植物营养与肥料学报 2015,21(3):590-599 doi: 10.11674/zwyf.2015.0305
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

应用 ^{15}N 研究氮肥运筹对棉花氮素吸收利用及产量的影响

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】有关棉花适宜的施氮时期存在争议,国外有学者推荐最佳施氮时期为出苗后和现蕾期,也有研究认为播前和初花期各施一半较好。氮同位素示踪技术能区分作物吸收利用的肥料氮及土壤氮,并能深入细致研究施入氮肥的去向及在作物体内的分配。本文采用氮同位素示踪技术研究氮肥底追比例,施氮时期对棉花氮素吸收和产量的影响,以期为华北平原棉区氮肥管理提供理论依据。**【方法】**采用盆栽试验,以转 *Bt* + *CpTI* 基因抗虫棉品种中棉所 79(CCRI 79)、中棉所 60(CCRI 60)为材料,设氮肥底施与初花期追施比例 1∶1(N1)、1∶2 (N2)、0∶1(N3)、氮肥底施与蕾期追施比例 0∶1(N4)4 个处理,研究氮肥运筹对棉花初花期、收获期 ^{15}N 吸收、^{15}N 回收率、生物量积累和籽棉产量的影响。**【结果】**初花期棉株不同器官的氮素吸收来自氮肥(Ndff)的比例随底肥氮施用量的增加而显著增加,增幅为 25.88%～42.45%。收获期不同处理棉花单株 Ndff% 随追施氮量的增加而显著增加,增幅为 26.92%～54.14%,N3、N4 处理的棉花单株 Ndff% 显著高于 N1 和 N2。N2 处理的棉花单株籽棉产量高于其他处理,但与 N1 处理的差异不显著,N2 处理单株生物量与 N1、N3 差异不显著。2 个品种 N3、N4 处理的棉花收获期单株 ^{15}N 积累量均显著高于 N1 和 N2 处理,棉株收获期 ^{15}N 回收率均显著高于 N1。N2 处理的棉花收获期 ^{15}N 回收率高于 N1 处理,但差异未达到显著水平。棉花收获后 N2 处理土壤 ^{15}N 回收率低于 N1,但差异不显著。**【结论】**本试验条件下,2 个棉花品种氮素底追比为 1∶2 时的籽棉产量与 ^{15}N 回收率优于底追比为 1∶1 处理,底追比为 0∶1 的处理 ^{15}N 回收率在 4 个处理中最高,但未显示出产量优势,这些结果有待在大田试验中进一步验证。

关键词: ^{15}N 示踪技术; 氮肥运筹; 棉花; 氮吸收利用; 产量
中图分类号: S562.062.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)03-0590-10

Effects of nitrogen fertilizer application strategy on N uptake, utilization and yield of cotton using ^{15}N trace technique

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*)

Abstract:【Objectives】 There is controversy about suitable nitrogen(N) application period in cotton cultivation. Some scholars abroad recommended that the best periods of N application for cotton were the emergence and budding stage, while other researchers concluded that N application before the sowing and initial flowering stage each half was better for cotton. N isotope tracer technique can distinguish N of crop absorption and utilization deprived from fertilizer N or soil N, and can thoroughly investigate direction of N fertilizer and distribution in cotton plant. This work was to study effects of N application ratios of the base fertilizer and topdressing and topdressing period on N absorption and yield of cotton based on N isotope tracer technique in order to provide theoretical basis for N management of cotton in North China Plain. **【Methods】** A pot trial using ^{15}N trace technique was conducted with transgenic *Bt* + *CpTI* cotton(*Gossypium hirsutum* L.) cultivars, China Cotton Research Institute(CCRI 79 and

收稿日期: 2014-02-23 **接受日期:** 2014-05-26 **网络出版日期:** 2015-02-13
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,湖北荆州人,助理研究员,博士研究生,主要从事棉花营养与施肥研究。E-mail: lipengchengcri@163.com
* 通信作者 Tel: 0372-2562225, E-mail: donghl668@sina.com; E-mail: maosc@163.com

CCRI 60) at the farm of Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences in Anyang Henan in 2013. There were 4 treatments in the trial with total N application rate of 3.5 g each pot, and N application ratios of base fertilizer and topdressing at the initial flowering stage were 1∶1(N1), 1∶2(N2) and 0∶1(N3) respectively and as well as N application ratio of base fertilizer and topdressing at the budding stage 0∶1(N4). Effects of different N application strategy on ^{15}N absorption, ^{15}N recovery efficiency, biomass accumulation of cotton at the initial flowering stage as well as the harvest stage and seed cotton yield at the harvest stage were examined. 【**Results**】Percentages of N derived from fertilizer(Ndff) of different organs of cotton plants at the initial flowering stage are significantly increased with the increase of fertilizer rate of the basal N, and amplitude of the percentages of Ndff is 25.88–42.45. Percentages of Ndff of cotton plants at the harvest stage are significantly increased with the increase of fertilizer rate of the topdressing N, and amplitude of the percentages of Ndff of cotton plants is 26.92–54.14. Percentages of Ndff of cotton plants at the harvest stage under N3 and N4 are significantly higher than those under N1 and N2. Seed cotton yields of cotton plants of the 2 cultivars with N2 are higher than those of the other 3 treatments, and there is not significant difference between those of N2 and N1. Biomass accumulation amounts of cotton plants of the 2 cultivars with N2 are not significantly different from those of N1 and N3 respectively. ^{15}N uptake amounts of cotton plants of the 2 cotton cultivars with N3 and N4 at the harvest stage are significantly higher than those with N1 and N2 respectively. ^{15}N recovery rates of cotton plants of the 2 cotton cultivars with N3 and N4 at the harvest stage are significantly higher than those with N1, while ^{15}N recovery rates of cotton plants of the 2 cotton cultivars with N2 at the harvest stage are higher than those with N1, and there is not significant difference between N2 and N1. ^{15}N recovery rate of soil after the harvest with N2 is less than that with N1, and there is not significant difference between N2 and N1. 【**Conclusions**】When N application ratio of the basal fertilizer and topdressing at the initial flowering stage is 1∶2 in the pot trial, the seed cotton yield and ^{15}N recovery rate of cotton are higher than those of the conventional N application ratio 1∶1. When N application ratio of the basal fertilizer and topdressing at the initial flowering stage is 0∶1, the ^{15}N recovery of cotton is the highest among the 4 treatments, but the seed cotton yield is not improved. The results above in the pot trial should be further tested in field trial.

Key words: ^{15}N trace technique; N fertilizer application strategy; cotton(*Gossypium hirsutum* L.); N uptake and utilization; seed cotton yield

氮是作物生长必需的大量元素之一,作物吸收的氮一部分来源于土壤,一部分来源于施入的氮肥。氮同位素示踪技术能区分作物吸收利用的肥料氮及土壤氮,运用此技术测定的作物氮素利用率能真实地反映作物实际利用肥料的状态[1],并能深入细致研究施入氮肥的去向及在作物体内的分配[2-7],为作物氮肥运筹管理提供理论依据。

有关棉花适宜的施氮时期存在争议,国外有学者推荐最佳施氮时期为出苗后和现蕾期[8],也有研究认为播前和初花期各施一半较好[9]。国内有研究认为棉株中的氮素主要来自土壤,占棉株总氮量的53%以上;棉株生育前期对土壤氮的依赖性较高,而后期对肥料氮的依赖性较高[10],这一结果为棉花底氮后移提供了理论依据。滴灌条件下增加施氮次数[11]、滴灌时先滴一半肥液再滴一半清水[12-13]有利于提高棉花的氮肥利用率。棉花氮肥施氮时期、施氮次数、底施与追施比例对氮素吸收、产量及氮肥利用率的影响值得深入研究。黄河流域棉区氮肥施用习惯为底肥与初花期追肥各施一半,这种施氮方式是不是兼顾产量与氮肥利用率的最佳方式尚不明确。本文拟采用盆栽试验,使用氮同位素示踪技术,设计氮肥底施与初花期追施比例为1∶2和0∶1,底施氮与蕾期追氮比例为0∶1,以底氮与初花期追氮比例1∶1为对照,研究底氮后移以及一次性施氮对棉花生物量及氮素积累、籽棉产量及氮肥利用率的影响,以期为黄河流域棉区氮肥合理运筹提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验试计

盆栽试验于2013年在河南省安阳市中国农业科学院棉花研究所试验农场进行。以转 *Bt* + *CpTI*

基因中熟常规品种中棉所79(CCRI79)和中棉所60(CCRI79)为材料,设氮肥底施与初花期追施比例1∶1(N1)、1∶2(N2)、0∶1(N3)、氮肥底施与蕾期追施比例0∶1(N4)4个处理(表1),每处理重复10次,随机区组设计。试验用盆为塑料花盆,上部内直径35 cm,底部内直径30 cm,高39 cm。每盆装土35 kg,供试土壤有机质含量10.5 g/kg,全氮0.73 g/kg,碱解氮68.2 mg/kg,速效磷10.6 mg/kg,速效钾99.4 mg/kg。

所有处理磷、钾肥用量相同,并全部作底肥。磷肥用过磷酸钙(P_2O_5含量42%),每盆施8.33 g,钾肥用硫酸钾(含K_2O 51%),每盆用量6.86 g。氮肥为硫酸铵(含N 21%,上海化工研究院生产),^{15}N丰度10.08,每盆纯氮总用量均为3.5 g。于2013年4月8日装土并施入底肥,花盆按行距0.8 m、株距0.7 m摆放,并埋入土壤中。4月25日播种,5月2日出苗,6月10日现蕾,7月8日开花,9月5日吐絮。6月12日追施蕾期氮肥,7月10日追初花期氮肥。

表1 盆栽试验棉花施氮量及施氮时期

Table 1 N application rate and time in the pot experiment of cotton

处理 Treatment	纯氮总用量 Total N appl. rate (N g/pot)	底追比例 Base∶topdressing	底肥 Base fertilizer (N g/pot)	追肥 Topdressing fertilizer (N g/pot)	
				蕾期 Budding stage	初花期 Initial flowering stage
N1	3.50	1∶1	1.75	0	1.75
N2	3.50	1∶2	1.17	0	2.34
N3	3.50	0∶1	0	0	3.50
N4	3.50	0∶1	0	3.50	0

1.2 采样及测定

于初花期(7月10日)、收获期(9月20日)每处理取4株,初花期分根(子叶节以下)、茎、叶、花蕾,成熟期分根、茎、叶、铃壳、籽棉,于电热恒温干燥箱内105℃杀青30 min后80℃烘干至恒重,用万分之一天平称量生物量,粉碎待用。成熟期取0—30 cm土壤混合样,每处理取4个重复,自然风干后磨碎,过0.25 mm筛备用。植物不同部位和土壤全氮含量用半微量凯氏定氮法测定,^{15}N丰度用ZHT-03(北京化工仪器厂)质谱计测定。

棉株不同部位氮吸收量、棉株吸收的氮素来自氮肥(Ndff %)、氮肥回收率的计算参照王富林等[14]的方法,公式如下:

棉株不同部位氮吸收量(g) = 棉株不同部位生物量(g) × 全氮含量;

Ndff(%) = (棉株不同器官中^{15}N丰度 − 0.3663)/(肥料中^{15}N丰度 − 0.3663) × 100;

棉株不同器官^{15}N累积量(mg) = 棉株不同器官全氮吸收量(g) × Ndff % × 1000;

棉株^{15}N回收率(%) = 棉株体内^{15}N含量/^{15}N施入量 × 100;

土壤^{15}N回收率(%) = 土壤中^{15}N含量/^{15}N施入量 × 100。

1.3 数据处理

所有数据采用Excel 2007和DPS 11.0软件进行统计与分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥运筹对棉花不同器官生物量及籽棉产量的影响

由表2可以看出,初花期2个棉花品种不同施氮处理间棉株的根、花蕾部分生物量差异不显著,2个品种N4处理根、花蕾部分生物量在4个施氮处理中最高,说明蕾期施氮对棉花地下部的生长及花蕾的发育有促进作用。中棉所79的N1处理单株生物量在4个处理中最高,而中棉所60的N3处理的单株生物量在4个处理中最高,但各处理间的单株生物量差异不显著,说明了底施氮肥对初花期的棉花单株生物量影响较小。

收获期相同品种不同施氮处理间棉株根、茎、叶、铃壳的生物量差异不显著,单株籽棉产量均以N2处理最高(表3)。中棉所79各处理间单株籽棉产量、单株生物量无显著差异,N2处理单株籽棉产量比N1高5.5%。中棉所60的N2处理的单株籽

棉产量、生物量显著高于 N4 处理,但与 N1、N3 处理间的差异不显著,N2 处理单株籽棉产量比 N1 高 4.4%。结果表明,底氮与初花期追氮比例为 1∶2 时可促进棉花生物量的积累,相比常规施氮(底追比为 1∶1)有一定增产作用。

表 2　初花期棉株不同器官生物量(g/plant)

Table 2　Biomass of different organs of cotton plants at the initial flowering stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	花蕾 Flower and bud	全株 Whole plant
中棉所 79 CCRI 79	N1	7.87 a	20.82 a	23.65 a	3.13 a	55.48 a
	N2	7.64 a	16.86 b	19.67 c	3.60 a	47.76 a
	N3	7.85 a	16.74 b	19.79 c	2.75 a	47.13 a
	N4	8.36 a	20.28 a	21.65 b	3.82 a	54.11 a
中棉所 60 CCRI 60	N1	7.87 a	15.63 b	19.79 c	3.66 a	46.94 a
	N2	8.63 a	16.67 b	19.93 c	3.65 a	48.87 a
	N3	8.98 a	17.19 b	20.70 bc	3.63 a	50.50 a
	N4	9.44 a	17.19 b	19.69 c	3.94 a	50.27 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表 3　收获期棉株不同器官生物量(g/plant)

Table 3　Biomass of different organs of cotton plants at the harvest stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	铃壳 Boll shell	籽棉 Seed cotton	全株 Whole plant
中棉所 79 CCRI 79	N1	17.33 a	64.61 a	48.09 a	36.16 a	73.66 abc	239.85 a
	N2	17.16 a	51.53 a	45.63 ab	40.77 a	77.74 ab	232.83 a
	N3	20.31 a	64.75 a	44.99 ab	43.53 a	64.20 cd	237.78 a
	N4	16.52 a	52.93 a	38.67 ab	36.77 a	68.85 bc	213.74 ab
中棉所 60 CCRI 60	N1	19.51 a	48.28 a	32.84 b	41.52 a	79.30 ab	221.45 a
	N2	18.13 a	52.58 a	36.90 ab	40.66 a	82.75 a	231.01 a
	N3	16.69 a	43.59 a	41.07 ab	34.77 a	79.74 ab	215.85 ab
	N4	16.11 a	39.50 a	41.18 ab	29.67 a	55.90 d	182.35 b

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.2　氮肥运筹对^{15}N 丰度及^{15}N 积累量的影响

表 4 显示,初花期 2 个品种 N1 处理的主茎^{15}N 丰度大于花蕾、叶,根^{15}N 丰度最低。2 个品种 N4 处理花蕾^{15}N 丰度大于根、茎,叶^{15}N 丰度最低,N2 处理棉花初花期根、茎、叶、花蕾之间的^{15}N 丰度较接近。2 个品种 N1 处理的根、茎、叶、花蕾的^{15}N 丰度均显著高于 N2 和 N4,N4 花蕾的^{15}N 丰度显著高于 N2。

初花期各处理棉花的叶^{15}N 积累量最高,其次是主茎、花蕾,根部最少(表 5)。N4 处理花蕾的^{15}N 积累量高于 N2,与^{15}N 丰度结果一致,说明蕾期施氮促进了花蕾的发育及其对氮肥的吸收利用。中棉所 79 的 N1 处理的全株^{15}N 积累量显著高于 N2、N4 处理,中棉所 60 的 N1、N2 处理的全株^{15}N 积累量显著高于 N4。

表 6 结果表明,收获期棉花除了中棉所 79 的

表4 初花期棉花不同器官^{15}N丰度(%)

Table 4 ^{15}N abundance of different organs of cotton at the initial flowering stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	花蕾 Flower and bud
中棉所79 CCRI 79	N1	4.33 a	4.56 a	4.48 a	4.48 a
	N2	3.62 b	3.71 c	3.66 b	3.57 d
	N4	3.22 c	3.03 d	2.48 c	3.83 c
中棉所60 CCRI 60	N1	4.20 a	4.39 b	4.39 a	4.30 b
	N2	3.61 b	3.59 c	3.59 b	3.60 d
	N4	3.26 c	3.21 d	2.70 c	4.06 c

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表5 初花期棉花不同器官^{15}N积累量(mg/plant)

Table 5 ^{15}N accumulation amounts of different organs of cotton at the initial flowering stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	花蕾 Flower and bud	全株 Whole plant
中棉所79 CCRI 79	N1	32.12 a	111.38 a	258.40 a	49.73 a	451.63 a
	N2	22.30 b	68.74 cd	159.11 c	40.88 a	291.02 cd
	N4	25.55 ab	73.73 c	150.38 c	47.78 a	297.44 cd
中棉所60 CCRI 60	N1	28.01 ab	94.37 b	241.39 a	53.32 a	417.08 ab
	N2	26.37 ab	77.99 c	201.52 b	44.58 a	350.46 bc
	N4	30.19 ab	59.10 d	108.78 d	48.87 a	246.94 d

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表6 收获期棉花不同器官^{15}N丰度(%)

Table 6 ^{15}N abundance of different organs of cotton at the harvest stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	铃壳 Boll shell	籽棉 Seed cotton
中棉所79 CCRI 79	N1	2.67 d	2.75 d	2.57 e	3.15 c	3.35 cd
	N2	3.37 bc	3.64 bc	3.66 cd	3.97 b	4.09 bc
	N3	5.06 a	5.50 a	5.74 a	5.68 a	5.73 a
	N4	4.81 a	5.24 a	5.26 ab	5.48 a	5.73 a
中棉所60 CCRI 60	N1	2.85 cd	3.04 cd	3.26 de	3.12 c	3.05 d
	N2	3.63 b	3.77 b	3.84 cd	3.85 b	4.26 b
	N3	5.16 a	5.01 a	4.42 bc	5.80 a	6.18 a
	N4	5.23 a	5.24 a	4.74 b	5.87 a	6.06 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

N3 处理、中棉所 60 的 N1 处理外,其他处理的籽棉^{15}N 丰度均比其他部位高。中棉所 79 的 N3 处理的根、茎、叶、铃壳的^{15}N 丰度高于 N1、N2、N4 处理,N4 处理的籽棉^{15}N 丰度显著高于 N1、N2,与 N3 处理差异不显著。中棉所 60 的 N4 处理的根、茎、叶、铃壳的^{15}N 丰度高于 N1、N2、N3 处理,N3 处理籽棉的^{15}N 丰度在 4 个处理中最高,与中棉所 79 的结果一致。说明初花期施氮可促进生殖器官对肥料氮的吸收。除了中棉所 60 的 N1 处理外,其他处理的籽棉^{15}N 积累量均高于根、茎、叶、铃壳(表 7)。中棉所 79 的 N4 处理籽棉^{15}N 积累量最高,其次是 N3、N1,N2 最低。中棉所 60 的 N3 处理籽棉^{15}N 积累量最高,其次是 N4、N2,N1 最低。2 个品种 N3、N4 处理的全株^{15}N 积累量均显著高于 N2 和 N1 处理,说明蕾期或初花期一次性施氮有利于棉花的生殖生长,增加了生殖器官对肥料氮的吸收量。

表 7　收获期棉花不同器官^{15}N 积累量(mg/plant)

Table 7　^{15}N accumulation amounts of different organs of cotton at the harvest stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	铃壳 Boll shell	籽棉 Seed cotton	全株 Whole plant
中棉所 79 CCRI 79	N1	27.47 h	155.92 e	237.81 f	122.73 g	540.82 d	1162.38 d
	N2	37.42 g	188.57 d	301.04 d	275.64 d	482.54 e	1285.22 c
	N3	83.98 b	338.39 a	465.51 a	423.50 a	529.66 d	1841.05 a
	N4	63.98 d	265.30 c	410.24 b	331.69 b	574.98 c	1646.19 b
中棉所 60 CCRI 60	N1	45.01 f	161.17 e	186.92 d	302.16 c	264.94 g	960.20 e
	N2	53.45 e	190.02 d	284.30 e	245.80 e	351.08 f	1124.64 d
	N3	93.45 a	345.34 a	327.82 c	207.34 f	874.09 a	1848.05 a
	N4	73.05 c	291.50 b	458.49 a	263.48 d	725.73 b	1812.26 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.3　氮肥运筹对棉株吸收的氮素来自氮肥的比例(Ndff%)及^{15}N 回收率的影响

从表 8 可以看出,初花期,棉花全株的 Ndff% 为 25.88 ~ 42.45,说明初花期棉花吸收的氮素主要来源于土壤。2 个品种 N1 处理的棉花根、茎、叶和全株的 Ndff% 均显著高于 N2 处理,而 N2 处理显著高于 N4 处理。N4 处理花蕾的 Ndff% 显著高于 N2,但低于 N1 处理。表明随底施氮量的减少,初花期棉花吸收的氮素来自氮肥的比例减少,蕾期施氮能促进初花期棉花花蕾对肥料氮的吸收。表 9 显示,收

表 8　初花期棉花不同器官吸收的氮素来自氮肥的比例(%)

Table 8　Percentages of Ndff of different organs of cotton at the initial flowering stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	花蕾 Flower and bud	全株 Whole plant
中棉所 79 CCRI 79	N1	40.76 a	43.19 a	42.36 a	42.37 a	42.45 a
	N2	33.45 b	34.41 c	33.87 b	33.02 e	33.84 b
	N4	29.78 c	29.25 d	23.97 c	38.03 c	27.27 c
中棉所 60 CCRI 60	N1	39.45 a	41.47 b	41.42 a	40.53 b	41.18 a
	N2	33.43 b	33.23 c	33.18 b	33.31 e	33.22 b
	N4	29.39 c	27.43 e	21.80 c	35.70 d	25.88 d

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表9 收获期棉花不同器官吸收的氮素来自氮肥的比例(%)

Table 9 Percentages of Ndff of different organs in cotton at the harvest stage

品种 Cultivar	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	铃壳 Boll shell	籽棉 Seed cotton	全株 Whole plant
中棉所79 CCRI 79	N1	23.59 d	24.54 d	22.64 e	28.66 c	30.75 bc	26.92 c
	N2	30.87 bc	33.75 bc	33.89 cd	37.05 b	38.32 b	36.06 b
	N3	48.35 a	52.82 a	55.34 a	54.74 a	55.20 a	54.14 a
	N4	45.73 a	50.17 a	50.34 ab	52.63 a	55.25 a	52.13 a
中棉所60 CCRI 60	N1	25.61 cd	27.54 cd	29.75 de	28.32 c	27.67 c	28.07 c
	N2	33.59 b	35.00 b	35.80 cd	35.89 b	40.09 b	36.63 b
	N3	49.31 a	47.83 a	41.74 bc	55.89 a	59.87 a	52.73 a
	N4	50.11 a	50.20 a	45.03 b	56.67 a	58.63 a	52.60 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

获期,棉花单株的Ndff%为26.92～54.14。中棉所79的N3处理的根、茎、叶、铃壳的Ndff%显著高于N1、N2,但与N4处理的差异不显著,N4处理的籽棉Ndff%显著高于N1、N2,与N3的差异不显著。中棉所60的N4处理根、茎、叶、铃壳的Ndff%显著高于N1、N2,与N3间差异不显著,N4处理籽棉的Ndff%显著高于N1、N2,与N3处理的差异不显著。2个品种N3处理的全株Ndff%与N4间差异不显著,但均显著高于N1、N2。中棉所79的N2、N3、N4处理的全株Ndff% 分别比N1高9.14、27.22、25.21个百分点。说明底氮少量后移至初花期,蕾期或花期一次性施氮比常规施氮(N1)显著提高了棉花对肥料^{15}N的吸收比例。

图1显示,不同处理棉花初花期^{15}N回收率为7.06%～30.23%,中棉所60的N2处理初花期棉株^{15}N回收率显著高于N1、N4,分别比N1、N4高7.43、23.17个百分点。中棉所79初花期的N2处理棉株^{15}N回收率显著高于N4,与N1间差异不显著。结果表明,适当减少氮肥底肥施用量比常规施氮(N1)可相对提高氮肥的回收率。

不同处理棉花收获期的^{15}N回收率为27.43%～52.80%(图2)。2个品种的N3处理收获期棉株^{15}N回收率均最高,其次为N4、N2处理,N1处理最低。中棉所79的N3、N4处理间收获期棉株^{15}N回收率差异不显著,但均显著高于N1、N2;N2、N3、N4处理收获期棉株^{15}N回收率分别比N1高3.51、19.39、13.82个百分点。中棉所60的各处理收获期棉株^{15}N回收率和中棉所79呈现相似的趋势,N2、N3、N4处理收获期

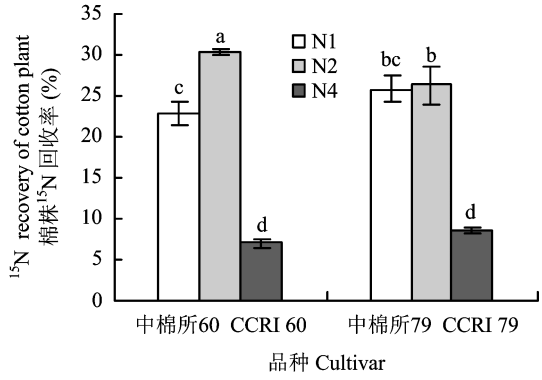

图1 氮肥运筹对初花期棉花植株^{15}N回收率的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen application strategy on ^{15}N recovery of cotton plants at the initial flowering stage

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% level.]

棉株^{15}N回收率分别比N1高4.70、25.37、24.34个百分点。结果表明,与常规施氮的底追各半处理相比,增加初花期施氮比例或蕾期、初花期一次性施氮均可提高棉花对肥料^{15}N的回收率。

2.4 氮肥运筹对棉花收获后土壤^{15}N回收率的影响

图3显示,不同处理棉花收获后土壤^{15}N回收率(土壤残留率)为11.70%～27.00%。收获期N4处理土壤^{15}N回收率显著高于N1、N2,与N3间差异不显著,N2处理土壤^{15}N回收率最低,N1、N3、N4处理棉花收获后的土壤^{15}N回收率分别比N2高1.2、6.9、15.3个百分点。

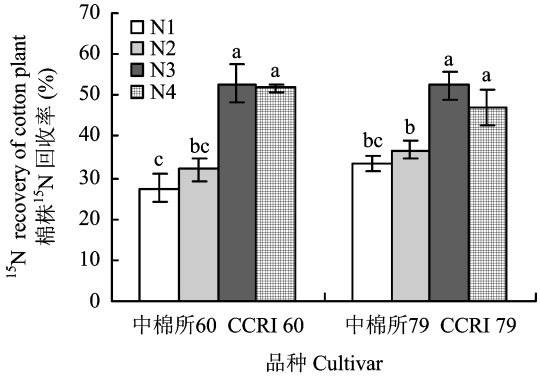

图 2　氮肥运筹对棉花植株收获期^{15}N 回收率的影响

Fig. 2　Effects of nitrogen application strategy on ^{15}N recovery of cotton plants at the harvest stage

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant among treatment at the 5% level.]

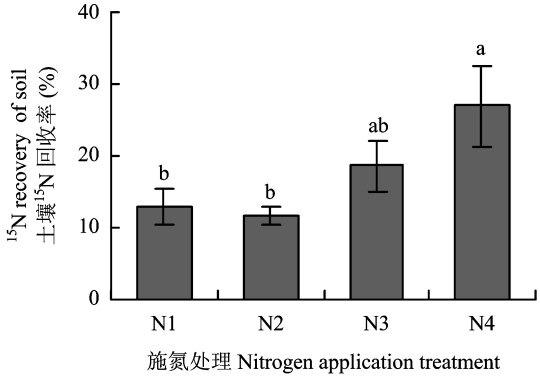

图 3　氮肥运筹对棉花收获后土壤^{15}N 回收率的影响

Fig. 3　^{15}N recovery of soil in the pot experiment of cotton after the harvest with different N application treatments

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% levels]

3　讨论与结论

有关氮肥基追比例对作物产量的影响在小麦、玉米、棉花等作物中均有报道。王晓英等[15]报道,强筋小麦济麦 20 号基肥、拔节肥比例 3∶17 处理优于基肥、拔节肥比例 1∶1 处理,能提高小麦产量与品质;战秀梅等[16]报道,春玉米氮肥减量后移能获得较高的产量,同时也能提高氮效率;赵士诚等[17]报道,夏玉米氮肥减量后移能节省氮肥,产量并不下降。以上研究表明,减少基施氮肥比例增加追施氮肥的比例能提高小麦、玉米等作物的氮肥利用率,达到增产或稳产的效果。氮肥基追比例对棉花产量的影响研究结果不尽一致,马宗斌等[18-19]报道,黄河滩区棉花施用基肥、花铃肥和盖顶肥的比例为 0.4∶0.4∶0.2 时,籽棉产量高于基肥、花铃肥和盖顶肥比例为 0∶0.4∶0.6,0.2∶0.4∶0.4,0.6∶0.4∶0 的处理,但马宗斌等[20]报道,在盆栽条件下(每盆装土 20 kg,每盆施尿素 12 g),杂交棉"豫杂 35"在氮肥基追比为 1∶2 时皮棉产量分别比 1∶1 和 2∶1 处理显著增加 3.66% 和 7.33%;Yang 等[21]盆栽和大田试验的结果表明,在施氮总量不变,初花期施总氮量的 40% 的前提下,不施底氮,盛花期施氮 60% 棉花的产量显著高于其他底氮与盛花期追氮处理。本试验条件下,2 个品种底氮、初花期追氮为 1∶2 的处理棉花单株籽棉产量均高于其他 3 个施氮处理,与马宗斌等[20]的盆栽试验结果相近,但增产效果未达到显著水平,可能与马宗斌等使用的品种为杂交棉以及其盆栽的氮肥用量较大有关。

氮肥基追比例对棉花肥料氮的利用率也有影响,Tang 等[22]报道在长江流域棉区,将底施氮肥较多地分配到盛花期能促进棉花结铃期的氮素积累,提高氮肥的利用率。Yang 等[23]报道棉株对初花期施氮的回收利用率要高于基施氮肥及盛花期施氮,而且初花期施氮损失率低于基施氮肥与盛花期施氮,棉株对初花期施入氮肥的吸收氮量占全生育期棉株吸收全氮量的 46%。本试验条件下,增加初花期施氮比例或蕾期、初花期一次性施氮提高了棉花全株尤其是籽棉氮素积累来源于肥料氮的比例,促进了棉花对肥料氮的吸收,提高了氮肥回收率,这一结果与以上结论[22-23]一致。本试验棉花^{15}N 回收率为 27.43%～52.80%,与常规灌溉农田的氮肥利用率(30%～40%)[24]较接近,但低于马丽娟等[25]的结果(47.02%～59.86%),可能因为其采用的灌溉方式为滴灌,且氮肥也是随灌溉水分 6 次滴入。

氮肥底追比例影响棉花对肥料氮的吸收,同时对土壤^{15}N 回收率也有影响。马丽娟等[25]报道滴灌棉花土壤^{15}N 回收率在 16.75%～22.41% 之间。本试验土壤^{15}N 回收率为 11.70%～27.00%,高于或低于 Karlen 等[26]的研究结果(20%),可能与本试验采用的底氮与追施氮肥比例不同有关。

本试验条件下,2 个品种底氮与追氮比例为1∶2 的处理棉花单株籽棉产量、收获期全株^{15}N 积累量、Ndff% 均高于底氮与初花期追氮为 1∶1 的处理,^{15}N 回收率略高于底氮与初花期追氮为 1∶1 的处理,而且棉花收获后肥料氮的土壤残留量低于底氮与初花期追氮为 1∶1 的处理,这还有待在大田试验中进一

步验证。本试验仅尝试了底氮与追氮1∶2、0∶1两种比例,追氮时期为蕾期、初花期,不同底追比例及不同追氮时期(如苗期、盛花期分次施用)的产量效应及氮肥回收率有待进一步研究。

参考文献:

[1] 王巧兰, 吴礼树, 赵竹青. ^{15}N示踪技术在植物N素营养研究中的应用及进展[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(1): 127-132.
Wang Q L, Wu L S, Zhao Z Q. Advance and application of ^{15}N tracer method on research of plant nitrogen nutrition[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(1): 127-132.

[2] 赵广才, 张保明, 王崇义. 应用^{15}N研究小麦各部位氮素分配利用及施肥效应[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 854-858.
Zhao G C, Zhang B M, Wang C Y. Studies on the effect of fertilization and distribution utilization of nitrogen in different parts of wheat by using ^{15}N tracer technique[J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(6): 854-858.

[3] Ju X T, Liu X J, Pan J R *et al*. Fate of ^{15}N-labeled urea under a winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain[J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 52-61.

[4] Wei C Z, Ma T F, Wang X J *et al*. The fate of fertilizer N applied to cotton in relation to irrigation methods and N dosage in arid area[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(3): 320-329.

[5] 孟维伟, 王东, 于振文, 等. ^{15}N示踪法研究不同灌水处理对小麦氮素吸收分配及利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011, 17(4): 831-837.
Meng W W, Wang D, Yu Z W *et al*. Effects of irrigation on nitrogen uptake and distribution of wheat using the ^{15}N tracer technique[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 831-837.

[6] 唐年鑫. 应用同位素示踪技术研究棉花对复(混)合肥料养分的吸收与分配[J]. 湖北农业科学, 1989,(4): 25-28.
Tang N X. Study on nutrient uptake and distribution of cotton from compound(mixed) fertilizer by the ^{15}N tracer technique[J]. Hubei Agricultural Sciences, 1989,(4): 25-28.

[7] 张美良, 吴建富, 刘经荣, 等. 应用^{15}N对棉田生态系统中氮素的吸收利用和去向的研究[J]. 江西农业大学学报,2001, 23(1): 57-61.
Zhang M L, Wu J F, Liu J R *et al*. A study on the absorbing utilization and fate of N in the ecosystem of cotton field by using ^{15}N[J]. Acta Agriculture Universities Jiangxiensis, 2001, 23(1): 57-61.

[8] McConnell J S, Mozaffari M. Yield, petiole nitrate, and node development responses of cotton to early season nitrogen fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 27(7): 1183-1197.

[9] McConnell J S, Baker W H, Miller D M *et al*. Nitrogen fertilization of cotton cultivars of differing maturity. Agronomy Journal,1993, 85: 1151-1156.

[10] 王娟, 马腾飞, 危常州, 等. 不同灌溉方式对棉花氮素吸收利用和氮肥利用率的影响[J]. 石河子大学学报, 2011, 29(6): 670-673.
Wang J, Ma T F, Wei C Z *et al*. Effect of different irrigation patterns on cotton nitrogen absorption and nitrogen fertilizer use efficiency[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2011, 29(6): 670-673.

[11] 侯振安, 李品芳, 龚江, 等. 不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 702-708.
Hou Z A, Li P F, Gong J *et al*. Effects of fertigation strategy on nitrogen uptake by cotton and use efficiency of N fertilizer[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 702-708.

[12] 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.

[13] Hou Z A, Chen W P, Li X *et al*. Effects of salinity and fertigation practice on cotton yield and ^{15}N recovery[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96: 1483-1489.

[14] 王富林, 周乐, 李洪娜, 等. 不同氮磷配比对富士苹果幼树生长及^{15}N-尿素吸收、分配与利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1102-1108.
Wang F L, Zhou L, Li H N *et al*. Effect of N, P ratios on the growth and absorption, distribution and utilization of ^{15}N-urea of Fuji Apple Saplings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1102-1108.

[15] 王晓英, 贺明荣. 追氮时期和基追比例对强筋小麦产量和品质的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(4): 711-715.
Wang X Y, He M R. Regulatory effect of topdressing stage and ratio of base and topdressing of nitrogen fertilizer on grain yield and quality of strong gluten winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(4): 711-715.

[16] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施肥对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 861-868.
Zhan X M, Li T T, Han X R *et al*. Effects of nitrogen fertilization on yield, profit and nitrogen absorption and utilization of spring maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 861-868.

[17] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2):492-497.
Zhao S C, Pei X X, He P *et al*. Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 492-497.

[18] 马宗斌, 刘桂珍, 严根土, 等. 施氮方式对转基因棉花Bt蛋白含量及产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7601-7609.
Ma Z B, Liu G Z, Yan G T *et al*. Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of Bacillus thuringiensis insecticidal protein and yield of transgenic cotton[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7601-7609.

[19] 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.

[20] 马宗斌, 房卫平, 谢德意, 等. 氮肥基追比对抗虫杂交棉叶片衰老和产量的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(10): 2062-2066.
Ma Z B, Fang W P, Xie D Y *et al*. Effects of different ratios of base and topdressing nitrogen fertilizer on the leaf senescence and yield of insect resistant hybrid cotton[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, 28(10): 2062-2066.

[21] 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.

[22] Tang H Y, Yang G Z, Zhang X L *et al*. Improvement of fertilizer N recovery by allocating more N for later application in cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. International Journal of Basic & Applied Sciences, 2012, 12(4): 32-37.

[23] Yang G Z, Chu K Y, Tang H Y *et al*. Fertilizer ^{15}N accumulation, recovery and distribution in cotton plant as affected by N rate and split[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(6): 999-1007.

[24] Rochester I J, Constable G A, Macleod D A. Cycling of fertilizer and cotton crop residue nitrogen[J]. Australian Journal of Soil Research, 1993, 31: 597-609.

[25] 马丽娟, 侯振安, 闵伟, 等. 适宜咸水滴灌提高棉花水氮利用率[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 130-138.
Ma L J, Hou Z A, Min W *et al*. Drip irrigation with suitable saline water improves water use efficiency for cotton[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 130-138.

[26] Karlen D L, Hunt P G, Matheny T A. Fertilizer ^{15}nitrogen recovery by corn, wheat, and cotton grown with and without pre-plant tillage on Norfolk loamysand[J]. Crop Science, 1996, 36: 975-981.