

施氮模式对番茄氮素吸收利用及土壤硝态氮累积的影响

姜慧敏^{1,2}, 张建峰^{1,2}, 杨俊诚^{1,2}, 刘兆辉³, 宋效宗³, 江丽华³

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2.农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081; 3.山东省农业科学院土壤肥料研究所, 山东 济南 250100)

摘要:采用田间小区试验,以番茄为指示植物,研究不同施氮模式:农民习惯施肥(N-farmer)、减施化肥氮 26%(74%N-farmer)、减施化肥氮 26%结合调节土壤 C/N(74%N-farmer+S)、减施化肥氮 26%结合调节土壤 C/N 和采用滴灌(74%N-farmer+S+D)、减施化肥氮 45%结合调节土壤 C/N 和采用滴灌(55%N-farmer+S+D)的集成模式对设施番茄氮素吸收利用及土壤硝态氮累积的影响。结果表明,55%N-farmer+S+D 模式下番茄产量最高为 108 349 kg·hm⁻²,产投比最高为 26.1;与 N-farmer 模式相比,74%N-farmer、74%N-farmer+S、74%N-farmer+S+D 和 55%N-farmer+S+D 模式的氮素利用率和氮素农学利用效率均有增加,其中 55%N-farmer+S+D 模式的氮素当季利用率为 9.56%,氮素农学效率为 43.67 kg·kg⁻¹,均显著高于 N-farmer 模式($P<0.05$);氮肥生理利用效率在各施氮模式间没有显著差异,55%N-farmer+S+D 模式的效率最高为 598.06 kg·kg⁻¹;55%N-farmer+S+D 模式的氮素果实生产效率和收获指数分别为 493.81 kg·kg⁻¹ 和 53.84%,均高于 N-farmer 模式。氮平衡结果表明,N-farmer 模式的表观损失最高,55%N-farmer+S+D 模式显著低于 N-farmer 模式;相同土壤剖面中不同模式硝态氮含量随番茄生育进程均呈先增高后降低的趋势;番茄盛果期和拉秧期,74%N-farmer+S、74%N-farmer+S+D 和 55%N-farmer+S+D 模式在 0~100 cm 剖面累积的硝态氮含量均低于 N-farmer 模式,拉秧期 N-farmer 模式累积的硝态氮含量最高达 705.24 kg·hm⁻²,74%N-farmer+S+D 模式累积的硝态氮含量最低为 453.75 kg·hm⁻²;番茄在 3 个不同生育期,土壤硝态氮多累积在 0~40 cm 土层,硝态氮的相对累积量约为 50%。综合以上分析结果,集成模式 55%N-farmer+S+D 具有明显优势,能够提高氮肥的吸收和利用效率,减少土壤硝态氮的残留。

关键词:施氮模式;滴灌;土壤硝态氮累积

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)12-2623-08

Effects of Models of N Application on Greenhouse Tomato N Uptake, Utilization and Soil NO₃⁻-N Accumulation

JIANG Hui-min^{1,2}, ZHANG Jian-feng^{1,2}, YANG Jun-cheng^{1,2}, LIU Zhao-hui³, SONG Xiao-zong³, JIANG Li-hua³

(1.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081,China; 2.Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Beijing 100081, China; 3.Soil and Fertilizer Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100,China)

Abstract:Continuously excessive nitrogen(N) input in vegetable-greenhouse is one of the major problems in China, especially in Shouguang, Shandong Province, the famous vegetable production base, which has caused the imbalance of C/N, the decrease of utilization rate of N and fall of fruit quality. Besides, over accumulation of soil nitrate-nitrogen(NO₃⁻-N) in protected vegetable fields will give a serious menace to the quality of groundwater. Aiming at these problems, a field experiment was conducted to study the effects of different N levels(1 000, 740, 550 kg·hm⁻²) and models of applying N fertilizer(reducing chemical N fertilizer, reducing chemical N fertilizer combined to adjust soil C/N ratio, reducing chemical N fertilizer combined to adjust soil C/N ratio and adopting drip irrigation) on tomato N uptake, N utilization and NO₃⁻-N residual in soil. The main results were as follows;tomato yield were increased after applying N fertilizer and yield growth rate reached over 20%. The maximum production(108 349 kg·hm⁻²) and value cost ratio(26.1) appeared in the model of 55%N-farmer+S+D. Compared with the local farmer's conventional model of applying N fertilizer(N-farmer), N use efficiency and N agronomic efficiency of reducing chemical N

收稿日期:2009-10-10

基金项目:国家重点基础研究发展规划 973 项目(2007CB109308);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2008-14)农业部公益性行业科研专项“核技术农业应用”(20083034)

作者简介:姜慧敏(1980—),女,黑龙江哈尔滨人,助理研究员,博士研究生,主要从事土壤环境研究。E-mail:hmjiang@caas.ac.cn

通讯作者:杨俊诚 E-mail:jcyang@caas.ac.cn

fertilizer combined to adjust soil C/N ratio and adopting drip irrigation measure (74% N-farmer、74%N-farmer+S、74 %N-farmer+S+D and 55%N-farmer+S+D) were all increased, N use efficiency of 55%N-farmer+S+D was 9.56% and N agronomic efficiency was 43.67 kg·kg⁻¹, respectively, which were both significantly higher than N-farmer (*P*<0.05). There was no significant difference of N physiologic efficiency among the models, the maximum value was 598.06 kg·kg⁻¹ in the model of 55%N-farmer+S+D. N fruit production efficiency and N harvest index of 55%N-farmer+S+D was 493.81 kg·kg⁻¹ and 53.84%, respectively, higher than N-farmer. The research on N balance indicated that N surplus (apparent N losses) was more higher in N-farmer than others models, the apparent N of 55%N-farmer+S+D was 186.24 kg·hm⁻² which was significantly lower than N-farmer (*P*<0.05). In the same soil depth, the amount of NO₃⁻-N of different models of applying N fertilizer increased from the flowering stage to the full fruit stage, but decreased from the full fruit stage to last harvest. The NO₃⁻-N accumulation in the soil layer of 0~100 cm of the models of 74 %N-farmer+S, 74%N-farmer+S+D and 55%N-farmer+S+D were lower than that of N-farmer. The NO₃⁻-N accumulation of the model of N-farmer model was 705.24 kg·hm⁻², which was higher than others models at last harvest. 74%N-farmer+S+D model accumulated less NO₃⁻-N in the soil, which was 453.75 kg·hm⁻². Nitrate accumulates mostly in the soil layer of 0~40 cm and less in deep soil layers, relative nitrate-N accumulation account for more than 50%. The results of all the above-mentioned indicated that the model of 55%N-farmer+S+D is the feasible N management practice.

Keywords: models of applying N fertilizer; drip irrigation; accumulation of NO₃⁻-N in the soil

设施栽培作为一种终年可以种植作物的栽培模式,能够形成蔬菜的反季节生产,是我国蔬菜生产发展的主要趋势。但传统设施蔬菜生产的高产出通常是以高投入为前提,尤其是肥料的投入量远远超过了作物的需求量,从而导致了资源浪费和环境污染等一系列严重的后果。在我国的设施蔬菜生产中,山东寿光市是最具代表性的,据黄化刚等^[1]对山东寿光设施栽培地区施肥状况等进行的研究表明,养分投入主要以化肥为主,每年投入的化肥氮高达 2 538 kg N·hm⁻²。过量施用氮肥,不但造成氮肥利用率降低,当季利用率不到 10%,而且大量盈余的养分进入环境,存在着巨大的环境风险^[2-3]。由于设施菜地灌水量大而且频繁,土壤经常处于水分饱和状态,土壤中累积的硝酸盐容易随水淋洗到深层土壤,作物很难再吸收利用,同时也会对地下水源造成更严重的污染^[4]。王立河等^[5]研究表明,保护地蔬菜品质下降和土壤质量恶化的主要原因是过量施用氮肥而造成的土壤硝酸盐累积。其他一些调查研究也表明地下水硝酸盐含量超标现象与氮肥的过量施用密切相关,施肥量、施肥方式等都会直接影响到硝态氮在土壤中的动态变化^[6-11]。

综合研究氮肥产量效应、氮肥的吸收利用效率以及土壤-植物体系中的氮素平衡,始终是评价氮肥合理施用与否的关键所在。为此,我们在山东寿光以设施番茄为研究对象,以当地农民习惯施肥模式为对照,通过对试验区的系统调研,分析该区域农民习惯施肥模式下化肥氮的施用量和方法,通过增施作物秸秆和采用滴灌方式,研究不同施氮模式对番茄氮素吸收利用及土壤硝态氮累积的影响,以期为提高设施蔬菜氮素养分利用率及氮素的循环利用,减少环境污

染,保持设施蔬菜生产优质高效和土壤可持续利用提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验安排在山东寿光稻田镇官路村,该乡镇为我国典型的设施番茄集约化种植区。试验地处于纬度 N36°49′57.7″,经度 E118°54′58.9″。土壤类型为褐土,质地为壤土。设施番茄一年种植两茬,连作制。

试验大棚土壤耕层基础养分状况见表 1。播种前 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 土层 NO₃⁻-N 含量分别为 15.13、15.15、15.59、8.81、10.17 mg·kg⁻¹。

表 1 供试土壤基本理化性质(0~20 cm)

Table 1 Basal physical and chemical properties of the soil studied (0~20 cm)

有机质/%	碱解 N/ mg·kg ⁻¹	速效 P/ mg·kg ⁻¹	速效 K/ mg·kg ⁻¹	pH	电导率/ μS·cm ⁻¹
0.81	37.8	1.9	107.8	8.8	334

1.2 试验材料

供试番茄品种为“好韦斯特”,是当地普遍栽培的品种。栽培方式均为传统的畦栽,行距 70 cm,株距 40 cm,每株留果 7 穗。

1.3 试验设计

试验设 6 个处理(表 2),3 次重复,随机排列。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 127 个有代表性农户施肥量的调查,统计分析取平均值。化肥磷和有机肥 100%作基施,化肥氮和化肥钾 40%基施,60%追施。化肥为尿素、过磷酸钙、硫

表 2 不同模式施肥量

Table 2 Amounts of fertilizers in different models

模式	化肥氮(N)/ kg·hm ⁻²	化肥磷(P ₂ O ₅)/ kg·hm ⁻²	化肥钾(K ₂ O)/ kg·hm ⁻²	有机肥氮(N)/ kg·hm ⁻²	有机肥磷(P ₂ O ₅)/ kg·hm ⁻²	有机肥钾(K ₂ O)/ kg·hm ⁻²
N0	0	800	885	0	0	0
N-farmer	1000	800	885	960	912	716
74%N-farmer	740	800	885	960	912	716
74%N-farmer+S	740	800	885	960	912	716
74%N-farmer+S+D	740	800	885	960	912	716
55%N-farmer+S+D	555	800	885	960	912	716

酸钾。有机肥为腐熟鸭粪(N:1.16%;P₂O₅:1.1%;K₂O:1.1%),成品豆粕(N、P₂O₅、K₂O≥5%)。玉米秸秆(1.5 cm 左右),鲜秸秆量 35 kg·小区⁻¹,含水量在 67%,N 含量为 1.01%,P₂O₅ 含量为 1.07%,K₂O 含量为 15.46%,C/N 为 83。秸秆风干粉碎后(1.5 cm 左右)堆制 2 个月,在添加秸秆的处理同有机肥一起基施。田间各处理灌溉量如表 3 所示。

表 3 田间灌溉记录

Table 3 Irrigation recording in the field

模式	灌溉方式	6 次总灌溉量/m ³	灌溉水量折算/mm
N0	沟灌	42	63
N-farmer	沟灌	42	63
74%N-farmer	沟灌	42	63
74%N-farmer+S	沟灌	42	63
74%N-farmer+S+D	滴灌	12	18
55%N-farmer+S+D	滴灌	12	18

每个小区宽 2.8 m,长 11 m。小区之间用塑料薄膜纵向隔开(埋深 50 cm),防止处理间肥水侧渗。大棚东西两端设有保护行。

1.4 样品采集及测定指标

在番茄开花期、盛果期和拉秧期取 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 土壤样品测定硝态氮含量。番茄盛果期和拉秧期取果实测定全氮含量,拉秧期取整株作物,烘干测定全氮含量。田间每次采收时,每试验小区的番茄果实集中采收分类,用电子台秤称重后,记录每个小区的产量。

1.5 测试方法

植株全氮含量用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,凯氏定氮法定氮;土壤硝态氮含量用酚二磺酸比色法测定。

1.6 计算方法

氮素干物质生产效率=单位面积植株地上部干物质总量/单位面积植株地上部氮素积累总量。

氮素果实生产效率=单位面积番茄果实产量/单位面积植株地上部氮素积累总量。

氮素收获指数=(果实吸氮量/作物地上部吸氮量)×100%。

氮素当季利用率=[(施氮区果实吸氮量-无氮区果实吸氮量)/施氮量]×100%。

氮肥农学利用效率(氮肥生产率)=(施氮区产量-无氮区产量)/施氮量。

氮肥生理利用率=(施氮区产量-无氮区产量)/(施氮区地上部吸氮量-无氮区地上部吸氮量)。

产投比=(施氮区作物产值-无氮区作物产值)/施入化肥氮成本。

土壤硝态氮绝对累积量=土层厚度×土壤容重×土壤硝态氮含量/10。

土壤硝态氮相对累积量=(某一土层硝态氮绝对累积量/整个剖面的硝态氮累积量)×100%。

氮素矿化根据无氮区作物吸氮量与试验前后土壤无机氮的净矿化加以计算,由于不考虑氮肥的激发效应,故假定施肥处理的土壤氮素矿化量和无肥区相同,即:

土壤氮素净矿化量=不施氮肥区地上部分氮积累量+不施氮肥区土壤残留无机氮量-不施氮肥区土壤起始无机氮量。

根据氮平衡模型计算氮的表观损失,即根据氮素输入输出平衡原理^[12]:

氮素表观损失(kg·hm⁻²)=氮输入量(施入氮肥氮+起始无机氮+氮矿化)-作物吸收氮量-土壤残留无机氮量。

计算时,番茄价格按 2.6 元·kg⁻¹,尿素价格按 2 元·kg⁻¹。

用 SAS 软件进行数据统计分析,含相同字母表示差异不显著,小写字母表示在 0.05 水平显著。

2 结果与分析

2.1 施氮模式对番茄产量与经济效益的影响

施用氮肥增产效果明显(表 4),与不施氮(N0)模

表 4 氮肥投入的经济效益分析
Table 4 Economic analysis of different N models

模式	经济产量/kg·hm ⁻²	增产率/%	氮肥生产率/kg·kg ⁻¹	产值/×10 ⁴ 元·hm ⁻²	产投比/元·元 ⁻¹
N0	84 114b	—	—	21.9	—
N-farmer	106 413a	26.5	22.32b	27.7	13.4
74% N-farmer	103 401ab	22.9	23.56b	26.9	15.5
74%N-farmer+S	107 655a	27.9	31.83ab	28.0	19.0
74%N-farmer+S+D	101 058ab	20.1	22.9b	26.3	13.7
55%N-farmer+S+D	108 349a	28.8	43.67a	28.2	26.1

式相比,施用氮肥的模式提高了番茄果实的产量,增产率都达到 20%以上,然而,过量的氮肥投入并没有得到预期的产量,如 N-farmer 模式化学氮肥的投入量最大,但产量并非最高,相反,74%N-farmer+S 和 55%N-farmer+S+D 模式番茄的产量分别比 N-farmer 增产 1.2%和 1.8%。在肥料经济学研究中通常认为,只有当 VCR 值均大于 2 时,施肥才有意义^[3]。结果表明,施用化肥氮处理的 VCR 值均大于 2,说明在本试验条件下,施用氮肥有明显效益,减施氮模式的产投比均大于 N-farmer,其中 55%N-farmer+S+D 模式的 VCR 值是 N-farmer 处理的 1.9 倍,施肥价值最高。

2.2 施氮模式对氮素利用效率的影响

5 个施用氮肥的处理,氮肥当季利用率均低于 10%(表 5),55%N-farmer+S+D 模式氮肥当季利用率最高为 9.56%,N-farmer 模式最低为 3.92%。从试验结果可知,减氮结合添加秸秆和/或滴灌措施对提高氮肥利用率效果明显,氮肥利用率由高到低依次为:55%N-farmer+S+D、74%N-farmer+S+D、74%N-farmer+S、74%N-farmer、N-farmer,其中 74%N-farmer+S+D 和 55%N-farmer+S+D 模式下氮肥的利用率均显著高于 N-farmer 模式($P<0.05$)。N-farmer 模式受传统日光温室蔬菜生产管理模式的影 响,大水漫灌的灌溉方式必然会导致过量投入的氮肥随水淋洗到下层土壤,对地下水造成潜在的威胁。

不同施氮模式下氮肥的生理利用效率没有显著差异,55%N-farmer+S+D 模式氮素生理效率最高为 598.06 kg·kg⁻¹,其他减氮模式的氮肥生理效率均低于 N-farmer 模式(538.19 kg·kg⁻¹)。

不同施氮模式下氮肥农学利用效率差异明显,74%N-farmer、74%N-farmer+S、74%N-farmer+S+D 和 55%N-farmer+S+D 模式下氮肥农学效率分别比 N-farmer 模式高 5.6%、42.6%、2.6%和 95.7%,其中 55%N-farmer+S+D 模式的氮肥农学效率为 43.67 kg·kg⁻¹,

显著高于 N-farmer 模式($P<0.05$)。

由表 6 可知,74%N-farmer、74%N-farmer+S、74%N-farmer+S+D 和 55%N-farmer+S+D 模式的氮素干物质生产效率均低于 N-farmer 模式,其中 74%N-farmer 和 74%N-farmer+S+D 模式的氮素干物质生产力均为 24.04 kg·kg⁻¹,显著低于 N-farmer 模式($P<0.05$)。55%N-farmer+S+D 模式的氮素果实生产效率、氮素收获指数分别比 N-farmer 模式增加 6.5%和 6.1%,其余施氮模式氮素果实生产效率均低于 N-farmer 模式,规律与氮肥生理利用效率一致,说明减施化肥氮结合调节土壤 C/N 比和改用滴灌措施能够利用氮素生产果实的能力较强。

表 5 不同氮肥施用模式对氮素利用效率的影响
Table 5 Effects of different models of applying N fertilizer on N utilization efficiency

模式	氮素利用率/%	氮素生理利用效率/kg·kg ⁻¹	氮素农学利用效率/kg·kg ⁻¹
N0	—	—	—
N-farmer	3.92b	538.19a	22.32b
74%N-farmer	7.27ab	355.28a	23.56b
74%N-farmer+S	8.33ab	366.53a	31.83ab
74%N-farmer+S+D	9.46a	262.76a	22.9b
55%N-farmer+S+D	9.56a	598.06a	43.67a

表 6 不同氮肥模式对氮素生产效率的影响
Table 6 Effects of different models of applying N fertilizer on N production efficiency on tomato

模式	氮素干物质生产效率/kg·kg ⁻¹	氮素果实生产效率/kg·kg ⁻¹	收获指数/%
N0	26.98a	474.6a	51.88a
N-farmer	26.69a	463.72a	50.75a
74%N-farmer	24.04b	439.09a	50.82a
74%N-farmer+S	24.36ab	441.51a	48.10a
74%N-farmer+S+D	24.04b	414.57a	49.40a
55%N-farmer+S+D	24.18ab	493.81a	53.84a

2.3 施氮模式对土壤氮素平衡的影响

运用氮素平衡原理,计算番茄整个生育期 0~100 cm 土体的氮素平衡。土壤无机氮(N_{min})由铵态氮和硝态氮组成,但早作土壤中铵态氮的变化主要集中在施肥后的两三周内,就整个生育期而言无机氮的变化主要受硝态氮影响^[14],裴雪霞^[12]等也得到相似的研究结果。由于设施菜地番茄拉秧前 2~3 周不施肥,就拉秧期而言无机氮的变化主要受硝态氮影响,所以本实验中氮素平衡中土壤无机氮只计算硝态氮含量。

表 7 列出了整个生育期土壤-作物体系中的氮素平衡。从表中可知,不同氮肥模式以 N-farmer 模式氮素盈余最多,即表观损失最严重,高达 382.72 kg·hm⁻²,74% N-farmer 的表观损失最低,为 120.54 kg·hm⁻²,其次是 55%N-farmer+S+D 模式为 186.24 kg·hm⁻²,显著低于 N-farmer 模式($P<0.05$)。

2.4 施氮模式对土壤硝态氮累积的影响

土壤剖面硝态氮的累积随着施氮模式和生育期的不同而异(图 1)。结果表明,施氮模式各生育期各土层硝态氮累积含量均高于 N0 处理;土壤剖面的硝态氮含量随着施氮量的增加而增加,在同一施氮水平下随着剖面深度的增加,土壤硝态氮含量逐渐降低。相同土壤剖面中各处理硝态氮含量随番茄生育进程均呈先增高后降低的趋势。这可能是由于开花期冬天气温低,日照不充分,棚内湿度大,土壤中的氮素主要来源于基肥中的养分投入,所以土层硝态氮累积含量很低。盛果期气温明显升高,日照充足,大棚内温度迅速升高,随着追肥中化肥氮投入量的增加,随水向下淋洗至剖面各层的氮素明显增多,导致土壤各层硝态氮累积含量升高明显,其中 74% N-farmer 模式土壤 0~100 cm 累积的硝态氮含量最高达到 921.85 kg·hm⁻²,其次是 N-farmer 模式高达 744.76 kg·hm⁻²。拉秧后,由于前期 2~3 周不再追施化肥,同时植物带走一部分氮,所以土壤各层硝态氮累积含量有所降低,但 0~

100 cm 累积的硝态氮仍高达 453.75~705.24 kg·hm⁻²,其中 74%N-farmer+S、74%N-farmer+S+D 和 55%N-

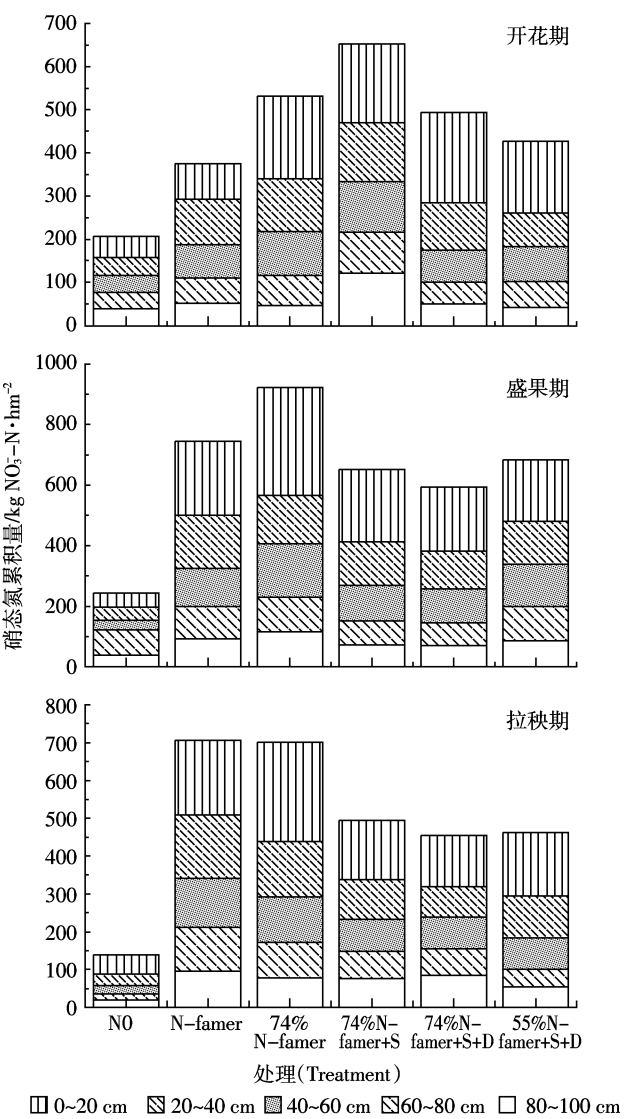


图 1 不同施氮模式不同生育期土壤剖面硝态氮累积
Figure 1 Distribution and accumulation of NO₃-N in soil profile with different models of applying nitrogen fertilizer at different growth stage

表 7 番茄整个生育阶段的氮素平衡(kg·hm⁻²)
Table 7 Nitrogen balance during the whole tomato season(kg·hm⁻²)

模式	N 输入			N 输出		N 表观损失
	施氮量	起始无机氮	净矿化	吸氮量	残留无机氮	
N0	0	168.61	149.24	178.67	139.18	0
N-farmer	1000	168.61	149.24	229.89	705.24	382.72
74%N-farmer	740	168.61	149.24	235.69	701.62	120.54
74%N-farmer+S	740	168.61	149.24	244.12	493.66	320.07
74%N-farmer+S+D	740	168.61	149.24	245.82	453.75	358.18
55%N-farmer+S+D	555	168.61	149.24	225.22	461.39	186.24

表 8 不同施氮模式对不同时期土壤硝态氮相对累积量的影响(%)

Table 8 Effects of different models of applying N fertilizer on relative nitrate-N accumulation in soil profile of different growth stage(%)		模式					
生育期	土层深度/cm	N0	N-farmer	74%N-farmer	74%N-farmer+S	74%N-farmer+S+D	55%N-farmer+S+D
开花期	0~40	43.70	50.19	59.01	48.89	64.68	57.24
	40~100	56.30	49.81	40.99	51.11	35.32	42.76
盛果期	0~40	36.91	56.52	56.00	58.71	56.71	50.38
	40~100	63.09	43.48	44.00	41.29	43.29	49.62
拉秧期	0~40	59.07	51.68	58.33	52.91	47.15	60.37
	40~100	40.93	48.32	41.67	47.09	52.85	39.63

farmer+S+D 模式土壤硝态氮含量显著低于 N-farmer 模式($P<0.05$)。

从表 8 可见,番茄在 3 个不同生育期,土壤硝态氮多累积在 0~40 cm 土层,硝态氮的相对累积量约为 50%,这部分累积的硝态氮大部分能被作物根系吸收利用。而在番茄根系不能到达的大部分区域(40~100 cm),仍有近一半的硝态氮累积,氮素在土壤中的累积必然导致淋洗到地下水中的硝酸盐增加,从而造成对地下水的硝酸盐污染。这一结果也进一步说明减少化肥氮的施用量是降低土壤硝酸盐淋失、减少地下水污染的主要途径和方法。

3 讨论

对于合理地推荐施肥技术的评价,必须考虑其经济效益,因为经济效益是生产者最关心的问题,所以应该通过合理的养分管理来减少投入,从而增加产出的经济效益^[15]。本试验结果表明,施用氮肥都有一定的增产作用,但过量施用氮肥并没有达到最高的产量,相反 74%N-farmer+S 和 55%N-farmer+S+D 模式比 N-farmer 模式的产量分别提高了 1.2%和 1.8%,这说明农民习惯施氮量已经超过了最适施氮量,不但不会提高番茄的产量,还会直接降低肥料的经济效益。对比不同氮肥施用模式,55%N-farmer+S+D 模式的产投比最高,因此其施肥价值最高,肥料经济效益最好。

提高氮肥当季利用率的潜力主要在于适量施肥并减少其施入土壤后的损失。有研究表明^[15],在冬春茬试验中,随着氮肥施用量的增加,氮肥的当季利用率明显降低,追施氮肥较少的调控处理的当季利用率略高于农民传统处理,因此损失量更少。孙志梅等^[16]研究表明,施氮后秸秆还田可提高氮肥利用率,减少 NO₃-N 的流失。杨丽娟等^[17]在塑料大棚草甸土上的研究表明,合理的灌溉方式对提高氮素利用率也非常重要,沟灌处理番茄植株营养器官中有硝酸盐累积,不

能被充分利用,滴灌能节水和提高肥料利用率。本试验研究也得到了相同的研究结果,即不同氮肥模式下氮肥的当季利用率均不到 10%,可见当前设施蔬菜生产中的氮肥利用率是非常低的,采用减施化肥氮结合调节土壤 C/N 和改用滴灌措施的模式氮肥利用率均高于农民习惯模式,尤其是 55%N-farmer+S+D 的集成模式表现突出,显著提高了氮肥利用率($P<0.05$)。

肥料的农学利用效率是单位面积施肥量对作物经济产量增加的反映,是农业生产中最重要也是农民最关心的经济指标之一。本研究表明,55%N-farmer+S+D 模式的氮肥农学效率为 43.67 kg·kg⁻¹,显著高于 N-farmer 模式($P<0.05$),说明化肥氮减施 45%结合调节土壤 C/N 比和采用滴灌措施能够保持稳定的产量,达到减肥增效的目的。这一结果也进一步证明了战洪成等^[18]对大棚蔬菜滴灌与畦灌进行比较研究结果和乔立文等^[19]对温室大棚蔬菜滴灌应用的研究结果。55%N-farmer+S+D 模式氮肥生理利用率高于 N-farmer,其他施氮模式的氮肥生理利用效率都低于 N-farmer,但模式间差异不显著。氮素生产效率的几个指标中,减施化肥氮的氮素干物质生产效率都低于 N-farmer 模式,这是因为单位面积番茄地上部干物质总量差异不明显的条件下单位面积番茄地上部氮素积累总量高于 N-farmer 模式所致。55%N-farmer+S+D 模式下氮的收获指数最高,说明番茄植株中积累的氮较多地分配到果实中,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。

施氮合理与否,除增产效果外,土壤中残留的硝态氮的高低也是一个重要指标。欧盟许多国家都要求 0~90 cm 土体中残留的硝态氮低于 45 kg·hm⁻²^[14]。从本试验结果看出,番茄收获后 0~100 cm 土层中残留的硝态氮仍保持较高的水平,尤其是 N-farmer 模式下,

土壤 0~100 cm 累积的硝态氮高达 705.24 kg·hm⁻², 远远超出国外 45 kg·hm⁻² 的环境可承受值。土壤中较高残留的硝态氮随着下一季肥料和灌溉的增加, 极易淋溶到土壤下层, 甚至会淋溶到地下水, 从而对地下水的水质造成严重污染^[21]。减施氮肥结合添加秸秆和滴灌措施后明显降低了土体的硝酸盐累积。

温室栽培条件下由于土壤耕作层较浅, 一般只有 20~30 cm, 限制了根系的下扎, 充足的水肥供应也导致大多数根系都只分布在 0~30 cm 土层内^[20]。本试验结果表明, 55%N-farmer+S+D 模式能够显著降低番茄生育期的表观损失, 明显减少拉秧期土体 30 cm 以下硝态氮的积累, 这一结果与 Mahdi Cheysari 等相一致^[22], 即控制硝酸盐从根区淋洗出去的方法就是适当灌溉结合肥料的管理。土壤硝态氮多累积在 0~40 cm 土层中, 与熊淑萍和周建斌等研究结果相同^[23-24]。拉秧期 0~40 cm 硝态氮的相对累计量最大的是 55%N-farmer+S+D 处理为 60.37%, 在这一土层累积的硝态氮越多, 下一季可被作物再利用的可能性越大。

合理施氮关系到作物高产高效、生态安全和农业可持续发展。过量不合理施氮不仅不能实现作物增产, 而且使氮肥利用率和产投比下降, 并增加了地下水污染的风险, 造成氮肥农学效益的降低。综上所述, 改良农民施肥方法在番茄产量、氮肥利用效率、生产效率、肥料经济效益及对环境的影响均较农民习惯施氮模式有明显的提高, 试验筛选出 55%N-farmer+S+D 集成模式具有最明显的优势。

参考文献:

- [1] 黄化刚, 张锡州, 李廷轩, 等. 典型设施栽培地区养分平衡及其环境风险[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 676-682.
HUANG Hua-gang, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Nutrient balance and its environmental risks in typical greenhouse system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 676-682.
- [2] 马文奇. 山东省作物施肥现状、问题与对策[D]. 北京: 中国农业大学, 1999.
MA Wen-qi. Present situation, question and countermeasure of crop fertilizer application in Shandong[D]. Beijing: China Agricultural University, 1999.
- [3] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 等. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 126-128.
LI Jun-liang, CUI De-jie, MENG Xiang-xia, et al. The study of fertilization condition and question in protectorate vegetable in Shouguang, Shandong[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(2): 126-128.
- [4] 张学军, 赵桂芳, 朱雯清, 等. 菜田土壤氮素淋失及其调控措施的研究进展[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 105-108.
ZHANG Xue-jun, ZHAO Gui-fang, ZHU Wen-qing, et al. Nitrogen leaching from vegetable soil and control measures: A review[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1): 105-108.
- [5] 王立河, 赵喜茹, 王喜枝, 等. 有机肥与氮肥配施对日光温室黄瓜和土壤硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 472-476.
WANG Li-he, ZHAO Xi-ru, WANG Xi-zhi, et al. Effect of co-application of organic and nitrogen fertilizer on nitrate content of cucumber and soil in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3): 472-476.
- [6] 汤丽玲, 陈清, 张宏彦, 等. 不同水氮处理对菠菜硝酸盐累积和土体硝态氮淋洗的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 326-328.
TANG Li-Ling, CHEN Qing, ZHANG Hong-yan, et al. Effect of different water and nitrogen supply on accumulation nitrate in spinach and NO₃⁻-N leaching in soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(5): 326-328.
- [7] 于红梅, 李子忠, 龚元石. 不同水氮管理对蔬菜地硝态氮淋洗的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1849-1855.
YU Hong-mei, LI Zi-zhong, GONG Yuan-shi. Leached nitrate in vegetable field under different water and nitrogen fertilizer management practices[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9): 1849-1855.
- [8] Home P G, Panda R K, Kar S. Effect of method and scheduling of irrigation of water and nitrogen use efficiencies of Okra (Abesculentus)[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 55: 159-170.
- [9] Diez J A, Caballero R, Roman R, et al. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in central Spain[J]. *Journal of Environment Quality*, 2000, 29: 1539-1547.
- [10] Capri E, Civita M, Corniello A, et al. Assessment of nitrate contamination risk: The Italian experience[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 102(2): 71-86.
- [11] Esteller M V, Martínez-Valdés H, Garrido S, et al. Nitrate and phosphate leaching in a Phaeozem soil treated with biosolids, composted biosolids and inorganic fertilizers[J]. *Waste Management*, 2009, 29(6): 1936-1944.
- [12] 裴雪霞, 王秀斌, 何萍, 等. 氮肥后移对土壤氮素供应和冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 9-15.
PEI Xue-xia, WANG Xiu-bin, HE Ping, et al. Effect of postponing N application on soil N supply, plant N uptake and utilization in winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 9-15.
- [13] 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, 2004, 10(3): 286-291.
LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Wei-li, et al. Study on N use efficiency of Chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 286-291.
- [14] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1122-1128.
LIU Xue-jun, ZHAO Zi-juan, JU Xiao-tang et al. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter, fertilizer N recovery and N balance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1122-1128.
- [15] 张国红. 施肥水平对日光温室番茄生育和土壤环境的影响[D]. 北京: 中国农业大学博士论文, 2004.
ZHANG Guo-hong. Effect of fertilization levels on growth development

- of tomato and soil environment in Hello-Greenhouse[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [16] 孙志梅, 薛世川, 彭正萍, 等. 影响土壤硝态氮淋失的因素及预防措施[J]. 河北农业大学学报, 2001, 24(3):95-99.
- SUN Zhi-mei, XUE Shi-chuan, PENG Zheng-ping, et al. The factors influencing loss of nitrate nitrogen in soil and precautionary measures[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2001, 24(3):95-99.
- [17] 杨丽娟, 张玉龙, 李晓安, 等. 灌水方法对塑料大棚土壤-植株硝酸盐分配影响[J]. 土壤通报, 2000, 31(2):251-256.
- YANG Li-juan, ZHANG Yu-long, LI Xiao-an, et al. Effects of irrigation methods on the distribution of nitrates in soil and tomato plants in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(2):251-256.
- [18] 战洪成, 王德次, 王翠高. 大棚蔬菜滴灌与畦灌应用的对比研究[J]. 节水灌溉, 1999, 5:30-31.
- ZHAN Hong-cheng, WANG De-ci, WANG Cui-gao. Comparative study on drip irrigation and border irrigation[J]. *Water saving irrigation*, 1999, 5:30-31.
- [19] 乔立文, 陈友, 齐红岩, 等. 温室大棚蔬菜生产中滴灌带灌溉应用效果分析[J]. 农业工程学报, 1996, 12(2):34-39.
- QIAO Li-wen, CHEN You, QI Hong-yan, et al. Effect of drip tape irrigation on vegetable production in greenhouse [J]. *Transactions of the CSAE*, 1996, 12(2):34-39.
- [20] Bloom A J, Jackson L E, Smart D R. Root growth as a function of ammonium and nitrate in the root zone [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16:199-206.
- [21] 陈宝明. 施氮对植物生长、硝态氮累积及土壤硝态氮残留的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(3):630-632.
- CHEN Bao-ming. Effect of N supply on plant growth, nitrate accumulation and soil nitrate residue[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(3):630-632.
- [22] Mahdi Gheysari, Seyed Majid Mirlatifi, Mehdi Homaei, et al. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96:946-954.
- [23] 熊淑萍, 姬兴杰, 赵巧梅, 等. 不同肥料类型对土壤硝态氮时空变异的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6):171-176.
- XIONG Shu-ping, JI Xing-jie, ZHAO Qiao-mei, et al. Effect of different fertilizer treatments on spatial-temporal variations of soil ammonium nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 25(6):171-176.
- [24] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 等. 设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23 (2):332-335.
- ZHOU Jian-bin, ZHAI Bing-nian, CHEN Zhu-jun, et al. Nutrient accumulations in soil profiles under canopy vegetable cultivation and their potential environmental impacts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2):332-335.

致谢:本研究工作得到中国农业科学院土壤质量重点开放实验室的条件支持,在此谨致谢意。