

## 温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究

陈修斌, 潘林, 王勤礼, 谢鑫星

(甘肃河西学院园艺系, 甘肃 张掖 734000)

**摘要:** 采用三因素二次回归通用旋转组合设计, 研究了灌水量、氮肥、钾肥的耦合效应对番茄的影响, 得到番茄产量对三因素的回归数学模型。结果表明: 三因素影响番茄产量的顺序依次为施氮量、灌水量、施钾量, 各因素间存在交互作用。经计算机模拟得出, 番茄产量达到最高值  $89.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 其对应的灌水量、施氮量和施钾量分别为  $2\ 637.2 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $374.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $51.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。对模拟结果进行的验证试验表明, 模型优选所得到配施方案的番茄产量最高。

**关键词:** 温室番茄; 水肥耦合; 数学模型; 优化方案

中图分类号: Q945.12; S641.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-2030 (2006) 03-0138-04

## Water-fertilizer coupling effects and its optimization in greenhouse tomato production

CHEN Xiu-bin, PAN Lin, WANG Qin-li, XIE Xin-xing

(Department of Horticulture, Gansu Hexi College, Zhangye 734000, China)

**Abstract:** Using quadratic general revolving combination design with 3 factors, the effects of irrigation, nitrogen and potassium fertilization on greenhouse tomato were investigated and quantified. The results showed that tomato yield was affected strongest by nitrogen, then by irrigation and potassium. There was interaction between each factor. Highest tomato yield was obtained ( $89.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) when the quantity of irrigation, nitrogen and potassium were  $2\ 637.2 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $374.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $51.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively, which agreed with the optimization result of the regression model.

**Key words:** greenhouse tomato; water-fertilizer coupling; mathematics model; optimization scheme

番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 是我国北方地区温室栽培的主要蔬菜之一。近年来, 随着国家实施黑河流域节水分流的战略措施以来, 河西走廊水资源匮乏的现象更加突出。温室蔬菜生产主要依靠肥水的大量投入来提高产量, 不合理灌水、施肥不仅造成水资源和肥料的浪费, 还导致蔬菜发病率高、品质下降、土壤硝酸盐淋失、微量元素缺乏及环境污染。对农作物的水肥耦合技术已有研究<sup>[1-2]</sup>。也有研究表明, 养分和水分结合起来能有效提高水肥资源的利用率<sup>[3-4]</sup>, 但这些研究大多集中于旱地作物。本研究以番茄为材料, 分析灌水量、氮肥及钾肥施用量与番茄产量的关系, 定量研究水肥对番茄产量和水肥耦合效应的影响, 从而为番茄高产、优质、高效栽培及温室节水灌溉提供依据。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 试验地概况及试验材料

试验于 2004 年在甘肃省张掖市新墩镇蔬菜基地的第二代日光温室中进行, 温室长度 52 m, 跨度 7.5 m, 脊高 3.5 m, 后坡水平投影长度 1.5 m, 墙体为 1.5 m 厚的土墙, 低温季节加盖草帘保温, 高温季节通风换气, 设施内温度调控在白天 20 ~ 30 °C, 夜间 15 ~ 20 °C, 以利于番茄生育。供试番茄品种为中杂 8 号。供试土壤为灌漠土, 0 ~ 20 cm 耕层土壤有机质含量  $12.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾  $0.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $60.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $9.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $140.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , pH 值 7.25。播前采集 0 ~ 20 cm 各处理 3 个重复的混合土样, 自然风干, 分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛。测定项目及方法<sup>[5]</sup>: 土壤有机质 (重铬酸钾法)、全氮 (开氏定氮法)、全磷 (酸溶-钼

收稿日期: 2005-10-31

基金项目: 甘肃省教育厅科研资助项目 (048B-02)

作者简介: 陈修斌 (1968-), 硕士, 副教授, 主要从事设施园艺方向的研究, E-mail: chenxiubin@hxa.edu.cn.

铈抗比色法)、全钾(氢氧化钠碱熔-火焰光度法)、碱解氮(扩散法)、速效磷(碳酸氢钠浸提-钼铈抗比色法)、速效钾(火焰光度计法)、pH值(酸度计法)、土壤质地(甲种比重计法)。

1.2 试验设计

试验采用三因素二次回归通用旋转组合设计<sup>[6]</sup>，以产量为目标函数，以灌水量、施氮量、施钾量为因变量，构建数学模型。三因素不同水平的编码值见表1。

表1 水肥试验因素编码水平

Table 1 Code level of the water-fertilizer experiments

变量 Variation	变化间距 Variational distance	编码水平 Code level				
		-1.682	-1	0	+1	+1.682
$X_1$ (H <sub>2</sub> O) /m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	312.2	1 800.0	2 012.8	2 325.0	2 637.2	2 850.0
$X_2$ (N) /kg·hm <sup>-2</sup>	111.3	0	75.8	187.1	298.4	374.1
$X_3$ (K <sub>2</sub> O) /kg·hm <sup>-2</sup>	76.1	0	51.6	127.7	203.8	255.6

试验设20个处理，采用高畦栽培，各处理小区面积6.0 m×1.0 m，小区之间埋50 cm塑料薄膜隔离，以防止小区之间水分和养分相互影响。每畦定植2行，株、行距分别为0.3 m和0.4 m，每穴1株，保苗76 500株·hm<sup>-2</sup>。滴灌管布置在中间，滴头间距0.3 m，滴头距植株0.10 cm，滴头流量0.96 L·h<sup>-1</sup>。每次灌水前后测定各处理土壤含水量，作为灌溉依据。

供试肥料：氮肥为尿素(含氮46%，利用率40%)、钾肥为硫酸钾(含氧化钾50%，利用率35%)。氮肥30%做基肥，追肥平均分2次，分别在结果初期、结果盛期施入；钾肥50%做基肥，50%在结果初期1次施入；试验前各处理磷肥做基肥1次施入。其他田间管理同常规生产。2004年1月6日播种育苗，3月15日定植，4月10日开花，5月13日开始采收果实，7月22日拉秧。采收时按各处理分别统计产量。试验处理见表2。

表2 各试验处理

Table 2 The experiment treatment

处理 Treatment	$X_1$ (H <sub>2</sub> O)	$X_2$ (N)	$X_3$ (K <sub>2</sub> O)	处理 Treatment	$X_1$ (H <sub>2</sub> O)	$X_2$ (N)	$X_3$ (K <sub>2</sub> O)
1	1	1	1	11	0	1.682	0
2	1	1	-1	12	0	-1.682	0
3	1	-1	1	13	0	0	1.682
4	1	-1	-1	14	0	0	-1.682
5	-1	1	1	15	0	0	0
6	-1	1	-1	16	0	0	0
7	-1	-1	1	17	0	0	0
8	-1	-1	-1	18	0	0	0
9	1.682	0	0	19	0	0	0
10	-1.682	0	0	20	0	0	0

注：表2中“1、-1、0、-1.682、1.682”代表各因子不同水平的编码值，见表1。In Table 2, “1, -1, 0, -1.682, 1.682” stand for different coding value of each factors in Table 1.

2 结果与分析

2.1 产量目标函数数学模型的建立与检验

根据表3结果，以产量为目标函数(Y)，以灌水量( $X_1$ )、施氮量( $X_2$ )、施钾量( $X_3$ )为控制变量，用计算机对数据进行处理，得到番茄产量对三因素的回归模型： $Y = 82.07 + 1.82X_1 + 4.48X_2 + 1.33X_3 - 1.56X_1^2 - 1.16X_2^2 - 2.05X_3^2 + 0.67X_1X_2 + 0.50X_1X_3 - 3.51X_2X_3$ 。经显著性检验， $F_1 = 2.12 < F_{0.05}(5, 5) = 5.05$ ，失拟不显著，拟合很好； $F_2 = 12.02 > F_{0.01}(9, 10) = 5.26$ ，方程回归显著。 $F$ 检验说明产量与各因素拟合很好，方程有效，可以进行效应分析及预测。剔除 $\alpha = 0.10$ 不显著项后，简化的回归方程为： $Y = 82.07 + 1.82X_1 + 4.48X_2 + 1.33X_3 - 1.56X_1^2 - 1.16X_2^2 - 2.05X_3^2 - 3.51X_2X_3$ 。

2.2 各因素及其交互作用与产量之间的关系

2.2.1 主效应分析 由于设计中各因素均经无量纲线性编码处理<sup>[6]</sup>，各偏回归系数不受因素取值的大小和单位的影响，即已经标准化，其绝对值的大小直接反映变量对产量的影响程度。从回归模型中可以看出，回归系数绝对值的大小依次为 4.48、1.82、1.33，可得出本试验中三因素对产量影响的顺序依次为  $X_2$ 、 $X_1$ 、 $X_3$ ，即施氮量、灌水量、施钾量。

2.2.2 单因子效应分析 将回归模型中的灌水量、施氮量、施钾量 3 因子中的 2 个固定在零水平，求得单因素对产量的偏回归子模型：灌水量： $Y_1 = 82.07 + 1.82X_1 - 1.56X_1^2$ ；施氮量： $Y_2 = 82.07 + 4.48X_2 - 1.16X_2^2$ ；施钾量： $Y_3 = 82.07 + 1.33X_3 - 2.05X_3^2$ 。分别对其求导，令  $dY_i/dX_i = 0$  ( $i = 1, 2, 3$ )，求  $Y_i$  达极大值时各要素单独施用的最适量，可得  $X_1 = 0.583$ ， $X_2 = 1.631$ ， $X_3 = 0.324$ 。并据其描绘出相应变化曲线（图 1），分别获得各因素在不同水平下的产量预测值。灌水量、氮肥、钾肥与番茄产量之间呈抛物线关系，在较低水平下，边际产量较大，产量迅速提高。 $X_1$  编码值为 0.583 时，边际产量趋近于零，产量达最高，之后边际产量转化为负值，产量开始下降，出现随灌水量的增加而减产的现象。氮、钾肥对番茄产量的变化趋势和灌水量相似，但在其施肥水平分别高于或低于极值点 1.631 和 0.324 时，番茄产量都会降低。这主要是由于营养不足或肥料浓度较高时，同化作用受到抑制所致<sup>[7-8]</sup>。

2.2.3 三因子的交互效应分析 通过对产量模型的解析，分别得到灌水量与施氮量、灌水量与施钾量、施氮量与施钾量的交互效应。灌水量与施氮量的交互效应分界点为： $X_1 = 0.500$ ， $X_2 = 1.341$ ，灌水量与施钾量的为： $X_1 = 0.500$ ， $X_3 = 0$ ，施氮量与施钾量的为： $X_2 = 1.683$ ， $X_3 = -1.343$ ，低于此水平时与产量存在正相关关系，高于此水平时呈负相关关系。通过对产量模型的解析，得出最佳组合：灌水量、施氮量、施钾量分别为  $2\ 637.2\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 、 $374.1\ kg \cdot hm^{-2}$  和  $51.6\ kg \cdot hm^{-2}$ ，番茄产量可达到最高值  $89.15\ t \cdot hm^{-2}$ 。

3 模型验证

3.1 试验概况与试验设计

试验于 2005 年 3 月 9 日在原试验地进行。供试土壤为灌漠土，0~20 cm 耕层土壤有机质含量  $12.50\ g \cdot kg^{-1}$ ，碱解氮  $62.50\ mg \cdot kg^{-1}$ ，速效磷  $9.64\ mg \cdot kg^{-1}$ ，速效钾  $142.54\ mg \cdot kg^{-1}$ ，pH 值 7.21。

试验共设 3 个处理（表 4），分别为依据模型得到的最佳组合 A、最差组合 B 和生产上常用灌水施肥量（对照），各处理设置同 1.2 部分，重复 3 次，随机排列。进行模型的验证试验。

表 3 各处理产量

Table 3 The yield of different treatments

处理 Treatment	产量/ $t \cdot hm^{-2}$ Yield	处理 Treatment	产量/ $t \cdot hm^{-2}$ Yield
1	83.51	11	85.22
2	87.50	12	68.63
3	81.18	13	77.12
4	70.42	14	72.02
5	76.60	15	81.03
6	82.05	16	84.11
7	76.15	17	80.01
8	68.26	18	80.22
9	77.78	19	82.24
10	74.02	20	83.46

注：表中同一处理的产量为 3 次重复的平均值。The yield of the same treatment was the average of three repeats.

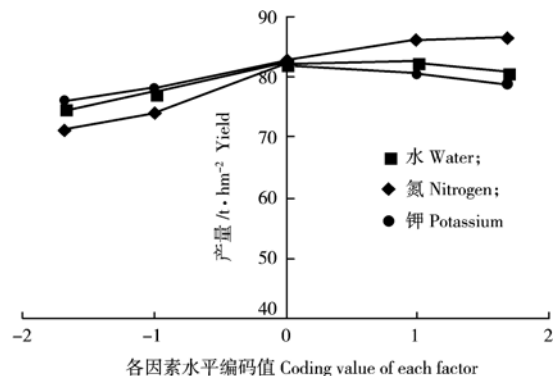


图 1 各单因素对产量的影响

Fig. 1 Effect of single factor on the yield

在其施肥水平分别高于或低于极值点 1.631 和 0.324 时，番茄产量都会降低。这主要是由于营养不足或肥料浓度较高时，同化作用受到抑制所致<sup>[7-8]</sup>。

表 4 各处理灌水量、氮肥、钾肥施用量

Table 4 The application rate of irrigation water, nitrogenous fertilizer and potassium fertilizer of every treatment

处理 Treatment	$X_1$ ( $H_2O$ ) / $m^3 \cdot hm^{-2}$	$X_2$ (N) / $kg \cdot hm^{-2}$	$X_3$ ( $K_2O$ ) / $kg \cdot hm^{-2}$
A	2 637.2	374.1	51.6
B	2 850.0	75.9	51.6
CK	2 741.1	306.5	138.6

### 3.2 试验结果与分析

由表5可以看出, 番茄产量从大到小依次为处理A、CK、处理B, 差异达极显著水平。说明由模型选优所得灌水量、氮肥和钾肥配比的番茄产量最高, 栽培效果明显优于其他配比。生产上普遍采用的水肥用量<sup>[9-11]</sup>, 产量居中, 而由模型选出的较差组合产量最低, 说明水肥配比失衡, 影响了番茄生长发育。由此证明, 构建的模型准确可靠。

表5 不同处理对番茄产量的影响

Table 5 Effect of different treatment on tomato yield

处理 Treatment	小区产量/kg Yield per plot	产量/t · hm <sup>-2</sup> Yield
A	52.93	88.26 <sup>A</sup>
B	40.05	66.78 <sup>C</sup>
CK	45.85	76.45 <sup>B</sup>

## 4 结论

在本研究的土壤肥力条件下, 建立了番茄产量与灌水量、施氮量、施钾量三因素之间的数学模型, 经检验达到了显著水平, 可用于预报和指导生产。得出番茄产量达到最高值 89.15 t · hm<sup>-2</sup>时, 其相对应灌水量、施氮量、施钾量分别为 2 637.2 m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup>、374.1 kg · hm<sup>-2</sup>和 51.6 kg · hm<sup>-2</sup>。三因素对番茄产量的影响顺序依次为施氮量、灌水量、施钾量。经验证由模型选优所得灌水量、施氮量和施钾量配比的番茄产量最高。

在本试验中, 初步探讨了灌水量、施氮量、施钾量与番茄产量的关系, 而这三因素对番茄的品质及磷肥与三因素之间综合对番茄产量的影响, 尚需进一步试验研究。

### 参考文献:

- [1] 黄得明, 白刚义, 樊淑文. 蔬菜配方施肥 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 115-116
- [2] 杨丽娟, 张玉龙, 须晖. 设施栽培条件下节水灌溉技术 [J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 130-132
- [3] Li Wenqing, Zhang Min, van der Zee S. Salt contents in soils under plastic greenhouse gardening in China [J]. Pedosphere, 2001, 11(4): 359-367
- [4] 汪建飞, 邢素芝, 于群英, 等. 结球甘蓝 NPKg 肥配施数学模型的研究 [J]. 土壤, 2004, 36(4): 412-415, 429
- [5] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980
- [6] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 366-385
- [7] 葛晓光. 菜田土壤与施肥 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 259-261
- [8] 邹长明, 秦道珠, 徐明岗, 等. 水稻的氮磷钾养分吸收特性及其与产量的关系 [J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 6-10
- [9] 顾斌杰, 杨广欣, 张敦强, 等. 雨水集蓄利用技术与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- [10] 陈修斌, 邹志荣, 姚静, 等. 日光温室西葫芦水肥耦合效应量化指标的研究 [J]. 西北农林科技大学学报, 2004, 32(3): 49-52
- [11] 井立军, 邹志荣, 刘建辉, 等. 中棚番茄产量的氮磷钾效应模式及最优施肥参数的确定 [J]. 华北农学报, 1999, 14(3): 86-90

责任编辑: 范雪梅