

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.01257

初花后土壤碱解氮浓度对棉花生物量和氮素累积特征的影响

宋为超 刘春雨 徐 娇 睢 宁 陈兵林* 周治国*

南京农业大学 / 农业部作物生理生态与生产管理重点实验室, 江苏南京 210095

摘 要: 试验于 2009—2010 年分别在江苏省棉花科技示范基地东台市(120°19' E, 32°52' N)和大丰市(120°28' E, 33°12' N)进行。设置 6 个水平(0、150、300、375、450 和 600 kg hm⁻²)施氮量, 研究土壤碱解氮浓度变化特征及对棉花生物量和氮素累积特征的影响。结果表明, 棉花初花后土壤碱解氮浓度的动态变化可用三次函数方程模拟, 棉花生物量、氮素累积动态可用 Logistic 方程拟合; 土壤碱解氮浓度快速下降期的平均速率、持续时间分别与棉株生物量、氮素快速累积期的最大相对累积速率、持续时间有较高的相关性; 在 375 kg hm⁻² 施氮量下, 土壤碱解氮浓度快速下降期具最佳平均速率和持续时间, 棉株生物量和氮素快速累积期有最优的累积特征值, 棉花具有最优的生物量、氮素累积特征值, 棉花产量最高、综合品质最优。高施氮量和低施氮量皆不利于棉花生物量和氮素的累积。因此, 适宜的施氮量及施氮运筹可调节棉花初花后土壤碱解氮浓度的动态变化, 优化棉花生物量和氮素的累积以及提高棉花产量和品质。

关键词: 棉花; 土壤碱解氮浓度; 生物量和氮素累积; 产量品质

Effects of Soil Alkaline Hydrolyzed Nitrogen Concentration on Biomass and Nitrogen Accumulation Eigenvalues of Cotton after Initial Flowering

SONG Wei-Chao, LIU Chun-Yu, XU Jiao, SUI Ning, CHEN Bing-Lin*, and ZHOU Zhi-Guo*

Nanjing Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology Ecology and Production Management, Ministry of Agriculture, Nanjing 210095, China

Abstract: Two field experiments were conducted at Dongtai City (120°19' E, 32°52' N) and Dafeng City (120°28' E, 33°12' N), Jiangsu Province, in 2009 and 2010, severally. Six nitrogen rates (0, 150, 300, 375, 450, and 600 kg ha⁻¹) were set to study the effects of soil alkaline hydrolyzed nitrogen concentration (SAHNC) on biomass and nitrogen accumulation of cotton. The result showed that, the change of SAHNC could be simulated with a cubic function, biomass and nitrogen accumulation of cotton could be simulated with logistic formula; average rate and duration of the SAHNC's speedy reducing had significant correlation with the biggest rate and duration of speedy accumulation period of cotton's biomass and nitrogen. Under the nitrogen applied level of 375 kg ha⁻¹, the SAHNC speedy reducing had optimal average rate and duration, cotton plant had optimal biomass and nitrogen accumulation eigenvalues, and had the highest fiber yield and optimal fiber qualities. Too high or too low nitrogen application was not benefit for biomass and nitrogen accumulation of cotton. Therefore, optimal nitrogen applied level and nitrogen applied strategy can adjust the dynamic change of SAHNC, and be beneficial for optimizing biomass and nitrogen accumulation eigenvalue and the lint yield and qualities after initial flowering.

Keywords: Cotton; Alkaline hydrolyzed nitrogen concentration; Biomass and nitrogen accumulation of cotton; Lint yield and qualities

棉花的生长发育受品种、生态环境和栽培措施等诸多因素的影响, 其中氮素是影响棉花产量品质的限制性因素之一^[1]。棉花生长期长, 氮素需求量大, 生产上多倾向于增施氮肥以获得高产^[2-3], 这不仅加

本研究由国家自然科学基金项目(30771279, 30971735), 国家公益性行业(农业)科研专项(3-5)和江苏省农业三新工程项目[SXGC(2012)390]资助。

* 通讯作者(Corresponding authors): 陈兵林, E-mail: blchen@njau.edu.cn; 周治国, E-mail: giscott@njau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: swcnjau@163.com

Received(收稿日期): 2012-11-12; Accepted(接受日期): 2013-03-11; Published online(网络出版日期): 2013-04-23.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130423.1838.018.html>

重了因氮肥的流失而造成的环境污染,还导致了棉花贪青晚熟,大幅度降低纤维品质^[4]。棉花生长所需的氮素来自土壤,土壤氮浓度显著影响棉花的生长^[5],研究土壤氮浓度的变化对棉花生物量和氮素累积的影响,在评价棉花氮素营养和合理施肥方面具有重要意义。

土壤速效氮主要来自土壤有机质的矿化和施入土壤肥料中的速效成分^[6],可以直接被植物根系吸收利用,是评价土壤养分的重要指标^[7-9]。但土壤中速效氮容易受降雨而淋洗,短时间内下降明显^[10],而碱解氮则相对稳定^[11]。碱解氮包括矿物态的氮和有机质中易分解、比较简单的有机态氮,是作物氮素营养的主要来源,能被作物直接吸收。土壤碱解氮主要集中在土壤表层,其浓度受施氮量的影响较大^[12-13],在棉花生育期内是动态变化的^[13]。生物量是棉花高产优质的基础^[14],而生物量的累积以养分的吸收为前提,养分的累积状况很大程度上决定了棉花产量和品质^[15-16],土壤养分含量的差异,导致棉花干物质和氮素累积量的不同^[17]。前人关于氮素对棉花生物量累积^[18-20]和氮素累积^[21-22]的影响研究较多,均指出棉花生物量和氮素累积随时间的变化符合 Logistic 模型。但是有关氮肥施入土壤后土壤碱解氮浓度的变化如何影响棉花生物量、氮素累积特征值尚未见报道。

本研究拟在长江下游棉区通过设置不同施氮量试验,研究土壤碱解氮浓度变化特征与施氮量的关系,以及与棉花生物量和氮素累积的关系,以期为棉花高产优质栽培合理施用氮肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2009 年在江苏省东台市(120°19' E, 32°52' N)和 2010 年在气候条件相似的江苏省大丰市(120°28' E, 33°12' N)棉花科技示范基地进行,供试品种为湘杂棉 8 号。土壤有机质分别为 26.10、11.70 g kg⁻¹,碱解氮分别含 52.95、63.78 mg kg⁻¹,速效磷分别含 43.22、42.50 mg kg⁻¹,速效钾分别含 131.54、230.00 mg kg⁻¹。

根据全国棉田施氮状况和当地施氮经验,本试验设 0、150、300、375、450、600 kg hm⁻² 6 个施氮量,重复 4 次,随机区组排列。总施氮量中,基肥占 30%,初花肥占 40%,盛花肥占 30%,两次花铃肥均穴施于棉花根部,氮肥种类为尿素;磷肥、钾肥全部基施,用量分别为 150、225 kg hm⁻²。小区长 10 m,

宽 4 m,4 行区,行距 1 m,株距 0.40 m,密度为每公顷 24 900 株。两试点均于 4 月 5 日左右播种育苗,5 月 20 日左右移栽,8 月 10 日左右打顶。田间管理均按当地高产栽培要求进行。

1.2 测定指标及方法

2009—2010 年分别于初花后 1、20、40、60、80 和 100 d 和 1、15、30、45、60、75 和 90 d 取棉株及土样。将棉株挖出,迅速带回室内将棉株分解为营养器官(茎、枝、叶、根)和生殖器官(蕾、花、铃),在 105℃ 杀青 30 min 后,70℃ 下烘至恒重,称量后粉碎。于棉花 0 行距(0R)、1/4 行距(1/4R)和 1/2 行距(1/2R)取 0~20 cm 土样,自然风干后 100 目过筛。用凯氏定氮法^[23]分别测定棉花生殖器官、营养器官全氮含量和土壤的碱解氮含量。

1.3 气象资料和数据统计分析

用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS11.5 统计软件对上述测量结果进行作图及统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤碱解氮浓度变化特征

不同施氮量下棉花初花后土壤碱解氮浓度的动态变化如图 1 所示。0 kg N hm⁻² 处理土壤碱解氮浓度一直呈下降的趋势,可以用二次函数模拟。150~600 kg N hm⁻² 处理土壤碱解氮浓度则呈先上升后迅速降低再略微上升的趋势,存在明显的快速下降期,可以用三次函数模拟。在初花后的各个时期,土壤碱解氮浓度随施氮量的增加呈增加的趋势,且距棉株越远,土壤碱解氮浓度越低。

根据 Logistic 方程求曲线特征值的方法,上述函数中,可求出土壤碱解氮浓度快速下降期的最高值(Y_1)和最低值(Y_2),及起(T_{\min})止(T_{\max})时间、持续时间($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$)及平均速率 $[\Delta V = (Y_1 - Y_2) / \Delta T]$ 。从表 1 可知,随施氮量的增加 T_{\min} 、 T_{\max} 、 ΔT 均呈先降后升的趋势, ΔV 随施氮量的增加呈先升后降的趋势,均在 375 kg hm⁻² 施氮量处出现拐点。可见,375 kg hm⁻² 的施氮量下具有土壤碱解氮浓度快速下降期的起止时间出现早、持续时间短、平均速率大的特点。

2.2 棉花生物量累积特征

棉株及生殖器官生物量累积变化可用 Logistic 方程进行拟合,其方程为 $W = W_m / (1 + ae^{bt})$ 。式中: W 为单株生物量累积量(g), W_m 为单株生物量累积理论最大值(g), t 为初花后天数(d), a 、 b 为棉花生长参数。对该方程求 1 阶、2 阶和 3 阶导数,可得生物量快速累积期的起始时间(t_1)、终止时间(t_2)、持续时间(T)、

最大相对累积速率(V_m)及其出现时间(T_m)。

$$t_1=\frac{1}{b}\ln\frac{2+\sqrt{3}}{a}$$
$$t_2=\frac{1}{b}\ln\frac{2-\sqrt{3}}{a}$$
$$T_m=-\frac{\ln a}{b}$$
$$V_m=-\frac{bW_m}{4}$$

由表 2 和表 3 可知, 生殖器官生物量和棉株总生物量的 t_1 、 t_2 、 T 、 T_m 随施氮量的增加呈先降后升的趋势, V_m 和 W_m 则呈先升后降的趋势, 均在 375 kg hm^{-2} 的施氮量下出现拐点。相对于对照, 375 kg hm^{-2} 施氮处理下总生物量 t_1 提前 8 d 左右, t_2 提前 10 d 左

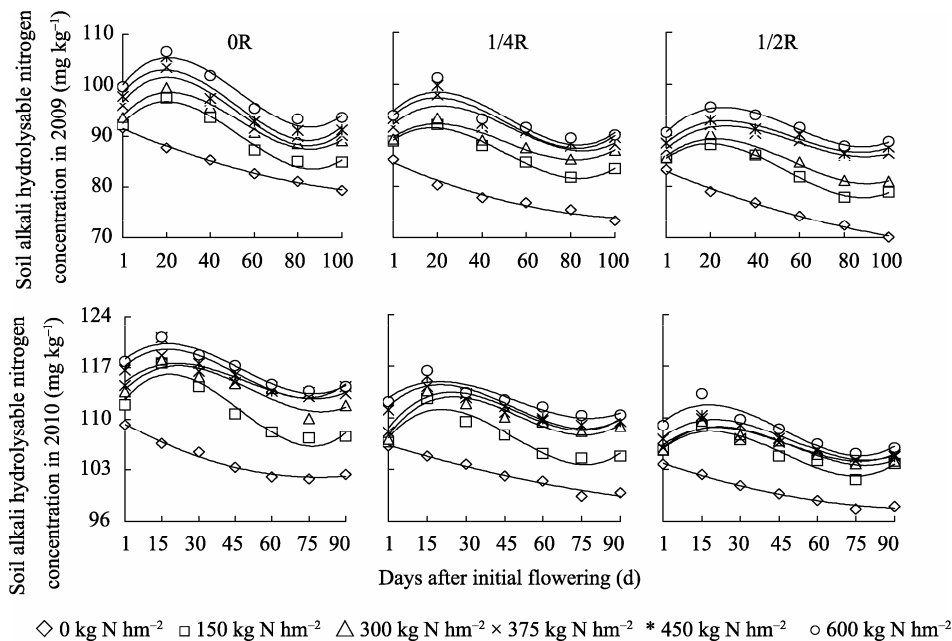


图 1 不同施氮量下初花后土壤碱解氮浓度随棉花生育进程的动态变化(2009–2010)

Fig. 1 Dynamic changes of soil alkaline hydrolyzed nitrogen concentration with cotton growing process under different nitrogen applied levels after initial flowering in 2009 and 2010

表 1 施氮量对棉花初花后土壤碱解氮浓度变化特征值的影响

Table 1 Effects of nitrogen applied levels on soil alkaline hydrolyzed nitrogen concentration eigenvalues of cotton after initial flowering												
施氮量 Nitrogen rate (kg hm ⁻²)	0R				1/4R				1/2R			
	T_{\min} (d)	T_{\max} (d)	ΔT (d)	ΔV (mg d ⁻¹)	T_{\min} (d)	T_{\max} (d)	ΔT (d)	ΔV (mg d ⁻¹)	T_{\min} (d)	T_{\max} (d)	ΔT (d)	ΔV (mg d ⁻¹)
2009												
0	1.0	100.0	99.0	0.124	1.0	100.0	99.0	0.119	1.0	100.0	99.0	0.107
150	20.2	74.5	54.3	0.183	21.9	78.6	56.7	0.163	22.4	81.3	58.9	0.142
300	18.6	70.8	52.2	0.207	19.8	75.7	55.9	0.187	20.5	76.9	56.4	0.154
375	16.4	68.2	51.8	0.276	17.3	71.5	54.2	0.223	17.8	73.1	55.3	0.186
450	17.6	69.6	52.0	0.243	18.2	72.7	54.5	0.208	18.8	74.7	55.9	0.163
600	18.2	71.5	53.3	0.221	19.6	75.3	55.7	0.197	20.3	76.4	56.1	0.157
2010												
0	1.0	99.0	89.0	0.098	1.0	99.0	89.0	0.092	1.0	99.0	89.0	0.083
150	17.1	86.0	68.9	0.136	18.6	87.8	69.2	0.123	19.4	89.7	70.3	0.116
300	15.9	82.2	66.3	0.154	17.2	85.6	68.4	0.148	17.5	86.7	69.2	0.134
375	14.7	76.1	61.4	0.184	15.8	79.4	63.6	0.163	16.5	82.2	65.7	0.151
450	15.5	78.0	62.5	0.162	16.5	79.3	62.8	0.156	16.9	81.3	64.4	0.144
600	16.3	81.0	64.7	0.156	17.1	82.3	65.2	0.152	18.2	85.0	66.8	0.136

T_{\min} : 土壤碱解氮浓度快速下降期的起始时间; T_{\max} : 终止时间; ΔT : 持续时间; ΔV : 平均速率。
 T_{\min} : starting day; T_{\max} : terminating day; ΔT : duration; ΔV : average rate for the soil alkaline hydrolyzed nitrogen concentration reducing, rapidly.

表 2 施氮量对棉花初花后生殖器官生物量累积特征值的影响

Table 2 Effects of nitrogen applied levels on the biomass accumulation eigenvalues of productive organs of cotton after initial flowering

施氮量 Nitrogen rate (kg hm ⁻²)	方程 Equation	R ²	PT ₁ (d)	PT ₂ (d)	PT (d)	PV _m (g d ⁻¹)	PT _m (d)
2009							
0	$W=276.630/(1+546.0879e^{-0.1056t})$	0.9769**	47.21	72.15	24.94	7.30	59.69
150	$W=292.143/(1+513.8428e^{-0.1065t})$	0.9665**	46.24	70.97	24.73	7.78	58.61
300	$W=303.090/(1+463.8034e^{-0.1075t})$	0.9746**	44.86	69.36	24.50	8.15	57.11
375	$W=326.077/(1+329.7005e^{-0.1087t})$	0.9958**	41.23	65.45	24.23	8.86	53.06
450	$W=298.589/(1+439.3633e^{-0.1076t})$	0.9877**	44.32	68.79	24.48	8.03	56.56
600	$W=283.420/(1+447.9094e^{-0.1059t})$	0.9787**	45.21	70.08	24.87	7.50	57.64
2010							
0	$W=274.570/(1+567.8934e^{-0.1008t})$	0.9493**	49.85	75.98	26.13	6.92	62.92
150	$W=278.294/(1+514.8596e^{-0.1049t})$	0.9767**	46.97	72.07	25.11	7.30	59.52
300	$W=283.210/(1+458.3992e^{-0.1066t})$	0.9476**	45.13	69.84	24.71	7.55	57.48
375	$W=317.813/(1+393.5108e^{-0.1102t})$	0.9764**	42.27	66.17	23.90	8.76	53.99
450	$W=286.802/(1+440.1485e^{-0.1078t})$	0.9841**	44.25	68.68	24.43	7.73	56.47
600	$W=283.752/(1+467.6019e^{-0.1054t})$	0.9729**	45.83	70.82	24.99	7.48	58.33

PT₁: 生殖器官生物量快速累积期的起始时间; PT₂: 终止时间; PT: 持续期; PV_m: 最大相对累积速率; PT_m: 最大相对累积速率出现时间(2009 年, $n=6$, $R^2_{0.05}=0.6584$, $R^2_{0.01}=0.8413$; 2010 年: $n=7$, $R^2_{0.05}=0.5693$, $R^2_{0.01}=0.7653$)。

PT₁: starting day; PT₂: terminating day; PT: duration; PV_m: maximum relative accumulation rate; PT_m: starting day for the maximum relative accumulation rate of the period of biomass rapidly accumulated in productive organs. (2009, $n=6$, $R^2_{0.05}=0.6584$, $R^2_{0.01}=0.8413$; 2010, $n=7$, $R^2_{0.05}=0.5693$, $R^2_{0.01}=0.7653$).

表 3 施氮量对棉花初花后总生物量累积特征值的影响

Table 3 Effects of nitrogen applied levels on the total biomass accumulation eigenvalues of cotton after initial flowering

施氮量 Nitrogen rate (kg hm ⁻²)	方程 Equation	R ²	CT ₁ (d)	CT ₂ (d)	CT (d)	CV _m (g d ⁻¹)	CT _m (d)
2009							
0	$W=487.467/(1+36.1512e^{-0.0794t})$	0.9647**	28.60	61.77	33.17	9.68	45.19
150	$W=549.506/(1+32.1634e^{-0.0811t})$	0.9753**	26.56	59.03	32.47	11.14	42.80
300	$W=585.658/(1+28.6293e^{-0.0827t})$	0.9707**	24.64	56.48	31.85	12.11	40.56
375	$W=604.499/(1+21.7170e^{-0.0841t})$	0.9461**	20.94	52.26	31.32	12.71	36.60
450	$W=577.330/(1+24.5304e^{-0.0812t})$	0.9232**	23.19	55.62	32.43	11.72	39.41
600	$W=542.864/(1+28.2630e^{-0.0781t})$	0.9783**	25.92	59.65	33.72	10.60	42.79
2010							
0	$W=529.857/(1+42.4966e^{-0.0754t})$	0.9774**	32.26	67.19	34.93	9.99	49.73
150	$W=551.216/(1+39.3062e^{-0.0765t})$	0.9765**	30.78	65.20	34.43	10.54	47.99
300	$W=576.728/(1+36.4647e^{-0.0789t})$	0.9624**	28.89	62.27	33.38	11.38	45.58
375	$W=610.321/(1+27.7365e^{-0.0812t})$	0.9805**	24.70	57.14	32.43	12.39	40.92
450	$W=575.580/(1+35.4583e^{-0.0798t})$	0.9701**	28.21	61.22	33.00	11.48	44.72
600	$W=556.022/(1+36.1480e^{-0.0786t})$	0.9638**	28.89	62.40	33.51	10.93	45.64

CT₁: 棉株生物量快速累积期的起始时间; CT₂: 终止时间; CT: 持续期; CV_m: 最大相对累积速率; CT_m: 最大相对累积速率出现时间(2009 年, $n=6$, $R^2_{0.05}=0.6584$, $R^2_{0.01}=0.8413$; 2010 年: $n=7$, $R^2_{0.05}=0.5693$, $R^2_{0.01}=0.7653$)。

CT₁: starting day; CT₂: terminating day; CT: duration; CV_m: maximum relative accumulation rate; CT_m: starting day for the maximum relative accumulation rate of the period of total cotton biomass accumulated rapidly. (2009, $n=6$, $R^2_{0.05}=0.6584$, $R^2_{0.01}=0.8413$; 2010, $n=7$, $R^2_{0.05}=0.5693$, $R^2_{0.01}=0.7653$).

右, T 减少 2 d 左右, V_m 提高 20%。可知, 375 kg hm⁻² 的施氮量下具有生物量快速累积期起止时间早、持

续时间短、最大相对生长速率大及出现时间早、氮素累积理论最大值大的特点。

2.3 棉花氮素累积特征

不同施氮量下棉株氮素累积变化亦符合“S”型曲线, 利用 Logistic 方程对其拟合及求导, 同样可得到相应曲线的特征值, 即氮素累积量理论最大值

(NW_m , mg 株^{-1})、快速累积期的起(Nt_1)止(Nt_2)时间、持续时间(NT)最大相对生长速率(PNV_m)及其出现时间(NT_m)。由表 4 和图 5 可知, 生殖器官氮素累积和整株氮素累积的 Nt_1 、 Nt_2 、 NT 、 NT_m 随施氮量的增

表4 施氮量对棉花初花后生殖器官氮素累积特征值的影响

Table 4 Effects of nitrogen applied levels on the nitrogen accumulation eigenvalues of productive organs of cotton after initial flowering

施氮量 Nitrogen rate (kg hm^{-2})	方程 Equation	R^2	PNt_1 (d)	PNt_2 (d)	PNT (d)	PNV_m (mg d^{-1})	PNT_m (d)
2009							
0	$W=2243.289/(1+286.8550e^{-0.0916t})$	0.9937**	47.40	76.15	28.75	51.37	61.78
150	$W=2445.232/(1+224.0495e^{-0.0921t})$	0.9927**	44.46	73.06	28.60	56.30	58.76
300	$W=2485.432/(1+154.9417e^{-0.0956t})$	0.9855**	38.98	66.53	27.55	59.40	52.75
375	$W=2659.481/(1+83.6585e^{-0.0979t})$	0.9838**	31.77	58.67	26.90	65.09	45.22
450	$W=2540.613/(1+96.0924e^{-0.0958t})$	0.9758**	33.91	61.40	27.49	60.85	47.65
600	$W=2389.331/(1+105.8759e^{-0.092t})$	0.9742**	36.01	64.36	28.35	55.49	50.19
2010							
0	$W=2462.583/(1+114.6767e^{-0.0809t})$	0.9854**	42.34	74.89	32.56	49.81	58.62
150	$W=3275.233/(1+84.6041e^{-0.0832t})$	0.9961**	37.51	69.17	31.66	68.12	53.34
300	$W=3655.430/(1+70.7461e^{-0.0855t})$	0.9846**	34.41	65.21	30.80	78.13	49.81
375	$W=4053.652/(1+52.4108e^{-0.0887t})$	0.9857**	29.79	59.48	29.69	89.89	44.63
450	$W=3823.072/(1+61.9080e^{-0.0854t})$	0.9862**	32.89	63.73	30.84	81.62	48.31
600	$W=3361.580/(1+68.1546e^{-0.0847t})$	0.9952**	34.30	65.39	31.09	71.18	49.84

PNt_1 : 生殖器官氮素快速累积期的起始时间; PNt_2 : 终止时间; PNT : 持续期; PNV_m : 最大相对累积速率; PNT_m : 最大相对累积速率出现时间(2009 年, $n=6$, $R^2_{0.05}=0.6584$, $R^2_{0.01}=0.8413$; 2010 年: $n=7$, $R^2_{0.05}=0.5693$, $R^2_{0.01}=0.7653$)。

PNt_1 : starting day; PNt_2 : terminating day; PNT : duration; PNV_m : maximum relative accumulation rate; PNT_m : starting day for the maximum relative accumulation rate of the period of nitrogen rapidly accumulated in productive organs. (2009, $n=6$, $R^2_{0.05}=0.6584$, $R^2_{0.01}=0.8413$; 2010, $n=7$, $R^2_{0.05}=0.5693$, $R^2_{0.01}=0.7653$)。

表5 施氮量对棉花初花后总氮素累积特征值的影响

Table 5 Effects of nitrogen applied levels on the total nitrogen accumulation eigenvalues of cotton after initial flowering

施氮量 Nitrogen rate (kg hm^{-2})	方程 Equation	R^2	CNt_1 (d)	CNt_2 (d)	CNT (d)	CNV_m (mg d^{-1})	CNT_m (d)
2009							
0	$W=4766.211/(1+24.7610e^{-0.0793t})$	0.9875**	23.86	57.07	33.21	94.49	40.47
150	$W=4911.823/(1+21.5066e^{-0.0822t})$	0.9825**	21.31	53.35	32.04	100.94	37.33
300	$W=5057.018/(1+18.4074e^{-0.0912t})$	0.9801**	17.50	46.38	28.88	115.30	31.94
375	$W=5284.594/(1+14.3593e^{-0.0989t})$	0.9848**	13.62	40.25	26.63	130.66	26.94
450	$W=5171.672/(1+17.5182e^{-0.0931t})$	0.9830**	16.61	44.90	28.29	120.37	30.75
600	$W=5053.905/(1+18.3834e^{-0.0874t})$	0.9871**	18.24	48.38	30.13	110.43	33.31
2010							
0	$W=5264.762/(1+19.0815e^{-0.0691t})$	0.9898**	23.61	61.73	38.11	118.59	42.67
150	$W=6272.356/(1+16.1964e^{-0.0726t})$	0.9941**	20.22	56.50	36.28	139.25	38.36
300	$W=6308.264/(1+14.8006e^{-0.0765t})$	0.9875**	18.01	52.44	34.43	147.42	35.22
375	$W=6642.506/(1+11.0198e^{-0.0832t})$	0.9882**	13.01	44.67	31.66	167.28	28.84
450	$W=6442.830/(1+12.9804e^{-0.0782t})$	0.9821**	15.94	49.62	33.68	153.33	32.78
600	$W=6339.049/(1+13.6014e^{-0.0746t})$	0.9720**	17.34	52.64	35.30	144.33	34.99

CNt_1 : 棉株总氮素快速累积期的起始时间; CNt_2 : 终止时间; CNT : 持续期; CNV_m : 最大相对累积速率; CNT_m : 最大相对累积速率出现时间(2009 年, $n=6$, $R^2_{0.05}=0.6584$, $R^2_{0.01}=0.8413$; 2010 年: $n=7$, $R^2_{0.05}=0.5693$, $R^2_{0.01}=0.7653$)。

CNt_1 : starting day; CNt_2 : terminating day; CNT : duration; CNV_m : maximum relative accumulation rate; CNT_m : starting day for the maximum relative accumulation rate of the period of total nitrogen accumulated rapidly. (2009, $n=6$, $R^2_{0.05}=0.6584$, $R^2_{0.01}=0.8413$; 2010, $n=7$, $R^2_{0.05}=0.5693$, $R^2_{0.01}=0.7653$)。

加呈先降后升的趋势, NV_m 和氮素理论最大值则呈先升后降的趋势, 均在 375 kg hm^{-2} 的施氮量下出现拐点。相对于对照, 375 kg hm^{-2} 的施氮量下总氮累积量 Nt_1 提前 10 d 左右, Nt_2 提前 17 d 左右, NT 减少 7 d 左右, NV_m 提高 40%, 具有氮素快速累积期起始时间早、持续时间短、最大相对累积速率大、最大相对累积速率出现时间早、累积理论最大值大的特点。

2.4 土壤碱解氮浓度变化特征值与棉花生物量、氮素累积特征值的相关性分析

表 6 和表 7 表明, ΔV 与 t_1 、 Nt_1 、 t_2 、 Nt_2 、 T 、 NT 、 T_m 、 NT_m 呈显著负相关, 与 V_m 、 NV_m 呈显著正相关。 T_{\min} 、 T_{\max} 、 ΔT 与 t_1 、 Nt_1 、 t_2 、 Nt_2 、 T 、 NT 、 T_m 、 NT_m 呈显著正相关, 与 V_m 、 NV_m 呈显著负相关。说明, 土壤碱解氮浓度快速下降期的起始时间早, 下降速率快, 持续时间短, 则棉花生物量和氮素快速累积期起始时间可以提前, 持续时间可以缩短, 最大相对累积速率可以升高, 就有利于棉花生物量和氮素累积在短时间内完成。

由表 2 至表 5 可知, 在 375 kg hm^{-2} 的施氮量下, 棉花有最优的生物量和氮素累积特征值。 ΔV 、 ΔT 分别与 V_m 、 NV_m 、 T 、 NT 有较高的相关性, 它们之间可用一次函数拟合(拟合方程的 R^2 均达到显著水平, 图略), 根据此函数关系可求出棉花最优的生物量和氮素累积特征值时的 ΔV 值和 ΔT 值, 2009 年 0R、1/4R、1/2R 处最有利于棉花生物量、氮素累积的 ΔV 、 ΔT 值分别为 0.273 mg d^{-1} 和 51.4 d、 0.228 mg d^{-1} 和 54.6 d、 0.186 mg d^{-1} 和 55.2 d, 2010 年分别为 0.188 mg d^{-1} 和 62.1 d、 0.176 mg d^{-1} 和 62.8 d、 0.163 mg d^{-1} 和 64.8 d, 可以看出, 随施肥点距离的增加, ΔV 呈递减趋势, ΔT 呈递增趋势。

2.5 施氮量对棉花产量和品质的影响

随着施氮量的增加, 皮棉产量呈先升后降的趋势(表 8), 在 375 kg hm^{-2} 施氮量下, 棉花产量最高, 较 0 kg hm^{-2} 施氮处理产量增 51% (2009 年) 和 27% (2010 年)。纤维马克隆值、比强度随着施氮量增加均呈先升后降的趋势, 都在 375 kg hm^{-2} 施氮量下有最优值。施氮量对纤维长度无显著影响。

3 讨论

不同施氮量下, 棉花初花后土壤碱解氮浓度的动态变化可用三次函数来模拟, 且存在明显的快速下降期。适氮(375 kg hm^{-2})条件下, 土壤碱解氮浓度

快速下降期的起止时间最早、持续时间最短、下降的速率最大。而高氮(600 kg hm^{-2})和低氮(0 kg hm^{-2})下, 土壤碱解氮浓度快速下降期的起止时间出现的晚、持续时间延长、下降的速率较小, 说明在高氮和低氮条件下, 土壤碱解氮的吸收利用出现滞后性。0R、1/4R 和 1/2R 处的土壤碱解氮浓度动态变化规律相同。生物量是作物高产优质的基础, 生物量和氮素的累积以养分的吸收为前提^[14-15], 土壤氮的充足供应对棉花生物量和氮素的累积至关重要。和适氮条件相比, 高氮条件下棉花生殖器官生物量、氮素累积理论最大值 2009 年分别下降了 13.08%、10.16%, 2010 年分别下降了 11.81%、17.07%, 低氮条件下两年分别下降了 15.16%、15.65% 和 13.61%、39.25%; 高氮条件下起始时间 2009 年分别推迟了 3.98、4.24 d, 2010 年分别推迟了 3.56、4.51 d, 低氮条件下 2 年分别推迟了 5.98、15.63 d 和 7.58、12.55 d; 高氮条件下持续时间 2009 年分别延长了 2.27、1.40 d, 2010 年分别延长了 1.00、1.50 d, 低氮条件下两年分别延长了 0.71、1.85 d 和 2.23、2.87 d; 高氮条件下最大累积速率 2009 年分别降低了 1.36 g d^{-1} 、 9.60 mg d^{-1} , 2010 年分别降低了 1.28 g d^{-1} 、 18.71 mg d^{-1} , 低氮条件下两年分别降低了 1.56 g d^{-1} 、 13.72 mg d^{-1} 和 1.84 g d^{-1} 、 40.08 mg d^{-1} 。棉花总生物量和氮素累积动态规律同生殖器官。这说明高氮和低氮条件下, 棉株生殖器官生物量和氮素累积的起始时间晚、持续时间长、最大累积速率小, 不利于棉株生物量和氮素的累积在短时间内完成, 进而影响棉花的产量和品质。而 375 kg hm^{-2} 施氮量处理棉株生物量和氮素快速累积期的起始时间较早, 持续时间较短, 最大累积速率较大, 最大累积速率出现的时间较早, 棉花产量最高, 综合纤维品质就最优。可见, 保持适宜的土壤碱解氮浓度有助于棉花生物量、氮素的快速累积以及产量和品质的提高。

氮对棉花生物量、氮素的累积有很大的调节作用, 已有研究指出^[5,13], 在适氮条件下, 生物量和氮素快速累积期持续时间缩短、最大累积速率出现时间提前、理论最大累积量和最大累积速率增大。棉纤维来源于棉花生殖器官, 因此要保证棉花产量和品质, 就必须保证棉花生殖器官的发育。本研究表明, 棉花生殖器官生物量、氮素快速累积期的持续时间、最大相对累积速率与土壤碱解氮浓度快速下降期的持续时间、下降速率皆呈显著正相关, 说明初花后棉花生殖器官生物量、氮素快速累积期的特

表6 棉花生物量累积特征值与土壤碱解氮浓度变化特征值的相关性

Table 6 Correlation coefficients between the soil alkaline hydrolyzed nitrogen concentration eigenvalues and the biomass accumulation eigenvalues of cotton

行距 Row distance	土壤碱解氮变化特征值 Eigenvalues of SAHNC	生殖器官生物量累积特征值 Biomass accumulation eigenvalues of productive organs					总生物量累积特征值 Total biomass accumulation eigenvalues of cotton				
		Pt_1	Pt_2	PT	PV_m	PT_m	Ct_1	Ct_2	CT	CV_m	CT_m
0R	T_{\min}	0.646*	0.674*	0.684*	-0.672*	0.686*	0.692*	0.687*	0.649*	-0.635*	0.643*
	T_{\max}	0.777**	0.774**	0.717*	-0.726**	0.767**	0.814**	0.802**	0.703*	-0.809**	0.809**
	ΔT	0.681*	0.677*	0.639*	-0.634*	0.670*	0.699*	0.686*	0.691*	-0.764**	0.693*
	ΔV	-0.799**	-0.784**	-0.647*	0.774**	-0.788**	-0.945**	-0.925**	-0.779**	0.747**	-0.937**
1/4R	T_{\min}	0.686*	0.643*	0.673*	-0.653*	0.654*	0.679*	0.683*	0.637*	-0.633*	0.690*
	T_{\max}	0.788**	0.783**	0.735**	-0.723*	0.777**	0.814**	0.800**	0.695*	-0.806**	0.807**
	ΔT	0.676*	0.671*	0.659*	-0.645*	0.664*	0.678*	0.664*	0.678*	-0.754**	0.672*
	ΔV	-0.807**	-0.797**	-0.708*	0.746**	-0.795**	-0.931**	-0.911**	-0.780**	0.706*	-0.921**
1/2R	T_{\min}	0.667*	0.659*	0.657*	-0.679*	0.685*	0.678*	0.678*	0.641*	-0.650*	0.683*
	T_{\max}	0.782**	0.775**	0.698*	-0.716*	0.770**	0.829**	0.813**	0.701*	-0.797**	0.821**
	ΔT	0.669*	0.663*	0.596*	-0.657*	0.657*	0.682*	0.666*	0.732**	-0.747**	0.674*
	ΔV	-0.906**	-0.900**	-0.819**	0.828**	-0.898**	-0.921**	-0.913**	-0.821**	0.832**	-0.917**

*和**表示相关的显著性分别达 0.05 和 0.01 水平 ($n=10$, $R_{0.05}=0.632$, $R_{0.01}=0.725$)。* and ** indicate significance of correlations at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表7 棉花氮素累积特征值与土壤碱解氮浓度变化特征值的相关性

Table 7 Correlation between the soil alkaline hydrolyzed nitrogen concentration eigenvalues and the nitrogen accumulation eigenvalues of cotton

行距 Row distance	土壤碱解氮变化特征值 Eigenvalues of SAHNC	生殖器官氮累积特征值 Nitrogen accumulation eigenvalues of productive organs					总氮累积特征值 Total nitrogen accumulation eigenvalues of cotton				
		PNt_1	PNt_2	PNT	PNV_m	PNT_m	CNt_1	CNT_2	CNT	CNV_m	CNT_m
0R	T_{\min}	0.681*	0.664*	0.699*	-0.661*	0.674*	0.665*	0.662*	0.685*	-0.680*	0.674*
	T_{\max}	0.648*	0.775**	0.653*	-0.869**	0.703*	0.766**	0.876**	0.790**	-0.662*	0.859**
	ΔT	0.696*	0.724*	0.678*	-0.800**	0.671*	0.713*	0.780**	0.672*	-0.661*	0.776**
	ΔV	-0.679*	-0.739**	-0.843**	0.961**	-0.634*	-0.691*	-0.920**	-0.942**	0.667*	-0.860**
1/4R	T_{\min}	0.649*	0.687*	0.655*	-0.683*	0.675*	0.691*	0.695*	0.682*	-0.680*	0.660*
	T_{\max}	0.638*	0.798**	0.637*	-0.869**	0.731**	0.786**	0.884**	0.783**	-0.681*	0.871**
	ΔT	0.661*	0.728**	0.698*	-0.785**	0.681*	0.717*	0.769**	0.647*	-0.648*	0.770**
	ΔV	-0.688*	-0.758**	-0.832**	0.929**	-0.655*	-0.714*	-0.927**	-0.932**	0.685*	-0.873**
1/2R	T_{\min}	0.659*	0.691*	0.655*	-0.677*	0.684*	0.695*	0.694*	0.679*	-0.677*	0.660*
	T_{\max}	0.640*	0.792**	0.669*	-0.888**	0.719**	0.771**	0.892**	0.812**	-0.657*	0.871**
	ΔT	0.674*	0.726**	0.671*	-0.792**	0.676*	0.709*	0.770**	0.658*	-0.656*	0.768**
	ΔV	-0.638*	-0.829**	-0.761**	0.922**	-0.742**	-0.821**	-0.962**	-0.887**	0.723*	-0.935**

*和**表示相关的显著性分别达 0.05 和 0.01 水平 ($n=10$, $R_{0.05}=0.632$, $R_{0.01}=0.725$)。* and ** indicate significance of correlations at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表8 施氮量对棉花纤维产量和品质的影响
Table 8 Effects of nitrogen rates on fiber yield and fiber qualities

年份 Year	施氮量 Nitrogen rate (kg hm ⁻²)	皮棉产量 Lint yield (kg hm ⁻²)	纤维长度 Fiber length (mm)	纤维马克隆值 Micronaire	纤维比强度 Strength (cN tex ⁻¹)
2009	0	1007.4 e	29.9 a	4.38 b	28.1 c
	150	1188.5 d	30.3 a	4.48 b	29.1 b
	300	1432.8 b	30.5 a	4.69 ab	30.2 ab
	375	1668.9 a	30.6 a	4.82 a	31.6 a
	450	1445.8 b	30.3 a	4.70 ab	30.4 ab
	600	1314.7 c	30.3 a	4.58 ab	29.7 bc
2010	0	1191.2 e	30.3 a	3.80 b	27.2 b
	150	1295.4 de	30.4 a	4.00 ab	27.8 ab
	300	1559.3 b	30.7 a	4.00 ab	29.0 a
	375	1708.6 a	30.7 a	4.20 a	29.1 a
	450	1490.4 c	30.5 a	3.90 ab	27.6 ab
	600	1336.3 d	30.3 a	3.90 b	28.5 ab

同一列数据后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Values followed by different letters with a column are significantly different at the 0.05 probability level.

征值与土壤碱解氮浓度快速下降期的特征值具有显著的相关性, 即当土壤碱解氮浓度较低或较高时, 土壤碱解氮浓度快速下降期持续时间延长、平均速率下降, 棉花生殖器官生物量、氮素快速累积的持续期也相应延长, 最大相对累积速率也相应降低, 棉株表现为生长缓慢或旺长。因此棉花初花后适宜的土壤碱解氮浓度有助于协调土壤碱解氮浓度快速下降期的下降速率及持续时间, 有利于棉花生殖器官生物量、氮素的快速协调累积。

2010 年土壤基础碱解氮含量略高于 2009 年, 相同施氮量下 2010 年土壤碱解氮浓度快速下降期的平均速率略低于 2009 年、持续时间略长于 2009 年, 并且两年土壤碱解氮浓度快速下降期的特征值与 375 kg hm⁻² 施氮处理非常接近。可见, 本试验条件下, 375 kg hm⁻² 施氮量下棉花初花后土壤碱解氮浓度快速下降期具有最适的平均速率及持续时间。

施肥方式也会影响棉花的生长^[24]。本研究采用生产上育苗移栽棉最常用的花铃肥两次分施方式, 对于早熟直播棉花铃肥一次施用或一次全部基施是否也有类似的结论, 有待于进一步深入研究。

4 结论

棉花初花至盛絮期土壤碱解氮浓度存在快速下降期, 棉株生物量和氮素累积动态存在快速累积期。土壤碱解氮浓度过低或过高, 令其快速下降期的平均速率降低及持续时间延长。棉株生物量、氮素快速累积期的特征值与土壤碱解氮浓度快速下降

期的特征值具有较高的相关性。棉株生物量和氮素快速累积期所具有的最佳的特征值与 375 kg hm⁻² 施氮量下土壤碱解氮浓度快速下降期的特征值非常接近。棉花初花后保持适宜的土壤碱解氮浓度和特征值, 有利于棉花生物量和氮素的快速累积及产量和品质的提高。

References

- [1] Tewolde H, Fernandez C J, Foss D C. Maturity and lint yield of nitrogen and phosphorus deficient pima cotton. *Agron J*, 1994, 86: 303–309
- [2] Boquet D J, Breitenbeck G A. Nitrogen rate effect on partitioning of nitrogen and dry matter by cotton. *Crop Sci*, 2000, 40: 1685–1693
- [3] Blaise D, Singh J V, Bonde A N, Tekale K U, Mayee C D. Effects of farmyard manure and fertilizers on yield, fiber quality and nutrient balance of rainfed cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Biores Technol*, 2005, 96: 345–349
- [4] Rochester I J, Peoples M B, Constable G A. Estimation of the N fertilizer requirement of cotton grown after legume crops. *Field Crops Res*, 2001, 70: 43–53
- [5] Xue X-P(薛晓萍), Guo W-Q(郭文琦), Wang Y-L(王以琳), Zhang L-J(张丽娟), Zhou Z-G(周治国). Research on dynamic increase characteristics of dry matter of cotton at different nitrogen levels. *Cotton Sci* (棉花学报), 2006, 18(6): 323–326 (in Chinese with English abstract)
- [6] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). Soil Physics and Chemistry Analysis (土壤理化分析). Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publisher, 1978 (in Chinese)
- [7] Kersebaum K C, Lorenz K, Reuter H I, Schwarz J, Wegehenkela

- M, Wendroth O. Operational use of agro-meteorological data and GIS to derive site specific nitrogen fertilizer recommendations based on the simulation of soil and crop growth processes. *Physics Chem Earth*, 2005, 30: 59–67
- [8] Malhi S S, Harapiak J T, Nyborg M, Gregorich E G, Monreal C M. Light fraction organic N, ammonium, nitrate and total N in a thin black chernozemic soil under brome grass after 27 annual applications of different N rates. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2003, 65: 201–210
- [9] Malhi S S, Brandt S A, Ulrich D, Lemke R, Gill K S. Accumulation in the soil profile under various alternative cropping system. *J Plant Nutr*, 2002, 25: 2499–2520
- [10] Zhang Q-L(张庆利), Zhang M(张民), Tian W-B(田维彬). Leaching characteristics of controlled release and common no nitrogen fertilizers and their effects on soil and ground water quality. *Soil Environ Sci (土壤与环境)*, 2001, 10(2): 98–103 (in Chinese with English abstract)
- [11] Wang Y-J(王艳杰), Fu H(付桦). The relationships among organic matter, total nitrogen and alkaline nitrogen of soil in Wuling Mountain. *J Agro-Environ Sci (农业环境科学学报)*, 2005, 24(suppl-1): 85–90 (in Chinese with English abstract)
- [12] Shi C-J(施春健), Zhuang Q-L(庄秋丽), Li Q(李琪), Liang W-J(梁文举), Jiang Y(姜勇). Profile distribution of alkali hydrolyzed nitrogen in farm land soils of Northeast China along a latitudinal gradient. *Chin J Ecol (生态学杂志)*, 2007, 26(4): 501–504 (in Chinese with English abstract)
- [13] Zheng D-M(郑德明), Jiang Y-J(姜益娟), Liu W-Y(柳维扬). The spatio-temporal variability of soil available nutrients of cotton fields in Xinjiang. *Cotton Sci (棉花学报)*, 2006, 18(1): 23–26 (in Chinese with English abstract)
- [14] Watt M S, Clinton P W, Whitehead D, Richardson B, Mason E G, Leckie A C. Above-ground biomass accumulation and nitrogen fixation of broom (*Cytisus scoparius* L.) growing with juvenile *Pinus* radiation a dry land site. *For Ecol Manag*, 2003, 184: 93–104
- [15] Xue X-P(薛晓萍), Wang J-G(王建国), Guo W-Q(郭文琦), Chen B-L(陈兵林), You J(尤军), Zhou Z-G(周治国). Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization recovery rate of cotton after initial flowering. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 2006, 26(11): 3631–3640 (in Chinese with English abstract)
- [16] Rochester J, Peoples M B, Hulugalle N R, Gault R R, Constable G A. Using legumes to enhance nitrogen fertility and soil condition in cotton cropping systems. *Field Crops Res*, 2001, 70: 27–41
- [17] Yang Z-B(杨志彬), Chen B-L(陈兵林), Zhou Z-G(周治国). Spatial and temporal variability of available nutrient in cotton field at flower and boll stage and its effect on lint yield and fiber quality. *Acta Agron Sin (作物学报)*, 2008, 34(8): 1393–1402 (in Chinese with English abstract)
- [18] Liu S-R(刘生荣), Liu D-P(刘党培), Jia T(贾涛). Effect of N P K basal dressing on vegetative organ development, dry matter accumulation and yield of transgenic pest-resistant cotton. *Plant Nutr Fert Sci (植物营养与肥料学报)*, 2005, 11(2): 282–284 (in Chinese with English abstract)
- [19] Hu G-Z(胡国智), Zhang Y(张炎), Li Q-J(李青军), Hu W(胡伟), Meng F-X(孟凤轩), Feng G-P(冯广平). Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter accumulation uptake and utilization and yield in cotton. *Plant Nutr Fert Sci (植物营养与肥料学报)*, 2011, 17(2): 397–403 (in Chinese with English abstract)
- [20] Bange M P, Milroy S P. Growth and dry matter partitioning of diverse cotton genotypes. *Field Crops Res*, 2004, 87: 73–87
- [21] Song Z-W(宋志伟), Liu S-T(刘松涛), Cao W-M(曹雯梅), Wang H-M(王汉民), Fang W-P(房卫平), Li C-H(李潮海). Study on the characteristics of N P K absorption and distribution of hybrid cottons. *Cotton Sci (棉花学报)*, 2006, 18(2): 89–93 (in Chinese with English abstract)
- [22] Wang Z-S(王子胜), Xu M(徐敏), Liu R-X(刘瑞显), Wu X-D(吴晓东), Zhu H(朱鹤), Chen B-L(陈兵林), Zhou Z-G(周治国). Effects of nitrogen rates on biomass and nitrogen accumulation of cotton with different varieties in growth duration. *Cotton Sci (棉花学报)*, 2011, 23(6): 537–544 (in Chinese with English abstract)
- [23] Bremner J M. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *J Agric Sci*, 1960, 55: 11–33
- [24] Yang G, Tang H, Nie Y, Zhang X. Responses of cotton growth, yield, and biomass to nitrogen split application ratio. *Eur J Agron*, 2011, 35: 164–170