

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.035

基于临界氮浓度的滴灌棉花氮素营养诊断模型研究

马露露¹ 吕新^{2,3} 张泽^{2,3} 马革新^{2,3} 海兴岩^{2,3}
(1. 石河子大学生命科学学院, 石河子 832003; 2. 石河子大学农学院, 石河子 832003;
3. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 在新疆滴灌棉田,选择新陆早45号作为试验材料,设置5个施氮水平(0、120、240、360、480 kg/hm²),研究滴灌棉花各器官氮素吸收分配规律及生物量和氮浓度的动态变化,并建立滴灌棉花的临界氮浓度稀释模型,确定临界氮营养指数,实现对滴灌棉花氮素营养丰缺程度的诊断。结果表明,滴灌棉花生物量随施氮量的增加而增加,氮浓度随滴灌棉花的生长进程而降低;滴灌棉花临界氮浓度与地上部生物量间符合幂函数关系,其相关系数为0.906。通过均方根误差RMSE对模型进行验证,验证结果表明,所得模型的模拟性能较好。基于临界氮浓度建立的氮素营养指数模型(NNI)可作为滴灌棉花氮素营养状况的判别指标,由氮营养指数得到滴灌棉花的适宜施氮量为240~360 kg/hm²。

关键词: 滴灌棉花; 施氮水平; 生物量; 临界氮浓度; 氮营养指数

中图分类号: S275.6; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0277-07

Establishment of Nitrogen Nutrition Diagnosis Model for Drip-irrigation Cotton Based on Critical Nitrogen Concentration

MA Lulu¹ LÜ Xin^{2,3} ZHANG Ze^{2,3} MA Gexin^{2,3} HAI Xingyan^{2,3}
(1. College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, China 2. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China
3. The Key Laboratory of Oasis Ecology Agricultural, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832003, China)

Abstract: A critical nitrogen concentration in plant above-ground biomass, which is defined as the minimum nitrogen concentration required for maximum plant growth, can be found at any time in the growth cycle. To determine the critical nitrogen (N) concentration dilution curve with different nitrogen levels for drip-irrigation cotton in the Manas County of Xinjiang. Field experiments were carried out with cultivars of Xinluzao 45 and five nitrogen rates (0 kg/hm², 120 kg/hm², 240 kg/hm², 360 kg/hm², and 480 kg/hm²) were applied. Results showed that N concentration in above-ground biomass was declined with accumulated physiological development time after emergence. The relationship between the above-ground biomass and critical N concentration can be described by the power equation ($N_c = 3.91 W_{max}^{-0.24}$), with $a = 3.91$ and $b = 0.24$. The relationship between the correlation coefficient was 0.906. Through the root mean square error (RMSE) to verify this model, validation results showed that the model had a good simulation performance. Based on the critical N concentration model, the model of nitrogen nutrition index (NNI) was developed. According to the NNI under critical N concentrations, it was concluded that 240~360 kg/hm² could be used as the optimum N application rate of drip-irrigation cotton in Xinjiang.

Key words: drip-irrigation cotton; nitrogen fertilizer levels; biomass; critical nitrogen concentration; nitrogen nutrition index

0 引言

氮素是干旱区作物增产增效的重要限制因素,国内外关于滴灌作物养分运移与分配、作物生长与产量、施肥制度、氮肥优化管理等方面开展了大量研究^[1]。但在作物生长过程中氮素需求和供应之间

收稿日期: 2017-05-14 修回日期: 2017-07-30
基金项目: 兵团应用基础研究计划项目(2016AG002)和高层次人才科研启动项目(RC2X201516)
作者简介: 马露露(1990—),女,博士生,主要从事精准农业与生态学研究,E-mail: 1849819772@qq.com
通信作者: 张泽(1983—),男,副教授,博士,主要从事作物信息技术与精准农业研究,E-mail: zhangze1227@163.com

的同步性研究较少^[2],导致氮素利用效率偏低,同时造成温室气体排放加剧和大气、土壤及水体的污染。因此,针对作物不同生育期氮素营养实际状况优化供氮量,对于提高氮素利用效率和环境保护具有重要意义。

植株氮素精确诊断是优化作物供氮量的基础,前人围绕植株体氮素精确诊断方面做了大量的研究,例如针对根区的养分检测^[3]、测定叶绿素^[4]以及应用 RS 技术^[5]等,这些技术的应用对于优化施氮起到了很好的作用,但由于受技术本身及成本等因素的制约,推广应用存在诸多困难。临界氮浓度被定义为在一定的生长期內最大生物量时的最小氮浓度,能较好地反映作物高产时的最优供氮水平,是作物氮素诊断的基本方法之一^[6-8]。前人建立了 C₃ 和 C₄ 作物的通用模型^[8],以及在卷心菜、水稻、冬小麦、大麦、牧草、向日葵、番茄、甜椒等农作物^[9-20]的临界氮浓度稀释模型,也在淹灌棉花上开展了建模工作。其中,薛晓萍等^[21]建立了长江中下游棉区和黄淮棉区棉花花后的临界氮浓度稀释曲线模型(南京, $N_c = 2.858 W_{max}^{-0.131}$; 安阳, $N_c = 3.387 W_{max}^{-0.131}$);王子胜等^[22]针对东北特早熟棉区建立了棉花全生育期的临界氮浓度稀释曲线模型($N_c = 4.377 W_{max}^{-0.252}$)。

研究发现,不同作物、生态气候区域及水肥管理方式之间的模型存在一定的差异,新疆属于典型干旱区,滴灌水肥一体化模式对氮素吸收影响较大,因此需要进行临界氮浓度稀释模型参数的本地化校正。

本研究以我国重要经济作物棉花为研究对象,在滴灌条件下开展不同施氮水平田间试验,以确定滴灌棉花生长发育与氮素吸收利用规律为基础,建立滴灌棉花临界氮稀释浓度模型,最终确定氮浓度营养指数,实现氮素准确、快速诊断,为进一步提高滴灌棉花的氮素利用效率、氮肥合理施用水平提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2015—2016 年在新疆玛纳斯县六户地镇高产创田地(东经 86°07'36",北纬 44°39'15",图 1)进行,日照时间达 2 800 ~ 3 000 h,年平均气温 5℃,大于等于 10℃ 有效积温 3 500 ~ 4 100℃,无霜期 180 d。土壤质地为壤土,0 ~ 20 cm 土层有机质质量比 19.13 g/kg,碱解氮质量比 50.8 mg/kg,速效磷质量比 19.8 mg/kg,速效钾质量比 160.1 mg/kg,田间持水量 29.6 g/m³,耕层土壤容重为 1.43 g/cm³。



图 1 试验地位置图
Fig. 1 Experimental field location map

滴灌棉花的供试品种为新陆早 45,试验设 6 个氮素水平 N0、N1、N2、N3、N4 (0、120、240、360、480 kg/hm²) 和 N5 (常规处理,施氮量为 300 kg/hm²,为当地农户施纯氮量,作为模型的验证),氮肥施用均为 30% 作为基肥,剩余 70% 在滴灌棉花生育期随水施入。磷肥 (P₂O₅) 150 kg/hm² 和钾肥 (K₂O) 150 kg/hm² 播前一次性施入。试验设 3 次重复,随机区组排列(图 2)。采用膜下滴灌的方式,氮肥(尿素,含氮量 46%)施入时间与当地农户同步。试验小区面积为 25 m² (2.5 m × 10 m),种植模式为“1 膜 3 管 6 行”,膜宽 2.05 m,株距 10 cm,行距配置为 10 cm + 66 cm,种植密度为 2.25 万株/hm²。试验地为棉花连

作,东西走向,四周设置保护行。2015 年 4 月 11 日播种,并滴施出苗水,其他田间管理措施均按高产栽培要求进行。

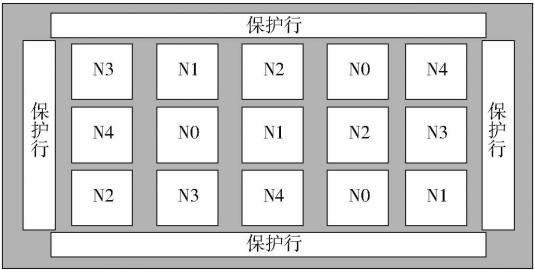


图 2 试验小区分布图
Fig. 2 Field experiment district distribution map

1.2 测定内容与方法

2015 和 2016 年试验均在滴灌棉花出苗后开始计算采样日期,直至棉花始絮期。第 2 次滴灌施肥 5 d 以后开始采样,其中施氮和滴灌日期为 6 月 17 日、6 月 23 日、7 月 1 日、7 月 10 日、7 月 22 日、8 月 5 日、8 月 20 日,施氮比例分别为 10%、10%、20%、20%、20%、10%、10%,采样时间分别为出苗后第 60、68、77、90、105、125 天,2 年试验施氮比例、施氮日期、采样时间相同。每个试验小区选取具有代表性的棉花 3~6 株,按茎、叶和蕾铃 3 类不同器官分样,称量其各部位鲜质量,在 105℃ 下杀青 30 min,80℃ 干燥至恒质量,然后称量其干物质量。粉碎后用凯氏定氮法测定各分器官的全氮含量,据此计算滴灌棉花单株氮素累积量。成熟后分小区收获、测产。

1.3 滴灌棉花临界氮浓度曲线模型的建立方法

1.3.1 滴灌棉花临界氮浓度曲线模型

根据 GREENWOOD 等^[8]对临界氮浓度的定义,对于滴灌棉花,地上干物质氮浓度值在其生长发育不受氮素制约的情况下达到最低值时为临界氮浓度。

临界氮浓度稀释曲线的模型为

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

式中 N_c ——临界氮浓度, g/(100 g)

a ——滴灌棉花地上部生物量为 1 t/hm² 时棉株的临界氮浓度

$W_{\max}$ ——滴灌棉花地上部最大生物量

b ——控制临界氮浓度稀释曲线斜率的参数

用均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 和标准化均方根误差 (n-RMSE) 对所得模型进行验证,然后建立模拟值和实测值 1:1 直方图显示模型的拟合度和可靠程度。其中 RMSE 值越小,表示模拟值与实测值的偏差越小;n-RMSE 小于 10%,模型模拟性能极好;n-RMSE 为 [10%, 20%],模型模拟

性能较好;n-RMSE 为 [20%, 30%],模型模拟性能一般;n-RMSE 大于 30%,模拟性能较差^[23]。

1.3.2 滴灌棉花的异速生长模型

滴灌棉花在临界氮浓度下达到累积的最大地上部生物量时所需的氮吸收量 N_{uptc} (kg/hm²) 为

$$N_{uptc} = 10N_c W_{\max}$$
 (2)

将式(1)代入式(2),得到滴灌棉花临界氮吸收模型,即滴灌棉花氮累积量与地上部生物量之间的异速生长模型

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

1.3.3 滴灌棉花临界氮营养指数

氮营养指数 (Nitrogen nutrition index, NNI) 是指作物地上部植株实际的氮浓度与临界氮浓度的比值,用来判定作物体内氮营养状况^[24-25],是 LEMAIRE 等^[26]基于临界氮浓度稀释模型提出了氮营养指数 (NNI) 的概念,计算式为

$$NNI = \frac{N_i}{N_c}$$
 (4)

式中 N_i ——地上部实测氮浓度, g/(100 g)
若 $NNI = 1$,表明作物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。

1.4 数据处理与分析

采用 2015 年的试验数据进行回归拟合,建立滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线模型,利用 2016 年的常规试验数据对模型进行验证。采用 Excel 2013 进行数据的基础整理,显著性分析在 SPSS 19.0 软件中的 LSD 和 Duncan 进行,图形通过 Origin 8.0 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对滴灌棉花氮素吸收分配规律的影响

由图 3 可以看出,滴灌棉花在不同施氮水平下,地上部各器官的氮素含量存在显著性差异,其中叶片含量最高,蕾铃次之,茎的含氮量最低。随着滴灌

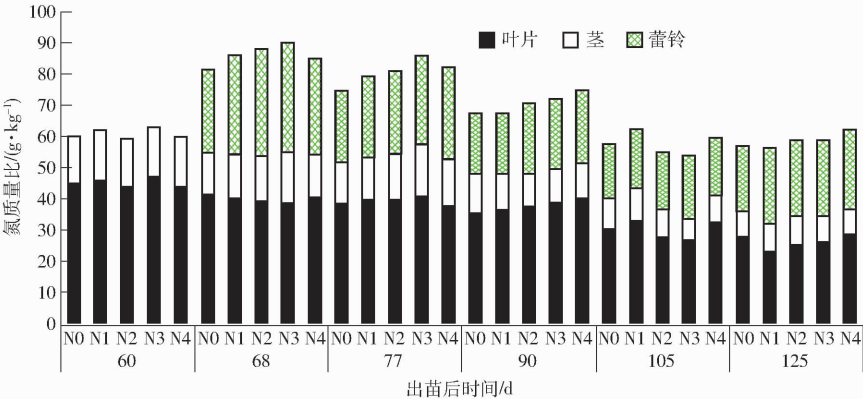


图 3 不同施氮水平下滴灌棉花地上部各器官氮素吸收分配规律

Fig. 3 Nitrogen absorption distribution rule of aboveground organs of drip-irrigation cotton under different nitrogen levels

棉花的生长发育,叶和茎的含氮量呈下降趋势,其中叶片的含氮量从 47.05 g/kg 降到 23.33 g/kg,降幅为 50.41%,茎的含氮量从 16.84 g/kg 降到 7.00 g/kg,降幅为 58.43%。由于土壤基础肥力的影响,N0、N1、N2 和 N3 处理对叶和茎的含氮量没有显著影响,在 N4 水平下有显著差异;叶和茎含氮量的降低与氮素向蕾铃转移有关,在棉花生长期,蕾铃的含氮量先下降后上升,这是由于后期幼铃增多且成铃数也在增加,蕾铃的生物量大幅增加,单铃的含氮量呈逐渐下降的趋势;出苗后 105 d 以后即盛铃期至始絮期,随着棉花整个生育期施氮的完成,叶片和茎的含氮量显著下降,同时由于棉花种子及纤维的发育,棉铃的含氮量出现回升。

表 1 施氮水平对滴灌棉花生物量动态累积变化的影响

施氮水平	出苗后时间/d					
	60	68	77	90	105	125
N0	2.95 ± 0.16 ^b	3.32 ± 0.13 ^d	5.87 ± 0.07 ^b	6.51 ± 0.16 ^c	8.82 ± 0.33 ^b	10.12 ± 0.95 ^b
N1	3.07 ± 0.21 ^a	4.73 ± 0.25 ^c	7.42 ± 0.38 ^a	8.95 ± 0.11 ^b	10.89 ± 0.50 ^b	16.08 ± 1.56 ^{ab}
N2	3.13 ± 0.15 ^a	5.44 ± 0.09 ^b	8.02 ± 0.69 ^a	11.45 ± 0.19 ^{ab}	16.63 ± 1.04 ^a	19.42 ± 1.43 ^a
N3	3.18 ± 0.36 ^a	5.65 ± 0.11 ^b	8.31 ± 0.58 ^a	12.29 ± 0.82 ^a	17.99 ± 0.44 ^a	21.42 ± 0.26 ^a
N4	3.20 ± 0.09 ^a	6.33 ± 0.24 ^a	8.57 ± 0.19 ^a	12.75 ± 0.58 ^a	17.09 ± 0.64 ^a	21.20 ± 1.00 ^a

注:同一列的不同字母代表差异显著($P < 0.05$),下同。

如图 4 所示,其氮浓度随生物进程的进行而降低,出苗后 68 d 的氮浓度下降得最快。通过显著性分析(表 2),其氮浓度在不同施氮水平下从大到小依次为 N3 和 N4 和 N2、N1、N0;在 N2、N3 和 N4 条件下,棉株地上部氮浓度差异不显著,说明在棉田土壤基础肥力的影响下,棉花的生长发育不受 N2、N3 和 N4 施氮水平的显著影响。

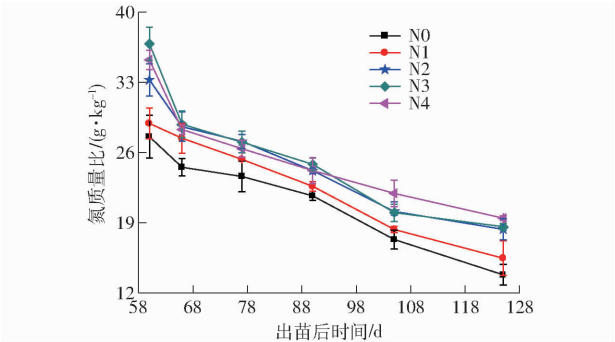


图 4 不同施氮水平下滴灌棉花地上部氮浓度动态累积变化

Fig. 4 Change of aboveground nitrogen concentration accumulation dynamic of drip-irrigation cotton under different nitrogen levels

结合 JUSTES 等^[27]和薛晓萍等^[21]提出的临界氮浓度稀释曲线的计算方法,本研究中滴灌棉花临界氮浓度模型的建立步骤为:①分析不同施氮水平

2.2 施氮水平对滴灌棉花地上生物量和氮浓度动态累积的影响

以 W0、W1、W2、W3、W4 分别表示 N0、N1、N2、N3、N4 施氮水平下滴灌棉株的地上部生物量(kg/hm²),表 1 试验结果表明,通过显著性分析,在不同施氮水平下的生物量由大到小依次为 W3 和 W4 和 W2、W1、W0,滴灌棉花的地上部生物量随着生物进程而增加,N0、N1、N2、N3、N4 水平下地上部生物量从第 60 天到第 125 天增幅分别为 243.49%、423.48%、519.93%、573.53%、561.79%,其中在 N3 水平下增幅最大,与 N0、N1 有显著差异,与 N2、N4 无显著差异;说明在其他条件平等的情况下,过多的施入氮肥并不能使滴灌棉花的生物量显著增加。

表 2 不同施氮水平下滴灌棉花地上部氮浓度显著性检验

Tab. 2 Significance test of aboveground nitrogen concentration of drip-irrigation cotton under different nitrogen levels

施氮水平	出苗后时间/d					
	60	68	77	90	105	125
N0	27.58 ^c	24.53 ^b	23.62 ^c	21.69 ^b	17.32 ^c	13.81 ^c
N1	28.90 ^{bc}	27.44 ^a	25.32 ^b	22.64 ^b	18.33 ^{bc}	15.46 ^b
N2	33.25 ^{ab}	28.58 ^a	27.12 ^a	24.19 ^a	20.12 ^b	18.34 ^a
N3	36.86 ^a	28.82 ^a	27.04 ^a	24.83 ^a	20.01 ^b	18.60 ^a
N4	35.25 ^a	28.30 ^a	26.39 ^a	24.21 ^a	21.93 ^a	19.46 ^a

下,滴灌棉花地上部干物质与其氮浓度,通过对施氮水平进行方差分析,氮素是否制约棉花的正常生长发育。②对于不受氮素限制的施氮水平,采用其地上部干物质的平均值作为该采样日期的最大干物质。③对于不能满足棉花生长发育氮需求量的施氮水平,对其地上干物质与氮浓度值进行线性或者曲线拟合。④采样日的临界氮浓度为由步骤③的线性或曲线与横坐标上最大干物质的垂线交点的纵坐标。

2.3 滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线模型建立

由于新疆地区特殊的地理气候条件,滴灌棉田的种植密度比内地大,因此单位面积棉花的生物量较高。在出苗后第 60 ~ 125 天的采样时间里,滴灌

棉花的生物量范围在 3 ~ 22 t/hm²,全部大于 1 t/hm²;氮浓度在 17 ~ 35 g/kg 范围内。通过分析得出,滴灌棉花在 N0 和 N1 条件下为限氮水平,由临界氮浓度的确定条件和式(1)得出滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线(图 5)及模型,表 3 为模型参数。分析实测数据得出在不同施氮水平下,同样的地上生物量值其所对应氮浓度值不同,取每个采样日氮浓度的最大、最小实测值模拟得到其最高 ($N_{\max}$,%)、最低 ($N_{\min}$,%) 氮浓度稀释模型,结果同样也符合模型(1),这与薛晓萍等^[21,28]的结果相符,模型参数见表 3。由式(2)和(3)得到异速生长模型,2 个模型的参数见表 3。其中 10a 值与薛晓萍等^[21]和王子胜等^[22]的结果存在差异,这与新疆土壤类型、农田生态和水肥供应方式有关。

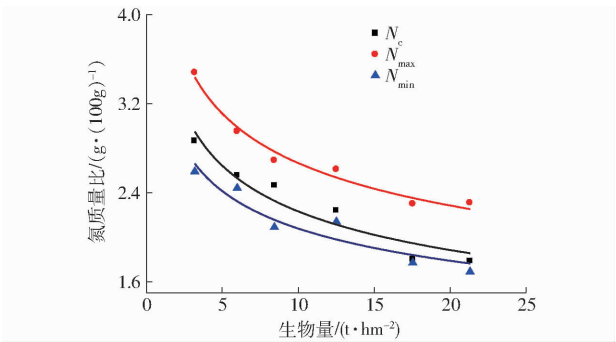


图 5 滴灌棉花氮浓度稀释曲线

Fig.5 Nitrogen concentration dilution curves for drip-irrigation cotton

表 3 滴灌棉花临界氮浓度稀释模型和异速生长模型的参数值

Tab.3 Parameters of nitrogen dilution model and allometric growth model of drip-irrigation cotton

类型	稀释曲线			类型	异速生长曲线		
	a	b	R ²		10a	1-b	R ²
$N_{\max}$	4.45	0.22	0.973	N_{uptmax}	44.51	0.78	0.954
$N_{\min}$	3.42	0.22	0.882	N_{uptmin}	34.21	0.78	0.897
N_c	3.91	0.24	0.906	N_{upte}	39.14	0.76	0.933

2.4 滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线模型的验证

采用独立试验数据对模型进行验证,研究选取 2016 年常规试验即施纯氮量为 300 kg/hm²的大田试验的全生育期的 6 次采样的单株滴灌棉花地上部生物量来验证模型。将独立试验的滴灌棉花地上部生物量(其中 6 月 28 日取样 3 株、7 月 6 日取样 3 株、7 月 15 日取样 3 株、7 月 28 日取样 3 株、8 月 12 日取样 3 株、9 月 3 日取样 4 株,共计 $n = 19$,)代入所得滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线模型中得到模拟值,然后做出模拟值和实测值的 1:1 直方图(图 6),通过 RMSE 和 n-RMSE 来评价模型的精准度。其中 RMSE 为 3.71 g/kg, n-RMSE 为 13.60%,

n-RMSE 为 [10%, 20%],说明模型的模拟性能较好,可以进一步用于滴灌棉花的营养诊断。

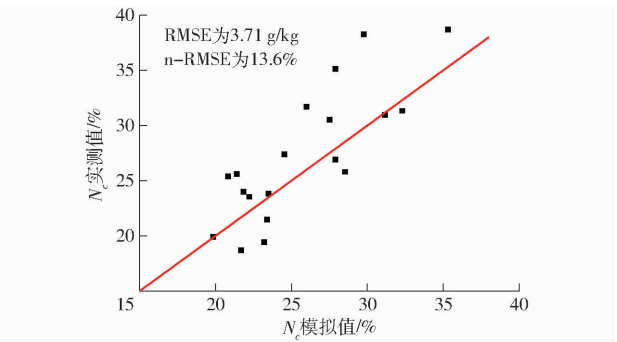


图 6 滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线模型的验证

Fig.6 Validation of critical nitrogen concentration dilution curve model for drip-irrigation cotton

2.5 基于滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线的氮营养诊断

本研究采用氮素营养指数作为判断滴灌棉花临界氮浓度稀释模型的依据。由式(4),通过氮营养指数得出滴灌棉花的营养状况。如图 7 所示,随着施氮水平的增加,氮营养指数不断提高。不同氮素处理的滴灌棉花的 NNI 值分别为: N0 (0.74 ~ 0.96)、N1 (0.84 ~ 0.97) 和 N2 (0.92 ~ 0.99) 水平在出苗后第 60 ~ 125 天内 NNI 值均小于 1,说明 N0、N1 和 N2 水平下,滴灌棉花的生长受到了氮素的限制, N3 (1.005 ~ 1.03) 和 N4 (1.06 ~ 1.12) 水平下 NNI 值均大于 1,说明在 N3、N4 水平下滴灌棉花属于过量氮素的施入,因此其适宜施氮量在 N2 和 N3 之间。

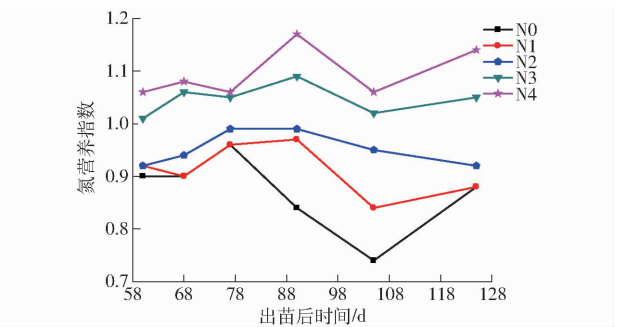


图 7 滴灌棉花氮营养指数动态变化

Fig.7 Dynamic changes of nitrogen nutrient index of drip-irrigation cotton

3 讨论

3.1 滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线的模型特征

本研究建立了新疆干旱棉区滴灌棉花除苗期之外全部生育期临界氮浓度稀释曲线模型,其模型在形式上与薛晓萍等^[21]、王子胜等^[22]针对长江流域、黄河流域和东北特早熟棉区建立的棉花临界氮浓度稀释模型一致,其采样时间(苗期后期)与薛晓萍

等^[21] (初花期) 的采样时间大致一样, 这说明临界氮浓度稀释模型的建立与棉花的生育期无明显的关系; 所得模型的 b 值(0.24) 与薛晓萍等^[21] 淹灌的模型 b 值(南京, 0.131; 安阳, 0.131) 差异较大, 与王子胜等^[22] 所建立的模型 b 值(0.252) 极为接近, 但 a 值(3.91) 与薛晓萍等^[21] (黄淮棉区, 2.858; 长江中下游棉区, 3.387) 和王子胜等^[22] (东北早熟棉区, 4.377) 的研究结果均有差异, 说明新疆滴灌棉的氮吸收能力比安阳和南京的棉花氮吸收能力强, 但是低于东北早熟棉区的氮吸收能力。其原因: ①新疆干旱棉区采用滴灌方式, 肥随水入, 每个生育期都会施入其所需的氮肥, 这与薛晓萍等^[21] 分 30%、70% 施入和王子胜等^[22] 将氮肥一次性施入不同, 说明施肥方式对棉花的氮素吸收能力有一定的影响。②新疆由于土壤类型和气候原因, 采用“密、早、矮、膜”的栽培方式, 其密度(19.6 万株/hm²) 为王子胜等^[22] 研究的最大密度(12 万株/hm²) 的 1.6 倍, 使得其在同一生育期的单位面积内生物量(表 1) 是东北早熟棉区 2 倍之多, 但是在所得单位生物量下, 所需的临界氮浓度(表 2) 比之较小, 说明新疆特有的高密度种植模式符合新疆滴灌棉花提高经济效益的需求。

3.2 基于临界氮浓度稀释曲线和 NNI 滴灌棉花氮营养诊断

基于临界氮浓度稀释模型得出的氮营养指数能诊断滴灌棉花不同生长阶段的氮营养状况, 还可以量化滴灌棉花氮素胁迫的程度。本研究通过滴灌棉花临界氮浓度稀释模型的建立得出, 新疆滴灌棉区

施氮量应不低于 240 kg/hm², 不高于 360 kg/hm²。通过对新疆滴灌棉区不同施氮水平的临界氮浓度稀释模型和氮营养指数的研究, 结合前人的研究, 结果表明不同棉区的氮肥施入量、施肥方式和种植模式都会影响棉花的氮素吸收水平, 进而对棉花的生物量、氮浓度和产量产生影响。新疆干旱棉区其特殊的滴灌模式和根据生育时期随水施入的施肥模式能满足干旱区棉花对于氮素养分的需要, 更有效地提高氮肥利用率, 降低过量施肥给土壤带来的压力, 进一步改善土壤生态环境。

4 结论

- (1) 以滴灌棉花、设置 5 个施氮水平进行试验, 探讨了施氮量对滴灌棉花氮素吸收分配规律的影响。滴灌棉花各器官含氮量的关系由大到小为叶片、蕾铃、茎, 叶片和茎的含氮量随生物进程而降低, 低于 360 kg/hm² 的施氮量对于叶片和茎的含氮量没有显著影响。
- (2) 在一定施氮水平下, 滴灌棉花的地上部生物量随施氮量的增加而增加, 氮浓度随植株生长发育的进行而降低; 建立和验证了滴灌棉花临界氮浓度稀释曲线模型, 结果表明, 滴灌棉花各生育期的最大生物量与氮浓度之间符合幂指数关系。
- (3) 基于临界氮浓度稀释曲线模型, 通过氮营养指数对新疆干旱区滴灌棉花进行了氮营养诊断, 结果显示, 在本试验条件下, 240 ~ 360 kg/hm² 为滴灌棉花的适宜施氮量。

参 考 文 献

1 山立, 邹宇锋. 我国旱区农业的地位和发展潜力及政策建议[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(4): 425-430.
SHAN Li, ZOU Yufeng. Status and potential for development of China's dryland agriculture and suggestions on its policy making [J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(4): 425-430. (in Chinese)

2 BRYE K R, NORMAN J M, GOWER S T, et al. Methodological limitations and N-budget differences among a restored tallgrass prairie and maize agroecosystems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 97(1): 181-198.

3 REN T, CHRISTIE P, WANG J, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(1): 25-33.

4 ZHENG H, LIU Y, QIN Y, et al. Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(1): 190-195.

5 HANSEN P M, SCHJOERRING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4): 542-553.

6 ULRICH A. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1952, 3(1): 207-228.

7 ZIADI N, BRASSARD M, BÉLANGER G, et al. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in eastern Canada [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(2): 271-276.

8 GREENWOOD D J, GASTAL F, LEMAIRE G, et al. Growth rate and % N of field grown crops: theory and experiments[J]. Annals of Botany, 1991, 67(2): 181-190.

9 EKBLADH G, WITTER E. Determination of the critical nitrogen concentration of white cabbage [J]. European Journal of Agronomy, 2010, 33(4): 276-284.

10 DEBAEKE P, VAN OOSTEROM E J, JUSTES E, et al. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower

(*Helianthus annuus* L.) [J]. Field Crops Research, 2012, 136: 76 – 84.

11 梁效贵, 张经廷, 周丽丽, 等. 华北地区夏玉米临界氮稀释曲线和氮营养指数研究[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 292 – 299.
LIANG Xiaogui, ZHANG Jingting, ZHOU Lili, et al. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index for summer maize in North China Plain [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 292 – 299. (in Chinese)

12 BEN Zhao. Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley[J]. Field Crops Research, 2014,160:64 – 72.

13 ATA-UI-KARIM S T, YAO X, LIU X, et al. Determination of critical nitrogen dilution curve based on stem dry matter in rice [J]. PLOS ONE, 2014, 9(8): e104540.

14 陈玲玲, 毛培胜, 王明亚, 等. 临界氮浓度稀释模型在牧草种子生产中的应用前景[J]. 草地学报, 2015, 23(2): 231 – 236.
CHEN Lingling, MAO Peisheng, WANG Mingya, et al. Application prospect of critical nitrogen concentration dilution model in grass seed prodution[J]. Acta Agrestia Sinical, 2015, 23(2): 231 – 236. (in Chinese)

15 杨慧, 曹红霞, 柳美玉, 等. 水氮耦合条件下番茄临界氮浓度模型的建立及氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1234 – 1242.
YANG Hui, CAO Hongxia, LIU Meiyu, et al. Simulation of critical nitrogen concentration and nitrogen nutrition index of tomato under different water and nitrogen conditions [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science ,2015, 21(5): 1234 – 1242. (in Chinese)

16 向友珍, 张富仓, 范军亮, 等. 基于临界氮浓度模型的日光温室甜椒氮营养诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17):89 – 97.
XIANG Youzhen, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Nutrition diagnosis for N in bell pepper based on critical nitrogen model in solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17):89 – 97. (in Chinese)

17 杜娅丹, 曹红霞, 谷晓博, 等. 基质栽培番茄临界氮浓度和氮营养指数研究[J]. 节水灌溉, 2016(9): 1 – 7.
DU Yadan, CAO Hongxia, GU Xiaobo, et al. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index for soilless tomato[J]. Water Saving Irrigation,2016(9): 1 – 7. (in Chinese)

18 YUE S, MENG Q, ZHAO R, et al. Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(2): 523 – 529.

19 ZIADI N, BÉLANGER G, CLAESSENS A, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat [J]. Agronomy Journal, 2010, 102(1): 241 – 250.

20 HU D, SUN Z, LI T, et al. Nitrogen nutrition index and its relationship with N use efficiency, tuber yield, radiation use efficiency, and leaf parameters in potatoes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(5): 1008 – 1016.

21 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[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1781 – 1791.
XUE Xiaoping, ZHOU Zhiguo, ZHANG Lijuan, et al. Development and application of critical nitrogen concentration dilution model for cotton after flowering[J]. Acta Ecologica Sinica,2006, 26(6): 1781 – 1791. (in Chinese)

22 王子胜, 金路路, 赵文青, 等. 东北特早熟棉区不同群体棉花氮临界浓度稀释模型的建立初探[J]. 棉花学报, 2012, 24(5): 427 – 434.
WANG Zisheng, JIN Lulu, ZHAO Wenqing, et al. Preliminary development and application of a critical nitrogen concentration dilution model for cotton grown in Northeast China[J]. Cotton Science , 2012, 24(5): 427 – 434. (in Chinese)

23 CHEN X, ZHANG F, CUI Z, et al. Critical grain and stover nitrogen concentrations at harvest for summer maize production in China[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(1): 289 – 295.

24 Ata-Ui-Karim S T, ZHU Y, YAO X, et al. Determination of critical nitrogen dilution curve based on leaf area index in rice[J]. Field Crops Research, 2014, 167: 76 – 85.

25 FIZGERALD G, RODRIGUEZ D, O’LEARY G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—the canopy chlorophyll content index (CCCI)[J]. Field Crops Research, 2010, 116(3): 318 – 324.

26 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? [J]. Field Crops Research, 2007,100(1): 91 – 106.

27 JUSTES E,MARY B, MEYNARD J M,et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops [J]. Annals of Botany,1994,74(4):397 – 407.

28 强生才, 张富仓, 向友珍, 等. 关中平原不同降雨年型夏玉米临界氮稀释曲线模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 168 – 175.
QIANG Shengcai, ZHANG Fucang, XIANG Youzhen, et al. Simulation and validation of critical nitrogen dilution curve for summer maize in Guanzhong Plain during different rainfall years [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 168 – 175. (in Chinese)