

滴灌氮肥用量对设施菜地硝态氮含量及环境质量的影响

李若楠², 武雪萍^{1*}, 张彦才², 王丽英², 李孝兰³, 陈丽莉², 翟凤芝²

(1 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, 北京 100081;

2 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051; 3 河北黄骅市农业局土肥站, 黄骅 061100)

摘要:【目的】滴灌施肥较传统施肥更为精准的将肥水输送至作物的根区, 减少肥料的用量, 降低土壤水分和养分深层渗漏带来的环境风险。本试验研究滴灌管理下不同氮肥(N)用量对设施菜地供氮能力及环境质量的影响, 以期获得滴灌水肥一体化管理条件下最佳施氮用量。【方法】采用日光温室冬春茬黄瓜-秋冬茬番茄轮作, 共设计4个化肥氮用量梯度(N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3), 对应冬春茬黄瓜季施氮0、300、600、900 kg/hm²; 秋冬茬番茄季施氮0、225、450、675 kg/hm²。3年定位研究比较不同氮用量下0—100 cm土体硝态氮、电导率($EC_{5:1}$)、pH动态变化, 计算了各施氮水平下设施蔬菜生产的氮素表观平衡、氮肥利用率和经济效益。【结果】随着种植年限的延长, N_2 和 N_3 处理0—100 cm土体硝态氮和盐分积累显著, 土壤硝态氮含量分别由2008年黄瓜季季平均14.4~31.1和14.9~41.0 mg/kg增至2010年番茄季季均76.4~119.8和129.0~184.5 mg/kg, 分别增加了1.9~5.1和3.5~7.7倍; 两处理 $EC_{5:1}$ 分别由2008年黄瓜季季平均379.6~514.3和407.0~476.7 $\mu S/cm$ 增至2010年番茄季季平均663.0~1212.4和710.0~1359.6 $\mu S/cm$, 分别增加了0.3~1.8和0.5~2.0倍。与 N_2 和 N_3 处理相比, N_1 处理节氮50%~66.7%, 经过三年的种植0—100 cm土层季均硝态氮含量和 $EC_{5:1}$ 分别下降了35.5%~67.4%和6.0%~25.2%, pH增加0.06~0.18, 氮肥利用率显著增加9.0~13.8个百分点, 而种植蔬菜的经济效益未有显著下降。【结论】温室滴灌冬春茬黄瓜-秋冬茬番茄经济施氮量分别为N 300和225 kg/hm², 既能保证3年5季蔬菜根层(0—60 cm)土层硝态氮处于相对适宜水平, 具有较好的经济和环境效益。

关键词: 蔬菜; 施氮量; 土壤硝态氮含量; $EC_{5:1}$; pH

中图分类号: S625.5⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)06-1642-10

Nitrate nitrogen contents and quality of greenhouse soil applied with different N rates under drip irrigation

LI Ruo-nan², WU Xue-ping^{1*}, ZHANG Yan-cai², WANG Li-ying², LI Xiao-lan³, CHEN Li-li², ZHAI Feng-zhi²

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/

National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China;

2 Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences,

Shijiazhuang 050051, China; 3 Huanghua Soil and Fertilizer Technology Guidance Station, Huanghua, Hebei 061100, China)

Abstract: 【Objectives】Drip irrigation could effectively inhibit nutrient leakage as water and nutrients can be accurately sent to close the crop root zone. In this paper, the soil mineral N contents and environmental qualities were detected under different N rates and drip irrigation, to provide a base for efficient N management in vegetable production. 【Methods】A three-years' field experiment was conducted with winter-spring cucumber and autumn-winter tomato double cropping system in a greenhouse. Four N rates were applied as 0, 300, 600, 900 kg/hm² for cucumber and 0, 225, 450, 675 kg/hm² for tomato under drip irrigation (correspondingly recorded as N_0 , N_1 ,

收稿日期: 2015-06-23

接受日期: 2015-09-06

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAD22B03); 863 课题(2013AA102901); 公益性行业(农业)科研专项(201203077); 河北省农林科学院科学技术研究与发展计划项目(A2015130101)资助。

作者简介: 李若楠(1981—), 女, 河北冀县人, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事蔬菜营养与施肥技术研究。E-mail: liruonan2004@163.com

张彦才与第一作者同等贡献。 * 通信作者 E-mail: wuxueping@caas.cn

N_2 , N_3). The mineral nitrogen contents, salinity ($EC_{5:1}$) and acidity (pH) of 0–100 cm soil depth were investigated, and the economic and environmental efficiencies of N were calculated. **【Results】** As the elongation of the cropping year, the NO_3^- -N contents under N_2 and N_3 treatments in 0–100 cm soil profile were significantly increased from 14.4–31.1 and 14.9–41.0 mg/kg in cucumber season in 2008, respectively, to 76.4–119.8 and 129.0–184.5 mg/kg in tomato season in 2010, respectively, increased by 0.3–1.8 and 0.5–2.0 times respectively. The electrical conductivity ($EC_{5:1}$) of 0–100 cm soil profile under N_2 and N_3 was significantly increased from 379.6–514.3 and 407.0–476.7 $\mu S/cm$, respectively, to 663.0–1212.4 and 710.0–1359.6 $\mu S/cm$ of tomato season in 2010, respectively, increased by 0.3–1.8 and 0.5–2.0 times. The N rates in N_1 was 33.3%–50% of N_2 and N_3 . Compared with N_2 and N_3 , the NO_3^- -N content and $EC_{5:1}$ of N_1 decreased by 35.5%–67.4% and 6.0%–25.2% after three years cultivation, and the pH and NUE increased by 0.06–0.18 unit and 9.0–13.8 percentage points. **【Conclusions】** Under this condition, the proper N rate for winter-spring cucumber and autumn–winter tomato was recommend as N 300 and 225 kg/hm². In most crop seasons (5 seasons), the NO_3^- -N contents in 0–60 cm depth were in the proper range for cucumber and tomato growth, and no significant accumulation of NO_3^- -N was observed below 60 cm in the soil under this recommended N rate.

Key words: vegetable; N rate; NO_3^- -N content; $EC_{5:1}$; pH

中国是蔬菜生产大国,2012 年蔬菜产量和产值分别占世界的 59.3% 和 55.5%^[1]。设施蔬菜栽培在一些地区已经成为农业生产的支柱产业,更是农民增收的重要途径。然而,中国设施蔬菜生产起步较晚,设施生产标准化程度低。近些年,施肥对设施蔬菜产量的贡献越来越小,而对于环境的负面影响却与日俱增。很多研究显示随着设施种植年限的增加,菜地电导率(EC)逐渐升高,土壤出现次生盐渍化问题^[2–3]。黄绍文等^[4]对全国 633 个设施土样调查发现温室和大棚土壤平均 $EC_{5:1}$ 分别为 523.6 $\mu S/cm$ 和 540.1 $\mu S/cm$,高于蔬菜正常生长 $EC_{5:1}$ 临界值(600 $\mu S/cm$)的土样接近总数的 30%。甘肃石羊河流域日光温室各土层平均土壤硝态氮含量和 EC 值分别为露地粮田的 1.2~3.3 倍和 0.7~3.2 倍,耕层以下土壤硝态氮含量和 EC 值随种植年限延长而增加^[5]。袁丽金等^[6]调查发现河北定州 0—200 cm 和 0—400 cm 设施土壤速效养分累积均高于对照农田,低龄棚和老龄棚硝态氮含量分别为 377.2 和 629.1 mg/kg。积累在土壤中的硝态氮随灌水向土壤深层淋失,污染地下水体。刘兆辉等^[7–8]对山东寿光设施菜地研究显示硝态氮在土壤剖面中淋洗下移明显,下移前锋已到达 5—6 m 处,土壤具有明显的酸化现象。河北省蔬菜高产区土壤硝态氮含量与地下水硝酸盐含量呈极显著正相关^[9]。袁金丽等^[6]对河北定州设施蔬菜栽培区地下水硝酸盐含量调查显示,表层地下水受硝态氮污染严重,超标率和严重超标率为 39.3% 和 7.1%,而深层地下水硝态氮含量超标率为 37.5%。在天津

种植年限超过 10 年的设施蔬菜地下水硝酸盐含量已经达到 149.1 mg/L^[10]。

日光温室传统的大水大肥种植习惯是造成温室土壤养分和盐分累积的主要原因^[5]。巨晓棠等^[11]研究认为就全国而言特别是在蔬菜和果树等经济作物上,过量施氮(N)现象还相当普遍。在山东寿光典型温室蔬菜生产基地,年氮肥平均投入量高达 4088 kg/hm²,蔬菜氮素吸收量仅占氮肥投入量的 24%^[12]。河北设施黄瓜和番茄生产化肥平均投入氮 1269.0 kg/hm² 和 996.0 kg/hm²,有机肥平均投入氮 3427.5 kg/hm² 和 2301.0 kg/hm²^[13]。滴灌能较为精准的将肥水施入作物根区,有效降低土壤水分和养分的深层渗漏,从而显著降低肥水用量,提高肥水利用效率。本试验在日光温室冬春茬黄瓜—秋冬茬番茄轮作下,三年定位研究滴灌不同化肥氮用量对 0—100 cm 土体硝态氮、 $EC_{5:1}$ 、pH 动态变化的影响,综合分析各氮素水平下蔬菜生产的环境效益和经济效益,以期获得滴灌管理下的最佳氮肥用量,为设施蔬菜生产减氮节水增效提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于河北省辛集市马庄试验站新建日光温室。该地属于暖温带半湿润大陆季风气候,年平均气温 11.5℃,年平均降雨量为 540 mm。温室长为 40 m,宽为 7.5 m,表面覆聚乙烯棚膜。供试土壤为壤质潮土,0—20 cm 土层基础土壤理化性质为:有机质 15.0 g/kg、Olsen-P 82.9 mg/kg、速效钾 60.0 mg/kg、

pH 8.1(水土比为 2.5:1, 25℃)、 $EC_{5:1}$ 307.4 $\mu S/cm$ (水土比 5:1, 25℃)土壤容重 1.35 g/cm^3 和田间持水量 25.1%。0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土壤硝态氮含量分别为 5.5、4.2、7.5、25.8、34.6 mg/kg , 对应铵态氮含量分别为 19.4、10.3、9.7、9.5、9.0 mg/kg 。

1.2 试验设计

试验始于 2008 年 2 月,采用该区域典型的冬春茬黄瓜-秋冬茬番茄轮作制度。试验共设 4 个化肥氮用量 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 ,对应冬春茬黄瓜季分别施用氮 0、300、600、900 kg/hm^2 ,秋冬茬番茄季分别施用氮 0、225、450、675 kg/hm^2 。各处理磷肥和钾肥用量一致,冬春茬黄瓜 $P_2O_5-K_2O$ 用量为 300—525 kg/hm^2 ,秋冬茬番茄 $P_2O_5-K_2O$ 用量为 225—450 kg/hm^2 。

试验为随机区组设计,小区面积 10.8 m^2 (宽 1.8 m×长 6 m),各处理设计 3 次重复。采用膜下滴灌方式,保持生育期根层土壤含水量在田间持水量的 75%—90%,土壤含水量由安装在小区内的 TDR 进行监测。为防止小区之间土壤养分相互干扰,试验开始前保持原状土,在小区四周开挖宽 10 cm、深 100 cm 的沟槽,放入 4 mm PVC 板制成的塑料隔断(PVC 板衔接处涂 PVC 胶并用铆钉固定);隔断上缘高出土面 5 cm,周围用相应层次的土回填。

1.3 供试肥料品种与施肥方法

供试化学氮、磷、钾肥分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)和硫酸钾(含 K_2O 51%)。20%氮肥、100%磷肥和 40%钾肥基施入土,余下肥料冬春茬黄瓜季分 8~10 次滴入土壤,秋冬茬番茄季分 4~6 次滴入土壤。灌溉依据土壤含水量、蔬菜生育期和天气情况进行调控。2008~2010 年冬春茬黄瓜总灌水量在 342~417 mm,秋冬茬番茄总灌水量在 126~135 mm。

1.4 蔬菜种植与管理

供试黄瓜品种为博美 11 号,番茄品种为金棚 1 号,为当地代表性品种。种子先在苗棚中培养至 3~5 叶龄后,按照每小区 60 株定植。冬春茬黄瓜定植时间为 2008 年 2 月 18 日、2009 年 2 月 27 日、2010 年 2 月 20 日,对应拉秧时间为 2008 年 7 月 8 日、2009 年 7 月 4 日、2010 年 7 月 7 日。秋冬茬番茄定植时间为 2008 年 8 月 12 日、2009 年 8 月 10 日、2010 年 9 月 1 日,对应拉秧时间为 2008 年 12 月 31 日、2009 年 12 月 27 日、2010 年 2 月 14 日。每小区每次果实采摘记录产量。试验由具有蔬菜栽培经验的技术人员进行日常管理。

1.5 样品采集与测试

各小区选取 5 株植株记录全生育期管理打下叶片干重。各小区采收期选取商品果实 60℃ 烘干测定水分含量。拉秧期各小区选取两株有代表性样品,分根、茎、叶烘干测定干物重。根、茎、叶、果实干样研磨成粉测定全氮含量。在蔬菜生长关键生育期,以 20 cm 为间隔取 0—100 cm 土壤样品,每小区取 5 钻制备混合样,鲜样测定硝态氮,样品风干后测定 $EC_{5:1}$,拉秧期土壤样品测定 pH。具体取土样日期为:2008—3—12、2008—4—7、2008—5—24、2008—7—8、2008—9—18、2008—10—20、2008—12—15、2009—3—30、2009—5—18、2009—7—4、2009—9—18、2009—11—5、2009—12—27、2010—4—1、2010—5—20、2010—6—13、2010—7—7、2010—10—22、2010—11—16 和 2011—1—18。取样留下的钻孔用保护区土壤回填,防止灌水追肥养分下渗。植株全氮用硫酸-过氧化氢消煮蒸馏定氮法测定;土壤硝态氮采用 2 mol/L KCl 浸提 1h,采用紫外分光光度法测定;土壤 $EC_{5:1}$ 采用水土比 5:1,电导率仪测定;土壤 pH 值采用水土比 2.5:1, pH 计测定^[14]。

1.6 数据处理与统计方法

氮素表观平衡、氮肥利用率和经济效益计算公式如下:

氮素表观平衡 = 施氮量 - 作物氮素吸收量
上式未考虑氮素损失。灌水采用深井水,硝态氮和全氮未检测出。

氮肥利用率 = (施氮处理作物氮素吸收量 - 不施氮处理作物氮素吸收量) / 施氮量 × 100

经济效益 = 作物产量 × 价格 - 肥料用量 × 价格 - 灌水量 × 价格 - 农药费用

式中,黄瓜、番茄、化肥 N、 P_2O_5 和 K_2O 的价格分别按照 2.0、3.0、5.0、5.0、7.6 yuan/kg;灌水费用按照灌溉 1 m^3 水需消耗 1 度电,约花费 0.5 元计算;农药费用按照每季 1 万元/ hm^2 计算。

数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 8.0 软件进行统计分析,等值线图采用 Surfer 8.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 温室菜田土壤硝态氮动态变化

随着种植年限的延长,低量氮肥处理(N_1)蔬菜根区硝态氮含量显著增加(图 1),0—60 cm 土体硝态氮含量由 2008 年黄瓜季季均 12.2~17.1 mg/kg 增至 2010 年番茄季季均 42.3~61.4 mg/kg ,增加

了 0.5~2.6 倍。中量(N_2)和高量(N_3)施氮处理土壤硝态氮呈显著积累态势(图 1);在 0—100 cm 土体, N_2 和 N_3 处理土壤硝态氮含量分别由 2008 年黄瓜季季均 14.4~31.1 和 14.9~41.0 mg/kg,增至 2010 番茄季季均 76.4~119.8 和 129.0~184.5 mg/kg,分别增加了 1.9~5.1 倍和 3.5~7.7 倍,两个种植季间硝态氮含量差异显著。

在 3 年中,各施氮处理(N_1 、 N_2 和 N_3)0—20、20—40、40—60、60—100 cm 土层季均硝态氮含量

分别从 2008 年黄瓜季、2008 年番茄季、2009 年黄瓜季和 2010 年黄瓜季开始呈现显著差异。经过 3 年的种植(2010 年番茄收获后), N_2 、 N_3 处理 0—100 cm 土体硝态氮含量分别达 N_1 处理的 1.4~3.0 倍和 2.1~4.5 倍。在中、高量施氮处理下,番茄季土壤硝态氮积累状况较黄瓜季严重, N_3 处理在 2010 年番茄季内 0—20 cm 硝态氮含量达 263.4 mg/kg,为各处理 3 年内最高,随后表层积累的硝态氮呈现向土壤深层迁移的趋势。

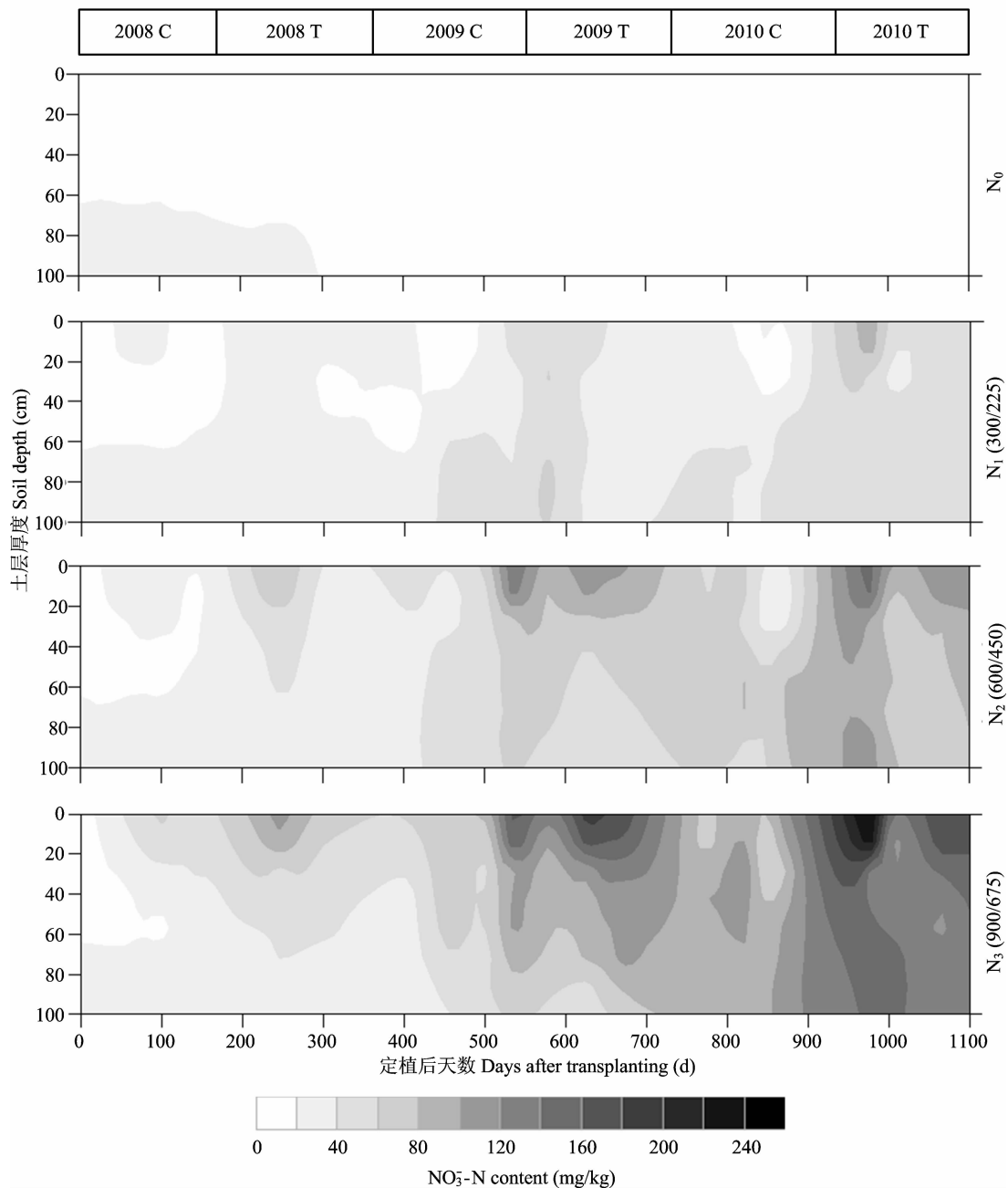


图 1 滴灌化肥氮用量对 0—100 cm 土壤 NO_3^- -N 含量的影响

Fig. 1 Dynamics of NO_3^- -N contents affected by different N rates in 0–100 cm soil profile

[注 (Note): C—黄瓜季 Cucumber growing season; T—番茄季 Tomato growing season]

2.2 温室菜田土壤电导率动态变化

随着种植年限的延长,4 个处理土壤均出现不同程度次生盐渍化倾向,以中、高量施氮处理土壤盐渍化程度最重(图 2)。N₀、N₁、N₂、N₃ 处理 0—100 cm 土体 EC_{5:1} 由 2008 年黄瓜季季均 331.1 ~ 503.3、368.5 ~ 506.5、379.6 ~ 514.3、407.0 ~ 476.7 μS/cm,增至 2010 年番茄季季均 478.3 ~ 723.1、636.3 ~ 1071.0、663.0 ~ 1212.4、710.0 ~

1359.6 μS/cm,分别增加了 0.03 ~ 1.0、0.3 ~ 1.9、0.3 ~ 1.8、0.5 ~ 2.0 倍;其中 N₀ 处理 0—40 cm 土壤 EC_{5:1} 升高显著,N₁ 和 N₂ 处理 0—60 cm 土壤 EC_{5:1} 显著升高,而 N₃ 处理 0—100 cm 土体 EC_{5:1} 均显著升高。各处理均以表层 0—20 cm 土壤 EC_{5:1} 增加最为显著。对应 4 个处理(N₀、N₁、N₂ 和 N₃)0—20 cm 土层 EC_{5:1} 年均增幅分别达 91.4、172.4、206.7、257.3 μS/cm。

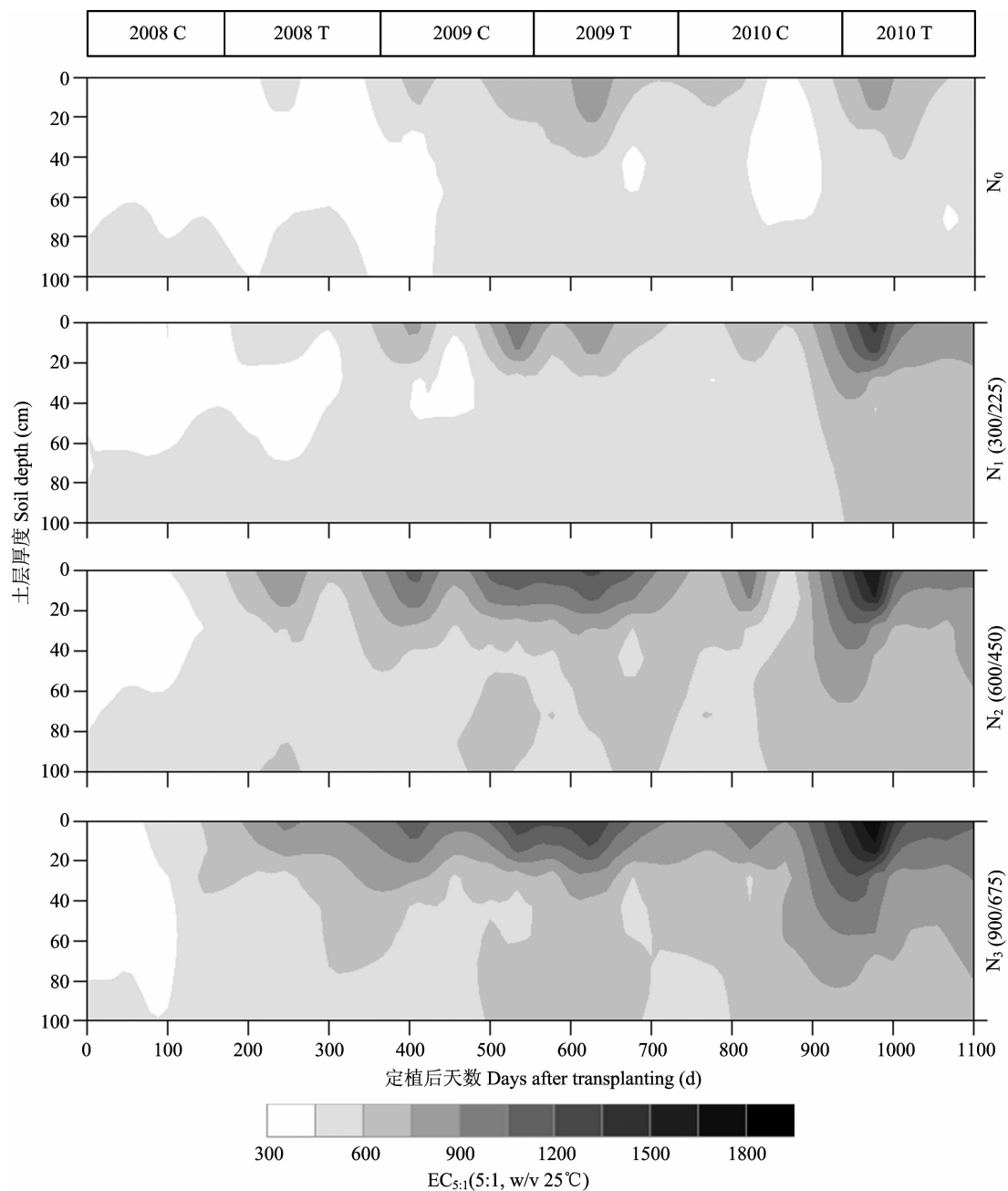


图 2 滴灌化肥氮用量对 0—100 cm 土壤 EC_{5:1} 的影响

Fig. 2 Dynamics of EC_{5:1} affected by different N rates in 0–100 cm soil profile

[注 (Note): C—黄瓜季 Cucumber growing season; T—番茄季 Tomato growing season]

在3年中, N_2 、 N_3 处理0—100 cm土体 $EC_{5:1}$ 分别为 N_1 处理的0.8~1.8、0.8~2.2倍;从2008年番茄季至2009年番茄季, N_2 、 N_3 处理与 N_1 处理0—20 cm土层季均 $EC_{5:1}$ 差异显著。进入2010番茄季, N_3 处理 $EC_{5:1}$ 达到三年最高值1836.2 $\mu S/cm$,但是处理间季均 $EC_{5:1}$ 差异趋于减小而不显著。

2.3 温室菜田土壤 pH 变化

随着种植年限的延长,0—40 cm土体pH值逐渐降低(图3)。在黄瓜季,各处理2010年收获后0—40 cm土体pH值较2008年有所下降,其中 N_2 和 N_3 处理pH值下降显著;在番茄季,各处理2010年收获后0—40 cm土体pH值较2008年也呈降低趋势,但仅 N_3 处理0—20 cm土层pH值显著下降。

综合3年,在0—20 cm土层,2010年番茄收获后土壤pH值较2008年黄瓜季显著下降, N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 处理土壤pH值年均降幅分别达0.11、0.15、0.16、0.21;对应20—40 cm土层pH值年均降幅分别达0.09、0.14、0.15、0.16。

从2008年番茄季开始,施氮导致的土壤pH值下降逐渐显现;在5季中, N_1 、 N_2 、 N_3 较 N_0 处理0—40 cm土壤pH值分别下降了0.03~0.22、0.06~0.23、0.13~0.30,其中大部分种植季 N_3 与 N_0 处理pH值差异显著(仅除2009年黄瓜季20—40 cm土层外);5季中, N_3 处理较 N_1 处理土壤pH值下降了0.03~0.18,但是两处理仅在2009年黄瓜季和2010年番茄季0—20 cm土层pH差异显著。

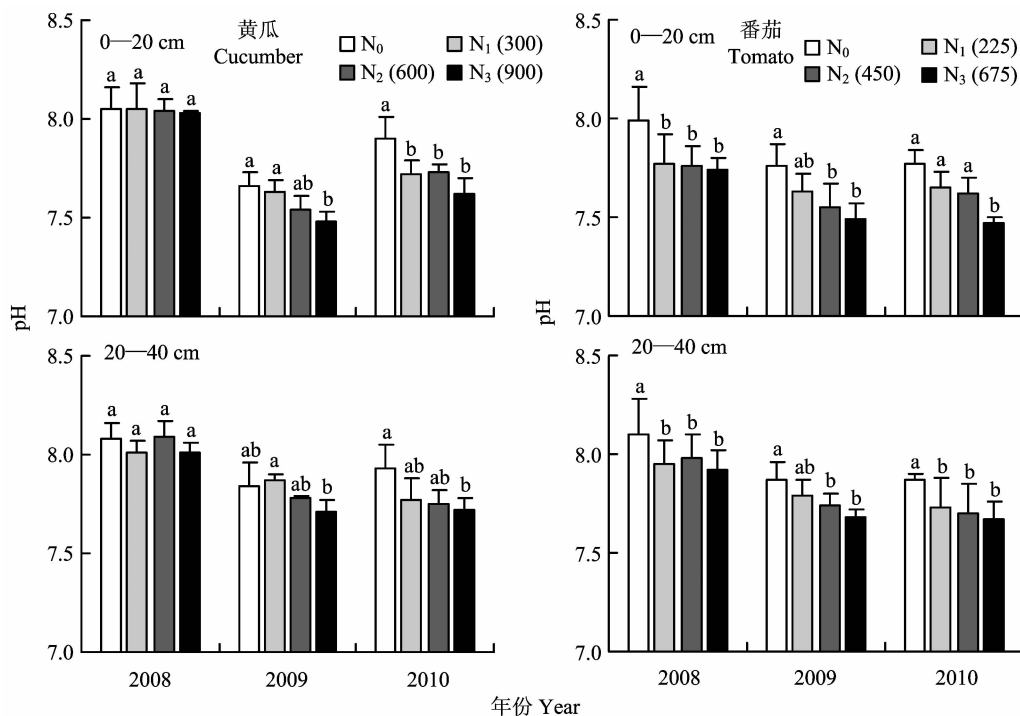


图3 滴灌化肥氮用量对蔬菜根层0—40 cm土壤pH的影响

Fig.3 pH affected by different N rates in 0—40 cm soil depths

2.4 温室蔬菜生产氮肥利用率和经济效益

N_1 处理土壤氮素输入与输出基本平衡(表1),但是中、高量施氮处理氮素表观盈余显著增加,三年 N_2 和 N_3 处理氮素表观盈余量分别达1335.3和2946.1 kg/hm^2 。 N_1 处理氮肥利用率显著高于 N_3 处理,综合3年 N_1 处理氮肥利用率较 N_2 和 N_3 处理提高了9.0~13.8个百分点。种植黄瓜番茄3年实现经济效益182.0~188.7 $\times 10^4$ yuan/ hm^2 ,而各施氮处理经济效益未有显著差异。

3 讨论

3.1 化肥氮用量对土壤硝态氮供应的影响

很多研究均显示随着施氮量的增加,土壤剖面硝态氮累积量增加,土壤氮素淋失加剧^[15-18]。由于黄瓜主根系集中于0—40 cm土层^[19],番茄根系较深可达到60 cm土层^[20],因此60 cm以下土体累积的硝态氮很难被利用,环境风险大大增加。在本试验中,中、高量施氮(N_2 和 N_3)处理即使采用滴灌

表 1 滴灌化肥氮用量对温室蔬菜种植氮肥利用率和经济效益的影响

Table 1 The N use efficiency and economic benefits affected by different N rates under greenhouse vegetable production

项目 Item	蔬菜 Vegetable	种植季 Year	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃
氮素表观平衡 Apparent N balance (N kg/hm ²)	黄瓜 Cucumber	2008	-378.7 ± 35.9 d	-148.3 ± 14.1 c	168.2 ± 29.8 b	502.1 ± 18.6 a
		2009	-322.3 ± 10.3 d	-137.3 ± 48.9 c	176.9 ± 7.4 b	474.7 ± 38.6 a
		2010	-206.8 ± 22.2 d	-4.6 ± 44.5 c	252.3 ± 23.4 b	536.7 ± 66.2 a
	番茄 Tomato	2008	-187.3 ± 21.8 d	25.0 ± 16.9 c	225.1 ± 24.9 b	454.1 ± 3.6 a
		2009	-159.3 ± 23.6 d	29.2 ± 23.6 c	256.3 ± 23.6 b	501.7 ± 23.6 a
		2010	-177.9 ± 12.4 d	46.4 ± 14.5 c	256.4 ± 21.1 b	476.9 ± 15.7 a
氮肥利用率 N use efficiency (%)	黄瓜 Cucumber	2008	—	23.2 ± 4.7 a	8.8 ± 5.0 b	2.1 ± 2.1 c
		2009	—	23.9 ± 3.6 a	11.6 ± 3.4 b	6.3 ± 2.5 b
		2010	—	24.6 ± 6.5 a	13.6 ± 3.5 ab	8.1 ± 2.3 b
	番茄 Tomato	2008	—	15.7 ± 3.9 a	8.6 ± 5.9 b	3.4 ± 3.5 c
		2009	—	22.3 ± 4.7 a	10.8 ± 3.6 b	5.4 ± 1.8 b
		2010	—	21.1 ± 6.0 a	12.1 ± 2.5 ab	7.3 ± 2.0 b
经济效益 Economic benefit (× 10 ⁴ yuan/hm ²)	黄瓜 Cucumber	2008	37.7 ± 1.1 a	37.4 ± 0.1 a	37.7 ± 1.3 a	38.0 ± 1.2 a
		2009	31.3 ± 2.2 a	33.7 ± 2.4 a	33.0 ± 0.8 a	31.7 ± 0.5 a
		2010	20.5 ± 3.0 b	28.7 ± 2.1 a	29.6 ± 1.4 a	28.5 ± 1.6 a
	番茄 Tomato	2008	41.5 ± 4.2 a	38.0 ± 2.8 b	38.7 ± 2.8 ab	37.8 ± 1.7 b
		2009	25.8 ± 2.8 a	23.9 ± 4.2 ab	24.4 ± 2.2 ab	22.1 ± 2.5 b
		2010	25.7 ± 2.7 a	25.9 ± 3.4 a	25.2 ± 1.8 a	23.9 ± 2.7 a

注 (Note): 同行数字后不同字母代表处理间差异达到 5% 显著水平 Data followed by different letters in a row indicate significant differences between treatments at the 5% level.

管理,60 cm 以下土壤硝态氮仍出现显著积累,这与表层土壤硝态氮大量盈余有关。毕晓庆等^[17]研究表明设施滴灌栽培番茄当施氮量大于 270 kg/hm²时,土壤表层硝态氮含量显著增加。本研究与前人结果一致。章明清等^[21]研究显示,菜田土壤氮淋失临界指标为 NO₃⁻-N 76.3 mg/kg。本试验中,N₃ 处理从 2009 年番茄季 40—60 cm 土体硝态氮含量即超过该值,N₂ 处理进入 2010 黄瓜季后 40—60 cm 土体硝态氮含量接近该值。加之试验中蔬菜定植水量和缓苗水量按农民常规管理进行,此时可能造成了硝态氮的显著淋失。此外,该结果还可能跟单施化肥导致土壤结构退化有关。沈灵凤等^[15]和廉晓娟等^[22]研究显示,单施化肥较单施有机肥、有机无机肥配施更易造成土壤硝态氮淋溶并在深层累积。长期定位研究表明,单施化肥导致土壤腐殖质“老化”,分子缩合度和芳构化度增大,不利于土壤养分的有效性转化^[23]。

黄绍文等推荐适宜蔬菜生长的土壤硝态氮含量为 50 ~ 100 mg/kg^[4]。《中国主要作物施肥指南》

中给出适宜黄瓜和番茄生长的土壤硝态氮含量为 100 ~ 140 kg/hm²,约在 25.0 ~ 40.0 mg/kg^[24]。在低量施氮处理(N₁)下,大部分种植季(5 季)0—60 cm 土层硝态氮处于“指南”推荐适宜水平,60—100 cm 土层硝态氮未出现明显积累,氮肥利用率显著增加,而种植蔬菜经济效益未出现显著下降,具有较好的经济和环境效益。多数研究也表明,减量施氮能显著降低设施菜田土壤氮素淋失量^[25-27]。综合考虑经济效益响应、土壤养分供应状况、盐渍化水平和酸化程度等因素,推荐在与本试验条件接近的温室,滴灌冬春茬黄瓜-秋冬茬番茄经济施氮量为 300 ~ 225 kg/hm²。该结果与张学军等基施有机肥下滴灌秋冬茬番茄实现 70 ~ 120 t/hm² 产量,推荐氮肥用量在 100 ~ 150 kg/hm² 较为接近^[28]。但是较“指南”上的推荐施氮量偏低,主要是因为滴灌管理显著降低土壤氮素淋洗,同时供试土壤矿化供氮量偏高。N₁ 处理 3 年氮肥用量与作物氮素吸收量基本平衡,0—60 cm 土壤硝态氮逐年缓慢增加,说明在该试验条件下土壤氮素矿化量高于淋失量。由于深

井水灌溉带入氮量极小,根据 N_0 处理作物吸氮量推断土壤氮素年矿化量在 $N\ 385.0 \sim 566.0\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 高于设施番茄连作土壤氮年矿化量 $N\ 125\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 及设施黄瓜连作土壤净矿化量 $N\ 129.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 的估值^[28-29],这与蔬菜种植茬口、土壤基础肥力等因素的差异有关。

3.2 化肥氮用量对设施菜地环境质量的影响

黄瓜和番茄对盐渍化土壤较为耐受,耐盐临界值 $EC_{5:1}$ 约为 $600\ \mu\text{S}/\text{cm}$,当 $EC_{5:1}$ 超过 $900\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 时出现严重毒害^[4,30]。但是也有研究表明,保证黄瓜果实产量的土壤 $EC_{5:1}$ 临界值为 $2000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ^[31]。在本试验过量施氮处理(N_2 和 N_3)下,0—20 cm 土层季均 $EC_{5:1}$ 在 2008 年番茄季即超过 $600\ \mu\text{S}/\text{cm}$,2009 年黄瓜季即超过 $900\ \mu\text{S}/\text{cm}$,从而导致经济效益逐年下降。由于过量施用化学氮肥加重了土壤次生盐渍化程度,可见 NO_3^- 是导致设施土壤次生盐渍化的重要离子。有研究显示设施菜地硝酸盐型次生盐渍化表层土壤硝酸盐含量与 EC 之间呈显著正相关关系^[31]。然而,本试验 N_0 处理土壤 $EC_{5:1}$ 值也呈逐年增加趋势,0—20 cm 土层季均 $EC_{5:1}$ 在进入 2009 年黄瓜季后也超过 $600\ \mu\text{S}/\text{cm}$,表明设施土壤次生盐渍化并非单由过量施氮所致。除 NO_3^- 外, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 等也是影响设施土壤盐分含量的主要离子^[2, 32-34]。 N_0 处理 $EC_{5:1}$ 的升高还可能与长期单施化肥导致土壤对离子的吸附交换能力下降有关。

设施土壤酸化与不合理施氮有关。陆扣萍等^[18]的研究显示过量的氮肥投入导致大棚土壤 pH 迅速下降。有研究表明设施土壤硝态氮及碱解氮含量与 pH 值呈极显著负相关关系^[15, 35]。本试验中过量施用氮肥加快了土壤酸化的速度,3 年 N_3 处理 0—40 cm 土层 pH 由 $8.10 \sim 8.15$ 降至 $7.47 \sim 7.67$,此时土壤 H^+ 浓度较基础土增加了 $2.0 \sim 3.3$ 倍。由于北方旱地土壤通气状况良好,施用氮肥导致的土壤酸化可能与尿素水解产物 NH_4^+ 的硝化作用有关。1 个 NH_4^+ 在硝化细菌的作用下将产生两个 H^+ ^[36]。此外尿素水解产生的 CO_2 溶于土壤溶液后电离也会产生 H^+ 。由于 H^+ 与土壤离子颗粒表面的结合力较 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 强, H^+ 浓度的增加可能导致这些离子从土壤表层淋失^[37]。但是,本试验 N_0 处理土壤 pH 值也呈逐年下降趋势,说明设施土壤酸化与次生盐渍化一样都是多因素共同调控的结果。由于设施栽培复种指数高,每年作物从土壤中带走大量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子,这可能是 N_0 处理土

壤酸化的重要原因。此外,过磷酸钙、作物根系分泌 H^+ 都是土壤 H^+ 的来源。

4 结论

本试验在滴灌条件下,随着种植年限的延长,中、高量施氮(N_2 和 N_3)处理 0—100 cm 土体硝态氮和盐分显著积累。与中、高量施氮处理相比,低量施氮(N_1)处理节氮 $50\% \sim 66.7\%$,经过 3 年的种植能显著降低 0—100 cm 土层季均硝态氮含量和 $EC_{5:1}$,同时氮肥利用率显著增加。该处理在 3 年中的 5 季菜地 0—60 cm 土层硝态氮处于相对适宜水平,而种植蔬菜具有较好的经济和环境效益。在本试验条件下,推荐温室滴灌冬春茬黄瓜—秋冬茬番茄轮作经济施氮量为 $300\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $225\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。

参考文献:

- [1] Statistics Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT, Crops production database, 2012 [EB/OL]. <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>, 2013-1-1.
- [2] 曾希柏,白玲玉,苏世鸣,等. 山东寿光不同种植年限设施土壤的酸化与盐渍化[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1853-1859.
Zheng X B, Bai L Y, Su S M *et al.* Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City, Shandong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1853-1859.
- [3] Zhang Y C, Li R N, Wang L Y *et al.* Threshold of soil Olsen-P in greenhouses for tomatoes and cucumbers[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41: 2383-2402.
- [4] 黄绍文,王玉军,金继运,等. 我国主要菜区土壤盐分,酸碱性及肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.
Huang S W, Wang Y J, Jin J Y *et al.* Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 906-918.
- [5] 杨慧,谷丰,杜太生. 不同年限日光温室土壤硝态氮和盐分累积特性研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(2): 240-247.
Yang H, Gu F, Du S T. Study on the accumulation characteristics of the soil nitrate nitrogen and salinity in greenhouses of different cultivation years [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(2): 240-247.
- [6] 袁丽金,巨晓棠,张丽娟,等. 设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对地下水的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 14-19.
Yuan L J, Ju X T, Zhang L J *et al.* NPK accumulation in greenhouse soil and its effect on groundwater[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 14-19.

- [7] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 氮, 磷, 钾在设施蔬菜土壤剖面中的分布及移动研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(B09): 537-542.
- Liu Z H, Jiang L H, Zhang W J *et al.* N, P, K distributions and movement in soils for greenhouse and outdoor field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(B09): 537-542.
- [8] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303.
- Lu Z H, Jiang L H, Zhang W J *et al.* Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 296-303.
- [9] 王凌, 张国印, 孙世友, 等. 河北省蔬菜高产区分肥施用对地下水硝态氮含量的影响[J]. 河北农业科学, 2008, 12(10): 75-77.
- Wang L, Zhang G, Sun S Y *et al.* Effect of fertilization on nitrate-N concentration of groundwater in high-yielding vegetable land of Hebei Province[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(10): 75-77.
- [10] 高伟, 朱静华, 高宝岩, 等. 天津市设施蔬菜不同种植年限土壤及地下水养分特征[J]. 华北农学报, 2010, 25(2): 206-211.
- Gao W, Zhu J H, Gao B Y *et al.* Characteristic of soil and groundwater nutrient in different age greenhouse vegetable cultivation in Tianjin[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(2): 206-211.
- [11] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状, 问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783-795.
- [12] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514-522.
- Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(3): 514-522.
- [13] 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 Y C, Li Q Y, Zhai C X *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.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- Lu R K. Methods in agricultural soil chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [15] 沈灵凤, 白玲玉, 曾希柏, 等. 施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及pH的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1350-1356.
- Shen L F, Bai L Y, Zheng X B *et al.* Effects of fertilization on NO_3^- -N accumulation in greenhouse soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(7): 1350-1356.
- [16] 姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚, 等. 不同氮肥用量对设施番茄产量, 品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2338-2345.
- Jiang H M, Zhang J F, Yang J C *et al.* Effects of different treatments of nitrogen fertilizer on yield, quality of tomato and soil NO_3^- -N accumulation in vegetable greenhouse[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12): 2338-2345.
- [17] 毕晓庆, 山楠, 杜连凤, 等. 氮肥用量对设施滴灌栽培番茄产量品质及土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2246-2250.
- Bi X Q, Shan N, Du L F *et al.* Effects of nitrogen rates on tomato yield and quality and soil nitrate accumulation under drip irrigation in solar greenhouse[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(11): 2246-2250.
- [18] 陆扣萍, 闵炬, 施卫明, 王海龙. 不同轮作模式对太湖地区大棚菜地土壤氮淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 689-697.
- Lu K P, Min J, Shi W M, Wang H L. Effect of rotation patterns on nitrogen leaching loss from protected vegetable soil in Tai Lake region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 689-697.
- [19] Guo R, Li X, Christie P *et al.* Influence of root zone nitrogen management and a summer catch crop on cucumber yield and soil mineral nitrogen dynamics in intensive production systems[J]. Plant and Soil, 2008, 313(1-2): 55-70.
- [20] 何飞飞, 任涛, 陈清, 等. 日光温室蔬菜的氮素平衡及施肥调控潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 692-699.
- He F F, Ren T, Chen Q *et al.* Nitrogen balance and optimized potential of integrated nitrogen management in greenhouse vegetable system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 692-699.
- [21] 章明清, 姚宝全, 李娟, 等. 福建菜田氮磷积累状况及其淋失潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 148-155.
- Zhang M Q, Yao B Q, Li J *et al.* N and P accumulation status and their leaching potential in vegetable fields in Fujian Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 148-155.
- [22] 廉晓娟, 李明悦, 王艳, 等. 不同氮肥管理条件下设施黄瓜硝态氮淋失量研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(10): 135-139.
- Lian X J, Li M Y, Wang Y *et al.* Study on nitrate-N leaching loss of cucumber in greenhouse under different nitrogen managements[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(10): 135-139.
- [23] 吕家珑, 王旭东. 长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 569-572.
- Lü J L, Wang X D. Effect of long-term single application of chemical fertilizer on soil properties and crop yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 569-572.
- [24] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M].

- 中国农业大学出版社, 2009.
- Zhang F S, Chen X P, Chen Q. The fertilization guide for main crops in China [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [25] 殷冠羿, 胡克林, 李品芳, 等. 不同水肥管理对京郊设施菜地氮素损失及氮素利用效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2403–2412.
- Yin G Y, Hu K L, Li P F *et al.* Nitrogen loss and use efficiency in greenhouse vegetable soil under different water and fertilizer managements[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12): 2403–2412.
- [26] 武其甫. 不同水氮管理下保护地番茄季主要氮素损失研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2011.
- Wu Q F. Studies on the major of nitrogen loss in the protected soil under different nitrogen fertilization and irrigation strategies during tomato growing season [D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [27] 李银坤. 不同水氮条件下黄瓜季保护地氮素损失研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2010.
- Li Y K. Study on the nitrogen loss in the protected soil under different water and nitrogen conditions during cucumber drawing season[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [28] 张学军, 赵营, 陈晓群, 等. 氮肥施用量对设施番茄氮素利用及土壤 NO_3^- -N 累积的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3761–3768.
- Zhang X J, Zhao Y, Chen X Q *et al.* Nitrogen fertilizer effects on N recovery and residual soil NO_3^- -N for greenhouse grown tomato [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3761–3768.
- [29] 孙媛, 胡克林, 邱建军, 等. 不同水肥管理下设施黄瓜地氮素损失及水氮利用效率模拟分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1635–1645.
- Sun Y, Hu K L, Qiu J J *et al.* Simulation and analysis of nitrogen loss, water and nitrogen use efficiencies of greenhouse cucumber under different water and fertilizer managements [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(8): 1635–1645.
- [30] 李宇虹, 陈清. 设施果类蔬菜土壤 EC 值动态及盐害敏感性分析[J]. 中国蔬菜, 2014, (2): 15–20.
- Li Y H, Chen Q. Analysis of soil EC value dynamic and salt sensitivity for facility fruit vegetable [J]. China Vegetables, 2014, (2): 15–20.
- [31] 张金锦, 段增强, 李汛. 基于黄瓜种植的设施菜地土壤硝酸盐型次生盐渍化的分级研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 673–680.
- Zhang J J, Duan Z Q, Li X. The classification study on NO_3^- soil secondary salinization in cucumber-based greenhouse [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 673–680.
- [32] 施毅超, 胡正义, 龙为国, 等. 轮作对设施蔬菜大棚中次生盐渍化土壤盐分离子累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 548–553.
- Shi Y C, Hu Z Y, Long W G *et al.* Effect of crop rotation on ion accumulation in secondary salinization soil of vegetable field in greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 548–553.
- [33] 唐冬, 毛亮, 支月娥, 等. 上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4705–4711.
- Tang D, Mao L, Zhi Y E *et al.* Investigation and canonical correspondence analysis of salinity contents in secondary salinization greenhouse soils in Shanghai suburb [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4705–4711.
- [34] 黄敏, 余婉霞, 李亚兵, 等. 武汉城郊设施菜地土壤 pH 与可溶性盐分的变化规律分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 51–56.
- Huang M, Yu W X, Li Y B *et al.* Variation of pH and soluble salt in greenhouse soil in suburbs of Wuhan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 51–56.
- [35] 曹齐卫, 张卫华, 李利斌, 等. 济南地区日光温室土壤养分的分布状况和累积规律[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 115–124.
- Cao Q W, Zhang W H, Li L B *et al.* Distribution and accumulation characteristics of nutrients in solar greenhouse soil in Jinan, Shandong Province of East China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 115–124.
- [36] 胡霭堂. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- Hu A T. Plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003.
- [37] Plaster E. Soil science and management [M]. New York, U.S. A: Cengage learning, 2013.