

适宜施氮量保证滴灌日光温室黄瓜番茄产量降低土壤盐分及氮残留

王丽英^{1,2}, 武雪萍³, 张彦才², 李若楠², 陈丽莉², 陈清^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 农民传统过量肥水供应可能导致土壤氮素和盐分积累, 滴灌施肥能在根区精确供应肥水以满足作物需求。为明确膜下滴灌日光温室黄瓜-番茄轮作体系氮素供应对土壤氮残留、电导率及作物产量和根干质量的影响, 该研究设计空白(NN)、有机肥对照(MN)、优化供氮(RN)、高量供氮(HN)、传统供氮(CN)5个处理, 进行了2008—2010年6季田间试验。结果表明, 随着氮素供应量的增加, 根层土壤硝态氮和电导率显著增加, CN处理加快并加剧了土壤硝态氮和盐分积累。3个黄瓜-番茄轮作周期, 氮素供应RN、HN、CN处理的土壤硝态氮平均分别为176.9、346.6、500.8 kg/hm², CN处理是RN处理的2.83倍($P<0.05$)。3a黄瓜季RN、HN、CN处理的土壤硝态氮积累量平均分别为-1.87、-49.61、-3.52 kg/hm²、番茄季分别为74.89、225.23、343.15 kg/hm², CN处理积累量是RN处理的4.58倍($P<0.05$)。3个轮作周期后, RN、HN、CN处理比试验前的土壤硝态氮残留增加了219.1、526.9、1 018.9 kg/hm², 平均每个轮作周期增加73.0、175.6、339.6 kg/hm², CN处理是RN处理的4.65倍($P<0.05$)。3个轮作季后, NN、MN、RN、HN、CN处理土壤电导率分别为433.8、681.5、824.5、927.5、1 120.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, RN、HN、CN处理显著高于MN、NN处理($P<0.05$)。2008年番茄季、2009黄瓜季、2009番茄季、2010番茄季拉秧后的土壤电导率差异显著, CN处理是RN处理的1.15、1.29、1.40、1.36倍($P<0.05$), 表明RN处理可显著降低土壤次生盐渍化的风险。每个轮作周期的土壤硝态氮、电导率动态变化均存在2个积累时期, 分别在7月初—8月初的夏季休闲和9月初—11月中旬的番茄结果期。总之, 优化供氮比传统供氮减施氮肥66.7%, 显著降低土壤硝态氮残留和土壤电导率, 保证黄瓜番茄产量不减, 将为日光温室黄瓜番茄轮作体系滴灌施肥制度提供科学依据。

关键词: 日光温室; 氮肥; 土壤; 硝态氮; 电导率; 根干质量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.012

中图分类号: S275.6; S625.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0091-08

王丽英, 武雪萍, 张彦才, 李若楠, 陈丽莉, 陈清. 适宜施氮量保证滴灌日光温室黄瓜番茄产量降低土壤盐分及氮残留[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 91—98. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.012 <http://www.tcsae.org>
Wang Liying, Wu Xueping, Zhang Yancai, Li Ruonan, Chen Lili, Chen Qing. Optimal nitrogen application rate to ensure cucumber and tomato yield with drip irrigation in greenhouse and to reduce soil salinity and nitrate residue [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 91—98. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.012 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国设施蔬菜栽培种植规模发展迅速, 大水大肥仍然是主要水肥管理方式。据调查, 蔬菜生产中氮肥过量施用的现象比较普遍, 河北省日光温室黄瓜、番茄的传统有机肥氮投入量平均为3 427.5和2 301.0 kg/hm², 化肥氮投入量平均为1 269.0和996.0 kg/hm², 化肥氮投入量是推荐施氮量的2.8和3.5倍^[1]。过量施氮不仅能使蔬菜产量降低, 还能导致土壤硝态氮积累, 引发土壤次生盐

渍化^[2]。合理的氮肥管理应基于作物目标产量、氮素吸收量、种植前根层土壤无机氮以及氮素损失, 采用氮素平衡原理即氮素输入等于氮素输出的平衡来推荐施肥总量, 包括有机肥氮和化肥氮。氮肥输入包括有机肥氮矿化、土壤有机氮矿化、化肥氮施入和灌溉水带入氮, 氮输出包括作物吸收氮、土壤氮残留以及氮素损失^[3]。由于蔬菜大部分根系分布在0~40 cm^[3-4], 因此, 调控根层土壤氮素供应是氮肥高效利用的关键^[4]。郭瑞英^[5]研究表明沟灌条件下, 设施冬春茬黄瓜初瓜期、盛瓜期和末瓜期的根层土壤硝态氮最低残留量为100 kg/hm²。Ren等^[6]提出, 沟灌条件下保证一年两季番茄高产和低氮素损失的根层氮素供应临界值为150 kg/hm²。西欧从环境保护角度提出, 保证地下水不受硝酸盐污染的土壤无机氮最高残留水平, 允许浅根性蔬菜收获后土壤最低氮不得超过90 kg/hm²^[7]。

与传统沟灌相比, 滴灌施肥能准确控制灌溉施肥量和时期, 调控氮素供应浓度。邢英英等^[8]研究得出春茬番茄滴灌施氮120 kg/hm²处理的氮肥利用效率最大。根干质量常受养分供应影响^[9], 氮量过多, 根干质量降低。

收稿日期: 2014-12-23 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAD14B07-05); 国家重点基础研究发展计划(2007CB109305); 现代农业产业技术体系果类蔬菜北京市创新团队土壤水岗位科学家项目

作者简介: 王丽英, 河北邱县人, 博士, 副研究员, 从事蔬菜营养与施肥技术研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: wangliying5@163.com

*通信作者: 陈清, 山东文登人, 博士, 教授, 从事经济作物养分管理与环境方面研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: qchen@cau.edu.cn

适量供氮能诱导侧根的产生, 增加根干质量^[10]。程美廷^[11]认为化肥氮施用过量可导致土壤硝态氮积累, 是温室土壤次生盐渍化的主要原因之一。土壤次生盐渍化可使蔬菜根系生长不良, 产量降低^[2,11]。因此, 本研究采用田间定位试验研究膜下滴灌条件下, 3a 6 季黄瓜-番茄轮作体系氮肥用量对根层土壤硝态氮和土壤电导率周年变化特征的影响, 以及黄瓜、番茄产量和根系的反应, 旨在为设施黄瓜-番茄轮作体系滴灌施肥提供科学依据。

1 材料与方法

表 1 供试温室基础土壤理化性质

Table 1 Soil physiochemical characteristics in tested greenhouse

土层 Soil depth/cm	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate NO ₃ ⁻ -N (kg·hm ⁻²)	电导率 Electrical conductivity (μS·cm ⁻¹)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	田间持水量 Field water capacity /%
0~20	15.4	1.55	14.87	276	1.354	19.11
>20~40			12.80	278	1.517	16.87
>40~60			22.25	348	1.485	22.04
>60~80			70.25	360	1.361	23.02
>80~100			98.68	392	1.424	20.18

注: 电导率基于土水比 1:5 测定。
Note: Electrical conductivity measurement is based on soil and water ratio of 1:5.

1.2 供试作物

供试作物为冬春季黄瓜-秋冬季番茄, 黄瓜、番茄品种分别为博美 11 号、金鹏 1 号。冬春季黄瓜定植时间为每年 2 月 21 日, 拉秧时间为 2008 年 7 月 4 日、2009 年 7 月 7 日、2010 年 7 月 8 日。番茄定植时间为每年 8 月 11 日, 拉秧时间分别为 2008 年 12 月 25 日, 2009 年 12 月 21 日, 2011 年 1 月 18 日。种植密度为株距 0.30 m, 行距 0.60 m。蔬菜生长期除草、打叶、病虫害防治等措施按照无公害蔬菜栽培技术规程进行管理。

1.3 试验设计

优化供氮依据黄瓜番茄目标产量、氮素吸收量和基础土壤硝态氮水平进行推荐, 传统供氮量接近农民传统沟灌氮肥推荐量平均值的 70%^[1], 高量供氮为传统供氮量的 66.7%, 优化供氮为传统供氮量的 33.3%。试验共进行 3 a, 每年处理设计一致, 设 5 个处理(表 2), 3 次重复。各小区面积为 10.80 m² (长 6 m、宽 1.8 m), 随机排列,

1.1 试验区概况

试验于 2008 年 2 月—2011 年 1 月在河北省辛集市马庄试验站进行(37°18'N、115°28'E)。该地属东部季风区暖温带半湿润大陆性气候, 全年平均气温 12.5℃, 年平均降水 488.2 mm, 年平均湿度 67%, 年平均日照 2 629.5 h。该区域地势平坦, 土层深厚, 适合设施蔬菜生产。供试日光温室带有保温层、砖制墙体, 无水泥柱拱形结构, 拱形外表面覆盖 0.8 mm 聚乙烯棚膜, 冬季棚膜上覆盖草帘。该温室长 40 m、宽 7.5 m、拱高 2.5 m。供试土壤为壤质潮土, 0~20 cm 基本理化性质见表 1。

小区四周用聚氯乙烯板隔离 1 m 深, 防止水肥测渗。冬春季黄瓜和秋冬季番茄的施肥量见表 2。施肥量的 20%氮肥、100%磷肥和 40%钾肥在定植前底施, 其余肥料追施。黄瓜季从第 1 根瓜坐住开始追肥, 共追肥 10 次, 番茄季从第 1 穗果实膨大期开始追肥, 共追肥 4 次。施肥采用压差式施肥罐, 设备主要由水源、变频水泵、旋翼式水表、压差施肥罐和输配水管道系统等组成。灌溉量根据土壤水分状况和气候条件确定, 保持生育期根层土壤相对含水率为 75%~90%。2008、2009 和 2010 年黄瓜季的灌溉定额分别为 412、342、357 mm, 灌溉 20~25 次, 每次灌溉量 12~18 mm; 2008、2009 和 2010 年番茄季的灌溉定额分别为 135、126、126 mm, 灌溉 5 次, 每次灌溉量 12~18 mm。滴灌带为内镶式, 内径 8 mm, 滴头间距 30 cm, 滴头流量 2 L/h, 滴灌工作压力 0.3 MPa。滴灌施肥采用清水-肥液-清水的模式, 先滴清水 20~30 min, 然后滴肥液, 最后滴清水 20~30 min。

表 2 黄瓜季和番茄季各处理的施肥量

Table 2 Fertilizer application rate of each treatment in cucumber and tomato seasons

处理 Treatment	冬春季黄瓜 Winter-spring cucumber				秋冬季番茄 Fall-winter tomato			
	有机肥氮 Organic N (kg·hm ⁻²)	化肥氮 Nitrogen N (kg·hm ⁻²)	化肥磷 Phosphorous P ₂ O ₅ (kg·hm ⁻²)	化肥钾 Potassium K ₂ O (kg·hm ⁻²)	有机肥氮 Organic N (kg·hm ⁻²)	化肥氮 Nitrogen N (kg·hm ⁻²)	化肥磷 Phosphorous P ₂ O ₅ (kg·hm ⁻²)	化肥钾 Potassium K ₂ O (kg·hm ⁻²)
空白 Blank (NN)	0	0	300	525	0	0	225	450
对照 Control (MN)	357	0	300	525	0	0	225	450
优化供氮 Rational N (RN)	357	300	300	525	0	225	225	450
高量供氮 High N (HN)	357	600	300	525	0	450	225	450
传统供氮 Conventional N (CN)	357	900	300	525	0	675	225	450

注: 试验前第 1 季冬春季黄瓜定植前底施有机肥 30 000 kg·hm⁻², 以后几季不施有机肥。
Note: Organic fertilizer (30 000 kg·hm⁻²) was applied only before cucumber cultivation of first season.

供试有机肥为发酵鸡粪（干基），其碳氮比（C/N）为 11.0、含全氮 11.9 g/kg、全磷 21.2 g/kg、全钾 13.6 g/kg。化肥采用尿素（46% N），硫酸钾（50% K₂O），过磷酸钙（16% P₂O₅）。

1.4 采集与测定

果实产量从黄瓜、番茄采摘开始，每小区记录实际产量，计算产量。

根系样品采集以主根为中心、水平半径 15 cm、深 40 cm 空间区域的完整根系。黄瓜根系采样时间为 2008 年 7 月 4 日、2009 年 7 月 8 日、2010 年 7 月 7 日；番茄根系采集时间为 2008 年 12 月 25 日、2009 年 12 月 21 日，2011 年 1 月 18 日。

土壤样品采集分 0~20 和 >20~40 cm 共 2 层：2008 年采集 9 次（1 月 3 日、3 月 12 日、4 月 7 日、5 月 24 日、7 月 8 日、9 月 1 日、9 月 18 日、10 月 20 日、12 月 25 日）、2009 年采集 7 次（3 月 16 日、3 月 30 日、5 月 18 日、7 月 4 日、9 月 16 日、11 月 5 日、12 月 21 日）、2010 年采集 7 次（4 月 1 日、5 月

20 日、6 月 1 日、7 月 7 日、10 月 22 日、11 月 16 日、1 月 18 日）。

土壤有机质、全氮、容重、田间持水量和土壤电导率采用常规方法测定^[12]。土壤硝态氮采用新鲜土壤，紫外分光光度法测定^[13]。

数据采用 SAS8.0 软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 氮素供应对黄瓜番茄产量和根干质量的影响

氮素供应对日光温室黄瓜番茄产量的影响结果表明（表 3），2008、2009 年黄瓜季，MN、RN、HN、CN 处理间差异均不显著（ $P>0.05$ ），但 RN 和 HN 显著高于空白 NN（ $P<0.05$ ）；2010 年黄瓜产量 RN、HN、CN 处理显著高于 MN 和 NN 处理（ $P<0.05$ ），比 MN 处理分别增产 37.6%、42.3%、38.0%。2008 年番茄季，MN、RN、HN 和 CN 处理间产量差异不显著（ $P>0.05$ ）；2010 年番茄季，各处理产量差异均不显著（ $P>0.05$ ）。比较而言，RN 和 HN 处理更能保证产量保持较高水平。

表 3 氮素供应对温室黄瓜番茄产量的影响
Table 3 Effect of nitrogen supply on yield of tomato and cucumber in greenhouse

处理 Treatments	黄瓜 Cucumber/(10 ³ kg·hm ⁻²)				番茄 Tomato/(10 ³ kg·hm ⁻²)			
	2008 年	2009 年	2010 年	总计 Total	2008 年	2009 年	2010 年	总计 Total
NN	163.2 b	126.3 b	80.1c	369.6 b	118.5 b	98.9 a	89.7 a	307.1 a
MN	197.2 a	165.1 ab	111.2 b	473.5 a	143.3 a	91.1 ab	89.5 a	323.9 a
RN	196.5 a	178.0 a	153.0 a	527.5 a	132.2 ab	85.2 ab	84.9 a	302.3 a
HN	199.0 a	175.2 a	158.2 a	532.4 a	134.8 ab	87.1 ab	88.8 a	310.7 a
CN	201.0 a	169.5 ab	153.5 a	524.0 ab	132.1 ab	79.7 b	90.8 a	302.6 a

注:不同小写字母表示 0.05 水平差异显著;下同。
Note: Different letters indicate significant difference at 0.05 level; Same as below.

氮素供应对黄瓜番茄根干质量的影响结果表明（表 4），黄瓜根干质量较高的处理为 NN、MN，番茄根干质量较高的为 NN、MN、RN 处理。2008、2010 年 CN 处

理的黄瓜根干质量比 RN 处理分别降低 4.2%、7.3%（ $P<0.05$ ），番茄季分别降低 14.0%、12.8%（ $P<0.05$ ）。总之，MN、NN、RN 处理根干质量最佳。

表 4 氮素供应对黄瓜番茄根干质量的影响
Table 4 Effect of nitrogen supply on dry root matter of tomato and cucumber in greenhouse

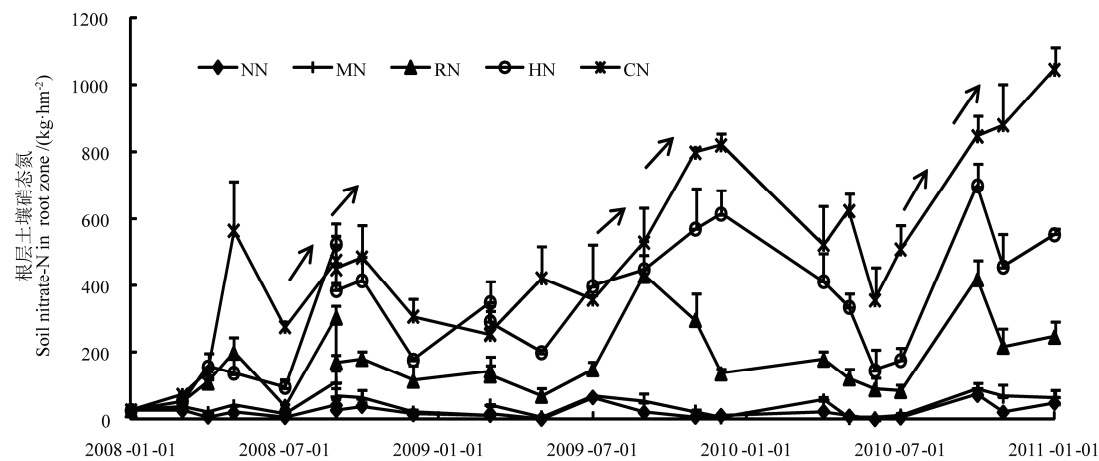
处理 Treatments	黄瓜 Cucumber/(kg·hm ⁻²)			番茄 Tomato/(kg·hm ⁻²)		
	2008 年	2009 年	2010 年	2008 年	2009 年	2010 年
NN	193.1 ab	203.1 a	226.5 a	139.7 bc	113.2 ab	102.2 a
MN	220.6 a	190.6 a	210.9 ab	157.4 ab	120.5 a	113.9 ab
RN	128.4 b	165.5 b	183.0 b	165.0 a	106.9 b	125.7 a
HN	125.1 bc	165.4 b	178.9 bc	153.5 ab	105.8 b	117.7 b
CN	123.0 c	158.9 b	169.7 c	141.9 b	105.3 b	109.6 b

2.2 氮素供应对根层土壤硝态氮和电导率的影响

2.2.1 根层土壤硝态氮周年动态

随着氮素供应量的增加，根层土壤硝态氮含量增加，传统供氮 CN 处理出现土壤硝态氮积累（图 1）。3 个轮作周期，空白 NN 和对照 MN 处理的土壤硝态氮平均为 24.09、41.08 kg/hm²，RN、HN、CN 处理分别为 176.9、

346.6、500.8 kg/hm²，CN 处理是 RN 处理的 2.83 倍（ $P<0.05$ ），RN 处理比 CN 处理降低了 64.7%（ $P<0.05$ ）。分析每个轮作周期根层土壤硝态氮的周年动态变化发现（图 1），土壤硝态氮积累在 2 个时期比较明显：一个是黄瓜拉秧后到番茄定植前，即 7 月初—8 月初的夏季休闲期；另一个是在番茄结果期，即 9 月初—11 月中旬。



注：箭头表示土壤硝态氮积累的时期；NN 和 MN 分别表示空白和有机氮肥对照，RN、HN 和 CN 分别表示优化供氮、高量和传统供氮，下同。
Note: Arrows indicate period of soil nitrate nitrogen accumulation; NN and MN are blank and control with only organic fertilizer, RN, HN and CN are rational, high and conventional N application, respectively, same as below.

图 1 氮素供应对根层 0~40 cm 土壤硝态氮周年动态的影响
Fig.1 Effect of nitrogen supply on dynamics of soil nitrate in 0 to 40 cm root zone

氮素供应对每季黄瓜番茄拉秧后土壤硝态氮残留的影响表明（表 5），2008、2009、2010 年黄瓜季收获后，RN 处理土壤硝态氮分别为 39.85、149.50、84.54 kg/hm²，HN 处理分别为 96.89、399.33、177.08 kg/hm²，CN 处理分别为 277.36、359.30、510.22 kg/hm²，CN 处理分别是 RN 处理的 7.0、2.4、6.0 倍（ $P<0.05$ ）；2008、2009、2010 年番茄季收获后，RN 处理根层土壤硝态氮分别为 114.94、136.89、246.73 kg/hm²，HN 处理分别为 178.12、616.36、554.52 kg/hm²，CN 处理为 308.57、821.19、1 046.57 kg/hm²，CN 处理分别是 RN 处理的 2.7、6.0、4.2 倍（ $P<0.05$ ）。分析当季土壤硝态氮积累量发现，黄瓜季 RN、HN、CN 处理的土壤硝态氮积累量平均值分别为-1.87、

-49.61、-3.52 kg/hm²，番茄季分别为 74.89、225.23、343.15 kg/hm²，番茄季 CN 处理是 RN 处理的 4.58 倍（ $P<0.05$ ）。3 个轮作周期后，NN、MN 处理的土壤硝态氮比试验前增加了 21.9、38.9 kg/hm²，平均每个轮作周期增加 7.3、13.0 kg/hm²，积累量很低，可以忽略不计。而 RN、HN、CN 处理比试验前增加了 219.1、526.9、1 028.9 kg/hm²，平均每个轮作周期增加 73.0、175.6、339.6 kg/hm²，CN 处理是 RN 处理的 4.65 倍（ $P<0.05$ ）。因此，RN、CN 处理土壤硝态氮积累主要发生在番茄季，优化供氮 RN 处理显著降低了土壤硝态氮残留和每季土壤硝态氮积累量（ $P<0.05$ ）。

表 5 氮素供应对每季黄瓜番茄拉秧后土壤硝态氮残留和当季硝态氮积累量的影响
Table 5 Effect of nitrogen fertilizer application on soil nitrate after harvest of cucumber and tomato and its accumulation rate each season

土壤硝态氮 Soil nitrate	处理 Treatments	黄瓜 Cucumber/(kg·hm ⁻²)			番茄 Tomato/(kg·hm ⁻²)		
		2008 年	2009 年	2010 年	2008 年	2009 年	2010 年
每季拉秧 后残留量 Content after harvest	NN	8.28 de	66.62 d	6.59 d	16.36 de	12.51 d	49.53 cd
	MN	15.94 d	68.15 d	13.56 d	21.96 d	7.31 de	66.59 d
	RN	39.85 c	149.50 c	84.54 c	114.94 bc	136.89 c	246.73 c
	HN	96.89 b	399.33 a	177.08 b	178.12 b	616.36 b	554.52 b
	CN	277.36 a	359.30 ab	510.22 a	308.57 a	821.19 a	1046.57 a
当季积累量 Accumulation rate each season	NN	-19.39 d	50.26 b	-5.92 d	8.08 c	-54.10 c	42.94 d
	MN	-11.73 d	46.19 b	6.25 d	6.02 c	-60.84 c	53.03 d
	RN	12.18 c	34.57 bc	-52.35 c	75.09 a	-12.62 cd	162.19 c
	HN	69.22 b	221.22 a	-439.27 a	81.23 a	217.02 b	377.44 b
	CN	249.69 a	50.73 b	-310.97 b	31.21 b	461.89 a	536.35 a

注：当季土壤硝态氮积累量=拉秧时土壤硝态氮-定植前土壤硝态氮。
Note: Soil nitrate accumulation rate each season is soil nitrate after harvest minus that before transplanting.

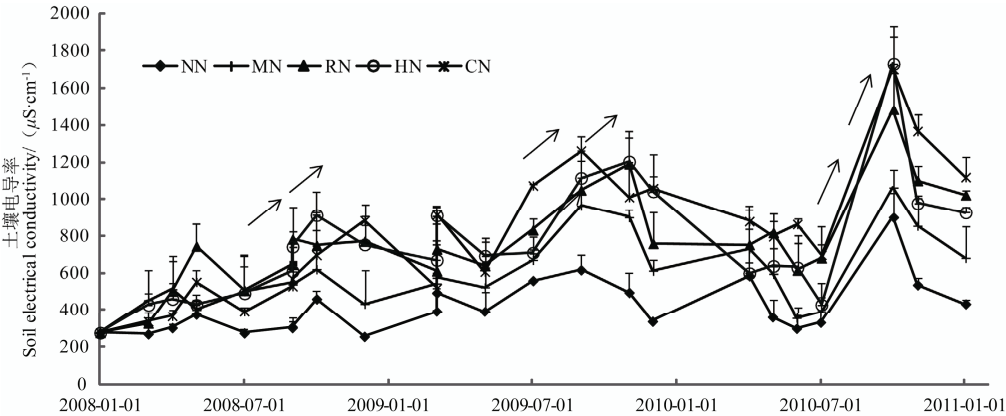
2.2.2 电导率周年动态

土壤硝酸盐 NO₃⁻是土壤盐分的主要阴离子之一，土壤电导率是测定土壤水溶性盐的指标，其大小表征土壤盐分含量的高低，也反应土壤环境质量状况。不同氮素供应下土壤电导率变化表明（图 2），随着氮供应量的增

加，0~20 m 土壤电导率有升高趋势。NN 和 MN 土壤电导率平均值分别为 422.1、612.6 μS/cm，RN、HN、CN 处理分别为 769.3、777.7、827.6 μS/cm。与根层土壤硝态氮周年动态变化特征一致（图 1 和图 2），土壤电导率的周年动态变化特征也存在 2 个盐分积累时期：一个是黄

瓜拉秧后到番茄定植前,即7月初—8月初的夏季休闲期;另一个是在番茄结果期,即9月初—11月中旬。与其他

氮素供应处理相比,优化供氮更能降低土壤电导率,减少土壤次生盐渍化风险。



注：箭头表示土壤电导率升高。
Note: Arrow indicates that soil electrical conductivity is increased.

图 2 氮素供应对土壤电导率动态的影响
Fig.2 Effect of nitrogen supply on dynamics of soil electrical conductivity

每季黄瓜番茄拉秧后土壤电导率结果显示(表 6), 3 个轮作周期后, NN、MN 处理的土壤电导率从试验前 276 μS/cm 上升到 433.8、681.5 μS/cm, 分别增加 57.2 %、146.9 % ($P<0.05$); 而 RN、HN、CN 处理分别上升到 824.5、927.5、1 120.0 μS/cm, 分别增加 198.7 %、236.1%、305.8 % ($P<0.05$)。除 2010 年黄瓜季外, 其余几季 MN 处理土壤电导率分别是 NN 处理的 1.83、1.20、1.69、1.82、1.57 倍, 显著低于空白处理 ($P<0.05$)。2009 年黄瓜季,

2008 年番茄季、2009 番茄季、2010 番茄季, RN 处理的土壤电导率显著低于 CN 处理 ($P<0.05$), CN 处理分别是 RN 处理的 1.29、1.15、1.40、1.36 倍。CN、HN、RN 处理早在 2008 年番茄季, 土壤电导率就超过蔬菜正常生长临界值 600 μS/cm^[14], 且以 CN 处理电导率最高, 而 MN 处理 2009 年黄瓜季超过该临界值, 说明氮肥供应提前了土壤次生盐渍化出现的时间, 而且过量氮肥供应增大了次生盐渍化的风险。

表 6 氮素供应对每季黄瓜番茄拉秧后 0~20 cm 土壤电导率的影响
Table 6 Effects of nitrogen supply on soil electrical conductivity in 0 to 20 cm after each season of cucumber and tomato harvest

处理 Treatments	黄瓜 Cucumber /(μS·cm ⁻¹)			番茄 Tomato /(μS·cm ⁻¹)		
	2008	2009	2010	2008	2009	2010
NN	274.5 c	559.3 d	332.0 bc	255.9 d	337.3 c	433.8 e
MN	502.0 a	670.3 c	389.5 b	433.5 c	612.5 b	681.5 cd
RN	505.7 a	832.7 b	681.2 a	771.8 b	759.1 b	824.5 c
HN	491.0 a	717.0 bc	429.2 b	754.5 b	1043.1 a	927.5 ab
CN	391.3 ab	1074.7 a	697.5 a	884.8 a	1060.0 a	1120.0 a

2. 2. 3 土壤硝态氮与土壤电导率的关系

土壤硝态氮是土壤次生盐渍化的原因之一。除 RN 处理 >20~40 cm 外, 土壤硝态氮与电导率均呈显著线性相关 ($P<0.05$, 表 7), 说明随着土壤硝态氮的增加, 土壤电导率呈线性增加, 且二者相关性以 CN 处理 >20~40 cm 最高, 相关系数为 0.85 ($P<0.05$), 表明施氮量越高, 电导率随之增加越显著, 土壤次生盐渍化风险越高。

表 7 土壤硝态氮与电导率的相关关系
Table 7 Correlation between soil nitrate and electrical conductivity

处理 Treatments	0~20 cm	>20~40 cm
RN	0.82*	0.22
HN	0.82*	0.67*
CN	0.60*	0.85*

注：*表示在 5%水平显著相关。
Note:* indicate significant correlation at 5% level.

3 讨 论

张学军^[15]研究表明, 日光温室秋冬茬番茄、秋冬茬黄瓜底施 18 t/hm² 鸽粪时, 滴灌施肥适宜施氮量为 100~150、400~450 kg/hm²。赵文艳等^[16]盆栽试验得出, 抑制番茄生长的土壤 NO₃⁻-N 适宜上限值为 150 mg/kg, 此时对应的施氮量上限为 437 kg/hm²。本试验冬春季黄瓜、秋冬季番茄 RN 处理每次滴灌的氮浓度(每次氮素供应量除以灌溉量)范围分别为 80~97、170~198 mg/L^[9], 与荷兰无土栽培黄瓜、番茄推荐的氮素浓度一致^[17]。本研究冬春季黄瓜、秋冬季番茄的优化供氮量分别为 300、225 kg/hm², 可能是作物品种、土壤肥力、蔬菜产量以及有机肥用量和种类对土壤供氮能力和化肥施氮量的影响。本试验 MN 处理与 RN 处理相比, 根层土壤硝态氮和土壤电导率显著降低, 根层土壤硝态氮平均仅为 41.08

kg/hm², 但黄瓜、番茄产量没有降低。分析其原因是该试验 6 季土壤有机氮矿化量为 1 259 kg/hm², 有机肥氮矿化量为 230 kg/hm², 二者氮矿化总量为 1 489 kg/hm², 比 6 季黄瓜番茄的氮素吸收总量 1 448.8 kg/hm² 高出 40.2 kg/hm²^[18]; RN 处理增施化学氮肥除了满足作物氮素吸收, 还维持根层土壤适宜的氮素含量及不可避免的氮素损失。与黄瓜、番茄传统供氮量 900、675 kg/hm² 相比, 优化供氮量减施比例为 66.7%, 但产量不降低。可见, 该土壤肥力条件下的氮肥减施潜力较大。

该试验优化供氮 RN 处理 3 个轮作周期的根层土壤硝态氮均值为 176.9 kg/hm², 与 Ren 等^[6]提出保证番茄产量和环境友好的根层土壤无机氮临界值 150 kg/hm² 接近。番茄季 RN 处理平均每个轮作周期的土壤硝态氮增加 64.1 kg/hm², 3 个轮作周期后, 番茄拉秧时土壤硝态氮为 246.73 kg/hm², 高于西欧提出的菜田土壤环境友好指标, 无机氮 90 kg/hm²^[7], 可能会增加硝态氮淋洗污染地下水的风险^[19]。因此, 该试验中番茄季的优化供氮量仍有下调的余地^[18]。黄瓜、番茄根干质量随着氮供应量的增加而降低, 说明氮肥过量导致土壤硝态氮积累^[20], 抑制根系生长, 这与高丽等^[21]表明的日光温室传统施氮处理抑制黄瓜根系生长的结果一致。

膜下滴灌水流缓慢, 不断浸润根层, 使作物主根区土壤经常保持良好的水分环境, 同时很快将盐分带入湿润区边缘, 淡化主根区的盐分, 为作物生长创造了一个良好的土壤环境^[22]。但是, 依“盐随水来, 盐随水走”原理, 夏季休闲期不揭棚膜, 地表没有作物覆盖, 当土壤水分蒸发时也会导致盐分表聚。本试验结果表明, 日光温室黄瓜-番茄轮作体系根层土壤硝态氮积累和电导率升高的时期均在夏季休闲期和番茄季结果期, 其中夏季休闲期就是由于没有作物覆盖, 温室气温高, 土壤蒸发强烈, 盐分随着水向表层土壤运移发生表聚积累的结果^[23]。硝酸盐是温室土壤盐渍化过程中增加最多的组分, 盐分组成阴离子以 NO₃⁻为主。薛继澄等^[24]研究指出 NO₃⁻占阴离子总质量分数的 67%~76%。童有为等^[25]测定的 NO₃⁻也占阴离子总质量分数的 50%以上, 而硝态氮的分布与施肥和种植年限有关。李刚等^[26]研究指出, 随着大棚种植年限的延长, 盐分有明显的表聚现象。这与该试验随着种植年限的延长, 电导率升高, 盐分积累加重的结果一致。

土壤盐分积累导致土壤溶液中离子含量过高引起水分胁迫而使根系吸水困难, 直接影响蔬菜根系生长和产量。黄瓜、番茄对土壤盐分积累较为敏感的作物^[2], 但黄瓜、番茄根系受施氮量的影响存在差异, 还需要深入研究不同蔬菜作物对施氮量、土壤硝态氮以及土壤盐分积累的反应, 为设施菜田土壤次生盐渍化改良提供科学依据。

4 结 论

该土壤肥力条件下, 日光温室黄瓜-番茄轮作体系中, 随着氮素供应量的增加, 土壤硝态氮增加, 土壤电导率升高, 并随着种植年限的延长而加剧。优化供氮比传统

供氮量减施 66.7%, 在保证黄瓜番茄产量不减的前提下, 显著降低土壤硝态氮残留和土壤电导率, 减肥潜力较大。日光温室黄瓜-番茄轮作体系的土壤硝态氮和土壤电导率周年动态变化特征表明, 土壤硝态氮和盐分积累均存在 2 个关键时期, 分别在 7 月初—8 月初的夏季休闲期和 9 月初—11 月中旬的秋冬季番茄结果期。

[参 考 文 献]

- [1] 张彦才, 李巧云, 翟彩霞, 等. 河北省大棚蔬菜施肥状况分析与评价[J]. 河北农业科学, 2005, 9(3): 61—67.
Zhang Yancai, Li Qiaoyun, Zhai Caixia, et al. The condition and appraisal of the vegetable apply fertilizer in greenhouse in Hebei Province[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2005, 9(3): 61—67. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郭文忠, 刘声峰, 李丁仁, 等. 设施蔬菜土壤次生盐渍化发生机理的研究现状与展望[J]. 土壤, 2004, 36(1): 25—29.
Guo Wenzhong, Liu Shengfeng, Li Dingren, et al. Mechanism of soil salinization in protected cultivation[J]. Soil, 2004, 36(1): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [3] 高杰云, 王丽英, 严正娟, 等. 设施土壤栽培番茄配方施肥策略与指标研究[J]. 中国蔬菜, 2014(1): 7—12.
Gao Jieyun, Wang Liying, Yan Zhengjuan et al. Studies on fertilization strategy and related indexes for tomato facility soil cultivation [J]. China Vegetables, 2014(1): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王丽英, 任珊露, 严正娟, 等. 根层调控: 果类蔬菜高效利用养分的关键[J]. 华北农学报, 2012, 27(增刊): 292—297.
Wang Liying, Ren Shanlu, Yan Zhengjuan, et al. Rhizosphere management: the key to get high nutrient use efficiency for fruit vegetable[J]. Acta Agriculture Boreali Sinica, 2012, 27(Supp.): 292—297. (in Chinese with English abstract)
- [5] 郭瑞英. 设施黄瓜根层氮素调控及夏季种植填闲作物阻控氮素损失研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
Guo Ruiying. Studies on Nitrogen Control in Root zone and Summer Catch Crop Planting for Reducing N Loss in Greenhouse Cucumber Cropping System[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [6] Ren Tao, Christie Peter, Wang Jingguo, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(1): 25—33.
- [7] Declercq P, Gertsis A C, Hofman G, et al. Nutrient Management Legislation in European Countries[M]. Ghent: Department of Soil Management and Soil Care, Ghent University, 2001: 56—77.
- [8] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 110—121.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality,

- water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 110—121. (in Chinese with English abstract)
- [9] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2015, 30(21): 70—80.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Zhang Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 70—80. (in Chinese with English abstract)
- [10] 石小虎, 曹红霞, 杜太生, 等. 膜下沟灌水氮耦合对温室番茄根系分布和水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 89—93.
Shi Xiaohu, Cao Hongxia, Du Taisheng, et al. Effects of water and nitrogen coupling on root distribution and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2013, 41(2): 89—93. (in Chinese with English abstract)
- [11] 程美廷. 温室土壤盐分积累、盐害及其防治[J]. 土壤肥料, 1990(1): 1—4.
Cheng Meiting. Soil salinization accumulation, salt damage, prevention and cure[J]. Soil and Fertilizer, 1990(1): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [13] 宋歌, 孙波, 教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. 2007, 44(2): 288—293.
Song Ge, Sun Bo, Jiao Jianying. Comparison between ultraviolet spectrophotometer and other methods in determination of soil nitrate-N[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 288—293. (in Chinese with English abstract)
- [14] 高峻岭, 宋朝玉, 黄绍文, 等. 青岛市设施蔬菜施肥现状与土壤养分状况[J]. 山东农业科学, 2011(3): 68—72.
Gao Junling, Song Chaoyu, Huang Shaowen, et al. Fertilization and soil nutrient status in greenhouse vegetables in Qingdao[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2011(3): 68—72. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张学军. 节水控氮对宁夏不同土壤-蔬菜体系中氮素平衡 NO_3^- -N 淋失的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
Zhang Xuejun. Effects of Water Saving and Nitrogen Controlling on Nitrogen Balance and Nitrate Leaching in Different Vegetable System Ningxia[D]. Wuhan: Hua zhong Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵文艳, 张晓敏, 石宗琳, 等. 氮钾肥施用对土壤有效养分和盐分及番茄生长的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 100—104.
Zhao Wenyan, Zhang Xiaomin, Shi Zonglin, et al. Effects of application of nitrogen and potassium fertilizers on available nutrient, water-soluble salt in soil and the growth of Tomato [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 100—104. (in Chinese with English abstract)
- [17] Michael R, Heinrich Lieth J. Soilless Culture: Theory and Practice [M]. New York: Elsevier Science, 2008.
- [18] 王丽英. 氮磷供应对设施黄瓜番茄轮作体系蔬菜生长及氮磷高效利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
Wang Li ying. Effect of Nitrogen and Phosphorus Supply in Root Zone on Vegetable Growth and High Use Efficiency in Greenhouse Cucumber-tomato Production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [19] Song Xiaozong, Zhao Changxing, Wang Xiaolan, et al. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in Northern China[J]. Comptes Rendus Biologies, 2009, 332(4): 385—392.
- [20] 刘庆芳, 吕家珑, 李松龄, 等. 不同种植年限蔬菜大棚土壤中硝态氮时空变异研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 159—163.
Liu Qingfang, Lu Jialong, Li Songling, et al. The spatio temporal variation of nitric nitrogen in protected vegetable soils in different years of cultivation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 159—164. (in Chinese with English abstract)
- [21] 高丽, 李红岭, 王铁臣, 等. 水氮耦合对日光温室黄瓜根系生长的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 58—64.
Gao Li, Li Hongling, Wang Tiechen, et al. Coupling effect of water and nitrogen on cucumber root growth in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 58—64. (in Chinese with English abstract)
- [22] 吕殿青, 王全九, 王文焰, 等. 膜下滴灌土壤盐分特性及影响因素的初步研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 28—31.
Lü Dianqing, Wang Jiuquan, Wang Huoyan, et al. Salt distribution and effect factors in under-film drip irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(1): 28—31. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李亚灵, Stanghellini Cecilia. 温室内蒸腾控制对高盐分下番茄生产的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 85—89.
Li Yaling, Stanghellini Cecilia. Effect of transpiration control under high salinity in a greenhouse on tomato yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2001, 17(6): 85—89. (in Chinese with English abstract)
- [24] 薛继澄, 李家金, 毕德义, 等. 保护地栽培土壤硝酸盐积累对辣椒生长和锰含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 1995, 8(1): 53—57.
Xue Jicheng, Li Jiajin, Bi Deyi, et al. Effects of nitrate accumulation of soil on growth and manganese concentration of pepper in protected cultivation[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1995, 8(1): 53—57. (in Chinese with English abstract)
- [25] 童有为, 陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究[J]. 园艺学报, 1991, 18(2): 159—162.
Tong Youwei, Chen Danfei. Study on the cause and control of secondary saline soils in greenhouses[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1991, 18(2): 159—162. (in Chinese with English abstract)

- [26] 李刚, 张乃明, 毛昆明, 等. 大棚土壤盐分累积特征与调控措施研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 44–47.
Li Gang, Zhang Naiming, Mao Kunming, et al.
Characteristics of soil salt accumulation in plastic greenhouse

and its control measures [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 44–47. (in Chinese with English abstract)

Optimal nitrogen application rate to ensure cucumber and tomato yield with drip irrigation in greenhouse and to reduce soil salinity and nitrate residue

Wang Liying^{1,2}, Wu Xueping³, Zhang Yancai², Li Ruonan², Chen Lili², Chen Qing^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Institute of Agricultural Resource and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China;

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

Abstract: In traditional irrigation and fertilization practices, excessive water and fertilizers often cause soil salinity accumulation in greenhouse vegetable production. Drip irrigation is one of methods to accurately supply water and nutrient in root zone to meet crop needs. To determine effects of N application rate on soil NO_3^- -N, soil electrical conductivity (EC), yield and root dry matter in greenhouse cucumber and tomato rotation, six-season experiments were conducted with drip irrigation under plastic film in greenhouse from 2008 to 2010. The experiment site was Mazhuang Experiment Station ($37^\circ 18' \text{ N}$, $115^\circ 28' \text{ E}$) in Xinji city, Hebei province, China. Five treatments of no N fertilizer (NN), manure N (MN), optimal N (RN), high N (HN) and traditional N (CN) with 3 replicates each were designed. Chicken manure application rate (30 t/hm^2) was applied only before cucumber season in 2008. The chemical N application rate was 0, 300, 600, 900 kg/hm^2 in winter-spring cucumber season and 0, 225, 450, 675 kg/hm^2 in fall-winter tomato season for NN, RN, HN, and CN, respectively. The yield, root dry matter, soil NO_3^- -N, and EC were measured. The results showed that soil NO_3^- -N and EC were significantly increased with the increase of N rate. The CN treatment accelerated and increased the soil NO_3^- -N accumulation and soil salinity. During the 3 cucumber and tomato rotations, the average soil NO_3^- -N content of RN, HN, and CN treatments was 176.9, 346.6, and 500.8 kg/hm^2 , respectively. The content of CN treatment was 2.83 times as high as RN ($P < 0.05$). In cucumber season, soil NO_3^- -N accumulation of RN, HN and CN treatments were -1.87, -49.61, and -3.52 kg/hm^2 , respectively, but 74.89, 225.23, 343.15 kg/hm^2 in tomato season, respectively. The CN treatment was 4.58 times as high as RN ($P < 0.05$). After 3 rotations, soil NO_3^- -N residual of RN, HN, and CN treatment was 219.1, 526.9, 1028.9 kg/hm^2 higher than before experiment, and increased by 73.0, 175.6, 339.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in each rotation. The CN treatment was 4.65 times as high as RN ($P < 0.05$). After 3 rotations, soil EC of NN, MN, RN, HN, and CN treatment were 433.8, 681.5, 824.5, 927.5, 1120 $\mu\text{S/cm}$, respectively. Soil EC of RN, HN, and CN treatment was significantly higher than MN and NN treatment ($P < 0.05$). Soil EC of CN treatment was 1.15, 1.29, 1.40, 1.36 ($P < 0.05$) times as that of RN after season of tomato in 2008, cucumber in 2009, tomato in 2009 and 2010, respectively. Soil EC was decreased significantly in RN treatment compared to CN treatment, indicating optimal N management decreased the risks of soil secondary salinization. During each rotation, there were 2 key periods for soil NO_3^- -N and soil EC rapid accumulation: 1) in the summer from early July to early August, and 2) early September to middle November in fruiting period of Fall-winter tomato. In sum, the optimal N rate reduced N application rate by 66.7%, decreased soil nitrate residue and soil electrical conductivity significantly, but kept the tomato and cucumber yields as high as the other high and traditional N application rate treatments. These results provide valuable information for fertigation regime in cucumber and tomato rotation of greenhouse.

Key words: greenhouses; nitrogen fertilizers; soils; nitrate nitrogen; electrical conductivity; root dry matter