

# Effects of Water and Fertilizer Coupling on Soil Water Utilization under Drip Fertilization in Solar-Greenhouse

Penghui Song, Mingtao Liu\*

Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan  
Email: [183363468@qq.com](mailto:183363468@qq.com)

Received: Feb. 25<sup>th</sup>, 2014; revised: Mar. 11<sup>th</sup>, 2014; accepted: Mar. 28<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Experiments were carried out to study the effects of water and fertilizer coupling on soil water utilization by using quadratic general revolving combination design with two factors. The results showed that regression correlations between irrigating water quota, fertilizer application quota and soil water utilization were extremely significant; the regression correlations were reliable; and effects of irrigating water quota on soil water utilization were more than those of fertilizer application quota. A holistic optimum plan of water and fertilizer coupling for obtaining high yield and good quality of tomato fruit was put forward: irrigating water quota: 17.61 - 17.64 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, fertilizer application quota: 174.86 - 180.73 kg/hm<sup>2</sup>. The gained results can be used in the production in solar greenhouses.

## Keywords

Solar Greenhouse; Drip Irrigation; Tomato; Water and Fertilizer Coupling; Soil Water Utilization

---

# 日光温室膜下滴灌水肥耦合对土壤水分利用率的影响

宋鹏辉, 刘鸣韬\*

\*通讯作者。

河南科技学院, 河南新乡  
Email: [183363468@qq.com](mailto:183363468@qq.com)

收稿日期: 2014年2月25日; 修回日期: 2014年3月11日; 录用日期: 2014年3月28日

## 摘要

采用二因素二次通用旋转组合设计,研究了日光温室中膜下滴灌水肥耦合技术对土壤水分利用率的影响。结果表明:灌水定额、施肥定额二因素与土壤水分利用率之间存在极显著的回归关系;二因素的影响程度为灌水定额 > 施肥定额,由此提出了最优水肥组合方案,灌水定额为 $17.61\sim 17.64\text{ kg}/667\text{ m}^2$ ,施肥定额为 $174.86\sim 180.73\text{ m}^3/667\text{ m}^2$ 。本研究为日光温室膜下滴灌栽培生产提供了借鉴。

## 关键词

日光温室; 膜下滴灌; 水肥耦合; 水分利用率

## 1. 引言

目前日光温室蔬菜生产中仍然采用沟灌浇水和随水冲肥的传统方式,这样虽然带来了高额的蔬菜产量,但同时也带来了农业生产环境恶化和蔬菜生产安全等负面作用[1]-[3]。膜下滴灌施肥技术是对传统的沟灌施肥技术的改革,既能节水、增产,还能降低室内空气湿度[4]。但由于滴灌水、肥技术参数确定不合理,使这一新技术在应用时还存在一定的问题[5] [6]。因地制宜地调节水分和肥料,使它们处于合理的范围,使水肥产生协同作用,达到“以水促肥”和“以肥促水”的目的,对节约水、肥资源和保护环境将有重要意义。原保忠、康跃虎的研究表明,将滴灌带下 15 cm 处的土壤水势维持在番茄生长的适宜范围( $\geq -20\text{ Kpa}$ ),可用日光温室内的水分蒸发量作为指导灌溉的灌水量[7]。然而,对于保护地生产已有的研究多集中于肥料间的配施效果和水分灌溉指标方面[8]-[10],综合考虑水、肥因子的水肥耦合效应的研究还不多见。为此,本试验通过对番茄设置不同的水分和养分施用水平,采用水、肥二因素二次通用旋转组合设计方法,研究了不同水、肥耦合后对分析项目的影响,通过回归分析,对各个水肥组合的增产效应和提高水分利用率效应做出定量评价,并提出最优水肥组合方案,以期为我省日光温室滴灌番茄的高产栽培提供水肥管理参数。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验区概况

试验于 2005 年 12 月至 2006 年 7 月在中国水利部农田灌溉研究所(新乡)1 号日光温室中进行。温室长 40 m、宽 8.5 m,种植区  $40\text{ m} \times 7\text{ m}$  ( $280\text{ m}^2$ )。温室东西走向,与其他温室间隔 15 m,互不遮荫。覆盖无滴聚乙烯薄膜,外层覆盖复合保温被,温室内没有补温装置。试验地土质为砂壤土,耕层土壤容重  $1.38\text{ g}/\text{cm}^3$ ,田间持水量 24%(占干重%)。该温室使用年限为 8 年。

### 2.2. 供试材料

试验所用番茄品种为“东方一号”,由西安常丰园种业有限公司提供;供试肥料为尿素( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ,含 N46%,纯度 99%)、磷酸一铵( $\text{NH}_4\text{HPO}_4$ ,含  $\text{P}_2\text{O}_5$  46%、含 N18%,纯度 98%)、硫酸钾(含  $\text{K}_2\text{O}$  42%)。

### 2.3. 试验设计

试验采用二因素(灌水定额、施肥定额)二次通用旋转组合设计[11],以生长发育和品质指标为目标函数,以灌水定额( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )和施肥定额( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )两因素为因变量,构建数学模型。各个因素上下水平[12]及变化区间见表1。

根据因素水平编码值表的格式,计算出诸因素每个水平编码值的相应量(表2)。

根据试验因素的个数及通用旋转组合的要求, $m_c = 4$ ,  $p = 2$ ,  $m_0 = 5$ ,全部试验设置13个处理组合,拟定出番茄水、肥二因素通用旋转组合设计试验方案(表3)。

### 2.4. 试验方法

根据上述设计方案,在日光温室内共设置13个小区,每小区栽植两畦,每畦宽1m,栽两行,行距0.55m,株距0.4m,将滴灌带铺放在栽植行上,使滴灌带上的滴头与番茄植株根部保持10cm距离,铺地膜,形成膜下滴灌方式,两畦间留有0.6m宽的过道,便于进行观测记载。整地时施用腐熟有机肥( $75,000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ )和磷酸一铵(按照试验设计)作底肥,尿素则按照试验设计在番茄第一穗果实膨大期、第二穗果实膨大期、第三穗果实膨大期分3次随水滴灌追施,3次追肥比例为2:2:1。不同灌水处理每7天测定一次,灌水前和灌水4小时后加测,取土位置在滴管近端处垂直方向上15cm和两滴头中间取土,取样深度分别为0~20cm、20~40cm,然后用烘干法测其含水量,求出各处理的调和水分平均利用率(%)。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 水分利用率目标函数数学模型的建立与检验

根据本次试验结果将水分利用率作为目标函数,根据二次通用旋转组合设计原理上机运算获得番茄灌水量、施肥量与水分利用率之间的数学模型为下式:

$$y = 3.82 + 0.79x_1 + 0.60x_2 + 1.18x_1^2 + 1.14x_2^2 - 0.53x_1x_2 \quad (1)$$

对(1)式进行显著性检验,经计算: $F_1 = 0.67 < F_{0.05(3,4)} = 6.59$ ,  $F_1 = 0.67 < F_{0.01(3,4)} = 16.7$ ,失拟不显著,拟合很好,  $F_2 = 16.58 > F_{0.05(5,7)} = 3.9975$ ,  $F_2 = 16.58 > F_{0.01(5,7)} = 6.1088$ ,方程回归显著。 $F$ 检验表明  $F_1 = 0.67$  模式适合,  $F_2 = 16.58^{**}$  回归可靠。由以上检验结果可知,所建立的水肥耦合回归模型显著,可用于生产预报且有较高的可靠性。

用  $t$  检验对(1)式回归模型偏回归系数进行显著性检验,其结果如下: $t_0 = 15.36$ ,在  $t_{0.001}$  水平上显著(\*\*);  $t_1 = 4.02$ ,在  $t_{0.001}$  水平上显著(\*\*);  $t_2 = 3.05$ ,  $t_{0.001}$  不显著;  $t_{11} = 5.61$ ,在  $t_{0.001}$  水平上显著(\*\*);  $t_{11} = 5.41$ ,在  $t_{0.001}$  水平上显著(\*\*)。常数项和一次项中的灌水定额  $x_1$  对水分利用率影响显著(\*\*),二次项系数中的灌水定额  $x_1$  和施肥定额  $x_2$  对水分利用率影响显著(\*\*),其余影响不显著。方程各项回归系数检验结果表明,灌水、施肥各因子都对水分利用率有一定的影响。

### 3.2. 各因素及其交互作用与水分利用率之间的关系

#### 3.2.1. 主因素效应分析

回归方程一次项系数的  $t$  值检验得到:  $t_1 = 4.02$  显著(\*\*),  $t_2 = 3.05$  不显著,影响水分利用率的水肥二因素的重要性数值分别为2.30和2.25,因素的重要性数值越大说明其对水分利用率的影响越大。因此从偏回归系数、 $t$  值检验及因素重要性数值的结果均可得出各因子对产量影响的大小顺序为:灌水量 > 施肥量。可见灌水量对水分利用率的影响最大,表现出显著正效应,施肥量对产量的影响较小,灌水效应稍大于施肥效应;二次项系数则相反,  $t$  值检验得到:  $t_1 = 5.61$  显著(\*\*),  $t_2 = 5.41$  显著(\*\*),灌水量和施

**Table 1.** The upper and lower level and variation sections of different factors in the whole growth period**表 1.** 番茄全生育期试验各因素的上下水平及变化区间

水平	Z <sub>1</sub> (灌水定额)	Z <sub>2</sub> (施肥定额)
Z <sub>2j</sub>	3300	尿素 450 + 磷酸一铵 450
Z <sub>1j</sub>	2250	尿素 150 + 磷酸一铵 150
Δ <sub>j</sub>	375	105

注：表中施肥定额是指尿素的纯 N 量和磷酸一铵的纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 量。

**Table 2.** The variable standards coding value of different factors in the whole growth period**表 2.** 番茄全生育期试验因素变量水平编码值表

因素	Z <sub>1</sub> (灌水定额)	Z <sub>2</sub> (施肥定额 kg/hm <sup>2</sup> )
+1.414	3300	尿素 450 + 磷酸一铵 450
+1	3150	尿素 405 + 磷酸一铵 405
0	2775	尿素 300 + 磷酸一铵 300
-1	2400	尿素 195 + 磷酸一铵 195
-1.414	2250	尿素 150 + 磷酸一铵 150

**Table 3.** Dual on tomato in common used to rotate association design structure matrix**表 3.** 番茄二元二次通用旋转组合设计结构矩阵

处理	编码						处理组合	
	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Z <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	Z <sub>2</sub> (kg/hm <sup>2</sup> )
1	1	1	1	1	0.5	0.5	1(3150)	1(405)
2	1	1	-1	-1	0.5	0.5	1(3150)	-1(195)
3	1	-1	1	-1	0.5	0.5	-1(2400)	1(405)
4	1	-1	-1	1	0.5	0.5	-1(2400)	-1(195)
5	1	1.414	0	0	1.5	-0.5	1.414(3300)	0(300)
6	1	-1.414	0	0	1.5	-0.5	-1.414(2250)	0(300)
7	1	0	1.414	0	-0.5	1.5	0(2775)	1.414(450)
8	1	0	-1.414	0	-0.5	1.5	0(2775)	-1.414(150)
9	1	0	0	0	-0.5	-0.5	0(2775)	0(300)
10	1	0	0	0	-0.5	-0.5	0(2775)	0(300)
11	1	0	0	0	-0.5	-0.5	0(2775)	0(300)
12	1	0	0	0	-0.5	-0.5	0(2775)	0(300)
13	1	0	0	0	-0.5	-0.5	0(2775)	0(300)

注：表中 x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub> 分别代表灌水定额和施肥定额的因素编码值，Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub> 分别代表灌水水平、施肥水平。

肥量均对水分利用率的影响表现为正效应。由此可见，适当的施肥灌水条件下番茄水分利用率水平最高，偏施或少施肥料与多灌或少灌水均将使水分利用率降低，以平衡施肥与适量灌水条件下最利于番茄节水、高产。

### 3.2.2. 单因素效应及边际效应分析

将回归模型中的水、氮-磷二因子中的一个固定在零水平,求得单因素对水分利用率的偏回归子模型如下:

灌水量:

$$y_1 = 3.82 + 0.79x_1 + 1.18x_1^2 \quad (2)$$

施肥量:

$$y_2 = 3.82 + 0.60x_2 + 1.14x_2^2 \quad (3)$$

对上述偏回归子模型分别令  $dy_1/dx_1 = 0$ ,  $dy_2/dx_2 = 0$ , 求得  $x_1 = -0.33$ ,  $x_2 = -0.26$ 。最适合回归值  $y = 3.36$ , 当灌水水平为-0.33、施肥水平为-0.26时,水分利用率有最小值即在此模型下水分利用率最低可达 3.36。

边际效应可反映单个因素单位水平投入量变化对水分利用率增减速率的影响。为了研究水、肥处理的边际效应,对回归子模型求一阶偏导,得出各试验因素的边际效应方程:

水:

$$y_1 = 0.79 + 2.36x_1 \quad (4)$$

肥:

$$y_2 = 0.60 + 2.28x_2 \quad (5)$$

由直线方程(4)和(5),分别让  $x_j$  取 0 和 1, 算出边际水分利用率,并绘成图 1。图中  $y_1$  表示随着灌水量的增加其水分边际效应的变化,  $y_2$  表示随着施肥量的增加其水分边际效应的变化。从图 1 中不难看出:

1) 随着水、肥用量增加,其边际水分利用率都是增加的,但水比肥增加的幅度更明显一些。2) 从图中还可以看出,各因素在不同水平时,对产量的影响程度也不同的,这为在不同的条件下,选择提高产量的因素和决定产量大小提供参数。

### 3.2.3. 二因子的交互作用分析

上述二因子之间对土壤水分利用率的影响有明显的交互耦合作用,且各因子之间均表现出交互效应,对交互项系数的  $t$  值检验得到:  $t_{12} = 1.92$ , 虽未达到显著水平,但从中可见灌水量与施肥量对土壤水分利用率均有一定的正交互作用,水肥配施或水肥相济有利于促进土壤水分利用率的提高,因此利用滴灌设施随水同时追施肥或追肥后及时灌水以提高其交互耦合效应,将十分有利于番茄最佳土壤水分利用率的获得。

### 3.2.4. 试验因素的最优组合方案

根据方程(1),在变量  $x$  的取值范围  $[-1.414, 1.414]$  内,寻求最优灌水施肥方案。通过模拟分析,可以得到最优试验水平值:灌水定额为  $174.86 \text{ m}^3/667\text{m}^2$ , 施肥定额为  $17.61 \text{ kg}/667\text{m}^2$ 。在此处理组合下其相应的水分利用率估计值可以达到 3.82。从试验结果可知最优的施肥、灌水组合方案为:  $17.61 \sim 17.64 \text{ kg}/667\text{m}^2$ ,  $174.86 \sim 180.73 \text{ m}^3/667\text{m}^2$ 。

## 4. 结论与讨论

1) 在日光温室滴灌条件下,提出了滴灌番茄水肥耦合模型,在此水分利用率模型下番茄水分利用率理论上可达 3.36。经检验达到了显著水平,可以用于预报和指导生产。

2) 在本试验条件下,通过对影响土壤水分利用率的水、肥二因素的重要性分析可知:影响水分利用

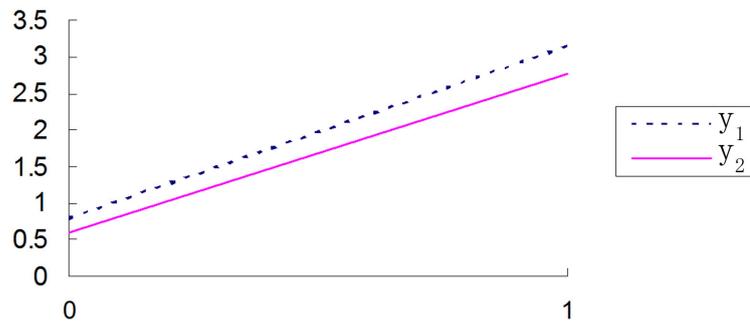


Figure 1. Water use rate of marginal effect of line graph

图 1. 水分利用率的边际效应直线图

率的水肥二因素的重要性数值分别为 2.30、2.25，单因素增产效应分析表明水、肥二因素影响滴灌番茄土壤水分利用率的主次顺序为灌水量 > 施肥量，灌水量对水分利用率的影响最大，表现出显著正效应，施肥量对水分利用率的影响较小。

3) 在本试验的水肥处理水平下，得出水分利用效率较佳的最优组合方案为灌水指标 174.86~180.73  $\text{m}^3/667\text{m}^2$ ，施肥指标为 17.61~17.64  $\text{kg}/667\text{m}^2$ 。这一结论较虞娜、张玉龙等人研究的可节水、节肥均达 19%~24%，较刘祖贵、段爱旺等人研究的可节水 16%~19%。因此，对于豫北地区日光温室的膜下滴灌番茄，依此施肥灌水指标就可以实现节水、高产、高效的目标。

4) 在本试验条件下，灌水水平与施肥水平交互关系经检验未达显著水平。但从中可见灌水量与施肥量对产量和水分利用率均有一定的正交互作用，水肥配施或水肥相济有利于促进增产和提高水分利用率，因此利用滴灌设施随水同时追施肥或追肥后及时灌水以提高其交互耦合效应，将十分有利于番茄产量的形成和水分利用效率的提高。

## 基金项目

河南省重大科技攻关项目(092101310300)。

## 参考文献 (References)

- [1] 易秀 (2001) 农事活动对水资源的非点源污染问题. *西安工程学院学报*, **2**, 42-45.
- [2] 谢建昌, 陈际型 (1997) 菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥. 河海大学出版社, 南京, 289-293.
- [3] 任祖金, 邱孝煊, 蔡元程 (1997) 化学氮肥对蔬菜硝酸盐污染影响的研究. *中国环境科学*, **4**, 326-329.
- [4] 汤丽玲, 陈清, 张福锁 (2004) 日光温室番茄的氮素追施与反馈调控. *植物营养与肥科学报*, **4**, 391-397.
- [5] 李明思, 马富裕, 郑旭荣 (2002) 膜下滴灌棉花需水规律的研究. *灌溉排水*, **1**, 58-60.
- [6] 李久生, 饶敏杰, 张建君 (2003) 干旱区玉米滴灌需水规律的田间试验研究. *灌溉排水学报*, **1**, 16-21.
- [7] 原保忠, 康跃虎 (2000) 番茄滴灌在日光温室内存水规律的初步研究. *节水灌溉*, **3**, 25-27.
- [8] 吴建繁, 等 (2000) 京郊保护地番茄氮磷钾肥料效应及其吸收分配规律研究. *植物营养与肥学报*, **4**, 409-416.
- [9] 汪智慧 (2000) 钾氮互作及配施微量元素对番茄产量和品质的影响. *安徽农业科学*, **2**, 232-234.
- [10] 曾向辉, 等 (1999) 温室西红柿滴灌灌水制度实验研究. *灌溉排水*, **4**, 23-26.
- [11] 白厚义, 肖俊璋 (1998) 试验研究及统计分析. 世界图书出版公司, 西安, 229-235.
- [12] 陈修斌, 邹志荣, 姚静 (2004) 日光温室西葫芦水肥耦合效应量化指标研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, **3**, 49-51.