

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

薛晓萍^{1,2}, 周治国^{1,*}, 张丽娟¹, 王以琳², 郭文琦¹, 陈兵林¹

(1. 南京农业大学/农业部作物生长调控重点开放试验室, 江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 南京 210095; 2. 山东省气象中心, 济南 250031)

摘要:在大田栽培条件下,于江苏南京(长江中下游棉区)和河南安阳(黄淮棉区)设置了棉花氮素水平试验,依据 Justes 的临界氮浓度稀释曲线确定方法,建立了棉花花后临界氮浓度稀释曲线模型。结果表明,2 试点的临界氮浓度与地上最大生物量间均符合幂指数关系,尽管不同气候区域间的模型存在一定差异,但临界氮稀释曲线斜率相同。棉花最高(N_{max})、最低(N_{min})氮浓度稀释模型也符合幂指数关系,且 2 试点最高、最低氮稀释曲线斜率亦分别相同。2 试点氮稀释模型参数值的差异表明,对于相同的地上部生物量,安阳试点棉株的氮累积能力高于南京。基于临界氮浓度稀释模型,建立了棉株地上部氮素与干物质累积量之间的异速生长模型和氮营养指数模型(NNI),前者可作为施氮量调控的判别指标,后者作为实际与临界氮浓度的比值,能客观、定量地诊断棉株的氮素营养状况。基于临界氮浓度稀释条件下的异速生长参数、氮营养指数及动态临界氮累积量等指标得到施氮量调控的结果一致:(1)尽管安阳、南京 2 试点的地上生物量、产量差异较大,但临界氮稀释曲线条件下不同气候区域棉花达到最高产量的瞬时氮吸收速率的变化趋势、氮素快速累积期、最大氮吸收速率出现日等基本一致;(2)安阳、南京 2 试点的适宜施氮量应控制在 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 水平上。由于临界氮浓度具有合理的生物学意义,因而所建模型有精确、简单和生物学意义明确等特点,可以直接用于评估作物的需氮量,亦可用于作物氮动态模拟的复杂模型中,为适时精确施肥提供了新的思路。

关键词:棉花;临界氮浓度;稀释模型;氮素营养指数;施氮量调控

文章编号:1000-0933(2006)06-1781-11 **中图分类号:**S184,S314 **文献标识码:**A

Development and application of critical nitrogen concentration Dilution Model for cotton after flowering

XUE Xiao-Ping^{1,2}, ZHOU Zhi-Guo^{1,*}, ZHANG Li-Juan¹, WANG Yi-Lin², GUO Wen-Qi¹, CHEN Bing-Lin¹ (1. Key Laboratory of Crop Growth Regulation of the Ministry of Agriculture, Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture, Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Shandong Meteorological Centre, Ji'nan 250031, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1781 ~ 1791.

Abstract: The critical nitrogen (N) concentration of a plant can be defined as the minimum nitrogen concentration required for maximum growth rate at any time. To determine the critical N concentration dilution curve for cotton, several field experiments with different levels of N 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 N concentration in shoot biomass declined with the growth stage after flowering. The relationship between the

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(BK200719,BK2005091)

收稿日期:2005-11-29;**修订日期:**2006-03-16

作者简介:薛晓萍(1964~),女,山东招远人,高级工程师,博士生,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: giscott@njau.edu.cn

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

Received date:2005-11-29;**Accepted date:**2006-03-16

Biography: XUE Xiao-Ping, Ph. D., Senior engineer, mainly engaged in crop ecology and agrometeorology forecast.

shoot dry matter and critical N concentration can be described by power equation put the equation here, with $b = 0.131$ for both experimental sites, $a = 3.837$ and 2.858 for Anyang and Nanjing, respectively. The results mentioned above support the viewpoint that the critical N concentration dilution curve for cotton is independent of ecological region. The maximum and the minimum N concentration dilution curves also follow a power equation put the equations here, with $b_{\max} = 0.142$ and $b_{\min} = 0.158$ for both experimental sites, and $a_{\max} = 3.530$ and 3.208 and $a_{\min} = 3.055$ and 2.251 for Anyang and Nanjing, respectively. The same estimate of b in critical dilution curve at the two experimental sites indicates that growth rate, density and pedoclimatic conditions do not affect the slope of the critical N dilution curve. The difference of the coefficients a between the two experimental sites shows that, the cotton plant in Anyang has a higher capacity of N accumulation in shoot biomass than in Nanjing for the same shoot dry matter. Due to its biological soundness, the critical N concentration dilution curve can be a theoretically sound and practically reliable tool for diagnosing the N nutrition status of plants. Based on the critical N concentration dilution model, the model of allometric relationships between crop N uptake at each N application level and accumulated dry matter in the shoot biomass, and the model of N nutrition index (NNI) were developed. The former can be used as an index for controlling of N application, and the latter can be used to express the N status of the cotton plants. If $NNI = 1$, N nutrition is considered to be optimum, $NNI > 1$ indicates excess N. $NNI < 1$ indicates N deficiency. Based on the critical N concentration model, the model of N demand at different growth stages for potential growth and yield was developed. According to the allometric growth coefficient, NNI and N accumulation rate under critical N concentration, the following conclusion can be extracted: (1) Despite the difference of biomass and lint yield between Anyang and Nanjing, the eigenvalues of the dynamic biomass accumulation model were consistent. (2) The optimal rate of N application in Anyang should be higher than that in Nanjing, and the optimal N application rate is 360 kg hm^{-2} and 240 kg hm^{-2} in Anyang and Nanjing, respectively.

Since the models developed in this study are based on the actual growth rate of the crop, it has the advantages over other models: it is crop specific, exact, simple and biologically sound. The models can be used directly to estimate the intrinsic crop nitrogen demand, and can be integrated, as a submodel, into the crop growth simulation models. The result of this paper has paved the way toward a timely precision nutrient fertilization.

Key words: cotton; critical nitrogen concentration; dilution curve; nitrogen nutrition index; control

作物高产是以较高的生物量累积为前提^[1-5],而生物量累积是以养分的吸收为基础,氮素是作物吸收的主要养分之一,生物量的累积对氮素最为敏感^[6-7]。研究表明,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 $N = aW^{-b}$ 表示(a, b 为参数)^[8],获得最大地上生物量所需的最低氮浓度值为“临界氮浓度”^[9-11]。

关于作物的临界氮浓度稀释曲线,Greenwood^[8]等在 1990 年提出了两个有关 C_3 、 C_4 作物的临界氮浓度与地上干物质间的通用模型($C_3: N = 5.7W^{-0.5}$; $C_4: N = 4.1W^{-0.5}$),之后,Lemaire 和 Gastal 对 Greenwood 的模型参数进行了修正,提出两个新的模型^[12](C_3 作物: $N = 5.7W^{-0.5}$; C_4 作物: $N = 3.6W^{-0.34}$),此模型是在多个试验的平均状况下得到的,再加上供试作物有限,因而很难能代表所有 C_3 、 C_4 作物。

近年来有关学者已建立了冬牧草、马铃薯、冬油菜、玉米和卷心菜等作物的临界氮浓度稀释曲线模型^[13-16],但针对棉花氮浓度稀释曲线模型的研究至今仍为空白。棉花具有无限开花结铃习性,花后棉花的生长时期较长,是产量、品质形成的关键时期,现有棉花氮素运筹的研究仅仅把棉花花后的花铃期和吐絮期作为两个比较重要的“时间点”开展研究,显然不妥,针对花后棉株生长期氮素营养状况、氮素需求量的研究迄今少有报道。

本研究在不同棉花种植区域进行氮素水平试验,目的在于确定花后棉花的临界氮浓度稀释模型,弄清是否可用此模型来指导区域棉花的氮素运筹。同时试图寻找可以客观、定量地判断棉株氮素营养状况,从而达到定量调控棉花施氮量目的指标,为棉花生产中适时定量施肥提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于2004年在河南安阳中国农业科学院棉花研究所(黄淮棉区)和江苏南京江苏省农业科学院(长江中下游棉区)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73.4mg·kg⁻¹、91.8 mg·kg⁻¹,速效磷为23.6 mg·kg⁻¹、41.5 mg·kg⁻¹,速效钾为247.5 mg·kg⁻¹、226.25 mg·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 kg·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、株距分别为75cm×25cm和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、壳和纤维等不同器官分样,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测定分器官的全氮含量,根据分器官的干物质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 临界氮浓度稀释曲线模型 作物在生长过程中,若地上部分氮浓度值在临界氮浓度以下,作物的生长将受到氮养分的制约;在临界氮浓度以上,则说明施氮量已超过作物的需求量,作物生长不受氮的限制;只有氮浓度值等于临界氮浓度时的施氮量最为适宜。

由于临界氮浓度值是由不同的氮水平试验监测结果确定,因而氮水平试验需要包含作物生长受到氮素营养欠缺的制约和不受制约两种情况,若增加施氮量导致作物地上生物量显著性增加($p < 0.05$),表明作物生长因氮素供应不足而不能达到最大生产量;反之,若增加施氮量,尽管氮吸收量可能增加,但地上干物质并未出现显著性的增加($p < 0.05$),作物生长将不受氮素制约。

按照Justes等人1994年提出的临界氮浓度稀释曲线的计算方法,其包括以下步骤:(1)对比分析不同氮水平试验的每次取样地上干物重及相应的氮浓度值,用方差分析对作物生长受氮素营养限制与否的施氮水平进行分类;(2)对于施氮量不能满足作物最大生长需求的试验监测资料,其地上干物重与氮浓度值间的关系以线性曲线拟合;(3)对于作物生长不受氮素影响的施氮水平,其地上生物量的平均值用以代表最大干物重。(4)每次取样日的理论临界氮浓度由上述线性曲线与以最大生物量为横坐标的垂线的交点的纵坐标决定。按Greenwood等的定义,临界氮浓度稀释曲线模型为:

$$N_c = aW_{\max}^{-b} \quad (1)$$

式中, N_c (%)为棉株地上部分的临界氮浓度值, W_{\max} (Mg·hm⁻²)为棉株地上干物质最大值, a 、 b 为参数,其中, a 代表当地上生物量为1Mg时的氮浓度值; b 为控制临界氮浓度稀释曲线斜率的统计参数。

1.3.2 异速生长模型 作物在临界氮浓度状态下达到地上生物量最大累积所需要的氮吸收量 N_{uptc} (kg·hm⁻²)为:

$$N_{\text{uptc}} = 10N_cW_{\max} \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式得到作物氮累积量与地上生物量之间的异速生长模型:

$$N_{\text{uptc}} = 10aW_{\max}^{1-b} \quad (3)$$

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; $10a$ 为当地上干物重达到1Mg·hm⁻²

时的氮吸收量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 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的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:

$$NNI = \frac{N_t}{N_c} \quad (4)$$

式中, N_t ($\text{g}/100\text{g}$)为作物地上部氮浓度的实测值, N_c ($\text{g}/100\text{g}$)为以相同的地上生物量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体内氮营养状况,若 $NNI = 1$,表明作物体内氮素营养水平处于最佳状态,高于1为氮营养过剩,低于1则氮营养不足。

1.3.4 临界氮吸收速率 作物在动态生长过程中其临界氮浓度与地上干物重均随生育进程的推移为以时间为自变量的时间函数($N_c(t)$,%; $W_{\max}(t)$, $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$),因而临界氮累积量($N_{\text{uptc}}(t)$, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的时间函数为:

$$N_{\text{uptc}}(t) = 10N_c(t)W_{\max}(t) \quad (5)$$

在棉株生长过程中,其临界氮吸收速率(R_c , $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)可用以下式表示:

$$R_c = \frac{d(10N_cW_{\max})}{dt} \quad (6)$$

则:

$$R_c = 10N_c \frac{dW_{\max}}{dt} + 10W_{\max} \frac{dN_c}{dt} \quad (7-1)$$

$$R_c = 10N_c \frac{dW_{\max}}{dt} + 10W_{\max} \left(\frac{dN_c}{dW_{\max}} \frac{dW_{\max}}{dt} \right) \quad (7-2)$$

$$R_c = 10 \frac{dW_{\max}}{dt} \left(N_c + W_{\max} \frac{dN_c}{dW_{\max}} \right) \quad (7-3)$$

根据氮素临界稀释曲线模型(1),则:

$$\frac{dN_c}{dW_{\max}} = -abW_{\max}^{-b-1} \quad (8)$$

因此,临界氮吸收速率可由式(7-3)和(8)合并为:

$$R_c = 10 \frac{dW_{\max}}{dt} (aW_{\max}^{-b} - abW_{\max}^{-b}) \quad (9-1)$$

$$R_c = 10a(1-b)W_{\max}^{-b} \frac{dW_{\max}}{dt} \quad (9-2)$$

$$R_c = 10(1-b)N_c \frac{dW_{\max}}{dt} \quad (9-3)$$

由(9-3)可知,棉株临界氮吸收速率主要取决于作物生长和无氮素亏缺条件下的干物质最大生长速率。

根据作物生长的动态过程符合 Logistic 生长模型原理^[17],其干物质动态累积的时间函数可表示为

$$W_{\max}(t) = \frac{W_M}{1 + ae^{-\beta t}} \quad (10)$$

式中, W_M ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)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,则:

$$\frac{dW_{\max}}{dt} = \frac{-W_M\alpha\beta\exp(-\beta t)}{(1 + a\exp(-\beta t))^2} \quad (11)$$

将(11)代入(9-3)式便可得到临界氮吸收速率:

$$R_c = \frac{-10(1-b)a\alpha\beta W_M^{1-b}\exp(-\beta t)}{(1 + a\exp(-\beta t))^{2-b}} \quad (12)$$

1.4 数据分析

采用 Excel 软件完成全部数据处理和作图,SPSS11.0 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 棉花临界氮浓度稀释模型的建立

2.1.1 不同施氮水平下生物量与氮浓度分析 按照 Justes 等人关于临界氮浓度稀释曲线模型的计算方法,对比分析安阳、南京 2 试点不同氮水平试验各取样日棉花地上干物重和相应的氮浓度值(见表 1、图 1),安阳试点棉株地上总生物量随施氮量的增加,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,前期随氮素水平的增加而增加,到中期以后 N2 处理的总生物量迅速增加,与 N3、N4 处理差异较小,均显著高于 N1、N0 处理。根据表 1 中统计检验结果,随着施氮量的增加,安阳试点 N3、N4 处理间的地上干物重无显著性差异,南京试点的 N2、N3、N4 施氮水平间的生物量为统计意义上的相等。2 试点各取样时间点的干物质满足下列统计意义上的不等式:

$$\text{安阳试点} \quad W_0 < W_1 < W_2 < W_3 = W_4 \quad (13)$$

$$\text{南京试点} \quad W_0 < W_1 < W_2 = W_3 = W_4 \quad (14)$$

式中, W_0 、 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别表示 N0、N1、N2、N3、N4 施氮水平下的棉株地上干物重 ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

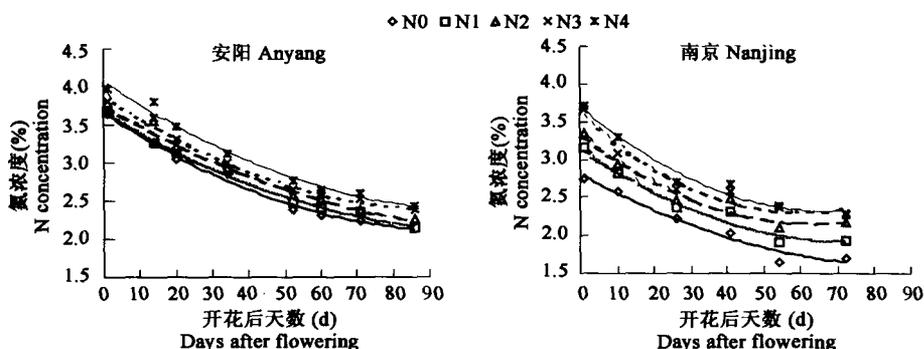


图 1 不同施氮水平下棉株地上干物质氮浓度的动态变化(安阳,南京)

Fig.1 Dynamic change of nitrogen concentration in shoot dry matter of cotton under different nitrogen levels (Anyang, Nanjing)

表 1 施氮水平对棉花地上生物量动态累积的影响

Table 1 Effects of nitrogen fertilization rate on dynamic accumulation of cotton shoot biomass

地点 Sites	花后天数 Days after flowering (d)	地上生物量 Aboveground biomass ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)				
		N0	N1	N2	N3	N4
安阳 Anyang	1	230.3 ± 3.7c	247.0 ± 6.5b	246.8 ± 4.5b	254.0 ± 3.0ab	262.4 ± 9.8a
	14	932.4 ± 11.2d	997.8 ± 9.6b	987.2 ± 6.1c	1013.5 ± 5.9a	1008.8 ± 7.2a
	20	1340.9 ± 34.6c	1420.2 ± 17.4b	1433.0 ± 27.3b	1499.1 ± 23.6a	1484.3 ± 11.4a
	34	1670.2 ± 16.2d	2039.3 ± 31.8c	2837.2 ± 29.7b	2993.6 ± 75.4a	2968.5 ± 14.6a
	52	4534.3 ± 191.9d	4995.4 ± 207.1c	5735.2 ± 110.5b	6173.3 ± 354.8ab	5921.2 ± 68.4a
	60	5884.9 ± 195.1d	6313.7 ± 71.4c	7140.7 ± 33.5b	7675.1 ± 181.5a	7541.9 ± 115.8a
	71	6818.7 ± 105.4d	7447.6 ± 119.6c	8261.6 ± 116.5b	8665.3 ± 142.4a	8592.0 ± 76.0a
南京 Nanjing	1	199.3 ± 15.1b	208.9 ± 10.1b	284.3 ± 23.8a	280.3 ± 8.1a	308.6 ± 31.9a
	10	625.3 ± 21.2c	810.8 ± 48.1b	1160.2 ± 90.1a	1120.0 ± 98.3a	1261.0 ± 193.4a
	26	1274.5 ± 142.3c	1668.4 ± 197.2b	2392.4 ± 158.1a	2396.5 ± 213.6a	2558.3 ± 214.4a
	41	2755.6 ± 166.1c	3530.2 ± 99.3b	4179.2 ± 138.6a	4061.7 ± 302.2a	4371.5 ± 315.9a
	54	4264.2 ± 172.6c	5371.7 ± 243.0b	6913.5 ± 257.4a	6714.2 ± 220.6a	6830.5 ± 228.3a
	72	5899.3 ± 248.3c	7432.8 ± 265.0b	8807.3 ± 293.2a	8825.2 ± 251.1a	8629.9 ± 245.8a

表中数据为平均值 ± 标准误差,同一行数据具有相同字母的表示处理间没有达到显著性检验 ($p < 0.05$) Data of the table represent average value ± standard error and those with the same letters are not significantly different ($p < 0.05$)

由图 1 可见,对于同一个取样日,棉株地上氮浓度值随施氮量的增加而提高。根据临界氮浓度的定义,每

个取样日的临界氮浓度值是由 2 条曲线交点决定的,其中,一条是由逐渐增长的干物重与对应的氮浓度值的交点形成的一倾斜曲线,安阳试点该线经过 W_0 、 W_1 、 W_2 、 W_3 点,南京试点则通过 W_0 、 W_1 、 W_2 点。另一条线是以最大生物量为横坐标的垂直线,安阳试点该线经过 W_3 、 W_4 点,而南京试点该线则由 W_2 、 W_3 、 W_4 点组成。曲线与直线相交点的纵坐标值即为临界氮浓度值。

2.1.2 棉花临界氮浓度稀释模型与异速生长模型的建立 采用(1)、(3)式,对上述确定的临界氮浓度值与对应的最大干物重进行拟合,得到了安阳、南京 2 试点棉花临界氮浓度模型和异速生长模型(参数见表 2)。

表 2 棉花氮稀释模型和异速生长模型的参数值(安阳,南京)

Table 2 The parameters of nitrogen dilution model and allometric growth model for cotton (Anyang, Nanjing)

试点 Sites	氮稀释曲线 Nitrogen dilution model			异速生长曲线 Allometric growth model				
		a	b	R^2	$10 a$	$1 - b$	R^2	
安阳 Anyang	N_{min}	3.055	0.158	0.964**	N_{uptmin}	30.552	0.842	0.999**
	N_{max}	3.530	0.142	0.934**	N_{uptmax}	35.302	0.858	0.998**
	N_c	3.387	0.131	0.940**	N_{uptc}	33.868	0.869	0.999**
南京 Nanjing	N_{min}	2.251	0.158	0.921**	N_{uptmin}	22.505	0.842	0.997**
	N_{max}	3.208	0.142	0.961**	N_{uptmax}	32.075	0.853	0.999**
	N_c	2.858	0.131	0.943**	N_{uptc}	28.579	0.869	0.999**

$R^2_{0.01} = 0.766$

图 2 为安阳、南京 2 试点不同施氮水平下地上生物量所对应的氮浓度值的分布图,从图 2 可看出,对于同一试点在不同施氮水平下,同样的地上生物量氮浓度值不同,分别用每个取样日氮浓度的最大、最小实测值模拟可得到棉花最高(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(1),模型参数见表 2。

从表 2 可看出,2 试点棉花花后地上干物质的临界氮浓度稀释模型、最高和最低氮浓度稀释模型的形式一致,但参数不同。其中,安阳、南京试点对应的氮浓度稀释模型的参数 b 相同, a 值有一定差异。在安阳试点,初花期的棉花氮浓度值在 3.63% ~ 3.97%,临界值为 3.82%;吐絮期的波动范围则在 2.14% ~ 2.40%,临界值为 2.39%。南京试点,初花期、吐絮期氮浓度的变化范围分别为 2.74% ~ 3.71%、1.69% ~ 2.28%,临界值则为 3.35%、2.18%。可见由于 2 试点分别处于不同的气候区域,加之基础土壤条件有异,棉株地上部氮浓度值的临界、最高、最低值均有所不同,安阳试点临界、最高、最低氮浓度曲线的位置高于南京试点,且安阳试点的 N_c 与 N_{max} 的差值较小,而南京试点的差异较大,由此可以预测安阳试点的最佳施氮量将比南京试点高。

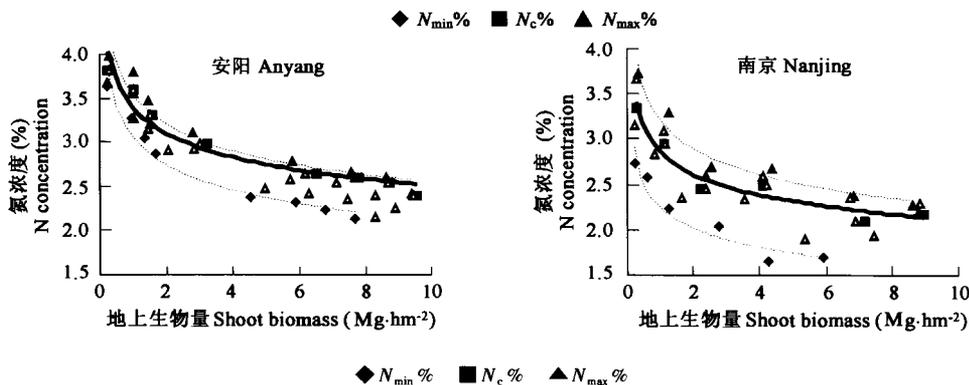


图 2 棉花地上生物量的氮稀释曲线(安阳,南京)

Fig. 2 Nitrogen dilution curve in shoot biomass of cotton (Anyang, Nanjing)

2.2 棉花临界氮浓度稀释模型与施氮量调控

2.2.1 基于异速生长模型的施氮量调控 根据上述分析结果,棉花生长过程中其临界氮浓度与地上干物重均随生育进程的推移为以时间为自变量的函数,因而每个生长发育阶段均对应有一个特定的氮累积量。根据

异速生长模型(3)可得到各取样日的棉株临界氮累积量,将其分别与不同氮处理条件下实测氮累积量进行对比(见图3),2试点不同施氮水平下的氮累积与临界值的相对误差为:安阳为28.5%、20.2%、9.9%、3.2%、4.7%;南京为47.4%、26.7%、3.6%、8.0%、17.6%。说明施氮量在 $360\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (安阳)和 $240\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (南京)较为适宜,与综合分析不同氮素水平下的花后棉株总生物量、氮素累积量及氮素利用率的动态变化特征值后所得到的安阳、南京适宜施氮量的结果一致,同时也与2.1.2中根据临界氮浓度值与最大氮浓度值的差异对2试点的最佳施氮量的预测结果一致。

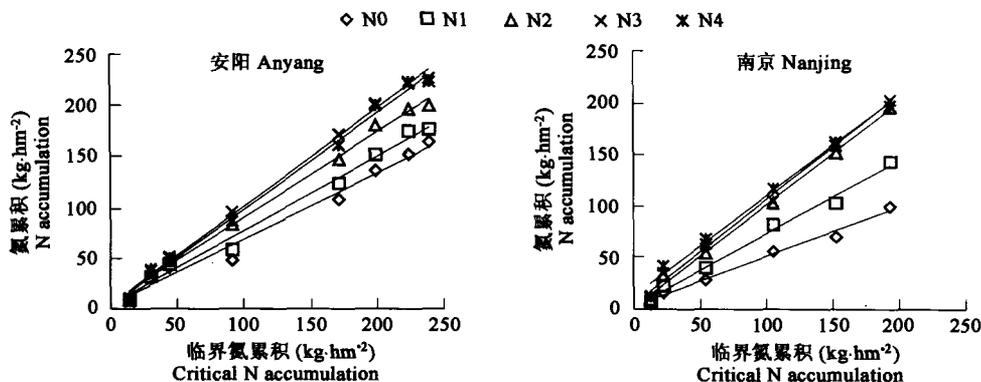


图3 棉株临界氮累积与不同氮水平条件下氮累积1:1对比(安阳、南京)

Fig.3 Comparison of N accumulation between critical and different N application rates (Anyang, Nanjing)

2.2.2 基于棉花氮营养指数的施氮量调控 图4为根据氮素营养指数模型(4)计算所得的2试点各氮素水平下棉花花后NNI的动态变化。由图4可看出,在棉株动态生长过程中地上部NNI并不是均匀一致的,而是呈现一定的波动状态,且随着施氮量的增加NNI呈增加的趋势。综合分析各处理的NNI,以安阳试点的N3处理、南京试点的N2处理的施氮量较为适宜,与2.1.2和2.2.1中的结论一致。由此可见,NNI可以作为定量判断棉株营养状况和施肥量调控的指标之一。

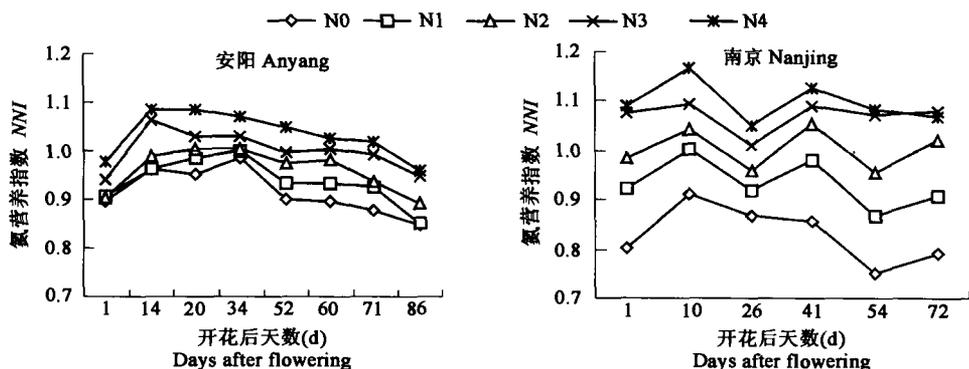


图4 棉花氮素营养指数的动态变化(安阳、南京)

Fig.4 Dynamic change of the nitrogen nutrient index of cotton (Anyang, Nanjing)

2.2.3 基于棉花临界氮吸收速率的施氮量调控 分析安阳、南京2试点不同施氮水平下棉株的NNI和产量(见图5),在低氮水平下,其NNI均较低,产量也低,随着施氮量的增加,NNI增加,当施氮量超过一定数量后,其氮素营养出现过剩,但产量并未出现明显的增加,甚至有所下降,为此,根据临界氮浓度稀释模型可将棉株动态发育过程中的氮素需求量定量化,在生产中通过适时定量施肥将棉株的动态氮吸收速率调节控制在临界氮浓度稀释条件下的棉株动态瞬时需氮量的范围内,便可做到即能获得高产又最大限度地降低施氮量。

利用模型(10、11)对安阳、南京2试点在临界氮浓度条件下棉株地上部分干物质动态增长特征值进行计算(见表3),结果表明,尽管安阳、南京2试点地上生物量和皮棉产量不同,但临界氮浓度条件下的生物量动

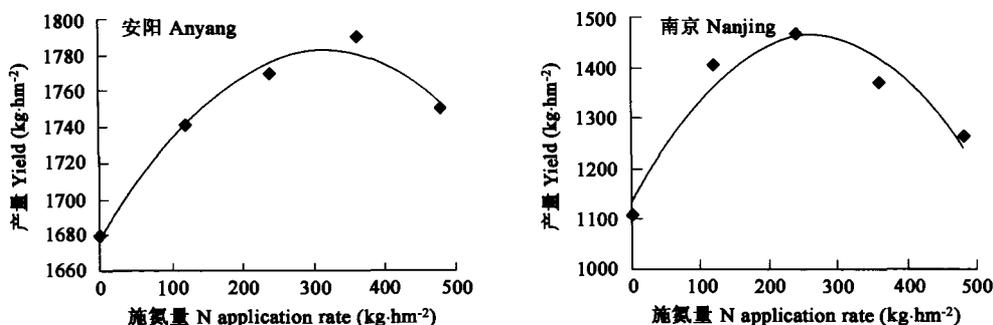


图 5 施氮量对皮棉产量的影响(安阳,南京)

Fig.5 Effect of nitrogen application on lint cotton yield

态累积模型特征值却相似,其地上部干物质快速累积期的起始时间在开花后 26d 左右,持续时间、干物质瞬时最大累积速率出现日等基本一致。据此,由模型(12)可以分别得到各棉区棉株瞬时临界氮吸收速率(见图 6),由图 6 可见,随着生育进程的推移二者均为单峰型,且升降几乎同步,表明在不同气候区域棉花达到最高产量的瞬时氮吸收速率的变化趋势、氮素快速累积期、最大氮吸收速率的出现日基本一致,其临界最大氮吸收速率分别为 $4.634 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $3.826 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,由此便可得到 2 试点棉花动态临界氮需求量,且安阳试点的 N3 处理、南京试点的 N2 处理的氮累积实测值与其对应的临界值吻合性最好(见图 7),因而为适宜的施氮水平。

表 3 棉花地上干物质临界动态累积模型及其特征参数(安阳,南京)

Table 3 Critical dynamic model of shoot dry matter of cotton plant and eigenvalues parameter (Anyang, Nanjing)

试点 Sites	W_m ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	α	β	R^2	快速生长期 Speediness growth period(d)	最大速率日期 Date of maximum rate(d)	最大速率 V_m ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
安阳 Anyang	9.886	30.728	-0.078	0.999**	27-60	44	0.194
南京 Nanjing	10.227	27.132	-0.075	0.993**	27-62	44	0.191

3 讨论

3.1 棉花临界氮稀释曲线模型与其它作物模型比较

棉花花后地上部干物质含氮百分率随着干物重的增长为一稀释过程,这种氮稀释现象主要是由棉株生长发育的两个过程所致^[18-19],其一是叶片的相互遮阴,另一过程为在棉花生长过程中叶片与茎秆之比的变化。继 Greenwood、Lemaire 和 Gastal 等提出了关于 C_3 、 C_4 植物的临界氮浓度通用模型之后,近年来许多学者对不同作物分别进行了不断深入的研究,Justes^[13]等得到的关于冬小麦临界氮浓度稀释曲线模型为 $N\% = 5.35 W^{-0.442}$,Colnenne^[14]等对冬油菜的研究模型为 $N\% = 4.48 W^{-0.25}$,Tei^[15]等得到的马铃薯模型则为 $N\% = 3.9 W^{-0.27}$,上述研究所得到的模型形式与 Greenwood 等提出的模型一致,但参数不同,造成以上差异的原因有两方面:(1)Greenwood 等所用的试验数据是在作物生长不受氮营养制约的条件下得到的,因此,其氮浓度临界值可能比实际值高。(2)由于不同作物间的生长形态、生理生态等特征的不同,造成其相应临界氮浓度稀释曲线参数存在一定差异。本研究表明,棉花的临界氮浓度稀释曲线模型形式符合 Greenwood 等人的假设,且 2 试点的模型参数 b 值相同,表明气候、土壤、密度等环境条件对棉花临界氮浓度稀释曲线斜率无影响,即其存在较好的稳定性。与前人研究结论不同的是 2 试点的参数

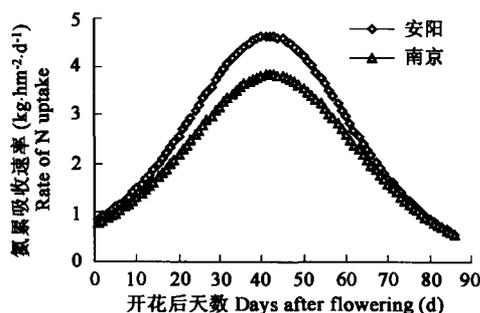


图 6 棉花逐日临界氮吸收速率的动态变化(安阳、南京)

Fig.6 Dynamics change of critical rate of nitrogen uptake of cotton (Anyang, Nanjing)

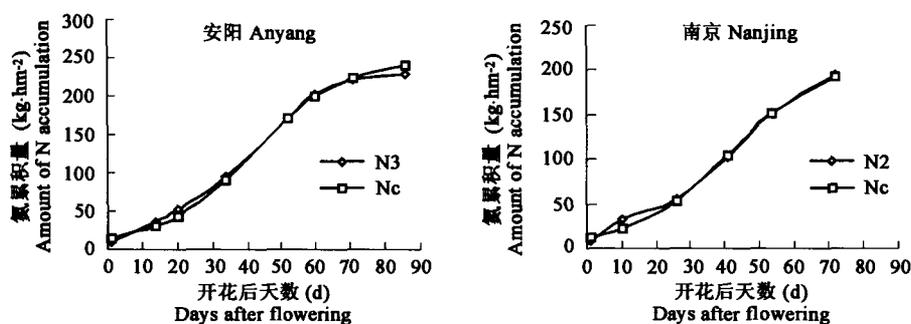


图 7 棉株临界氮累积与适宜施氮水平下氮累积的对比(安阳、南京)

Fig. 7 The comparison of N accumulation between critical and optimal N application rates (Anyang, Nanjing)

a 存在一定差异,表明不同气候区域有其特定的临界氮稀释曲线,这可能与棉花的生长形态、习性与其它作物间存在很大差别有关。Sheehy^[16]等在对热带高产水稻的研究中得到与本研究一致的结论。

3.2 棉株地上干物质氮浓度的变化

试验结果表明,不同施氮水平下相同棉株地上干物质氮浓度存在较大的变化幅度,根据表 2 中参数值,2 试点最高、最低氮稀释曲线模型可表示为:

$$\text{安阳} \quad N_{A_{\max}} = 3.530 W_{A_{\max}}^{-0.142} \quad (15)$$

$$N_{A_{\min}} = 3.055 W_{A_{\min}}^{-0.158} \quad (16)$$

$$\text{南京} \quad N_{N_{\max}} = 3.208 W_{N_{\max}}^{-0.142} \quad (17)$$

$$N_{N_{\min}} = 2.251 W_{N_{\min}}^{-0.158} \quad (18)$$

从图 2 中可以看出,安阳试点的最高、最低氮稀释曲线的位置均高于南京试点对应的曲线位置。这一差别可以从以下关系式中得到解释,根据模型(1)、(3)和(15)~(18),则有:

$$(dN_{\text{upt}}/dt)_{\max} = k_{\max} (dW/dt)_{\max} \quad (19)$$

$$(dN_{\text{upt}}/dt)_{\min} = k_{\min} (dW/dt)_{\min} \quad (20)$$

$$k = 10(1 - b) a W^{-b}$$

两试点的最高、最低曲线的 K 值分别为: $(30.287 W^{-0.142})_{A_{\max}}$ 、 $(27.3648 W^{-0.142})_{A_{\max}}$ 和 $(25.723 W^{-0.158})_{A_{\min}}$ 、 $(18.953 W^{-0.158})_{A_{\min}}$,表明对于相同的地上生物量,安阳试点棉株的氮累积能力高于南京试点,因此,在达到最大地上干物质并保持临界氮浓度时,安阳试点的氮素吸收速率大于南京试点的相应值,达到最高产量所需的施氮量也高于南京试点的需肥量。

试验结果表明,2 试点棉株地上氮浓度值随施氮量的增加而提高,由于试验施氮水平设置的局限性,本文对最高氮浓度稀释曲线的确定有可能低于实际值。另外,由于棉花的特殊生长形态与习性,在其生长过程中不断有叶子衰老脱落,如此同时出现了氮从老叶向新叶的转移分配现象,由此使棉株地上部分的氮浓度增加,故所得最低氮浓度稀释曲线可能高于实际值。

3.3 氮营养指数(NNI)的应用

由 Lemaire 等人^[9,20]提出的 NNI 概念,由于其基于作物临界氮浓度,因而具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。Colnenne 等建立了 NNI 指数与油菜的生长速率、叶面积指数、氮素利用率以及产量的关系模型,从而可以定量诊断因氮营养胁迫对作物各项生长指标造成的损失。Devienne 等^[21]对油菜、小麦和玉米的 NNI 与对应 1 周前的土壤硝态氮含量的动态变化进行模拟,二者关系密切。本研究中运用 NNI 对不同氮素处理下棉株的氮营养进行了动态分析,得到了与利用其他指标确定区域适宜施肥量相同的结论,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,并可为精细农业的科学施肥提供理论指导。

图 4 中, 2 试点棉花至吐絮期, 安阳试点各处理的 NNI 较前期有所下降, 而南京试点则略有上升的趋势, 主要是由于 2 试点生态条件不同所致, 安阳试点, 此时气温已经显著下降(9 月 20 日的日平均气温为 18.7°C , 5 日滑动平均气温为 20.2°C), 棉株长势明显减弱, LAI 较前期明显降低, 导致氮吸量减少, 故棉株内 NNI 下降。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°C , 5 日滑动平均气温为 24.5°C), 此期 LAI 仍维持在较高的水平, 氮吸收能力也相应较强, 其 NNI 也相应维持在较高的水平。可见 NNI 是环境因素对棉花氮营养变化影响的综合反映指标。

3.4 氮吸收速率的控制

本文以临界氮浓度稀释曲线模型为基础, 给出了在给定的环境条件下, 棉花各生育阶段的氮需求均得到满足时的适宜干物质增长速率、氮吸收速率时间模型。由此而得的 2 试点临界氮累积需求量与适宜施氮水平的试验结果有较好的吻合性, 因此, 其为适时精确施肥提供了新的思路。此模型具有精确、简单和有生物学意义等特点, 可以直接用于评估作物的需氮量, 亦可用于作物氮动态模拟的复杂模型中。由于模型是以特定环境下大田试验结果而建立, 因而在确定棉花需氮量时应充分考虑潜在的环境影响。

4 结论

本文依据 2 个不同气候区域的试验资料, 建立了棉花临界氮浓度稀释曲线模型, 2 试点的模型参数 b 值相同, 表明气候、土壤、密度等环境因子对曲线斜率无影响。参数 a 值的不同说明在相同的生物量条件下安阳的氮累积能力高于南京, 同时不同的气候区域棉花应有独立的氮稀释曲线。此模型具有明确的生物学意义, 因而是诊断棉花动态氮营养状况的工具之一。由于异速生长模型、氮营养指数模型和临界氮吸收速率模型均基于临界氮浓度稀释模型, 因而利用上述指标进行适宜施氮量调控的结论基本一致, 安阳试点的施氮量宜在 $360 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 南京试点以 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量较为适宜, 并与当地实况相符。

本研究所得的模型参数是由单一棉花品种而得, 尽管已有的研究表明小麦、玉米等作物^[12,13]的模型对不同品种均具有较好的广适性, 因而棉花氮稀释模型品种间应该有较好的通用性, 但这仍需在以后的研究中加以验证。

References:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Damisch W. Biomass yield-A topical issue in modern wheat breeding programmers. *Plant Breeding*, 1996, (107): 11 ~ 17.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Gayler S, Wang E, Priesack E, et al. Modeling biomass growth, Nuptake and phynological development of potato crop. *Geoderma*, 2002, (105): 367 ~ 383.
- [7] 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.
- [8] Greenwood D J, Lemaire G, Gosse G, et al. Decline in percentage N of C_3 and C_4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany*, 1990, (67): 181 ~ 190.
- [9] 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.
- [10] Lemaire G, Salette J. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de gramine! es fourragères I. Etude de l'effet du milieu. *Agronomie*, 1984, 4: 423 ~ 430.
- [11] 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* 1984b, 4: 431 ~ 436.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Tei F, Benincasa P, Guiducci M. Critical nitrogen concentration in processing tomato. *European Journal of Agronomy*, 2002, (18):45 ~ 55.
- [16] 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.
- [17] Nkoa R, Desjardins Y, Tremblay N, *et al.* A mathematical model for nitrogen demand quantification and a link to broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) glutamine synthetase activity. *Plant Science*, 2003, (165):483 ~ 496.
- [18] Lemaire G, Onillon B, Onillon G, *et al.* Nitrogen distribution within a Lucerne canopy during regrowth: Relation with light distribution. *Annals of Botany*, 1991, (68):483 ~ 488.
- [19] Lemaire G, Chartier B. Relationship between growth dynamics and nitrogen uptake for individual sorghum plants growing at different plant densities. In: proceedings of the 2nd ESA Congress. Warwick University, England 23 ~ 29 August 1992. 98 ~ 99.
- [20] 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.
- [21] Devienne F B, Justes E, Machet J M, *et al.* Integrated control of nitrate uptake by crop growth rate and soil nitrate availability under field conditions. *Annals of Botany*, 2000, (86):995 ~ 1005.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 上官周平,李英,陈培元. 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.
- [7] 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.