

滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响

杜清洁, 李建明, 潘铜华, 常毅博, 刘国英, 王鹏勃, 郑 刚
(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 以番茄为材料, 采用正交设计, 研究了滴灌条件下水肥耦合对番茄产量和品质的影响。利用层次分析法对果实品质进行综合评价, 建立水肥与番茄产量和品质综合得分的数学模型, 并确定了最优灌水施肥量。结果表明: 所建立的模型拟合较好, 可用于分析水肥对产量和综合品质的影响。水肥对产量和品质的影响有所不同。产量模型中, 灌水量 (X_1) 的一次项系数为 0.78, 大于施肥量 (X_2) 的一次项系数 0.35, 水分因素对产量的贡献比施肥大; 而在品质效应模型中, 施肥量 (X_2) 的一次项系数 0.22 大于灌水量 (X_1) 的一次项系数 0.14, 肥料对品质的影响更大。在水肥耦合作用中, 产量及品质效应图均为上凸的曲面, 水肥过高或过低均会使产量和品质下降, 灌水和施肥要配合合理。由综合产量和品质得出最佳灌水量为 $2\ 803.36 \sim 3\ 420.93\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 施肥量为 $\text{N}: 286.01 \sim 334.78\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5: 143.00 \sim 167.39\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O}: 286.01 \sim 334.78\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词: 番茄; 滴灌; 施肥; 产量; 品质
中图分类号: S641.2 **文献标志码:** A

The compound effects of water and fertilizer on yield and quality of tomato under drip irrigation

DU Qing-jie, LI Jian-ming, PAN Tong-hua, CHANG Yi-bo, LIU Guo-ying, WANG Peng-bo, Zheng Gang
(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Using orthogonal design, the study aims to investigate the effects of irrigation and fertilization on yield and quality of tomato under drip irrigation. The optimal practices of irrigation and fertilization were proposed according to the established model of regression relationship between water and fertilizer amounts and yield as well as score of quality. The quality was graded with analytic hierarchy process (AHP). The result showed that the established model fitted well and can be used to analyze the effects of irrigation and fertilization on yield and quality. Impact of water on the yield and quality was different from that of fertilizer. In the yield model, coefficient of irrigation (0.78, X_1), was greater than that of fertilization (0.35, X_2), showing a larger influence of water on yield than that of fertilizer. In the quality model, coefficient of fertilization (0.22, X_2) was greater than that of irrigation (0.14, X_1), indicating a larger influence of fertilizer on quality than that of water. The yield and quality of tomato declined in low or high level of water and fertilizer, so the amount of irrigation water and fertilizer must be managed reasonably. Taking yield and quality into consideration, the optimum amount of irrigation water was $2\ 803.36 \sim 3\ 420.93\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, and fertilizer amount was $286.01 \sim 334.78\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5\ 143.00 \sim 167.39\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and $\text{K}_2\text{O}\ 286.01 \sim 334.78\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

Keywords: tomato; drip irrigation; fertilization; yield; quality

设施栽培使蔬菜周年生产得以实现, 但管理仍采用传统的肥水利用率不高的“大水大肥”。为更有效地利用肥水, 设施内开始采用滴灌技术, 将灌溉施肥两者结合起来, 实现灌溉施肥一体化^[1-2]。水肥作为作物生长发育的必要因素, 被作物吸收利用时二者既相互促进又相互制约, 存在着明显的耦合关系, 水肥一体化的实现又使这种关系对作物的影响加大。番茄作为设施内种植最多的作物, 水肥耦合

收稿日期: 2014-05-31
基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD29B01), 国家“863”计划项目(2011AA100504)
作者简介: 杜清洁(1991—), 男, 山西长子人, 硕士, 研究方向为设施作物生理生态。E-mail: duqj91@163.com。
通信作者: 李建明(1966—), 男, 陕西洛川人, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺研究。E-mail: lijianming66@163.com。

对其的影响,前人已经有了一定的研究,但主要集中于以番茄产量为目标的水肥耦合研究上^[3-4],以品质尤其是综合品质为目标进行的研究较少。综合品质是对品质的一个综合评价,可以避免单一品质指标的局限性,在对种质资源进行评选时经常作为一个重要的指标^[5-6],但是在确定灌溉及施肥量时将其作为一个评价标准的较少。层次分析法作为综合评价的一种重要方法,将定性与定量评价结合起来,把复杂的问题分解成若干个层次,然后对各层次进行分析,可将人的主观判断和定性分析用数量形式表达和处理^[7-8]。

所以本试验在前人研究基础上以灌水量及施肥量为因素,采用正交设计,利用层次分析法对品质进行模糊综合评价得出综合品质评价得分,通过建立水肥与产量及综合品质评价得分的回归模型,研究了滴灌条件下水肥对番茄产量和品质的影响,并确定了最优灌水施肥量,以期为生产实践及高产栽培提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验一、二分别于 2013 年 3—7 月在西北农林科技大学北校园艺场 2.3 号塑料大棚内进行。供试品种为“金棚 1 号”。供试土壤基本理化性质为:土壤容重 $1.38\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,最大田间持水量 28.3% ,有机质 $13.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $85.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $19.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $100.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 7.5。

1.2 试验方法

试验一:以灌溉定额和施肥量为因素,采用二因子五水平正交组合设计,各处理实施见表 1。试验

共设 20 个小区,小区面积 8.4 m^2 ,随机区组排列,2 次重复。番茄于 2013 年 2 月播种,待长致 4 叶 1 心,选取健壮、长势均匀的幼苗定植,每小区 25 株,定植前各小区覆透明地膜。定植后缓苗 10 d,开始处理。为防止相邻小区水分及养分互相影响,各小区之间深埋 50 cm 的薄膜隔离,并在两头设保护行。本试验中自开始处理在番茄整个生育期按既定灌溉总量平均分为 15 次灌溉,每 7 天灌溉一次。施肥采用 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=2:1:2$ 的比例,除磷肥作基肥一次性全部施入外,氮肥和钾肥分 4 次等量施入,作基肥施入 1 次,在第 1、2、4 穗果膨大期随水施入各一次。试验所用氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。按生产经验 5 穗果打顶。及时喷药,保证整个生产期无病虫害。其它管理同大田生产。

试验二:设置 3 个灌溉水平(编码值: - 1、0、1), 3 个施肥水平(编码值: - 1、0、1)共 9 个处理,其它同试验一。试验二数据用于模型检验。

1.3 测定项目

在番茄结果盛期取成熟度一致的果实测定各指标。番茄产量按小区记录;硬度采用果实硬度计;可溶性固形物用手持折射仪,以上每个指标随机选 8 个果实进行测量,最后取所有果实的平均值进行分析。

根据高俊凤^[9]的方法对以下指标进行测定:果实可溶性糖采用蒽酮比色法,Vc 采用钼蓝比色法,可滴定酸(以苹果酸计)采用酸碱滴定法,可溶性蛋白采用考马斯亮蓝比色法,硝酸盐采用水杨酸 - 硫酸法,糖酸比 = 可溶性糖/可滴定酸。番茄红素依照分光光度计法测定(GB/T 14215,1993),取样和测定时各重复 3 次,取其平均值。

表 1 处理实施方案
Table 1 Treatments of irrigation and fertilization in this study

处理编号 Treatments	灌水量编码值 Irrigation coding	施肥量编码值 Fertilization coding	灌水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$) Irrigation amount	施肥量 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ Fertilization amount
1	1	1	4415	441:221:441
2	1	- 1	4415	158:79:158
3	- 1	1	1585	441:221:441
4	- 1	- 1	1585	158:79:158
5	- 1.414	0	1000	300:150:300
6	1.414	0	5000	300:150:300
7	0	- 1.414	3000	100:50:100
8	0	1.414	3000	500:250:500
9	0	0	3000	300:150:300

1.4 数据转化与统计分析

1.4.1 各品质指标数据的转化 用于统计分析的

数据为各品质指标的平均数据。由于不同指标的计量单位不同,数据量纲也不一致,不利于进行数据的

分析,因此,在进行综合品质评价前,根据马庆华^[10]的方法使用隶属函数法对数据进行转化:正相关指标(番茄红素、Vc、糖酸比、可溶性蛋白、可溶性固形物及硬度)依据公式: $U = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,负相关指标(有机酸、硝酸盐)依据公式: $U = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。其中: $X_{\max}$ 为指标中最大值; $X_{\min}$ 为指标中最小值; U 为该指标的隶属函数值。

1.4.2 综合品质评价 采用层次分析法对番茄果实品质进行模糊综合评价。(1) 根据层次分析法确定各项品质指标的权重;(2) 综合品质总得分依据公式: $TS = \sum U_{ij} \times W_j \times 10$ 。其中: U_{ij} 为第*i*个处理第*j*个指标的隶属函数值; W_j 为第*j*个指标的权重; TS 为每一处理的果实综合品质得分。

1.4.3 回归估计标准误差 *RMSE* 和相对误差 *RE* 的计算 根据回归估计标准误差 *RMSE* 和相对误差 *RE* 对模型的准确性进行验证。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}}$$
$$RE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n OBS_i} \times 100\%$$

式中, OBS_i 为实测值; SIM_i 为模拟值; n 为样本容量。*RMSE* 值越小,表明模拟值与实测值间的偏差越小,模型预测的准确性越高。

1.4.4 回归方程的建立 根据二次回归的计算原理,采用 DPS 7.05,对番茄产量及综合品质得分和各试验因子进行回归分析,并建立相应的数学回归模型,用 SigmaPlot 12.0 对分析结果进行图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 水肥耦合产量效应模型的建立与分析

各处理的产量数据见表 2。根据二元二次回归的计算原理,以产量为因变量(*Y*),灌溉量(X_1)、施肥量(X_2)为自变量进行二元二次多项式拟合,得出相应的产量效应模型。

$$Y = 10.79 + 0.78X_1 + 0.35X_2 - 1.34X_1^2 - 0.75X_2^2 + 0.073X_1X_2$$

式中, Y 代表产量($10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); X_1 代表灌水量的编码值; X_2 代表施肥量的编码值。

对回归方程拟合度及显著性进行检验,结果表明: $F = 23.54^* > F_{0.05}(5,3) = 9.01$,说明试验所选的因子与产量的回归关系达显著水平,所采用的模型是恰当的,与实际情况拟合得较好,决定系数 R^2

$= 0.96$,说明各因子共决定了产量变化的 96%,因此,其它因素对试验结果的影响可忽略,可以用来分析水肥对产量的影响。

表 2 不同水肥处理下番茄产量

Table 2 Yield of tomato under different treatments

处理编号 Treatments	灌水量编码值 Irrigation coding	施肥量编码值 Fertilization coding	产量 Yield /($10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
1	1	1	10.20
2	1	-1	9.22
3	-1	1	8.19
4	-1	-1	7.50
5	-1.414	0	7.16
6	1.414	0	8.92
7	0	-1.414	8.82
8	0	1.414	9.60
9	0	0	10.79

由于试验采用正交设计,回归方程中自变量经无量纲线性编码处理,故模型可进行降维处理,且各项回归系数可直接用于水肥对产量影响的比较。由回归方程灌水量(X_1)、施肥量(X_2)的一次项系数均为正且前者大于后者,可知在试验设计水平范围内二者均表现出增产效应,灌水的增产效应要大于施肥的增产效应。对模型进行降维处理,即将 X_1 (X_2)固定在零水平探讨 X_2 (X_1)与产量的关系,可以明确水肥的单因素效应,灌水量、施肥量单因素与产量效应的关系(图 1)。

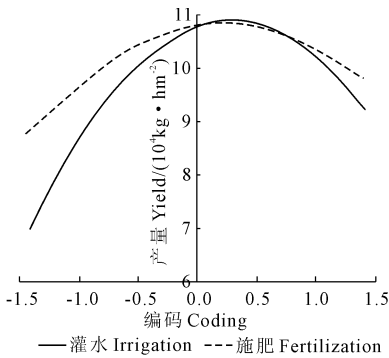


图 1 水肥单因素产量效应

Fig.1 Effect of single factor of irrigation and fertilization on yield

由图 1 可知,灌水、施肥单因素对产量的影响效应曲线均为开口向下的抛物线,随着灌水量和施肥量的增加,产量呈现先增加后降低的趋势,产量最高值分别出现在 X_1 为 0.29, X_2 为 0.23 时。说明二者都符合报酬递减规律,不合理的灌水或施肥都会使番茄产量下降。从两条效应曲线的变化来看,肥料

效应曲线比水分效应曲线变化平缓,表明灌水的增产幅度比施肥的增产幅度大,即一定范围内增加相同编码值的水分和肥料,增加灌水的收益较高。

根据回归方程可得出水肥耦合的产量效应图(图 2)。从图 2 可以看出,水肥耦合的产量效应呈现为上凸的曲面,在高水高肥区和低水低肥区产量均明显下降,产量最高值出现在中水中肥区。此外交互项系数为负值,水肥二者间相互作用会使产量降低,在灌水量或施肥量一定时,过多施肥或灌水并不会使产量增加反而会下降。因此,在实际生产中不可“大水大肥”,要合理灌水施肥。通过对拟合方程求最大值可得: $X_1 = 0.30$, $X_2 = 0.25$ 即灌水量为 $3\,420.93\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,施肥量为 $\text{N}:334.78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{P}:167.39\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{K}:334.78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,产量最大值为 $10.95\times10^4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.2 水肥耦合对番茄果实品质影响的综合评价

2.2.1 水肥耦合对番茄果实品质各单项指标的影响 对 9 个水肥处理的品质指标测定结果见表 3。由表 3 可知,不同水肥处理下若按番茄果实某单一品质指标进行排序,不同指标中最优水肥组合排序

不尽相同。处理 4 以 Vc 、可溶性固形物和可溶性蛋白含量最多,但有机酸含量也最多;处理 5 的糖酸比和硬度最大;处理 9 有机酸含量最少,番茄红素含量最多;硝酸盐又以处理 7 含量最少。因此,为找到最优的水肥组合,必须对试验各处理的果实品质进行综合评价。此外,不同指标间数据的量纲和单位不同,不便于数据的综合分析,因此在综合评价之前要采用隶属函数法对原始数据转化。

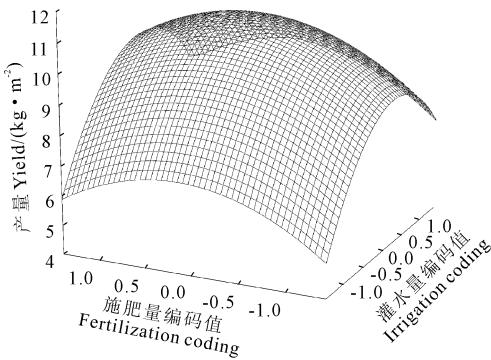


图 2 水肥耦合产量效应

Fig.2 Effect of coupling of irrigation and fertilization on yield

表 3 不同水肥处理下番茄各项品质指标
Table 3 Quality of tomato under different treatments

处理 Treatments	有机酸 Organic acid /%	糖酸比 Sugar /acid	硬度 Hardness /(N·cm ⁻²)	番茄红素 Lycopene /(μg·g ⁻¹)	硝酸盐 NO ₃ ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	Vc 含量 Vc content /(mg·100g ⁻¹)	可溶性固形物 SSC /%	可溶性蛋白 Soluble protein /(μg·g ⁻¹)
1	0.19	7.02	18.00	18.96	270.65	28.77	4.34	11.29
2	0.24	7.84	21.24	16.76	285.60	31.45	4.24	14.08
3	0.29	9.13	26.46	13.66	370.52	33.98	5.60	13.46
4	0.34	7.96	25.97	13.43	263.86	47.48	5.61	17.88
5	0.33	11.22	27.22	27.23	341.76	41.51	5.13	10.27
6	0.21	7.78	20.63	26.26	304.85	27.56	5.11	12.88
7	0.22	6.18	21.61	9.89	253.44	29.38	4.84	16.96
8	0.27	8.79	23.47	28.02	406.30	28.52	4.93	12.63
9	0.18	9.38	20.69	29.56	293.52	32.72	4.50	12.46

2.2.2 采用层次分析法确定各品质指标权重 根据所测定 8 个品质指标的基本性质、指标之间的相互关联影响以及层次隶属关系,建立综合评价层次结构图(图 3)。将目标层综合评价分为口感品质和营养品质两个准则层,口感品质包括有机酸、糖酸比和硬度 3 个子准则层,营养品质则包括番茄红素、硝酸盐、Vc、可溶性固形物和可溶性糖 5 个子准则层。

根据所建立的层次结构图,运用 1~9 比例标度法建立判断矩阵(表 4~表 6)。计算矩阵最大的特征根 $\lambda_{\max}$ 及相应的特征向量,然后对特征向量进行归一化处理,求出各个决定因素的权重 W 。为保证

结论的可靠性、合理性,对各判断矩阵进行一致性检验,由表 4、表 5、表 6 中 CR 均小于 0.10 知一致性检验是满意的,说明建立的判断矩阵是合理的。

各品质指标最终权重值可根据公式: $W_j = W_k \cdot W_{k-j}$ 得到如表 7。

2.2.3 各水肥处理番茄果实品质综合评价的结果

根据各项品质指标原始数据转化后的隶属函数值及表 7 中的相应权重可得试验各处理果实品质综合总得分(见表 8),总得分越高的果实综合品质越好。由表 8 可知,处理 9 的综合得分最高(6.82),处理 8 的综合得分最低(4.00)。

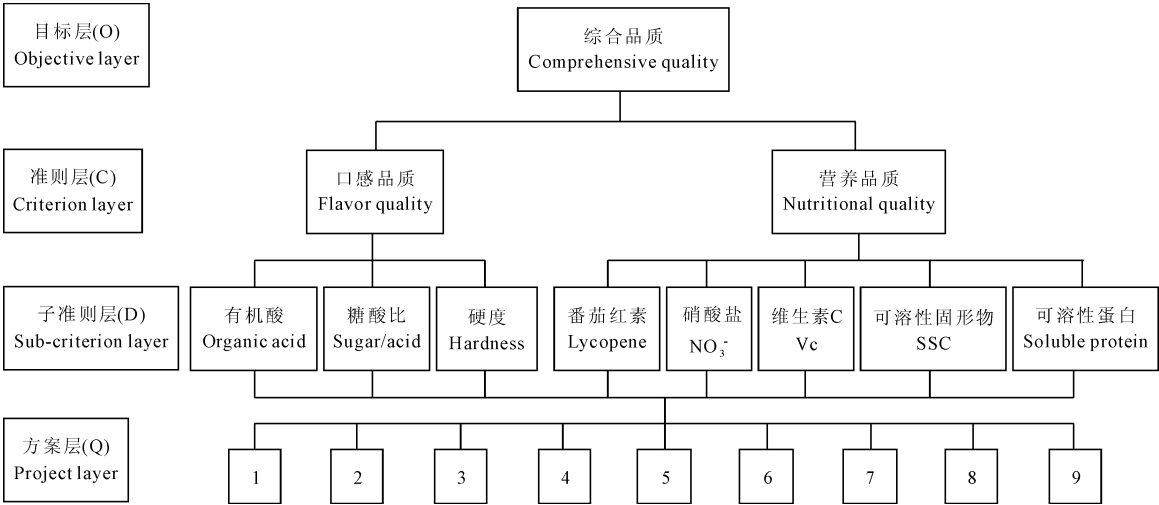


图 3 综合评价层次结构图

Table 3 Comprehensive assessment hierarchical chart

表 4 判断矩阵目标层 – 准则层一致性检验及权重值

Table 4 Consistency check of objective-criterion layer and weight

项目 Item	口感品质 Flavor quality	营养品质 Nutritional quality	权重 Weight
口感品质 Flavor quality	1	1	0.5
营养品质 Nutritional quality	1	1	0.5

注: $\lambda_{\max} = 3.0$, $CI = 0$, $RI = 0.58$, $CR = 0$

表 5 判断矩阵口感品质 – 子准则层一致性检验及权重值

Table 5 Consistency check of flavor quality-sub-criterion layer and weight

口感品质 Flavor quality	有机酸 Organic acid	糖酸比 Sugar/acid	硬度 Hardness	权重 Weight
有机酸 Organic acid	1	1	2	0.4
糖酸比 Sugar/acid	1	1	2	0.4
硬度 Hardness	1/2	1/2	1	0.2
$\lambda_{\max} = 3.0$, $CI = 0$, $RI = 0.58$, $CR = 0$				

表 6 判断矩阵营养品质 – 子准则层一致性检验及权重值

Table 6 Consistency check of nutritional quality-sub-criterion layer and weight

营养品质 Nutritional quality	硝酸盐 NO ₃ ⁻	番茄红素 Lycopene	维生素 C Vc	可溶性固形物 SSC	可溶性蛋白 Soluble protein	权重 Weight
硝酸盐 NO ₃ ⁻	1	3	3	4	5	0.432
番茄红素 Lycopene	1/3	1	2	4	5	0.256
维生素 C Vc	1/3	1/2	1	3	4	0.176
可溶性固形物 SSC	1/4	1/4	1/3	1	3	0.088
可溶性蛋白 Soluble protein	1/5	1/5	1/4	1/3	1	0.049
$\lambda_{\max} = 5.281$, $CI = 0.07$, $RI = 1.12$, $CR = 0.06$						

表 7 各品质指标最终权重

Table 7 Final weight of quality

品质指标 Quality	有机酸 Organic acid	糖酸比 Sugar/acid	硬度 Hardness	番茄红素 Lycopene	硝酸盐 NO ₃ ⁻	维生素 C Vc	可溶性固形物 SSC	可溶性蛋白 Soluble protein
权重 Weight	0.200	0.200	0.100	0.128	0.216	0.088	0.044	0.024

2.3 水肥耦合品质综合评价得分效应模型的建立与分析

根据表 8 中数据,以品质综合评价总得分为目标函数,用二元二次多项式拟合回归进行分析,建立灌水量、施肥量与综合品质得分的回归方程,得到最

终的模型如下:

$$Y = 6.82 - 0.14X_1 - 0.22X_2 - 0.60X_1^2 - 1.33X_2^2 + 0.31X_1X_2$$

式中, Y 代表品质综合评价得分; X_1 代表灌水量的编码值; X_2 代表施肥量的编码值。

拟合度及显著性检验结果表明: $F = 20.67^* > F_{0.05}(5,3) = 9.01$,决定系数 $R^2 = 0.97$,灌水量与施肥量与品质综合评价得分之间存在显著的回归关

系,与实际情况拟合得较好,回归方程可靠,可用于生产预报及分析水肥对品质的影响。

表 8 各处理番茄综合品质得分
Table 8 Score of comprehensive quality under different treatments

序号 Number	有机酸 Organic acid	糖酸比 Sugar/acid	硬度 Hardness	番茄红素 Lycopene	硝酸盐 NO ₃ ⁻	Vc 含量 Vc content	可溶性固形物 SSC	可溶性蛋白 Soluble protein	总分 Score
1	1.85	0.33	0.00	0.59	1.92	0.05	0.03	0.03	4.80
2	1.23	0.66	0.35	0.45	1.70	0.17	0.00	0.12	4.69
3	0.60	1.17	0.92	0.25	0.51	0.28	0.44	0.10	4.26
4	0.00	0.71	0.86	0.23	2.01	0.88	0.44	0.24	5.37
5	0.12	2.00	1.00	1.13	0.91	0.61	0.28	0.00	6.06
6	1.60	0.63	0.29	1.07	1.43	0.00	0.28	0.08	5.38
7	1.50	0.00	0.39	0.00	2.16	0.08	0.19	0.21	4.54
8	0.85	1.04	0.59	1.18	0.00	0.04	0.22	0.08	4.00
9	2.00	1.27	0.29	1.28	1.59	0.23	0.08	0.07	6.82

在水肥与品质综合评价得分的回归模型中,灌水量一次项系数为 -0.14 ,施肥量一次项系数为 -0.22 ,前者的绝对值小于后者,表明在编码值范围内两者的主效应均表现为对品质有负的作用,施肥对品质综合评价得分变化的贡献比灌水大。此外,两者系数为负值,说明适度的水分亏缺和减少施肥量有利于改善品质。模型降维处理后,水肥单因素效应如图 4。

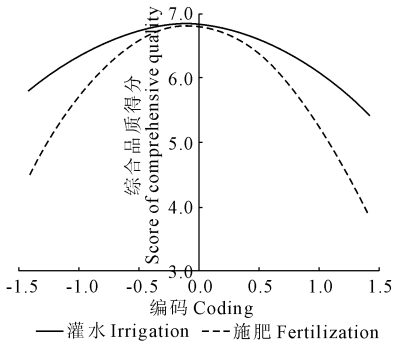


图 4 水肥单因素品质效应
Fig.4 Effect of single factor of irrigation and fertilization on quality

由图 4 可知,在试验设计的范围内品质综合评价得分随灌水量和施肥量的增加表现出先升高后降低的变化,当灌水量编码值为 -0.12 ,施肥量编码值为 -0.09 时分别有最大值。灌水、施肥单因素对品质综合评价得分效应曲线为开口向下的抛物线,说明二者都符合报酬递减规律,当灌水量或施肥量超过一定范围后再继续增加灌水量或施肥量,对品质的改善作用不大。随施肥量的增加品质得分急剧变化,而随灌水量增加品质得分变化较为平缓,说明灌

水施肥量在较低的水平时,施肥对改善品质的效应要大于灌水,超过一定水平则负效应要大于灌水。

从图 5 水肥耦合对番茄果实品质综合评价得分的影响可以看出,当灌水量一定时,品质得分随施肥量增加而先升高后降低;当施肥量一定时,随灌水量增加品质得分呈现相同变化。当灌水和施肥量处于过高或过低水平时均会使品质得分较低,品质得分最高值出现在中水中肥区。对模型求极值可得: $X_1 = -0.14$, $X_2 = -0.10$ 即灌水量为 $2\,803.36\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,施肥量为 $\text{N}:286.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{P}:143.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{K}:286.01\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,品质综合评价得分最高为 6.84 。

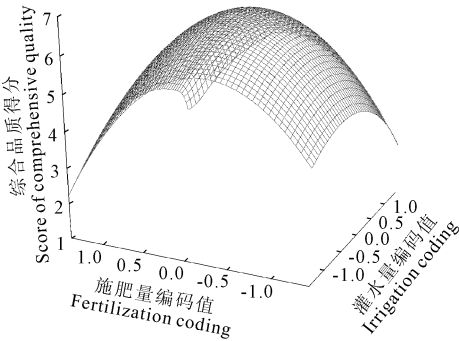


图 5 水肥耦合品质效应图
Fig.5 Effect of coupling of irrigation and fertilization on quality

2.4 水肥耦合产量及品质综合评价得分效应模型的验证

从表 9 可知,试验二测定的产量值、综合品质得分值与模拟值的相关系数均达 85% 以上。其中产

量模型的标准误差为 $0.35\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 相对误差 3.78%, 小于 5%; 综合品质得分模型的标准误差为 0.59, 相对误差 11.24%, 小于 15%。可见, 不同水肥处理下, 模型的预测精度可达 85% 以上, 能够准确预测水肥番茄产量及综合品质的影响。

表 9 水肥耦合产量及品质综合评价得分效应模型误差分析
Table 9 Errors analysis of yield and comprehensive quality score model of irrigation and fertilization coupling

灌水量编码值 Irrigation coding	施肥量编码值 Fertilization coding	产量/(10 ⁴ kg·hm ⁻²) Yield		综合品质得分 Comprehensive quality score	
		实测值 OBS	模拟值 SIM	实测值 OBS	模拟值 SIM
1	1	9.66	9.90	4.19	4.84
1	0	9.68	10.23	6.59	6.08
1	-1	9.09	9.06	4.18	4.66
0	1	10.46	10.39	4.49	5.27
0	0	10.63	10.79	6.91	6.82
0	-1	10.19	9.69	6.07	5.71
-1	1	7.83	8.20	3.97	4.50
-1	0	8.12	8.68	6.86	6.36
-1	-1	7.79	7.65	4.55	5.56
相关系数/% R^2		90.38		87.75	
回归估计标准误差 $RMSE$		0.35		0.59	
相对误差/% RE		3.78		11.24	

注: OBS 为试验二测定值; SIM 为根据模型计算的模拟值。
Note: OBS was the measurement value of experiment 2; SIM was the simulation value of model.

3 讨论与结论

水肥作为作物生长发育过程中所必需的要素, 会影响植物体内的碳氮代谢、叶片气孔的开闭及光合产物的运输等各种生理生化过程, 进而最终影响产量和品质。可见, 水肥对产量和品质的形成起着决定性的作用。而在农业生产中投入最多的也是水分和肥料, 所以合理的灌水施肥不仅可以提高产量和品质, 还可以减少农业生产投入。

本试验结果表明, 不同水肥处理下番茄产量和品质不同, 且水分和肥料两者对产量及品质影响有所区别。水分对产量的贡献较大, 增产幅度也大, 肥料的增产效应较小。植物对养分的吸收、运输和利用都依赖于土壤水分, 土壤的水分状况在很大程度上决定着肥料的合理用量^[11]。所以, 在水肥相互配合施用的过程中, 要适当发挥水分的增产作用, 尤其是采用滴灌施肥技术, 水分将肥料直接输送到作物的根部。肥料浓度过高会对作物造成伤害甚至烧苗, 且会出现土壤盐渍化等生态问题^[12], 而水分适当多一些可使元素快速向根表迁移加快吸收。而对于品质, 肥料起第一主导作用, 水分为第二主导因子。这可能是由于肥料中的营养元素在促进植物体内光合产物、ATP 合成, 光合产物运转及其它矿质养

分的吸收、代谢等方面有重要作用^[13-16], 因而可以显著提高蔬菜产品品质。

在水肥耦合作用中, 灌水和施肥要配合合理。试验中对于产量和品质, 水肥相互作用呈现出相似的影响, 两者过高或过低都会使产量和综合品质下降。这与孙文涛^[17]在产量上的结果相似, 说明灌水与施肥的相互作用对番茄产量的形成有重要作用。虞娜^[18]也以番茄为材料分别探讨了水肥对 Vc、有机酸、可溶性糖及糖醋酸比的影响, 其结果表明水肥的过高或过低均会使品质降低。有研究表明, 水分不足抑制了植物根系的生长, 降低了根系的吸收面积和吸收能力, 木质部液流粘滞性增大, 从而降低了养分的吸收和运输^[19]; 而施肥能提高土壤水分利用效率和保水力, 提供给植株更多的有效水^[20]。

通过对产量模型和品质综合评价得分模型求极值, 得出: 灌水量为 $3\,420.93\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 施肥量 $334.78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 产量达最大; 灌水量为 $2\,803.36\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 施肥量为 $286.01\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 品质最优。综合两者可以看出: 在本试验条件下当灌水量在 $2\,803.36\sim3\,420.93\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 施肥量在 $286.01\sim334.78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 可以使产量和品质均达到较高水平, 产量 $106\,159.66\sim109\,492.58\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 品质综合得分 $6.61\sim6.84$ 。与陈碧华^[21]以产量和单个品质

指标为目标得出的结果相比施肥量相似,但灌水量要高 $100 \sim 500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,而比虞娜^[22]以产量为目标得出的结果最佳施肥量 $337.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 低。这一方面可能与考虑的目标因素不同,另一方面可能与试验地的养分条件、气候状况不同有关,但相差不大。本试验对品质进行了综合评价,且结合了产量与品质综合得分两个因素得出最优的灌水施肥量,所以对滴灌条件下番茄生产的水肥用量有一定指导意义。

参 考 文 献:

[1] 袁洪波,王海华,庞树杰,等.日光温室封闭式栽培系统的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(21):159-165.

[2] 张乐森,王振华,孟凡山,等.保护地大葱水肥一体化滴灌施肥应用研究[J].节水灌溉,2013,(11):17-20,24.

[3] 陈修斌,潘林,王勤礼,等.温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究[J].南京农业大学学报,2006,29(3):138-141.

[4] 丁果.温室蔬菜滴灌灌溉施肥水肥耦合效应的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.

[5] 徐心诚.主成分分析法对番茄品种耐弱光性的综合评价[J].中国农学通报,2012,28(4):135-140.

[6] 张文娥,王飞,潘学军.应用隶属函数法综合评价葡萄种间抗寒性[J].果树学报,2007,24(6):849-853.

[7] 陈义强,刘国顺,习红昂.基于烟叶品质指数的氮、磷、钾施肥模型[J].植物营养与肥料学报,2013,19(3):632-643.

[8] 刘振虎,卢欣石,葛军.利用层次分析法综合评价 9 个草坪品种的耐盐性[J].草地学报,2002,10(3):207-11,216.

[9] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.

[10] 马庆华,李永红,梁丽松,等.冬枣优良单株果实品质的因子分析与综合评价[J].中国农业科学,2010,43(12):2491-2499.

[11] 李世娟,周殿玺,李建民.限水灌溉下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响[J].华北农学报,2001,16(3):86-91.

[12] 饶碧玉,罗绍芹,吴占景,等.水肥耦合对当归产量和品质的影响效应研究[J].中国农学通报,2012,28(34):274-278.

[13] 李冬梅,魏珉,张海森,等.氮、磷、钾用量和对比对温室黄瓜叶片相关代谢酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):382-387.

[14] Mahgoub G, Khedr E, Amer S, et al. Effect of Adenosine Triphosphate (ATP) and Nicotinamide Adenine Dinucleotide (NAD) on maize grain yield and NPK uptake in grains[J]. Annals of Agricultural Science, Moshtohor,1991,29(2):631-644.

[15] Hebbar S, Ramachandrappa B, Nanjappa H, et al. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato[J]. European Journal of Agronomy, 2004,21(1):117-127.

[16] 田丰,张永成,张凤军,等.不同肥料和密度对马铃薯光合特性和产量的影响[J].西北农业学报,2010,19(6):95-98.

[17] 孙文涛,张玉龙,王思林,等.滴灌条件下水肥耦合对温室番茄产量效应的研究[J].土壤通报,2005,36(2):202-205.

[18] 虞娜,张玉龙,黄毅,等.温室滴灌施肥条件下水肥耦合对番茄产量影响的研究[J].土壤通报,2003,34(3):179-183.

[19] 王海艺,韩烈保,黄明勇.干旱条件下水肥耦合作用机理和效应[J].中国农学通报,2006,22(6):124-128.

[20] 赵立新,荆家海,王韶唐.旱地冬小麦施肥效应研究[J].干旱地区农业研究,1991,(4):46-52.

[21] 陈碧华,邵庆炉,孙丽.番茄日光温室膜下滴灌水肥耦合效应研究[J].核农学报,2009,23(6):1082-1086.

[22] 虞娜,张玉龙,张玉玲,等.灌溉和施肥对温室番茄产量和品质影响效应的研究[J].中国土壤与肥料,2009,(4):31-35.

(上接第 9 页)

[13] 赵燕东,王一鸣.基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量敏感度分析[J].农业工程学报,2002,18(2):5-8.

[14] 伍永秋,刘宝元,Erik van den Elsen,等.黄土高原土壤水分的自动监测——TDR 系统及其应用[J].水土保持学报,2001,15(2):108-111.

[15] 宋文,张玉龙,韩巍,等.渗灌灌水定额对温室黄瓜产量和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):61-66.

[16] Lv Lihua, Wang Huijun, Jia Xiuling, et al. Analysis on water requirement and water – saving amount of wheat and corn in typical regions of the North China Plain[J]. Frontiers of Agriculture in China, 2011,5(4):556-562.

[17] Chattaraj Sudipta, Chakraborty Debashis, Garg R N, et al. Hyper-spectral remote sensing for growth-stage-specific water use in wheat [J]. Field Crops Research, 2013,144:179-191.

[18] Wang Jun, Liu Wenzhao, Dang Tinghui. Responses of soil water balance and precipitation storage efficiency to increased fertilizer application in winter wheat[J]. Plant and Soil, 2011,347(1–2):41-51.

[19] 赵燕东,王一鸣.基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J].农业机械学报,2002,33(4):109-111,121.

[20] 杨直毅,樊军.TDR 和 FDR 测定黄绵土土壤含水量的标定[J].土壤通报,2009,40(4):740-742.

[21] 苏都,红梅,陈有君,等.TDR 测定淡栗钙土水分的标定[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2012,33(1):88-92.

[22] 周凌云,陈志雄,李卫民.TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J].土壤学报,2003,40(1):59-64.

[23] 李元寿,王根绪,程玉菲,等.FDR 在高寒草地土壤水分测量中的标定及其应用[J].干旱区地理,2006,29(4):543-547.