

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

殷冠羿¹, 胡克林^{1*}, 李品芳¹, 刘荣豪²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 定量分析不同水肥管理下设施菜地的氮素损失途径及氮素利用效率, 可为合理制订菜地水肥管理措施提供科学依据。2009年在北京市顺义区设施番茄大棚设置了6种水肥管理模式:(1)传统施肥+传统畦灌(N1F1);(2)优化施肥+优化畦灌(N2F2);(3)减量施肥+优化畦灌(N3F2);(4)传统施肥+传统滴灌(N1D1);(5)优化施肥+优化滴灌(N2D2);(6)减量施肥+优化滴灌(N3D2)。利用田间观测数据对EU-Rotate_N模型进行了校验,并计算了各水肥管理下设施菜地的氮素淋失、气体损失和氮素利用效率。结果表明,各处理的土壤氮素淋失量占施肥总量的1%~9%,气体损失占施肥总量的5%~14%,各处理氮素淋失表现为N1F1>N3F2≈N2F2>N1D1>N2D2>N3D2。滴灌处理的淋失量比对应畦灌处理减少了72%~87%,气体损失量比畦灌处理平均降低了40%,其氮素利用效率比对应畦灌处理提高32%~36%。在保证蔬菜产量影响不大的情况下,优化施肥和滴灌均能有效地降低氮素淋失和气体损失,提高氮素利用效率。

关键词: 设施菜地;施肥;灌水方式;氮素淋失;氮素利用效率

中图分类号:X143.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)12-2403-10 doi:10.11654/jaes.2013.12.013

Nitrogen Loss and Use Efficiency in Greenhouse Vegetable Soil Under Different Water and Fertilizer Managements

YIN Guan-yi¹, HU Ke-lin^{1*}, LI Pin-fang¹, LIU Rong-hao²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Optimal applications of water and fertilizers are important for maintaining yield and reducing environmental pollution in greenhouse vegetable production. An experiment was conducted to examine nitrogen (N) loss pathways and nitrogen use efficiency (NUE) under different water and fertilizer managements in a tomato-growing greenhouse located in Shunyi, Beijing from August 2009 to January 2010. Six different water and fertilizer combinations were designed, including (i) traditional fertilization + traditional irrigation (N1F1), (ii) optimal fertilization + optimal irrigation (N2F2), (iii) reduced fertilizer + optimal irrigation (N3F2), (iv) traditional fertilization + conventional drip irrigation (N1D1), (v) the optimal fertilization + optimal drip irrigation (N2D2) and (vi) reduced fertilizer + optimal drip irrigation (N3D2). We used the field observed dataset to calibrate and validate the EU-Rotate N model, and calculated N leaching, gaseous N loss and NUE. The results showed that the amounts of N leaching and gaseous N loss under different treatments accounted for 1%~9% and 5%~14% of total applied N, respectively. Nitrogen leaching for all treatments was in order: N1F1>N3F2≈N2F2>N1D1>N2D2>N3D2. Compared with the corresponding furrow treatments, N leaching under drip treatments was reduced by 72%~87%, gaseous N loss decreased by about 40%, and the NUE increased by 32%~36%. Therefore, optimal fertilization and drip irrigation combination practices could significantly reduce N leaching and gaseous N loss and increase the NUE without decreasing tomato yields.

Keywords: greenhouse vegetable; fertilizer application; irrigation method; nitrate leaching; nitrogen use efficiency

收稿日期: 2013-03-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BADA7B05); 北京市优秀人才培养资助项目(2011D009007000002)

作者简介: 殷冠羿(1989—), 女, 山东淄博人, 博士生, 主要从事土地利用与信息技术的研究。E-mail: yinguan-yi@126.com

* 通信作者: 胡克林 E-mail: hukel@cau.edu.cn

种植蔬菜是我国农民增收的主要途径之一,其经济效益明显优于粮、油、棉等大田作物。我国设施蔬菜产业近年来发展迅速,截至2010年底,种植面积估计达466.7万 hm^2 ,分别占我国设施栽培95%和世界设施园艺80%的面积,成为世界上设施面积最大的国家^[1]。相比大田蔬菜,设施菜地的养分投入量很高。研究显示,占全国农作物播种面积11.4%的蔬菜,消费了我国22%的化肥^[2],导致肥料损失严重和环境污染。山东寿光的长期定位试验结果显示,农民习惯管理下的氮素表观损失量平均每季高达 $852\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,占氮素总投入的81%^[3]。根据Guo等的研究,北京地区设施菜地农民习惯处理的氮素损失量占到施肥量的82%^[4]。由硝酸盐淋失所造成的地下水污染问题,已引起了广泛关注^[5]。北京市平原农区地下水硝态氮污染主要集中在蔬菜种植区,污染程度已接近甚至超过欧美国家,浅层地下水的污染更为严重^[6]。因此,综合考虑菜园经济效益与环境效应已成为一项迫切需要解决的问题。

目前国内外研究农田硝酸盐淋洗的方法主要有多孔陶土杯法、渗漏计法、定位通量法和离子交换树脂法等,这些方法虽然在小面积田块上能估计出氮素淋失量,但是很难确定气象、土壤、蔬菜种类、管理措施等因素对氮素淋失量的影响。近年来,一些学者运用数学模型方法定量模拟菜地土壤氮素的淋洗。Ersahin等利用NLEAP模型模拟了番茄地氮素的淋失,发现淋失量与灌溉和施肥量密切相关,氮素淋失量占施氮量的5.6%~33%^[7]。Wallis等利用GLEAMS模型模拟了地中海地区硝态氮的淋洗情况,结果表明氮素淋洗量占施氮量的13%~45%,灌水量大是氮素淋洗比例较高的主要原因之一,由灌溉水带入大量的氮也是一个重要因素,其可达施氮量的1/3^[8]。Sun等利用EU-Rotate_N模型模拟了山东寿光设施黄瓜地土壤水氮的动态变化过程,发现氮素淋失占到施氮总量的35%~56%^[9]。到目前为止,利用数学模型定量研究我国设施菜地土壤氮素损失及氮素利用效率的报道还很少见。本研究选取北京郊区——顺义区的设施

番茄大棚,通过设置不同灌水方式和氮肥管理的田间试验,利用EU-Rotate_N模型量化分析不同水肥管理模式下设施菜地土壤氮素的淋失、气体损失以及氮素利用效率,旨在为设施菜地合理的水氮管理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于北京市顺义区大孙各庄镇的三高试验基地。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均温 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降雨量625 mm。试验选用的日光温室为钢架结构,已连续种植2年番茄,温室内种植面积为 $56\text{ m}\times 11\text{ m}$ 。土壤类型为褐潮土,质地为砂壤,表层土壤有机质含量为 $6.99\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $0.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮为 $53.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷为 $31.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾为 $72.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤剖面基本理化性状见表1。

1.2 试验设计

试验设置了6个处理:(1)传统施肥+传统畦灌(N1F1);(2)优化施肥+优化畦灌(N2F2);(3)减量施肥(-40%)+优化畦灌(N3F2);(4)传统施肥+传统滴灌(N1D1);(5)优化施肥+优化滴灌(N2D2);(6)减量施肥(-40%)+优化滴灌(N3D2)。小区面积为 $11\text{ m}\times 3.2\text{ m}$,每个处理3次重复。为了防止小区间水分互相影响,小区之间用埋深0.5 m的塑料膜隔开。番茄品种为仙客5号,2009年8月20日移栽,株行距分别为0.4、1 m,2010年1月29日拉秧。

灌水:当地农民习惯在番茄移栽时、开花期以及穗果膨大期分别进行灌溉,畦灌每次灌水约70 mm,滴灌约40 mm。传统畦灌处理(F1)和传统滴灌处理(D1)的灌水量根据农民习惯进行管理(表2);优化畦灌处理(F2)的土壤含水量保持在田持的50%~80%,根据水分监测值来计算灌水量;优化滴灌处理(D2)的灌水时间与灌水量同F2。

施肥:农民习惯在番茄移栽前将约 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的

表1 土壤剖面基础理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of soil used for the experiment

土层/cm	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	粒径组成/%			土壤质地 (美国制)	pH值	$\theta_s/\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	$\theta_k/\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	$\theta_w/\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	$K_s/\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$
		砂粒	粉粒	黏粒						
0~30	1.57	70.68	18.05	11.27	砂壤	7.5	0.31	0.28	0.08	3.86
30~60	1.69	78.48	13.38	8.13	壤砂	8.0	0.30	0.23	0.10	14.72
60~90	1.43	61.14	27.91	9.45	砂壤	8.5	0.40	0.35	0.10	5.07

注: θ_s 为饱和含水量; θ_k 为田间持水量; θ_w 为萎蔫点; K_s 为饱和导水率。

表 2 水肥管理措施

Table 2 Water and fertilizer applications

处理	灌溉/mm		施氮量 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$			
			基施		追施	
	方式	次数	每次灌溉量	有机氮	无机氮	次数 每次追氮量
N1F1	畦灌	3	70	610	112.5	2 144
N2F2		3	20	610	112.5	2 79
N3F2		3	20	610	112.5	2 63
N1D1	滴灌	3	40	610	112.5	2 144
N2D2		3	20	610	112.5	2 79
N3D2		3	20	610	112.5	2 63

商品有机肥和 $100 \sim 120 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的尿素翻耕入土作为基肥,然后在第二和第四穗果膨大期分两次追施尿素,每次施用约 $150 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。传统施肥处理(N1)按照农民习惯管理,减量施肥(N3)比传统施肥处理的尿素总量减少 40%(表 2)。优化施肥处理(N2)的施氮量根据目标产量法计算得到,计算过程如下:

总需氮量=目标产量 $\times$ 单位产量的吸氮量-土壤供氮量

土壤供氮量=土壤碱解氮 $\times 2.25 \times$ 校正系数

所需尿素氮量=总需氮量-施入有机肥氮量 $\times$ 有机肥利用率

尿素用量(纯 N 计)=所需尿素氮量/氮肥利用率

其中目标产量设定为 $75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,单位产量的吸氮量为 $3.54 \text{ kg N} \cdot \text{t}^{-1}$,有机肥的利用率为 15%,氮肥利用率为 35%,校正系数取 0.658,详见文献[10]。

各处理磷、钾用量相同,均为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,作为底肥一次性施入,分别在 8 月 20 日、9 月 24 日和 10 月 12 日进行灌溉,追肥日期为 10 月 12 日和 12 月 4 日。具体水肥管理见表 2。

1.3 测定项目与方法

试验前在大棚内开挖土壤剖面,按照土壤发生层取样,参照《土壤物理学》分别测定土壤容重:环刀法;土壤饱和导水率:定水头法;土壤水分特征曲线:沙箱和压力板法。土壤质地:吸管法;pH 值:水土比 2.5:1,酸度计测定。参照《土壤农化分析》测定土壤有机质:重铬酸钾容量法;全氮:半微量开氏法;速效钾: NH_4OAc 浸提-火焰光度法;速效磷: NaHCO_3 浸提法-比色法。土壤初始含水量:烘干法;土壤初始含氮量: $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 浸提(水土比为 10:1),流动分析仪测定。部分理化性质测定结果见表 1。

土壤水分和硝态氮的动态监测:分别在番茄关键生育期,距植株主根 10 cm 处,分 0~30、30~60、60~90

cm 3 层取土测定根层土壤水分和硝态氮的动态变化,取样日期为 2009 年 8 月 20 日、9 月 15 日、10 月 8 日、11 月 15 日、12 月 28 日及 2010 年 1 月 28 日。同时取植株样,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,凯氏定氮法测定植株含氮量。每次收获时将各处理小区内的果实称重,计算产量。每次灌水时收集水样,硝态氮含量均采用流动分析仪测定。大棚内安装有自动气象站,用来记录气温、相对湿度、风速、太阳辐射等气象要素。

1.4 模型简介及输入数据

本研究所采用的 EU-Rotate_N 模型是由欧盟联合开发的菜地水肥管理模型,用来优化作物与蔬菜轮作模式下的氮肥管理。该模型是在 N-ABLE 模型的基础上^[11],通过重新设计土壤、作物模块并添加经济效益评价模块而发展起来的。该模型采用 FAO 方法计算参考作物蒸散量,水分入渗及再分布过程采用 Cascade 方法,土壤氮矿化过程来源于 DAISY 模型,有机肥的氨挥发过程基于 ALFAM 模型,尿素水解及化肥氨挥发过程采用 AMOVOL 模型,蔬菜产量采用设定目标产量的方法。详细原理见文献[12]。该模型适用多种蔬菜,已被用来模拟不同水肥管理方式对设施黄瓜产量及氮素损失的影响^[4,9],并且优化了蔬菜与作物轮作模式下的氮肥管理^[12]。

模型需要输入的数据资料有:①基本信息:试验点的纬度、海拔;②土壤资料:土层厚度、土层机械组成、pH 值、容重、田间持水量、萎蔫点、饱和含水量、土壤有机质和全氮含量等;③田间管理:灌水日期、方式、灌水量及灌溉水含氮量;施肥日期、方式、肥料种类和数量;④土壤初始条件:含水量和无机氮;⑤气象资料:平均气温、相对湿度、太阳辐射和风速。⑥作物参数:作物种类、株行距,种植和收获日期及目标产量。

1.5 模型校验

本研究采用农民习惯处理(N1F1)的田间观测数据来校准模型参数,用其他处理的实测数据来验证模型。土壤水力学参数、土壤理化性质及初始的水分和无机氮含量均采用实测值(表 1)。作物生长和氮素转化参数的校准采用试错法,对比模拟值和实测值进行校准。番茄生长初期、盛果期和末期的作物系数最后分别取值 0.6、1.32 和 0.7,最大株高为 1.0 m,收获指数为 0.55。参考有关文献^[9,12],氮素转化参数在模型默认值的基础上进行了小的调整,作物奢侈吸氮系数为 1.1,尿素水解速率为 0.00334 d^{-1} ,硝化速率为 0.001 d^{-1} ,氨挥发气体阻抗系数为 $25 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$,硝态氮和铵态氮的固持速率分别为 0.1 、 0.4 d^{-1} 。

本研究选择两种统计参数和相关系数来评价模型的模拟值与实测值的吻合程度。

均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}}$$

一致性指数:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2}$$

式中: P_i 为模拟值, O_i 为实测值, O 为平均实测值, n 为实测值个数。

当 $RMSE$ 值趋近于 0 时, 模拟值更接近于实测值, 模型模拟的效果越好。 $0 < d < 1$, d 趋近于 1 时, 反映模拟值与实测值具有较好的一致性。

表 3 为各层土壤体积含水量和土壤硝态氮含量的模拟效果评价指标。土壤含水量均方根误差在 0.03~0.04 之间, 一致性指数在 0.49~0.70 之间, 说明模型可较好地模拟土壤含水量。土壤硝态氮含量的均方根误差在 13~39 之间, 变化较大, 一致性指数在 0.72~0.77 之间, 接近于 1, 说明模拟值与实测值吻合较好。总体来说, 模拟的土壤水分、硝态氮与实测值均基本吻合较好。因此, 该模型可以用来模拟分析该地区不同水肥管理下的土壤氮素淋失及水氮利用效率。

表 3 土壤含水量和硝态氮含量模型评价指标

Table 3 Validation indices for soil water contents and nitrate concentrations predicated by the model

指标	土壤含水量			土壤硝态氮			
	土层/cm	0~30	30~60	60~90	0~30	30~60	60~90
$RMSE$	0.04	0.03	0.04	39.51	21.69	13.44	
d	0.49	0.70	0.67	0.73	0.77	0.72	

2 结果分析

2.1 设施番茄地土壤水分的模拟

图 1 为不同处理土壤含水量模拟值与实测值的对比, 总体来说模拟值与实测值趋势吻合较好。灌水日期在 8 月 20 日、9 月 24 日和 10 月 12 日, 模拟结果中各处理表层 0~30 cm 含水量均在对应时期出现峰值, 说明模拟结果比较符合实际情况。

具体来看, 表层土壤 0~30 cm 含水量变化相对剧烈, 30~60 cm 土层次之, 而 60~90 cm 土层变化则相对平缓, 其主要原因是表层土壤受到外界气象因素以及灌溉的影响比较大。由于番茄的根系主要分布在

0~30 cm 土层, 根系在土壤中的分布受到土壤水肥供应状况的影响, 同时根系的数量和分布也反过来影响土壤中水分的运移与消耗。与表层土壤(0~30 cm)相比, 下层土壤(30~60 cm 和 60~90 cm)的模拟效果较好, 这与深层作物根系较少、土壤水分变化缓慢有关。在番茄生长后期, 各处理土壤水分含量均呈下降趋势, 主要原因是番茄后期需水量较大, 导致了各土层的含水量均有不同程度的下降, 同时也与该地土壤质地偏砂, 部分水分渗漏到深层有关。

2.2 设施番茄地土壤硝态氮的模拟

图 2 为不同处理土壤硝态氮的模拟值与实测值的对比。表层土壤的无机氮含量远高于 60 cm 和 90 cm 土层的无机氮含量。各处理在 8 月 20 日基施有机肥和尿素, 随着尿素水解很快转化为无机氮, 8 月 23 日左右各处理表层 0~30 cm 均出现峰值, 在 9 月 24 日和 10 月 12 日进行了追肥, 但峰值相比基施时期较不明显, 这与后期番茄吸氮量较大有关。在番茄生育后期, 各处理土壤表层硝态氮含量呈下降趋势, 这与番茄后期吸氮量较大, 以及该地土壤质地偏砂, 硝态氮易随灌溉水淋洗到 90 cm 以外有关。相比表层土壤, 下层土壤(30~60 cm 和 60~90 cm)的模拟效果较好, 土壤表层(0~30 cm)含水量和硝态氮含量变化剧烈, 这与作物根系在 0~30 cm 分布较多有关^[9]。

硝态氮的主要淋失方式为随水下渗, 尤其表层土壤变化最为明显。其中 N1F1 处理每次灌水量为 70 mm, 对应时段土壤硝态氮含量下降的趋势最为明显, 而 N2F2、N3F2、N2D2 和 N3D2 处理每次灌水量仅为 20 mm, 对应时段土壤硝态氮含量下降的趋势较为平缓, 尤其 N2D2 和 N3D2 处理为滴灌处理, 土壤硝态氮下降幅度相比 N2F2、N3F2 的畦灌处理更为平缓, 表明硝态氮淋失程度与灌水方式有关。

2.3 番茄产量(干重)及吸氮量的模拟效果

图 3 为番茄产量(干重)及吸氮量的模拟值与实测值的对比。可以看出, 模拟值与实测值的相关系数分别为 0.93 和 0.92, 均接近于 1, 而且土壤水分和硝态氮含量的点均比较集中地分布在 1:1 线的附近, 说明该模型较好地模拟了土壤水分和硝态氮含量。但是模型模拟的番茄产量(干重)和吸氮量均低于实测值, 这可能与模拟时段内雨雪天气较多、室温低、光照弱、湿度过大, 番茄生长缓慢有关。总体来说, 模型的模拟效果较为满意。

2.4 设施菜地水分渗漏和硝酸盐淋失动态

图 4 为模型模拟得到的各处理土体 0.9 m 处的

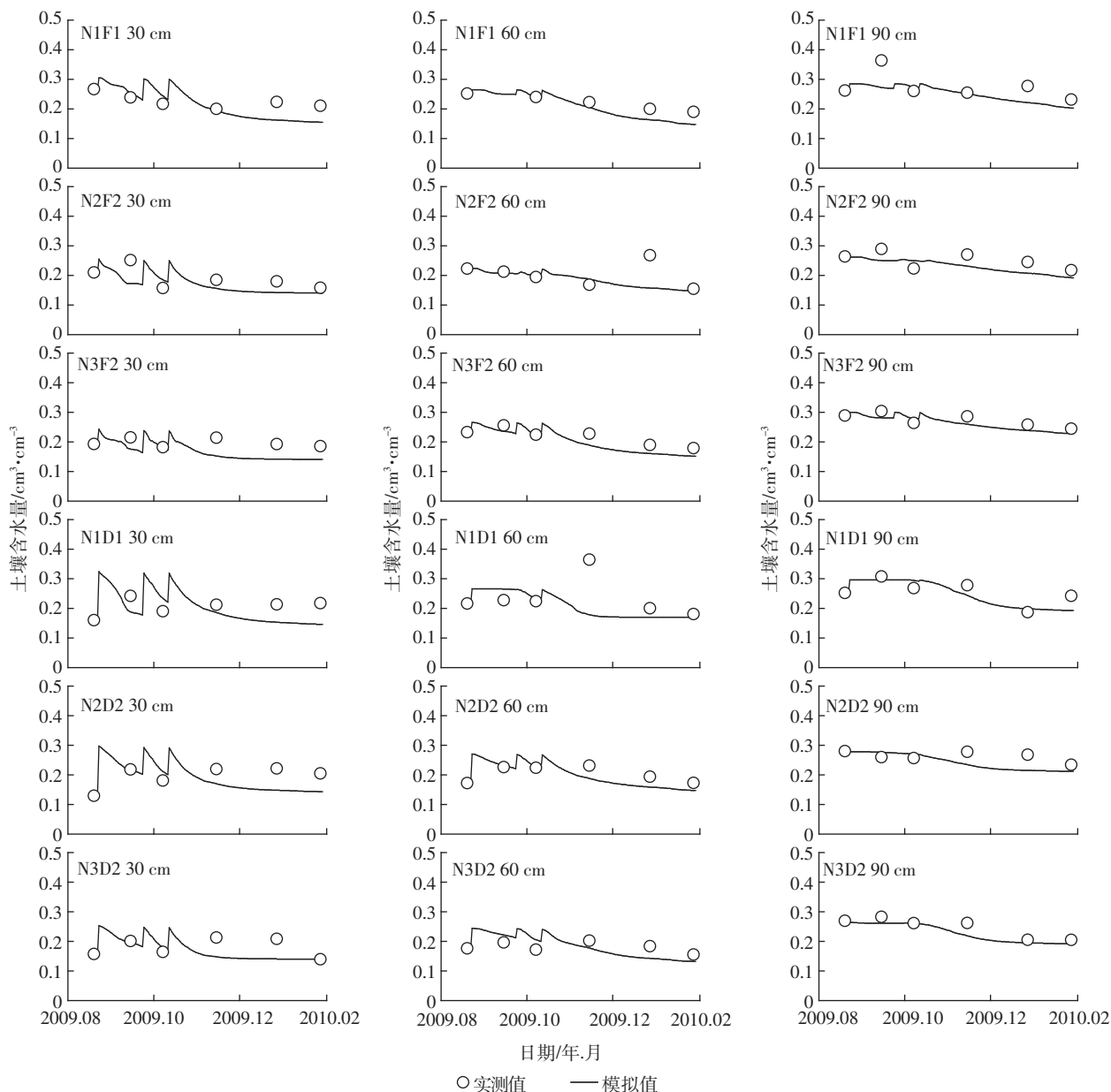


图 1 不同土层含水量的模拟值与实测值的比较

Figure 1 Predicted and measured soil water contents in different soil depths

水分渗漏和氮素淋洗动态。由于该地土壤质地偏砂,每次灌水(8月20日、9月24日和10月12日)之后各处理均出现了不同程度的水分渗漏。从图4可见,畦灌处理N1F1的每次灌水量最大(70 mm),其水分渗漏也是最高的,3次灌水之后的水分渗漏分别达到51.5、49.4、49.8 mm,其次是N2F2和N3F2处理,最小为滴灌的3个处理(N1D1、N2D2和N3D2),每次渗漏量均不超过10 mm。另外,在番茄生长的后期,各处理基本没有发生水分渗漏,这主要与番茄后期灌水少,番茄生长旺盛、需水较多有关。

从图4还可以看出,氮素淋失表现出与水分渗漏

一致的规律,氮素淋失也主要发生在3次灌溉之后。8月20日各处理基肥用量均相同,由于N1F1处理的灌水量最大,故该处理的氮素淋洗量远大于其他处理,达到 $30.5 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在9月24日和10月12日伴随灌溉进行了追肥,其中N1F1处理灌溉施肥量均最多,其对应时段的氮素淋洗量也最大,分别为32.2、 $21 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其次为N2F2、N3F2处理,而其余3个滴灌处理的施肥量相对较低,故氮素淋失量最小,表明氮素淋洗与施氮量密切相关。另外,N2F2和N3F2处理的灌水量比N1F1减少了一半以上,其对应时段的氮素淋洗量显著低于N1F1处理。同样,N2D2和

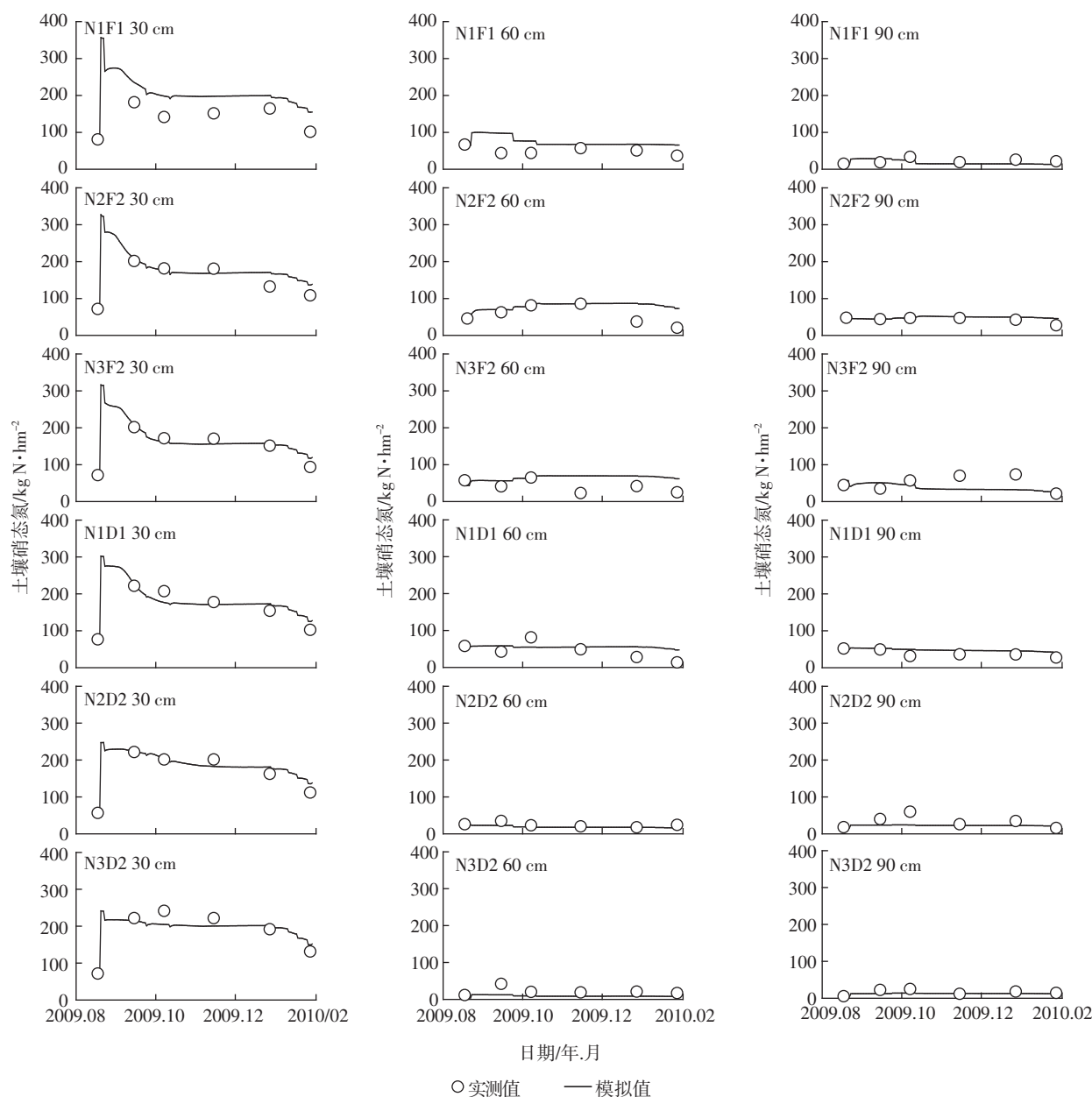


图 2 不同土层土壤硝态氮含量的模拟值与实测值的对比

Figure 2 Predicted and measured soil nitrate contents in different soil depths

N3D2 处理的灌水量为 N1D1 处理的一半, 其对应时段的氮素淋洗也显著低于 N1D1 处理, 说明氮素淋洗与灌水量也密切相关。

模型模拟计算结果表明, 3 个畦灌处理的蒸发量差别不大, 均在 21 mm 左右, 而滴灌处理的蒸发量在 13 mm 左右, 明显小于畦灌处理。各处理蒸腾量的差别也不明显, 在 90~105 mm 范围内, 而各处理水分渗漏间的差别较大, 表现为 $N1F1 > N3F2 \approx N2F2 > N1D1 > N2D2 > N3D2$, 其中畦灌处理 N1F1 的水分渗漏量远大于其他处理, 达到 165.6 mm, 而滴灌处理 N1D1 的水

分渗漏量仅为 3.8 mm, 说明水分渗漏与灌水量和灌水方式有关。当灌水方式相同时, 灌水量越大, 渗漏量越大。相同灌水量条件下, 滴灌处理(N1D1、N2D2 和 N3D2) 的水分渗漏量分别比畦灌对应处理(N1F1、N2F2 和 N3F2) 减少了 89%、80% 和 91%, 说明滴灌可有效降低水分渗漏和土面蒸发。

2.5 氮素损失与氮素利用效率

表 3 为不同水肥处理下的土壤氮素平衡结果。氮素淋失表现出与水分渗漏相似的规律。3 个畦灌处理的氮素淋失表现为 $N1F1 > N3F2 \approx N2F2$; 滴灌处理的

表现为 $N1D1 > N2D2 > N3D2$ 。另外,滴灌处理的氮素淋失量明显小于畦灌处理,滴灌处理 $N1D1$ 、 $N2D2$ 和 $N3D2$ 的淋失量分别比对应畦灌处理 $N1F1$ 、 $N2F2$ 和

$N3F2$ 减少了 72%、80%和 87%。

各处理的气体损失量差别较大,范围在 44~137 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,占施肥总量的 5%~14%,成为土壤氮素损

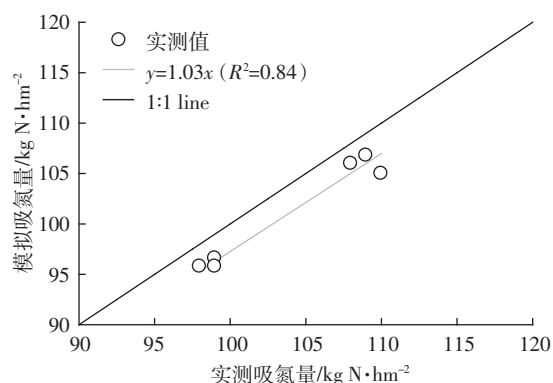
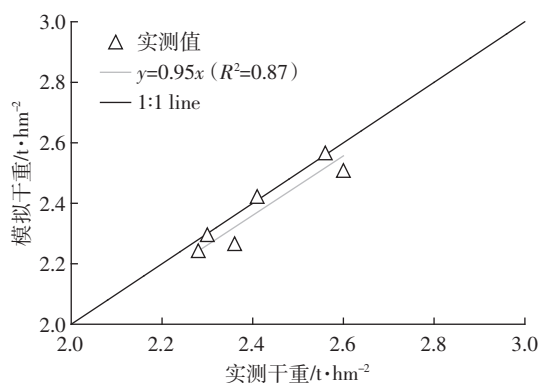


图 3 番茄产量和吸氮量的模拟值与实测值的比较

Figure 3 Predicted and measured values of tomato dry yield and N uptake

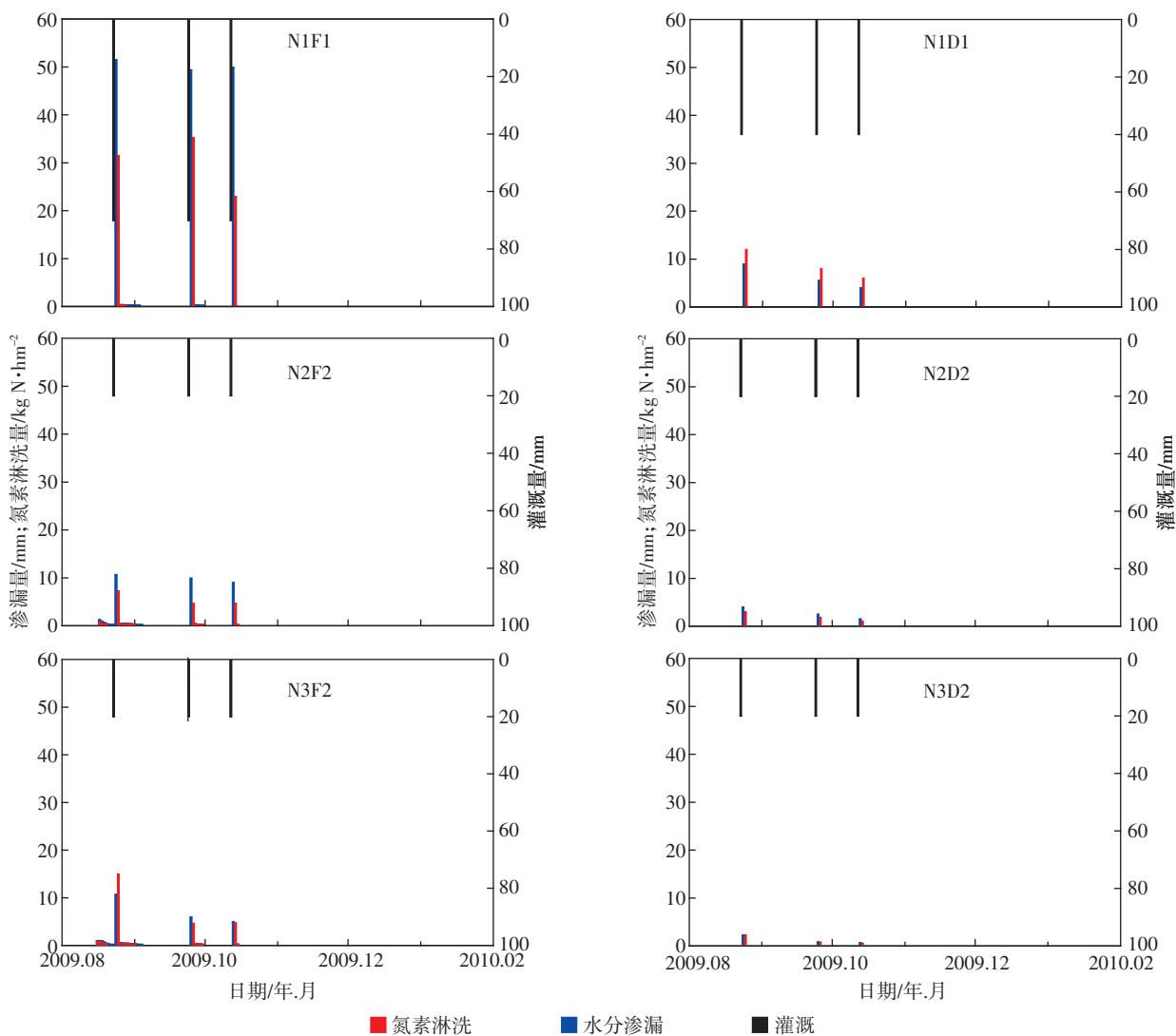


图 4 不同处理土壤水分渗漏、氮素淋洗动态

Figure 4 Dynamic of water drainage and nitrate leaching under different treatments

表 3 不同水肥处理下的土壤氮素平衡

Table 3 Soil nitrogen balance under different irrigation and fertilization

处理	有机肥/ kg N·hm ⁻²	化肥/ kg N·hm ⁻²	灌溉/ kg N·hm ⁻²	净矿化/ kg N·hm ⁻²	吸氮量/ kg N·hm ⁻²	淋失/ kg N·hm ⁻²	气体损失/ kg N·hm ⁻²	平衡/ kg N·hm ⁻²	鲜重产量/ t·hm ⁻²	NUE/ kg·kg ⁻¹
N1F1	610	400	1.1	63.0	106.0	94.4	137.0	736.6	34.17	101.3
N2F2	610	270	0.3	28.0	106.8	31.9	115.0	654.6	36.94	145.6
N3F2	610	240	0.3	44.0	96.6	31.5	113.0	653.2	35.97	149.2
N1D1	610	400	0.6	34.0	95.8	26.0	109.0	813.8	34.35	148.8
N2D2	610	270	0.3	25.0	95.8	6.5	50.2	753.1	33.16	217.6
N3D2	610	240	0.3	24.0	105.0	4.0	44.4	720.9	35.87	233.8

注:平衡=(有机肥+化肥+灌溉+净矿化)-(吸收+淋失+气体损失);氮素利用效率(NUE)=产量/(吸收+淋失+气体损失)。

失的主要途径之一。氮素气体损失与施肥量密切相关,N1F1处理的施肥量远高于其他处理,故其气体损失量也最高,达到了137 kg N·hm⁻²。在3个滴灌处理中,N1D1施肥量最高,其气体损失也最高。其次,气体损失与灌水方式也有关,滴灌处理N1D1、N2D2和N3D2的气体损失量分别比对应畦灌处理N1F1、N2F2和N3F2降低了2%、56%和61%,说明滴灌还可以有效降低氮素气体损失。

由于滴灌处理的氮素淋失和气体损失量均明显低于畦灌处理,滴灌处理的氮素利用效率(NUE)要高于畦灌处理,滴灌处理N1D1、N2D2和N3D2的NUE分别比对应畦灌处理N1F1、N2F2和N3F2提高了46.9%、49.5%和56.7%。相同灌水方式下,灌溉和施肥量高的处理,其NUE明显低于其他处理,畦灌处理中N3F2>N2F2>N1F1,滴灌处理中N3D2>N2D2>N1D1,说明NUE与灌溉量、施肥量和灌水方式均有关。

3 讨论

大量研究结果表明,灌水量、灌水方式和施肥量是影响氮素淋失的主要因素。Song等^[13]和Zhao等^[14]利用土壤渗漏计法测定的设施菜田土壤硝态氮淋洗量占到氮素总投入的20%~30%。Ramos等^[15]发现西班牙Valencia省菜地土豆和洋葱的氮素淋失占到施氮总量的38%~70%。本研究中各处理土壤氮素淋失量占施肥量的1%~9%。相比之下本研究的氮素淋洗量结果偏低,这与本研究的大棚土壤质地为砂土,为减少渗漏,灌水较少有关。本试验最高的灌水量为210 mm,最低的仅为60 mm,而山东寿光设施大棚一季黄瓜的灌水量就达到800~1000 mm(其中滴灌为300~450 mm)。

其次,灌水方式也是影响氮素淋失的主要因素。聂斌^[16]指出设施番茄滴灌能有效减少水分向土壤深

层渗漏,从而减少氮素淋失风险。Sharmasarkar等^[17]研究发现,滴灌代替畦灌可在提高甜菜产量的同时,有效降低氮素淋失。Sun等^[9]研究表明在相同施肥情况下,滴灌比畦灌的氮素淋失量减少了75%~80%。本研究中滴灌与畦灌处理相比,氮素淋失量减少了72%~87%,该结果与上述报道是一致的。

此外,施氮量也是影响氮素淋失的主要因素。高兵等^[18]指出,在追氮量减少50%~63.5%和灌水量减少44%~39%的情况下,番茄不仅不减产,反而增产10%~18%,同时各土层无机氮残留量显著降低。Zotarelli等^[19]指出,在不降低产量前提下减少灌溉和施肥量,土体硝酸盐淋失可降低28%~37%。Min等^[20]发现,减少氮肥施入量可以在不影响西红柿、黄瓜和芹菜产量的前提下,降低50%的土壤氮素损失。本试验中相同灌水方式下,畦灌处理中N2F2和N3F2比N1F1的淋失量分别降低了66%和67%,滴灌处理中N2D2和N3D2分别比N1D1的淋失量降低75%和85%,说明适当降低施氮量可有效降低土壤氮素淋失。

气体损失也是设施菜地土壤氮素损失的主要途径之一。由于设施菜地通风条件较差,一些研究指出氨挥发损失所占的比例较低,一般为施肥量的1%~3%^[21-22],由于设施菜地施肥量大、温度高、土壤湿度大,而反硝化作用所导致的气体损失相对较大。Ryden等^[23]研究发现芹菜地土壤反硝化损失量占肥料用量的15.3%。Ryden和Lund^[24]测得菜地土壤反硝化损失量占施N量的14%~52%。本研究中气体损失占施肥量的5%~14%,与上述研究结果基本一致。

大量研究表明,产量受施肥的影响明显^[9,18-19]。本研究中,除N2D2处理外,其他滴灌处理的产量比传统畦灌均有增加,增加幅度为0.52%~8.11%,但各处理产量差异不明显,说明在一定程度内减少施氮量和灌水量,仍能保持番茄产量。本次研究中各处理番茄的

平均产量明显偏低,只占寿光设施番茄平均产量的 56%^[25],占陕西设施番茄产量的 27%~46%^[26]。这是由于在该季番茄的生长过程中,雨雪天气较多,造成温室内多日低温寡照,严重影响了番茄生长,造成产量普遍偏低。

4 结论

EU-Rotate_N 模型在北京郊区设施番茄地的校验结果表明,模拟的土壤水分、硝态氮、番茄产量和吸氮量与实测结果均吻合较好,该模型可以用来定量分析我国设施番茄地的氮素损失及氮素利用效率。

氮素淋失和气体损失是设施菜地土壤氮素损失的主要途径。各处理土壤氮素淋失量占施肥总量的 1%~9%,而气体损失占到施肥总量的 5%~14%。氮素淋失和气体损失与施肥量、灌水量和灌水方式密切相关。各处理氮素淋失表现为 $N1F1 > N3F2 \approx N2F2 > N1D1 > N2D2 > N3D2$ 。滴灌处理的氮素淋失量明显小于畦灌处理,其淋失量比对应畦灌处理减少了 72%~87%。同时滴灌处理的气体损失量平均比畦灌处理降低了约 40%,说明滴灌可以有效降低氮素淋失和气体损失。

各处理的氮素利用效率(NUE)表现为 $N3D2 > N2D2 > N1D1 \approx N3F2 > N2F2 > N1F1$,说明施肥量越高,氮素损失越多,NUE 越低。滴灌处理的 NUE 要显著高于畦灌处理,其 NUE 比对应畦灌处理提高 32%~36%,说明优化施肥和滴灌可以有效提高氮素利用效率。

参考文献:

- [1] 喻景权. “十一五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J]. 中国蔬菜, 2011(2): 11-23.
- [2] 王敬国. 设施菜田退化土壤修复与资源高效利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 2-3.
- [3] Ren T, Christie P, Wang J G, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment[J]. *Scientia Horticulture*, 2010, 125: 22-33.
- [4] Guo R, Nendel C, Rahn C, et al. Tracking nitrogen losses in a greenhouse crop rotation experiment in North China using the EU-Rotate_N simulation model[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2218-2229.
- [5] 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(增刊): 537-542.
- [6] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 406-413.
- [7] Ersahin S, Karaman M R. Estimating potential nitrate leaching in nitrogen fertilized and irrigated tomato using the computer model NLEAP[J]. *Agriculture Water Management*, 2001, 51: 1-12.
- [8] Wallis K J, Candela L, Mateos R M, et al. Simulation of nitrate leaching under potato crops in a Mediterranean area: Influence of frost prevention irrigation on nitrogen transport[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98: 1629-1640.
- [9] Sun Y, Hu K L, Zhang K F, et al. Simulation of nitrogen fate for greenhouse cucumber grown under different water and fertilizer management using the EU-Rotate N model[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 112: 21-32.
- [10] 陈伦寿, 陆景陵. 蔬菜营养与施肥技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 1-170.
- [11] Greenwood D J, Rahn C R, Draycott A, et al. Modelling and measurement of the effects of fertiliser-N and crop residue incorporation on N-dynamics in vegetable cropping[J]. *Soil Use and Management*, 1996, 12: 13-24.
- [12] Rahn C R, Zhang K, Lillywhite R, et al. A European Decision Support System, EU-Rotate_N to predict environmental and economic consequences of the management of nitrogen fertiliser in crop rotations[J]. *European Journal of Horticultural Science*, 2010, 75(1): 20-32.
- [13] Song X Z, Zhao C X, Wang X L, et al. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in Northern China[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, 332: 385-392.
- [14] Zhao C S, Hu C X, Huang W, et al. A lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China[J]. *Soil Sediments Contamination*, 2010, 10(1): 9-17.
- [15] Ramos C, Agut A, Lidon L, et al. Nitrate leaching in important crops of the Valencian Community region (Spain) [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 118(2): 215-223.
- [16] 聂斌, 李文刚, 江丽华, 等. 不同灌溉方式对设施番茄土壤剖面硝态氮分布及灌溉水分效率的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 102-107.
- [17] Sharmasarkar F C, Sharmasarkar S, Miller S D, et al. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarcane[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 46: 241-251.

LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, ZHANG Wen-jun, et al. N, P, K distri-

- [18] 高 兵, 李俊良, 陈 清, 等. 不同水氮管理对日光温室番茄产量及土壤无机氮的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 136–140.
GAO Bing, LI Jun-liang, CHEN Qing, et al. Effects of different irrigation and fertilization strategies on the yield and inorganic N in greenhouse tomato system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 136–140.
- [19] Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M S, et al. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 8: 1247–1258.
- [20] Min J, Shi W M, Xing G X, et al. Effects of a catch crop and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching in greenhouse vegetable production systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 91: 31–39
- [21] 李银坤, 梅旭荣, 武雪萍, 等. 不同水氮条件对日光温室冬春茬黄瓜栽培氨挥发影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1413–1419.
LI Yin-kun, MEI Xu-rong, WU Xue-ping, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on ammonia volatilization in solar greenhouse soils in winter-spring cucumber cultivation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1413–1419.
- [22] Min J, Zhao X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 464–472.
- [23] Ryden J C, Lund L J, Letey J, et al. Direct measurement of denitrification loss from soils: II development and application of field methods[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43: 110–119.
- [24] Ryden J C, Lund L J. Nature and extent of directly measured denitrification losses from some irrigated vegetable crop production units[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 505–511.
- [25] 李俊良, 朱建华, 张晓晟, 等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2): 126–129.
LI Jun-liang, ZHU Jian-hua, ZHANG Xiao-sheng, et al. Nitrate leaching loss from soil and nutrient utilization by tomato in protected field[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(2): 126–129.
- [26] 高佳佳, 雷金繁, 陈竹君, 等. 施肥对新建日光温室番茄产量及土壤养分含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 19–24.
GAO Jia-jia, LEI Jin-fan, CHEN Zhu-jun, et al. Effects of fertilization on the yield of tomato and soil nutrient contents in newly-built sunlight greenhouse[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 19–24.