植物营养与肥料学报 2015,21(1):81-91
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0109

施氮量对棉花功能叶片生理特性、氮素利用效率及产量的影响

李鹏程, 董合林*, 刘爱忠, 刘敬然, 李如义, 孙 淼, 李亚兵, 毛树春*
(中国农业科学院棉花研究所, 棉花生物学国家重点实验室, 河南安阳 455000)

摘要:【目的】黄河流域棉区是我国三大棉区之一,氮肥管理在棉花生产中至关重要,氮肥供应不足或过量会影响棉花的皮棉产量和纤维品质,过量施氮可能导致棉花营养生长过旺,产量下降,也会造成不必要的浪费及棉田环境污染,氮肥供应不足会导致棉花生物量较小,皮棉产量降低,纤维品质下降。本文通过3年不同氮肥用量的田间小区定位试验,研究施氮量对棉花功能叶生理特性、氮素利用效率及籽棉产量的影响,旨在探讨黄河流域棉区华北平原亚区中等肥力棉田适宜施氮量,揭示棉花氮素高效利用的相关机理。**【方法】**田间试验于2011～2013年在河南安阳县中棉所试验农场进行,供试田块为多年连作棉田,土壤为壤质潮土,2011年播种前0—20 cm土层土壤有机质、全氮、速效氮(N)、速效磷(P)、速效钾(K)含量分别为11.24 g/kg、0.82 g/kg、77.43 mg/kg、16.69 mg/kg、129.82 mg/kg。以转 *Bt* + *CpTI* 中熟棉花品种中棉所79为材料,采用随机区组设计,重复4次,设置0、90、180、270、360、450 kg/hm^2 6个施氮水平,氮肥底施和初花期追施各半,磷(P_2O_5)、钾(K_2O)全部底施,施用量均为120 kg/hm^2。试验小区长10 m,宽4.8米,每小区6行棉花,种植密度57500 plant/hm^2。2011年4月17日播种,2012年4月25日播种,2013年5月3日播种。2013年研究了施氮量对初花期棉花功能叶光合速率、不同生育期棉花群体叶面积指数(LAI)、不同生育期棉花功能叶叶绿素含量、丙二醛(MDA)含量、谷氨酰胺合成酶(GS)活性的影响,2012、2013年研究了施氮量对棉花氮素内在利用率、氮肥农学利用率、氮素生理利用率、氮肥回收率及籽棉产量的影响。**【结果】**随施氮量的增加,不同生育期棉花群体LAI、功能叶叶绿素含量、GS活性、初花期棉花功能叶净光合速率呈增加的趋势,而功能叶MDA含量呈下降趋势。施氮量270、360 kg/hm^2 处理棉花在盛铃期群体LAI较适宜,吐絮期棉花功能叶能维持较高的生理活性,可为棉花高产提供物质保障。棉花氮素积累量、籽棉产量与施氮量间均呈二次曲线关系,棉花氮肥农学利用率和氮素内在利用率随施氮量增加显著下降,施氮量超过180 kg/hm^2 时氮素生理利用率下降,施氮量为270 kg/hm^2 时氮肥回收率高于其他处理。施氮量360 kg/hm^2 时,籽棉平均产量最高,显著高于施氮量为0、90 kg/hm^2 的处理,但与施氮量180、270、450 kg/hm^2 处理间差异不显著。棉花3年籽棉平均产量(Y)与施氮量(N)的效应方程为 $Y = 3143.8036 + 4.2057N - 0.006220N^2$ ($R^2 = 0.9805$, $P = 0.002717$);棉花的最高产量施氮量为338.1 kg/hm^2,经济最佳施氮量为299.7 kg/hm^2。**【结论】**黄河流域棉区华北平原亚区中等肥力棉田施氮量超过270 kg/hm^2 时,棉花氮肥农学利用率、氮素内在利用率、氮素生理利用率、氮肥回收率开始下降,该区棉田推荐经济施氮量299.7 kg/hm^2。

关键词: 施氮量; 棉花; 功能叶片生理特性; 氮素利用效率; 产量
中图分类号: S157.4$^+$1; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0081-11

Effects of nitrogen application rates on physiological characteristics of functional leaves, nitrogen use efficiency and yield of cotton

LI Peng-cheng, DONG He-lin*, LIU Ai-zhong, LIU Jing-ran, LI Ru-yi, SUN Miao, LI Ya-bing, MAO Shu-chun*
(*Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Cotton Biology, Anyang, Henan 455000, China*)

收稿日期: 2014-02-17 **接受日期:** 2014-09-22
基金项目: 国家棉花产业体系建设专项资金(CARS-18-17);转基因生物新品种培育重大专项(2012ZM08013007);棉花生物学国家重点实验室开放课题(CB2014A18)资助。
作者简介: 李鹏程(1972—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事棉花营养生理研究。E-mail: lipengchengcri@163.com, Tel: 0372-2562225
* 通信作者 E-mail: donghl668@sina.com, Tel: 0372-2562225; E-mail: maosc@163.com, Tel: 0372-2562216

Abstract:【**Objectives**】The Yellow River Valley cotton area is one of the three largest cotton areas in China. Nitrogen fertilizer management is of vital importance in cotton production. Both deficient and excess N application in cotton crop negatively affects the lint yield and fiber quality. In this paper, a 3-years fixed plot experiment was conducted to study the effect of N application rate on the physiological characteristics of cotton functional leaves at different growth stages of cotton, and the N use efficiency and seed yield of cotton, proposing a suitable N application rate for cotton production in medium fertility field in the North China Plain Subregion.【**Methods**】A field experiment with completely randomized design and 4 replications was conducted from 2011 to 2013 on the farm of Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences in Anyang of Henan, where the soil type is fluvo-aquic loam soil and cotton was continuously grown with transgenic *Bt* + *CpTI* cotton cultivar of CCRI (China Cotton Research Institute) 79. The effects of N application rates on leaf area index (LAI) of cotton population at different growth stages, the contents of chlorophyll, the activities of glutamine synthetase (GS) and methane dicarboxylic aldehyde (MDA) in functional leaves of cotton at different growth stages, net photosynthetic rate of functional leaves of cotton at initial flowering stage in 2013 were measured. The effects of N application rates on internal N use efficiency (iNUE, is defined as lint yield per unit tissue N), agronomic N use efficiency (aNUE, is defined as the increase in seed cotton yield per unit of fertilizer N applied), physiological N use efficiency (pNUE, is defined as the increase in seed cotton yield per unit of increased N uptake), N recovery efficiency (NRE, is defined as the increase in difference of total N uptake of N-fertilized plot and total N uptake of zero-N plot per unit of fertilizer N applied) of cotton and seed cotton yield in 2012 and 2013 were studied.【**Results**】The LAI, the chlorophyll contents and the activities of GS in functional leaves of cotton at different growth stages and the net photosynthetic rates of functional leaves of cotton at initial flowering stage were increased with the increased N fertilization rate, while the MDA contents decreased. The LAI of cotton population at peak bolling stage with the treatments of N 270 and 360 kg/ha were more appropriate than those with other N treatments, so the corresponding physiological activities in the two treatments were much higher and they provided better material insurance for high yield of cotton than other treatments. A quadratic correlation existed between the N application rates, the total N accumulation of cotton population and the seed yield. aNUE and iNUE of cotton were remarkably decreased with the increased N rates. NRE and pNUE of cotton reached the highest values at the treatment of N 270 kg/ha and N 180 kg/ha, respectively. The average seed yield of cotton of 3 years experiment reaches the highest level at the treatment of N 360 kg/ha, which was not significantly different compared with treatments of N 180, 270, 450 kg/ha, but significantly higher than the treatment of N 0, 90 kg/ha. The fertilizer effect equation between seed cotton yield and nitrogen application rate under intermediate fertility conditions in North China Plain is $Y = 3143.8036 + 4.2057N - 0.006220N^2$ ($R^2 = 0.9805$, $P = 0.002717$). The maximum and profitable cotton yield will be achieved at nitrogen application rate of 338.1 kg/ha and 299.7 kg/ha, respectively.【**Conclusions**】In the medium fertility field of the North China Plain Subregion of Yellow River Cotton Area, the nitrogen fertilizer efficiencies of cotton will start to decline when the nitrogen application rate is more than 270 kg/ha. The recommended economical nitrogen application rate is 299.7 kg/ha for cotton in the experimental area.

Key words: nitrogen application rate; cotton (*Gossypium hirsutum* L.); physiological characteristics of functional leaves; nitrogen use efficiency; yield

氮是作物生长必需的三大营养元素之一。根据国际肥料工业协会统计数据,2006 年全球棉花氮肥用量占所有作物氮肥用量的 3.8%,施氮总量达到 370 万吨,其中中国的棉花施氮量达到 123.8 万吨,居于世界第一位[1]。20 世纪 80 年代以后,我国农田氮素开始盈余,并呈现增长趋势。20 世纪 90 年代以后,氮盈余量每年保持在 360 ~ 546 万吨,相当于纯氮 24 ~ 35 kg/hm^2[2]。过量施氮导致了较低的氮素利用效率和较高的氮肥损失,这些损失通过土壤径流、淋洗、反硝化、挥发等途径,造成严重环境污染,影响农业生产的可持续性[3]。在农业生产中如何合理运筹氮肥实现高产高效成为科研工作者的

重要课题[4]。关于棉花适宜施氮量,在长江流域[5-8]、西北内陆[9-12]和黄河流域棉区[13-15]均有研究报道。华北平原亚区棉花种植面积占黄河流域棉区的55%左右[16],在我国棉花生产中的战略地位不容忽视,有关该区棉花施氮量的报道从棉叶生理特性、干物质积累、棉花籽棉产量等方面研究了棉花对不同施氮量的响应,施氮水平较少,鲜有根据试验结果建立棉花产量对施氮量的效应方程并提出经济最佳施氮量。目前该区棉花兼顾产量与氮肥利用率的最佳施氮量尚不明确。本研究设置了5个不同施氮量,以不施氮为对照,进行了3个年度田间试验,拟提出华北平原亚区中等肥力棉田的经济最佳施氮量,同时研究了施氮量对棉花功能叶生理特性及氮素利用效率的影响,以期为该棉区棉花合理施氮提供理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验设计

试验于2011～2013年在河南省安阳县白壁镇中国农业科学院棉花研究所试验场进行。供试田块为多年连作棉田,土壤为壤质潮土,土壤肥力中等(表1)。供试棉花品种为转 *Bt* + *CpTI* 基因中熟品种中棉所79。

试验设6个处理,纯氮用量分别为0、90、180、270、360、450 kg/hm^2,分别以N1、N2、N3、N4、N5、N6表示。施用氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。氮肥底施与初花期追施各半,磷钾肥全部底施,磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥施用量均为120 kg/hm^2。随机区组设计,重复4次。试验小区为6行,行距0.8 m,行长10 m,小区面积48 m^2,密度为57500 株/hm^2。2011年播种期4月17日,2012年播种期4月25日;2013年播种期5月3日,出苗期5月10日,蕾期6月15日,开花期7月12日,吐絮期8月29日,7月17日追施尿素,7月30日打顶。其他管理措施参照当地高产管理水平。

表1　2011年供试土壤基础养分状况

Table 1　Basic nutrient contents in tested soils of 2011

土层 Soil layer (cm)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效氮 Avail. N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
0—20	11.24	0.82	77.43	16.69	129.82
20—40	9.63	0.73	65.72	11.93	90.67
40—60	7.98	0.62	50.50	5.07	57.85

1.2　测定项目与方法

1.2.1 棉花主茎功能叶取样及相关生理指标测定　2013年棉花出苗后49 d(6月28日)、63 d(7月12日)、77 d(7月26日)、101 d(8月19日)、115 d(9月2日)、137 d(9月24日),每个小区取主茎功能叶4片(打顶前取主茎倒4完全展开叶,打顶后取主茎倒3完全展开叶),分别测定叶绿素含量、丙二醛(MDA)含量、谷胺酰胺合成酶(GS)活性。叶绿素含量采用丙酮乙醇混合液法测定,MDA含量用硫代巴比妥酸比色法[17]测定,GS活性参考文献[18]的方法测定。

1.2.2 棉花单株叶面积及功能叶光合作用相关指标测定　2013年6月28日、7月16日、8月27日、9月24日取棉花整株样,用Li-3000叶面积仪进行叶面积扫描,根据单株叶面积和实收密度计算叶面积指数(LAI)。2013年7月15日上午9:00～11:00用美国产LI-6400型光合仪测定固定棉花功能叶的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO_2浓度,测定时每个处理重复4次,每张叶片测定3次取其平均值。

1.2.3 棉花生育调查、单株干物质重、氮素含量测定及产量　出苗后每个小区固定连续10株长势一致的棉花进行生育期调查,2012年和2013年9月15日取收获期棉花样品,每个小区取4株长势一致的棉花室内烘干后测定棉花干物质重,粉粹后测全氮含量,小区籽棉产量为实收,籽棉晒干后计产,籽棉轧花后计皮棉产量并计算衣分。棉株全氮含量采用半微量蒸馏凯氏定氮法[17]测定。

1.2.4 氮素利用率的计算方法　氮素内在利用率[Internal nitrogen use efficiency, iNUE, kg/(kg,N)] = 皮棉产量/氮素吸收量;氮肥农学利用率[Agronomic nitrogen use efficiency, aNUE, kg/(kg,N)] = (施氮区

籽棉产量－无氮区籽棉产量)/施氮量;氮素生理利用率[Physiological nitrogen use efficiency, pNUE, kg/(kg,N)]=(施氮区籽棉产量－无氮区籽棉产量)/(施氮区吸收氮量－不施氮区吸收氮量);氮肥回收率(Nitrogen recovery efficiency, NRE, %)=(施氮区吸收氮量－不施氮区吸收氮量)/施氮量[19-22]。

1.3 数据分析

数据采用 Excel 软件和 DPS 12.01 软件进行统计分析,差异显著性检验采用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 施氮量对棉花叶面积指数(LAI)的影响

从全生育期来看(表2),棉花叶面积指数(LAI)的峰值出现在盛铃期,到吐絮期开始下降,低氮处理下降辐度要高于高氮处理,N1、N2、N3、N4、N5、N6 的 LAI 下降辐度分别为 44.4%、39.7%、31.1%、26.5%、17.5%、16.0%,说明增加施氮量能维持棉花生育后期较高的 LAI。在蕾期(6月28日)、初花期(7月16日)、盛铃期(8月27日)、吐絮期(9月24日)棉花的 LAI 均随施氮量增加而增加,说明施氮能促进棉花叶片的营养生长,利于棉花维持较高的 LAI。蕾期 N6 处理棉花的 LAI 最高,显著高于其他处理;N4、N5 处理棉花的 LAI 显著高于 N3、N2、N1 处理。初花期 N6 处理棉花的 LAI 显著高于 N1,与其他4个处理间差异不显著。盛铃期和吐絮期 N5、N6 处理棉花的 LAI 显著高于其他4个处理。

表2 不同氮肥用量下棉花叶面积指数

Table 2 Leaf area index of cotton under different nitrogen application rates

氮施用量(kg/hm²) N rate		测定日期 Measurement date			
		28-Jun	16-Jul	27-Aug	24-Sep
N1	0	0.59 c	2.11 b	2.72 b	1.51 c
N2	90	0.61 c	2.25 ab	2.84 b	1.71 c
N3	180	0.63 c	2.65 ab	3.41 b	2.35 b
N4	270	0.80 b	2.77 ab	3.47 b	2.55 b
N5	360	0.90 b	2.85 ab	4.73 a	3.90 a
N6	450	1.10 a	3.01 a	4.89 a	4.11 a

注(Note):同列数字后不同小写字母表示不同氮肥处理间在0.05水平下差异显著 Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

2.2 施氮量对棉花主茎功能叶生理特性的影响

2.2.1 施氮量对棉花主茎功能叶叶绿素含量的影响

棉叶的叶绿素含量能反映棉叶的氮素营养水平。由表3可见,棉花主茎功能叶叶绿素含量从蕾期到盛花期呈上升趋势,除了 N1 外,其他施氮处理在盛花期(7月26日)出现一个峰值,盛花期以后呈下降趋势。棉花主茎功能叶的叶绿素含量随施氮量的增加而增大,除了8月19日以外,各生育时期 N3、N4、N5、N6 处理与 N1 间差异均达到显著水平。9月2日,N6 与 N5 棉花主茎功能叶叶绿素含量差异不显著,但 N6 均显著高于其他4个处理,其中 N2、N3、N4、N5、N6 棉花主茎功能叶叶绿素含量分别比 N1 高 34%、37%、53%、58%、66%。9月24日,N5、N6 棉花主茎功能叶叶绿素含量显著高于 N2、N1 处理,说明施氮有助于维持棉叶生育后期的正常叶色,延长其功能期。

2.2.2 施氮量对棉花主茎功能叶光合性能的影响

表4表明,初花期棉花主茎功能叶净光合速率随施氮量增加而增大,N6 最高,与 N5 间差异不显著,与 N1、N2、N3、N4 间差异极显著,N2、N3、N4、N5 间棉花主茎功能叶净光合速率差异不显著,但均显著地高于 N1,其中 N2、N3、N4、N5、N6 棉花主茎功能叶净光合速率分别比 N1 高 6%、9%、19%、30%、46%。棉花主茎功能叶蒸腾速率随施氮量增加而上升,N6 最高,与 N4、N5 间差异不显著,与 N1、N2、N3 间差异显著。各施氮处理间棉花功能叶气孔导度差异不显著。棉花主茎功能叶细胞间二氧化碳浓度随施氮量增加而下降,N6 最低,与 N4、N5 间差异不显著,与 N1、N2、N3 间差异显著,这可能是由于叶片较高的净光合速率消耗的二氧化碳数

表 3　施氮量对棉花主茎功能叶的叶绿素含量(mg/g,FW)

Table 3　Chlorophyll content of functional leaves in the main stems of cotton under different N rates

处理 Treatment	测定日期 Measurement date					
	28-Jun	12-Jul	26-Jul	19-Aug	2-Sep	24-Sep
N1	0.34 c	2.00 c	1.82 c	1.91 ac	1.33 d	0.70 c
N2	0.37 c	2.11 b	2.20 b	2.13 abc	1.78 c	0.86 c
N3	0.45 b	2.17 ab	2.20 b	2.18 abc	1.82 c	1.31 b
N4	0.46 b	2.18 ab	2.51 a	2.19 abc	2.04 b	1.41 b
N5	0.47 ab	2.21 a	2.61 a	2.30 ab	2.10 ab	1.52 ab
N6	0.52 a	2.23 a	2.67 a	2.30 a	2.21 a	1.85 a

注(Note): 同列数字后不同小写字母表示不同氮肥处理间在 0.05 水平下差异显著 Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

表 4　不同施氮量下初花期棉花主茎功能叶光合作用指标测定值

Table 4　The photosynthesis indices of functional leaves in the main stems of cotton at initial flowering stage under different N rates

处理 Treatment	E (%)	Ci (μmol/mol)	Tr [g/(m^2·h)]	Gs [mmol/(m^2·s)]	Pn [CO_2 μmol/(m^2·s)]
N1	16.0 b	265.5 a	5.0 c	0.65 a	18.3 c
N2	16.8 b	262.0 a	5.1 c	0.57 a	19.4 bc
N3	17.1 b	254.3 a	5.4 bc	0.54 a	19.9 bc
N4	18.7 a	241.5 ab	5.9 ab	0.57 a	21.8 bc
N5	19.7 a	237.8 ab	5.9 ab	0.63 a	23.7 ab
N6	20.2 a	214.5 b	6.3 a	0.64 a	26.7 a

注(Note): E—含水量 water content of leaf cell; Ci—胞间二氧化碳浓度 carbon dioxide content of leaf cell; Tr—蒸腾速率 leaf transpiration rate; Gs—气孔导度 leaf stomatal conductance; *Pn*—净光合速率 leaf net photosynthetic rate. 同列数字后不同小写字母表示不同氮肥处理间在 0.05 水平下差异显著 Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

量相对较多,从而使叶片二氧化碳浓度降低。叶片含水量也是随施氮量增加而加大,可能是较高的光合速率及蒸腾速率促进了水分向叶片的运输,保证叶片光合作用充足的水分供应。

2.2.3 施氮量对棉花主茎功能叶 Gs 活性的影响

谷氨酰胺合成酶(GS)是氮素代谢的主要酶之一,其活性高低代表棉叶的氮素代谢水平。表 5 表明,开花期(7 月 12 日、7 月 26 日)棉花主茎功能叶 GS 活性高于蕾期,在盛花期(7 月 26 日)达到峰值,盛铃期(8 月 19 日)下降,吐絮后降到最低。在相同生育期,棉花主茎功能叶 GS 活性随施氮量增加而增大。蕾期(6 月 28 日),N4 处理棉花主茎功能叶 GS 活性显著高于 N1、N2 处理, N6 处理显著高于 N1、N2 和 N3 处理。盛花期(7 月 26 日), N6 处理棉花主茎功能叶 GS 活性显著高于 N1、N2 处理。盛铃期(8 月 19 日)与吐絮期(9 月 2 日),N6 处理棉花主茎功能叶 GS 活性显著高于 N1 处理。盛铃期 N2、N3、N4、N5、N6 处理棉花主茎功能叶酶活性分别比 N1 处理高 60%、61%、64%、65%、107%,说明施氮能提高棉叶氮素代谢水平。

2.2.4 施氮量对棉花主茎功能叶 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂过氧化产物,其含量高低代表细胞的衰老程度。表 6 表明,花期(7 月 12 日、7 月 26 日)棉花主茎功能叶的 MDA 含量低于蕾期(6 月 28 日),铃期 N4、N5、N6 处理略有下降(8 月 19 日),吐絮后(9 月 2 日、9 月 24 日)有增加的趋势。相同生育期,棉花主茎功能叶 MDA 含量随施氮量增加而降低,9 月 2 日,各施氮处理棉花主茎功能叶 MDA 含量显著低于 N1 处理,其中 N2、N3、N4、N5、N6 处理棉花功能叶 MDA 含量分别比 N1 处理低 5%、

表5 不同氮肥处理棉花主茎功能叶谷氨酰胺合成酶活性[μmol/(g·h),FW]

Table 5 Glutamine synthetase activity of functional leaves in the main stems of cotton under different nitrogen rates

处理 Treatment	测定日期 Measurement date				
	28-Jun	12-Jul	26-Jul	19-Aug	2-Sep
N1	1.98 c	2.29 a	2.74 c	1.40 b	1.20 b
N2	2.04 c	2.33 a	2.89 bc	2.24 ab	1.33 ab
N3	2.40 bc	2.44 a	2.89 bc	2.26 ab	1.34 ab
N4	2.87 ab	2.68 a	3.35 abc	2.30 ab	1.62 ab
N5	3.06 ab	2.86 a	3.54 ab	2.31 ab	1.71 ab
N6	3.18 a	2.88 a	3.68 a	2.90 a	2.28 a

注(Note):同列数字后不同小写字母表示不同氮肥处理间在0.05水平下差异显著 Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

表6 不同施氮量棉花主茎功能叶MDA含量(μmol/g,FW)

Table 6 MDA content in functional leaves of main stems of cotton under different nitrogen rates

处理 Treatment	测定日期 Date of measurement					
	28-Jun	12-Jul	26-Jul	19-Aug	2-Sep	24-Sep
N1	134 a	93 a	113 a	122 a	159 a	164 a
N2	134 a	93 a	113 a	110 a	128 b	153 ab
N3	127 a	92 a	109 a	110 a	126 b	139 abc
N4	118 a	87 a	103 b	93 a	117 b	132 bc
N5	114 a	87 a	100 b	87 a	116 b	127 c
N6	102 a	79 a	91 b	72 a	110 b	122 c

注(Note):同列数字后不同小写字母表示不同氮肥处理间在0.05水平下差异显著 Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

6%、15%、16%、45%。9月24日,N3、N4、N5、N6处理间棉花功能叶MDA含量差异不显著,N4、N5、N6处理显著低于N1处理,说明施氮能减少棉叶膜脂过氧化产物的产生,延缓主茎功能叶的衰老。

2.3 施氮量对棉花氮素积累量及氮素利用效率的影响

2.3.1 施氮量对棉花氮素积累量的影响 由表7可以看出,相同施氮处理棉花2012年氮素总积累量低于2013年,这与籽棉产量的结果一致(表8)。2012年棉花氮素总积累量(Y)与施氮量(X)呈显著的二次曲线变化关系($Y = 100.5821 + 0.346582X - 0.000337X^2$, $R^2 = 0.9535$, $P = 0.01$),N4、N5、N6处理棉花的氮素总积累量显著高于N1处理,分别比N1处理高66.3%、81.1%、74.3%。2013年棉花氮素总积累量(Y)与施氮量(X)呈显著的二次曲线变化关系($Y = 112.9754 + 0.285737X - 0.000023X^2$, $R^2 = 0.9782$, $P = 0.0032$),N3、N4、N5、N6处理的氮素总积累量显著高于N1处理,分别比N1处理高34.4%、59.7%、81.1%、97.6%。

2.3.2 施氮量对棉花氮素利用效率的影响 两个年度棉花的aNUE、iNUE均随施氮量增加而下降,2012年N5、N6处理棉花的iNUE显著低于N1处理,而aNUE显著低于N2、N3处理。2013年N5、N6处理棉花的iNUE显著低于N1、N2、N3和N4处理,2013年棉花的aNUE随施氮量增加显著下降。2012年和2013年N4处理棉花的NRE最高,2012年度各施氮处理间棉花的NRE差异均不显著,2013年N3、N4、N5、N6处理棉花的NRE显著高于N2处理。两个年度N3处理棉花的pNUE均最高,施氮量超过N3处理后棉花的pNUE下降,

表 7　不同施氮量棉花的氮素利用效率

Table 7　Nitrogen use efficiency of cotton under different nitrogen application rates

年度 Year	处理 Treatment	氮总积累量 TNAA (kg/hm^2)	氮内在利用率 iNUE (kg/kg)	氮肥农学利用率 aNUE (kg/kg)	氮肥回收率 NRE (%)	氮肥生理利用率 pNUE (kg/kg)
2012	N1	103.7 c	11.59 a			
	N2	127.5 bc	10.35 ab	5.83 a	26.42 a	15.81 ab
	N3	140.5 abc	9.78 ab	3.98 b	20.46 a	19.73 a
	N4	172.5 ab	8.17 ab	3.19 bc	28.68 a	12.33 bc
	N5	187.8 a	7.42 b	2.13 c	23.38 a	9.13 c
	N6	183.9 a	7.61 b	1.69 c	17.83 a	9.85 c
2013	N1	118.6 e	11.34 a			
	N2	128.9 de	11.33 a	10.55 a	11.5 b	21.18 a
	N3	159.4 cd	9.93 ab	7.05 b	22.7 a	21.50 a
	N4	189.4 bc	8.64 ab	5.85 c	29.5 a	14.92 b
	N5	214.7 ab	7.76 c	3.93 d	26.7 a	12.98 bc
	N6	234.3 a	6.94 c	3.05 e	25.7 a	9.73 c

注(Note): TNAA—Total nitrogen accumulation amount; aNUE—Agronomic nitrogen use efficiency; iNUE—Internal nitrogen use efficiency; NRE—Nitrogen recovery efficiency; pNUE—Physiological nitrogen use efficiency;同列数字后不同小写字母表示不同氮肥处理间在 0.05 水平下差异显著 Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

2012 年 N5、N6 处理棉花的 pNUE 显著低于 N2 和 N3 处理,2013 年 N4、N5、N6 处理棉花的 pNUE 显著低于 N2 和 N3 处理(表 7)。

2.4　施氮量对棉花籽棉产量的影响

由表 8 可以看出,2011 年棉花籽棉产量(Y)与施氮量(N)呈显著二次曲线变化关系($Y = 3021.9510 + 2.9292N - 0.004456N^2$, $R^2 = 0.9841$, $P = 0.002$),N5 处理籽棉产量最高,N2、N3、N4、N5、N6 处理棉花籽棉产量显著高于 N1,分别比 N1 处理增产 9.4%、13.4%、15.2%、15.8%、15.1%。2012 年棉花籽棉产量(Y)与氮肥用量(N)呈显著二次曲线变化关系($Y = 2950.0833 + 4.9393N - 0.007707N^2$, $R^2 = 0.9564$, $P = 0.0091$),N4 处理棉花籽棉产量最高,N3、N4、N5、N6 处理棉花籽棉产

表 8　施氮量对棉花籽棉产量的影响

Table 8　Effects of nitrogen application rates on seed cotton yield

处理 Treatment	籽棉产量 Seed cotton yield (kg/hm^2)			
	2011	2012	2013	平均 Average
N1	3001.2 c	2895.4 c	3437.9 d	3111.5 c
N2	3285.9 b	3420.2 b	3844.5 c	3516.8 b
N3	3406.3 ab	3611.2 a	4164.7 b	3727.4 a
N4	3458.4 a	3661.7 a	4266.4 ab	3795.5 a
N5	3475.7 a	3655.2 a	4300.2 ab	3810.4 a
N6	3453.7 a	3661.0 a	4309.3 a	3808.0 a

注(Note): 同列数字后不同小写字母表示不同氮肥处理间在 0.05 水平下差异显著 Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

量差异不显著,显著高于 N1、N2 处理,分别比 N1 处理增产 24.7%、26.5%、26.2%、26.4%。2013 年棉花籽棉产量(Y)与氮肥用量(N)呈显著二次曲线变化关系($Y = 3445.3001 + 5.1416N - 0.007289N^2$, $R^2 = 0.9928$, $P = 0.0006$),N6 处理棉花籽棉产量最高,N4、N5、N6 处理棉花籽棉产量差异不显著,显著高于 N1、N2 处理,N3、N4、N5、N6 处理分别比 N1 处理增产 21.1%、24.1%、25.1%、25.3%。

采用一点多年的方差分析方法,以 3 年籽棉产量的平均值(Y)与施氮量(N)建立肥料效应方程如下:$Y = 3143.8036 + 4.2057N - 0.006220N^2$ ($R^2 = 0.9805$, $P = 0.002717$),对方程求导后计算得出,最高产量的施氮量为 338.1 kg/hm^2,最高籽棉产量为 3854.7 kg/hm^2;按照纯氮价格 4.35 yuan/kg,籽棉价格 9.1 yuan/kg 计算,经济最佳施氮量为 299.7 kg/hm^2,籽棉经济产量为 3845.5 kg/hm^2。

3 讨论

3.1 施氮对棉花 LAI 及棉叶生理特性的影响

一般棉花高产群体盛铃期适宜的叶面积指数在 4.0 左右,吐絮期为 2.0～2.5,盛铃期维持在 3.5～4.6[13]。本试验中,施氮量为 270、360 kg/hm^2 时棉花盛铃期叶面积指数分别为 3.47、4.73,吐絮期分别为 2.55、3.9,基本符合棉花高产群体条件。

施氮能提高花铃期叶片净光合速率,降低叶片 MDA 含量[23],本试验得到了相同的结果。本试验条件下,不同生育期棉花功能叶的叶绿素含量、谷胺酰胺合成酶活性随施氮量增加而增加,与马宗斌等[13]的研究结果一致。说明适量施氮能促进棉花的营养生长,利于棉花在盛铃期建成适宜的群体叶面积指数,提高棉叶叶绿素含量及谷胺酰胺合成酶活性,为棉花高产奠定物质基础。

3.2 施氮量对氮素利用效率的影响

正确理解氮素利用效率随施氮量变化的规律将有助于生产者做出兼顾效益与环境的施氮决策[24]。氮肥农学利用率考虑的是氮肥投入与产量输出的性价比[25],内在氮利用率表示棉花如何有效地将吸收的氮转化为皮棉产量[24],氮肥回收效率即棉花吸收的氮量占施入氮肥量的比例,表征棉花对施入氮肥的吸收利用程度好坏[26],氮肥生理利用效率即增加的棉花籽棉产量与增加的氮的比值[21],可以综合反映棉花对氮素吸收与利用的效率。国内有关棉花氮素利用效率的报道较多[27-35],氮肥利用率的计算较多采用的是氮素回收利用率,即氮肥表观利用率[39]。棉花的 NRE 随施氮量增加而降低[30-32],如长江流域主栽品种在使用纯氮用量 300 kg/hm^2 时氮素回收率变化范围为29.0%～48.2%之间[31],新疆棉花漫灌条件下氮素回收率为 25.13%[29],施氮量 360 kg/hm^2 处理棉花的氮素回收率低于施氮量 240 kg/hm^2,高于施氮量 480 kg/hm^2 处理。本试验纯氮用量在 270 kg/hm^2 时,氮素回收率为 20.46%～22.7%,施氮量高于或低于此用量,均降低氮素回收率。本试验棉花氮农学利用率随施氮量增加显著降低,施氮量超过 270 kg/hm^2 时 NRE 下降,这一结果与王肖娟等[29]的结果一致。Zhang 等[32]报道山东东营市盐碱地施氮量为 120、210、300 kg/hm^2 时,棉花的 NRE、pNUE、iNUE、aNUE 均随施氮量增加而下降,本试验的 iNUE、aNUE 与其变化趋势一致,但本试验施氮量为 180 kg/hm^2 时棉花的 pNUE 最高,施氮量为 270 kg/hm^2 时棉花的 NRE 最高,施氮量超过 180 kg/hm^2 时 pNUE 下降,施氮量超过 270 kg/hm^2 时 NRE 下降,这可能因为本试验相近施氮水平下的吸氮量和籽棉产量高于其盐碱地棉花吸氮量和籽棉产量。

3.3 施氮量对棉花产量的影响

有关施氮量对棉花产量的研究表明,不同棉区因栽培品种、气候条件及土壤肥力不一致棉花的适宜施氮量差异较大[5-15,35-38]。在美国加利福尼亚,棉花施氮量在 56～224 kg/hm^2 之间时产量为增加趋势,过量施氮产量下降[39]。在我国长江流域和黄河流域棉区,设置相同的氮肥用量处理,结果皮棉产量最高的施氮量不同[7-8]。同一生态区域的棉花因为土壤肥力的差异最高产量施氮量不一致,在长江流域棉区[6]、北部特早熟棉区[37]、南疆棉区[11-12]均有报道。马宗斌等[13]选用中棉所 72 杂交棉品种,在郑州市黄河滩区(土壤全氮含量为 0.44 g/kg,速效氮含量 70.8 mg/kg)试验,结果表明施氮量 300 kg/hm^2 产量高于施氮量 0、150、450 kg/hm^2。李伶俐等[38]在郑州(土壤有机质 13.6 g/kg,碱解氮 74.9 mg/kg)试验结果表明,施氮量在 225～300 kg/hm^2 范围内,能提高杂交棉产量,施氮量 375 kg/hm^{2}时产量下降。本试验在河南安阳,采用常规棉品种中棉所 79,设置了 0、90、180、270、360、450 kg/hm^2 6 个施氮量处理,3 年试验的平均结果表明施氮量为 360 kg/hm^2 时籽棉产量最高,这一结果与薛晓萍等[15]的结果一致。本试验施氮量 450 kg/hm^2 在 2011 年产量低于其他施氮处理,与马宗

斌等[12]结果一致,但施氮量为 450 kg/hm^{2}处理 2012 年、2013 年的产量略高于 360 kg/hm^2 施氮处理,可能与两个年度花铃期降水量偏小未造成棉株过量的营养生长有关(图 1)。

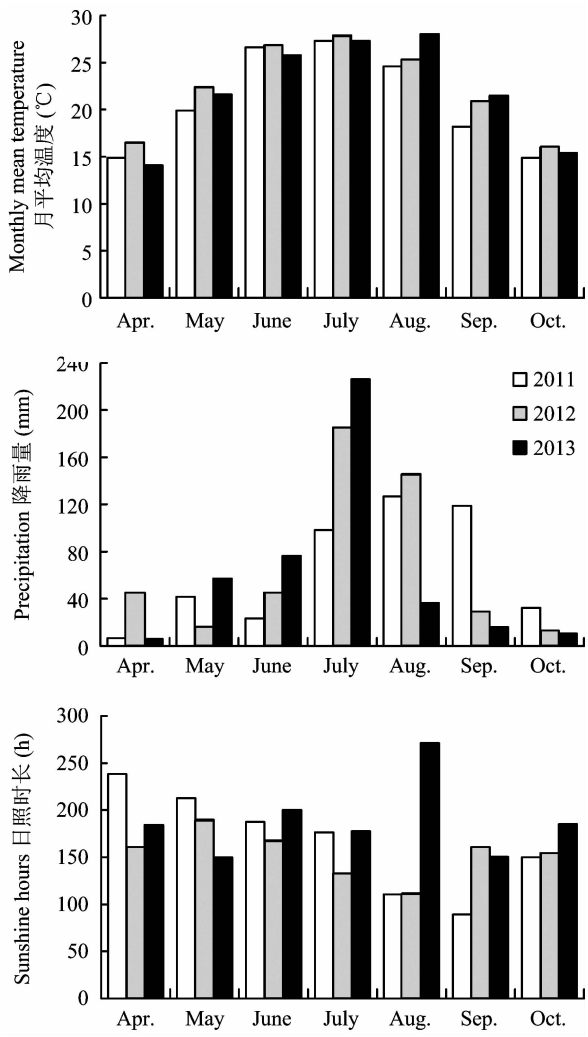

图 1　2011、2012 和 2013 年棉花生长季节月平均气温 、降雨量 、日照时长

Fig. 1　Monthly mean temperature, precipitation, sunshinehours during growth season of cotton in 2011, 2012 and 2013

本试验条件下,相同施氮处理 2013 年的籽棉产量高于 2012 年,2012 年籽棉产量高于 2011 年,这可能与 3 年的棉花生长季节的气候有关(图 1),2011 年 8、9、10 月的日照时长及月均温比 2012 年和 2013 年低,而 9 月、10 月的降雨量偏高,不利于棉花后期产量的形成及实收。2013 年 6 月至 8 月的日照时长比 2012 年长,8 月至 9 月的月均温高于 2012 年,2013 年 5 月至 7 月的降水量高于 2012 年,利于棉花前期生长和籽棉产量的形成,另外 2013 年 8 月至 10 月降水量要明显低于 2012 年,减少了中下部的烂铃,利于籽棉产量的实收。

3.4　棉花籽棉产量与氮素吸收量的关系

Eduardo 等[40]报道使用普通尿素添加质量比为 25% 的脲酶抑制剂(NBPT)能促进氮素的吸收,提高棉花产量与氮利用效率。分析本试验棉花籽棉产量与氮素吸收量的关系,发现二者存在极显著的二次曲线关系,说明通过增加棉花氮素的吸收能提高籽棉产量(图 2)。同时还能看出,2013 年棉花对吸收的氮素利用效率要比 2012 年高,与本试验计算的 pNUE 结果一致。

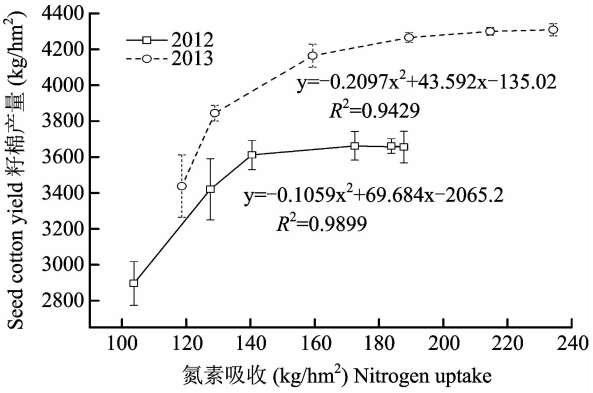

图 2　氮素吸收量与籽棉产量的关系

Fig. 2　Relationship between N uptake and seed cotton yield

4　结论

本试验条件下,随施氮量增加,棉花群体叶面积指数、功能叶叶绿素含量、谷氨酰胺合成酶活性、初花期功能叶净光合速率呈上升趋势,而 MDA 含量则下降。施氮量 270、360 kg/hm^2 棉花在盛铃期群体叶面积指数较适宜,吐絮期棉花功能叶能维持较高的生理活性,可为棉花高产提供物质保障。棉花全生育期氮素积累量随施氮量增加呈二次曲线显著增加,棉花的氮素内在利用率、农学利用率随施氮量增加而下降,施氮量超过 180 kg/hm^2 时棉花的氮素生理利用率下降,施氮量超过 270 kg/hm^2 时棉花的氮肥回收率下降。3 年籽棉产量的平均值(Y)与施氮量(N)的肥料效应方程如下: $Y = 3143.8036 + 4.2057N - 0.006220N^2$ ($R^2 = 0.9805$, $P = 0.002717$),根据方程计算出黄河流域棉区华北平原亚区中等肥力棉田经济施氮量为 299.7 kg/hm^2。

参考文献:

[1] Heffer P. Assessment of fertilizer use by crop at the global level 2006/07-2007/08[R]. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2009. 8-11.

[2] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(1): 68-77.
Yang X L, Lu Y L, Tong Y A *et al*. Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 68-77.

[3] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63: 117-127.

[4] Fageria N K, Baligar V C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88: 97-185.

[5] Yang G Z, Tang H Y, Nie Y C *et al*. Responses of cotton growth, yield, and biomass to nitrogen split application ratio[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 35: 164-170.

[6] 杨国正. 棉花氮素响应特性及氮肥高效利用机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学博士学位论文, 2011.
Yang G Z. Cotton response to nitrogen and the mechanism of efficient utilization to nitrogen fertilizer[D]. Wuhan: PhD dissertation in Huazhong Agricultural University, 2011.

[7] 薛晓萍, 郭文琦, 王以琳, 等. 不同施氮水平下棉花生物量动态增长特征研究[J]. 棉花学报, 2006, 18(6): 323-326.
Xue X P, Guo W Q, Wang Y L *et al*. Research on dynamic increase characteristics of dry matter of cotton at different nitrogen levels[J]. Cotton Science, 2006,18(6): 323-326.

[8] 薛晓萍, 王建国, 郭文琦, 等. 氮素水平对初花后棉株生物量、氮素累积特征及氮素利用率动态变化的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3631-3640.
Xue X P, Wang J G, Guo W Q *et al*. Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization recovery rate of cotton after initial flowering[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3631-3640.

[9] 李培岭,张富仓. 根系分区交替滴灌下水氮耦合对棉花氮素利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(25): 112-116.
Li P L, Zhang F C. Effects of water and nitrogen coupling on cotton nitrogen absorption and utilization under alternate root partition drip[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(25): 112-116.

[10] 潘冬梅, 吕新, 王海江. 棉花膜下滴灌施用氮肥施肥模型及推荐决策支持系统建立研究[J]. 土壤, 2008, 40(1): 141-144.
Pan D M, Lü X, Wang H J. Fertilization model and recommendation/decision-making supporting system for nitrogen use in drip fertigation of plastic mulched cotton[J]. Soils, 2008, 40(1): 141-144.

[11] 娄善伟,张巨松,罗新宁,等. 施氮水平对棉花农艺性状、倒四叶光合特性及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报,2009, 32(1): 39-42.
Lou S W, Zhang J S, Luo X N *et al*. Influence of nitrogenous fertilizer level on agronomic characters, fourth leaf from top photosynthetic characteristics and yield of cotton[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009, 32(1): 39-42.

[12] 林涛,郭仁松,崔建平,等. 施氮对南疆荒漠绿洲滴灌棉田产量及棉纤维品质的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(11): 47-53.
Lin T, Guo R S, Cui J P *et al*. Effects of nitrogen application on cotton yield and fiber quality under drip irrigation condition in oasis of South Xinjiang[J]. Acta Agricultura Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(11): 47-53.

[13] 马宗斌, 严根土, 刘桂珍, 等. 施氮量对黄河滩区棉花叶片生理特性、干物质积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 849-857.
Ma Z B, Yan G T, Liu G Z *et al*. Effects of nitrogen application rates on main physiological characteristics of leaves, dry matter accumulation and yield of cotton cultivated in the Yellow River bottomlands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(4): 849-857.

[14] 马宗斌,严根土,刘桂珍,等. 氮肥分施比例对黄河滩地棉花叶片生理特性、干物质积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1092-1101.
Ma Z B, Yan G T, Liu G Z *et al*. Effects of split nitrogen fertilization on physiological characteristics of leaves, dry matter accumulation and yield of cotton cultivated in the Yellow River bottomland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1092-1101.

[15] 刘绍东,张思平,张立祯. 不同基因型棉花地上部干物质积累对氮素的响应[J]. 棉花学报, 2010, 22(1): 77-82.
Liu S D, Zhang S P, Zhang L Z. Above-ground dry matter accumulation of cotton genetics at different nitrogen applications[J]. Cotton Science, 2010, 22(1): 77-82.

[16] 中国农业科学院棉花研究所. 中国棉花栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社,2013.
Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences. Cotton Farming in China[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2013.

[17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Li H S. Principles and techniques for plant physiology and biochemistry experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

[18] Zhang C F, Peng S B, Peng X X *et al*. Response of glutamine synthetase isoforms to nitrogen sources in rice (*Oryza sativa* L.) roots[J]. Plant Science, 1997, 125: 163-170.

[19] Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S *et al*. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia[J]. Field Crops Research, 1999, 63: 113-118.

[20] Novoa R, Loomis R S. Green plants play a unique role among living organisms through their ability to reduce carbon in photosynthesis[J]. Plant and Soil, 1981, 58: 177-204.

[21] Isfan D. Nitrogen physiological efficiency index in some selected spring barley cultivars[J]. Journal of Plant Nutrition, 1990, 13: 907-914.

[22] Dilz K. Efficiency of uptake and utilization of fertilizer nitrogen by plants [A]. Jenkinson D S, Smith K A. Nitrogen efficiency in agricultural soils[C]. London: Elsevier Applied Science, 1988.

[23] 刘瑞显, 郭文琦, 陈兵林, 等. 氮素对花铃期干旱及复水后棉花叶片保护酶活性和内源激素含量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(09): 1598-1607.
Liu R X, Guo W Q, Chen B L *et al*. Effects of nitrogen on the antioxidant enzyme activities and endogenous hormone contents of cotton leaf under drought stress and after soil re-watering during the flowering and boll-forming stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(09): 1598-1607.

[24] Rochester I J. Assessing internal crop nitrogen use efficiency in high-yielding irrigated cotton[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90: 147-156.

[25] Vanlauwe B, Kihara J, Chivenge P *et al*. Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management [J]. Plant and Soil, 2011, 339: 35-50.

[26] Rochester I J, Halloran J, Maas S *et al*. Monitoring nitrogen use efficiency in your region[J]. Australian Cotton Grower, 2007, 28 (4): 24-27.

[27] 王肖娟,危常州,张君,等. 灌溉方式和施氮量对棉花生长及氮素利用效率的影响[J]. 棉花学报, 2012, 24(6): 554-561.
Wang X J, Wei C Z, Zhang J *et al*. Effects of irrigation methods and N application level on cotton growth and nitrogen use efficiency[J]. Cotton Science, 2012, 24(6): 554-561.

[28] Hou Z A, Li P F, Li B G *et al*. Effects of fertigation scheme on N uptake and N use efficiency in cotton[J]. Plant and Soil, 2007, 290: 115-126.

[29] 王肖娟,危常州,张君,等. 灌溉方式和施氮量对棉田氮肥利用率及损失的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(10): 2751-2758.
Wang X J, Wei C Z, Zhang J *et al*. Effects of irrigation mode and N application rate on cotton field fertilizer N use efficiency and N losses[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (10): 2751-2758.

[30] 闵伟,侯振安,冶军,等. 灌溉水盐度和施氮量对棉花产量和水氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(4): 858-867.
Min W, Hou Z A, Ye J *et al*. Effects of water salinity and nitrogen rate on yield, WUE and NUE of cotton under drip irrigation with saline water conditions [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(4): 858-867.

[31] 张祥,刘晓飞,王桂霞,等. 长江流域棉花主推品种氮素吸收与利用效率比较与分类[J]. 棉花学报,2012,24(3): 253-258.
Zhang X, Liu X F, Wang G X *et al*. Study on nitrogen uptake and use efficiency in different cotton cultivars in the Yangtze River Region[J]. Cotton Science, 2012, 24(3): 253-258.

[32] Zhang D M, Li W J, Xin C S *et al*. Lint yield and nitrogen use efficiency of field-grown cotton vary with soil salinity and nitrogen application rate[J]. Field Crops Research, 2012, 138, 63-70.

[33] 李燕青,孙文彦,许建新,等. 黄淮海地区绿肥与化肥配施对棉花生长和肥料利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012,18(6): 1398-1404.
Li Y Q, Sun W Y, Xu J X *et al*. Influence of combined application of green manure and inorganic fertilizers on cotton growth and fertilizer use efficiency in Huanghuaihai Area[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1398-1404.

[34] 李学刚,宋宪亮,孙学振,等. 控释氮肥对棉花纤维品质、产量与氮肥利用效率的影响[J]. 作物学报,2011,37(10): 1910-1915.
Li X G, Song X L, Sun X Z *et al*. Effects of controlled-release N fertilizer on fiber quality, yield and N use efficiency[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(10): 1910-1915.

[35] 胡国智,张炎,李青军,等. 氮肥运筹对棉花干物质积累、氮素吸收利用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(2): 397-403.
Hu G Z, Zhang Y, Li Q J *et al*. Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter accumulation, N uptake and utilization and yield in cotton[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 397-403.

[36] 潘薇薇,危常州,丁琼,等. 膜下滴灌棉花氮素推荐施肥模型的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009,15(1): 204-210.
Pan W W, Wei C Z, Ding Q *et al*. Nitrogenous fertilizer recommendation model for cotton under mulch-drip irrigation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 204-210

[37] 王子胜,徐敏,张国伟,等. 施氮量和种植密度对东北特早熟棉区棉花生物量和氮素累积的影响[J]. 应用生态学报, 2011,22(12): 3243-3251.
Wang Z S, Xu M, Zhang G W *et al*. Effects of nitrogen fertilization rate and planting density on cotton biomass and nitrogen accumulation in extremely early mature cotton region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3243-3251.

[38] 李伶俐,房卫平,马宗斌,等. 施氮量对杂交棉氮、磷、钾吸收利用和产量品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 663-667.
Li L L, Fang W P, Ma Z B *et al*. Effects of nitrogen fertilization rate on uptake of NPK and yield and quality of hybrid cotton[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 663-667.

[39] Hutmacher R B, Travis R L, Nichols R L. Response of Acala cotton to nitrogen rates in the San Joaquin Valley of California [J]. The Scientific World Journal, 2001, 1(2): 691-698.

[40] Eduardo M K, Derrick M O, John L S *et al*. Physiological and yield responses of field-grown cotton to application of urea with the urease inhibitor NBPT and the nitrification inhibitor DCD [J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43, 147-154.