

施氮量和种植密度对东北特早熟棉区棉铃生物量和氮素累积的影响^{*}

王子胜^{1,2} 吴晓东² 高相彬¹ 徐 敏² 沈 丹² 金路路² 周治国^{1**}

(¹南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095; ²辽宁省经济作物研究所, 辽宁辽阳 111000)

摘 要 以辽棉 19 号和美棉 33B 为材料, 研究了不同施氮量(0、240、480 kg · hm⁻²) 和不同种植密度(75000、97500、120000 plants · hm⁻²) 对东北特早熟棉区棉花棉铃生物量和氮素累积特征的影响. 结果表明: 棉花单铃、棉籽和纤维的生物量及其氮素累积随棉花生育进程的动态变化均符合“S”型曲线, 种植密度和施氮量可以显著影响棉铃各部分生物量和氮素累积的动态特征, 以及棉花产量与品质; 在施氮量 240 kg · hm⁻² 和种植密度 97500 plants · hm⁻² 处理下, 单铃、棉籽和纤维的生物量均达到最大, 生物量和氮素累积的快速累积起始时间和终止时间较早但持续时间较短, 生物量快速累积速率最大, 生物量和氮素在铃壳中的分配系数最低, 在棉籽和纤维中分配系数最高.

关键词 特早熟棉区 棉铃 施氮量 种植密度 生物量 品质

文章编号 1001-9332(2012)02-0403-08 **中图分类号** S562 **文献标识码** A

Effects of nitrogen fertilization rate and planting density on cotton boll biomass and nitrogen accumulation in extremely early maturing cotton region of Northeast China. WANG Zi-sheng^{1,2}, WU Xiao-dong², GAO Xiang-bin¹, XU Min², SHEN Dan², JIN Lu-lu², ZHOU Zhi-guo¹ (¹Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ²Liaoning Institute of Cash Crops, Liaoyang 111000, Liaoning, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(2): 403–410.

Abstract: Taking cotton cultivars Liaomian 19 and NuCoTN 33B as test materials, a field experiment was conducted to study the effects of nitrogen fertilization rate (0, 240 and 480 kg · hm⁻²) and planting density (75000, 97500 and 120000 plants · hm⁻²) on the boll biomass and nitrogen accumulation in the extremely early maturing cotton region of Northeast China. With the growth and development of cotton, the biomass and nitrogen accumulation of cotton boll, cotton seed, and cotton fiber varied in ‘S’ shape. Both nitrogen fertilization rate and planting density had significant effects on the dynamic characteristics of boll biomass and nitrogen accumulation, and on the fiber yield and quality. In treatment 240 kg · hm⁻² and 97500 plants · hm⁻², the biomass of single boll, cotton seed and cotton fiber was the maximum, the starting time and ending time of the rapid accumulation period of the biomass and nitrogen were earlier but the duration of the accumulation was shorter, the rapid accumulation speed of the biomass was the maximum, and the distribution indices of the biomass and nitrogen were the lowest in boll shell but the highest in cotton seed and cotton fiber.

Key words: extremely early maturing cotton region; cotton boll; nitrogen fertilization rate; planting density; biomass; quality.

目前,棉花生产已进入产量、质量和效益并重的新阶段,提高棉花产量和品质是获得经济效益的基

础. 棉纤维产量和品质的形成是品种遗传性、环境生态因素和栽培措施共同作用的结果. 不同生态条件下种植的同一品种棉花的纤维产量和品质差异较大,在当前棉花主栽品种遗传背景较为优化以及环境因素较为稳定的前提下,通过栽培措施来调控棉

^{*} 国家自然科学基金项目(30771279, 30971735)和公益性行业(农业)科研专项(nyhyzx07-005-18, 200903003)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: giscott@njau.edu.cn

2011-05-24 收稿, 2011-12-07 接受.

纤维产量和品质的形成变得尤为重要。

棉花产量和品质的形成以及生物量在各器官间的分配受多种因素的影响,其中种植密度和施氮量是重要的调控措施。种植密度通过调节棉花的源库活性进一步调控生物量在不同器官间的分配,适宜的种植密度有利于生物量向经济器官的分配以促进经济产量的形成^[1-2]。Dong 等^[3]以棉纤维产量和品质为衡量指标指出,在黄河中下游棉区盐碱地的适宜种植密度为每公顷 75000~90000 株,而在非盐碱地的适宜种植密度为每公顷 45000~75000 株;通过对不同种植模式的研究发现,在黄河流域棉区北部留叶枝栽培的适宜种植密度为每公顷 60000 株。氮素是作物生长发育所必需的营养元素,对作物产量和品质的形成有重要作用。刘瑞显等^[4]研究表明,适宜的施氮量有利于维持棉花叶片较高的光合能力;郭文琦等^[5]发现,适宜的施氮量有利于逆境中棉花的自身修复;赵新华等^[6]认为,适宜的施氮量改变了生物量在铃壳、棉籽和纤维中的分配,有利于纤维产量和品质的形成;薛晓萍等^[7]指出,在长江中下游棉区适宜的施氮量为 240~360 kg·hm⁻²。

上述研究分别从种植密度和施氮量影响棉花产量品质形成的生理机制以及确定适宜种植密度和施氮量的角度进行了探讨,取得了较显著的成果,但将种植密度和施氮量作为一个复合因子研究其对东北特早熟棉区棉花产量和品质形成影响的研究未见报道。辽宁省辽阳市属于我国东北特早熟棉区,其棉花生产环境在整个东北特早熟棉区具有代表性。本研究在辽阳市通过设置不同种植密度和施氮量耦合试验,探讨了其对棉纤维生物量、品质形成的影响,以期探寻东北特早熟棉区适宜的种植密度和施氮量,为实现东北特早熟棉区棉花的高产优质提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2008 年在辽宁省辽阳市的辽宁省经济作物研究所(41°26' N,123°14' E)试验地进行。2008 年 4—10 月(棉花全生育期内)的平均气温 19.0℃,降水量 554.4 mm,总日照时数 1350.6 h。土壤为粘土,0~20 cm 耕层土壤中碱解氮 83.1 mg·kg⁻¹,速效磷 21.7 mg·kg⁻¹,速效钾 128.2 mg·kg⁻¹,有机质 32.0 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

供试棉花品种为辽棉 19 号和美棉 33B。采用裂

区试验设计方法,设置 3 个施氮水平:0、240、480 kg·hm⁻²(以氮含量计),氮肥于播种时一次性施入。设 75000、97500、120000 plants·hm⁻² 3 个种植密度,行、株距分别为 55 cm×24.3 cm、55 cm×18.7 cm、55 cm×15.2 cm。3 次重复,小区面积 20 m²。棉花播种时间为 2008 年 4 月 28 日,按高产栽培要求进行田间管理。

在棉株第 6~8 果枝第 1、2 果节开花时,挂牌标记,从开花后第 10 天开始取样,以后每隔 6 d 取样 1 次,每小区取标记棉铃 8~10 个,直至吐絮。将棉铃分为铃壳、棉籽和纤维,分别烘干称量,计算单铃铃壳、棉籽和纤维生物量。样品粉碎后,采用凯氏定氮法测定铃壳、棉籽、纤维的全氮含量,根据各组分的生物量计算氮素累积量。棉花吐絮后收获,测定籽棉产量,采集大小一致的棉铃 20 个,风干轧花后,由农业部纤维品质监督检测中心采用 HVI9000 仪测定主要纤维品质指标。

1.3 数据处理

棉铃生物量和氮素累积量的增长符合 Logistic 曲线,其公式为:

$$w = \frac{w_m}{1 + ae^{bt}}$$
 (1)

式中:w 为棉花生物量或氮素累积量(kg·hm⁻²);w_m为相应的理论最大值(kg·hm⁻²);t 为出苗后的生长日数(d)。

分别对式(1)求 1 阶、2 阶和 3 阶导数,得到相应生长曲线的最快生长时段的起始时间(t₁)、终止时间(t₂)、最大相对生长速率(V_m)及其出现时间(t_m):

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

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

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

$$v_m = -\frac{bw_m}{4}$$
 (5)

生物量分配系数=棉铃各部分生物量/棉铃(铃壳+棉籽+纤维)生物量。

氮素累积分配系数=棉铃各部分氮素累积量/棉铃(铃壳+棉籽+纤维)总氮素累积量。

采用 SPSS 17.0 软件进行处理间差异显著性分析,采用 Excel 软件作图。

2 结果与分析

2.1 施氮量和种植密度对棉铃生物量、氮素累积量的影响

由表 1 可以看出,棉铃及其各部分的生物量和氮素累积量受施氮量和种植密度单一因素的显著影响,亦受施氮量和种植密度交互作用的显著影响. 在种植密度 97500 plants · hm⁻² 和施氮量 240 kg · hm⁻² 处理下,辽棉 19 号和美棉 33B 的单铃生物量均达到最大,棉籽和纤维生物量亦最大,而铃壳生物量较小. 其中,辽棉 19 号的单铃、棉籽、纤维和铃壳的生物量分别为 8. 17、3. 71、2. 82 和 1. 65 g;美棉 33B 的单铃、籽棉、纤维和铃壳的生物量分别为 7. 46、3. 36、2. 53 和 1. 57 g. 不同施氮量和种植密度处理中,棉铃及其各部分氮素累积量的变化趋势与生物量基本一致,在种植密度 97500 plants · hm⁻² 和施氮量 240 kg · hm⁻² 处理下,单铃和纤维的氮素累积量达到最大,棉籽和铃壳生物量相对较小.

2.2 施氮量和种植密度对棉铃生物量、氮素累积量动态特征的影响

2.2.1 单铃生物量和氮素累积量 由表 2 可以看出,辽棉 19 号和美棉 33B 在种植密度 97500 plants · hm⁻²和施氮量 240 kg · hm⁻²处理下单铃生物量累积最大,分别为 8. 59 和 7. 85 g,快速累积起始时间和终止时间较早,快速累积持续时间较短,最大累积速率较高、出现时间较早. 表明在东北特早熟棉区适宜的种植密度和施氮量互作后可以提高单铃生物量最大累积速率,进而提高单铃生物量累积. 辽棉 19 号和美棉 33B 在种植密度 97500 plants · hm⁻²和施氮量 480 kg · hm⁻²处理下单铃氮素累积量最大,分别为 200. 02 和 199. 38 mg,可见,在单铃生物量累积最大时的处理下,单铃氮累积量并不是最大.

2.2.2 棉籽生物量和氮素累积量 由表 3 可以看出,棉籽生物量和氮素累积动态特征值受种植密度和施氮量的显著影响. 辽棉 19 号和美棉 33B 的棉籽生物量累积均在种植密度97500 plants · hm⁻²和施

表 1 施氮量和种植密度对棉铃生物量、氮素累积的影响
Table 1 Effects of nitrogen fertilization rate and planting density on the biomass and nitrogen accumulation of cotton boll

品种 Cultivar	施氮量 Nitrogen fertilization rate (kg · hm ⁻²)	种植密度 Planting density (plants · hm ⁻²)	铃壳 Shell		棉籽 Cotton seed		纤维 Fiber		单铃 Single boll	
			生物量 Biomass (g)	氮素累积量 Nitrogen accumulation (mg)	生物量 Biomass (g)	氮素累积量 Nitrogen accumulation (mg)	生物量 Biomass (g)	氮素累积量 Nitrogen accumulation (mg)	生物量 Biomass (g)	氮素累积量 Nitrogen accumulation (mg)
辽棉 19 号 Liaomian 19	0	75000	1. 37e	32. 18c	3. 39cd	132. 36f	2. 45e	11. 26c	6. 97c	160. 68e
		97500	1. 46e	30. 42d	3. 32e	139. 94e	2. 42e	11. 70c	7. 2bc	165. 04d
		120000	1. 80c	30. 42d	3. 07g	134. 51f	2. 08f	10. 15d	6. 95c	141. 74f
	240	75000	1. 64d	36. 50b	3. 63b	162. 58b	2. 71b	13. 46ab	7. 11bc	173. 30b
		97500	1. 65d	36. 75b	3. 71a	165. 73ab	2. 82a	13. 96a	8. 17a	180. 86a
		120000	2. 18a	36. 75b	3. 28f	138. 82e	2. 44e	11. 86c	7. 89ab	172. 77b
	480	75000	1. 43e	39. 53a	3. 73a	168. 42a	2. 60c	12. 98b	7. 46abc	172. 41b
		97500	1. 65d	38. 85a	3. 42c	152. 72c	2. 54d	13. 39ab	7. 61abc	171. 03bc
		120000	2. 09b	38. 85a	3. 38d	147. 03d	2. 44e	11. 39c	7. 91ab	168. 26cd
	NFR		0. 07	24. 23 * *	5. 52	4. 84	12. 55 *	124. 23 * *	3. 81 *	8. 33 *
	PD		24. 83 * *	2. 47	7. 13 *	2. 17	10. 37 *	104. 66 * *	2. 24	2. 67
	NFR×PD		10. 87 *	8. 33 *	77. 09 * *	66. 65 * *	42. 19 * *	0. 31	1. 48	29. 95 * *
美棉 33B NuCOTN 33B	0	75000	1. 42de	32. 18c	3. 30b	135. 57c	2. 29c	10. 06de	6. 53b	162. 72d
		97500	1. 47d	30. 42d	3. 05cd	125. 90ef	2. 14e	10. 36cd	6. 66ab	160. 51d
		120000	1. 82b	30. 42d	2. 91d	105. 91g	2. 03f	9. 45e	6. 75ab	140. 54e
	240	75000	1. 46d	36. 50b	3. 35a	139. 62b	2. 37b	11. 78ab	6. 64ab	171. 63b
		97500	1. 57c	36. 75b	3. 36a	124. 78f	2. 53a	12. 53a	7. 46a	180. 09a
		120000	2. 10a	36. 75b	3. 01cd	129. 06de	2. 09f	11. 09cd	7. 19ab	171. 34b
	480	75000	1. 53c	39. 53a	3. 36a	144. 30a	2. 34b	12. 03a	6. 83ab	170. 08b
		97500	1. 48d	38. 85a	3. 22c	131. 02d	2. 30c	11. 75ab	7. 00ab	171. 70b
		120000	1. 85b	38. 85a	3. 15c	129. 78a	2. 18d	10. 20cde	7. 18ab	168. 99c
	NFR		2. 10	23. 63 * *	3. 07	2. 76	2. 29	19. 42 * *	1. 39	8. 34 *
	PD		31. 85 * *	2. 56	9. 54 *	5. 81	4. 89	10. 05 *	1. 57	1. 57
	NFR×PD		1. 26	9. 43 *	46. 90 * *	35. 33 * *	64. 06 * *	1. 59	0. 69	29. 92 * *

NFR:施氮量 Nitrogen fertilization rate; PD:种植密度 Planting density. 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. * $P<0.05$; * * $P<0.01$. 下同 The same below.

表 2 不同施氮量和种植密度处理下棉铃生物量和氮素累积动态特征
Table 2 Dynamic characteristics of biomass and nitrogen accumulation in cotton boll under different nitrogen fertilization rate and planting density treatments

品种 Cultivar	施氮量 Nitrogen fertilization rate (kg · hm ⁻²)	种植密度 Planting density (plant · hm ⁻²)	单铃生物量 Biomass per boll						单铃总氮量 Total N per boll					
			<i>Y_m</i> (g)	<i>t</i> ₁ (d)	<i>t</i> ₂ (d)	<i>t_m</i> (d)	<i>V_{max}</i> (g · d ⁻¹)	<i>T</i> (d)	<i>Y_m</i> (g)	<i>t</i> ₁ (d)	<i>t</i> ₂ (d)	<i>t_m</i> (d)	<i>V_{max}</i> (g · d ⁻¹)	<i>T</i> (d)
辽棉 19 号 Liaomian 19	0	75000	7.20	15.3	35.1	24.2	0.23	19.8	179.41	17.0	41.8	29.4	3.89	24.8
		97500	7.45	16.8	36.7	25.0	0.24	19.9	184.54	19.9	44.7	32.3	4.00	24.8
		120000	7.27	15.2	37.8	25.2	0.22	22.6	159.82	17.4	43.4	30.4	3.34	26.0
	240	75000	7.38	15.2	34.9	24.5	0.23	19.7	193.18	21.2	47.6	34.4	4.18	26.4
		97500	8.59	16.6	37.6	26.3	0.26	21.0	194.98	18.5	44.5	31.5	4.27	26.0
		120000	8.18	17.2	36.3	25.1	0.26	19.1	185.47	19.3	40.9	30.1	4.47	21.6
	480	75000	7.83	15.0	37.0	25.2	0.24	22.0	198.31	19.2	46.1	32.6	4.02	26.9
		97500	7.95	15.2	36.6	24.4	0.25	21.4	200.02	18.3	42.7	30.5	4.10	24.4
		120000	8.19	15.8	34.5	24.1	0.27	18.7	197.62	20.3	47.6	34.0	3.96	27.3
美棉 33B NuCOTN 33B	0	75000	6.98	18.5	40.8	29.2	0.22	20.7	185.23	20.3	45.5	32.9	3.96	25.2
		97500	7.07	18.0	39.3	28.2	0.22	21.3	185.21	19.5	46.4	33.0	3.76	26.9
		120000	7.15	18.2	39.8	28.4	0.22	21.6	160.11	17.9	44.8	31.4	3.26	26.9
	240	75000	7.12	18.5	39.5	28.3	0.22	21.0	192.81	21.6	48.0	34.8	4.17	26.4
		97500	7.85	18.0	38.3	27.1	0.25	20.3	195.01	18.9	45.4	32.2	4.21	26.5
		120000	7.44	18.2	36.7	26.2	0.26	16.5	184.79	19.4	41.3	30.4	4.41	21.9
	480	75000	7.16	16.8	37.2	26.4	0.23	20.4	196.44	19.3	46.2	32.8	3.98	26.9
		97500	7.26	17.4	37.5	26.2	0.24	20.1	199.38	18.8	43.6	31.2	4.10	24.8
		120000	7.55	17.5	37.6	27.3	0.24	20.1	191.15	18.6	45.0	31.8	3.93	26.4

Y_m:最大累积量 Maximal accumulation mass; *t*₁:快速累积期起始时间 Starting time of rapid accumulation period; *t*₂:快速累积期终止时间 Ending time of rapid accumulation period; *t_m*:最大累积速率出现时间 Time reached maximal accumulation rate; *V_{max}*:最大累积速率 Maximal accumulation speed; *T*:快速累积持续时间 Duration time of rapid accumulation. 下同 The same below.

表 3 不同施氮量和种植密度处理下棉籽生物量和氮素累积动态特征
Table 3 Dynamic characteristics of biomass and nitrogen accumulation in cotton seed under different nitrogen fertilization rate and planting density treatments

品种 Cultivar	施氮量 Nitrogen fertilization rate (kg · hm ⁻²)	种植密度 Planting density (plants · hm ⁻²)	棉籽生物量 Biomass of cotton seed						棉籽总氮量 Total N of cotton seed					
			<i>Y_m</i> (g)	<i>t</i> ₁ (d)	<i>t</i> ₂ (d)	<i>t_m</i> (d)	<i>V_{max}</i> (g · d ⁻¹)	<i>T</i> (d)	<i>Y_m</i> (g)	<i>t</i> ₁ (d)	<i>t</i> ₂ (d)	<i>t_m</i> (d)	<i>V_{max}</i> (g · d ⁻¹)	<i>T</i> (d)
辽棉 19 号 Liaomian 19	0	75000	3.47	20.0	37.1	28.5	0.14	17.1	136.85	24.3	43.3	34.8	4.01	19.0
		97500	3.39	20.3	37.1	28.7	0.14	16.8	142.65	24.3	42.5	34.4	4.34	18.2
		120000	3.13	20.8	37.2	29.0	0.13	16.4	138.78	25.6	44.2	35.9	4.14	18.6
	240	75000	3.72	19.8	36.4	28.1	0.15	16.6	147.37	24.7	42.7	34.7	5.12	18.0
		97500	3.82	20.9	38.4	29.7	0.15	17.6	152.86	25.9	45.6	36.8	4.89	19.7
		120000	3.35	20.6	37.8	29.2	0.13	17.2	143.21	25.0	43.6	35.3	4.27	18.6
	480	75000	3.81	19.4	35.3	27.3	0.16	15.9	153.24	24.2	42.4	34.3	5.24	18.2
		97500	3.50	19.5	35.9	27.7	0.14	16.4	156.91	24.0	42.4	34.2	4.72	18.4
		120000	3.46	20.1	37.4	28.7	0.14	17.4	152.42	24.7	43.5	35.1	4.50	18.8
美棉 33B NuCOTN 33B	0	75000	3.39	21.6	38.7	30.1	0.14	17.2	145.83	25.4	43.6	35.5	4.43	18.2
		97500	3.14	21.8	38.6	30.2	0.13	16.8	133.70	23.6	41.6	33.6	4.11	18.0
		120000	3.05	23.3	42.4	32.9	0.12	19.0	119.38	26.9	46.7	37.8	3.41	19.7
	240	75000	3.43	20.9	36.8	28.8	0.14	15.9	156.15	27.2	46.5	37.8	4.52	19.3
		97500	3.47	22.1	39.9	31.0	0.14	17.8	134.99	24.9	42.8	34.8	4.15	18.0
		120000	3.12	22.2	39.0	30.6	0.13	16.8	133.22	26.6	44.4	36.5	4.43	17.8
	480	75000	3.43	20.2	36.1	28.1	0.14	15.9	160.46	27.5	45.3	37.4	4.96	17.8
		97500	3.30	20.9	37.7	29.3	0.13	16.8	142.12	25.6	44.2	35.9	4.24	18.6
		120000	3.23	21.8	38.4	30.1	0.13	16.6	133.26	25.4	42.9	35.1	4.17	17.6

氮量 240 kg · hm⁻²处理下达到最大,分别为 3.82 和 3.47 g,棉籽生物量快速累积起始时间和终止时间较早,但快速累积持续时间较短,最大累积速率较大,分别为 0.15 和 0.14 g · d⁻¹. 棉籽氮素累积动态特征值对种植密度和施氮量的响应与棉籽生物量累积动态之间存在差异,当棉籽生物量累积最大时棉籽氮素累积量、最大速率和快速累积持续时间均居中,表明棉籽生物量累积与氮素的平缓累积相对应.

2.2.3 棉纤维生物量和氮素累积量 由表 4 可以看出,棉纤维生物量、氮素累积动态特征值受种植密度和施氮量的显著影响. 辽棉 19 号和美棉 33B 的棉纤维生物量累积均在种植密度 97500 plants · hm⁻²和施氮量 240 kg · hm⁻²处理下最大,棉纤维生物量最大累积速率最大,分别为 0.12 和 0.11 g · d⁻¹,但是其快速累积持续时间较短,分别为 15.8 和 17.2 d. 当纤维生物量累积最大时,纤维氮素累积量、最大累积速率和快速累积持续时间均居中,表明氮素累积过高或过低均不利于纤维生物量的累积.

2.3 施氮量和种植密度对棉铃各组分生物量和氮素分配的影响

棉铃生物量分配系数是反映棉铃物质利用效率的重要指标. 棉铃生物量向纤维中的分配是获得高产优质棉纤维的基础. 种植密度和施氮量显著影响

棉铃生物量在铃壳、棉籽和纤维中的分配(表 5). 在种植密度 97500 plants · hm⁻²和施氮量 240 kg · hm⁻²处理下,辽棉 19 号和美棉 33B 的棉铃生物量在铃壳中的分配系数最小、棉籽和纤维的分配系数最大,表明适宜的种植密度和施氮量互作有利于棉铃生物量向棉籽和纤维的分配,获得高产. 棉铃氮素分配系数亦受种植密度和施氮量互作的影响. 在种植密度 97500 plants · hm⁻²和施氮量 240 kg · hm⁻²处理下,辽棉 19 号和美棉 33B 的铃壳中氮素分配系数均最小、棉籽和纤维中分配系数均最大,表明该处理下提高了氮素由铃壳向棉籽和纤维中的输入. 铃壳和棉籽氮素分配系数在不同处理间的差异达到显著水平,而纤维氮素分配系数在不同处理间的差异不显著,表明种植密度和施氮量互作主要影响了氮素在铃壳和棉籽中的分配.

2.4 施氮量和种植密度对棉花纤维品质的影响

由表 6 可以看出,棉纤维品质受种植密度和施氮量互作的显著影响. 除纤维整齐度以外,棉纤维长度、比强度、马克隆值和伸长率在不同处理间差异均达到显著水平. 其中,棉纤维长度、比强度、伸长率和马克隆值均在种植密度 97500 plants · hm⁻²和施氮量 240 kg · hm⁻²处理下达到最大,纤维整齐度也较高.

表 4 不同施氮量和种植密度处理下棉纤维生物量和氮素累积动态特征
Table 4 Dynamic characteristics of biomass and nitrogen accumulation in cotton fiber under different nitrogen fertilization rate and planting density treatments

品种 Cultivar	施氮量 Nitrogen fertilization rate (kg · hm ⁻²)	种植密度 Planting density (plants · hm ⁻²)	纤维生物量 Biomass of cotton fiber						纤维总氮量 Total N of cotton fiber					
			Y _m (g)	t ₁ (d)	t ₂ (d)	t _m (d)	V _{max} (g · d ⁻¹)	T (d)	Y _m (g)	t ₁ (d)	t ₂ (d)	t _m (d)	V _{max} (g · d ⁻¹)	T (d)
辽棉 19 号 Liaomian 19	0	75000	2.50	23.1	39.5	30.8	0.11	16.4	11.62	22.3	39.3	30.3	0.40	17.0
		97500	2.48	23.9	40.8	31.9	0.10	16.9	11.93	21.9	38.6	29.7	0.42	16.7
		120000	2.14	24.0	40.6	31.8	0.09	16.6	10.35	22.1	37.7	29.4	0.39	15.6
	240	75000	2.84	26.6	45.3	35.5	0.11	18.8	13.80	21.6	39.1	29.8	0.46	17.5
		97500	2.92	21.7	39.5	31.1	0.12	15.8	13.44	20.6	37.4	28.5	0.50	16.9
		120000	2.48	21.8	35.7	28.2	0.12	13.9	12.12	21.9	38.6	29.7	0.42	16.7
	480	75000	2.68	24.7	42.0	32.8	0.11	17.2	13.25	21.0	37.1	28.6	0.48	16.1
		97500	2.61	23.5	40.4	31.5	0.11	16.9	13.72	22.1	39.1	30.1	0.47	17.1
		120000	2.49	22.3	37.7	29.5	0.11	15.5	11.63	21.0	36.3	28.1	0.44	15.3
美棉 33B NuCOTN 33B	0	75000	2.41	26.7	44.1	34.9	0.10	17.4	10.71	26.6	44.6	35.1	0.36	18.0
		97500	2.29	27.6	46.0	36.3	0.09	18.4	10.96	25.7	44.3	34.5	0.35	18.6
		120000	2.13	28.8	46.6	37.2	0.09	17.8	9.91	25.5	43.6	34.1	0.33	18.1
	240	75000	2.59	30.1	49.3	39.2	0.10	19.2	12.15	24.6	40.9	32.2	0.44	16.3
		97500	2.61	25.4	42.6	33.5	0.11	17.2	11.95	23.4	41.0	31.7	0.43	17.6
		120000	2.14	23.3	37.2	29.7	0.10	13.9	11.82	24.3	44.4	33.9	0.36	20.1
	480	75000	2.48	27.9	45.5	36.2	0.10	17.6	12.37	24.8	40.5	32.2	0.45	15.7
		97500	2.40	26.1	43.5	34.3	0.10	17.4	12.20	24.5	41.7	32.6	0.42	17.2
		120000	2.25	24.5	40.3	31.9	0.10	15.8	10.81	23.1	41.1	31.6	0.36	18.0

表 5 不同施氮量和种植密度处理下铃壳、棉籽、纤维的生物量和氮素的分配系数
Table 5 Distribution indices of the biomass and nitrogen of cotton shell, cotton seed and cotton fiber in cotton boll under different nitrogen fertilization rate and planting density treatments

品种 Cultivar	施氮量 Nitrogen fertilization rate (kg · hm ⁻²)	种植密度 Planting density (plants · hm ⁻²)	铃壳 Cotton shell		棉籽 Cotton seed		纤维 Cotton fiber	
			生物量 分配系数 Distribution index of biomass	氮素 分配系数 Distribution index of nitrogen	生物量 分配系数 Distribution index of biomass	氮素 分配系数 Distribution index of nitrogen	生物量 分配系数 Distribution index of biomass	氮素 分配系数 Distribution index of nitrogen
辽棉 19 号 Liaomian 19	0	75000	0. 19d	0. 53a	0. 47ab	0. 43bc	0. 34a	0. 04a
		97500	0. 20d	0. 52ab	0. 46ab	0. 44bc	0. 34a	0. 04a
		120000	0. 26ab	0. 49c	0. 44bc	0. 47ab	0. 30c	0. 04a
	240	75000	0. 21cd	0. 50abc	0. 45b	0. 47ab	0. 34a	0. 04a
		97500	0. 20d	0. 48c	0. 45b	0. 48ab	0. 34a	0. 04a
		120000	0. 28a	0. 53a	0. 42c	0. 43bc	0. 31b	0. 04a
	480	75000	0. 18d	0. 49bc	0. 48a	0. 48a	0. 34a	0. 04a
		97500	0. 22cd	0. 51ab	0. 45b	0. 45b	0. 33a	0. 04a
		120000	0. 26ab	0. 52ab	0. 43c	0. 45b	0. 31b	0. 03a
	NFR		0. 81	0. 02	1. 82	1. 97	0. 40	1. 00
	PD		25. 75 *	0. 07	39. 37 *	12. 02 *	36. 40 **	3. 00
	NFR×PD		4. 27 *	6. 78 *	60. 41 **	6. 22 *	44. 89 **	1. 00
美棉 33B NuCOTN 33B	0	75000	0. 21c	0. 53bcd	0. 47a	0. 44a	0. 32b	0. 03a
		97500	0. 22c	0. 54abc	0. 46ab	0. 42b	0. 32b	0. 03a
		120000	0. 27b	0. 55ab	0. 43bc	0. 41b	0. 30b	0. 04a
	240	75000	0. 20c	0. 53abcd	0. 47a	0. 43ab	0. 33ab	0. 04a
		97500	0. 21c	0. 52cd	0. 45b	0. 44a	0. 34a	0. 04a
		120000	0. 29a	0. 55abc	0. 42c	0. 41b	0. 29b	0. 04a
	480	75000	0. 21c	0. 52d	0. 46ab	0. 44a	0. 32b	0. 04a
		97500	0. 21c	0. 55a	0. 46ab	0. 42b	0. 33ab	0. 04a
		120000	0. 26b	0. 54abc	0. 44c	0. 42b	0. 30b	0. 03a
	NFR		6. 81 *	2. 40	1. 62	2. 87	0. 50	1. 86
	PD		27. 05 *	0. 12	29. 37 *	9. 02 *	14. 00 *	1. 00
	NFR×PD		5. 27 *	2. 06	70. 41 **	3. 22 *	88. 47 **	2. 15

表 6 不同施氮量和种植密度处理下棉花纤维的品质
Table 6 Cotton fiber quality under different nitrogen fertilization rate and planting density treatments

品种 Cultivar	施氮量 Nitrogen fertilization rate (kg · hm ⁻²)	种植密度 Planting density (plants · hm ⁻²)	长度 Length (mm)	比强度 Strength (c N · tex ⁻¹)	马克隆值 Micronaire	伸长率 Elongation rate (%)	整齐度 Uniformity (%)
辽棉 19 号 Liaomian 19	0	75000	28. 8cd	28. 1c	4. 25c	6. 40bc	84. 33a
		97500	28. 4d	28. 4bc	4. 25c	6. 40bc	83. 20a
		120000	28. 6d	28. 2bc	4. 27c	6. 36c	84. 25a
	240	75000	30. 0ab	29. 1ab	4. 59a	6. 60ab	84. 60a
		97500	30. 5a	29. 6a	4. 57ab	6. 63a	83. 40a
		120000	29. 1bcd	28. 4bc	4. 40ab	6. 50ab	84. 65a
	480	75000	29. 0cd	29. 1ab	4. 36b	6. 43b	83. 95a
		97500	29. 7abc	28. 7bc	4. 49ab	6. 53ab	83. 00a
		120000	28. 6d	28. 7bc	4. 32bc	6. 40bc	83. 85a
	NFR		11. 20 **	6. 11 *	55. 54 **	6. 41 *	3. 31
	PD		4. 02 *	1. 81	9. 14 *	7. 31 *	3. 33
	NFR×PD		1. 78	1. 52	5. 07 *	1. 13	0. 12
美棉 33B NuCOTN 33B	0	75000	29. 7de	30. 1bc	4. 28d	6. 49c	85. 07a
		97500	29. 8de	29. 7c	4. 26d	6. 50c	84. 87a
		120000	29. 5e	29. 9c	4. 23d	6. 50c	84. 07a
	240	75000	31. 0ad	30. 8ab	4. 49a	6. 63ab	84. 97a
		97500	31. 1a	31. 1a	4. 51a	6. 67ab	84. 80a
		120000	30. 6ab	30. 3bc	4. 44ab	6. 60ab	83. 90a
	480	75000	30. 5bc	30. 3dc	4. 39bc	6. 58bc	84. 90a
		97500	30. 1cd	30. 6ab	4. 47ab	6. 68a	84. 70a
		120000	29. 9de	30. 3bc	4. 38c	6. 53bc	83. 80a
	NFR		33. 07 **	10. 13 *	46. 27 **	9. 20 *	1. 02
	PD		3. 87 *	1. 42	3. 60 *	6. 23 *	0. 05
	NFR×PD		0. 69	1. 50	0. 83	2. 28	1. 31

3 讨 论

叶片合成的碳水化合物以蔗糖的形式通过铃壳-棉籽运输到纤维^[8],在棉铃各部分中的累积分配影响产量的形成,且其转化后合成纤维素,影响纤维的产量和品质^[9-11]。提高棉铃的生物量累积以及促进棉铃生物量向纤维的分配是获得纤维高产优质的基础。棉花单铃、棉籽和纤维的生物量累积呈“S”型曲线,可用 Logistic 模型进行拟合^[12-15]。通过分析 Logistic 模型中特征值以及分配系数对种植密度和施氮量互作的响应规律,可进一步明确种植密度和施氮量互作对生物量累积分配的影响机理,通过协调种植密度和施氮量的互作实现棉花的高产优质。

种植密度的改变对植物的生长有着重要的影响。种植密度影响作物的源库关系,适宜的种植密度利于作物产量的形成。例如,郑红丽等^[16]研究发现,甜菜生物量的累积以及在地上部与块根之间、叶片与叶柄之间的分配均受种植密度的影响,适宜的种植密度能够促进生物量向块根中运输。氮素作为作物生长发育必需的营养元素,能够调控作物的源库关系以及同化物质在不同器官间的累积分配。赵新华等^[17]对棉铃生物量的累积分配研究发现,施氮量显著影响棉铃生物量在铃壳、棉籽和纤维中的累积分配,且其累积分配动态特征值变化显著。本研究中,将种植密度和施氮量作为复合因子研究发现,棉铃生物量的累积分配亦受到显著影响。

在种植密度 97500 plants · hm⁻² 和施氮量 240 kg · hm⁻² 处理下,棉铃单铃、棉籽和纤维生物量累积均达到最大,快速累积起始时间和终止时间较早,持续时间较短,快速累积速率最大,表明在东北特早熟棉区棉铃生物量的累积主要依赖于快速累积最大速率。而赵新华等^[17]在长江中下游棉区研究指出,棉铃生物量的累积除要求快速累积最大速率较高外,还需要较长的快速累积持续时间。该差异的原因可能是棉花对不同生态环境的自我适应调控机制不同。同时,在该处理下棉铃生物量在棉籽和纤维中的分配系数最大,表明适宜的种植密度和施氮量耦合有利于提高棉籽和纤维产量。

不同种植密度条件下通过调节施氮量可实现对个体生长状况的调控,影响作物的最终产量和品质。氮素参与棉铃生长发育的各代谢过程,对棉铃产量和品质的形成有重要的调控作用^[18-20],同时氮素的累积、分配影响生物量的累积以及在各组分之间的分配。本研究中,棉铃各组分氮素累积与分配受种植

密度和施氮量互作的影响显著,当棉铃各组分生物量累积最大时其氮素累积各特征值居中,表明棉铃生物量的累积和向纤维中的分配依赖于适宜的氮素累积和分配特性。

棉纤维品质的形成以纤维中生物量的累积为物质基础,纤维比强度是衡量原棉品质的重要指标。束红梅等^[21]研究指出,纤维比强度的形成与纤维中纤维素的累积特征密切相关,因此通过调节纤维物质的累积可实现对纤维品质的调控,而纤维物质的累积受种植密度和施氮量的影响。本研究发现,在种植密度 97500 plants · hm⁻² 和施氮量 240 kg · hm⁻² 处理下,纤维长度、比强度、马克隆值和伸长率均显著高于其他处理,纤维整齐度也较高,表明适宜的种植密度和施氮量互作有利于高品质纤维的形成。

辽棉 19 号为特早熟棉区的适栽品种,不同处理间只有种植密度 97500 plants · hm⁻² 和施氮量 240 kg · hm⁻² 处理下纤维品质指标达到或接近其最优状况;尽管美棉 33B 的区域适应性较广,但在本研究中,其纤维品质的最佳值与其在最适宜环境下获得的品质之间仍有较大差距,这一方面反映出种植密度和施氮量互作对纤维品质形成的重要调控作用,另一方面反映出培育东北特早熟棉区适宜品种的紧迫性。

参考文献

- [1] Gwathmey CO, Clement JD. Alteration of cotton source-sink relations with plant population density and mepiquat chloride. *Field Crops Research*, 2010, **116**: 101-107
- [2] Guan B-H (关保华), An S-Q (安树青), Cai Y (蔡颖), et al. Effects of planting density on growth of *Trapa incisa* in substrata with different phosphorus concentrations. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境学报), 2009, **18**(1): 42-47 (in Chinese)
- [3] Dong HZ, Li WJ, Xin CS. Late planting of short-season cotton in saline fields of the Yellow River Delta. *Crop Science*, 2010, **50**: 292-300
- [4] Liu R-X (刘瑞显), Chen B-L (陈兵林), Wang Y-H (王友华), et al. Effects of nitrogen on cotton root growth under drought stress and after watering during flowering and boll-forming stages. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, **33**(2): 405-413 (in Chinese)
- [5] Guo W-Q (郭文琦), Chen B-L (陈兵林), Liu R-X (刘瑞显), et al. Effects of nitrogen application rate on cotton leaf antioxidant enzyme activities and endogenous hormone contents under short-term waterlogging at flowering and boll-forming stage. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(1): 53-60 (in Chinese)

- [6] Zhao X-H (赵新华), Wang Y-H (王友华), Shu H-M (束红梅), *et al.* Effect of plant physiological age on biomass and nitrogen accumulation in cotton boll. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(22): 4605–4613 (in Chinese)
- [7] Xue X-P (薛晓萍), Zhou Z-G (周治国), Zhang L-J (张丽娟), *et al.* Development and application of critical nitrogen concentration dilution model for cotton after flowering. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(6): 1782–1791 (in Chinese)
- [8] Hu H-B (胡宏标), Zhang W-J (张文静), Wang Y-H (王友华), *et al.* Matters related with cotton fiber thickening development and fiber strength. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2007, **27**(4): 726–733 (in Chinese)
- [9] Zhang W-J (张文静), Hu H-B (胡宏标), Wang Y-H (王友华), *et al.* Fiber strength and enzyme activities of different cotton genotypes during fiber development. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(10): 2177–2184 (in Chinese)
- [10] Jiang G-H (蒋光华), Meng Y-L (孟亚利), Chen B-L (陈兵林), *et al.* Effects of low temperature on physiological mechanisms of cotton fiber strength forming process. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**(2): 335–343 (in Chinese)
- [11] Jiang G-H (蒋光华), Zhou Z-G (周治国), Chen B-L (陈兵林), *et al.* Effect of cotton physiological age on the fiber thickening development and fiber strength formation. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(2): 265–273 (in Chinese)
- [12] Leffler HR. Development of cotton fruit. I. Accumulation and distribution of dry matter. *Agronomy Journal*, 1976, **68**: 855–857
- [13] Chen B-L (陈兵林), Cao W-X (曹卫星), Zhou Z-G (周治国), *et al.* Simulation and validation of dry matter accumulation and distribution of cotton bolls at different flowering stages. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(3): 487–493 (in Chinese)
- [14] Zhou K-J (周可金), Pei X-W (裴训武), Jiang H-W (江厚旺), *et al.* Studies on the dynamics of dry matter accumulation of cotton boll at different flower stages. *Acta Gossypii Sinica* (棉花学报), 1996, **8**(3): 145–150 (in Chinese)
- [15] Shan S-H (单世华), Sun X-Z (孙学振), Zhou Z-G (周治国), *et al.* The effect of temperature on the dynamic changes of cotton fiber dry matter accumulation. *Journal of Shandong Agricultural University* (Natural Science) (山东农业大学学报·自然科学版), 2001, **32**(1): 6–10 (in Chinese)
- [16] Zheng H-L (郑红丽), Shao J-W (邵金旺), Fan M-S (樊明寿), *et al.* Influence of planting density on assimilate partitioning in sugarbeet. *China Beet & Sugar* (中国甜菜糖业), 2003(2): 1–3 (in Chinese)
- [17] Zhao X-H (赵新华), Shu H-M (束红梅), Wang Y-H (王友华), *et al.* Effects of sowing date on accumulation and distribution of biomass and nitrogen in cotton bolls. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2010, **36**(10): 1707–1714 (in Chinese)
- [18] Hu H-B (胡宏标), Zhang W-J (张文静), Chen B-L (陈兵林), *et al.* Changes of C/N ratio in the subtending leaf of cotton boll and its relationship to cotton boll dry matter accumulation and distribution. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2008, **34**(2): 254–260 (in Chinese)
- [19] Ma R-H (马溶慧), Xu N-Y (许乃银), Li W-F (李文峰), *et al.* Effects of nitrogen rates on dry matter accumulation and distribution of bolls and fiber quality characteristics in cotton. *Cotton Science* (棉花学报), 2009, **21**(2): 115–120 (in Chinese)
- [20] Zhang P-T (张培通), Xu L-H (徐立华), Yang C-Q (杨长琴), *et al.* Effects of nitrogen fertilization on dry matter accumulation and its distribution, yield and fiber quality of upland cotton. *Cotton Science* (棉花学报), 2008, **20**(4): 295–299 (in Chinese)
- [21] Shu H-M (束红梅), Wang Y-H (王友华), Chen B-L (陈兵林), *et al.* Genotypic differences in cellulose accumulation of cotton fiber and its relationship with fiber strength. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(6): 921–926 (in Chinese)

作者简介 王子胜,男,研究员.主要从事棉花育种及栽培技术研究. E-mail: wangzisheng6666@126.com

责任编辑 孙 菊
