

# 化肥减施对日光温室越冬长茬番茄氮肥利用率及去向的影响

张怀志, 唐继伟, 袁 硕, 冀宏杰, 黄绍文\*  
(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:**【目的】我国设施蔬菜过量施肥现象严重, 在设施栽培条件下, 比较常规施肥与化肥减施增效技术(简称化肥减施)下蔬菜产量(生物量)和氮肥利用率, 研究氮素去向, 为高效施肥提供依据。【方法】2017—2018年在河北省定兴县龙华村基地的日光温室进行2个试验。试验1根据差减法设计4个处理, 包括常规施肥(CF, N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O为858-594-1284 kg/hm<sup>2</sup>)和化肥减施40%(RF, N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O为608-297-720 kg/hm<sup>2</sup>), 及其相应的不施化肥氮对照(CFNN和RFNN)。试验2为<sup>15</sup>N示踪试验, 用<sup>15</sup>N尿素替代普通尿素<sup>15</sup>NRF和<sup>15</sup>NCF 2个处理。番茄收获后, 取0—20、20—40和40—60 cm土层样品, 测定氮素的残留量。分期收获成熟番茄及枯枝落叶, 拉秧时取植株地上和地下部分, 再分为不同部位, 对番茄产量和养分吸收量进行测定。【结果】差减法试验结果表明, RF处理番茄产量、总吸氮量分别较CF显著增加了10.4%、14.8%, 化肥氮利用率增加了15.4个百分点。<sup>15</sup>N示踪试验结果表明, <sup>15</sup>NRF处理产量、氮吸收量和<sup>15</sup>N吸收量分别较<sup>15</sup>NCF处理增加12.1%、25.3%和13.8%, <sup>15</sup>NRF和<sup>15</sup>NCF处理的化肥氮利用率分别为36.4%、20.3%。<sup>15</sup>N示踪法研究还表明, 不同土层的全氮含量及<sup>15</sup>N原子百分超呈自上而下逐渐降低的趋势; <sup>15</sup>NRF处理的化肥氮损失、番茄氮吸收以及土壤氮残留比例分别为40.4%、36.4%和23.2%, <sup>15</sup>NCF处理化肥氮损失、番茄氮吸收和土壤氮残留比例分别为59.6%、20.6%和19.6%, 化肥氮去向总体表现为损失>番茄吸收>土壤残留; <sup>15</sup>NRF处理化肥氮损失率较<sup>15</sup>NCF处理低19.2个百分点; <sup>15</sup>NRF和<sup>15</sup>NCF处理0—20 cm土层化肥氮残留量分别占土壤中化肥氮总残留量的88.9%和87.9%。【结论】在施用30 t/hm<sup>2</sup>有机肥的前提下, 减少农户常规化肥用量的40%并调整氮磷钾比例, 番茄产量和氮素吸收量显著增加, 土壤残留比例没有明显变化, 损失量显著降低, 化肥氮利用率提高15个百分点以上。

**关键词:** 日光温室; 番茄; 化肥减施增效技术; <sup>15</sup>N示踪法; 差减法; 化肥氮利用率; <sup>15</sup>N去向

## Effect of fertilizer reduction on nitrogen utilization efficiency and fate during overwinter long-season tomato production in greenhouse

ZHANG Huai-zhi, TANG Ji-wei, YUAN Shuo, JI Hong-jie, HUANG Shao-wen\*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** 【Objectives】 Excessive application of fertilizers in vegetable production is quite often happened in China. We studied the effects of reduced chemical fertilizers on the yield and nitrogen fertilizer efficiency of tomato grown in greenhouse. We also studied the fate of applied nitrogen after harvest, so as to provide scientific references for rational chemical fertilizer application in this region. 【Methods】 A fertilizer subtraction and a <sup>15</sup>N labeled microplot experiment were conducted simultaneously in a greenhouse from 2017 to 2018 in Dingxing County, Hebei Province. The tomato cultivar used is ‘Provence’, which is often grown overwinter and for about 8 months. There were four treatments in the fertilizer subtraction experiment, including: the farmers’ average N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O input of 858-594-1284 kg/hm<sup>2</sup>(CF); the reduced 40% fertilizer treatment (RF), with the N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O input of 608-297-720 kg/hm<sup>2</sup>; the left two treatments were the above two deleted nitrogen (CFNN,

收稿日期: 2019-08-17 接受日期: 2020-05-07

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFD0201001, 2016YFD0801006); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23-B02); 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016003)。

联系方式: 张怀志 E-mail: zhanghuai-zhi@caas.cn; \*通信作者 黄绍文 E-mail: huangshaowen@caas.cn

RFNN). In the  $^{15}\text{N}$  labeled experiment, the nitrogen in RF and CF were replaced by  $^{15}\text{N}$  labeled urea ( $^{15}\text{NRF}$  and  $^{15}\text{NCF}$ ). The tomato yield and fallen leaves were collected with the ripe of fruits, and the whole plant and soil samples (0–20, 20–40 and 40–60 cm layer) were collected after the final harvest. The N contents were measured and fertilizer utilization efficiencies were calculated. **【 Results 】** In the fertilizer subtraction experiment, the yield, total N uptake of RF treatment were significantly increased by 10.4% and 14.8%, and the chemical N recovery rate was increased by 15.4 percentage points, compared with those of CF. In the  $^{15}\text{N}$  labeled experiment, the tomato yield, the total N uptake and  $^{15}\text{N}$  uptake in  $^{15}\text{NRF}$  treatment were increased by 12.1%, 25.3% and 13.8%, compared with those of  $^{15}\text{NCF}$ . The difference in chemical N recovery rate was significant between  $^{15}\text{NRF}$  (36.4%) and  $^{15}\text{NCF}$  (20.3%). From the  $^{15}\text{N}$  labeled experiment, the total soil N content and  $^{15}\text{N}$  atom% content decreased with the soil depths increased. The fertilizer N fate was in order of loss > tomato uptake > soil residue, with detailed ratio of loss, tomato uptake and soil residue of 40.4%, 36.4% and 23.2% in the  $^{15}\text{NRF}$  treatment, and 59.6%, 20.6% and 19.6% in the  $^{15}\text{NCF}$  treatment. The fertilizer N loss rate of  $^{15}\text{NRF}$  was 19.2 percentage points lower than that of the  $^{15}\text{NCF}$ . The fertilizer N residue in the 0–20 cm soil layer of  $^{15}\text{NRF}$  and  $^{15}\text{NCF}$  accounted for 88.9% and 87.9% of the total, respectively. **【 Conclusions 】** On the base of applying 30 t/hm<sup>2</sup> of organic fertilizer, reducing 40% chemical NPK nutrient input and adjusting the N–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–K<sub>2</sub>O ratio could achieve significantly higher tomato yield, decrease the nitrogen loss, keep similar nitrogen residue in the soil, and increase chemical N use efficiency more than 15 percentage points.

**Key words:** greenhouse; tomato; efficient technology of chemical fertilizer reduction;  $^{15}\text{N}$  trace method; subtraction method; nitrogen recovery rate of chemical fertilizer;  $^{15}\text{N}$  fate

设施蔬菜种植在我国农民脱贫致富中发挥了重要作用, 2016 年底我国设施蔬菜的播种面积、产量和产值分别占蔬菜总播种面积、总产量和总产值的 21.5%、30.5% 和 62.7%<sup>[1]</sup>。黄绍文等<sup>[2]</sup>研究表明, 设施蔬菜化肥养分用量平均为 1354.5 kg/hm<sup>2</sup>, 是全国农作物化肥养分用量的 4.1 倍。设施蔬菜过量施肥不仅导致化肥利用率低, 还导致了氮磷速效养分富集、N<sub>2</sub>O 排放增加、土壤次生盐渍化、土壤酸化等问题<sup>[3-4]</sup>。我国设施蔬菜的化肥减施潜力较大<sup>[2]</sup>, 研发设施蔬菜化肥减施增效技术, 已成为蔬菜产业绿色发展急需解决的重要问题。

前人提出了应用有机肥<sup>[5-6]</sup>、生物炭<sup>[7]</sup>、腐植酸<sup>[8]</sup>、微生物菌剂<sup>[9]</sup>、控释肥料<sup>[10]</sup>等技术, 或者集成的技术模式, 如基于化肥精准减量、有机肥替代化肥、新型专用水溶肥、土壤改良剂应用技术、水肥协同一体化等关键技术/产品的设施蔬菜化肥减施增效技术模式<sup>[11]</sup>, 应用高效新型肥料、土壤改良剂及有机替代技术、辅以种植制度优化技术的大蒜化肥减施增效的初步技术模式<sup>[12]</sup>, 用以减少养分用量, 尤其是化肥氮养分用量。单项技术下化肥氮利用率的研究较多, 但化肥减施增效技术模式的化肥减施数量及其相应的化肥氮素利用率变化情况还有待进一步研究。本研究以日光温室越冬长茬番茄为对象, 同时利用 $^{15}\text{N}$  示踪和差减法两种方法, 研究比较设施蔬

菜化肥减施增效技术模式的化肥氮利用率及差异, 了解氮素去向, 为设施蔬菜科学合理施氮提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2017 年 10 月至 2018 年 6 月在河北省定兴县龙华村日光温室进行。定兴县位于太行山东麓海河平原的黑龙港流域, 地处北纬 39°5'39"~39°20'04", 东经 115°30'37"~115°58'06", 海拔 43.2~13.4 m, 属温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 11.7℃, 全年无霜期平均 185 天, 年平均降水量 545.8 mm, 主要集中在 6—9 月, 年际间变化大。试验用日光温室面积 740 m<sup>2</sup>, 种植年限 6 年, 土壤为山前平原冲积性潮褐土, 0—20 cm 土壤 pH 7.2、有机质含量 27.1 g/kg、铵态氮 36.6 mg/kg、硝态氮 125.1 mg/kg、速效磷 238 mg/kg、速效钾 1100 mg/kg、电导率 (EC) 值 2480 μS/cm, 土壤肥力水平中等。

### 1.2 试验设计

1.2.1 试验设计 本研究在同一南北向日光温室内进行, 共设置两个试验, 试验 1 设 4 个处理: 1) 农户常规化肥养分用量 (CF), 当地调查的 15 个农户在

越冬长茬番茄上的化肥  $N-P_2O_5-K_2O$  实际用量平均为 858–594–1284 kg/hm<sup>2</sup>, 总养分 2736 kg/hm<sup>2</sup>; 2) 化肥减施处理 (RF), 为常规养分用量的 60%,  $N-P_2O_5-K_2O$  平均比例 1.00 : 0.32 : 1.32, 实际用量为 608–297–720 kg/hm<sup>2</sup>, 总养分为 1625 kg/hm<sup>2</sup>; 3) 和 4) 在 CF 和 RF 基础上去掉化肥氮, 形成 CFNN 和 RFNN 两个处理。试验 2 设 2 个处理, 氮磷钾用量同 CF 和 RF 处理, 其中的氮素由 <sup>15</sup>N 尿素替代, 即 <sup>15</sup>NCF、<sup>15</sup>NRF。

试验 1、试验 2 各个处理均采用微区, 面积为 1.705 m<sup>2</sup> (1.55 m × 1.1 m), 3 次重复, 随机排列。微区内各种植 2 行 8 株番茄, 行距 40 cm, 株距 39 cm。微区用无底不锈钢铁皮框围成, 铁皮框埋方法是先将无底不锈钢铁皮框放到微区所在的位置, 四周挖出宽 0.5 m、深 1.05 m 的沟, 将钢皮框套在土柱外, 并使其周围与土壤紧贴, 铁皮框上方露出地表 5 cm; 挖出的土壤分层堆放, 铁皮框安装后, 将土壤分层回填、踏实。

试验 1、试验 2 各处理除设计的化肥养分外, 均基施有机肥 30 t/hm<sup>2</sup>。供试有机肥为湖北产的商品有机肥 ( $N-P_2O_5-K_2O=1.52-1.74-1.63$ , 含水 18.5%)。试验 1 中的 CFNN、RFNN 化肥源的  $P_2O_5$  和  $K_2O$  分别采用  $KH_2PO_4$  和  $K_2SO_4$ , 每次先用  $KH_2PO_4$  满足  $P_2O_5$  养分用量后, 再用  $K_2SO_4$  补充  $K_2O$ , 最终满足  $K_2O$  用量需求。CF 处理所用化肥为农户选择的复合肥 (15–15–15)、诺泰克水溶肥 (14–8–20)、华戎水溶肥 (20–10–30) 和康朴水溶肥 (14–8–30); RF 处理所用化肥为专家推荐复合肥 (15–15–15)、黄博 1 号 (22–12–16+TE+BS) 和黄博 2 号 (19–6–25+TE+BS)。<sup>15</sup>N 尿素为上海化工研究院有限公司生产 (<sup>15</sup>N 丰度为 10.0%); RF、RFNN 和 <sup>15</sup>NRF 处理基肥中化肥养分占总养分用量的 20%, 作基肥的化肥与适量的细土混匀后在整地前施用; 开花前追施两次肥料, 用量占总化肥养分用量 10%; 花后追肥 11 次, 化肥追施时将化肥溶于水, 均匀灌入膜下土壤中。CF、CFNN 和 <sup>15</sup>NCF 处理化肥施用时间根据农户习惯确定, 基施的化肥养分用量占总用量的 40%, 追肥 12 次, 施用方法与化肥减施处理相同。

1.2.2 种植方式和田间管理 试验用番茄品种为‘普罗旺斯’, 于 2017 年 10 月 29 日移栽, 2018 年 6 月 15 日收获; 微区均采用覆膜栽培, 膜下灌溉, 其灌溉量根据温室微区外的区域每次膜下微喷灌溉用水量计算得到, 均匀灌入膜下; 其它田间管理措施一致。

### 1.3 样品采集

1.3.1 植物样品 2 个试验均分时段收集各个微区的所有番茄成熟果实及落叶。拉秧时, 将微区所有植株地上部及根系全部收获。每次收集的植株样品称鲜重, 之后在 100℃ 快速杀青 30 min, 在 65℃ 下烘干, 称干重。将用于测定的植株各器官全部粉碎过 0.15 mm 筛 (100 目), 混匀后, 连续用 4 分法取测定所需的样品量, 用于测定植株含氮量和 <sup>15</sup>N 丰度。

1.3.2 土壤样品 拉秧时, 采用土钻法, 分 0–20、20–40、40–60 cm 3 个层次采集土样, 每个微区取 5 钻, 每一微区采自同一层的土壤混匀、风干后, 过 0.15 mm 筛 (100 目), 测定各层次中全氮含量以及 <sup>15</sup>N 丰度。

### 1.4 样品测定方法

植株各器官全氮采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮, 凯氏定氮法测定; 土壤各层样品全氮采用  $H_2SO_4$ -混合加速剂消煮, 凯氏定氮法测定<sup>[13]</sup>。植株各器官及土壤各层样品 <sup>15</sup>N 丰度用 Delta Plus XP<sup>15</sup>N (美国 THERMO finnigan 公司生产) 进行测定。

### 1.5 计算公式与数据分析

植物 Ndff% = 植株 <sup>15</sup>N 原子百分超 / 肥料 <sup>15</sup>N 原子百分超 × 100 (1)

植株氮素来自化肥氮的量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 植物 Ndff% × 植物吸氮量 (kg/hm<sup>2</sup>) (2)

番茄 <sup>15</sup>N 回收率 (%) = 植株中的化肥氮素吸收量 / 施化肥氮量 × 100 (3)

差减法氮素利用率 (%) = (施化肥氮区蔬菜吸氮量 - 不施化肥氮区蔬菜吸氮量) / 施化肥氮量 × 100 (4)

土壤各层全氮来自标记 <sup>15</sup>N 的 Ndff% = 土壤各层全氮 <sup>15</sup>N 原子百分超 / 标记 <sup>15</sup>N 原子百分超 × 100 (5)

土壤各层来自 <sup>15</sup>N 肥料的氮量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 土壤各层全氮含量 (kg/hm<sup>2</sup>) × 土壤各层全氮来自标记 <sup>15</sup>N 的 Ndff% (6)

试验数据采用 Excel 2010 和 SAS 8.0 中的单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 越冬长茬番茄生物量与吸氮量

表 1 表明。试验 1 的越冬长茬番茄各器官生物量和氮吸收量呈现出果实 > 叶 > 茎 > 根的趋势。RF 处理果实、根、茎和叶生物量均显著高于 CF 处理, 分别高出 12.2%、11.7%、11.3% 和 11.6%, 果

实、茎和叶氮吸收量也均显著高于 CF 处理, 分别高出 22.8%、9.9% 和 8.5%。不施化肥氮的 RFNN 和 CFNN 处理果实、根、茎和叶生物量以及果实、茎和叶氮吸收量差异不明显。

表 2 显示, 试验 2 的越冬长茬番茄各器官生物量和氮吸收量呈现出果实 > 叶 > 茎 > 根的趋势;  $^{15}\text{NRF}$  处理果实、根、茎和叶生物量均显著高于  $^{15}\text{NCF}$ , 分别高出 13.7%、11.5%、13.7% 和 11.4%。 $^{15}\text{NRF}$  处理茎、果实、叶和植株氮总吸收量也均显著高于  $^{15}\text{NCF}$  处理, 分别高出 17.9%、16.7%、8.4% 和 13.8%。

从番茄各个器官乃至整个植株对化肥氮和其它氮源(土壤氮、有机肥氮)的吸收量(表 3)来看,  $^{15}\text{NRF}$  处理只有果实、茎、叶和总吸氮量高于  $^{15}\text{NCF}$  处理, 但两处理仅果实中来自其它氮源的氮量之间有显著差异, 根、茎、叶及总吸氮量来自其它氮源的氮量之间无显著差异; 而对化肥氮的吸收量, 两个处理间的果实、根、茎、叶以及植株均存在显著差异, 且都是  $^{15}\text{NRF}$  处理高于  $^{15}\text{NCF}$  处理。

从各个器官乃至整个植株对肥料氮和其它氮源的吸收比例(表 3)来看, 其它氮源所占比例高于肥料氮, 这说明其它氮源也是番茄生长发育的主要氮

表 1 不同处理下越冬长茬番茄各器官干物质质量和氮吸收量(试验 1)

Table 1 Biomass and nitrogen uptake of different organs of overwinter long-season tomato under each treatment in the fertilizer experiment 1

处理 Treatment	生物量 Biomass (kg/hm <sup>2</sup> , DM)				氮吸收量 N uptake (kg/hm <sup>2</sup> )			
	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CF	7456 ± 85 b	433 ± 5.5 b	4162 ± 32 b	4345 ± 51 b	161 ± 7.1 b	6.4 ± 0.4 a	77.9 ± 1.8 b	132 ± 4.0 b
CFNN	5598 ± 54 c	336 ± 11 c	2982 ± 34 c	3331 ± 91 c	98 ± 3.8 c	3.6 ± 0.1 b	46.9 ± 1.1 c	88 ± 0.8 c
RF	8364 ± 115 a	484 ± 1.8 a	4632 ± 40 a	4847 ± 43 a	198 ± 1.9 a	6.7 ± 0.4 a	85.6 ± 1.5 a	144 ± 0.5 a
RFNN	5732 ± 69 c	346 ± 12 c	3032 ± 42 c	3418 ± 90 c	100 ± 0.6 c	3.7 ± 0.2 b	45.3 ± 1.6 c	90 ± 4.3 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 significantly different among treatments at the 5% level.

表 2  $^{15}\text{N}$  示踪试验中日光温室越冬长茬番茄各器官干物质质量和氮吸收量

Table 2 Biomass and nitrogen uptake of different organs of overwinter long-season tomato grown in greenhouse in  $^{15}\text{N}$  trace experiment

处理 Treatment	生物量 Biomass (kg/hm <sup>2</sup> , DM)				氮吸收量 N uptake (kg/hm <sup>2</sup> )			
	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
$^{15}\text{NCF}$	7674 ± 208 b	472 ± 9.6 b	4258 ± 38 b	4656 ± 80 b	165 ± 5.3 b	6.6 ± 0.2 a	77.8 ± 2.2 b	148 ± 6.4 b
$^{15}\text{NRF}$	8552 ± 113 a	526 ± 8.4 a	4841 ± 33 a	5185 ± 72 a	193 ± 2.9 a	7.0 ± 0.1 a	91.7 ± 3.9 a	160 ± 5.8 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 significantly different among treatments at the 5% level.

表 3 日光温室越冬长茬番茄各器官中肥料氮和其他氮的吸收比例

Table 3 Nitrogen uptake from fertilizer and other source in organs of overwinter long-season tomato in greenhouse

氮素来源 N Source	处理 Treatment	氮吸收量 N uptake (kg/hm <sup>2</sup> )					比例 Proportion (%)				
		果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	总计 Total	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	总计 Total
化肥 Fertilizer	$^{15}\text{NCF}$	73.2 ± 2.1 b	2.8 ± 0.0 b	34.0 ± 1.8 b	66.3 ± 1.3 b	176.3 ± 3.6 b	44.3 ± 5.6 b	42.3 ± 5.6 b	43.8 ± 5.6 b	45.0 ± 5.6 b	44.4 ± 0.7 b
	$^{15}\text{NRF}$	91.9 ± 2.2 a	3.4 ± 0.1 a	46.9 ± 1.8 a	78.9 ± 3.1 a	221.0 ± 3.3 a	47.6 ± 5.6 a	48.2 ± 5.6 a	51.2 ± 5.6 a	49.2 ± 5.6 a	48.9 ± 0.3 a
其它 Other	$^{15}\text{NCF}$	92.0 ± 4.1 b	3.8 ± 0.2 a	43.7 ± 0.6 a	81.4 ± 5.6 a	220.9 ± 5.8 a	55.7 ± 5.6 a	57.7 ± 5.6 a	56.2 ± 5.6 a	55.0 ± 5.6 a	55.6 ± 0.7 a
	$^{15}\text{NRF}$	101.0 ± 0.7 a	3.6 ± 0.0 a	44.8 ± 2.1 a	81.3 ± 3.0 a	230.6 ± 2.6 a	52.4 ± 5.6 b	51.8 ± 5.6 b	48.8 ± 5.6 b	50.8 ± 5.6 b	51.1 ± 0.3 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 significantly different among treatments at the 5% level.

源。两个处理的果实、根、茎、叶以及总吸氮量中来自于其它氮源的比例存在显著差异, 均为<sup>15</sup>NRF 处理低于<sup>15</sup>NCF 处理, <sup>15</sup>NRF、<sup>15</sup>NCF 处理中来自其它源氮占总吸氮量的比例分别为 51.1%、55.6%; <sup>15</sup>NRF 和<sup>15</sup>NCF 处理来自于化肥源氮所占比例也存在显著差异, 所占比例分别为 48.9% 和 44.4%。

## 2.2 越冬长茬番茄化肥氮利用率

2.2.1 采用差减法计算 表 4 表明, RF 处理番茄产量、总吸氮量均明显高于 CF 处理, 分别高出 10.4%、14.8%。CF 和 RF 处理化肥氮利用率分别为 16.4% 和 31.8%, RF 处理化肥氮利用率较 CF 明显提高 15.4 个百分点。

2.2.2 采用<sup>15</sup>N 示踪法计算 表 5 显示, <sup>15</sup>NRF 处理番茄产量、总吸氮量均明显高于<sup>15</sup>NCF 处理, 分别高出 12.1%、25.3%。<sup>15</sup>NRF、<sup>15</sup>NCF 处理化肥氮利用率为 36.4%、20.3%, <sup>15</sup>NRF 处理化肥氮利用率平均提高 16.1 个百分点, 这与<sup>15</sup>NRF 处理减少化肥养分用量、协调氮磷钾养分比例、调整化肥基追比例而提高番茄产量等有关。与表 4 比较, 同样的化肥氮用量情况下, 两种计算方法都显示化肥减施处理的化肥氮利用率高于常规施肥处理的。

## 2.3 土壤剖面全氮与<sup>15</sup>N 百分超的变化

试验 2, 越冬长茬番茄拉秧时各处理不同深度土层的全氮含量自上而下逐渐降低(表 6), 统计分析表明, 2 个处理 0—20 cm 土层全氮含量均显著高于 20—40、40—60 cm 土层, 其中<sup>15</sup>NCF 处理 0—20cm 土层全氮含量的平均值分别是 20—40、40—60 cm 土层的 3.04、3.35 倍, <sup>15</sup>NRF 处理 0—20 cm 土壤全氮含量的平均值分别是 20—40、40—60 cm 土层的 2.63、2.99 倍。<sup>15</sup>NCF 处理 0—20 cm 土壤全氮高于<sup>15</sup>NRF 处理, 而 20—40 和 40—60 cm 土层却是<sup>15</sup>NRF 处理土壤全氮含量略高于<sup>15</sup>NCF 处理, 统计分析还表明, 同一个土层的全氮含量, <sup>15</sup>NCF 处理与<sup>15</sup>NRF 处理均差异较小; 这可能与土壤本身全氮含量较高有关, 即使第一年减施化肥氮, 但对土壤氮库影响很小。

各处理不同深度土层的<sup>15</sup>N 原子百分超也呈现出自上而下逐渐降低趋势(表 6), 统计分析表明, 两个处理 0—20 cm 土层<sup>15</sup>N 原子百分超均显著高于 20—40、40—60 cm 土层, 其中<sup>15</sup>NCF 处理 0—20 cm 土层<sup>15</sup>N 原子百分超分别是 20—40、40—60 cm 土层的 4.02、5.52 倍, <sup>15</sup>NRF 处理 0—20 cm 土壤<sup>15</sup>N 原子百分超分别是 20—40、40—60 cm 土层的

表 4 差减法试验中日光温室越冬长茬番茄产量、氮素吸收量与化肥氮利用率

Table 4 Yield, total nitrogen uptake and chemical nitrogen recovery rate of overwinter long-season tomato in greenhouse by subtraction method experiment

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	氮吸收总量 Total N uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	化肥氮利用率 Chemical N recovery rate (%)	氮素利用率提高百分点 Percentage point increase in N recovery rate
CF	140770 ± 3227 b	377.5 ± 2.3 b	16.4 ± 1.0 b	
CFNN	108834 ± 1074 c	236.9 ± 5.3 c		
RF	154909 ± 2182 a	433.5 ± 3.4 a	31.8 ± 1.1 a	15.4 ± 0.7
RFNN	112951 ± 2383 c	239.9 ± 5.8 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 significantly different among treatments at the 5% level.

表 5 <sup>15</sup>N 示踪法试验中日光温室越冬长茬番茄产量、<sup>15</sup>N 总吸收量与化肥氮利用率

Table 5 Yield, total <sup>15</sup>N uptake and chemical nitrogen recovery rate of overwinter long-season tomato in greenhouse by <sup>15</sup>N trace method

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	<sup>15</sup> N 吸收总量 Total <sup>15</sup> N uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	化肥氮利用率 Chemical N recovery rate (%)	氮素利用率提高百分点 Percentage point increase in N recovery rate
<sup>15</sup> NCF	144002 ± 2622 b	176.3 ± 3.6 b	20.3 ± 0.4 b	
<sup>15</sup> NRF	161911 ± 2677 a	221.0 ± 3.3 a	36.4 ± 0.5 a	16.1 ± 0.7

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 significantly different among treatments at the 5% level.

表 6 越冬长茬番茄收获后不同土层土壤全氮及<sup>15</sup>N 原子百分超  
Table 6 Total soil nitrogen content and atom% <sup>15</sup>N excess in different soil depths after harvest of overwinter long-season tomato

土层深度 (cm) Soil depth	土壤全氮 Soil total N (g/kg)		<sup>15</sup> N 原子百分超 Atom% <sup>15</sup> N excess	
	<sup>15</sup> NCF	<sup>15</sup> NRF	<sup>15</sup> NCF	<sup>15</sup> NRF
0—20	0.94 ± 0.09 a	0.92 ± 0.07 a	7.07 ± 2.31 a	6.11 ± 0.87 a
20—40	0.31 ± 0.02 b	0.35 ± 0.00 b	1.76 ± 0.32 b	1.55 ± 0.33 b
40—60	0.28 ± 0.03 b	0.31 ± 0.03 b	1.28 ± 0.34 b	0.50 ± 0.12 b

注 (Note): 同列数据后不同字母表示不同土层间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among soil layers at the 5% level.

3.93、12.12 倍。<sup>15</sup>NCF 处理各土层<sup>15</sup>N 原子百分超均高于 <sup>15</sup>NRF 处理, 统计分析还表明两处理之间 0—20 及 20—40 cm 土层不存在明显差异, 只有 40—60 cm 土层存在明显差异, 这可能与<sup>15</sup>NRF 处理化肥氮用量低于<sup>15</sup>NCF 处理有关。上述结果表明, 即使日光温室越冬长茬番茄采用微喷灌方法, 到拉秧时氮肥在土壤剖面仍有累积并开始随水向下迁移。

#### 2.4 日光温室越冬长茬番茄化肥氮的去向

氮肥施入农田后的去向可分为: 被作物吸收、残留在土壤中和通过不同机制和途径损失<sup>[4]</sup> 3 个部分。表 7 结果显示, 日光温室越冬长茬番茄收获后, <sup>15</sup>NRF 处理的化肥氮损失量为 245.5 kg/hm<sup>2</sup>、番茄吸收量 221.0 kg/hm<sup>2</sup>、土壤残留量 141.4 kg/hm<sup>2</sup>, 分别占化肥氮用量的 40.4%、36.4%、23.2%; <sup>15</sup>NCF 处理化肥氮损失量 513.2 kg/hm<sup>2</sup>、番茄吸收量 176.3 kg/hm<sup>2</sup>、土壤残留量 168.5 kg/hm<sup>2</sup>, 分别占化肥氮用量的 59.6%、20.6%、19.6%, 表现为化肥氮损失量 > 番茄吸收量 > 土壤残留量。<sup>15</sup>N 残留在土壤中成为土壤氮库的一部分, 未来可能再被作物利用, 以气态形式挥发或随水运移到根区外成为真正的损失。<sup>15</sup>NRF 处理的化肥氮土壤残留量与<sup>15</sup>NCF 处理没有明显差异, 由于番茄吸收量显著增加, 损失比例显著降低了 19.2 个百分点, 充分显示了化肥减施增效技术提高化肥氮素效益的作用。表 7 中数据还显示,

随着土层深度增加, 化肥氮残留量也随着降低, <sup>15</sup>NRF、<sup>15</sup>NCF 处理 0—20 cm 土层<sup>15</sup>N 残留量分别为 125.8、148.1 kg/hm<sup>2</sup>, 分别占总残留量的 88.9%、87.9%, 可见化肥氮主要残留在 0—20 cm 土层。

### 3 讨论

前人对粮食作物氮肥利用率研究表明, 通常情况下用差减法得出的氮肥利用率高于示踪法获得的结果, 但当氮肥与 C/N 值比较大的有机肥配合施用, 此关系并不成立<sup>[15]</sup>。本研究表明, 同样的化肥氮用量条件下, 常规施肥情况下, 用示踪法获得的化肥氮利用率较差减法计算的结果高出 3.9 个百分点; 化肥减施情况下, 用示踪法获得的化肥氮利用率较差减法计算的结果高出 4.6 个百分点。不过本研究基肥施用了 30 t/hm<sup>2</sup> 的有机肥, 即化肥和有机肥配合施用; 另外, 供试土壤速效氮含量甚高, 其中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量为 36.6 mg/kg, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量为 125.1 mg/kg, 番茄因施氮肥而多吸收的土壤氮量可能有限, 对氮肥利用率影响较小, 上述两个原因可能导致本研究的示踪法计算的结果高于差减法计算的结果。至于设施蔬菜氮肥利用率两种计算方法所得结果间的关系还值得进一步研究。

本研究表明, 化肥减施增效技术模式较常规施肥模式化肥养分用量降低了 40%, 产量增加了

表 7 日光温室越冬长茬番茄生产中化肥<sup>15</sup>N 的去向 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 7 Fate of <sup>15</sup>N-labelled chemical fertilizer during overwinter long-season tomato production in greenhouse

处理 Treatment	施入量 Input	吸收量 Uptake	土壤中残留量 Residue in soil				损失量 Loss
			0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—60 cm	
<sup>15</sup> NCF	858	176.3 ± 3.6 b	148.1 ± 38.9 a	12.2 ± 1.3 a	8.3 ± 3.0 a	168.5 ± 30.5 a	513.2 ± 32.8 a
<sup>15</sup> NRF	608	221.0 ± 3.3 a	125.8 ± 17.0 a	12.2 ± 2.5 a	3.4 ± 0.7 a	141.4 ± 14.8 a	245.5 ± 17.5 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 significantly different among treatments at the 5% level.

10% 以上, 这与前人化肥减施、作物产量不降低的研究结果<sup>[16-19]</sup>是一致的。但是本研究化肥养分减量, 不仅从总量上减少, 而且还考虑到协调氮磷钾养分比例, 调整了基肥化肥与追肥化肥养分的比例, 而前人采用的策略重点是化肥氮养分减少, 或者是总量减少, 或者是氮磷钾同比例减少。中国农业科学院农业资源与农业区划研究所蔬菜养分管理团队前期农户施肥调查结果表明, 河北地区日光温室越冬长茬番茄化肥氮、磷、钾用量分别为各自推荐用量的 1.44、3.28 和 1.57 倍, 实际生产中, 化肥养分投入量与作物养分需求规律并不匹配, 设施蔬菜化肥减施不仅要考虑化肥养分投入总量的减少, 还要考虑协调化肥氮磷钾的投入比例<sup>[20]</sup>。

差减法、<sup>15</sup>N 示踪法计算结果都表明, 日光温室越冬长茬番茄化肥减施增效技术模式的化肥氮利用率较常规施肥模式均提高 15 个百分点以上, 这与前人用<sup>15</sup>N 示踪法研究氮素利用率结果基本一致; 徐明杰等<sup>[20]</sup>利用<sup>15</sup>N 示踪法研究表明, 夏玉米施氮量由农户习惯用量 250 kg/hm<sup>2</sup> 降低到 185 kg/hm<sup>2</sup>, 即减施 26%, 并调整化肥氮运筹模式, 氮素利用率提高了 11.7 个百分点。雍太文等<sup>[21]</sup>利用<sup>15</sup>N 示踪法的研究表明, 玉米大豆套作施氮量由 240 kg/hm<sup>2</sup> 降低到 180 kg/hm<sup>2</sup>, 即减施 25%, 第 1 年、第 2 年氮素利用率分别提高了 28.8 个百分点、35.5 个百分点。鉴于设施蔬菜化肥用量大, 应用<sup>15</sup>N 示踪法研究成本远高于差减法, 可见用差减法研究化肥减施增效和化肥氮利用率也能达到预期效果。

本研究还表明, 设施蔬菜化肥减施增效技术模式(化肥氮用量 608 kg/hm<sup>2</sup>), 土壤<sup>15</sup>N 损失率为 40.4%, 低于常规施肥模式的 59.6%, 即化肥减施可降低农田氮损失量。姜慧敏等<sup>[22]</sup>应用平衡理论计算得出, 设施蔬菜优化施肥(化肥氮用量 500 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>15</sup>N 损失率为 8.2%。Milkha 等<sup>[23]</sup>研究表明, 氮用量在 120、150 kg/hm<sup>2</sup> 时, 小麦收获时有 5%~27% 的<sup>15</sup>N 损失; Wang 等<sup>[24]</sup>研究表明, 玉米不同氮素用量情况下, <sup>15</sup>N 的损失比例 11.2%~22.2%。Ding 等<sup>[25]</sup>研究表明, 不同蔬菜作物尿素氮用量在 225~250、450~480 kg/hm<sup>2</sup> 时的损失率分别为 6.6%~31.1%、11.9%~37.4%; 本研究<sup>15</sup>N 损失率较高, 这可能与化肥氮用量较高、施用次数较多、土壤采样深度仅为 0~60 cm 等有关。本试验氮损失是基于氮素平衡理论计算得出的, 氮损失的定量分析还有待进一步全面深入研究。本试验还表明, 氮主要残留在 0—20 cm 土壤, 这与赵伟等<sup>[26]</sup>、Zhong 等<sup>[27]</sup>在大田上的研究结果相似, 说明土地利用方式并不

影响氮在土壤中主要残留深度。

## 4 结论

在施用有机肥 30 t/hm<sup>2</sup> 的基础上, 将日光温室越冬长茬番茄农户常规施用化肥总养分量减少 40%, 并调节氮磷钾比例, 可显著增产 10% 以上, 化肥氮利用率提高 15.4~16.1 个百分点, 氮素损失率降低 40.4%~59.6%, 土壤残留比例基本不变。

## 参 考 文 献:

- [1] 张真和, 马兆红. 我国设施蔬菜产业概况与“十三五”发展重点[J]. 中国蔬菜, 2017, (5): 1-5.  
Zhang Z H, Ma Z H. General situation of greenhouse vegetable industry and key points of development of China in the 13th Five-Year Plan[J]. China Vegetables, 2017, (5): 1-5.
- [2] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480-1493.  
Huang S W, Tang J W, Li C H, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(6): 1480-1493.
- [3] Chen H, Zhou J, Li B, et al. Yield-scaled N<sub>2</sub>O emissions as affected by nitrification inhibitor and overdose fertilization under an intensively managed vegetable field: A three-year field study[J]. Atmospheric Environment, 2019, 206: 247-257.
- [4] Zhang M, Chen Z Z, Li Q L, et al. Quantitative relationship between nitrous oxide emissions and nitrogen application rate for a typical intensive vegetable cropping system in Southeastern China[J]. Clean-Soil Air Water, 2016, 44(12): 1725-1732.
- [5] 张国显, 白银霞, 范永怀, 等. 化肥减量配施有机物料对设施番茄氮素积累、分配与利用率的影响[J]. 北方园艺, 2019, (3): 6-13.  
Zhang G X, Bai Y X, Fan Y H, et al. Effect of organic materials combined application with chemical fertilizer on accumulation distribution and utilization efficiency of nitrogen in greenhouse tomato[J]. Northern Horticulture, 2019, (3): 6-13.
- [6] 唐宇, 包慧芳, 詹发强, 等. 化肥减施条件下配施生物有机肥对番茄生长及品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2019, (5): 841-854.  
Tang Y, Bao H F, Zhan F Q, et al. Effect of combined application of bio-organic fertilizer on tomato growth and quality under the condition of chemical fertilizer reduction[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, (5): 841-854.
- [7] 庄振东, 李絮花. 腐植酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1232-1239.  
Zhuang Z D, Li X H. Effects of humic acid nitrogen fertilization on corn yield, nitrogen utilization and nitrogen loss[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(5): 1232-1239.
- [8] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1352-1360.  
Zhang A P, Liu R L, Gao J, et al. Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the Ningxia Yellow River irrigation region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1352-1360.
- [9] 王颖. 设施黄瓜化肥减施条件下微生物菌剂应用效果研究初报[J].

- 辽宁农业科学, 2018, (3): 35–38.
- Wang Y. Study on the effect of microbial inoculates on greenhouse cucumber under reduced chemical fertilizer supply[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2018, (3): 35–38.
- [10] 尹彩侠, 李前, 孔丽丽, 等. 控释氮肥减施对春玉米产量、氮素吸收及转运的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3941–3950.
- Yin C X, Li Q, Kong L L, *et al.* Effect of reduced controlled-release nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and transportation of spring maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3941–3950.
- [11] 黄绍文, 唐继伟, 张怀志, 等. 设施蔬菜生产全程精准施肥解决方案的制定与实施[J]. *中国蔬菜*, 2017, (7): 5–8.
- Huang S W, Tang J W, Zhang H Z, *et al.* Formulation and implementation of precision fertilization solution for greenhouse vegetable production[J]. *China Vegetables*, 2017, (7): 5–8.
- [12] 周红梅, 李艳霞, 王春兰, 等. 济宁地区覆膜大蒜化肥减施增效技术措施研究[J]. *现代农业科技*, 2019, (6): 61–63.
- Zhou H M, Li Y X, Wang C L, *et al.* Study on fertilizer reduction and efficiency increase of garlic covered with mulch in Jining Region[J]. *Modern Agriculture Science and Technology*, 2019, (6): 61–63.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [14] 巨晓棠, 张福锁. 氮肥利用率的意义及其提高的技术措施[J]. *科技导报*, 2003, 21(03044): 51–54.
- Ju X T, Zhang F S. Correct understanding of nitrogen recovery rate[J]. *Science and Technology Review*, 2003, 21(03044): 51–54.
- [15] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 213–249.
- Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in Chinese soil[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 213–249.
- [16] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(2): 492–497.
- [17] 王文军, 朱克保, 叶寅, 等. 水肥一体肥料减量对大棚番茄产量、品质和氮肥利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(28): 38–42.
- Wang W J, Zhu K B, Ye Y, *et al.* Effect of reducing fertilizer application on yield, quality and fertilizer utilization of greenhouse cultivation tomato under integration of water and fertilizer[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(28): 38–42.
- [18] 唐珖, 李丽君, 刘平, 等. 减肥减水对温室黄瓜养分吸收、产量及土壤质量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (1): 77–82.
- Tang Y, Li L J, Liu P, *et al.* Effects of irrigation and fertilization on nutrient absorption and yield of cucumber and soil quality in greenhouse[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, (1): 77–82.
- [19] 张怀志, 唐继伟, 袁硕, 等. 津冀设施蔬菜施肥调查分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (2): 54–60.
- Zhang H Z, Tang J W, Yuan S, *et al.* Investigation and analysis of greenhouse vegetable in Tianjin Metropolis and Hebei Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018, (2): 54–60.
- [20] 徐明杰, 张琳, 汪新穎, 等. 不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(1): 36–45.
- Xu M J, Zhang L, Wang X Y, *et al.* Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 36–45.
- [21] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系统下作物氮素吸收和利用效率的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 4473–4482.
- Yong T W, Liu X M, Liu W Y, *et al.* Effects of reduced nitrogen application on nitrogen uptake and utilization efficiency in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 4473–4482.
- [22] 姜慧敏, 张建峰, 李玲玲, 等. 优化施氮模式下设施菜地氮素的利用及去向[J]. *植物营养与肥科学报*, 2013, 19(5): 1146–1154.
- Jiang H M, Zhang J F, Li L L, *et al.* Utilization and fate of nitrogen in greenhouse vegetable under optimized nitrogen fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(5): 1146–1154.
- [23] Milkha S A, Ashok K G, Joginder S M, *et al.* Biological nitrogen fixation by soybean and fate of applied  $^{15}\text{N}$ -fertilizer in succeeding wheat under conventional tillage and conservation agriculture practices[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107: 79–89.
- [24] Wang S J, Luo S S, Yue S C, *et al.* Fate of  $^{15}\text{N}$  fertilizer under different nitrogen split applications to plastic mulched maize in semiarid farmland[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 105: 129–140.
- [25] Ding H, Li S Q, Zhang Y S, *et al.* The fate of urea nitrogen applied to a vegetable crop rotation system[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 103: 279–292.
- [26] 赵伟, 梁斌, 杨学云, 等. 长期不同施肥对小麦-玉米轮作体系土壤残留肥料氮去向的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(8): 1628–1634.
- Zhao W, Liang B, Yang X Y, *et al.* Effects of long-term different fertilizations on the fate of residual fertilizer N in a wheat-maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(8): 1628–1634.
- [27] Zhong Y M, Wang X P, Yang J P, *et al.* Tracing the fate of nitrogen with  $^{15}\text{N}$  isotope considering suitable fertilizer rate related to yield and environment impacts in paddy field[J]. *Paddy and Water Environment*, 2017, 15: 943–949.