

温室辣椒水肥耦合效应研究^①

杨 彬，陈修斌，鄂利锋，许耀照

(河西学院农学系，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、施N量、施K量的耦合效应对辣椒产量的影响，得到辣椒产量对3因素的回归数学模型。结果表明：3因素影响辣椒产量的顺序为施N量>灌水量>施K量。各因素间存在交互作用，灌水量与施N量、灌水量与施K量、施N量和施K量在低于0.500和1.682、0.501和0.000、1.685和-1.345水平时对产量存在正相关关系，在分别高于以上水平时又会呈负相关关系。经过计算机模拟，得到辣椒最高产量达52.75 t/hm²时，相对应的灌水量、施N量、施K量分别为2627.2 m³/hm²、2156.3 kg/hm²、580.3 kg/hm²。对试验结果进行的验证表明，构建的模型准确可靠。

关键词：辣椒；水肥耦合；量化指标；温室

中图分类号：S641.3; S626.5

辣椒是我国北方地区温室栽培的主要蔬菜之一。多年来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，导致辣椒发病率高、品质下降，而且土壤硝酸盐淋失，微量元素缺乏及环境的污染。近年来，国内外对农作物实施水肥耦合技术的大量研究^[1-4]，取得了很大的成绩。大量研究证明养分和水分结合起来能有效提高水肥资源的利用率，但这些研究大多集中于旱地作物^[5-6]。而在温室滴灌条件下，辣椒的水肥耦合技术研究尚稀见系统报道。在河西走廊灌漠土栽培条件下，土壤中P的含量充足，作物生长的3要素中，N、K肥的用量因而成为影响作物产量的重要因子。本研究以辣椒为材料，分析灌水量、施N量及施K量与辣椒产量的关系，定量研究水肥耦合效应对辣椒产量的影响，从而为温室辣椒的节水节肥、高产优质高效栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2006—2007年在甘肃张掖市新墩镇蔬菜基地温室进行。温室长度55 m，跨度8 m，脊高3.8 m，后坡水平投影长度1.3 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℃，夜间14~20℃，空气相对湿度保持75%~85%。供试土壤类型为灌漠土，其体积

碱解N 76.50 mg/kg，速效P 15.28 mg/kg，速效K 167.38 mg/kg，pH为7.42。

1.2 供试材料

目前温室主栽品种陇椒2号。

1.3 试验方法

试验采用三因素二次回归通用旋转组合设计^[7]，以产量为目标函数，以灌水量(H₂O, m³/hm²)、施N量(N, kg/hm²)、施K量(K₂O, kg/hm²)3因素为因变量，构建数学模型。3因素不同水平的编码值见表1。

表1 全生育期灌水量、N肥及K肥用量试验因素水平编码

Table 1 Codes and levels of experimental factors in growing period of pepper

变量	灌水量 (t/hm ²)	尿素 (kg/hm ²)	硫酸钾 (kg/hm ²)
+r	2976.0	2156.3	2862.4
+1	2627.2	1719.2	2282.1
0	2116.2	1078.2	1431.2
-1	1605.2	437.2	580.3
-r	1256.4	0	0

试验设计共20个处理，采用高畦栽培，每处理畦底宽60 cm，上口宽40 cm，长6 m，小区面积6 m²，栽培密度33 cm×40 cm，每小区约42穴，每穴2株，

①基金项目：甘肃省教育厅硕士生导师科研项目(0709—05)资助。

作者简介：杨彬(1977—)，男，甘肃景泰人，讲师，硕士研究生，主要从事设施园艺方向的研究。E-mail: yangbinjqx@163.com

同，分别计算滴灌延续时间，然后用闸阀控制，精确记载流量、灌水量。每次灌水前后测定各处理土壤含水量，作为灌溉依据。N 肥采用尿素，30% 做基肥进行条施，70% 做追肥平均分 2 次，分别在开花结果初期、盛 期穴施；K 肥采用硫酸钾，其用量 50% 做基肥进行条施，剩下 50% 在结果初期采用穴施一次施入。N、K 肥料的施用量见表 1。其它田间管理同常规生产。2006 年 9 月 6 日播种育苗，11 月 10 日定植，12 月 20 日开花结果，翌年 5 月 22 日拉秧。试验处理方案见表 2。

表 2 各试验处理方案

Table 2 Scheme of experimental treatments

处理	$x_1(\text{H}_2\text{O})$	$x_2(\text{N})$	$x_3(\text{K}_2\text{O})$
1	1	1	1
2	1	1	-1
3	1	-1	1
4	1	-1	-1
5	-1	1	1
6	-1	1	-1
7	-1	-1	1
8	-1	-1	-1
9	r	0	0
10	-r	0	0
11	0	R	0
12	0	-r	0
13	0	0	r
14	0	0	-r
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

为了确保模型的可靠性和准确性，试验依据模型寻优得到的最佳组合A、最差组合B和生产上一般灌水施肥量CK，共设 3 个处理，各处理设置同前，重复 3 次，采用随机区组排列设计，进行模型的验证试验，试验于 2007 年 5 月至 11 月在原试验温室进行。供试品种为陇椒 2 号，土壤养分含量为碱解N 80.20 mg/kg、速效 P_2O_5 18.36 mg/kg、速效 K_2O 169.80 mg/kg。各处理灌水量、N肥、K肥施用量见表 3。

表 3 各处理灌水量、N 肥及 K 肥施用量

Table 3 Amounts of irrigated water, applied nitrogen

and potassium fertilizers

处理	$x_1(\text{H}_2\text{O})$ ($\times 10^4 \text{kg/hm}^2$)	$x_2(\text{N})$ (kg/hm^2)	$x_3(\text{K}_2\text{O})$ (kg/hm^2)
A	262.7	2156.3	580.3
CK	281.3	1078.2	1431.2
B	160.5	437.2	580.3

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 4 试验产量结果，以产量为目标函数 (y)，以灌水量 (x_1)、施N量 (x_2)、施K量 (x_3) 3 因素为控制变量，对数据进行计算机处理，得到辣椒产量对 3 因素的回归数学模型： $y = 45.28 + 1.81 x_1 + 4.46 x_2 + 1.36 x_3 - 1.56 x_1^2 - 1.11 x_2^2 - 1.89 x_3^2 + 0.65 x_1 x_2 + 0.62 x_1 x_3 - 3.46 x_2 x_3$ 。经显著性检验： $F_1 = 2.598 < F_{0.05} = 5.05$ ，失拟不显著，拟合很好。 $F_2 = 11.760 > F_{0.01} = 4.94$ ，表明方程回归关系达到极显著水平。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，简化后的回归方程为： $y = 45.28 + 1.81 x_1 + 4.46 x_2 + 1.36 x_3 - 1.56 x_1^2 - 1.11 x_2^2 - 1.89 x_3^2 - 3.46 x_2 x_3$ 。

表 4 各处理产量结果

Table 4 Pepper yields of different treatments

处理	产量 (t/hm^2)	处理	产量 (t/hm^2)
1	47.15	11	48.76
2	50.81	12	32.16
3	44.74	13	40.82
4	33.93	14	35.56
5	40.16	15	44.47
6	45.52	16	47.21
7	39.65	17	43.82
8	32.02	18	43.36
9	40.76	19	45.36
10	37.45	20	47.11

注：表中同一处理的产量为 3 次重复的平均值。

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 回归模型本身已经过无量纲形编码代换，其偏回归系数已经标准化，故可以直接从其绝对值的大小来判断各因素对目标函数的相对重要性。因此，3 因素对产量的影响程度大小为 $x_2 > x_1 > x_3$ ，即施N量 > 灌水量 > 施K量。

2.2.2 单因子效应分析 将回归模型中的灌水量、施 N 量、施 K 量 3 因子中的两个固定在 0 水平，求得

单因素对产量的偏回归模型。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。

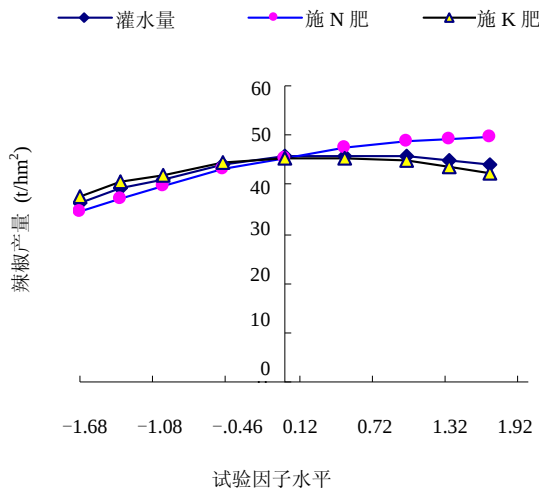


图 1 灌水量、施 N 及 K 量与辣椒产量的效应曲线

Fig. 1 Effect curves between pepper yield and H_2O , N and K fertilizers

灌水量: $y = 45.28 + 1.81x_1 - 1.56x_1^2$

施 N 量: $y = 45.28 + 4.46x_2 - 1.11x_2^2$

施 K 量: $y = 45.28 + 1.36x_3 - 1.89x_3^2$

分别对其求导, 令 $dy_i/dx_i = 0$, 求得 y_i 达极大值时各要素单独施用的最适量, 可得 $x_1 = 0.580$, $x_2 = 2.009$, $x_3 = 0.360$ 。辣椒对土壤 N 肥的反应比较敏感, 在 N 肥较低水平下, 边际产量较大, 产量迅速提高, x_1 编码值为 0.580 时, 边际产量趋近于 0, 产量达最高, 之后边际产量转化为负值, 产量开始下降, 出现随施 N 量的增加而减产的现象。灌水量的变化趋势和施 N 量相似, 但

变化更剧烈, K 的极值点 $x_2 = 2.009$, 超过了本实验方案最高水平 1.682, 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^[8]。K 肥在 $x_3 = 0.360$ 时产量最高, 低于或高于此水平产量都会降低。

2.2.3 3 因子的交互效应分析 实验中 3 因子之间对产量的影响有明显的交互耦合作用。按薛尔维斯德多元函数极值判别法则^[9], 通过对产量模型的解析, 分别得到灌水量与施 N 量、灌水量与施 K 量、施 N 量和施 K 量的交互效应分界点, 其交互点值分别为 0.500 和 1.682、0.501 和 0.000、1.685 和 -1.345, 在其低于此相应水平时对产量存在正相关关系, 高于此水平时又会呈负相关关系

2.2.4 灌水量、施 N 量、施 K 量的优化组合及相应产量 通过对产量模型的解析, 分析了灌水量、施 N 量、施 K 量各因子对产量的影响程度, 得出 3 因子的取值分别为 1、1.682、-1, 其相对应灌水量、施 N 量、施 K 量分别为 2627.2 t/hm^2 、 2156.3 kg/hm^2 、 580.3 kg/hm^2 时, 以此量化指标栽培辣椒, 产量可达到最高值 52.75 t/hm^2 。

2.2.5 模型验证试验结果 根据表 3 试验设计得到如下结果(表 5), 由表 5 可以看出, 不同施肥量对温室辣椒产量影响很大, 各处理产量 $A > CK > B$, 差异达极显著水平。说明由模型选优所得灌水量、施 N 量和施 K 量配比的产量最高, 施肥成本、施肥利润、肥料投资效率分别为 $0.57 \times 10^4 \text{ 元/hm}^2$ 、 $1.30 \times 10^4 \text{ 元/hm}^2$ 和 2.28 元/元, 栽培效果明显优于其他配比。生产上普遍采用的肥水量, 产量居中^[10-11], 而由模型选出的较差组合产量最低, 说明灌水量、施 N 量、施 K 量配比失衡, 影响了辣椒生长发育。由此证明, 构建的模型准确可靠。

表 5 不同处理对辣椒产量的影响

Table 5 Effects of different treatments on pepper yield

处理	小区产量 (kg/区)	产量 (t/hm ²)	增产量 (t/hm ²)	增产值 ($\times 10^4$ 元/hm ²)	肥水成本 ($\times 10^4$ 元/hm ²)	肥水利润 ($\times 10^4$ 元/hm ²)	肥水投资效率 (元/元)
B	45.42	75.04 bC					
A	52.68	86.71 aA	11.67	1.87	0.57	1.30	2.28
CK	48.21	80.39 bB	5.35	0.86	0.28	0.58	2.07

注: 辣椒、水肥料价格: 辣椒 1600 元/t, 尿素 1250 元/t, 水 0.8 元/m³, 硫酸钾 1620 元/t。

3 结论与讨论

在本试验条件下, 得出了滴灌温室辣椒水肥耦合模型, 经检验达到了显著水平, 可以用于预报和指导生产。模型验证试验结果表明: 由模型选优所得最佳

的灌水量、施 N 量和施 K 量配比的产量最高, 而由模型选出的较差组合产量最低, 说明肥料有明显的调水作用, 灌水也有显著的调肥作用^[12], 最佳的肥水用量可以促进植株的生育, 提高产量。试验证明, 水、N、K

3 因素影响辣椒产量的顺序为施N量>灌水量>施K量。这一结果表明: 辣椒对营养元素的吸收量是N大于K, 与前人关于辣椒对营养元素的吸收量的大小研究的结果相吻合^[13]。在本试验中, 水分成为影响辣椒产量居N素后的第二因子, 说明在辣椒的生长过程中, N素对辣椒生长发育及产量的影响程度高于水分的影响。

试验结果证明, 辣椒产量达到最高值 52.75 t/hm² 时, 相对应的灌水量、施N量、施K量分别为 2627.2 t/hm²、2156.3 kg/hm²、580.3 kg/hm²。各因素间存在交互作用, 分别得到灌水量与施N量、灌水量与施K量、施N量和施K量的交互效应分界点。其交互点值分别为 0.500 和 1.682、0.501 和 0.000、1.685 和 -1.345, 在其低于此相应水平时对产量存在正相关关系, 高于此水平时又会呈负相关关系。

在本试验中, 初步探讨了灌水量、施 N 量、施 K 量与辣椒产量的关系, 而这 3 因素对番茄的品质及 P 肥与 3 因素之间综合对辣椒产量的影响, 尚需进一步试验研究。

参考文献:

- [1] 张振贤, 张福漫. 我国设施园艺相关生理研究进展. 农业工程学报, 2002, 18: 117-123
- [2] 杨丽娟, 张玉龙, 须晖. 设施栽培条件下节水灌溉技术. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 130-132
- [3] 冯绍元, 王广兴. 滴灌棉花水肥耦合效应的田间试验研究. 中国农业大学学报, 1998, 3(6):59-62
- [4] Phene CJ, Hutmacher RB, Davis KR. Water fertilizer management of processing tomatoes. Acta Hort., 1990, 277: 137-193
- [5] Baselga Yrisarry JJ. Response of processing tomato to three different levels of water and nitrogen application. Acta Hort., 1993, 335: 149-153
- [6] Smatsria AG, Locascio SJ. Tensiometer-controlled, drip-irrigation scheduling of tomato. Applied Engineering in Agriculture, 1996, 12(3): 315-319
- [7] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析. 北京: 高等教育出版社, 2000: 366-385
- [8] 葛晓光. 菜田土壤与施肥. 北京: 中国农业出版社, 2002: 259-261
- [9] 穆兴民. 水肥耦合效应与协同管理. 北京: 中国林业出版社, 1999: 142-143
- [10] 顾斌杰, 张敦强, 潘云生, 杨广欣. 雨水集蓄利用技术与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- [11] 井立军, 邹志荣, 刘建辉, 张合一, 刘晓辉. 中棚番茄产量的氮磷钾效应模式及最优施肥参数的确定. 华北农学报, 1999, 14: 86-90
- [12] 康绍忠. 新的农业科技革命与 21 世纪我国节水农业的发展. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 11-17
- [13] 张竹青. 辣椒优质高产施肥技术研究进展. 辣椒杂志, 2007(3): 36-39

The Effect of Water-Fertilizer Coupling on the Quantitative Index of Pepper in Greenhouse

YANG Bin, CHEN Xiu-bin, E Li-feng, XU Yao-zhao

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

Abstract: By means of the quadratic general rotary unitized design, the comprehensive effects of H₂O, N and K₂O fertilizers on pepper yield were studied, three water-fertilizer coupling regression models demonstrating the relationships between the yield and the factors were established. Results showed that: The increasing effect of three factors on pepper yield was in an order of N>H₂O>K₂O. There were interactions between the factors, positive correlations existed between H₂O and N, H₂O and K₂O, N and K₂O at the levels lower than 0.500 and 1.682, 0.501 and 0.000, 1.685 and -1.345 respectively, but negative correleations existed when higher than the above levels. Computer simulation showed that the highest pepper yield was 52.75 t/hm² with the corresponding amounts of water irrigation, applied nitrogen and potassium fertilizers of 2,627.2 m³/hm², 2,156.3 kg/hm² and 580.3 kg/hm² respectively. The estalished models were verified to be accurate and reliable.

Key words: Pepper, Water-fertilizer coupling, Quantitative index, Greenhouse