-6204-08 中图分类号:S148 文献标识码:A

Accumulation characteristics of biomass and nitrogen and critical nitrogen concentration dilution model of cotton reproductive organ

XUE Xiao-Ping^{1,2}, SHA Yi-Zhuo³, GUO Wen-Qi¹, 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 Center, Jinan 250031, China

3 Atmospheric Observation Technology Center, Beijing 100081, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6204 ~ 6211.

Abstract: Several nitrogen (N) field experiments were carried out in Nanjing and Anyang to study the dynamic characteristics of biomass accumulation and nitrogen uptake, and to define the dilution curve for critical N concentration (i. e. the minimum N concentration required for the maximum growth) in the reproductive organ of cotton over the period of growth. The results show that the total biomass and N accumulations were affected significantly by the application rates of N fertilizers throughout the growth period, exhibiting a sigmoid curve over time. The beginning time of fast N accumulation was 1—5 days earlier than that of biomass. The cotton lint yield was correlative with N concentrations in the reproductive

基金项目:国家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:2007-07-25; **修订日期:**2007-12-14

作者简介:薛晓萍(1964~),女,山东招远人,博士,研究员,主要从事生态与农业气象预测研究. E-mail: xypdhy@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: giscott@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:2007-07-25; **Accepted date:**2007-12-14

Biography: XUE Xiao-Ping, Ph. D., mainly engaged in ecology and agrometeorology forecast. E-mail: xypdhy@163.com

organ and fluctuated with the varying N concentrations, indicating the existence of luxurious N consumption for the reproductive organ of cotton. The N concentrations increased with the increasing N application rates, and decreased gradually during the growing period. The relationship between the biomass and N concentrations can be described by a power equation. The patterns of N concentration dilution model were consistent at both experimental sites, but the model parameter values, particularly the values of a differed. The results presented in this paper indicate that a critical N concentration dilution curve for cotton reproductive organ is independent of ecological region and can be described with a power equation. The dilution curve can be used as a reliable tool for diagnosing the N status of cotton for optimal yield and quality.

Key Words: cotton; bud; flower and boll of cotton; biomass; nitrogen accumulation; critical nitrogen concentration; nitrogen dilution model

充足的施氮量是获得高产的基础,但过多施肥将造成资源浪费和环境污染,适时有效地监测作物体内氮营养状况并以此为依据进行合理施肥,既可使各生长阶段的氮素供应与需求达到平衡,又能降低生产成本和对环境的污染程度^[1]。研究表明,作物的产量、品质与其生长过程中的生物量累积、氮吸收和氮浓度有密切关系^[2~5],作物存在临界氮浓度值,当氮浓度超过临界值时,增加施氮量对产量无正效应,甚至产量降低^[6]。产量与氮浓度的关系可以被用于判断作物收获后土壤是否有氮亏缺现象,为下茬作物的氮肥运筹提供依据^[7,8]。

研究表明^[9],作物体内的氮浓度随地上干物质的增长而降低,作物地上部分的含氮量(N,%)与地上总生物量($W, \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)间可用幂函数方程表示,获得最大地上生物量所需的最低氮浓度值为“临界氮浓度”^[10~12]。对小麦、玉米等作物灌浆期间籽粒干物重、氮素累积的动态变化研究表明^[13~15],其籽粒的氮浓度存在临界值,Egelkraut 等人^[16]关于棉籽氮浓度的变化特征的研究也证明了临界氮浓度值的存在,且棉籽氮浓度值达到临界值时,棉花产量最高。但上述关于作物生殖器官临界氮浓度值的研究均是定性的,从定量角度确定其动态变化值迄今尚未见报道。与其他作物相比棉花开花至吐絮生长发育时间长,蕾花铃的生长、氮素累积和氮浓度对产量品质形成的影响更明显,而目前对其间的动态定量关系并不清楚,本研究目的在于阐明花后棉花蕾花铃生物量、氮累积的动态变化规律,探明是否存在氮稀释现象和临界氮稀释曲线,为棉花生产的精确施肥、高产优质提供理论依据。

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年在河南安阳中国农业科学院棉花研究所农场(黄河流域黄淮棉区)和江苏南京江苏省农业科学研究院试验基地(长江流域下游棉区)进行。安阳、南京试点土壤分别为沙壤土、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 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷为23.6、41.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为247.5、226.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。两试点棉花全生育期内的月平均温度、总降水量、总日照时数分别为:安阳(4~10月份)20.7℃、455.3mm、1283.4h;南京(4~11月份)21.7℃、791.3mm、1297.6h。供试棉花品种为美棉33B,安阳、南京试点分别在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 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (分别以N0、N1、N2、N3、N4表示),氮素运筹均按基肥40%、花铃肥60%,3次重复,随机区组排列,小区面积分别为21m²、18m²,行、株距为90cm×25cm。田间管理均按高产栽培要求进行,3月下旬浇底墒水,基肥于播种前施用,花铃肥在7月21日追施,追肥方式采用穴式法。

1.2 测定内容与方法

在棉花开花后分试验小区取样,取样时间分别为:安阳试点在开花后的第1、14、20、34、52、60、71、86天,

南京试点在开花后第 1、10、26、41、54、72 天,每个小区选取有代表性的棉株 5 株,按根、茎、果枝、主茎叶、果枝叶、蕾铃、铃壳和纤维等不同器官分样,各器官(纤维除外)均在 105℃ 下杀青 30min,80℃ 烘至恒重,测定其干物重,粉碎后用凯氏定氮法分器官测定全氮含量,根据各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 作物氮素营养有关指标计算方法

1.3.1 生物量动态增长模型

根据作物生长动态过程符合 Logistic 生长模型原理,其干物质动态累积时间函数可表示为:

$$W_{\max(t)} = \frac{W_M}{1 + \alpha e^{\beta t}} \quad (1)$$

式中, W_M ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 为干物质累积的理论最大值, t 为开花后日数, α 、 β 是生长参数。

对(1)式进行微分,得到以日为步长的干物质的瞬时增长速率:

$$\frac{dW_{\max}}{dt} = \frac{-W_M \alpha \beta \exp(\beta t)}{(1 + \alpha \exp(\beta t))^2} dt \quad (2)$$

1.3.2 临界氮浓度稀释曲线模型

作物在生长过程中,若氮浓度值在临界氮浓度以下,其生长将受到氮营养的制约;在临界氮浓度以上,则说明施氮量已超过作物的需求量,作物生长不受氮素限制;只有氮浓度值等于临界氮浓度时,施氮量最为适宜。按照 Justes 等人 1994 年提出的临界氮浓度稀释曲线的确定方法^[17],临界氮浓度稀释曲线模型为:

$$N_c = a W_{\max}^{-b} \quad (3)$$

式中, N_c (%) 为棉株蕾花铃等器官临界氮浓度值, $W_{\max}$ ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 为干物重最大值, a 、 b 为参数,其中, a 代表当生物量为 1Mg 时的氮浓度值; b 为控制临界氮浓度稀释曲线斜率的参数。

1.3.3 异速生长模型

棉花蕾花铃在临界氮浓度状态下达到生物量最大值所需要的氮吸收量 N_{uptc} ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 为:

$$N_{\text{uptc}} = 10 N_c W_{\max} \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式得到作物氮累积量与生物量之间的异速生长模型:

$$N_{\text{uptc}} = 10 a W_{\max}^{1-b} \quad (5)$$

式中, $1-b$ 为异速生长参数,是氮吸收速率与干物质累积速率之比; $10a$ 为当干物重达到 $1\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的氮吸收量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.4 氮素营养指数(nitrogen nutrition index, NNI)

临界氮浓度稀释曲线为作物体内氮素营养状况动态诊断提供了一个很好的工具,为进一步明确作物氮营养状态, Lemaire 等人提出了氮素营养指数的概念,其模型为:

$$NNI = \frac{N_t}{N_c} \quad (6)$$

式中, N_t ($\text{g}/100\text{g}$) 为蕾花铃氮浓度的实测值, N_c ($\text{g}/100\text{g}$) 为相同生物量条件下根据临界氮浓度稀释模型求得的临界氮浓度值。 NNI 可以定量地反映作物氮营养状况,若 $NNI = 1$,表明氮素营养水平处于最佳状态,高于 1 氮营养过剩,低于 1 则氮营养不足。

2 结果与分析

2.1 棉花蕾花铃生物量、氮累积动态分析

2.1.1 棉花蕾花铃生物量

图 1 为安阳、南京两试点不同施氮水平下棉花蕾花铃生物量的动态变化分布图,两试点蕾花铃生物量随生育进程的动态累积符合 Logistic 生长曲线,且均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。

根据模型(1)、(2)可得 2 试点各氮素水平下蕾花铃生物量以日为时间步长的动态累积特征。在安阳试点,蕾花铃快速累积期持续时间从 N0 ~ N4 处理分别为:22.6、23.0、22.0、22.2、22.1 d,快速累积期起始日在花后的 43 ~ 47 d,其早晚顺序为:N3、N2、N4、N0、N1。以日为时间步长的生物量累积速率的变化趋势为缓慢、快速、最大和下降 4 个阶段,最大值出现在花后 54 ~ 59 d,以 N3 处理最早。生物量的理论最大值和最大累积速率处理间差异均表现为 N3 > N4 > N2 > N1 > N0。在南京试点,蕾花铃快速累积期持续时间分别为:27.2、26.4、26.3、26.7、26.4 d,起始日在花后 43 ~ 45 d,生物量累积速率与安阳试点类似,最大速率出现在花后的 56 ~ 58 d,生物量的理论最大值和最大累积速率处理间差异均表现为 N2 > N1 > N3 > N4 > N0。

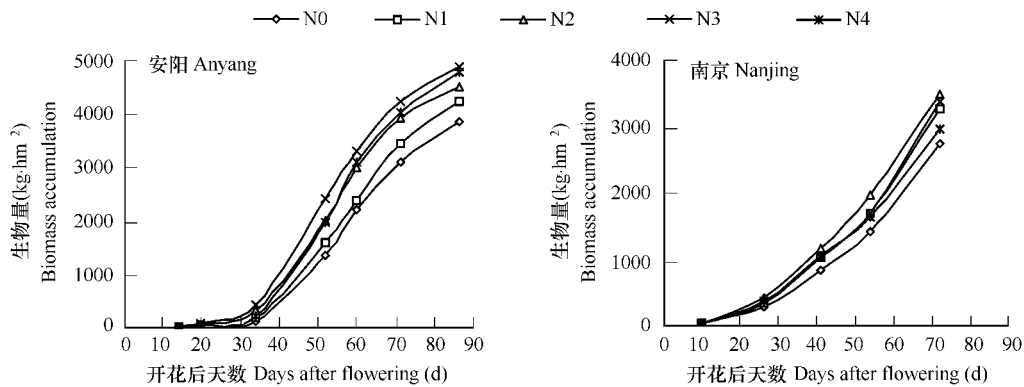


图 1 氮素水平对棉花蕾花铃生物量动态变化的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen levels on dynamic change of biomass accumulation in bud, flower and boll of cotton

2.1.2 棉花蕾花铃氮素累积

从图 2 可以看出,随着生育进程的推移棉株蕾花铃氮素累积动态也符合 Logistic 模型曲线。安阳、南京两试点棉株蕾花铃氮素累积量随氮素水平的提高而增加,分别至 N3、N2 处理时达到最大,之后下降。

运用模型(1)、(2)对不同氮素水平下蕾花铃氮动态累积实测值进行拟合,可以得到,安阳试点的氮累积量理论最大值为:N3 > N4 > N2 > N1 > N0,快速生长期持续时间在 21 ~ 24 d 之间,快速生长期的起始日为开花后的 38 ~ 43 d,以 N3 处理最早;氮吸收最大速率为 N3 > N4 > N2 > N1 > N0,出现在花后的 49 ~ 56 d,以 N3 处理最早。各处理的快速生长期起始日和最大速率出现日较对应的生物量早 3 ~ 5 d。南京试点,理论最大值为:N2 > N3 > N1 > N4 > N0,快速累积起始日在花后的 41 ~ 43 d,较生物量早 1 ~ 2 d,持续时间在 28 ~ 30 d 之间。最大吸收速率在花后的 55 ~ 58 d,以 N2 处理最大。

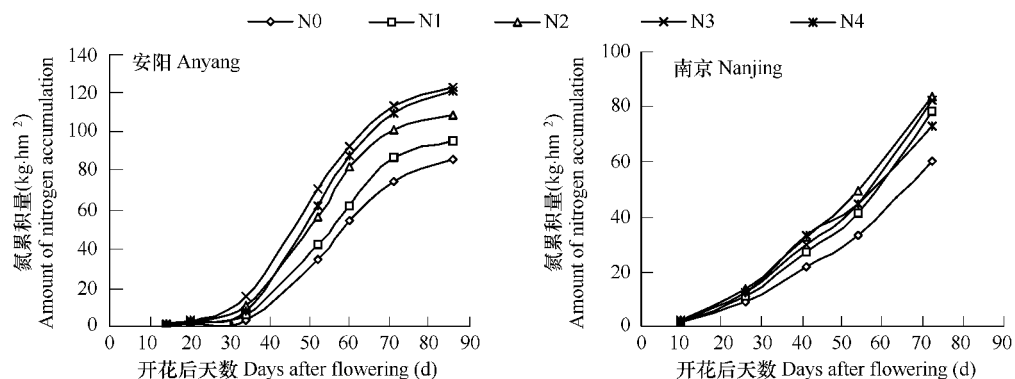


图 2 氮素水平对棉花蕾花铃氮素累积动态变化的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen levels on dynamic change of the nitrogen accumulation in bud, flower and boll of cotton

综合分析棉花蕾花铃生物量和氮吸收动态累积的特征参数,可以看出,安阳 N3 处理和南京 N2 处理的生

物量、氮累积量最大,其快速生长启动早,且最大生长速率大,各项特征参数最为协调。

2.2 棉花蕾花铃临界氮浓度稀释曲线模型的确定

图3表示棉花蕾花铃氮浓度值的动态分布,由图可见,安阳、南京两试点蕾花铃氮浓度值均表现为随生育进程的延后而降低,即其氮浓度值存在稀释现象。对比分析同一试点同一取样日不同氮素水平的氮浓度值,其值随氮素水平的提高而增大,根据氮素水平对棉花产量效应的研究中关于过多施肥产量降低的结论^[18],可以推测棉花蕾花铃也存在氮奢侈消费现象,因而其动态变化应有临界氮浓度稀释曲线。

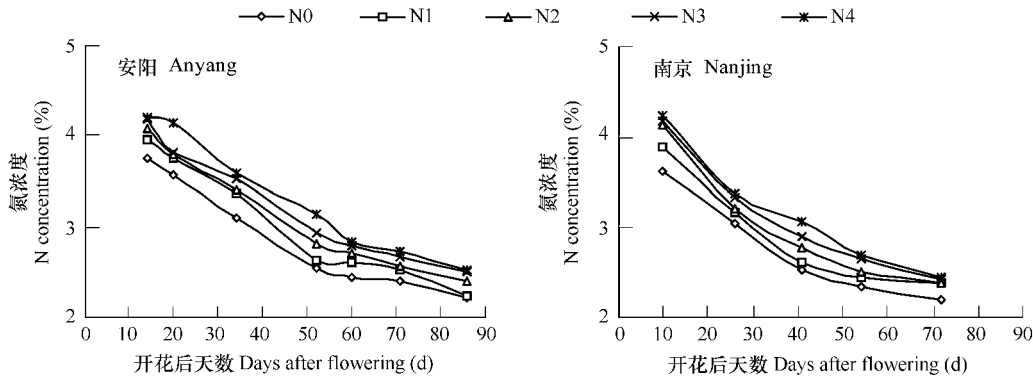


图3 不同氮素水平下棉花蕾花铃氮浓度的动态变化

Fig. 3 Dynamic change of nitrogen concentration in bud, flower and boll of cotton under different nitrogen levels

按照 Justes 提出的临界氮浓度稀释曲线计算方法,并利用模型(3)、(5)得到了蕾花铃的临界氮浓度稀释曲线模型和异速生长模型,模型参数见表1。从表1可看出,两试点棉花蕾花铃临界氮浓度稀释模型形式一致,但参数不同。其中,安阳、南京试点对应的临界氮浓度稀释曲线的斜率(参数 b)相同,而单位生物量氮浓度值(参数 a)存在一定差异。

图4为安阳、南京两试点不同氮素水平下棉花蕾花铃生物量所对应的氮浓度值分布图,从图4可看出,对于同一试点不同施氮水平,同样的生物量其氮浓度值不同,分别用各取样日氮浓度的最大、最小实测值模拟可得到最高($N_{\max}$, %)、最低($N_{\min}$, %)氮浓度稀释模型,即氮稀释边界模型,同样亦符合模型(3),模型参数见表1。从其参数看,各试点的最高、最低稀释曲线参数 b 值相同,且与临界曲线斜率基本一致,单位生物量氮浓度值(参数 a)存在一定差异。可见,尽管两试点的气候条件、土壤环境不同,但棉花蕾花铃临界、最高和最低氮浓度稀释曲线基本平行,安阳试点各氮稀释曲线在同一坐标中的位置较南京试点对应曲线要略高,表明在同样生物量条件下,安阳试点棉花生殖器官的氮容纳能力高于南京,其对应的需氮量也高。

表1 棉花蕾花铃氮稀释模型和异速生长模型的参数值

Table 1 The parameter of nitrogen dilution model and allometric growth model for bud, flower and boll of cotton

试点 Site		氮稀释曲线 Nitrogen dilution curve				异速生长曲线 Allometric growth curve		
		a	b	R^2		$10a$	$1-b$	R^2
安阳 Anyang	$N_{\min}$	2.627	0.099	0.987 **	Nuptmin	26.271	0.901	0.999 **
	$N_{\max}$	3.142	0.099	0.957 **	Nuptmax	31.417	0.901	0.998 **
	N_c	3.037	0.098	0.984 **	Nuptc	30.368	0.901	0.999 **
	$N_{\min}$	2.523	0.098	0.931 **	Nuptmin	25.226	0.902	0.999 **
南京 Nanjing	$N_{\max}$	2.941	0.098	0.915 **	Nuptmax	29.407	0.902	0.999 **
	N_c	2.793	0.098	0.899 **	Nuptc	27.931	0.902	0.999 **

$R^2_{0.01} = 0.766$, $n = 8$

2.3 不同氮素水平下棉花蕾花铃氮素营养诊断

图5为根据氮素营养指数(NNI)模型(6)计算所得两试点各氮素水平下棉花蕾花铃 NNI 的动态变化。

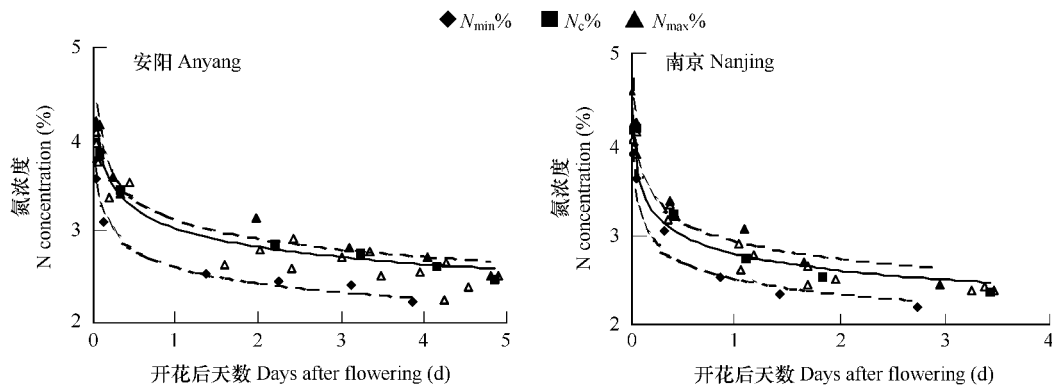


图4 棉花蕾花铃氮浓度稀释曲线

Fig. 4 Nitrogen concentration dilution curve in bud, flower and boll of cotton

在棉株动态生长过程中,其蕾花铃 NNI 并非均匀一致,而是呈现一定的波动状态,其值随着施氮量的增加而增大。在安阳试点, N_0 、 N_1 处理在整个生长过程中 NNI 值明显低于 1,表明氮素供应不足, N_4 处理则 NNI 远大于 1,为氮素营养过剩, $NNI=1$ 直线介于 N_2 、 N_3 处理之间,表明适宜的氮素水平应在 N_2 、 N_3 之间。在南京试点, N_0 、 N_1 处理棉花生长明显受氮素不足制约, N_3 、 N_4 则出现氮奢侈消耗,只有 N_2 处理的 NNI 值始终与 1 接近,为较适宜的氮素水平。

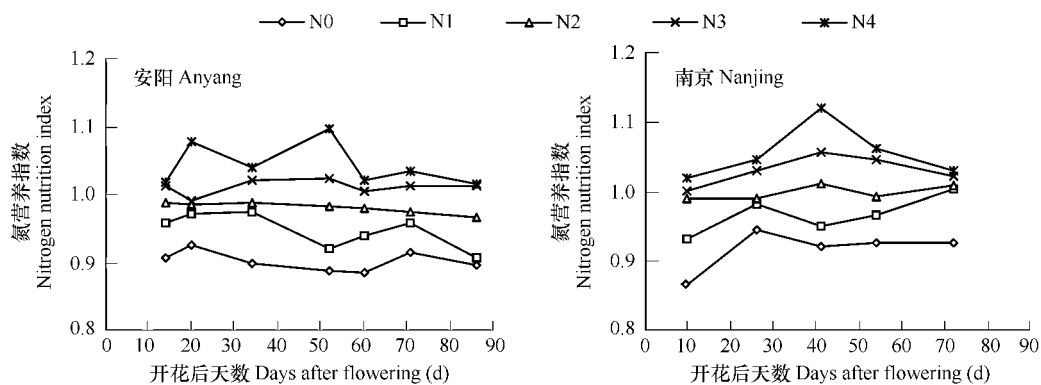


图5 棉花蕾花铃氮素营养指数的动态变化

Fig. 5 Dynamic change of the nitrogen nutrient index in bud, flower and boll of cotton

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 棉花蕾花铃生物量与氮累积

氮素通常被认为是植物生长的主要限制因素,因而被大量地施用以获得高产,Wood^[19]的研究表明,高的氮累积与高生物量累积有关。本研究表明,棉花蕾花铃生物量增长、氮吸收累积均受施氮水平的影响,且其随时间的动态变化呈 S 型曲线。但与安阳试点相比,南京试点蕾花铃的生物量与氮累积随时间的 S 型曲线并不明显,主要是由于两试点生态条件不同所致,生长后期,安阳试点气温已经显著下降(9 月 20 日的日平均气温为 18.7℃,5 日滑动平均气温为 20.2℃),棉株长势明显减弱, LAI 较前期降低,导致氮吸收量减少,故其生长曲线出现明显拐点。而在南京试点,棉花吐絮后气温回落缓慢(9 月 20 日的日平均气温为 22.1℃,5 日滑动平均气温为 24.5℃),由于棉花有无限生长习性,因而,此期 LAI 仍维持在较高的水平,氮吸收能力也相应较强,导致曲线拐点不明显。同样,由于两试点的气象条件和土壤类型的不同,棉花蕾花铃的生物量和氮素累积曲线对施氮水平的反映存在差异。本研究表明,尽管较高的氮素累积是棉花达到最大生物量的基础,但二者

并非线性关系,过多的氮吸收将导致生物量下降。

3.1.2 棉花蕾花铃氮浓度与产量

Wadleigh^[20]的研究表明,在众多矿物质营养中,氮素对铃数的影响最大,在氮素水平低于 $360\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,产量随施氮量增加而增加,产量最高可达到 $2535\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,若继续增加施氮量,产量无明显提高。Nelson^[21] 和 Sawan^[22] 分别在研究中得到,增加施氮量可提高棉花产量和棉籽氮浓度值,Lhuillier-soundélé 等^[23] 在棉花的氮素水平研究中发现,棉籽氮浓度随施氮量的增加而增加。本研究表明,棉花从开花至吐絮其蕾花铃的氮浓度随施氮量的增加而提高,随生育进程的推移为下降趋势,但产量水平并非与施氮量和氮浓度值呈正相关,过多施氮将导致产量下降^[18]。可以推测棉花蕾花铃存在氮奢侈消费现象,因而其动态变化应存在临界氮浓度稀释曲线。

3.1.3 棉花临界氮浓度稀释曲线模型及其应用

有关学者在关于小麦、油菜、马铃薯等作物地上干物质临界氮浓度的研究中得到,临界氮浓度模型为不同气候区域、不同品种的通用模型^[24~30]。对棉株地上临界氮浓度模型研究表明^[31],不同区域间临界氮浓度稀释曲线斜率相同,但生物量达到 $1\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的氮浓度值不同。本文研究表明,棉花蕾花铃在生长过程中亦存在临界、最低和最高氮稀释曲线,且对于同一试点,3 条稀释曲线的斜率基本一致。

由于试验施氮水平设置的局限性,本研究对最高氮浓度稀释曲线的确定有可能低于实际值。而最低氮浓度稀释曲线可能高于实际值,主要原因在于,在大田条件下即使不施氮肥,土壤本身已经有一定的含氮量。

3.1.4 棉花异速生长模型和氮营养指数

根据 Lemaire 等的研究^[7,32],作物氮累积量与生物量间的异速生长关系存在较高的稳定性,且作物氮素累积相对速率较生物量的相对累积速率小 5%,这种稳定关系为氮素定量调控提供了理论依据。本研究中,棉花蕾花铃氮素累积量与生物量间也存在异速关系。另外,对其他作物研究表明^[35],氮素累积与叶面积指数亦存在稳定的关系模型,这为通过作物叶面积监测来诊断氮营养状况提供了更为直接的方法。

由 Lemaire 等人^[27,32] 提出的 *NNI* 概念,由于其是基于作物临界氮浓度稀释曲线模型,因而 *NNI* 有合理的生物学意义,能定量、动态地描述作物氮营养状况的变化。由图 5 可以看出,安阳试点的 N4 处理和南京试点的 N3、N4 处理的 *NNI* 均远大于 1,表明棉花蕾花铃存在氮奢侈消费现象,即过多的氮储存于蕾花铃,但这种奢侈消耗并非是无限度的,因而导致不同氮素水平下其 *NNI* 的变化不一致。另外试验误差也可导致 *NNI* 存在一定误差。

根据对 *NNI* 与作物各项生长指标及产量关系的研究表明^[28,33],他们之间存在极显著的相关关系,在作物生长出现氮素亏缺时,利用 *NNI* 可定量诊断评估因氮营养胁迫而造成的影响与损失。本研究中运用 *NNI* 对不同氮素水平下棉花的氮营养进行了动态分析,得到了与利用其他指标确定不同生态区域适宜施氮量^[31] 相同的结论,因此,*NNI* 是一个较好的动态、定量诊断作物生长过程中养分供应、循环的工具,并可为精准农业的科学施肥提供理论指导。

3.2 结论

棉花蕾花铃的生物量增长、氮吸收累积均受氮素水平影响,且其随时间的动态变化呈 S 型曲线,安阳试点 $360\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯氮和南京试点的 $240\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯氮水平的各特征值最为协调,对生物量和氮累积较为有利;各氮素水平的产量水平并非与施氮量和氮浓度值呈正相关,棉花蕾花铃存在氮奢侈消费现象;从开花至吐絮棉花蕾花铃存在临界氮浓度稀释曲线,此模型可以用于棉花的生长模型中;基于临界氮浓度稀释曲线建立的异速生长模型和氮营养指数模型,二者可用于棉花生产氮素调控与氮素营养诊断。

References:

- [1] Jaynes D B, Colvin T S, Karlen D L, *et al.* Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 1305 – 1314.
- [2] Sinclair T R, Pinter P J, Kimball B A, *et al.* Leaf nitrogen concentration of wheat subjected to elevated $[\text{CO}_2]$ and either water or N deficits.

- Agiculture Ecosystems & Environment, 2000,79:53—60.
- [3] Ntanos D A, Koutroubas S D. Dry matter and N accumulation and translocation for Indica and Japonica rice under Mediterranean conditions. Field Crops Research, 2002,74:93—101.
- [4] John K R, Reddy K R, Jenkins J N. Yield and fiber quality of Upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. European Journal Agronomy, 2006,24:282—290.
- [5] Boquet D J, Breitenbeck G A. Nitrogen rate effect on partitioning of nitrogen and dry matter by cotton. Crop Science, 2000,40:1685—1693.
- [6] Goss R J, Westfall D G, Ludwick A E, *et al.* Grain protein content as an indicator of N sufficiency for winter wheat. Agronomy Journal, 1982,74:130—133.
- [7] Lemaire G, Avise J C, Kim T H, *et al.* Developmental changes in shoot N dynamics of lucerne (*Medicago sativa* L.) in relation to leaf growth dynamics as a function of plant density and hierarchical position within the canopy. Journal of Experimental Botany, 2005,56:935—943.
- [8] Lemaire G, Van Oosterom E, Sheehy J, *et al.* Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth?. Field Crops Research, 2007,100:91—106.
- [9] Greenwood D J, Lemaire G, Gosse G, *et al.* Decline in percentage N of C₃ and C₄ crops with increasing plant mass. Annals of Botany, 1990, (67):181—190.
- [10] Lemaire G, Gastal F, Salette J. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. In: proceedings of the 16th international Grassland Congress. Nice, France, 1989.179—180.
- [11] Lemaire G, Salette J. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères I. Etude de l'effet du milieu. Agronomie, 1984, 4: 423—430.
- [12] Lemaire G, Salette J. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. II. Etude de la variabilité entre génotypes. Agronomie, 1984,4: 431—436.
- [13] Goss R J, Westfall D G, Ludwick A E, *et al.* Grain protein content as an indicator of N sufficiency for winter wheat. Agronomy Journal, 1982,74:130—133.
- [14] Pierre W H, Dumenil L, Jolley V D, *et al.* Relationship between corn yield, expressed as a percentage of maximum, and the N percentage in the grain: I. Various N-rate experiments. Agronomy Journal, 1977, 69: 215—220.
- [15] Pierre W H, Dumenil L, Henao J. Relationship between corn yield, expressed as a percentage of maximum, and the N percentage in the grain: II. Diagnostic use. Agronomy Journal, 1977, 69: 221—226.
- [16] Egelkraut T M, Kissel D E, Cabrera M L, *et al.* Nitrogen concentration in cottonseed as an indicator of N availability. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2004 68: 235—242.
- [17] Justes E, Mary B, Meynard J M, *et al.* Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. Annals of Botany, 1994,74:397—407.
- [18] Xue X P, Wang J G, Gun Q, *et al.* Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization recovery rate of cotton after initial flowering. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(11):3631—3640.
- [19] Wood A W, Muchow R C, Robertson. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia III. Accumulation, partitioning and use of nitrogen. Field Crops Research, 1996,48:223—233.
- [20] Wadleigh C H. Growth status of the cotton plant as influenced by the supply of nitrogen. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico, 1944,44:668—698.
- [21] Nelson W L. The effect of nitrogen, phosphorus, and potash on certain lint and seed properties of cotton. Agronomy Journal, 1949,41:289—293.
- [22] Sawan M Z, El-Farra A, El-Latif S A. Cottonseed, protein and oil yields and oil properties as affected by nitrogen and phosphorus fertilization and growth regulators. Journal of the American Oil Chemists Society, 1988,65:948—951.
- [23] Lhuillier-soundélé A, Nathalie G, Munier-Jolain, *et al.* Dependence of seed nitrogen concentration on plant nitrogen availability during the seed filling in pea. European Journal of Agronomy, 1999,11:157—166.
- [24] Greenwood D J, Lemaire G, Gosse G, *et al.* Decline in percentage N of C₃ and C₄ crops with increasing plant mass. Annals of Botany, 1990,67:181—190.
- [25] Lemaire G, Gastal F, Salette J. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. In: proceedings of the 16th international Grassland Congress, Nice, France, 1989.179—180.
- [26] Flénet F, Guérif M, Boiffin J, *et al.* The critical N dilution curve for linseed (*Linum usitatissimum* L.) is different from other C₃ species. European Journal Agronomy, 2006,24:367—373.
- [27] Lemaire G, Gastal F, Cruz P, *et al.* Relationships between plant-N, plant mass and relative growth rate for C₃ and C₄ crop. Proceedings first ESA Congress, Paris, 1990,1—5.
- [28] Colnenne C, Meynard J M, Reau R, *et al.* Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. Annals of Botany, 1998,81:311—317.
- [29] Tei F, Benincasa P, Guiducci M. Critical nitrogen concentration in processing tomato. European Journal of Agronomy, 2002,18:45—55.
- [30] Sheehy J E, Dionora M J A, Mitchell P L, *et al.* Critical nitrogen concentration: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. Field Crops Research, 1998,59:31—41.
- [31] Xue X P, Zhou Z G, Zhang L J, *et al.* Development and Application of Critical Nitrogen Concentration Dilution Model for Cotton after Flowering. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(6):113—123.
- [32] Lemaire G, Gastal F, Salette J. N uptake and distribution in plant canopies. In: Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer: Berlin, 1997:3—45.

参考文献:

- [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. 生态学报, 2006,26(11):3631—3640.
- [31] 薛晓萍, 周治国, 张丽娟, 等. 棉花花后临界氮浓度稀释模型的建立及在施氮量调控中的应用. 生态学报, 2006,26(6):113—123.