

# 施氮量对土壤–棉花系统中氮素吸收利用和氮素去向的影响

王士红<sup>1,2</sup>, 聂军军<sup>1</sup>, 李秋芝<sup>2</sup>, 尹会会<sup>2</sup>, 宋宪亮<sup>1\*</sup>, 孙学振<sup>1\*</sup>

(1 山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; 2 聊城市农业科学研究院, 山东聊城 252000)

**摘要:**【目的】明确棉田施氮效应, 为科学施氮提供理论依据。【方法】采用<sup>15</sup>N示踪法进行盆栽试验, 以聊棉6号为材料, 设N0、2、4、6、8 g/pot (分别记作N0、N2、N4、N6、N8) 5个施氮量, 研究施氮量对土壤–棉花系统中氮素吸收利用及氮素去向的影响。【结果】在收获期, 随着施氮量的增加, 籽棉产量先升高后降低, N2、N4处理籽棉产量和收获指数明显高于其他处理; 干物质积累量和氮素吸收量增加, 均以N8处理最大; 氮肥农学利用率显著降低, 而氮肥回收率则先升高后降低, 以N4处理最大, 其与N2处理差异不显著; 棉株肥料<sup>15</sup>N吸收量显著升高, 而<sup>15</sup>N回收率呈下降趋势; 肥料<sup>15</sup>N残留量、<sup>15</sup>N损失量显著升高, <sup>15</sup>N残留率为21.87%~29.76%, <sup>15</sup>N损失率为17.68%~33.61%, 与初花期相比, 收获期<sup>15</sup>N残留量、<sup>15</sup>N损失量增加而<sup>15</sup>N残留率、<sup>15</sup>N损失率降低, 花后对肥料<sup>15</sup>N吸收利用增强, <sup>15</sup>N回收率升高, <sup>15</sup>N残留率和<sup>15</sup>N损失率降低。棉株氮素来源于土壤氮的比例(Ndfs)为66.35%~81.87%, 土壤氮素激发率为114.44%~125.86%, 各施氮量间土壤氮素均产生正激发效应, 且差异不显著。【结论】N2处理肥料<sup>15</sup>N回收率为58.65%、<sup>15</sup>N残留率为23.67%、<sup>15</sup>N损失率为17.68%, 可在保证棉花高产基础上, 减少氮肥投入, 充分发挥土壤氮库的作用, 提高氮肥吸收利用, 降低损失, 满足高产和环境友好的需求。

**关键词:** 棉花; 施氮量; <sup>15</sup>N示踪; 氮肥利用率; 氮肥残留; 氮肥损失

## Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization, and fate of nitrogen in soil-cotton system

WANG Shi-hong<sup>1,2</sup>, NIE Jun-jun<sup>1</sup>, LI Qiu-zhi<sup>2</sup>, YIN Hui-hui<sup>2</sup>, SONG Xian-liang<sup>1\*</sup>, SUN Xue-zhen<sup>1\*</sup>

(1 Agronomy College, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China;  
2 Liaocheng Academy of Agricultural Sciences, Liaocheng, Shandong 252000, China)

**Abstract:** 【Objectives】 In order to clarify the effect of nitrogen application on high-yield cotton fields in this region. It provides a theoretical basis for scientific nitrogen application. 【Methods】 The <sup>15</sup>N tracer method was used in the pot experiment. It was conducted with Liaomian 6 as material, five nitrogen rates of 0, 2, 4, 6 and 8 g/pot were designed, and recorded as N0, N2, N4, N6 and N8, respectively. The experiment was conducted to study the effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization, and fate of nitrogen in soil-cotton system. 【Results】 At harvest stage, with the increase of nitrogen application, the yield of seed cotton increased first and then decreased. The seed cotton yield and harvest index of N2 and N4 were significantly higher than those of other treatments. The accumulation of dry matter and nitrogen increased, and they all reached the maximum in N8. At the same time, the N agricultural efficiency decreased significantly, and the N recovery efficiency increased first and then decreased. It achieved the maximum value in N4, but there was no significant difference with taht in N2. The uptake of fertilizer <sup>15</sup>N increased significantly, and <sup>15</sup>N recovery rate showed a downward trend in cotton plant. Positive excitation effect was produced in all nitrogen application treatments.

收稿日期: 2019-07-31 接受日期: 2019-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601253); 国家现代农业产业技术体系(棉花)建设专项(CARS-18-37); 山东省现代农业产业技术体系(棉花)建设专项(SDAIT-03); 山东省自然科学基金项目(ZR2016CQ20)。

联系方式: 王士红 E-mail: wshguyu@126.com

\* 通信作者 宋宪亮 E-mail: xlsong@sdau.edu.cn; 孙学振 E-mail: sunxz@sdau.edu.cn

With the increase of nitrogen application,  $^{15}\text{N}$  residue and  $^{15}\text{N}$  loss of fertilizer increased significantly. After topdressing,  $^{15}\text{N}$  residue and  $^{15}\text{N}$  loss increased while  $^{15}\text{N}$  residue rate and loss rate decreased. This indicated that the absorption and utilization of  $^{15}\text{N}$  increased after anthesis, and the recovery rate of  $^{15}\text{N}$  of cotton plant increased, resulting in the decrease of residue rate and loss rate. The proportion of cotton nitrogen from soil was 66.35%–81.87%, and the priming effect of soil nitrogen was 114.44%–125.86%. **【 Conclusions 】** The recovery rate of  $^{15}\text{N}$  was 58.65%, the residual rate of  $^{15}\text{N}$  was 23.67% and the loss rate of  $^{15}\text{N}$  was 17.68% when nitrogen application rate was N2. N2 can guarantee high cotton yield, reduce the input of nitrogen fertilizer, reduce losses and improve the absorption and utilization of nitrogen fertilizer. In N2 treatment, soil nitrogen pool reaches a balanced state, which could not only achieve high yield but also meet the needs of environmental friendliness.

**Key words:** cotton; N application rate;  $^{15}\text{N}$  tracing; N use efficiency; N residue; N loss

氮肥是制约棉花高产的关键因素<sup>[1]</sup>。黄河流域棉区是我国棉花主产区, 为保障棉花高产稳产, 氮肥投入快速增加, 一般高产棉田氮肥施入量为 240~350 kg/hm<sup>2</sup><sup>[2-6]</sup>, 氮肥利用率低、损失严重, 既容易造成环境污染又增加了植棉成本。根据棉花生长需求, 减少施氮量, 提高氮肥利用率, 充分发挥土壤氮库增产潜力是当前棉花生产亟需解决的问题。氮肥利用率通常采用差值法计算, 但对作物吸收的氮是来源于肥料氮还是土壤氮未能给出明确识别。用同位素示踪法测定氮肥利用率已成为普遍使用的方法<sup>[7-9]</sup>, 该方法不仅可以明确氮素来源, 还可通过氮素在植株各器官的分布状况反映植株长时间对氮素的利用, 以及氮素在植株体内代谢和运转的综合信息<sup>[10]</sup>。利用同位素示踪法研究棉花氮素吸收利用已有报道<sup>[11-14]</sup>, 但主要集中在研究不同施肥方式、不同肥水条件互作、不同土壤肥力等对棉花氮素吸收利用的影响, 而关于土壤-棉花系统氮素流动, 肥料氮对土壤氮的激发效应, 肥料氮真实损失情况还少有报道。本研究以聊棉 6 号为试验材料, 利用 $^{15}\text{N}$  示踪法研究施氮量对肥料氮和土壤氮的吸收利用以及肥料氮去向的影响, 旨在为棉花高产增效提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

盆栽试验于 2016 年在山东农业大学棉花科研基地聊城市茌平县振兴办事处 (36°31'N、116°16'E) 进行, 供试土壤为粘土, 取自耕层 0—20 cm 土壤, 将土壤中的杂物清除后, 风干过筛备用。试验用盆为白色塑料花盆, 上部内直径 38 cm、底部内直径 30 cm、高 40 cm, 装盆时土壤含水量 15.7%, 每盆装干土 40 kg, 并埋入土壤中, 花盆按行距 76 cm 摆放, 每盆 1 株, 四周设置 5 m 相同密度保护行。

### 1.2 试验设计

设 5 个施氮量, 分别为每盆施纯氮 0、2、4、6、8 g (对应大田施氮量为 0、105、210、315、420 kg/hm<sup>2</sup>, 分别记作 N0、N2、N4、N6、N8), 氮肥全部来源为 $^{15}\text{N}$  同位素标记尿素 (丰度 10.16%, 上海化工研究院生产), 按照本地施肥习惯将氮肥分两次施入, 基追比 1:1, 每处理重复 12 次, 随机区组设计。于 4 月 28 日播种, 地膜覆盖, 每盆 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (过磷酸钙) 和 K<sub>2</sub>O (硫酸钾) 施用量均为 2 g (对应大田用量为 105 kg/hm<sup>2</sup>), 基施氮肥和全部磷钾肥播种时集中施入深 10 cm 土壤中, 剩余 50% 氮肥于初花期追施。

### 1.3 测定项目与方法

于初花期、收获期取样, 棉株样品置于电热恒温干燥箱内 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘干至恒重, 称量生物量, 粉碎待用。土壤样品自然风干后磨碎, 过 0.25 mm 筛备用。每两周收集脱落器官, 分别归入初花期和收获期样品中, 称重并粉碎。棉株和土壤全氮含量用半微量凯氏定氮法测定,  $^{15}\text{N}$  丰度用 ZHT-03 质谱计测定。

### 1.4 计算公式

棉株氮素来源于肥料 $^{15}\text{N}$  的比例 (Ndff, %) = 植株样品中 $^{15}\text{N}$  肥料原子百分超/标记肥料的 $^{15}\text{N}$  原子百分超 × 100;

棉株氮素来源于土壤的比例 (Ndfs, %) = 1 - Ndff;

棉株氮素吸收量 (g) = 单株干重 × 棉株含氮量;

棉株氮素来源于肥料 $^{15}\text{N}$  的量 (g) = 棉株氮素吸收量 × Ndff;

棉株氮素来源于土壤氮的量 (g) = 棉株氮素吸收量 × Ndfs;

$^{15}\text{N}$  回收率 (%) = 棉株吸收的肥料氮量/施氮量 × 100;

$^{15}\text{N}$  残留量 (g) = 土样干重 × 土壤全氮含量 × 土壤 $^{15}\text{N}$  原子百分超 × 100;

$^{15}\text{N}$  残留率 (%) = 土壤氮肥残留量/施氮量 × 100;

$^{15}\text{N}$  损失量 (g) = 施氮量 - 棉株吸收的肥料氮量 - 土壤氮肥残留量;

$^{15}\text{N}$  损失率 (%) = (施氮量 - 棉株吸收的肥料氮量 - 土壤氮肥残留量)/施氮量 × 100;

土壤氮素激发率 (%) = 施氮处理植株氮素来源于土壤氮的量/不施氮处理植株总吸氮量 × 100;

氮肥农学利用率 (N agricultural efficiency, NAE, g/g) = (施氮处理籽棉产量 - 不施氮处理籽棉产量)/施氮量;

氮肥回收率 (N recovery efficiency, NRE, %) = (施氮处理氮素吸收量 - 不施氮处理氮素吸收量)/施氮量 × 100。

## 1.5 数据处理

试验数据处理和图表制作采用 Microsoft Excel 2007, 统计分析采用 SPSS Statistics 23.0, 多重比较采用 LSD (Least Significant Difference) 法, 差异显著

水平为 0.05 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 棉花产量及其构成因素

由表 1 可知, 供试施氮量范围内, 籽棉产量和铃数以 N4 和 N2 处理较高, 二者均显著高于其他处理, 铃重 N2、N4、N6、N8 处理均高于 N0, 各施氮处理间差异不显著, 而衣分则无显著变化, 可见铃数、铃重是获得高产的重要因素。但生物量 N4、N6 和 N8 处理显著高于 N2 处理, N2 又显著高于 N0, 收获指数 N2 处理显著高于 N6 和 N8 处理, 与 N4 处理差异不显著, 可见施氮量超过 N4 处理后, 氮素主要增加了生物量, 而没有增加籽棉产量, 收获指数反而降低。

### 2.2 氮肥吸收利用

由表 2 可知, 随着施氮量增加, 棉株氮素吸收量呈升高趋势, 以 N8 处理最大, 与 N6 处理差异不显著, 与其他处理差异显著; 棉籽氮素吸收量则呈先升高后降低的趋势, 以 N4 处理最大, 与 N2 处理

表 1 不同施氮量下棉花产量及其构成因素

Table 1 Cotton yield and its components under different N application rates

处理 Treatment	单株铃数 Bolls per plant	铃重 (g/boll) Boll weight	衣分 (%) Lint percentage	籽棉产量 (g/plant) Seed cotton yield	生物量 (g/plant) Biological yield	收获指数 (%) Harvest index
N0	13.30 c	5.06 b	42.15 a	67.34 d	229.79 c	29.31 c
N2	15.86 a	5.44 a	41.95 a	86.27 a	249.12 b	34.66 a
N4	15.77 a	5.50 a	42.14 a	86.71 a	264.95 a	32.75 ab
N6	14.89 b	5.52 a	41.86 a	82.12 b	266.81 a	30.78 bc
N8	14.39 b	5.43 a	42.10 a	78.19 c	268.72 a	29.10 c

注 (Note): N0, N2, N4, N6 and N8 对应大田施氮量为 0、105、210、315、420 kg/hm<sup>2</sup>; 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。N rates in N0, N2, N4, N6 and N8 are 0, 105, 210, 315, 420 kg/hm<sup>2</sup>. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

表 2 不同施氮量下棉花氮肥吸收与利用

Table 2 Nitrogen absorption and utilization of cotton under different N application rates

处理 Treatment	氮素吸收总量 (g/plant) Total N uptake	棉籽氮素吸收量 (g/plant) Cottonseed N uptake	氮素收获指数 (%) N harvest index	氮肥农学利用率 (g/g) NAE	氮肥回收率 (%) NRE
N0	4.63 d	3.30 d	71.44 a		
N2	6.47 c	4.07 ab	63.05 b	9.47 a	57.82 a
N4	7.76 b	4.33 a	55.76 c	4.84 b	61.20 a
N6	8.36 a	3.83 bc	45.87 d	2.46 c	50.76 ab
N8	8.72 a	3.50 cd	40.28 d	1.36 d	42.57 b

注 (Note): N0, N2, N4, N6 and N8 对应大田施氮量为 0、105、210、315、420 kg/hm<sup>2</sup>; 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。N rates in N0, N2, N4, N6 and N8 are 0, 105, 210, 315, 420 kg/hm<sup>2</sup>. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

差异不显著, 但显著高于其他处理; 各施氮处理中氮素收获指数和氮肥农学利用率均以 N2 处理最高, 显著高于其他处理; 氮肥回收率 N2 和 N4 处理接近, 二者均显著高于 N8 处理。可见, N2 处理棉籽中吸收的氮素与 N4 处理没有显著差异, 但显著高于 N8 处理, 而 N6 和 N8 处理虽然棉株总吸氮量显著高于 N2 和 N4 处理, 但在棉籽中的分配却不及 N2 和 N4 处理, 因此, N2 和 N4 处理有较高的氮肥农学利用率和氮肥回收率。

### 2.3 棉株对不同来源氮素的吸收

由表 3 可知, 随着施氮量的增加, 不同时期棉株对土壤氮和肥料氮的吸收存在一定差异。初花期, 棉株氮素来源于土壤氮的量随着施氮量增加先升高后降低, 以 N2 处理最大, 与其他处理差异显著, 而各施氮处理来源于土壤氮的比例 (Ndfs) 则为 N2 处理显著高于其他处理; 棉株氮素来源于肥料氮的量和比例 (Ndff) 均随着施氮量增加而增加, N8 处理显著高于其他处理, N4 与 N6 处理差异不显著。收获期, 棉株对不同来源氮素吸收的变化趋势与开花期相同, 但棉株氮素来源于土壤氮的量最大值出现在 N6 处理, 且 N6 处理与 N4、N8 处理差异不显著, 与其他处理差异显著, 来源于土壤氮的比例 (Ndfs) 范围是 66.35%~81.87%; 棉株氮素来源于肥料氮的量和比例 (Ndff) 范围是 18.13%~33.65%。

### 2.4 肥料<sup>15</sup>N 对土壤氮的激发效应

由表 4 可知, 不同时期肥料<sup>15</sup>N 对土壤氮素激发率不同, 各处理均产生正激发效应, 其变化范围为 114.44%~125.86%。基施肥料<sup>15</sup>N 后土壤氮素激发率随施氮量增加呈下降趋势, N2 处理显著高于其他处理, N4、N6 处理差异不显著, 与 N2 处理相比, N4、N6、N8 处理分别下降了 5.12、8.11、18.19 个百分点, 可见生育前期增施肥料<sup>15</sup>N 会抑制棉株从土壤中吸收氮素。追施肥料<sup>15</sup>N 后土壤氮素激发率则随施氮量增加呈上升趋势, 以 N8 处理最大, 与 N4、N6 处理差异不显著, 与 N2 处理差异显著, 与 N2 处理相比, N4、N6、N8 处理分别提高了 15.05、24.92、30.53 个百分点, 与基施肥料<sup>15</sup>N 相比, 追施肥料<sup>15</sup>N 后 N6、N8 处理从土壤中吸收氮素量上升, 激发效应增强。

### 2.5 肥料<sup>15</sup>N 去向

如图 1 所示, 不同时期肥料<sup>15</sup>N 去向存在一定差异。初花期, 随着施氮量增加, <sup>15</sup>N 吸收量增加, N2 处理显著低于其他处理, N4 和 N6 处理差异不显著, <sup>15</sup>N 回收率则先升高后降低, 以 N4 处理最大, 与 N2 处理差异不显著, 与其他处理差异显著; <sup>15</sup>N 残留量和<sup>15</sup>N 损失量则显著升高, <sup>15</sup>N 残留率 N6 处理最大, 与 N4 处理差异显著, 与其他处理差异不显著, <sup>15</sup>N 损失率呈上升趋势, N8 处理显著高于其他处理, 而 N4、N6、N8 处理间差异不显著。收获期, <sup>15</sup>N 吸收量的变化趋势与初花期相同,

表 3 不同施氮量下棉花吸收的土壤氮和肥料氮

Table 3 Effects of <sup>15</sup>N rate on soil nitrogen and fertilizer nitrogen absorption

生长期 Growth stage	处理 Treatment	来自土壤氮 From soil nitrogen		来自肥料氮 From fertilizer nitrogen	
		(g/plant)	Ndfs (%)	(g/plant)	Ndff (%)
初花期 Initial flowering	N0	1.89 d			
	N2	2.46 a	87.36 a	0.36 c	12.64 c
	N4	2.36 b	75.52 b	0.77 b	24.48 b
	N6	2.31 b	73.62 b	0.83 b	26.38 b
	N8	2.12 c	68.77 c	0.96 a	31.23 a
收获期 Harvesting	N0	4.63 c			
	N2	5.29 b	81.87 a	1.17 d	18.13 c
	N4	5.61 ab	72.28 b	2.15 c	27.72 b
	N6	5.82 a	69.58 b	2.54 b	30.42 b
	N8	5.79 a	66.35 c	2.93 a	33.65 a

注 (Note): N0, N2, N4, N6 and N8 对应大田施氮量为 0、105、210、315、420 kg/hm<sup>2</sup>; 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。N rates in N0, N2, N4, N6 and N8 are 0, 105, 210, 315, 420 kg/hm<sup>2</sup>. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

表 4 不同施氮时期及施用量下土壤氮素激发率 (%)  
Table 4 Priming effect of soil N under different application time and rates

处理 Treatment	基施 Basal application	追施 Topdressing	总计 Sum
N2	130.27 a	103.50 b	114.44 a
N4	125.15 b	118.55 ab	121.23 a
N6	122.16 b	128.42 a	125.86 a
N8	112.08 c	134.03 a	125.05 a

注 (Note): N0, N2, N4, N6 and N8 对应大田施氮量为 0、105、210、315、420 kg/hm<sup>2</sup>; 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。N rates in N0, N2, N4, N6 and N8 are 0, 105, 210, 315, 420 kg/hm<sup>2</sup>. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

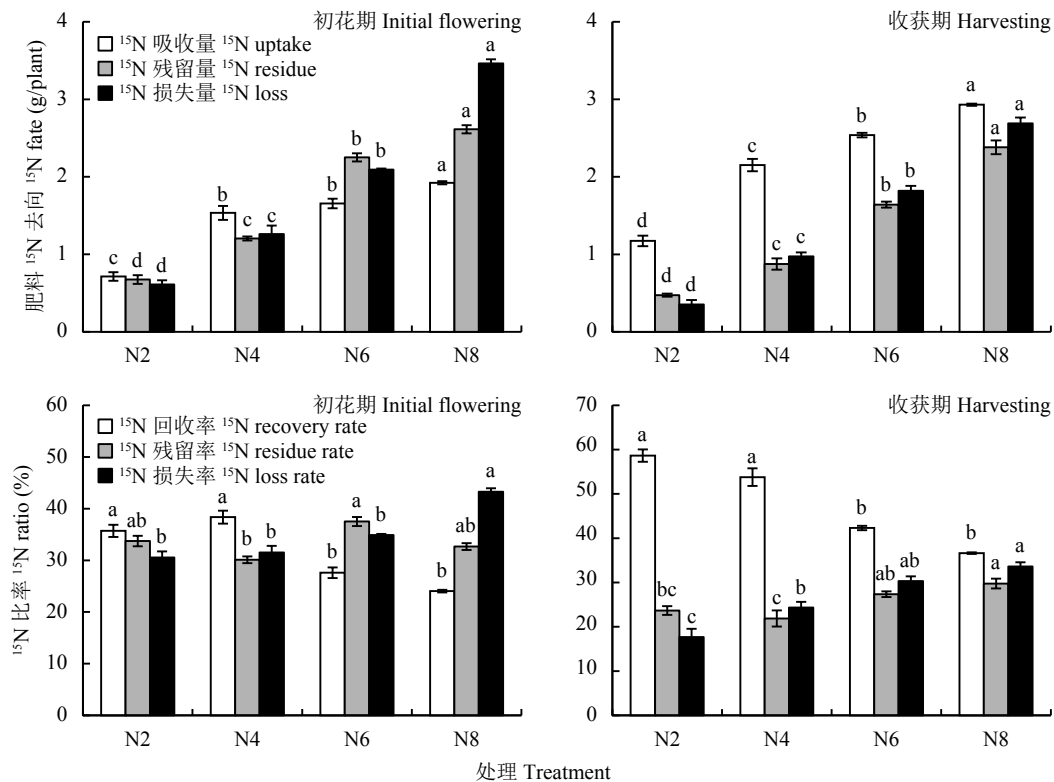


图 1 施氮量对<sup>15</sup>N 去向的影响

Fig. 1 Effect of <sup>15</sup>N rate on fate of <sup>15</sup>N

[注 (Note): N0, N2, N4, N6, N8 对应大田施氮量为 0、105、210、315、420 kg/hm<sup>2</sup>; 柱上不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。N rates in N0, N2, N4, N6 and N8 are 0, 105, 210, 315, 420 kg/hm<sup>2</sup>. Different letters above the bars indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ )]

<sup>15</sup>N 回收率则呈下降趋势, 以 N2 处理最大, 与 N4 处理差异不显著, 与其他处理差异显著; <sup>15</sup>N 残留量、<sup>15</sup>N 损失量的变化趋势与初花期也相同, <sup>15</sup>N 残留率则呈先降低后升高的趋势, N6、N8 处理显著高于 N4 处理。与初花期相比, 收获期<sup>15</sup>N 吸收量、<sup>15</sup>N 回收率升高, <sup>15</sup>N 残留量、<sup>15</sup>N 损失量升高, <sup>15</sup>N 残留率、<sup>15</sup>N 损失率下降, <sup>15</sup>N 残留率为 21.87%~29.76%, <sup>15</sup>N 损失率为 17.68%~33.61%。表明花后对肥料<sup>15</sup>N 的吸收利用增强, <sup>15</sup>N 回收率升

高, <sup>15</sup>N 残留率和<sup>15</sup>N 损失率降低, 其中, N2 处理时<sup>15</sup>N 回收率为 58.65%, <sup>15</sup>N 残留率为 23.65%, <sup>15</sup>N 损失率为 17.68%。

### 3 讨论

#### 3.1 棉花产量及其构成因素

施氮量是调节棉花干物质积累和分配的重要手段, 对棉花生长发育和产量潜力具有调控作用。李

永旗等<sup>[11]</sup>研究发现,棉花叶片喷施1% <sup>15</sup>N-尿素,苗期干物质积累量和收获期籽棉产量最高;张文等<sup>[12]</sup>采用<sup>15</sup>N微区试验研究发现,施氮量由240 kg/hm<sup>2</sup>增大到360 kg/hm<sup>2</sup>时,籽棉产量增加4.73%。李鹏程等<sup>[13]</sup>利用<sup>15</sup>N示踪研究表明,低肥力土壤条件下,施氮量为225 kg/hm<sup>2</sup>时,棉花单株干物质积累量、籽棉产量最高。本研究发现,随着施氮量增加,籽棉产量、铃数和铃重先升高后降低,N<sub>2</sub>、N<sub>4</sub>处理高产,N<sub>8</sub>处理干物质积累量获得最大值,干物质积累量是棉花高产的基础,铃数、铃重则是高产的重要因素,生产中应重视铃数、铃重协同提高,加大干物质积累向生殖器官的分配比例,提高收获指数是棉花高产的重要保证。

### 3.2 氮肥的吸收利用

棉花氮素吸收是干物质积累的前提<sup>[15]</sup>,研究证实棉花氮素的吸收与干物质积累趋势一致,呈线性正相关<sup>[16-17]</sup>。本研究表明,随着施氮量增加,棉株氮素吸收量呈升高趋势,分配到棉籽的氮素量则先升高后降低,氮素收获指数显著降低。氮肥农学利用率随着施氮量增加显著降低,与N<sub>2</sub>处理相比,N<sub>4</sub>、N<sub>6</sub>、N<sub>8</sub>处理分别下降48.85%、73.98%、85.67%,氮肥回收率则为N<sub>2</sub>、N<sub>4</sub>处理显著高于N<sub>8</sub>处理,棉株获得高产不仅要通过增加氮素吸收量,而且还要解决好氮素在营养器官和生殖器官中分配与利用的问题,施氮量过大不利于氮肥的高效利用。

### 3.3 棉株对不同来源氮素的吸收

棉株吸收利用的氮素一部分来源于肥料氮,另一部分来源于土壤氮<sup>[18-19]</sup>。前人<sup>[11-13]</sup>研究认为,适宜的施氮量可以增加棉株对肥料<sup>15</sup>N的吸收量,提高棉株的肥料<sup>15</sup>N回收率。本试验条件下,随着施氮量增加,棉株氮素来源于肥料<sup>15</sup>N的量显著升高,<sup>15</sup>N回收率呈下降趋势,而来源于土壤氮的量先升高后降低,来源于土壤氮的比例(Ndfs)呈下降趋势,范围为66.35%~81.87%(收获期)。无论施氮量多少,土壤提供氮素的主导地位没变,仍然是植物最大的供氮源,这与山楠等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。与此同时,各施氮处理土壤氮素均产生正激发效应,基施<sup>15</sup>N土壤氮素激发率N<sub>2</sub>处理显著高于其他处理,表明生育前期增施肥料<sup>15</sup>N会抑制棉株从土壤中吸收氮素。追施<sup>15</sup>N土壤氮素激发率则呈上升趋势,可见高氮处理从土壤中吸收氮素量上升,激发效应增强。基施<sup>15</sup>N与追施<sup>15</sup>N土壤氮素激发率表现趋势相反,表明生育前期施氮量过大会增大碳氮比,降低土壤氮素

激发效应,而生育中后期随着生长高峰的到来,棉株加大了对土壤氮素的吸收,提高微生物活性,降低碳氮比,增加土壤氮素激发效应。

### 3.4 氮肥的去向

未被棉株吸收利用的肥料<sup>15</sup>N一部分残留土壤,另一部分则以不同形态损失。马丽娟等<sup>[21]</sup>研究发现,滴灌棉花土壤<sup>15</sup>N残留率为16.75%~22.41%。李鹏程等<sup>[13]</sup>研究表明,低等肥力棉田,土壤<sup>15</sup>N残留率为11.7%~27.0%。本试验条件下,随着施氮量增加,肥料<sup>15</sup>N残留量显著升高,残留率先降低后升高,各施氮处理分别为23.67%、21.87%、27.36%、29.76%,与朱兆良<sup>[22]</sup>总结发现国内氮肥残留率为15%~30%相符。研究<sup>[23-24]</sup>报道,随施氮量增加,肥料<sup>15</sup>N损失量显著升高,巨晓棠等<sup>[25]</sup>研究表明,当施氮量由120 kg/hm<sup>2</sup>增加至360 kg/hm<sup>2</sup>时,损失率由10.20%升高到55.90%。本研究条件下,随着施氮量增加,肥料<sup>15</sup>N损失量显著增加,损失率上升。初花期肥料<sup>15</sup>N去向表现为损失量>残留量>吸收量,收获期为吸收量>损失量>残留量。由此可见,生育前期肥料<sup>15</sup>N损失占据主导地位,生育后期棉株吸收占据主导地位,这可能与基施肥料<sup>15</sup>N位于表层土壤有关,应改进施肥管理措施,尽量深施减少气态N损失<sup>[26]</sup>。也可能与本试验将棉株全生育期内脱落器官收回有关,尤其是花后大量蕾铃脱落器官的收回增加了肥料<sup>15</sup>N吸收量,减少了肥料<sup>15</sup>N损失量,但在实际生产中,如何明确氮肥的主要损失途径和减少氮损失仍需进一步研究。

## 4 结论

在收获期,棉株吸收的氮素源于土壤氮的比例为66.35%~81.87%,土壤是供氮主体,是棉株最大供氮源。各施氮处理土壤氮素均产生正激发效应,土壤氮素激发率为114.44%~125.86%。因此在保证棉花高产基础上,应减少氮肥投入,充分发挥土壤氮库的重要作用,提高氮肥吸收利用,降低损失,施氮量为N<sub>2</sub>处理时<sup>15</sup>N回收率为58.65%、<sup>15</sup>N残留率为23.67%、<sup>15</sup>N损失率为17.68%,既可实现高产又满足环境友好的需求。

### 参考文献:

- [1] 石洪亮,严青青,张巨松,等.氮肥对非充分灌溉下棉花花铃期光合特性及产量的补偿作用[J].作物学报,2018,44(8):1196-1204.  
Shi H L, Yan Q Q, Zhang J S, et al. Compensation effect of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and yield during cotton

- flowering boll-setting stage under non-sufficient drip irrigation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(8): 1196–1204.
- [2] 胡斌, 张民, 刘春生. 测土配方施肥对鲁西地区提高棉花产量及肥料利用效率的效果[J]. *中国棉花*, 2014, 41(9): 19–21.  
Hu B, Zhang M, Liu C S. Effects of soil testing and fertilization recommendation on cotton yield and fertilizer use efficiency in main cotton cultivation areas of western Shandong Province[J]. *China Cotton*, 2014, 41(9): 19–21.
- [3] 王士红, 杨中旭, 李秋芝, 等. 鲁西地区抗虫棉品种筛选试验[J]. *山东农业科学*, 2013, 45(12): 5–7, 39.  
Wang S H, Yang Z X, Li Q Z, *et al.* Screening test of insect-resistant cotton varieties in western Shandong[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2013, 45(12): 5–7, 39.
- [4] 王家宝, 王留明, 姜辉, 等. 高产稳产型棉花品种鲁棉研 28 号选育及其栽培生理特性研究[J]. *棉花学报*, 2014, 26(6): 569–576.  
Wang J B, Wang L M, Jiang H, *et al.* Breeding of high and stable-yielding cotton variety SCRC28 and its physiological characteristics for cultivation[J]. *Cotton Science*, 2014, 26(6): 569–576.
- [5] 卢合全, 李振怀, 李维江, 等. 适宜轻简栽培的棉花品种 K836 的选育及高产简化栽培技术[J]. *中国棉花*, 2015, 42(6): 33–37.  
Lu H Q, Li Z H, Li W J, *et al.* Breeding of cotton cultivar K836 suitable for extensive farming and its high-yielding cultivation techniques[J]. *China Cotton*, 2015, 42(6): 33–37.
- [6] 尹会会, 李秋芝, 李海涛, 等. 鲁西地区不同类型土壤对棉花产量及其构成因素与成铃时空分布的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(36): 87–90.  
Yin H H, Li Q Z, Li H T, *et al.* Effect of different soil textures on cotton yield, composition factors and boll spatial-temporal distribution in western Shandong[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(36): 87–90.
- [7] 徐明杰, 董娴娴, 刘会玲, 等. 不同管理方式对小麦氮素吸收、分配及去向的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1084–1093.  
Xu M J, Dong X X, Liu H L, *et al.* Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1084–1093.
- [8] 张忠学, 陈帅宏, 陈鹏, 等. 基于<sup>15</sup>N 示踪技术的不同灌水方案玉米追肥氮素去向研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 262–272.  
Zhang Z X, Chen S H, Chen P, *et al.* Experiment on nitrogen utilization of maize under different water and fertilizer conditions based on <sup>15</sup>N tracing technique[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 262–272.
- [9] 李鹏飞, 李小坤, 侯文峰, 等. 应用<sup>15</sup>N 示踪技术研究控释尿素在稻田中的去向及利用率[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3961–3971.  
Li P F, Li X K, Hou W F, *et al.* Studying the fate and recovery efficiency of controlled release urea in paddy soil using <sup>15</sup>N tracer technique[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3961–3971.
- [10] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义—兼论对传统氮肥利用率的误解[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 921–933.  
Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer avail ability ratio—discussion misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 921–933.
- [11] 李永旗, 董合林, 李鹏程, 等. 叶施<sup>15</sup>N-尿素增加棉花苗期氮素吸收利用的生理生化机制研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1553–1559.  
Li Y Q, Dong H L, Li P C, *et al.* Physiological and biochemical mechanism of <sup>15</sup>N-urea foliage spraying in increasing the nitrogen uptake and utilization of cotton seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(6): 1553–1559.
- [12] 张文, 周广威, 闵伟, 等. 应用<sup>15</sup>N 示踪法研究咸水滴灌棉田氮肥去向[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 372–380.  
Zhang W, Zhou G W, Min W, *et al.* Fate of fertilizer N in saline water drip-irrigated cotton field using <sup>15</sup>N tracing method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 372–380.
- [13] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 应用<sup>15</sup>N 研究氮肥运筹对棉花氮素吸收利用及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 590–599.  
Li P C, Dong H L, Liu A Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application strategy on N uptake, utilization and yield of cotton using <sup>15</sup>N trace technique[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3): 590–599.
- [14] 李鹏程, 郑苍松, 孙森, 等. 利用<sup>15</sup>N 示踪研究不同肥力土壤棉花氮肥减施的产量与环境效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1199–1206.  
Li P C, Zheng C S, Sun M, *et al.* Using <sup>15</sup>N tracing technique to study the yield and environmental effect of decreasing N fertilization on cotton in different fertility fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5): 1199–1206.
- [15] 郑剑超, 闫曼曼, 张巨松, 等. 遮荫条件下氮肥运筹对棉花生长和氮素积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 94–103.  
Zheng J C, Yan M M, Zhang J S, *et al.* Effects of nitrogen application on growth and nitrogen accumulation of cotton under shading condition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1): 94–103.
- [16] 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.
- [17] 李春艳, 文如意, 石洪亮, 等. 海岛棉与陆地棉干物质积累与氮素吸收分配的特点[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 175–181.  
Li C Y, Wen R Y, Shi H L, *et al.* Dry matter and nitrogen accumulation distribution on island cotton and upland cotton[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2017, 35(1): 175–181.
- [18] 刘艳妮, 马臣, 于昕阳, 等. 渭北旱塬兼顾冬小麦产量和环境效益的农田适宜氮肥用量[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2509–2516.  
Liu Y N, Ma C, Yu X Y, *et al.* Optimum nitrogen application rate to maximum yield and environment protection for winter wheat in Weibei dryland, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2509–2516.
- [19] 马臣, 刘艳妮, 梁路, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和硝态氮残留淋失的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1240–1248.  
Ma C, Liu Y N, Liang L, *et al.* Effects of combined application of chemical fertilizer and organic manure on wheat yield and leaching of residual nitrate-N in dryland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1240–1248.
- [20] 山楠, 杜连凤, 毕晓庆, 等. 用<sup>15</sup>N 肥料标记法研究潮土中玉米氮肥

- 的利用率与去向[J]. *植物营养与肥科学报*, 2016, 22(4): 930-936.
- Shan N, Du L F, Bi X Q, *et al.* Nitrogen use efficiency and behavior studied with  $^{15}\text{N}$  labeled fertilizer in maize in fluvo-aquic soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4): 930-936.
- [21] 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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering*, 2013, 29(14): 130-138.
- [22] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778-783.
- Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [23] 田昌, 周旋, 刘强, 等. 控释尿素减施对双季稻田氮素渗漏淋失的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3267-3274.
- Tian C, Zhou X, Liu Q, *et al.* Effects of the reduction of controlled-release urea application on nitrogen leaching in double cropping paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3267-3274.
- [24] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 532-542.
- Meng L, Zhang X L, Jiang X F, *et al.* Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 532-542.
- [25] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- [26] 杨云马, 孙彦铭, 贾良良, 等. 氮肥基施深度对夏玉米产量、氮素利用及氮残留的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2016, 22(3): 830-837.
- Yang Y M, Sun Y M, Jia L L, *et al.* Effect of base nitrogen application depth on summer maize yield, nitrogen utilization efficiency and nitrogen residue[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3): 830-837.