植物营养与肥料学报 2013,19(5):1146-1154
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi:10.11674/zwyf.2013.0514

优化施氮模式下设施菜地氮素的利用及去向

姜慧敏,张建峰,李玲玲,李树山,张水勤,潘 攀,
郭俊姆,刘 恋,杨俊诚*
(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,耕地培育技术国家工程实验室,
中国农业科学院土壤质量重点开放实验室,北京 100081)

摘要:针对设施蔬菜生产中化肥氮高强度投入造成的肥料资源浪费和土壤质量下降等突出问题,以我国设施蔬菜生产典型区山东寿光为研究基地,在该区域3年减施氮肥模式对农学、肥力和环境效应影响的定位试验基础上,应用^{15}N示踪技术,对筛选出的氮肥优化模式进行验证,并定量化地研究氮肥基于C/N调控和基于水分调控的优化模式下氮素的吸收、利用及去向,以期为设施菜地合理的氮素管理提供理论和技术支持。试验设2个处理,1)农民习惯施氮模式(FP);2)优化施氮模式(OPT)。研究结果表明,OPT处理的番茄地上部产量和氮素吸收量均高于FP,作物吸收氮只有20%左右来自化肥氮;与FP相比,OPT处理的化肥氮素农学效率和氮素利用率显著提高($P<0.05$);土壤中残留氮主要以硝态氮的形式存在,FP和OPT处理在0—100 cm土层中的残留量分别为N 536.9和340.3 kg/hm^2,主要分布在0—40 cm土层,随着深度的增加,累积量有所减少,OPT处理显著降低了各土层硝态氮的累积($P<0.05$);除了作物吸收和土壤残留的氮,FP和OPT处理中分别有32.4%和8.2%的化肥氮以各种途径损失,OPT处理氮素损失率比FP低24.2个百分点。综合以上研究结果,优化施氮模式对化肥氮的吸收、利用及减少化肥氮的损失方面均优于农民习惯施氮模式。

关键词:^{15}N示踪;设施菜地;化肥氮素利用效率
中图分类号:S625.5$^+$4 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)05-1146-09

Utilization and fate of nitrogen in greenhouse vegetable under optimized nitrogen fertilization

JIANG Hui-min, ZHANG Jian-feng, LI Ling-ling, LI Shu-shan, ZHANG Shui-qin, PAN Pan,
GUO Jun-mei, LIU Lian, YANG Jun-cheng*
(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land/Key Laboratory of Soil Quality, CAAS, Beijing 100081, China*)

Abstract: Excessive nitrogen (N) fertilization input has resulted in fertilizer waste and soil quality degeneration, etc. Based on the last 3-year results of the effects of different N fertilizer management models on soil agronomy, fertilizer and environment efficiency, an optimum N fertilizer management model was selected. To indentify the model and investigate the fate and utilization of the chemical N fertilizer, a micro-plot experiment with ^{15}N tracing technique was carried out in Shouguang, Shandong Province, which is the famous greenhouse vegetable production base in Northern China. The experiment included the conventional N fertilizer model (FP) and optimized N fertilizer model (OPT). The main findings are that the higher dry matter production and N content are obtained in the OPT model and only about 20% of N uptake of plants comes from chemical N fertilizer. Compared with the FP model, the agronomic efficiency and N recovery efficiency of chemical fertilizer N are significantly increased in the OPT model. NO_3^--N is the main chemical N residue form, and the NO_3^--N accumulation amounts in 0-100 cm soil

收稿日期:2012-12-19 **接受日期**:2013-04-01
基金项目:国家重点基础研究计划"973"课题(2013CB127406);国家自然科学基金项目(21107139);农业部公益性行业科研专项(201103007);科研院所技术开发研究专项资金(2012EG134235)资助。
作者简介:姜慧敏(1980—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,主要从事土壤培肥与环境研究。E-mail:jianghuimin@caas.cn
* 通信作者 E-mail:yangjuncheng@caas.cn

layer of the two models are N 536.9 and 340.3 kg/ha respectively. NO_3^--N is mainly accumulated in 0–40 cm soil layer, and NO_3^--N accumulation amounts are decreased with the increase of soil depth. Compared with the FP model, soil NO_3^--N accumulation amounts in each soil layer of the OPT model are significantly decreased. 32.4% and 8.2% of ^{15}N loss are from the chemical N fertilizer, respectively in the FP and OPT models, and the N loss rate of the OPT model is 24.2% lower than that of the FP model. The present study shows that the OPT model can improve chemical N fertilizer uptake and utilization, reduce chemical N fertilizer loss and maintain the sustainability of greenhouse-based intensive vegetable systems.

Key words: ^{15}N tracer technology; greenhouse vegetable; chemical N recovery efficiency

以高投入获得高产出为特点的设施蔬菜生产体系中,氮素与其他矿质元素相比,其增产作用更突出、更显著[1],因此,长期以来设施蔬菜生产一直偏重于施用大量的氮肥。据报道,北京市设施栽培土壤全年平均施氮量为 N 1732 kg/hm^2,为一般蔬菜氮素吸收量的 4.5 倍,相当于冬小麦/夏玉米轮作粮田的 3.8 倍[2];山东寿光大棚黄瓜的单季化肥氮施用量达到 N 1816 kg/hm^2[3]。但是作物对营养元素的吸收和利用都是有限的,只有养分供应达到适宜的水平才能确保获得最高的产量,当氮肥施用量已达到产量增加的潜力限度时,过量的氮肥投入有抑制蔬菜产量增加的趋势[4],过量施氮一方面造成肥料浪费,大量速效氮素累积在土壤中,氮肥利用率常常不足 10%[5],另一方面大量盈余的养分进入环境,存在着巨大的环境风险。累积在土壤剖面中的大量氮素在农民习惯采用的大水漫灌的方式下使氮素随灌溉水被淋洗掉,逐渐进入地下水从而对饮用水的安全性构成威胁[6]。由此可见,过量的氮肥施入已经造成肥料资源浪费和环境风险增加,成为制约设施蔬菜可持续发展的瓶颈。

适宜的氮肥优化模式是设施蔬菜可持续发展的重要保障。国内外关于设施蔬菜合理氮肥管理模式的研究较多,概括起来可分为两类, 一类是采用土壤或植物测试以确定适宜的施氮量的方法[7-9],但是由于设施菜地特殊的栽培条件,不同地块之间土壤的供氮能力空间分异性很大,因此,这类预测方法提出的合理氮肥施用量基本上是半定量的;另一类是平均适宜施用量法[10],即给出一定的用量范围,测试的指标较少,可操作性很强,省工省钱,农民也易于掌握,便于推广和实际应用,更加符合我国目前设施栽培茬口紧、缺乏测试设备和技术人员的实际情况[11]。因此,本研究采用第二类方法,前期通过 3 年的田间定位试验,研究了减施氮肥结合 C/N 调控和基于水分调控等措施对设施菜地农学效应、肥力效应和环境效应的影响,初步筛选出了优化的氮肥管理模式。为了进一步对优化的氮肥管理模式进行验证,本文采用^{15}N 标记的田间微区试验,研究了优化施氮模式下蔬菜对化肥氮素的吸收、利用及化肥氮素在土壤-植物系统中的分配,以期明确优化模式下化肥氮素在设施蔬菜生产体系中的转化及去向,为优化施氮模式下化肥氮素养分高效利用提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于 2007 ～2009 年在山东省寿光市稻田镇东刘营村(E 118°55′49.0″、N 36°50′26.8″)的定位实验区。该地区属暖温带季风性大陆气候,四季分明,年平均气温 12.5℃,年降水量约 550 mm,年平均蒸发量为 1345.7 mm,无霜期 200 d 左右。该乡镇为典型的番茄(大红系列)集约化种植区,番茄(*Lycopersicum esculentum* Mill)品种为“好韦斯特”,一年两茬连作制。大棚土壤类型为褐土,质地壤土。^{15}N 标记的田间微区试验于 2009 年 9 月实施,微区面积 0.75 m^2,按微区的形状挖开周围的土层,然后将定制好的两端开口的 100 cm 不锈钢框套在微区上,高出地面 10 cm,将微区与外界隔开,以免灌水将外部氮携带进微区,周围用相应层次的土壤回填,边回填边压实,然后用泥土填紧微区内边缘。埋好框子后定植番茄,株距 45 cm,行距 70 cm,每个微区种 4 株番茄。

1.2　试验设计

前期定位试验结果表明,50% 的农民习惯化肥氮用量 + 秸秆 + 滴灌模式为当地番茄生产的氮肥优化模式。本研究应用^{15}N 示踪技术拟对这一模式进行验证,试验共设 2 个处理: 1)FP,农民习惯施氮模式[12](农民习惯施肥量参考 2007 年对寿光市集约化大棚蔬菜种植区的面上调查,施氮量为 N 1000 kg/hm^2),用^{15}N 标记的尿素(丰度 10.3%,上海化工研究院提供); 2)OPT,优化施氮模式(50% 的习惯

化肥氮用量 + 秸秆 + 滴灌，施氮量为 N 500 kg/hm²)。每个处理 3 次重复。各处理磷、钾肥和有机肥用量相同，于移栽前按 P_2O_5 800 kg/hm²(过磷酸钙)，K_2O 1000 kg/hm²(硫酸钾)和干鸡粪(有机质含量 39.15%、N 2.54%、P_2O_5 2.07%、K_2O 2.12%)47244 kg/hm²，作底肥一次施入。具体氮、磷、钾施用量见表 1。秸秆为玉米秸秆，鲜重 7500 kg/hm²，其含水量为 60%，全氮 0.98%，全磷 0.62%，全钾 1.05%，C/N 49。秸秆风干粉碎后(1.5 cm 左右)堆制 2 个月，添加秸秆的处理同有机肥一起基施。整个生育期共追 ^{15}N 标记的尿素 4 次，分别于基肥后 27 d、43 d、56 d 和 69 d 将尿素与水混匀后施入土壤。整个生育期共灌水 8 次，农民习惯施肥模式处理每次灌水 50 mm，滴灌采用重力插接式微孔滴灌，每次灌水 20 mm。病虫害防治等与当地农民传统方法相同。

表 1 肥料施用量(kg/hm²)

Table 1 Application rates of fertilizers

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer			有机肥 Organic manure			总量 Total		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
FP	1000	800	1000	1200	976	1001	2200	1776	2001
OPT	500	800	1000	1200	976	1001	1700	1776	2001

1.3 样品采集与分析方法

在种植前和收获后，采用土钻法取 0—100 cm 土壤，每小区取 5 钻，分成 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 5 个深度分别取样。将 5 钻同土层的土壤混合为一个样，一部分鲜样置于 0～4℃保存，用于测定无机氮的 ^{15}N，另一部分土样风干后过 0.25 mm 筛，用于测定土壤全氮。

番茄记产及养分测定：在初果期、盛果期和拉秧期取果实样品，风干粉碎后过 0.25 mm 筛，用于测定番茄含氮量和 ^{15}N 丰度，拉秧后取植株样，风干粉碎后过 0.25 mm 筛，用于测定全氮和 ^{15}N 丰度。

植株和土壤全氮 ^{15}N 的测定：用万分之一分析天平分别准确称取植株样 0.1 g，土样 5 g，放入消化管中，每样加入催化剂 1 g；植株样品加入浓硫酸 5 mL，土样加入浓硫酸 8 mL；将消化管放在消煮器上消化，温度 410℃。植物样品消化清亮后继续消化 2 h，土样消化清亮后继续消化 4 h；向消化管中加入 40% 的氢氧化钠溶液 15 mL；进行蒸馏，蒸馏液以 10 mL 2% 的硼酸溶液吸收，指示剂为甲基红-溴甲酚绿，蒸馏时间为 7 min；用标定好的硫酸滴定，并记录滴定体积；向三角瓶中加入 1 滴 0.5 mol/L的硫酸，然后放在电热板上浓缩，浓缩至约 N 1 mg/mL，用于测定 ^{15}N 丰度。

土壤无机氮 ^{15}N 的测定：称取土壤鲜样 20 g 于 250 mL 三角瓶中，加入 2 mol/L 的 KCl 溶液 100 mL，振荡 1 h，过滤。量取滤液 50 mL 于 300 mL 凯氏消化管中，加入 MgO 1.0 g，在定氮仪上蒸馏 7 min，蒸馏液以含有 10 mL 2% 的硼酸吸收液的 250 mL 三角瓶接收，指示剂为甲基红－溴甲酚绿，用标定的硫酸滴定，记录滴定体积，测定 NH_4^+-N 含量，然后向三角瓶加入 1 滴 0.5 mol/L 硫酸，放在电热板上浓缩，浓缩至约 N 1 mg/mL，用于测定 ^{15}N 丰度；再称取 0.3 g 定氮合金于上述消化管中，继续蒸馏 10 min，蒸馏液以含有 10 mL 2% 的硼酸吸收液的 250 mL 三角瓶接收，指示剂为甲基红－溴甲酚绿，用标定的硫酸滴定，记录滴定体积，测定 NO_3^--N (NO_2^--N)含量，然后向三角瓶加入 1 滴 0.5 mol/L 硫酸，放在电热板上浓缩，浓缩至约 N 1 mg/mL，用于测定 ^{15}N 丰度。以同体积的 2 mol/L KCl 溶液做空白。

^{15}N 的测定方法：将凯氏定氮后的浓缩液样品 1 mL(约 N 1 mg/mL)加至 Y 型瓶一侧，再加入 1 mL 次溴酸锂溶液于 Y 型瓶另一侧，用液氮冷冻，抽真空，解冻，混合 Y 型瓶两侧的反应液，使 NH_4^+-N 转化为氮气，其化学反应如下：

$$2\ NH_4^+ + 3BrO^- + 2OH^- \rightarrow N_2 + 3Br^- + 5H_2O$$

产生的 N_2 在高真空条件下进入离子源电离，使 N_2 转化为 N_2^+，利用电压扫描，记录 $^{28}N_2^+$ ($^{14}N^{14}N$)、$^{29}N_2^+$ ($^{14}N\ ^{15}N$)、$^{30}N_2^+$ ($^{15}N\ ^{15}N$)离子峰强度。

样品 ^{15}N%(≤5%)按下式计算：

$$R = \frac{^{28}N_2^+}{^{29}N_2^+}$$

$$^{15}N\% = \frac{1}{2 \times R + 1} \times 100$$

样品$^{15}N\%$(>5%)按下式计算:

$$^{15}N\% = \frac{^{29}N_2^+ + 2 \times {}^{30}N_2^+}{2 \times (^{28}N_2^+ + {}^{29}N_2^+ + {}^{30}N_2^+)} \times 100$$

所需仪器为 K-05 自动定氮仪(上海晟声自动化分析仪器有限公司),^{15}N 丰度的测定采用改进型 ZHT-03 质谱仪(北京分析仪器厂)。

1.4　土壤表面氨挥发的原位测定

试验采用的通气法装置如图 1[13],用 PVC 硬质塑料管制成,高 10 cm,内径 15 cm,分别将两块直径为 16 cm、厚度均为 2 cm 的优质海绵浸以 15 mL 的磷酸甘油溶液(具体配制为 50 mL 磷酸 +40 mL 丙三醇,定容至 1000 mL)后,置于 PVC 管中,上层的海绵与管顶部相平,下层的海绵距管底 5 cm。上层海绵用来吸收外部空气中产生的氨气,下层海绵用来吸收土壤中挥发的氨气。

施肥(包括基肥和追肥)后的第 2、3、4、5、6、7、10 d 和下次追肥的前一天取样。取样时将通气装置下层的海绵取出,迅速按小区分别装入自封袋中,密封;同时换上另一块刚浸过磷酸甘油的海绵,上层的海绵视其干湿情况 3～7 d 更换 1 次。把取下的海绵带回实验室后,分别装入塑料盒中,加入 300 mL 1.0 mol/L 的 KC1 溶液,使海绵完全浸于其中,振荡 30 min 后,浸提液统一定容充分混匀后,定量取 500 mL 溶液,加入几滴浓硫酸后冷冻保存,集中带回实验室后测定浸提液中的氨态氮^{15}N。

具体操作如下:取定容后的溶液样品 450 mL,加入 2 滴 0.5 mol/L 硫酸(防止氨挥发)后倒入三角瓶中消煮,消煮 2 h 后出现白色沉淀,然后倒入大试管,盖上小漏斗,消化液加入氢氧化钠,释放的氨气被蒸汽逐出,经冷凝后用 2% 硼酸吸收,加入混合指示剂用 0.05 mol/L 盐酸标定,此步骤将 NH_3-N 转变成 NH_4^+-N,滴定完的样品放在电炉上浓缩,浓缩至 N 1 mg/mL 样品 3 mL(分析仪器适宜量),浓缩后的样品用改进型 ZHT-03 质谱仪测定^{15}N 丰度。

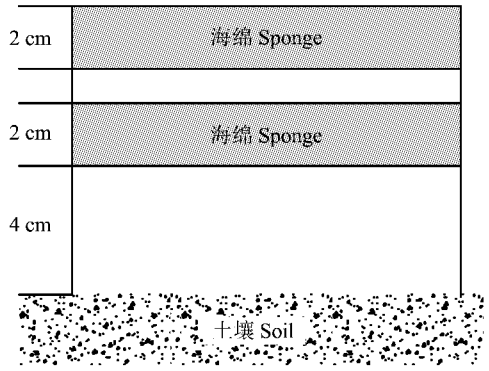

图 1　田间^{15}N 微区氨挥发收集装置

Fig. 1　Sketch of the NH_3 absorption equipment in ^{15}N micro-plots

1.5　计算公式

%Ndff (NO_3^--N) = 土壤中 NO_3^--N 的^{15}N 原子百分超/肥料的^{15}N 原子百分超 ×100

土壤中来自^{15}N 尿素的 NO_3^--N 含量 Ndff = 土壤中 NO_3^--N 含量 ×% Ndff (NO_3^--N)

作物的% Ndff = 作物中的^{15}N 原子百分超/肥料的^{15}N 原子百分超 ×100

作物 Ndff(N kg/hm^2) = 作物% Ndff × 作物吸氮量

土壤硝态氮累积量(N kg/hm^2) = 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm^3) × 土壤硝态氮含量(mg/kg)/10

化肥氮利用率(%) = 作物化肥氮吸收量/化肥氮用量 ×100

化肥氮农学效率(kg/kg) = 施氮区产量/施氮量

化肥氮素收获指数(%) = 果实吸氮量/作物地上部吸氮量 ×100

土壤的氨挥发速率 NH_3-N [kg/(hm^2·d)] = M/A × D × 10^{-2}

式中: M 为通气法单个装置平均每次测得的氨量(NH_3-N mg);A 为捕获装置的横截面积(m^2);D 为每次连续捕获的时间(d)。

1.6　数据分析

用 SAS(8.1)统计软件对所有实验数据进行统计分析,LSD 进行数据的显著性检验。

2　结果与分析

2.1　不同施氮模式对番茄氮素吸收的影响

从表 2 可以看出,OPT 处理果实和秸秆的干物质产量分别比 FP 增加了 4.1% 和 8.3%;果实和秸秆的氮素总吸收量分别比 FP 增加了 8.5% 和 6.3%。FP 处理下作物果实和秸秆吸收的来自化肥^{15}N 的氮量分别占果实和秸秆总吸氮量的 27.9%、23.7%;OPT 处理下作物果实和秸秆吸收的来自化肥^{15}N 的氮量分别占果实和秸秆总吸氮量 20.5% 和 16.9%,说明作物吸收的氮只有少部分来源于化肥氮。与 FP 处理相比,OPT 的作物果实和秸秆吸收的来自^{15}N 尿素的氮量没有显著差异,说明在目前

表2 不同氮肥管理模式下番茄地上部干物质产量及氮素吸收量

Table 2 Aboveground dry matter production and N content of tomato as affected by different N fertilizer management models

处理 Treatment	产量 Yield (t/hm², DW)		氮吸收量 N uptake (N kg/hm²)		吸收来自^{15}N尿素的氮 ^{15}N uptake by urea (N kg/hm²)	
	果实 Fruit	秸秆 Straw	果实 Fruit	秸秆 Straw	果实 Fruit	秸秆 Straw
FP	6.9 ±0.5 a	8.4 ±0.8 a	146.4 ±5.5 a	269.5 ±25.3 a	40.8 ±2.4 a	55.2 ±5.7 a
OPT	7.2 ±0.5 a	9.1 ±0.8 a	158.9 ±8.9 a	286.6 ±30.3 a	37.7 ±3.0 a	48.5 ±6.7 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.

的肥料施用情况下,试验区域菜地减量施氮对蔬菜产量和氮素吸收无显著影响。

2.2 不同施氮模式对番茄氮素利用的影响

OPT处理的氮肥农学效率是FP的2.1倍(表3),差异达显著水平($P<0.05$),说明50%农民习惯施氮量结合添加秸秆和滴灌的模式能够提高番茄的经济产量,达到了节肥增效的目的。FP处理化肥氮用量为N 1000 kg/hm²,9.6%的化肥氮能够为作物地上部吸收利用,其中果实4.1%、茎叶5.5%,说明农民习惯施氮模式下作物对氮的利用很低,90%以上的氮进入土壤环境或以其他的途径损失掉了,造成了肥料资源的极大浪费。OPT处理的化肥氮用量为N 500 kg/hm²,17.2%化肥氮能够为作物地上部吸收利用,其中果实7.5%、茎叶9.7%,显著高于FP($P<0.05$)。OPT处理的化肥氮素收获指数相比FP有增加,说明番茄植株中积累的氮较多的分配到果实中,吸收的氮保留在茎叶中的较少,这样可以减少秸秆移走或焚烧所造成的氮素损失,使吸收的氮素较多地转化为经济产量,避免无效累积,提高了氮肥的农学效益。

表3 不同氮肥管理模式对化肥^{15}N的利用

Table 3 Effects of different N fertilizer management models on the utilization of chemical fertilizer N

处理 Treatment	化肥氮农学效率(kg/kg) Chem. N agronomic efficiency	化肥氮利用率(%) Chem. N recovery efficiency	化肥氮收获指数(%) Chem. N harvest index
FP	6.9 ±0.3 b	9.6 ±0.8 b	42.7 ±1.2 a
OPT	14.3 ±0.6 a	17.2 ±1.6 a	44.2 ±3.9 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.

2.3 土壤中来自化肥的NO_3^--^{15}N

0—100 cm土层中来自^{15}N标记尿素的硝态氮含量结果如图2所示,FP处理0—20 cm土层土壤硝态氮含量显著低于20—40 cm($P<0.05$),表明当季化肥氮的下移较明显。随着土层深度的增加,40—60 cm、60—80 cm和80—100 cm硝态氮含量均显著低于0—20 cm和20—40 cm土层($P<0.05$)。OPT处理0—20 cm土层土壤硝态氮含量显著高于20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm和80—100 cm($P<0.05$);20—40 cm土层土壤硝态氮含量显著高于40—60 cm、60—80 cm和80—100 cm($P<0.05$);40—60 cm、60—80 cm和80—100 cm土层的硝态氮含量没有显著差异。同一土层不同氮肥管理模式间硝态氮含量相比较,FP均高于OPT,其中20—40 cm土层土壤硝态氮含量显著升高($P<0.05$)。以上结果表明,土壤中残留的硝态氮主要分布在0—40 cm土层,40 cm以下土壤硝态氮含量差异不大,施用的化肥氮量越高,土壤中残留的硝态氮含量越高,这样无疑会增加硝态氮被淋洗出根区的可能性及淋失总量。

收获结束后,施入微区的化肥^{15}N在不同土壤剖面中的分布主要以NO_3^--N形式存在(图3)。在

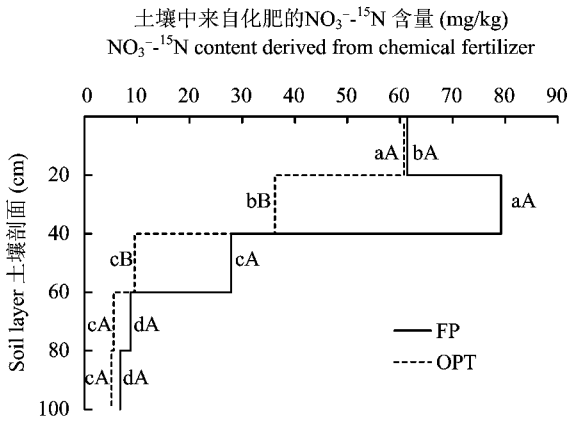

图 2　不同氮肥管理模式对土壤中来自^{15}N 尿素的 NO_3^--N 含量的影响

Fig. 2　Effects of different N fertilizer management models on NO_3^--^{15}N derived from chemical N fertilizer

[注(Note): 图中不同小写字母(a,b,c,d)表示同一模式不同土层间差异达 5% 显著水平,不同大写字母(A,B)表示同一土层不同模式间差异达 5% 显著水平 Different small letters (a,b,c,d) mean significant at the 5% level among soil layers, and capital (A,B) mean significant at the 5% level among N treatments.]

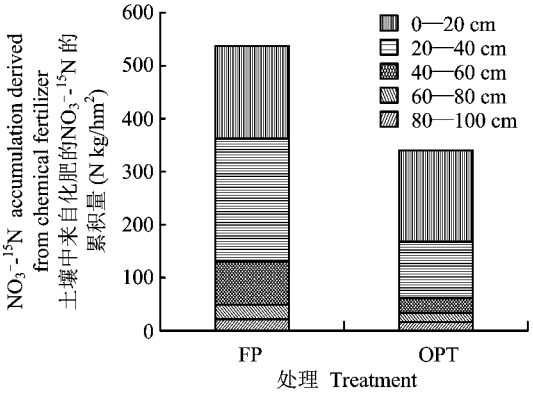

图 3　不同氮肥管理模式对 0—100 cm ^{15}N 硝态氮累积的影响

Fig. 3　Soil NO_3^--^{15}N accumulation derived from chemical fertilizer in the 0–100 cm depth for different N fertilizer management models

^{15}N用量为 N 1000 kg/hm² 条件下(FP 处理),NO_3^--^{15}N在 0—100 cm 土层内的残留量达到 N 536.9 kg/hm²,大部分 NO_3^--^{15}N 都存留在 0—40 cm 土层内,达 N 407.1 kg/hm²。随着剖面深度的增加,土壤硝态氮累积量逐渐降低,40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 土层中累积量分别为 N 80.9、27.3 和 21.6 kg/hm²,90 cm 以下仍明显有 NO_3^--^{15}N 的累积,是土壤氮素淋溶的结果。在^{15}N 用量为 N 500 kg/hm² 条件下(OPT 处理),NO_3^--^{15}N 在 0—100 cm 土层内的残留量明显降低,为 N 340.3 kg/hm²,同样大部分 NO_3^--^{15}N 都存留在 0—40 cm 土层内,达 N 278.9 kg/hm²,随着剖面深度的增加,土壤硝态氮累积量逐渐降低,40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 土层中含量分别为 N 27.7、17.4 和 16.3 kg/hm²,相同土层均低于 FP 处理。可见,优化施氮模式能够显著降低土壤来自^{15}N 尿素的 NO_3^--N 的累积量。

2.4　化肥 ^{15}N 氨挥发

本试验中共施肥 5 次,一次基施,4 次追施,追肥的氨挥发速率均高于基肥(图 4)。土壤氨挥发主要发生在施肥后的 14 d 内,随着时间的延长,氨挥发速率逐渐降低。在每次施肥并灌溉后,土壤氨挥发速率呈上升趋势,除基肥外,追肥后第 3 d 氨挥发速率均达最大值,第一次到第 4 次追肥 FP 处理的氨挥发速率分别为 N 0.339、0.204、0.197、0.279 kg/(hm²·d),OPT 分别为 N 0.0087、0.127、0.026、0.01 kg/(hm²·d),之后便逐渐下降,到下一次施肥并灌溉后,NH_3 挥发速率又逐渐增加,如此循环反复。

对整个生育期氨挥发累积量进行分析,结果表明,施氮量的增加显著增加了土壤 NH_3 的累积量,

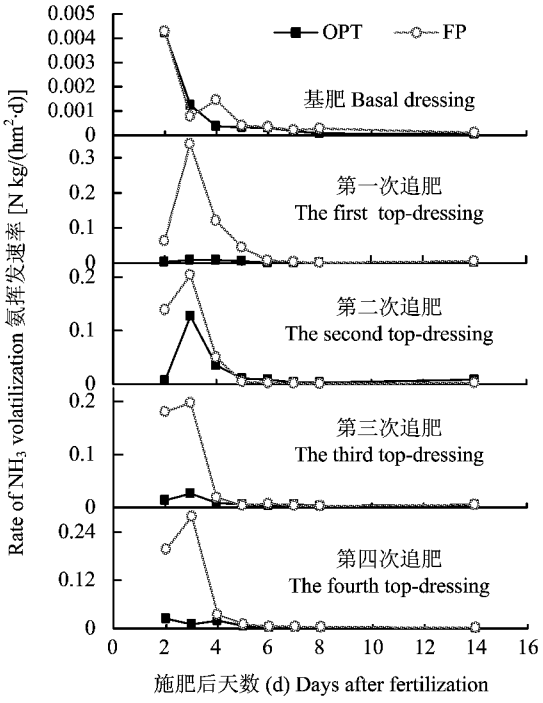

图 4　不同氮肥管理模式下 ^{15}N 氨挥发速率

Fig. 4　Effects of different N management models on rate of NH_3 volatilization

FP处理 NH_3 的累积量显著高于OPT($P<0.05$)。基肥和追肥后,FP处理的氨挥发累积量为N 1.95 kg/hm^2,OPT为N 0.38 kg/hm^2,OPT氨挥发累积量比FP降低了80.5%。

2.5 化肥^{15}N的去向

一般来说,蔬菜作物的根区很少能超过0—90 cm土层,本试验为了更精确,将0—100 cm土层内的氮素视为作物能够吸收利用的有效态氮,而将流出0—100 cm土层的氮素作为损失部分。收获结束后,^{15}N肥料在土壤-作物体系各部分的分配比例见表4。FP处理9.6%的化肥氮能够为作物地上部所利用,其中茎叶利用5.5%、果实利用4.1%。58.0%的化肥氮素残留在0—100 cm土层中,残留量为N 580.2 kg/hm^2,主要以硝态氮的形态存在。通过计算^{15}N的平衡,大约有32.4%的化肥氮流出了土壤-作物体系损失掉了,其中氨挥发损失占总损失的0.6%。OPT处理中有17.2%的化肥氮能够为作物地上部所利用,其中茎叶利用9.7%、果实利用7.5%。74.6%的化肥氮残留在0—100 cm土层中,主要以硝态氮的形态存在。通过计算^{15}N的平衡,大约有8.2%的化肥氮流出了土壤-作物体系,其中氨挥发损失占总损失的0.9%。与FP处理相比,OPT显著提高了作物对化肥氮的吸收和利用,氮肥利用率显著提高($P<0.05$),剩余的氮素大部分残留在土壤中,少部分损失,损失量和损失率均显著降低($P<0.05$)。另外,在计算^{15}N平衡过程中,由于没有考虑作物根系吸收利用,且仍残存于土壤中的那部分氮素,因此通过计算得出的氮肥损失量可能略高于实际的氮肥损失。但从FP处理作物地上部氮肥利用率不足10%来看,地下部对氮肥的回收率也会很低,因此认为,在传统施氮量和传统种植管理方式下,氮肥的损失量是巨大的,而优化模式减少了氮肥的施用量,适合作物生长需求,提高了氮肥的利用率,进而也减少了氮素在土壤中的残留及损失。

表4 化肥^{15}N在土壤-作物体系中的去向

Table 4 Fate of ^{15}N-labelled fertilizer in soil and crop system

处理 Treatment	化肥氮利用率 Chem. N recovery efficiency (%)	0—100 cm土壤残留氮 0-100 cm soil residual (N kg/hm^2)	土壤残留率 Soil residual (%)	损失量 Loss amount (N kg/hm^2)	损失率 Loss rate (%)
FP	9.6 b	580.2 a	58.0 b	324.0 a	32.4 a
OPT	17.2 a	372.8 b	74.6 a	41.0 b	8.2 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.

3 讨论

3.1 氮素的吸收和利用

氮肥利用率的计算方法有两种,一是差减法,二是^{15}N示踪法。差减法主要是施肥区作物吸氮量与不施肥区作物吸氮量的养分之差与肥料投入的比值,是通过设置无氮对照试验来实现的,而示踪法表示作物吸收的肥料氮占施氮量的百分数,是通过对氮素的标记来实现的[14]。由于差减法计算的结果不能准确表示作物吸收的肥料氮,因此,要研究肥料的利用、残留及损失的具体情况,宜采用^{15}N同位素示踪技术[15]。^{15}N示踪试验结果表明,农民习惯施氮模式(FP)下作物吸收的来自外源化肥氮的量与优化施氮模式(OPT)相比没有显著差异,说明FP处理没有有效促进作物对化肥氮的吸收。由于大量的肥料氮得不到有效地吸收,必然造成利用率的显著降低,即研究结果所显示的,FP处理化肥氮的利用率显著低于OPT。对利用率的结果进行分析,本实验FP处理化肥氮的利用率为9.6%,韩鹏远等[16]在田间采用微区^{15}N示踪法研究番茄生产过程中农民习惯施肥的氮肥利用效率为8.0%,朱建华[17]采用^{15}N示踪试验研究设施菜地氮素利用的结果表明,农民习惯施氮量为1200 kg/hm^{2}时,辣椒的氮素利用率为10.5%,说明当前设施栽培条件下,农民习惯施氮模式化肥氮的利用率非常低,其原因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。与FP处理相比较,OPT显著提高了化肥氮的利用率,其原因一方面是化肥氮施用量减少,而作物对化肥氮的吸收量与FP模式相比无显著差异;另一方面可能是采取的滴灌措施,滴灌条件水分进

入土壤的速度缓慢,使施入的肥料大多数随灌溉水均匀地分布在作物根际附近,促进了作物根系对氮肥的吸收和利用,而传统灌溉水分量大,使肥料向土壤深层淋洗较多,造成作物根际氮肥的浓度相对较低。Laura[18]研究表明,滴灌可以使作物根区保持较适宜的湿度和养分浓度,更加有利于作物生长对养分的吸收和利用。

3.2　氮素的去向

在土壤-作物体系中,作物吸收、土壤残留和不同途径的损失是氮肥施入土壤后的 3 种基本去向。收获后土壤中的残留肥料^{15}N 主要有 3 种形态,即 NH_4^+-N、NO_3^--N 和有机结合态氮。有研究表明,氮肥以固定态铵的形式残留较少,以 NH_4^+-N 形式残留的量也很少[19-20],有机结合态和 NO_3^--N 形式所占比例较大[21],但土壤有机物质对无机肥料氮的固定有一定限度,施入的无机氮超过这个限度,肥料^{15}N主要以 NO_3^--N 形式残留[22]。本研究结果证实了这一结论,即 NO_3^--^{15}N 是^{15}N 在土壤中的主要存在形态,FP 和 OPT 处理的累积量分别为 N 440.9 和 315.9 kg/hm^2,占 0—100 cm 土层残留化肥氮总量的 76.0% 和 84.7%。0—100 cm 土层中 OPT 处理的 NO_3^--^{15}N 的累积量显著低于 FP($P<0.05$)。其原因主要有两点:一是通过优化,化肥氮的投入量仅为农民习惯氮肥投入量的一半,Ju 等[23]研究表明,与农民习惯施氮处理相比较,减施化肥氮处理显著降低了土壤氮的残留率;二是添加秸秆使土壤的 C/N比值有所升高,经过连续的定位试验,FP 处理耕层 C/N 比值为 6.5,OPT 处理耕层 C/N 比值为 8.1,C/N 比值增加促使微生物的活性增强,张相松等[3]研究曾表明,添加秸秆,能提高土壤 C/N 比,有利于土壤中微生物活性的提高和多余矿质氮的有机固定。氮素损失率的结果显示,农民习惯施肥模式当季氮素损失率高达32.4%,这与李银坤[24]的结果相近,其研究得出,由于农民习惯施肥氮肥用量很高,加之频繁的灌水,当季氮素(^{15}N)损失率在 21.1%～30.8%之间。本试验中优化施氮模式与农民习惯施氮相比,其氮素的损失率显著降低,仅为 8.2%。

4　结论

长期以来我国设施蔬菜生产中氮肥盲目、不合理地大量投入造成的肥料资源浪费、养分利用率低、土壤质量退化、作物产量和品质降低等问题已受到全社会的高度关注。从保护环境和设施菜地土壤可持续利用的角度来看,在不降低经济效益的前提下,提出合理的施氮量,构建合理的施肥模式,是协调农学效益、经济效益与环境效益的关系,解决土壤质量退化与肥料资源浪费等问题的关键。本研究应用^{15}N标记的微区试验,揭示了农民习惯施氮模式和氮肥优化模式下无机氮素在植物-土壤体系中的去向,综合分析结果表明,优化施氮模式(OPT)对化肥氮的吸收、利用及减少化肥氮的损失方面均明显优于农民习惯施氮(FP),能够实现化肥氮素养分的高效利用。

参 考 文 献:

[1] Tremblay, Scharof H C, Weier U *et al*. Nitrogen management in field vegetable a guide to different fertilization [J/OL]. http://publications. gc. ca/collections/Collection/A42-92-2001E. pdf.

[2] 张继宗, 刘培财, 左强, 等. 北方设施菜地夏季不同填闲作物的吸氮效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2663-2667.
Zhang J Z, Liu P C, Zuo Q *et al*. Nitrogen uptake by different catch crops in facility vegetable field[J]. Agro-Environ. Sci., 2009, 28(12): 2663-2667.

[3] 张相松, 刘兆辉, 江丽华, 等. 设施菜地土壤硝态氮淋溶防控技术的研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2009, 26(2):207-211.
Zhang X S, Liu Z H, Jiang L H *et al*. Study on the technology of soil nitrate nitrogen leaching preventive and control in mushroom house[J]. J. Qingdao Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2009, 26(2):207-211.

[4] 闵炬, 施卫明, 王俊儒. 不同施氮水平对大棚蔬菜氮磷钾养分吸收及土壤养分含量的影响[J]. 土壤, 2008, 40(2):226-231.
Min J, Shi W M, Wang J R. Effect of N fertilizer application rate on vegetable N, P, K uptake and soil nutrient content in greenhouse[J]. Soil, 2008, 40(2):226-231.

[5] 杜连凤. 长江三角洲地区菜地系统氮肥利用与土壤质量变异研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院博士论文, 2005.
Du L F. The nitrogen fertilizer use efficiency and soil quality variation of vegetable-soil system in Yangts Delta Area [D]. Beijing: PhD dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.

[6] 张丽娟, 巨晓棠, 刘辰琛, 等. 北方设施蔬菜种植区地下水硝酸盐来源分析—以山东省惠民县为例[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21): 4427-4436.
Zhang L J, Ju X T, Liu C C *et al*. A study on nitrate contamination of ground water sources in areas of protected vegetables-growing fields—a case study in Huimin Country, Shandong Province[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 3(21):4427-4436.

[7] 汤丽玲. 日光温室番茄的氮素追施调控技术及其效益评估[D]. 北京:中国农业大学博士论文, 2004.

Tang L L. Studies on nitrogen topdressing techniques and profitable evaluation for greenhouse tomato production [D]. Beijing: PhD dissertation of China Agricultural University, 2004.

[8] Hartz T K, Bendixen W E, Wierdsma L. The value of presidedress soil nitrate testing as a nitrogen management tool in irrigated vegetable production[J]. Hort Sci., 2000, 35(4): 651-656.

[9] Heckman J R, Morris T, Sims J T *et al*. Pre-sidedress soil nitrate testing is effective for fall cabbage[J]. Hort Sci., 2002, 37(1): 113-117.

[10] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论诌议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1-4.
Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(1): 1-4.

[11] Shen W S, Lin X G, Shi W M *et al*. Higher rates of nitrogen fertilization decrease soil enzyme activities, microbial functional diversity and nitrification capacity in a Chinese polytunnel greenhouse vegetable land[J]. Plant Soil, 2011, 337:137-150.

[12] Jiang H M, Zhang J F, Song X Z *et al*. Responses of agronomic benefit and soil quality to better management of nitrogen fertilizer application in greenhouse vegetable land[J]. Pedosphere, 2012, 22(5): 650-660.

[13] 王朝辉, 宗志强, 李生秀, 等. 蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 79-83.
Wang Z H, Zong Z Q, Li S X *et al*. Nitrate accumulation in vegetables and its residual in vegetable fields [J]. Environ. Sci., 2002, 23(3): 79-83.

[14] 田昌玉, 林志安, 左余宝, 等. 氮肥利用率计算方法评述[J]. 土壤通报, 2011,42(6): 1530-1536.
Tian C Y, Lin Z A, Zuo Y B *et al*. Review on several concepts on fertilizer nitrogen recovery rate and its calculation[J]. Chin. J. Soil Sci, 2011, 42(6):1530-1536.

[15] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12 (2): 192-197.
Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Ecol. Environ., 2003, 12(2):192-197.

[16] 韩鹏远, 焦晓燕, 王立革, 等. 太原城郊老菜区番茄氮肥利用率及氮去向研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18 (3): 482-485.
Han P Y, Jiao X Y, Wang L G *et al*. Use efficiency and fate of applied nitrogen in long-term tomato districts of Taiyuan [J]. Chin. J. Eco-Agric., 2010, 18(3): 482-485.

[17] 朱建华. 蔬菜保护地氮素去向及利用研究[D]. 北京: 中国农业大学博士论文, 2002.
Zhu J H. Study on fate and utilization of nitrogen in protected vegetable fields [D]. Beijing: PhD dissertation of China Agricultural University, 2002.

[18] Laura S M, Augusto A, Alejandro B *et al*. Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop[J]. Soil Biol. Biochem., 2008, (40):1698-1706.

[19] 田琳琳, 庄舜尧, 杨浩. 不同施肥模式对芋艿产量及菜地土壤中氮素迁移累积的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20 (12): 1853-1859.
Tian L L, Zhuang S Y, Yang H. Dynamics and transport of soil inorganic nitrogen in vegetable lands with various fertilization modes in the region of Taihu Lake[J]. Ecol. Environ. Sci., 2011, 20(12): 1853-1859.

[20] 孙晓, 钟敏, 庄舜尧. 长三角蔬菜种植区土壤有机质与氮素含量分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(8): 167-171.
Sun X, Zhong M, Zhuang S Y. Investigation of organic matter and nitrogen of vegetable soils in the Yangtze River delta region [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2011, 27(8): 167-171.

[21] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 52-56.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Dynamics of various nitrogen forms in soil and nitrogen utilization under application urea and different organic materials[J]. J. China Agric. Univ., 2002, 7(3):52-56.

[22] 王秀斌. 优化施氮下冬小麦/夏玉米轮作农田氮素循环与平衡研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院博士论文, 2009.
Wang X B. Nitrogen cycling and balance in winter wheat-summer maize rotation system under optimized nitrogen management[D]. Beijing: PhD dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.

[23] 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.

[24] 李银坤. 不同水氮条件下黄瓜保护地氮素损失研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院硕士论文, 2010.
Li Y K. Nitrogen loss in the protected soil under different water and nitrogen conditions during cucumber growing seasons [D]. Beijing: MS thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.