

# 太原城郊老菜区番茄氮肥利用率及氮去向研究\*

韩鹏远<sup>1,2</sup> 焦晓燕<sup>2\*\*</sup> 王立革<sup>2</sup> 董二伟<sup>2</sup> 王劲松<sup>2</sup>

(1. 山西大学生物工程学院 太原 030006;

2. 山西省农业科学院土壤肥料研究所 山西省土壤肥料与养分资源重点实验室 太原 030031)

**摘 要** 为了加强太原城郊老菜区蔬菜生产中氮素管理和降低蔬菜生产对环境的污染,在田间采用微区  $^{15}\text{N}$  示踪法研究了番茄生产过程中农民习惯施氮(FAR)和推荐施氮(RAR)的氮肥利用效率和氮去向。结果表明:与习惯施氮比较,推荐施氮对番茄各部位干物质、氮浓度和产量均无显著影响,且明显降低了番茄地上部吸收化学肥料氮的百分率,但对各部位氮肥利用效率和总氮肥利用效率无显著影响,氮肥利用效率仅为 8%~9%,这可能与土壤原来氮库或所施有机肥矿化提供了大量氮素有关。两种施肥处理均导致 65%左右的氮素损失,其中习惯施氮和推荐施氮分别导致 30%和 26%的氮素淋洗到 40 cm 以下土层,为此有必要种植蔬菜后利用深根系粮食作物吸收土壤下层氮素来降低蔬菜生产对环境的影响。

**关键词** 番茄 施肥方法 氮肥利用率 氮去向 硝态氮

中图分类号: S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2010)03-0482-04

## Use efficiency and fate of applied nitrogen in long-term tomato districts of Taiyuan

HAN Peng-Yuan<sup>1,2</sup>, JIAO Xiao-Yan<sup>2</sup>, WANG Li-Ge<sup>2</sup>, DONG Er-Wei<sup>2</sup>, WANG Jin-Song<sup>2</sup>

(1. School of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Institute of Soil and Fertilizer, Shanxi Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Soil, Fertilizer and Nutrient Resources of Shanxi Province, Taiyuan 030031, China)

**Abstract** In order to manage N efficiently in long-term vegetable production districts, field trials were conducted to determine nitrogen use efficiency (NUE) and the fate of N under 2 nitrogen fertilizer application rates [farmer application rate (FAR) and recommended application rate (RAR) of  $^{15}\text{N}$ ] during tomato cultivation. The results indicate that RAR does not significantly influence dry-matter of different parts, yield and nitrogen content of tomato, compared with FAR. Contrary to FAR, RAR results in lower percent of plant nitrogen derived from fertilizer (NDF). The 2 treatments yield similar NUE, which is 8%~9%. This may be due to either relative large nitrogen pool in soils, high manure application or both. 65% of the nitrogen supplied as inorganic fertilizer is lost under two treatments, and 30% under FAR and 26% under RAR of which leaches to depths over 40 cm of soil profile. It is therefore necessary to understand whether leached nitrogen is utilizable by deep-rooted crops.

**Key words** Tomato, Fertilization method, Nitrogen use efficiency, Fate of nitrogen,  $\text{NO}_3^-$ -N

(Received Dec. 1, 2009; accepted Jan. 20, 2010)

蔬菜产业是城郊农业的主体,具有高产、高效和劳动密集特点,为城市居民蔬菜消费提供了保证,并为城郊农民提供了大量就业机会。但城郊蔬菜生产的环境效应也值得高度关注。如太原市蔬菜主产区老菜田土壤硝态氮严重淋洗,土壤剖面 160~200 cm 硝态氮含量高达 30~40  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远高于耕层土

壤硝态氮含量<sup>[1]</sup>。南京郊区番茄氮肥利用效率为 14.5%~22.5%,且当季有 10%左右的氮肥被淋洗到 40 cm 以下土层<sup>[2]</sup>。菠菜尿素施肥管理方式会明显影响硝态氮在土壤的淋洗,传统施肥氮肥利用效率仅为 3%~18%,50%的氮肥被淋洗;而根据作物生长需求的氮肥管理下氮淋洗量仅为传统施肥管理的一半<sup>[3]</sup>。

\* 山西省科技攻关项目(2007031035)和太原市科技明星专项(09121018)资助

\*\* 通讯作者: 焦晓燕(1964~),女,博士,主要从事土壤肥料与植物营养研究。E-mail: xiaoyan\_jiao@yahoo.com.cn

韩鹏远(1983~),女,在读研究生,主要研究方向为植物营养。E-mail: hpy31@126.com

收稿日期: 2009-12-01 接受日期: 2010-01-20

有关提高蔬菜氮肥利用效率和控制土壤剖面硝态氮的研究已有报道,如使用缓效肥<sup>[2]</sup>、利用有机改良剂<sup>[4]</sup>和多次施肥养分资源管理<sup>[3]</sup>等。Kristensen等<sup>[5]</sup>发现植物几乎不可能吸收根系以下土层的氮,蔬菜氮肥利用效率与其根系生长和空间分布有关。在我国北方,露地番茄生长季节正值雨季,土壤剖面160~200 cm硝态氮累积可能一方面与降雨和灌溉有关,更可能是多年过量施氮的结果。为此本研究利用<sup>15</sup>N示踪技术研究老菜田番茄的氮肥利用效率,明确不同养分资源管理方式下当季所施氮肥在土壤剖面的分布,以期为露地番茄施肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于山西省太原市清徐县孟封镇,东经112°18′,北纬37°36′,属暖温带大陆性气候,四季分明,年平均日照2 577.5 h,日照率达58%;无霜期183 d;年平均气温9.6~10.2℃,年均降水量为462 mm,试验年度番茄生育期降雨量340.7 mm,6~8月份降雨量279.4 mm。当地典型种植方式为两年3作的番茄/小麦/甘蓝。供试土壤为潮土,0~20 cm耕层土壤养分含量为:有机质17.30 g·kg<sup>-1</sup>、全氮0.87 g·kg<sup>-1</sup>、Olsen-P 22.95 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾134.45 mg·kg<sup>-1</sup>、硝态氮19.32 mg·kg<sup>-1</sup>。土壤剖面(0~200 cm)的机械组成见表1。

表1 试验地土壤剖面的机械组成  
Tab. 1 Soil particle size distribution of the studied site

土壤深度 Soil depth (cm)	土壤质地 Soil particle size distribution (%)		
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
0~20	45.7	27.1	27.2
20~40	60.3	12.8	27.0
40~60	63.2	17.4	19.4
60~80	22.9	40.3	36.8
80~100	51.4	20.9	27.7
100~120	9.3	40.9	49.9
120~140	5.2	46.9	47.9
140~160	7.9	49.9	42.2
160~180	20.4	40.4	39.2
180~200	35.0	29.5	35.5

### 1.2 试验设计

采用原子百分超为5.23%的<sup>15</sup>N标记尿素(化工部上海化工研究院生产)进行微区试验,微区面积为1.1 m<sup>2</sup>,定植前将1.1 m(长)×1 m(宽)×1 m(高)的微区框埋进土壤,露出地表15 cm,以免灌水将外部氮携带进微区,并保持微区框内为原状土。在有机肥、磷肥、钾肥用量相同的情况下,试验设农民习惯施

氮[Farmer application rate, FAR, 700 kg(N)·hm<sup>-2</sup>]和推荐施氮[Recommended application rate, RAR, 375 kg(N)·hm<sup>-2</sup>]两个处理,4次重复。供试蔬菜为番茄,于2006年4月28日定植,采用宽窄行种植地膜覆盖栽培,宽行行距70 cm,窄行行距40 cm,株距50 cm,种植密度为45 000株·hm<sup>-2</sup>,每微区种植番茄4株。

定植前施用有机肥32 t·hm<sup>-2</sup>,有机肥养分含量为全氮23.1 g·kg<sup>-1</sup>、全磷15.1 g·kg<sup>-1</sup>和全钾8.3 g·kg<sup>-1</sup>,生育期共施磷180 kg·hm<sup>-2</sup>、施钾360 kg·hm<sup>-2</sup>。分别于定植前、6月11日、6月23日和7月29日将50%、26%、22%和2%的<sup>15</sup>N标记尿素施入,其中播前<sup>15</sup>N标记尿素均匀撒施,生育期追肥则用纯净水溶解<sup>15</sup>N标记尿素,在宽行间开沟均匀施入并覆土,每次追肥灌水450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。9月12日全部拉秧。

### 1.3 测定项目与方法

番茄生长期间,每周将各微区打掉的侧枝和老叶带回,进入采收期后分别采收各微区的番茄并测产,各微区内番茄的侧枝、老叶、果实分别采收后烘干;拉秧时将根、茎、叶、果分开采收烘干,并分别与整个生育期收集的侧枝、叶片、果实混合、粉碎,以测定总干重及各部分氮含量和<sup>15</sup>N丰度;拉秧后每20 cm为1层采集0~200 cm土样,分别测定土壤全氮、硝态氮含量及<sup>15</sup>N丰度。

植株样105℃下杀青30 min、65℃烘干后称干重,测干物质重;植株氮含量用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>消煮,开氏定氮法测定<sup>[6]</sup>;植株和土壤<sup>15</sup>N丰度采用质谱法测定;土壤硝态氮采用流动分析仪测定。

### 1.4 计算与统计分析

根据参考文献[7-8]计算不同处理植物体内来自化学肥料氮百分率(NDF)和肥料氮利用效率(NUE):

$$NDF(\%)=100 \times (a - b)/(c - d) \quad (1)$$

式中, $a$ 为施用<sup>15</sup>N标记尿素植株根系、叶片、茎、果实的<sup>15</sup>N丰度, $b$ 为施用未标记尿素植株根系、叶片、茎、果实的<sup>15</sup>N丰度, $c$ 为<sup>15</sup>N标记尿素的<sup>15</sup>N丰度, $d$ 为自然的<sup>15</sup>N丰度。

$$NUE(\%)=(NDF \times S)/R \quad (2)$$

式中, $S$ 为单位面积植株根系、叶片、茎、果实N含量[kg(N)·hm<sup>-2</sup>], $R$ 为施氮量[kg(N)·hm<sup>-2</sup>]。

根据参考文献[7]计算不同土壤层次<sup>15</sup>N的回收率(RFNsoil):

$$RFNsoil(\%)=100 \times (a - c)/(b - c) \times (Np/Nf) \quad (3)$$

式中, $a$ 为施用<sup>15</sup>N标记尿素后的土壤<sup>15</sup>N丰度, $b$ 为<sup>15</sup>N标记尿素的<sup>15</sup>N丰度, $c$ 为未施肥土壤的<sup>15</sup>N丰度,

$N_p$  为单位面积土壤样品中全氮含量,  $N_f$  为施入单位面积土壤中的  $^{15}\text{N}$  量。

数据统计采用 MINITAB 14 进行。

## 2 试验结果

### 2.1 不同施氮量对番茄各部位干物质累积、氮含量及产量的影响

从图 1 可以看出, 与习惯施氮处理相比, 推荐施氮处理对番茄果实、叶片、茎和根各部位干物质累积量的影响不显著; 对番茄产量影响也不显著, 习惯施氮处理番茄产量为  $81.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 而推荐施氮处理为  $82.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同施氮处理番茄果实、叶片、茎及根系各部位氮含量和累积量也无显著差异。表明在目前有机肥施用情况下, 试验区域菜地减量施氮对蔬菜产量和养分吸收无显著影响。

### 2.2 不同施氮量对番茄各部位化学肥料氮百分率 (NDF) 及氮肥利用效率 (NUE) 的影响

表 2 表明, 习惯施氮果实、叶片、茎、根的 NDF 分别为 36.4%、32.9%、37.3% 和 24.9%, 而推荐施氮的果实、叶片、茎、根的 NDF 分别为 21.3%、18.3%、24.0%、21.6%, 两种施肥处理下, 除根系外, 其他部位 NDF 差异显著 ( $P < 0.05$ )。不同施氮处理对植株各部位氮肥利用效率和总利用效率无显著影响, 果实、叶片、茎和根系的氮肥利用效率均较低, 仅为 5.9%~6.3%、1.5%~1.9%、0.6%~0.8%、0.1%, 整株氮肥利用效率也仅为 8.5%~8.8%, 明显低于曹兵等<sup>[2]</sup>在南京郊区所得的番茄氮肥利用效率。

### 2.3 不同施氮量对土壤剖面 $^{15}\text{N}$ 回收率、氮损失和硝态氮含量的影响

番茄收获后, 两个施氮处理 0~140 cm 土体  $^{15}\text{N}$  回收率均达 54% 左右, 140 cm 以下土体未检测到  $^{15}\text{N}$ , 表明灌溉和降雨的共同作用可将当季所施氮肥淋洗到 140 cm 左右 (图 2)。土壤剖面  $^{15}\text{N}$  回收率表现为习惯施氮 20~40 cm、40~60 cm 土层最高, 接近 14%, 40~200 cm 土体中  $^{15}\text{N}$  回收率为 30% 左右; 而 0~20 cm 土层推荐施氮处理的  $^{15}\text{N}$  回收率最高为 15.5%, 40~200 cm 土体中  $^{15}\text{N}$  回收率为 26% 左右; 习惯施肥

导致当季所施氮肥明显下淋。鉴于蔬菜根系主要分布在 0~40 cm 土层<sup>[9]</sup>, 植物基本上不能吸收利用根系以下的氮素<sup>[5]</sup>, 故将土体 40 cm 以下氮素视为淋洗损失。根据氮肥利用效率和土壤 0~40 cm  $^{15}\text{N}$  回收率计算, 习惯施氮和推荐施氮处理的总  $^{15}\text{N}$  回收率分别为 32.0% 和 36.8% 左右, 淋洗到根层以下的占 30% 和 26%, 两处理均有约 38% 左右的氮素以气态损失。

与推荐施氮比较, 习惯施氮提高了 20~140 cm 土层硝态氮累积, 40~60 cm 和 60~80 cm 尤为明显 (图 2), 这与土壤剖面中  $^{15}\text{N}$  回收率结果一致, 进一步说明习惯施肥会明显导致氮在土壤剖面淋洗。

## 3 讨论

据报道全国露地氮肥使用量普遍较高, 达  $1\ 200 \text{ kg}(\text{N}) \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[10]</sup>, 城郊菜田尤为突出, 如北京市郊氮素平均用量为  $1\ 741 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[11]</sup>, 太原城郊 (有机无机) 施氮量亦达  $1\ 600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (如本研究中习惯施氮)。而蔬菜生长所需氮素仅为  $150\sim 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[12]</sup>, 本研究中番茄需氮量也约为  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (图 1), 90% 的氮素滞留在土壤环境中, 为此菜田土壤氮素管理尤为受到关注<sup>[2,11,13]</sup>。

尽管本试验中番茄产量是其他研究<sup>[2,14]</sup> 的两倍, 但推荐施氮量与农民习惯施氮量对番茄产量、各部位氮含量和氮累积量无显著影响, 以前也有类似报道<sup>[14-15]</sup>。这可能是由于土壤中氮素、有机肥氮素矿化或二者结合, 使推荐施氮量即可满足番茄对氮素的需求。因此从产量上来看该区域习惯施氮水平明显过量。

与推荐施氮比较, 习惯施氮明显提高了番茄地上部吸收化学肥料氮的百分率, 这表明植物对来自肥料氮素的吸收与土壤氮库大小有关。尽管两个处理  $^{15}\text{N}$  标记尿素的使用量相差甚大, 但氮肥利用效率基本一致, 低于国内报道<sup>[2,14]</sup>。Williams 等<sup>[3]</sup> 发现菠菜氮肥利用效率为 3%~18%, 且不同施肥方法氮肥利用效率不同。本研究中氮肥利用效率较低可能与有机肥施用量较高有关, 因此有必要明确该区域

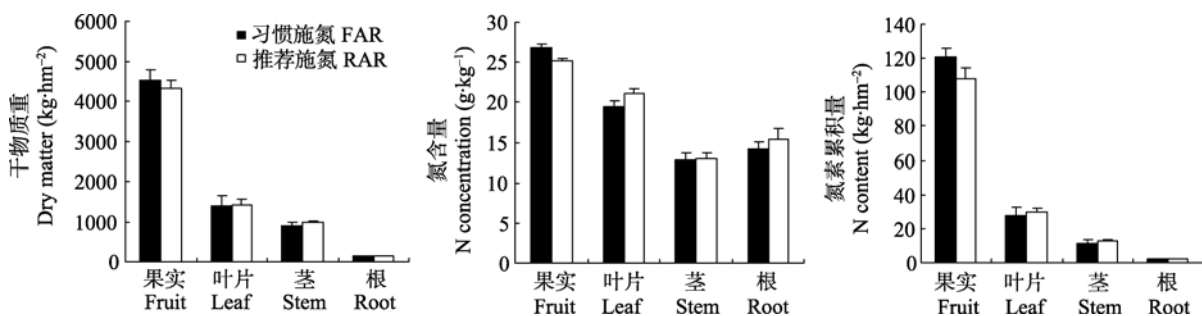


图 1 不同施氮量对番茄各器官干物质、氮含量、氮素累积量的影响

Fig. 1 Effect of N application rates on dry matter, N content and accumulation of different parts of tomato

表 2 施肥对番茄不同部位化学肥料氮百分率和氮肥利用效率的影响  
Tab. 2 Effects of N application rates on percentage of N derived from chemical fertilizer (NDF) and percentage of utilization of fertilizer N (NUE) of different parts of tomato

处理 Treatment	化学肥料氮百分率 NDF (%)				氮肥利用效率 NUE (%)				
	果实 Fruit	叶片 Leaf	茎 Stem	根系 Root	果实 Fruit	叶片 Leaf	茎 Stem	根系 Root	合计 Total
习惯施氮 FAR	36.4±1.7b	32.9±2.2b	37.3±6.1b	24.9±6.3a	6.3±0.1a	1.5±0.2a	0.6±0.1a	0.1±0.0a	8.5±0.2a
推荐施氮 RAR	21.3±2.5a	18.3±3.6a	24.0±4.3a	21.6±3.1a	5.9±0.3a	1.9±0.3a	0.8±0.0a	0.1±0.0a	8.8±0.4a

同列数据后不同字母表示处理间差异达 5%显著水平。Different letters in one column mean significant difference at 5%.

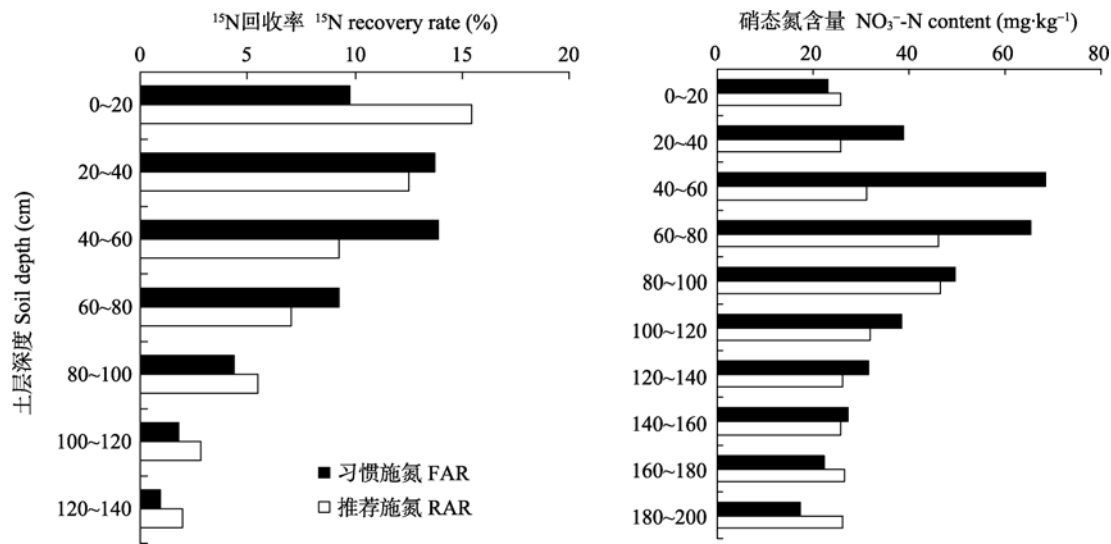


图 2 不同施氮量对土壤剖面 <sup>15</sup>N 回收率和硝态氮含量的影响  
Fig. 2 Effect of different N application rates on soil profile <sup>15</sup>N recovery rate and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content

露地蔬菜生产过程中有机肥矿化特征, 合理利用有机肥源, 结合蔬菜需肥规律, 进行菜田土壤合理的氮素管理。

无论习惯施氮还是推荐施氮, 40~200 cm 土体中 <sup>15</sup>N 回收率都高达 26%~30%, 其难以被浅根系蔬菜植物吸收利用。能否利用深根系粮食作物吸收土壤下层氮素来降低蔬菜生产对环境的影响值得考虑, 故有必要研究粮菜轮作体系中粮食作物对前茬蔬菜残留氮素的利用效率, 提高粮菜轮作体系中氮素的利用效率。

参考文献

[1] 白文斌, 焦晓燕, 王立革, 等. 利用 3D Surfer 实现田间土壤信息的三维可视化[J]. 山西农业科学, 2008, 36(3): 52-54

[2] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 南京郊区番茄地中氮肥的效应与去向[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1839-1844

[3] Williams P H, Tregurtha R J, Francis G S. Fate of urea applied to winter spinach in New Zealand[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 67: 245-254

[4] Choi W J, Ro H M, Chang S C. Recovery of fertilizer-derived inorganic-<sup>15</sup>N in a vegetable field soil as affected by application of an organic amendment[J]. Plant and Soil, 2004, 263: 191-201

[5] Kristensen H L, Thorup-Kristensne K. Uptake of <sup>15</sup>N labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2~2.5 meters depth[J]. Plant and Soil, 2004, 265: 93-100

[6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005

[7] Samuel C A, Jose S, Nair P K R, et al. Competition for <sup>15</sup>N-labeled fertilizer in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States[J]. Plant and Soil, 2004, 263: 151-164

[8] Wienhold B J, Trooien T P, Reichman G A. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the northern great plains[J]. Agronomy Journal, 1995, 87: 842-846

[9] 庄舜尧, 孙秀廷. 肥料氮在蔬菜地中的去向及平衡[J]. 土壤, 1997, 29(2): 80-83

[10] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 286-291

[11] 杜连凤, 吴琼, 赵同科, 等. 北京市郊典型农田施肥研究与分析[J]. 中国土壤与肥料, 2009(3): 75-78

[12] 陈清, 张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 63-67

[13] 钱海燕, 王兴江, 黄国勤, 等. 施肥对连作蔬菜地蔬菜产量和土壤氮素含量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 270-275

[14] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 露地蔬菜的氮素效应和氮素去向[J]. 核农学报, 2008, 22(3): 343-347

[15] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用效率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1122-1128