

滴灌施肥下水肥用量对温室土壤硝态氮残留的影响

张绍武^{1,2}, 胡田田^{1,2*}, 刘杰^{1,2}, 冯璞玉^{1,2}, 张美玲³

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 内蒙古水利水电勘测设计院, 呼和浩特 010020)

摘要:【目的】通过水肥管理达到减少温室土壤硝态氮残留、维持土壤质量的目的,探求温室土壤硝态氮残留与水肥用量的关系。【方法】在滴灌施肥条件下,以灌水量和氮、磷、钾及有机肥用量为试验因素,根据当地日光温室番茄长季节栽培实际中的水肥用量,设计各试验因子的水肥水平,采用五元二次通用旋转组合设计进行试验。拉秧后测定耕层土壤硝态氮量,建立土壤硝态氮量与水肥因子间的数学模型,据此分析了各单因子效应及二因素的耦合效应。【结果】施氮量对土壤硝态氮残留量影响最大,施磷量、灌水量和施钾量次之,有机肥用量最小。当其他因子为0水平时,土壤硝态氮残留量随氮肥用量的增多而增加,随施磷量呈开口向上的抛物线变化,随灌水量、施钾量以及有机肥用量呈开口向下的抛物线变化。灌水量及氮、磷、钾和有机肥用量对土壤硝态氮残留产生的影响程度随其他因子的水平而变,存在明显交互作用。模型寻优显示:灌水量455.1~471.5 mm,施氮量532.3~586.5 kg/hm²,施磷量420.8~466.4 kg/hm²,施钾量646.1~723.5 kg/hm²,有机肥用量25.6~27.9 t/hm²,耕层土壤硝态氮量可维持在100~150 mg/kg的较低水平。【结论】温室菜地土壤硝态氮残留量相对较大,可以通过优化水肥用量来减少土壤硝态氮的残留,故在滴灌施肥条件下仍需严格控制水肥用量。

关键词:灌水量; 氮、磷、钾及有机肥用量; 土壤硝态氮残留; 日光温室; 土壤

中图分类号:S625.5

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180305

张绍武,胡田田,刘杰,等. 滴灌施肥下水肥用量对温室土壤硝态氮残留的影响[J]. 灌溉排水学报,2019,38(3):56-63.

0 引言

目前,我国温室栽培普遍采用“大水大肥”、“肥随水走,一水一肥”的灌水施肥模式。过多施入氮肥加之不合理的灌水,不仅降低了氮肥的利用效率^[1-2],而且极易导致土壤次生盐渍化。研究表明,在盐渍化过程中增加最多的成分是硝酸盐,盐分组成阴离子以NO₃⁻为主^[3]。在日光温室的封闭环境下,由于蒸发量大,表层土壤缺乏雨水的淋洗,且硝态氮不易被土壤胶体吸附、易随水分运动,致使大量的硝态氮随水分向上迁移,富集在耕层土壤中^[4-5]。NO₃⁻的增加使土壤固相中的阳离子被交换出来形成各种硝酸盐,提高了土壤溶液的浓度和渗透压^[3],造成蔬菜生长不良、病害严重、品质下降和施肥不增产反而减产等问题,影响日光温室的持续利用^[6-7]。因此,研究滴灌条件下灌水施肥对温室土壤硝酸盐表聚的影响具有理论和实际意义。

土壤硝态氮的累积受施肥、温度、水分等因素影响,而施氮的影响程度最大^[8]。据调查,在山东寿光温室蔬菜生产基地,氮肥年平均投入量高达4 088 kg/hm²^[9],而当供氮量超过植物吸收量时就会造成氮素的残留。因此,调控根层土壤氮素盈亏是保证氮肥高效利用和温室可持续运行的关键。毕晓庆等^[10]研究表明,保证番茄产量和环境友好的氮肥用量为270~360 kg/hm²,且随着氮肥投入量的增加,各土层硝态氮量明显增加。西欧从环境友好的角度提出浅根蔬菜收获后土壤无机氮不大于90 kg/hm²^[11]。水分对土壤硝态氮累积的影响程度小于施氮^[12]。我国广大地区的温室缺少灌溉控制设备,使单季蔬菜灌水量常超过1 000 mm^[13]。据李若楠等研究,秋冬茬番茄灌水170~200 mm时,可使硝态氮趋近根区分布^[14],增大灌溉量则会使硝态氮渗漏到

收稿日期:2018-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51279169);国家“十二五”863子课题(2011AA100504)

作者简介:张绍武(1993-),男。硕士研究生,主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail: zhangshaowu@nwsuaf.edu.cn

通信作者:胡田田(1966-),女。教授,博士生导师,主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail: hutiantian@nwsuaf.edu.cn

根区以外,残留在土壤中,增加了温室在空闲期次生盐渍化的可能性。适量磷、钾肥或有机肥与氮肥配施均可促进植物对氮素的吸收,降低土壤中硝态氮的残留^[15-16]。

综上所述,水肥管理不当极易导致温室土壤以硝酸盐表聚为特征的次生盐渍化,优化水肥管理可减少蔬菜生产中土壤硝态氮的残留,改善土壤生境。但是前人的研究主要集中在单施无机肥^[10]、单施有机肥^[17-18]或二因素耦合^[15-16]对日光温室菜地土壤氮素的影响方面,而综合水、氮、磷、钾和有机肥用量多因子及因子间交互效应的研究很少。因此,根据当地日光温室番茄长季节栽培实际中的水肥用量,设计各试验因子的水肥水平,采用五元二次通用旋转组合设计,分析滴灌施肥条件下灌水量和氮、磷、钾及有机肥用量及其交互效应对番茄地耕层土壤硝态氮残留量的影响,以期通过水肥调控维持土壤养分平衡和温室土壤可持续利用奠定一定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2014年9月—2015年7月在陕西省咸阳市杨陵区大寨村温室大棚进行(108°04'E,34°20'N,海拔521 m)。该地属暖温带季风半湿润气候区,年均气温12.9℃,年均降水635.1 mm,年均蒸发量1 500 mm,年均日照时间2 163.8 h,试验期间平均昼夜温度15~24℃/12~17℃。供试温室为无加温土墙温室,长100 m,宽10 m,脊高3.5 m。供试土壤为肥力均匀的壤土,耕层(0~20 cm)土壤铵态氮、硝态氮、速效磷和速效钾的质量分数分别为7.65、16.88、227.00和360.00 mg/kg,土壤体积质量为1.43 g/cm³,田间持水率为23.98%(质量含水率)。供试番茄品种为“海蒂”。7月20日育苗,10月1日移栽定植,次年7月18日拉秧。种植规格为株距0.35 m,行距0.6 m。番茄生长期除草、打叶、病虫害防治等措施按照无公害蔬菜栽培技术规范进行管理。

1.2 试验方案

以灌水量、施氮量、施磷量、施钾量以及有机肥用量为试验因素,采用五元二次通用旋转组合设计,共32个处理(表2),无重复设置^[19]。根据当地温室番茄长季节栽培的水肥用量设计各因素水平,见表1。各小区随机排列,相邻小区间铺设埋深60 cm的塑料布,防止水肥测渗。缓苗期过后,待土壤含水率接近75%田间持水率(约移苗10 d后),开始灌水处理,从

表1 试验因子水平编码

因子	变量设计水平及编码				
	-2	-1	0	1	2
X ₁ 灌水量/mm	282	369	456	543	630
X ₂ 施氮量/(kg·hm ⁻²)	0	285	570	855	1 140
X ₃ 施磷量/(kg·hm ⁻²)	0	219	438	657	876
X ₄ 施钾量/(kg·hm ⁻²)	0	369	738	1 107	1 476
X ₅ 有机肥用量/(t·hm ⁻²)	0	12	24	36	48

定植至收获通过水表测定每次灌溉的用水量,全生育期共灌水14次。有机肥于移栽前一次性施入,氮、磷、钾肥分11次施用。定植前施入基肥,基肥施氮量占其总量的21.05%,磷、钾肥施入量按N、P₂O₅、K₂O质量比为1:2:1施入。追肥在越冬前施第1次:氮肥占5.26%,按N、P₂O₅、K₂O质量比为1:1:1追施磷钾肥;越冬后施第3~7次,氮肥各占10.53%,按N、P₂O₅、K₂O质量比为1:0.4:1.4追施磷钾肥;第2、8~10次氮肥各占5.26%,磷、钾肥维持N、P₂O₅、K₂O质量比为1:0.4:1.4比例追施。追肥随灌水施入,每个小区配置1个施肥桶和水表,用于施肥和记录灌水量。6月19日最后1次施肥,7月10日最后1次灌水。1行布设1条滴灌管,滴灌管为内镶式,内径8 mm,滴头间距35 cm,滴头流量2 L/h。

基施所用肥料为:尿素(含N量46.4%)、重过磷酸钙(含P₂O₅量44.0%)、硫酸钾(含K₂O量50%)和鸡粪(含pH值7.55,有机质3.25%,含N量0.29%,含P₂O₅量0.20%,含K₂O量0.301%)。追肥所用肥料为:氮肥采用尿素和硝酸铵,对于小于等于-1水平的处理,施用硝酸铵,超出部分用尿素。对于磷肥为非2水平的处理,施用CaCl₂按照2水平补充钙肥。对磷、钾同时施用的处理,磷肥施用磷酸二氢钾,其余处理用氯化钾和磷酸按设计水平补足。

1.3 测定项目与方法

番茄拉秧后获取耕层土壤样品,每个小区取3个点构成混合样,在室内风干后过1 mm筛,用2 mol/L KCl溶液浸提(干土5 g,土液比1:10)后过滤,然后用连续流动分析仪(AutoAnalyzer-III,德国 Bran+Luebbe 公司)测定土壤中硝态氮量。

1.4 数据统计与分析

采用DPS 3.01数据处理软件进行试验数据统计分析,建立数学模型。并采用SigmaPlot 10.0软件绘图。

表2 试验设计方案及结果

处理编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	NO ₃ -N量/(mg·kg ⁻¹)	处理编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	NO ₃ -N量/(mg·kg ⁻¹)
1	1	1	1	1	1	101.26	17	2	0	0	0	0	96.60
2	1	1	1	-1	-1	110.93	18	-2	0	0	0	0	226.48
3	1	1	-1	1	-1	92.02	19	0	2	0	0	0	244.66
4	1	1	-1	-1	1	137.41	20	0	-2	0	0	0	105.85
5	1	-1	1	1	-1	49.88	21	0	0	2	0	0	250.42
6	1	-1	1	-1	1	272.64	22	0	0	-2	0	0	308.90
7	1	-1	-1	1	1	197.01	23	0	0	0	2	0	92.01
8	1	-1	-1	-1	-1	50.12	24	0	0	0	-2	0	156.87
9	-1	1	1	1	-1	117.57	25	0	0	0	0	2	119.20
10	-1	1	1	-1	1	94.32	26	0	0	0	0	-2	126.09
11	-1	1	-1	1	1	292.43	27	0	0	0	0	0	188.25
12	-1	1	-1	-1	-1	331.67	28	0	0	0	0	0	168.85
13	-1	-1	1	1	1	62.34	29	0	0	0	0	0	167.26
14	-1	-1	1	-1	-1	91.37	30	0	0	0	0	0	170.84
15	-1	-1	-1	1	-1	60.53	31	0	0	0	0	0	180.50
16	-1	-1	-1	-1	1	161.90	32	0	0	0	0	0	169.23

2 结果与分析

2.1 土壤硝态氮残留量与灌水量及氮、磷、钾肥和有机肥用量间回归模型的建立

采用DPS 3.01软件对试验结果(表2)进行方差分析,并建立土壤硝态氮残留量与5因子之间的五元二次回归模型,统计检验值 $F_2=7.11>F_{0.01}(20,11)=4.1$ (表3),表明模型是有效的。剔除 $\alpha=0.1$ 下的不显著项,得到最终简化模型,即:

$$Y=180.23-19.19X_1+25.39X_2-22.49X_3-16.96X_4+16.73X_5-9.22X_1^2-5.80X_2^2+20.31X_3^2-18.50X_4^2-18.95X_5^2-36.74X_1X_2+33.69X_1X_3+24.72X_1X_5-27.26X_2X_3+8.45X_2X_4-29.30X_2X_5-12.44X_3X_4-5.85X_3X_5+15.68X_4X_5, \quad (1)$$

表3 试验结果方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	比值 F	显著水平
X_1	151 665.03	1	151 665.03	126.36	0
X_2	265 503.55	1	265 503.55	221.20	0
X_3	208 246.99	1	208 246.99	173.50	0
X_4	118 422.88	1	118 422.88	98.66	0
X_5	115 190.11	1	115 190.11	95.97	0
X_1^2	42 819.66	1	42 819.66	35.67	0.000 09
X_2^2	16 903.16	1	16 903.16	14.08	0.003 19
X_3^2	207 509.88	1	207 509.88	172.88	0
X_4^2	172 220.57	1	172 220.57	143.48	0
X_5^2	180 662.93	1	180 662.93	150.52	0
X_1X_2	370 568.50	1	370 568.50	308.73	0
X_1X_3	311 613.96	1	311 613.96	259.62	0
X_1X_4	256.28	1	256.28	0.21	0.653 03
X_1X_5	167 741.76	1	167 741.76	139.75	0
X_2X_3	203 945.95	1	203 945.95	169.92	0
X_2X_4	19 607.02	1	19 607.02	16.34	0.001 94
X_2X_5	235 621.25	1	235 621.25	196.30	0
X_3X_4	42 501.81	1	42 501.81	35.41	0.000 1
X_3X_5	9 393.83	1	9 393.83	7.83	0.017 35
X_4X_5	67 457.35	1	67 457.35	56.20	0.000 01
回归	170 714.16	20	8 535.71	$F_2=7.11$	0.000 09
剩余	13 203.11	11	1 200.28		
失拟	12 853.30	6	2 142.22	$F_1=30.62$	0
误差	349.82	5	69.96		
总和	183 917.28	31			

2.2 因子主效应分析

因子主效应分析旨在探明各因子对目标函数影响的主次地位。函数变幅是一个综合性较好、较合理的判定因子效应的指标^[20]。因此,采用函数变幅分析灌水量、施氮量、施磷量、施钾量及有机肥用量对土壤硝态氮残留量的影响。将回归模型分别固定在-2、-1、0、1、2水平下得各因子的函数变幅,结果见表4。

表4 不同水平下各因子的函数变幅及位次

编码	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	因子位次
-2	100.37	308.65	37.85	67.00	36.45	$X_2 \gg X_1 > X_4 > X_3 \geq X_5$
-1	66.88	174.64	40.92	54.63	39.12	$X_2 \gg X_1 > X_4 > X_3 > X_5$
0	33.31	41.59	50.32	42.57	43.05	$X_3 > X_2 \geq X_4 \geq X_5 > X_1$
1	17.56	94.63	63.41	35.31	47.93	$X_2 > X_3 > X_4 > X_5 > X_1$
2	40.00	228.42	78.55	35.71	53.54	$X_2 > X_3 > X_4 > X_1 > X_5$
平均变幅	51.62	169.59	54.21	47.04	44.02	$X_2 \gg X_3 \geq X_1 > X_4 \geq X_5$

从表4可以看出,除0水平外,其余水平下都是 X_2 函数变幅最大,其他因子间的差异明显减小,且施氮量的影响远大于其他因子;而在0水平下,施磷量对土壤硝态氮残留量影响最大,有机肥用量、施钾量和施氮量的影响相近,稍低于施磷量的影响。各水平下因子的平均效应大小依次为 X_2, X_3, X_1, X_4, X_5 ,而且 X_2 影响远大于其他因子,表明施氮量对土壤硝态氮残留量的影响明显比其他因子大,施磷量、灌水量和施钾量的影响次之,有机肥用量的影响最小。还可以看出,在-2和-1水平下, X_1 的变幅仅次于 X_2 ;在1和2水平下, X_3 的变幅仅次于 X_2 ,说明灌水量与施磷量对土壤残留硝态氮的影响程度与其他因子的水平有关。

2.3 单一因素对土壤硝态氮残留量的影响

由于试验设计满足正交性,模型中各项偏回归系数彼此独立。为了说明各因素的单独效应,对回归方程(1)进行降维处理,即固定其他因素为0水平,得各因素对土壤硝态氮残留量影响的一元二次偏回归模型,即:

$$\text{灌水量: } Y=180.23-19.19X_1-9.22X_1^2, \quad (2)$$

$$\text{施氮量: } Y=180.23+25.39X_2-5.80X_2^2, \quad (3)$$

$$\text{施磷量: } Y=180.23-22.49X_3+20.31X_3^2, \quad (4)$$

$$\text{施钾量: } Y=180.23-16.96X_4+18.50X_4^2, \quad (5)$$

$$\text{有机肥用量: } Y=180.23+16.73X_5-18.95X_5^2. \quad (6)$$

在试验设计的各因素水平范围内,随着施氮量(X_2)的增加,土壤硝态氮残留量持续增加,但增加幅度越来越小;随着施磷量(X_3)的增加,土壤硝态氮残留量先减少后增加;土壤硝态氮残留量对灌水量、施钾量和有机肥用量的响应为开口向下的抛物线(图1),表明随着灌水量、施钾量和有机肥用量的增多,土壤硝态氮残留量呈先增加后降低的趋势。从图1还可以看出,灌水量在次低(369 mm)水平以下,土壤硝态氮残留量小幅度增加,但在次低以后,可以显著降低土壤硝态氮残留量。

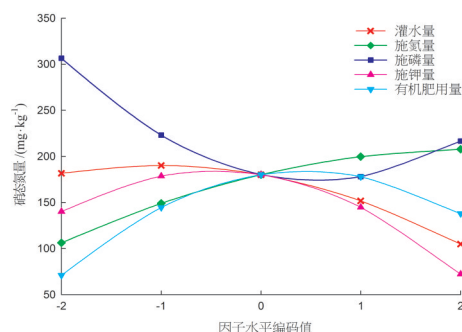


图1 试验因素对土壤硝态氮残留量的影响

2.4 二因素对土壤硝态氮残留量的耦合效应

对回归模型(1)进行降维,得到二因素对土壤硝态氮残留量的耦合效应模型,即:

$$Y=180.23-19.19X_1+25.39X_2-9.22X_1^2-5.80X_2^2-36.74X_1X_2, \quad (7)$$

$$Y=180.23-19.19X_1-22.49X_3-9.22X_1^2+20.31X_3^2+33.69X_1X_3, \quad (8)$$

$$Y=180.23-19.19X_1+16.73X_5-9.22X_1^2-18.95X_5^2+24.72X_1X_5, \quad (9)$$

$$Y=180.23+25.39X_2-22.49X_3-5.80X_2^2+20.31X_3^2-27.26X_2X_3, \quad (10)$$

$$Y=180.23+25.39X_2-16.96X_4-5.80X_2^2-18.50X_4^2+8.45X_2X_4, \quad (11)$$

$$Y=180.23+25.39X_2+16.73X_5-5.80X_2^2-18.95X_5^2-29.30X_2X_5, \quad (12)$$

$$Y=180.23-22.49X_3-16.96X_4+20.31X_3^2-18.50X_4^2-12.44X_3X_4, \quad (13)$$

$$Y=180.23-22.49X_3+16.73X_5+20.31X_3^2-18.95X_5^2-5.85X_3X_5, \quad (14)$$

$$Y=180.23-16.96X_4+16.73X_5-18.50X_4^2-18.95X_5^2+15.68X_4X_5. \quad (15)$$

采用 SigmaPlot 10.0 绘制响应图(图2)。

由耦合效应模型的交互项系数的正负可知,施氮量与灌水量、施磷量、有机肥用量,施磷量与施钾量、有机肥用量间的交互作用抑制土壤硝态氮的累积;灌水量与施磷量、有机肥用量,施钾量与施氮量、有机肥用量间的交互作用促进土壤硝态氮的累积。

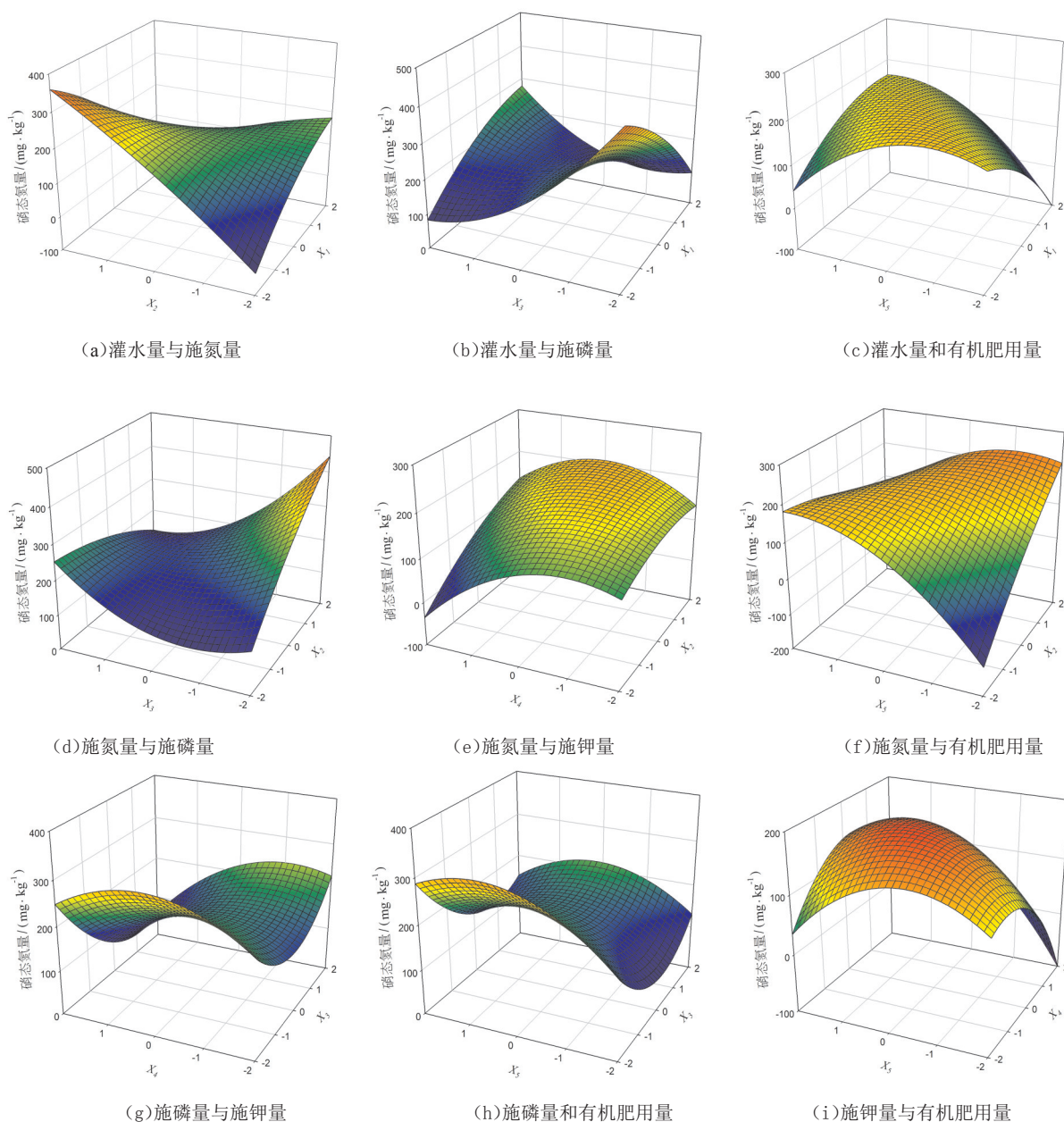


图2 二因素对土壤硝态氮残留量的交互影响

图2(a)中,随着施氮量不断增大,当灌水量不大于中间水平(456 mm)时,土壤硝态氮残留量不断增加;灌水量处于高水平时,变化规律相反;灌水量在中、次高水平(456~543 mm)之间时,土壤硝态氮残留量先增加后减少。随灌水量逐渐增大且施氮量小于低水平(285 kg/hm²)时,土壤残留硝态氮是逐渐增多的,但增幅变小;当施氮量处于中低水平(285~570 kg/hm²)时,土壤硝态氮残留量先增加减少;施氮量在中水平以上,土壤硝态氮残留量逐渐减少。

随着施磷量不断增大,灌水量处于低、次低水平(282~369 mm)时,土壤硝态氮残留量一直减少;灌水量处在次低、次高水平(369~543 mm)之间,土壤硝态氮残留量先减少后增加;灌水量大于543 mm时,土壤硝态氮残留量一直增加。当施磷量在中水平(438 kg/hm²)以下,随着灌水量逐渐增多,土壤硝态氮残留量逐渐减少;施磷量处在中高水平(438~876 kg/hm²)之间,土壤残硝态氮残留量先增加后减少;施磷量为高水平时,土壤硝态氮残留量逐渐增大(图2(b))。

图2(c)、图2(e)和图2(i)显示的二因素耦合效应有类似的变化规律。图2(c)中,无论灌水量处于哪个水平,随着有机肥用量的增多,土壤硝态氮残留量都呈先增加后减少的变化趋势;类似地,图2(e)中,不论施氮量在哪个水平,随着施钾量的增加,土壤硝态氮残留量呈现先增加后减少的趋势。同样地,无论施钾量处于哪个水平,随着有机肥用量的增多,土壤硝态氮残留量先增多后减少;同时,不论有机肥用量处于哪个水平,随着施钾量的增多,土壤残留硝态氮也呈先增大后减小的变化趋势(图2(i))。另外,随着灌水量增加,有机肥用量不大于12 t/hm²时,土壤硝态氮残留量逐渐减少;有机肥用量高于低水平(12 t/hm²)时,土壤硝态氮残留量先增加后减少,转折点随灌水量增大而后移,即有机肥施用量越大,其最高硝态氮量对应的灌水量也越大(图2(c))。随着施氮量逐渐增加,施钾量不大于369 kg/hm²时,土壤硝态氮残留量先增加后减少;施钾量大于369 kg/hm²时,土壤硝态氮残留量呈增加趋势(图2(e))。

随着施磷量逐渐增多,施氮量在中间水平(570 kg/hm²)以下时,土壤硝态氮残留量先减少后增加,且增幅变小;施氮量在中间水平(570 kg/hm²)以上时,土壤硝态氮残留量一直减少。随着施氮量逐渐增多,施磷量处在中水平(438 kg/hm²)以下时,土壤硝态氮残留量一直增多;施磷量在中高水平(438~876 kg/hm²)之间,土壤硝态氮残留量先增多后减少;施磷量在高水平(876 kg/hm²)时,土壤硝态氮残留量是一直减少的。土壤硝态氮残留量的最大值在不施磷和施氮量为最高水平时达到(图2(d))。

施氮量和有机肥用量耦合效应图表现为上凸曲面(图2(f))。随着有机肥用量增加,在不施氮时,土壤硝态氮残留量一直增多;施氮后,土壤硝态氮残留量呈先增多后减少的趋势。随施氮量增多,有机肥用量在中水平以下(0~24 t/hm²)时,土壤硝态氮残留量一直增加;有机肥用量在中、高水平之间(24~48 t/hm²)时,土壤硝态氮残留量先增多后减少;有机肥用量在高水平(48 t/hm²)时,土壤硝态氮残留量一直减少。

由图2(g)、图2(h)可知,无论施磷量处于哪个水平,随着施钾量、有机肥用量的增加,土壤硝态氮残留量均先增加后降低。类似地,不管施钾量、有机肥用量在任意水平变化,随施磷量的增多,土壤硝态氮残留量先减少后增加。可见,施钾量和有机肥用量对土壤硝态氮残留的影响均与施磷量有关。

2.5 土壤硝态氮残留量较低的水肥用量的确定

为了将土壤硝态氮量较低的水肥方案建立在可靠的基础上,根据所建立的数学模型(1),采用DPS 3.01进行模型寻优,可以得到土壤硝态氮量分布在0~50 mg/kg的方案316套,分布在50~100 mg/kg的方案410套,分布在100~150 mg/kg的方案430套,分布在150~200 mg/kg的方案413套,分布在200~250 mg/kg的方案273套,分布在250~300 mg/kg的方案176套,分布在大于300 mg/kg的方案371套。可见,土壤硝态氮量在100~150 mg/kg方案的频率分布最大。此时,各因子不同水平的频率分布见表5。因而在95%的置信水平下,灌水量455.1~471.5 mm,施氮量532.3~586.5 kg/hm²,施磷量420.8~466.4 kg/hm²,施钾量646.1~723.5 kg/hm²,有机肥用量25.6~27.9 t/hm²,耕层土壤硝态氮量可维持在100~150 mg/kg。本试验筛选出的优化灌水施肥方案,既考虑了方案的稳定性,又可使土壤硝态氮残留量达到符合实际的较小值。

表5 土壤硝态氮量分布在100~150 mg/kg的430个方案中各试验因子不同水平的频率分布

水平	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		X ₅	
	次数	频率	次数	频率	次数	频率	次数	频率	次数	频率
-2	56	0.130	62	0.144	73	0.170	94	0.219	44	0.102
-1	83	0.193	99	0.230	93	0.216	93	0.216	82	0.191
0	118	0.274	119	0.277	96	0.223	91	0.212	109	0.253
1	115	0.267	93	0.216	86	0.200	85	0.198	121	0.281
2	58	0.135	57	0.133	82	0.191	67	0.156	74	0.172
合计	430	1	430	1	430	1	430	1	430	1
$\bar{x}$	0.084		-0.037		0.026		-0.144		0.230	
S	0.047		0.048		0.052		0.052		0.047	
95%置信区间	-0.010~0.178 (455.1~471.5)		-0.132~0.053 (532.3~586.5)		-0.078~0.130 (420.8~466.4)		-0.249~-0.039 (646.1~723.5)		0.136~0.324 (25.6~27.9)	

注 95%置信区间即较低土壤硝态氮残留量对应的优化因子水平,括号中数据为优化因子水平编码值对应的实际水肥用量。

3 讨论

本研究中,各因子函数变幅值的结果说明施氮对耕层土壤硝态氮的残留影响程度远大于其他因子,施磷、灌水的影响程度次于施氮量,且施磷的影响程度大于灌水。大多数研究也显示施氮是导致土壤硝态氮累积的主要原因^[12,21-22]。但梁运江等^[23]报道,水、氮二因素对0~20 cm土层NO₃⁻-N累积影响较大,且灌水影响

程度大于施氮,而施磷量对0~20 cm土层 NO_3^- -N累积影响很小;王晓英等^[24]研究表明,在高肥力大田条件下,灌水是致使 NO_3^- -N累积的主导因素。因而,水肥各因子对土壤硝态氮残留的影响程度可能与供试土壤肥力、试验因素的水平及作物的吸收能力等因素有关。

试验条件下,单一因素对土壤硝态氮量影响的结果表明,灌水量在低、次低水平(282~369 mm)范围内,硝态氮量随灌水量增加而小幅度增多,但在次低水平(369 mm)以上,灌水量增大可以显著降低土壤硝态氮量。原因可能在于:在低水平下,灌水对土壤硝酸盐的淋洗效应很弱,而且此时灌水的增加会促进其他形态氮转化为硝态氮^[23]。而随着灌水量的进一步增大,其对硝酸盐的淋洗效应明显增强,导致0~20 cm土层中硝态氮减少。王晓英等^[24]研究得出:小麦全生育期降雨和灌水总量分别为288.5、348.5、408.5 mm的处理,收获后耕层土壤硝态氮量与降雨和灌水总量呈现出先略微增加后明显减少的趋势,这与本研究结果较为相似。

有机肥的施入对土壤硝态氮残留的影响一直是人们关注的问题。本试验结果显示,不施氮肥的情况下,土壤中硝态氮的残留量随有机肥用量的增多而增加,这与前人^[17,25]的研究结果一致。这一现象可能与鸡粪属速效性有机肥,其浓度高、分解快,在土壤中可以及时转化为无机养分^[26],在番茄拉秧后矿化产生的氮素没有被作物完全吸收,残留在土壤中有关。施氮的情况下,有机肥与施氮量的耦合效应表现为对土壤硝态氮累积的抑制作用。刘方春等^[27]研究也表明,有机肥和无机肥施入量高的处理较施入量低的处理,耕层硝态氮残留量少。原因可能在于,土壤中易分解的有机碳含量与土壤反硝化趋势之间有一定的正相关。有机肥的施用可显著增强土壤的反硝化潜势^[27],从而削弱施氮导致土壤硝态氮的累积效应。

本研究中,32个试验处理土壤硝态氮的实际测定值变化在49.88~331.67 mg/kg。这与试验水肥用量是基于当地温室番茄长季节栽培的水肥管理实际所设计的较高水平有关。在这样的水肥管理实际中,即使通过水肥用量优化,也仅能使土壤硝态氮量变化在100~150 mg/kg,仍远大于Ren等^[28]为维持土壤环境和番茄产量提出的34.5 mg/kg的标准。这与温室蔬菜地长期超过量施肥有密切关系,如在山东寿光温室蔬菜生产基地,氮肥多年平均投入量高达4 088 kg/hm²^[9],进一步暴露了我国温室蔬菜栽培中施肥过量的严重问题,应引起充分重视。

4 结 论

1)滴灌施肥条件下各因素对温室土壤硝态氮残留量的影响程度依次为:施氮量、施磷量、灌水量、施钾量、有机肥用量。2)单因子效应表现为:当其他因子为0水平时,土壤硝态氮残留量与施磷量呈开口向上的抛物线型变化,随灌水量、施钾量和有机肥用量呈开口先下的抛物线型变化,与施氮量呈现持续增加的趋势,但增幅逐渐变小。3)耦合效应表现为:施氮量与灌水量、施磷量、有机肥用量,施磷量与施钾量、有机肥用量间的交互作用抑制土壤硝态氮的累积;灌水量与施磷量、有机肥用量,施钾量与施氮量、有机肥用量间的交互作用促进土壤硝态氮的累积。4)在95%的置信水平下,灌水量455.1~471.5 mm,施氮量532.3~586.5 kg/hm²,施磷量420.8~466.4 kg/hm²,施钾量646.1~723.5 kg/hm²,有机肥用量25.6~27.9 t/hm²,耕层土壤硝态氮量可维持在100~150 mg/kg。

参考文献:

- [1] 左海军, 张奇, 徐力刚, 等. 农田土壤氮素径流损失的影响因素及其防治措施研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6):64-67.
- [2] 李静, 张富仓, 江明杰, 等. 水氮供应对温室黄瓜氮素吸收及土壤硝态氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3):52-58.
- [3] 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(2):159-162.
- [4] 王学军. 日光温室土壤次生盐渍化分析[J]. 北方园艺, 1998(Z1):12-13.
- [5] 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.
- [6] 刘磊. 蔬菜温室大棚土壤盐渍化成因分析[J]. 山东农业科学, 2012, 44(7):69-72.
- [7] 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的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2):126-128.
- [8] 袁巧霞, 武雅娟, 艾平, 等. 温室土壤硝态氮积累的温度、水分、施氮量耦合效应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10):192-198.
- [9] YU Haiying, LI Tingxuan, ZHANG Xizhou. Nutrient Budget and Soil Nutrient Status in Greenhouse System[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2010, 9(6):871-879.
- [10] 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):2 246-2 250.
- [11] 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.
- [12] 袁静超, 张玉龙, 虞娜, 等. 水肥耦合条件下保护地土壤硝态氮动态变化[J]. 土壤通报, 2011, 42(6):1 335-1 340.

- [13] ZHU J H, LI X L, CHRISTIE P, et al. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilizer hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 111(1):70-80.
- [14] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 节水减氮对温室土壤硝态氮与氮素平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(4):695-704.
- [15] 刘德平, 杨树青, 史海滨, 等. 氮磷钾平衡施肥对作物收获后土壤硝态氮残留的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(5):42-46.
- [16] 杨合法, 范聚芳, 梁丽娜, 等. 长期不同施肥模式对日光温室土壤硝态氮时空分布及累积的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2):246-252.
- [17] 张迪, 赵牧秋, 牛明芬, 等. 有机肥对设施土壤硝态氮垂直分布的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(5):1 148-1 152.
- [18] GREGORY E, CAROLINE S, JOHN S, et al. Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1/2):50-58.
- [19] 上海师范大学数学系概率统计教研组编. 回归分析及其试验设计[M]. 上海: 上海教育出版社, 1978:12-18.
- [20] 王小勇. 关于多元二次回归模型因子效应分析的一点改进意见[J]. *甘肃农业科技*, 1987(9):15-20.
- [21] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6):61-64.
- [22] 薛亮, 马忠明, 杜少平. 水氮耦合对绿洲灌区土壤硝态氮移及甜瓜氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1):139-147.
- [23] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应对保护地土壤硝态氮转移的影响[J]. *农村生态环境*, 2004, 20(3):32-36.
- [24] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(2):685-694.
- [25] 赵建生, 焦晓燕, 杨治平, 等. 有机肥料使用量对土壤环境、夏甘蓝产量和品质的影响[J]. *华北农学报*, 2006, 21(5):123-126.
- [26] 黄锦法, 李艾芬, 马树国, 等. 蔬菜保护地土壤障碍的调查及矫治措施[J]. *中国土壤与肥料*, 2002(2):42-44.
- [27] 刘方春, 聂俊华, 刘春生, 等. 不同施肥措施对土壤硝态氮垂直分布的特征影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(1):50-53.
- [28] REN T, CHRISTIE P, WANG J, 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.

Soil Nitrate Residue as Affected by the Amount of Water and Nitrogen Applications under Drip Fertigation

ZHANG Shaowu^{1,2}, HU Tiantian^{1,2*}, LIU Jie^{1,2}, FENG Puyu^{1,2}, ZHANG Meiling³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,
Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Inner Mongolia Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Hohhot 010020, China)

Abstract:【Objective】This study aims to study the impact of the amount of water and nitrogen applications under drip fertigation on nitrate residue in soil in an attempt to find the optimal fertigation that maintains soil fertility and in the meantime increase nitrogen use efficiency.【Method】The experiment was conducted in a greenhouse with tomato as model plant. We considered the combined effect of irrigation, K, P, N and organic fertilizers under a design using the quadratic regression orthogonal rotational method. In each treatment, the nitrate content in the plough layer was determined after harvest, which was linked to each of the five factors.【Result】Nitrate residue in soil was affected mostly by nitrogen application, followed by phosphorus, irrigation and potassium; it was least impacted by organic fertilizer application. When the other factors were at kept 0 level, nitrate residue in soil increased with nitrogen application, parabolically (upward) with phosphorus application, parabolically (downward) with irrigation, potassium and organic fertilizer application. The influence of each of the five factors on soil nitrate residue depended on interaction of the levels of the other factors. In our experiment, the optimum fertilization for keeping nitrate residue in soil at 100~150 mg/kg in the plough layer was as follows: irrigation 455.1~471.5 mm, N application 532.3~586.5 kg/hm², P application 420.8~466.4 kg/hm², K application 646.1~723.5 kg/hm², and organic fertilizer application 25.6~27.9 t/hm².【Conclusion】The nitrate residue in the greenhouse soil is generally high, but can be reduced by optimizing the amount of irrigation and fertilizer applications as revealed by our experimental results.

Key words: irrigation amount; Nitrogen, phosphorus, potassium and organic fertilizer application rates; soil nitrate N residue; solar greenhouse; quadratic general composite rotatable design

责任编辑: 赵宇龙