植物营养与肥料学报 2017, 23(5): 1199–1206
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16365
http://www.plantnutrifert.org

# 利用 $^{15}N$ 示踪研究不同肥力土壤棉花氮肥减施的产量与环境效应

李鹏程，郑苍松，孙 淼，刘绍东，张思平，王国平，
李亚兵，陈 静，赵新华*，董合林*
（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】华北平原棉区中等肥力棉田经济最佳施氮量为 300 kg/hm$^2$ 左右，这一结果仅从产量效应得出，未充分考虑棉花对氮肥的回收利用和土壤中氮肥的残留。探讨低肥力土壤施氮量及施氮比例对棉花产量及氮肥利用率的影响，以及低、中、高肥力土壤条件下等量施氮效应，旨在为棉花减氮增效提供理论依据。【方法】田间试验选择了高 (S1)、中 (S2)、低 (S3) 三个肥力水平的地块，其全氮含量分别为 0.83、0.74、0.60 g/kg。低肥力地块设置低氮 (N1 113 kg/hm$^2$)、中氮 (N2 225 kg/hm$^2$)、高氮 (N3 338 kg/hm$^2$) 3 个氮肥用量；中肥力和高肥力地块设低氮量处理，氮肥两次追施在苗期与初花期进行，氮肥比例为 1∶2；此外，设置低肥力土壤低氮量，氮肥追施在苗期与初花期进行，氮肥分配比例为 1∶1。在吐絮 70% 时采集棉株和土壤样品，用 $^{15}N$ 技术分析了棉株氮素吸收来源、籽棉产量、棉株氮肥回收率和土壤氮肥残留率。【结果】低氮处理，土壤肥力对棉花籽棉产量无显著影响，随土壤肥力提升，棉株吸收氮素来源于肥料的比例下降，相对增加了对土壤氮素的吸收。棉花植株 $^{15}N$ 回收率随施氮量增加显著下降，随土壤肥力提高呈下降趋势，低肥力土壤与中肥力土壤间棉花植株 $^{15}N$ 回收率差异不显著，但显著高于高肥力土壤。高肥力土壤 $^{15}N$ 残留率高于低肥力土壤和中肥力土壤。$^{15}N$ 损失率随施氮量和土壤肥力提高显著增加。低土壤肥力低氮量条件下氮肥分配比例 1∶2 处理籽棉产量高于 1∶1 处理。低肥力土壤条件下，中氮处理籽棉 $^{15}N$ 积累量相对高于高氮和低氮处理，籽棉产量较优。【结论】在较低土壤肥力条件下，施氮 225 kg/hm$^2$ 籽棉产量和氮回收率均优于施氮 338 kg/hm$^2$，氮肥损失率较低，减氮增效是可行的。高肥力土壤条件下减少氮肥投入可减少肥料的浪费。

**关键词:** 土壤肥力；棉花；施氮量；$^{15}N$ 回收率；产量

# Using $^{15}N$ tracing technique to study the yield and environmental effect of decreasing N fertilization on cotton in different fertility fields

LI Peng-cheng, ZHENG Cang-song, SUN Miao, LIU Shao-dong, ZHANG Si-ping, WANG Guo-ping, LI Ya-bing, CHEN Jing, ZHAO Xin-hua*, DONG He-lin*
( *Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Cotton Biology, Anyang, Henan 455000, China* )

**Abstract:**【**Objectives**】In the medium fertility field of cotton area in the Yellow River catchments, the North China Plain, the economic optimum nitrogen (N) rate for cotton is 300 kg/hm$^2$, and the result was derived from cotton yield response to N fertilizer rate in field trials for many years, but the N application rate did not fully consider residual N in the soil of cotton field. This paper was to explore effects of different N application rates and ratios on seed cotton yield and N use efficiency under low fertility soil, and effects of the same N application rate under low, medium and high fertility soils in field conditions aimed to provide a theoretical basis for N

**收稿日期：** 2016–09–26　　**接受日期：** 2016–11–22
**基金项目：** 国家科技支撑计划（2014BAD03B02）；农业部公益性行业（农业）科研专项（201503121，201203096）；棉花产业技术体系（CARS-18-17）资助。
**作者简介：** 李鹏程（1972—），男，湖北荆州人，博士，副研究员，主要从事棉花氮肥高效利用及机理研究。
Tel：0372-2562225，E-mail：lipengchengcri@163.com。* 通信作者 E-mail：zhaoxinhua1968@126.com；donghl668@sina.com

fertilization management of cotton.【**Methods**】Field trials of nitrogen fertilizer management were carried out using $^{15}N$ tracer technique and cotton was used as tested material. Fields with soil total N content of 0.83, 0.74 and 0.60 g/kg were taken as high (S1), media (S2) and low (S3) fertility fields for the experiment. Three N application rates were set up for the low fertility field: 113 kg/hm$^2$(N1), 225 kg/hm$^2$(N2) and 338 kg/hm$^2$(N3). The N fertilizer was divided into equal two parts and topdressed at the seedling and flowering stages. A treatment of twice N topdressing in ratio of 1∶2 was also setup in the low fertility field with low N rate. Cotton and soil (0–60 cm) were sampled at 70% boll opening stage, the contribution of N absorbed from fertilizer and soil were determined using $^{15}N$ tracer technique. The seed cotton yield, and $^{15}N$ recovery rate of cotton plants were investigated.【**Results**】For the low N rate, the soil fertility had no significant effect on seed cotton yields, the plant N uptake proportion deprived from fertilizer was declined with the increase of soil fertility, while the N uptake proportion deprived from soil nitrogen was increased. The $^{15}N$ recovery rate of cotton plants was decreased significantly with the increase of N application rate, and declined with increase of the soil fertility. There were no significant differences between the low soil fertility and medium soil fertility for $^{15}N$ recovery rate of cotton plant, but the recovery rate under the low soil fertility was significantly higher than that of the high fertility soil. The $^{15}N$ residual rate of high fertility soil was higher than those of the low fertility soil and the medium fertility soil. The $^{15}N$ loss rate was increased significantly with the increase of N application rate and soil fertility. Seed cotton yield for the low N rate at the ratio of 1∶2 was higher than that at the ratio of 1∶1. Under the condition of low fertility soil, seed cotton yield for N 225 kg/hm$^2$ was relatively higher than those for N 113 kg/hm$^2$ and N 338 kg/hm$^2$ because of more $^{15}N$ uptake by cotton plants.【**Conclusions**】Under the condition of lower soil fertility, the seed cotton yield and $^{15}N$ recovery rate for the moderate N rate (225 kg/hm$^2$) were higher than those for high N rate (338 kg/hm$^2$), and the N fertilizer loss rate was less, which demonstrated that it was feasible for improvement of both N use efficiency and seed cotton yield by decreasing input of N fertilizer. Low N input under the condition of high fertility soil could decrease N fertilizer loss.

**Key words:** soil fertility; cotton; N application rate; $^{15}N$ recovery rate; seed cotton yield

氮肥利用率一般用作物吸收肥料氮量与施氮量的比值来计算，氮肥利用率的高低可反映氮肥管理者施氮的经济效应和环境效应的优劣。棉花的氮肥利用率较低[1]，我国为30%～35%左右[2]，美国为30%～38%[3]，澳大利亚为30%[4]。传统的氮肥利用率计算采用的是差减法，用施氮小区的氮吸收量与对照不施氮小区的氮吸收量的差值与施氮量的比值来表示，这种计算方法只考虑了当季作物对氮肥的吸收利用，未能反映氮肥对土壤氮消耗的补偿效应[5]。氮肥的真实利用率是指氮肥施入土壤后直至被消耗完之前，被作物吸收利用的氮肥养分量占被消耗的肥料养分量的比率[6]，但在大田试验中很难将这一理论应用到实践中。同位素示踪技术能区分作物吸收的土壤氮与肥料氮，真实地反映作物对当季甚至上季氮肥的吸收利用情况[7]。

有关施氮量对棉花产量及氮肥利用率的影响研究报道较多[8–11]。但不同土壤肥力条件下在棉花上施氮效应的研究报道较少，Dong等[12]研究了两处不同地力棉田氮肥和钾肥施用效果，提出了低地力条件下(土壤碱解氮含量49.4 mg/kg)可通过增加种植密度实现增产，而高地力条件下(土壤碱解氮含量68.5 mg/kg)可适当减少氮肥投入、降低种植密度获得高产。罗新宁等[13]比较了新疆砂壤土(土壤碱解氮含量80.2 mg/kg)、重壤土(土壤碱解氮含量98.4 mg/kg)条件下氮肥施用效果，在相同施氮量条件下，砂壤土棉花的氮磷钾积累量高于重壤土，砂壤土、重壤土试点上分别以施氮量315 kg/hm$^2$、210 kg/hm$^2$棉株氮、磷、钾积累量最大。侯振安等[14]提出了北疆砂壤土棉田最佳经济施氮量为207～286 kg/hm$^2$；壤土棉田最佳经济施氮量为257～311 kg/hm$^2$；粘土棉田最佳经济施氮量为232～312 kg/hm$^2$。上述研究侧重于产量及大量元素养分的积累比较，没有进行棉株氮肥回收率及土壤氮肥残留率的深入分析，而且土壤肥力梯度设置较少。

华北平原棉区中等肥力棉田经济最佳施氮量为300 kg/hm$^2$左右[9–10]，这一结果从多年试验得出的氮

肥产量效应方程得出，并未充分考虑棉花对氮肥的回收利用和土壤中氮肥的残留，在此施肥量基础上减氮增效是否可行值得进一步探索。本研究采用 $^{15}N$ 示踪技术，在大田条件下，探讨不同肥力土壤条件下棉花对等量施氮的响应，以及低肥力条件下不同施氮量及施氮比例对棉花产量及氮肥利用率的影响，旨在为棉花减氮增效提供理论依据。

## 1　材料和方法

### 1.1　试验点概况

试验于 2015 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农场 (36°06′N，114°21′E) 大田进行。4 至 10 月平均气温 21.6℃，≥ 20℃ 积温 3607.1℃，日照时数 1425.9 h，降雨量 247.5 mm。试验地为一熟连作棉田，土壤类型为潮土，0—20 cm 土层土壤养分状况见表 1，土壤肥力梯度由多年氮肥不等量投入形成。

### 1.2　试验设计与样品采集、测定方法

为确保氮同位素肥料的施用效果，防止施入的同位素氮肥的流失，本研究在大田条件下，采用铁框法进行微区试验，计算出单株需氮量，确保单株施氮量的准确性，同时对铁框内棉花实行精细管理，以期获得较理想的试验结果。

微区试验设计了不同土壤肥力条件下的等量氮肥处理和低肥力条件下氮肥用量及施用比例处理，分别用 N1S1、N1S2、N1S3、N2S3、N3S3、N1S3(1/1) 表示，其中 S1、S2、S3 分别代表高、中、低三种土壤肥力，N1、N2、N3 分别代表低、中、高三个施氮量，施氮量分别为 N 113、225、338 kg/hm$^2$，N1S1、N1S2、N1S3、N2S3、N3S3 处理氮肥在苗期和初花期施用，施用比例为 1∶2，N1S3(1/1) 处理苗期和初花期氮肥施用比例为 1∶1。

为节省 $^{15}N$ 尿素并确保施肥效果，以上每个处理使用 $^{15}N$ 尿素标记 5 株，到棉花 3 叶 1 心时用铁框框起来，铁框长 1.2 m、宽 0.8 m、高 0.6 m，高出地面 5 cm，保证棉花生长在铁框中间。4 月 25 日播种，出苗期 5 月 2 日，蕾期 6 月 5 日，开花期 7 月 8 日，吐絮期 8 月 20 日。种植密度为 52500 株/hm$^2$。苗期 (5 月 15 日) 和初花期 (7 月 10 日) 施氮肥，于棉行两侧开沟，沟深 30 cm，均匀撒施后盖土。$^{15}N$ 尿素由上海化工研究院生产，$^{15}N$ 丰度为 10.20。磷钾肥全部底施，于耕翻前施入地里，磷 ($P_2O_5$)、钾 ($K_2O$) 肥施用量均为 120 kg/hm$^2$。化控、灌水、病虫害防控等与大田管理相同。

棉花生长期间单株进行精细管理，整枝及落叶分单株收集烘干后计入棉株总干物重，棉株吐絮 70% 时取整株样，整株全部拔除后分根 (子叶节以下)、茎、叶、籽棉、铃壳等部位烘干后测不同部位干物重，粉粹后测定 $^{15}N$、全氮含量，计算棉株 $^{15}N$ 回收率。拔除棉株后，取 0—60 cm 土壤混合样，每个铁框内取 4 个重复，每个重复由行上 1 个点、距棉行两边各 20 cm 2 个点共 3 个点混合而成，四分法留样，自然晾干磨碎，过 0.25 mm 筛备用，测定 $^{15}N$ 丰度、全氮含量，计算土壤 $^{15}N$ 残留率。植物不同部位全氮含量用半微量凯氏定氮法测定，$^{15}N$ 丰度用 ZHT-03 质谱计测定。

### 1.3　数据计算和统计方法

棉株不同部位氮吸收量、棉株吸收的氮素来自氮肥的百分比 (Ndff%)、氮肥回收率的计算参照王富林等[15]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 $^{15}N$ 丰度 – 0.3663)/(肥料 $^{15}N$ 丰度 – 0.3663) × 100%；

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

棉株 $^{15}N$ 回收率 = 棉株 $^{15}N$ 含量/$^{15}N$ 施入量 × 100%；

土壤 $^{15}N$ 回收率 = 土壤 $^{15}N$ 含量/$^{15}N$ 施入量 × 100%；

收获指数=籽棉产量/生物量。

所有数据采用 Excel 2007 和 DPS11.0 软件进行统计分析。

**表 1　供试土壤 0—20 cm 土层养分状况**

**Table 1　Soil nutrient status in tested field (0–20 cm)**

| 土壤肥力 Soil fertility | 有机质 (g/kg) OM | 全氮 (g/kg) Total N | 有效磷 (mg/kg) Avail. P | 速效钾 (mg/kg) Avail. K |
|---|---|---|---|---|
| 高 High（S1） | 11.24 | 0.83 | 20.24 | 105.12 |
| 中 Medium（S2） | 9.85 | 0.74 | 18.21 | 96.73 |
| 低 Low（S3） | 8.76 | 0.60 | 17.40 | 80.57 |

## 2 结果与分析

### 2.1 不同肥力土壤氮肥运筹对棉花单株干物重和籽棉产量的影响

由表2可以看出，N1S3、N2S3、N3S3间棉花单株生物量和籽棉产量差异显著，N2S3棉花单株生物量和籽棉产量显著高于N1S3和N3S3；N3S3棉花单株生物量显著高于N1S3，但籽棉产量则相反。N1S3、N2S3、N3S3棉花单株收获指数分别为0.40、0.38和0.37，N1S3收获指数较高主要是因为其单株生物量偏低。N1S3的单株干物重与N1S3(1/1)间差异不显著，但N1S3籽棉产量和收获指数显著高于N1S3(1/1)。

低氮处理在氮肥施用比均为1∶2条件下，不同土壤肥力棉花单株籽棉产量差异不显著，但N1S1棉花单株生物量显著高于N1S2和N1S3，N1S2棉花单株根和铃壳生物量相对偏低。

### 2.2 不同肥力土壤氮肥运筹对棉花氮素积累的影响

由表3可见，低肥力土壤条件下，随施氮量增加，棉花单株氮素积累量显著增加，N3S3棉花单株茎、叶的氮素积累量显著高于N2S3和N1S3。低肥力土壤低氮投入条件下，氮肥基追比对棉花单株氮积累量无显著影响，但N1S3棉花单株籽棉氮素累积量显著高于N1S3(1/1)，与表2中单株籽棉产量的结果一致。

N1S1棉花单株氮素积累量显著高于N1S2和N1S3，其中棉花单株根、茎、铃壳等部位氮素积累量较高。N1S2与N1S3间棉花单株、籽棉氮素积累量差异不显著，与表2中单株籽棉产量的结果一致。

### 2.3 不同肥力土壤氮肥运筹对棉花 $^{15}N$ 积累的影响

表4表明，N2S3棉花单株 $^{15}N$ 积累量显著高于N3S3和N1S3，N3S3显著高于N1S3。N1S3(1/1)棉

**表2 不同肥力土壤氮肥运筹对棉花单株生物量和籽棉产量的影响 (g/plant)**

**Table 2 Effects of N fertilizer application strategy on seed cotton yield and biomass of cotton plants under different soil fertility**

| 处理 Treatment | 根 Root | 茎 Stem | 叶 Leaf | 铃壳 Boll shell | 籽棉 Seed cotton | 单株生物量 Plant weight |
|---|---|---|---|---|---|---|
| N1S1 | 10.64 b | 35.00 b | 19.66 d | 25.70 b | 57.26 b | 148.26 c |
| N1S2 | 8.59 d | 30.53 c | 20.70 d | 19.09 c | 54.42 bc | 133.33 e |
| N1S3(1/1) | 9.57 c | 28.86 d | 25.10 b | 25.13 b | 53.39 cd | 142.05 d |
| N1S3 | 9.74 c | 31.08 c | 22.93 c | 20.78 c | 56.20 b | 140.73 d |
| N2S3 | 14.92 a | 38.65 a | 24.90 b | 30.67 a | 63.67 a | 172.81 a |
| N3S3 | 9.77 c | 38.55 a | 28.92 a | 24.04 b | 50.65 d | 151.93 b |

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 indicate significant differences among the nitrogen treatments at the 5% level.

**表3 不同肥力土壤氮肥运筹对棉花氮素积累的影响 (g/plant)**

**Table 3 Effects of N fertilizer application strategy on N accumulation of cotton plants under different soil fertility**

| 处理 Treatment | 根 Root | 茎 Stem | 叶 Leaf | 铃壳 Boll shell | 籽棉 Seed cotton | 单株 Cotton plant |
|---|---|---|---|---|---|---|
| N1S1 | 0.07 a | 0.33 a | 0.40 c | 0.51 a | 1.14 ab | 2.45 b |
| N1S2 | 0.05 b | 0.25 b | 0.49 b | 0.26 c | 1.24 a | 2.29 c |
| N1S3 (1/1) | 0.04 b | 0.19 c | 0.62 a | 0.41 b | 1.07 c | 2.33 c |
| N1S3 | 0.04 b | 0.22 bc | 0.47 b | 0.39 b | 1.13 ab | 2.25 c |
| N2S3 | 0.08 a | 0.25 b | 0.51 b | 0.53 a | 1.21 a | 2.58 b |
| N3S3 | 0.09 a | 0.34 a | 0.69 a | 0.51 a | 1.17 a | 2.80 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 indicate significant differences among the nitrogen treatments at the 5% level.

花单株 $^{15}N$ 积累量显著高于 N1S3，其中以棉花单株叶、铃壳、籽棉等部位 $^{15}N$ 积累量较高。N1S3 棉花单株及其铃壳、籽棉等部位 $^{15}N$ 积累量均显著高于 N1S2 和 N1S1，但 N1S2 和 N1S1 间棉花单株 $^{15}N$ 积累量差异不显著。随土壤肥力提高，棉花单株吸收 $^{15}N$ 量呈下降趋势，低、中、高肥力条件下棉花单株籽棉 $^{15}N$ 积累量占单株总积累量的百分比分别为 56.8%、56.1%、48.6%。

### 2.4　不同肥力土壤氮肥运筹对棉花 Ndff 值的影响

由表 5 可见，N2S3 棉花单株 Ndff 值显著高于 N3S3 和 N1S3，N1S3 棉花单株 Ndff 值显著高于 N3S3。N1S3(1/1) 除了棉叶外，棉花单株和根、茎、铃壳、籽棉等部位 Ndff 值显著高于 N1S3 处理，与单株 $^{15}N$ 的累积量结果一致。

N1S3 棉花单株及其根、茎、铃壳、籽棉等部位 Ndff 值均显著高于 N1S2 和 N1S1，N1S2 显著高于 N1S1。结果表明，随土壤肥力提升，棉株吸收肥料 $^{15}N$ 的比例下降，相对增加了对土壤氮素的吸收比例，这一结果与棉花单株 $^{15}N$ 的积累结果一致。

### 2.5　不同肥力土壤氮肥运筹对棉花 $^{15}N$ 回收率和氮肥损失率的影响

图 1 表明，N1S3 棉株的 $^{15}N$ 回收率显著高于 N1S1 和 N1S2，而土壤的 $^{15}N$ 残留率显著高于 N1S2，显著低于 N1S1。N1S3 棉株和土壤的 $^{15}N$ 总回收率显著高于 N1S2，但与 N1S1 间差异不显著，而 $^{15}N$ 肥料损失率则相反，N1S2 的 $^{15}N$ 肥料损失率显著高于 N1S3、N1S1，N1S3 与 N1S1 间 $^{15}N$ 肥料损失率无显著差异。另外，低氮投入时，氮肥基追比对棉株的 $^{15}N$ 回收率无显著影响，N1S3(1/1) 土壤 $^{15}N$ 残留率及棉株和土壤的 $^{15}N$ 总回收率显著低于 N1S3，$^{15}N$ 肥料损失率则相反。

在低肥力土壤条件下，随施氮量增加，棉株 $^{15}N$ 回收率显著下降，N2S3 土壤 $^{15}N$ 残留率显著高于 N1S3 和 N3S3。随施氮量增加，棉株和土壤总的 $^{15}N$ 回收率也显著下降，而 $^{15}N$ 肥料损失率呈上升趋势，N3S3 的 $^{15}N$ 肥料损失率显著高于 N1S3 和 N2S3(图 1)。

**表 4　不同肥力土壤氮肥运筹对棉花 $^{15}N$ 积累的影响 (g/plant)**

**Table 4　Effects of N fertilizer application strategy on $^{15}N$ accumulation of cotton plants under different soil fertility**

| 处理 Treatment | 根 Root | 茎 Stem | 叶 Leaf | 铃壳 Boll shell | 籽棉 Seed cotton | 单株 Cotton plant |
|---|---|---|---|---|---|---|
| N1S1 | 14.2 b | 73.5 b | 88.3 d | 132.3 c | 292.0 e | 600.3 d |
| N1S2 | 13.3 b | 64.7 c | 117.6 c | 72.5 d | 342.4 d | 610.5 d |
| N1S3(1/1) | 11.0 c | 62.7 c | 124.9 c | 143.9 b | 402.1 b | 744.6 b |
| N1S3 | 11.2 c | 65.3 c | 84.5 d | 133.2 c | 386.1 c | 680.3 c |
| N2S3 | 20.7 a | 76.2 b | 215.2 a | 176.0 a | 442.5 a | 930.6 a |
| N3S3 | 19.2 a | 80.3 a | 158.3 b | 140.6 b | 327.5 d | 725.9 b |

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 indicate significant differences among the nitrogen treatments at the 5% level.

**表 5　不同肥力土壤不同氮肥运筹棉花的 Ndff 值 (%)**

**Table 5　Ndff% of cotton under different soil fertility and N fertilizer management**

| 处理 Treatment | 根 Root | 茎 Stem | 叶 Leaf | 铃壳 Boll shell | 籽棉 Seed cotton | 单株 Cotton plant |
|---|---|---|---|---|---|---|
| N1S1 | 21.2 c | 22.9 d | 22.4 c | 26.3 c | 25.1 d | 24.5 e |
| N1S2 | 24.6 b | 26.4 c | 24.1 b | 27.6 c | 28.9 c | 26.8 d |
| N1S3(1/1) | 27.2 a | 32.8 a | 20.4 d | 36.6 a | 37.3 a | 31.7 b |
| N1S3 | 24.8 b | 29.3 b | 19.9 d | 34.0 d | 34.3 b | 30.1 c |
| N2S3 | 27.0 a | 30.6 b | 42.3 a | 34.6 b | 36.1 a | 36.2 a |
| N3S3 | 21.7 c | 23.2 d | 22.7 c | 27.5 c | 27.8 c | 25.9 e |

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 indicate significant differences among the nitrogen treatments at the 5% level.

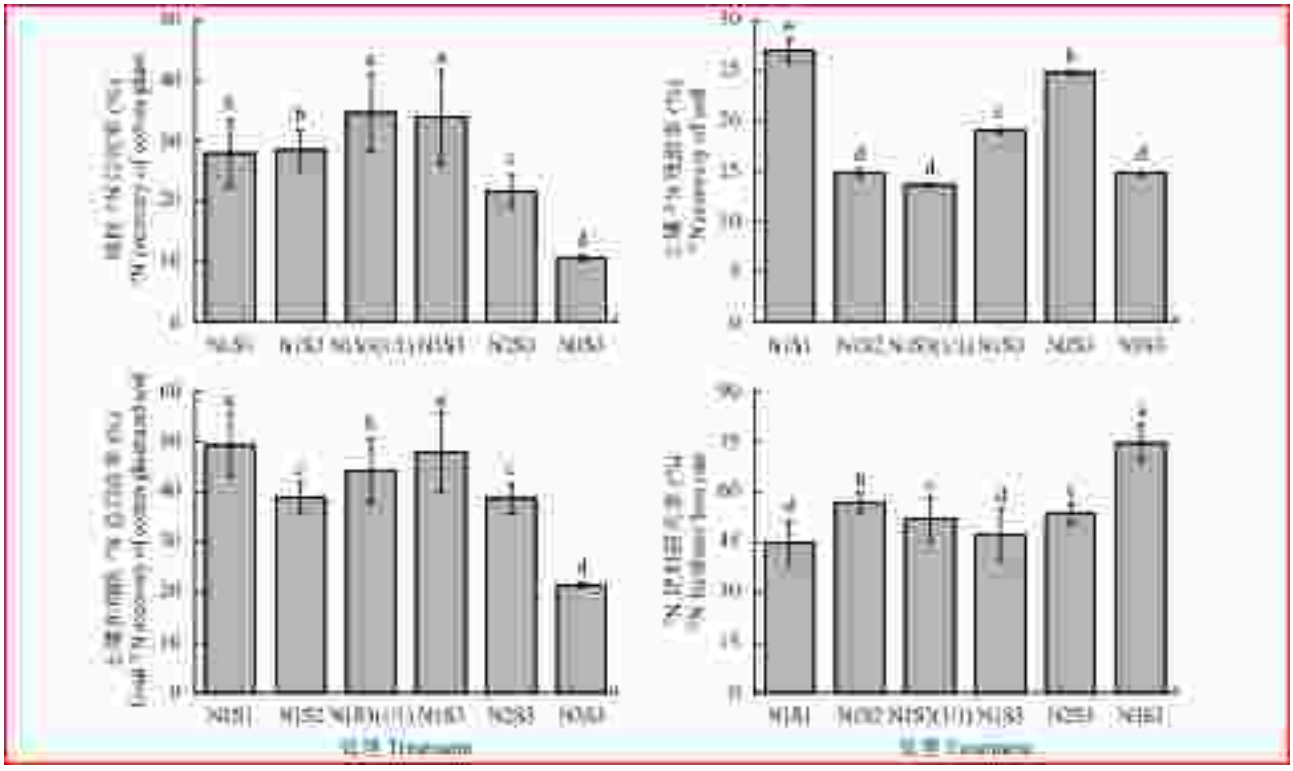

图 1 不同肥力土壤下氮肥运筹棉花和土壤 $^{15}N$ 回收率及氮肥损失率

**Fig. 1 Effects of N application strategy on $^{15}N$ recovery of cotton plants and soil and N fertilizer loss under different soil fertility**

[注（Note）：方柱上不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著

Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments at the 5% level.]

## 3 讨论

### 3.1 较低肥力土壤氮肥运筹对棉花产量和氮肥利用率的影响

在相同土壤条件下，棉花产量一般随施氮量呈二次曲线变化[9-10]，施氮量达到一定阈值，棉花产量达到最高值，之后产量随施氮量增加而下降。本试验在低肥力土壤条件下 (土壤全氮含量 0.60 g/kg)，中氮处理棉花单株生物量、籽棉 $^{15}N$ 吸收量、籽棉产量均高于高氮和低氮投入处理，高氮处理棉花单株生物量虽然高于低氮处理，但由于收获指数低于低氮处理，籽棉产量反而低于低氮处理。随施氮量增加，棉株 $^{15}N$ 回收率显著下降，而且高氮处理土壤 $^{15}N$ 残留率 (0—60 cm) 低于中氮和低氮处理，棉株和土壤 $^{15}N$ 总回收率显著下降，而氮肥损失率显著增加，可能与高氮投入时氮肥淋移到深层土壤及通过挥发等途径损失有关。

土壤在不受干扰条件下，土壤中的有机氮和无机氮可以矿化 2/3 供作物吸收利用，土壤中的大部分有机氮、无机氮有被作物吸收利用的潜力[17]。Hou 等[18]报道在大田试验条件下当季氮肥的回收率为 29%～49%，与 Fritschi 等[19]报道的棉花大田氮肥的回收率 43%～49% 较接近。本试验条件下氮肥回收率较低，除了低氮处理氮肥回收率高于 30% 外，其他处理氮肥回收率均低于 30%，与本试验低肥力条件下棉株的 Ndff% 较低有关 (各处理棉株吸收氮素来源于 $^{15}N$ 肥料的百分比变幅在 28.4%～42.1%)，另外可能与铁框处理局部限制了棉花 0—60 cm 表层根系的横向生长，从而影响其对氮素的充分吸收导致产量偏低有关。

低肥力土壤低氮条件下，苗期与初花期施氮比例 1∶2 处理较 1∶1 处理显著提高了籽棉氮素吸收量和籽棉产量，显著增加了土壤 $^{15}N$ 残留率、棉株与土壤的 $^{15}N$ 总回收率，明显减少了 $^{15}N$ 损失率，此结果与马宗斌等[20]和李鹏程等[21]结果一致。

### 3.2 不同肥力土壤棉花产量及氮肥利用率

本试验在氮肥施用量较低条件下，高肥力土壤棉花单株生物量、氮素吸收总量显著高于中、低肥力土壤；但棉花对肥料 $^{15}N$ 的吸收量、棉株 $^{15}N$ 回收率却是低肥力土壤高于中、高肥力土壤；随土壤肥

力的提升，棉花对肥料氮素的吸收比例显著下降，对土壤氮素的吸收比例显著上升；高肥力土壤肥料 $^{15}N$ 残留率显著高于中、低肥力土壤。这些结果说明了低肥力土壤施氮效果要优于中、高肥力土壤，与罗新宁等[13]结果一致。在土壤肥力较高时，可以充分发挥土壤无机氮库的作用，减少施氮量，提高氮肥利用率。中、高肥力土壤下棉花的施氮效应有待进一步研究。

## 4　结论

在较低肥力土壤条件下 (土壤全氮含量 0.60 g/kg)，施氮 225 kg/hm$^2$ 处理棉花籽棉产量和 $^{15}N$ 回收率均优于施氮 338 kg/hm$^2$ 处理，而肥料损失率显著低于施氮 338 kg/hm$^2$ 处理。因此，在该生态区域内棉花在常规施氮量基础上减少氮肥投入是可行的。较低施氮量 (113 kg/hm$^2$) 时，高肥力土壤 (土壤全氮含量 0.83 g/kg) 棉花 $^{15}N$ 回收率显著低于低肥力土壤，因此较高肥力土壤棉田可以适当降低施氮量，充分利用棉花对土壤氮素的吸收，减少肥料浪费，实现减氮增效。

**参 考 文 献：**


[1] Yang, G Z, Chu K, 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: 999–1007.

[2] 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.

[3] Navarro-Ainza J A C. Fertilizer nitrogen recovery and $^{15}N$ and bromide distribution in the soil profile as affected by the time of application on an irrigated upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [D]. Tucson: PhD Dissertation, University of Arizona, USA, 2007.

[4] Constable G A, Rochester I J. Nitrogen application to cotton on clay soil: timing and soil testing[J]. Agronomy Journal, 1988, 80: 498–502.

[5] 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义—兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921–933.
Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio—Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 921–933.

[6] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 216–225.
Wang H Y, Zhou J M. Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 216–225.

[7] 王西娜, 王朝辉. 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1202–1212.
Wang X N, Wang Z H. Dynamics and availability to crops of residual fertilizer nitrogen in upland soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1202–1212.

[8] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 种植密度氮肥互作对棉花产量及氮素利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 122–130.
Li P C, Dong H L, Liu A Z, *et al*. Effects of planting density and nitrogen fertilizer interaction on yield and nitrogen use efficiency of cotton[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 122–130.

[9] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 81–91.
Li P C, Dong H L, Liu A Z, *et al*. Effects of nitrogen application rates on physiological characteristics of functional leaves, nitrogen use efficiency and yield of cotton[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 81–91.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Dong H Z, Kong X Q, Li W J, *et al*. Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake of major nutrients in two fields with varying fertility[J]. Field Crops Research, 2010, 119(6): 106–113.

[13] 罗新宁, 陈冰, 张巨松, 等. 氮肥对不同质地土壤棉花生物量与氮素积累的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(4): 160–166.
Luo X N, Chen B, Zhang J S, *et al*. Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation of cotton plant on different soil textures[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalies Sinica, 2009, 18(4): 160–166.

[14] 侯振安, 王炜, 郭琛, 等. 不同土壤肥力棉田氮肥适宜用量研究[J]. 新疆农业科学, 2004, 41(S1): 121–124.
Hou Z A, Wang W, Guo C, *et al*. Study on suitable nitrogen applied rate of cotton in different soil fertility conditions[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2004, 41(S1): 121–124.

[15] 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.

[16] 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 Agriculture Boreali-occidentalies Sinica, 2013, 22(11): 47–53.

[17] Seneviratne G. Two-thirds law of nitrogen mineralization under undisturbed soil conditions: A new theory[J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 149–153.

[18] 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(10): 1483–1489.

[19] Fritschi F B, Roberts B A, Rains D W, *et al*. Fate of nitrogen-15 applied to irrigated acala and pima cotton[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(3): 646–655.

[20] 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.

[21] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 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[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 a $^{15}$N trace technique[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(3): 590–599.