

膜下滴灌施肥番茄水肥供应量的优化研究

王秀康^{1,2} 邢英英^{1,3} 张富仓³

(1. 延安大学生命科学学院, 延安 716000; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;

3. 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)

摘要: 为揭示膜下滴灌施肥番茄对不同灌水量和施肥量的响应, 基于2012—2013年田间随机分块试验, 采用Tukey HSD方差分析方法研究了不同水肥供应对番茄生长、产量和水分利用效率的影响, 进一步采用多元回归分析确定温室番茄田间管理推荐的灌水量和施肥量。结果表明, 在2012年, 移植后23 d, 灌水量和施肥量对番茄株高影响极显著, 水肥交互作用对番茄株高影响显著; 在整个生育期, 番茄茎粗与施肥量差异显著; 不同灌水处理之间平均叶片扩展速率无显著性差异, 叶片扩展速率对施肥处理的敏感性大于灌水处理; 干物质积累量与施肥量和灌水量均正相关, 施肥量对番茄干物质积累量影响显著, 施肥对番茄干物质积累量的影响大于灌水; 灌水和施肥对番茄产量影响显著, 水肥交互作用对番茄产量影响极显著, 在2012年, W1 (100% ET_0) 处理的番茄平均产量最大, 比W2 (75% ET_0)、W3 (50% ET_0) 处理分别高5.99%和13.54%, 番茄果数与产量呈正相关关系, 单果质量与番茄产量无相关关系; 灌水量对番茄水分利用效率的影响极显著, 作物耗水量与灌水量正相关, 与施肥量无显著性关系, 施肥对作物耗水有促进作用。根据2年田间试验结果, 综合考虑番茄产量和水分利用效率, 推荐番茄灌水量为151.12~207.76 mm, 施肥量为453.58~461.08 kg/hm², 其中, 氮肥用量为213.45~216.98 kg/hm², 磷肥用量为106.72~108.49 kg/hm², 钾肥用量为133.41~135.61 kg/hm²。

关键词: 番茄; 水分利用效率; 干物质; 滴灌施肥; 多元回归

中图分类号: S275.6; S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0141-10

Optimal Amount of Irrigation and Fertilization under Drip Fertigation for Tomato

Wang Xiukang^{1,2} Xing Yingying^{1,3} Zhang Fucang³

(1. College of Life Science, Yan'an University, Yan'an 716000, China

2. Institute of Water Resources and Hydro-electricity Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

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

Abstract: Field experiments were conducted from 2012 to 2013 to determine the effects of irrigation and fertilization on tomatoes' (*Lycopersicum esculentum* Mill., cv. 'Jinpeng 10') growth, yield and water use efficiency. Three levels of irrigation (W1: 100% ET_0 ; W2: 75% ET_0 ; W3: 50% ET_0) and three fertilization levels (F1: N 240 - P₂O₅ 120 - K₂O 150 kg/hm²; F2: N 180 - P₂O₅ 90 - K₂O 112.5 kg/hm²; F3: N 120 - P₂O₅ 60 - K₂O 75 kg/hm²) were combined with three replications of fertigation. There was no significant effect factor on plant height and stem diameter of the interaction of irrigation and fertilization, but the stem diameter was significantly higher at W1F1 treatment, and there was a positive correlation between fertilization rate and stem diameter. The F2 treatment had the highest leaf extension rate, while

收稿日期: 2015-09-02 修回日期: 2015-10-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)、延安大学博士启动基金项目(205040119)和中国博士后科学基金项目(2015M572659XB)

作者简介: 王秀康(1983—),男,讲师,西安理工大学博士后,主要从事农业水土工程研究,E-mail: wangxiukang@126.com

通信作者: 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

the fertilization rate had significant effect on leaf extension rate , and the sensitivity of the fertilization was greater than that of the irrigation treatment. There was an important impact of the fertilization rate on dry matter accumulation , but the irrigation level did not follow this trend. The influence of fertilization on dry matter accumulation was greater than that of irrigation. The interaction of irrigation and fertilization had significant effect on root shoot ratio , and the F2 treatment had the highest average root shoot ratio compared with F1 and F3 treatments. The single factors of irrigation or fertilization significantly affected the tomato yield and water use efficiency , and the interaction of fertilization and irrigation had a great significant effect on the yield. The average tomato yield in W1 was 5.99% , 13.54% higher than those in W2 , W3 treatments in 2012. Tomato fruit number was positively related to tomato yield , but the single fruit weight had no correlation with fruit yield. The crop water consumption was positively related to irrigation amount , and there was no significant trend between fertilization rate and crop water consumption , while fertilization rate had an obvious promoting effect on crop water consumption. According to the field experimental and comprehensive consideration of tomato yield and water use efficiency , the recommended irrigation amount was ranged from 151.12 mm to 207.76 mm , and fertilization rate was ranged from 453.58 kg/hm² to 461.08 kg/hm² (upper limit : N 213.45 – P₂O₅ 106.72 – K₂O 133.41 kg/hm² ; lower limit : N 216.98 – P₂O₅ 108.49 – K₂O 135.61 kg/hm²).

Key words: tomato; water use efficiency; dry matter; drip fertigation; multiple regression

引言

滴灌施肥是将施肥与滴灌相结合的一项农业技术,通过滴灌系统及灌水器输送水分和肥料到作物根区,供作物吸收和利用,这种灌溉施肥方式在提高作物产量的同时,减少灌溉水和肥料的损失,大幅度提高了水分和肥料的利用效率,是目前农业灌溉技术中较高效利用水分养分的田间管理技术^[1-2]。从20世纪开始,滴灌施肥技术在我国大面积推广应用,在滴灌施肥条件下,作物产量和水肥利用效率比常规灌水施肥提高20%~30%^[3]。水肥田间管理是影响作物生长发育和生产力水平提高的重要因素,其相互促进,相互制约^[4];水分和养分的结合能有效提高水肥资源的利用率,获得更高的生产和生态效益。因而,进一步研究作物产量和水分利用效率对水肥交互作用的响应机理,具有重要的理论和现实意义。

番茄在我国和其他国家都深受欢迎,原因主要是^[5]:一方面番茄的口感比较好,并且对人体有很多好处,富含维生素A和C;另一方面番茄是番茄红素的主要来源,也是美味佳肴的必备原料;另外,番茄还具有抗癌以及预防早期癌细胞扩散等功效。然而,番茄产量受水肥管理影响较大,为此前人对番茄水肥管理开展了大量研究工作^[6-9],结果表明,灌水量和施肥量对番茄生长有明显的耦合交互作用,合理的灌溉指标有利于番茄生长,提高产量和水分利用效率。孙文涛等^[10]研究表明灌水对番茄产量的影响大于施肥,灌水量和施钾肥量有显著的交互作

用,其次是氮肥,水肥对番茄产量的影响均表现为开口向下的抛物线趋势。Kuscu等^[11]研究表明,滴灌施肥技术能够节约用水33%,提高灌溉水分利用效率42%,同时,显著提高番茄产量。此外,有学者^[12-13]研究了滴灌施肥处理对番茄生长指标、根系干物质、产量和水分利用效率的影响,但灌水和施肥对各指标的影响顺序,以及同时考虑各指标相对较优时的水肥管理技术研究较少。

本文通过温室大棚滴灌施肥试验研究灌水量和施肥量对番茄生长、产量和水分利用效率的影响,揭示水肥供应对番茄生长的影响,以及水肥供应对番茄产量和水分利用效率的响应规律,采用多元回归和归一化处理,综合考虑水肥投入对番茄产量和水肥利用效率的影响,提出相对较优的灌水量和施肥量,为温室番茄田间管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验场地位于西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室日光温室,试验地位于东经108°04',北纬34°20',海拔高度522 m,试验区域为暖温带半湿润气候带,多年平均气温13℃,平均降水量645 mm,其中降雨主要在7—9月份,多年平均蒸发量1400 mm。试验场地土壤为重壤土,0~80 cm土壤基本理化性质为:有机质质量比15.02 g/kg、全氮质量比0.87 g/kg、全磷质量比0.55 g/kg、全钾(K₂O)质量比16.8 g/kg,pH值8.14,田间持水率为23%~25%(质量含水率),凋萎含水率为8.5%。

供试番茄品种为金鹏 10 号 (*Lycopersicum esculentum* Mill., cv. ‘Jinpeng 10’), 两年度的试验分别于 2012 年 3 月 21 日和 2013 年 3 月 31 日播种。滴灌施肥用的氮、磷和钾肥分别为尿素(N 质量分数 46%)、磷酸二铵(N 质量分数 16%、P₂O₅ 质量分数 44%)和氯化钾(K₂O 质量分数 60%)。

试验温室的长度、跨度和高度分别为 76、7.5、2.8 m, 滴灌施肥设备采用液压比例施肥泵装置控制, 设备主要由水源、水泵、旋翼式水表、比例施肥泵和输配水管道系统等组成。滴灌管为内镶式圆柱滴头滴灌管, 内径 8 mm, 滴头间距 30 cm, 滴头流量 2 L/h, 滴灌工作压力 0.3 MPa。

1.2 试验设计

灌溉依据参考作物蒸发蒸腾量, 肥料处理的 N-P₂O₅-K₂O 用量不同。以充分灌水(100% ET₀)、当地推荐施肥量(F: 240-120-150 kg/hm²)为基础, 设灌水和施肥 2 因素, 3 个滴灌水量(W1: 100% ET₀, W2: 75% ET₀, W3: 50% ET₀)和 3 个施肥水平(F1: 240-120-150 kg/hm², F2: 180-90-112.5 kg/hm², F3: 120-60-75 kg/hm²), 共 9 个处理, 各处理 3 次重复。F2 为 75% 推荐施肥量、F3 为 50% 推荐施肥量。随机区组排列, 小区区长 6 m、宽 3.75 m、面积 22.5 m², 小区间采用 60 cm 隔水板做防渗隔离。采用当地典型的沟垄覆膜种植模式, 番茄起垄时 1 管 2 行布置, 行距 50 cm、株距 45 cm, 每个小区定植 78 株, 具体布置如图 1 所示。

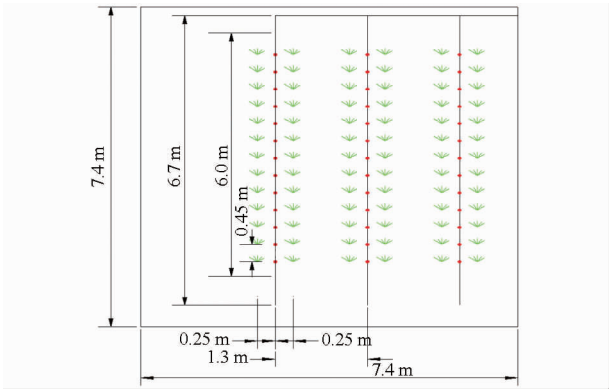


图 1 试验滴灌施肥布置图

Fig. 1 Sketch of drip fertigation experimental arrangement

1.3 灌水与施肥

2 年分别于 2012 年 3 月 21 日和 2013 年 3 月 31 日定植, 定植和缓苗时共灌水 40 mm。处理开始后平均每 7 d 灌 1 次水, 7 d 的每日蒸发蒸腾量由温室 HOBO 气象站采集, ET₀ 计算采用日光温室 Penman-Monteith 修正公式^[14]。每株留 4 穗果, 从定植到拉秧, W1、W2 和 W3 灌水总量分别为 279.54、219.66、159.77 mm。每个灌水处理小区的

首部单独安装了水表, 仅灌水不施肥时, 所有灌水处理同时进行, 用水表精确控制每个灌水处理的水量。

番茄的生长具有阶段性, 根据番茄生育周期, 滴灌施 N、P₂O₅ 和 K₂O 肥, 分 5 次通过滴灌系统施入, 2012 年 5 次施肥时间依次为: 定植后 10 d、定植后 25 d、定植后 46 d (第 1 穗果膨大期)、定植后 60 d (第 2 穗果膨大期)、定植后 74 d (第 3 穗果膨大期)。2013 年 5 次施肥时间依次为: 定植后 10 d、定植后 22 d、定植后 43 d (第 1 穗果膨大期)、定植后 66 d (第 2 穗果膨大期)、定植后 85 d (第 3 穗果膨大期)。前 2 次施肥量各占总量的 12.5%, 后 3 次施肥量各占总量的 25%。施肥时在前 1—2 d 将所需的施肥量按肥料种类和施肥水平溶于 9 个桶中, 并保证每一种肥料的浓度相同(母液浓度相同), 施肥时控制肥液比率为 4%, 将 3 个施肥量分别进行, 即一个施肥处理结束后再进行下一个施肥处理, 为了保证能将本次的施肥量完全施入, 在施肥过程中选择先施肥后灌水的方式, 将带走肥液所需的水量计入本次灌水量之内^[15]。

1.4 测定内容及方法

株高和茎粗测定: 每个处理选 3 株用标签标记, 每隔 15~20 d 用卷尺测定株高, 用游标卡尺测定茎粗。

叶片扩展速率测定: 从植株底部向上数至第 8 个叶片进行标记, 番茄定植后, 每隔 20 d 左右分别测定各叶片的叶长(L)和叶宽(W_i), 计算叶面积(S), 每个处理重复 3 次^[15]。

根系测定: 在生育末期进行根系样品采集, 每个处理随机选取番茄 3 株, 采用挖掘法取样, 以植株为中心, 在 60 cm×40 cm×60 cm 的样方内, 将整根取出, 用清水冲洗, 去除杂物, 放入干燥箱, 以 105℃ 杀青 30 min, 然后于 75℃ 干燥 72 h, 冷却后用电子天平称量。

产量测定: 2012 年从 5 月 29 日开始采摘, 至 7 月 22 日结束, 平均每 4 d 或 5 d 进行 1 次测产, 共取 13 次。2013 年从 5 月 21 日开始, 至 7 月 20 日结束, 测产 15 次, 每个小区取 3 个重复, 每个重复标记 12 株, 每次收获时将各计产小区分别称量, 计算产量。

采用水量平衡法计算不同时段内番茄的耗水量 ET_c, 即

ET_c = P_r + I + U - R - D - ΔW (1)

式中 P_r——有效降雨量, mm
I——灌水量, mm
U——地下水补给量, mm
R——径流量, mm

D ——深层渗漏量,mm
 ΔW ——试验初期和末期 0 ~ 100 cm 土壤储水量的变化量,mm

由于温室内没有降雨,故 $P_r = 0$,对于滴灌,每次灌水量较少(最大灌水量 24.3 mm),故 R 和 D 可以忽略不计,地下水位在 50 m 以下,故 U 也可忽略不计。式(1)简化为

$$ET_c = I - \Delta W \tag{2}$$

水分利用效率(Water use efficiency, WUE)计算公式为

$$V_{WUE} = Y/ET_c \tag{3}$$

式中 Y ——番茄产量,kg/hm²
 V_{WUE} ——水分利用效率,kg/m³

1.5 数据分析

株高、茎粗、叶面积扩展速率、产量和水分利用效率用 Microsoft Excel 2010 进行数据计算,用 SAS V8 和 SPSS 16.0 统计软件进行方差分析(Tukey HSD),用 SigmaPlot 10.0 和 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 水肥供应对番茄形态指标的影响

2.1.1 株高

水肥在番茄整个生长过程中起重要作用,番茄通过根系吸收土壤中的水分和养分,进行光合作用,合成碳水化合物。不同水肥供应对番茄株高的影响如图 2 所示(图中不同字母表示差异显著),2012 年,移植后 23 d,灌水量和施肥量对番茄株高影响极显著(表 1),水肥交互作用对番茄株高影响显著,但 2013 年结果表明水肥交互作用对番茄株高影响不明显,F1 处理的株高显著高于其他施肥水平,W2F1 处理的株高最大,为 40.75 cm,这与 2013 年结果相似,因此,在番茄移栽 23 d 前,最佳处理为 W2F1。移栽后 37 d,不同灌水处理间番茄株高差异不明显,

水肥交互作用对番茄株高影响不显著,W3 处理平均株高增加值最大,为 39.05 cm,高于 W1(36.35 cm)和 W2(35.03 cm)处理的株高增加值。随着生育期的推进,番茄株高在移栽后 53 d,W3 处理的株高增加速度大于 W1 和 W2 处理,但不同灌水量处理之间差异不显著。移栽后 70 d(80 d,2013 年),番茄的株高增加速度较移栽后 53 d(60 d)显著降低,这个阶段番茄的营养生长主要集中在果实部位,在番茄移栽后 70 d(80 d),水肥处理对株高的影响不显著。

2.1.2 茎粗

作物茎部是输送养分和水分的主要载体,具有支持叶部、花和果实稳定的作用,还有光合作用和贮藏营养物质的功能。水肥供应对番茄整个生育期茎粗的影响如图 3 所示,2012 年,移栽后 23 d,不同灌水处理之间的差异不显著,施肥对番茄茎粗的影响极显著,水肥交互作用对茎粗的影响显著(表 1),茎粗最大值为 W2F1 处理,达 8.90 mm,2013 年与 2012 年结果不同,灌水量和施肥量单因素对番茄茎粗的影响极显著,但水肥交互作用对番茄的茎粗影响不显著。移栽后 37 d,番茄茎粗增加速率显著下降,茎粗增加值范围为 0.90 ~ 2.21 mm,最大茎粗增加值出现在 W1F1 处理,与移栽后 23 d 的结果不同,可能随着番茄的生长,W2 处理的灌水量与番茄生长所需的土壤水分有差距,W1 显著促进了番茄茎粗的增加,在相同灌水处理下,F3 处理的茎粗显著低于其他处理,施肥对番茄茎粗的影响为极显著,结果表明,移栽后 23 d 至 37 d 是番茄茎粗积累的需肥关键期。移栽后 53 d,番茄茎粗增加速率继续下降,增加范围为 0.59 ~ 1.04 mm,番茄茎粗增加与灌水量无显著性关系,与施肥量有显著性关系,水肥交互作用对番茄茎粗的影响不显著。移栽后 70 d,不同水肥供应处理之间无显著差异,在相同灌水处理

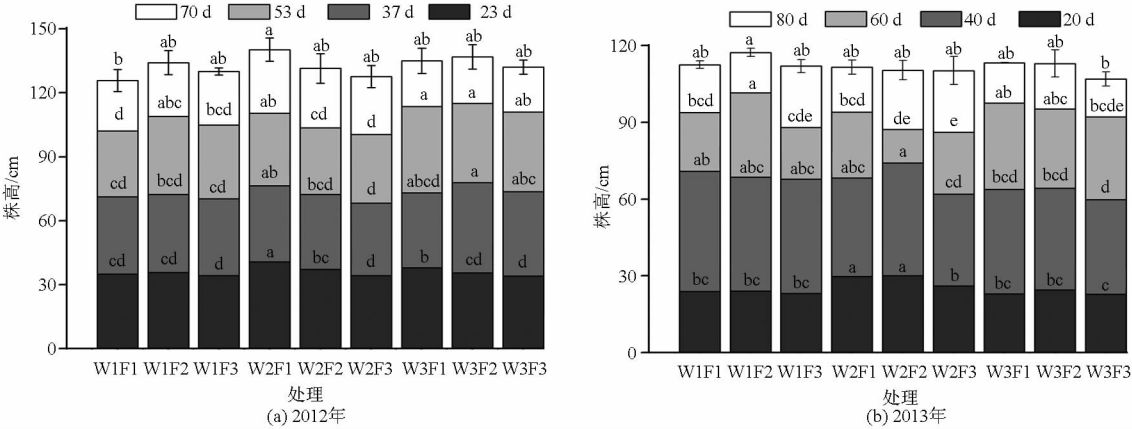


图 2 水肥供应对番茄整个生育期株高的影响
Fig. 2 Effects of irrigation and fertilization on tomato height at whole growth stages

表 1 水肥供应对番茄株高、茎粗和叶片扩展速率的方差分析

指标		2012 年				2013 年			
		23 d	37 d	53 d	70 d	20 d	40 d	60 d	80 d
株高	灌水	0.009 **	0.053	0.001 ***	0.367	<0.001 ***	0.008 **	0.021 *	0.260
	施肥	0.001 ***	0.048 *	0.072	0.387	0.017 *	0.017 *	0.013 *	0.203
	水肥交互	0.03 *	0.078	0.028 *	0.263	0.21	0.156	0.059	0.528
茎粗	灌水	0.076	0.047 *	0.07	0.172	<0.001 ***	<0.001 ***	<0.001 ***	0.001 ***
	施肥	<0.001 ***	0.001 ***	0.006 **	0.001 ***	0.003 **	<0.001 ***	0.001 ***	0.001 ***
	水肥交互	0.012 *	0.621	0.948	0.693	0.622	0.234	0.373	0.065
叶片扩展速率	灌水	<0.001 ***	0.463	0.566	0.071	<0.001 ***	0.008 **	<0.001 ***	0.141
	施肥	<0.001 ***	0.006 ***	0.019 *	0.018 *	<0.001 ***	<0.001 ***	0.001 ***	0.313
	水肥交互	0.464	0.943	0.845	0.626	0.003 **	0.001 ***	0.001 ***	0.003 **

注:表中*、**、***分别表示 $P\leq 0.05$ 、 $P\leq 0.01$ 和 $P\leq 0.001$ 。

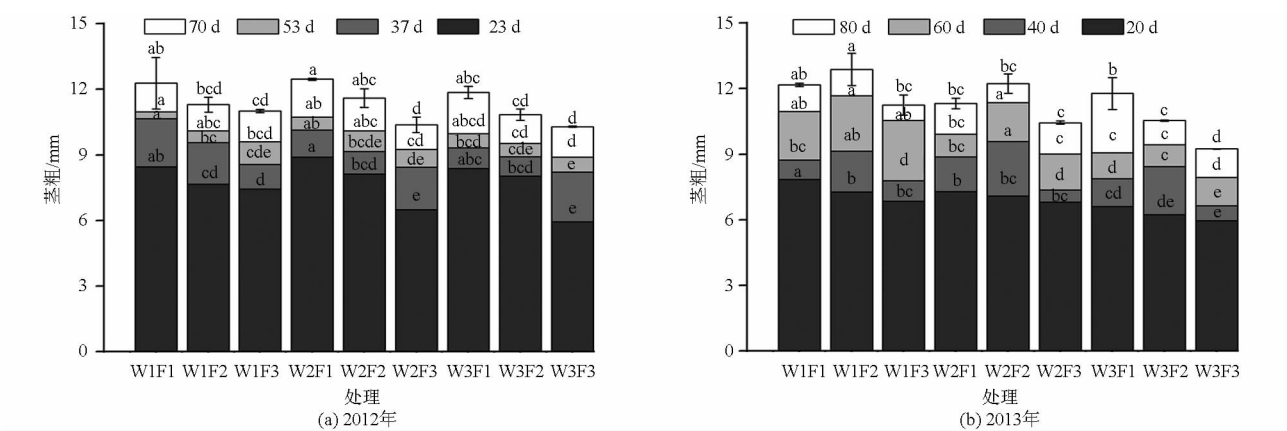


图 3 水肥供应对番茄整个生育期茎粗的影响

Fig. 3 Effects of irrigation and fertilization on tomato stem diameter at whole growth stages

下,番茄茎粗增加最大值为 F1 处理,不同施肥处理之间差异显著,茎粗的增加为番茄果实的累积提供养分运移场所,对施肥需求明显增加。在整个生育期,番茄茎粗与施肥量差异极显著,水肥交互作用对番茄的茎粗无显著性影响。

2.1.3 叶片扩展速率

叶片的主要功能是吸收阳光和二氧化碳,进行光合作用,番茄叶片对番茄产量形成有重要的作用。水肥供应对番茄叶片扩展速率的影响如图 4 所示,在 2012 年,叶片扩展速率的总体变化趋势依次为:迅速增加、迅速下降、增速放缓、趋于稳定,2013 年的变化趋势与 2012 年相似,但 2013 年生育后期,出现叶片衰老,甚至出现负增长现象,W3 处理在番茄后期生长过程中,不能满足叶片蒸发蒸腾耗水所需,叶片扩展速率出现负增长。在 2012 年,移栽后 23 d,灌水和施肥单因素对番茄的叶片扩展速率影响极显著,水肥交互作用对叶片扩展速率的影响不显著(表 1),移栽后 23 d 至 37 d,叶片增长速率呈线性增加,叶片扩展速率最大值为 4.53 cm²/(叶·d),不同灌水处理之间叶片扩展速率差异不显著,不同施肥处理的差异极显著,水肥交互作用对番茄叶片

扩展速率影响不显著,F2 处理的叶片扩展速率最大,结果表明,施肥对叶片扩展速率的影响大于灌水,结果与 2013 年相同,但 2013 年的水肥交互作用对番茄的叶片扩展速率影响极显著。移栽后 37 d 至 53 d,叶面积仍然增加,但增加速率迅速下降,叶片增加幅度为 1.25 ~ 2.34 cm²/(叶·d)。移栽后 53 d 至 70 d,叶片增加速度缓慢,叶片最大增加幅度仅为 1.47 cm²/(叶·d),灌水和施肥对番茄叶片扩展速率的影响比前期减弱,结果表明,F2 处理的叶片扩展速率显著大于 F1 和 F3 施肥处理;相同施肥处理下,不同灌水处理之间的叶片扩展速率无显著性差异,叶片扩展速率与施肥的敏感性大于灌水处理。

2.2 水肥供应对番茄干物质积累量和根冠比的影响

干物质积累量是衡量作物有机物质积累量、营养成分含量的重要指标,不同水肥供应对番茄干物质积累量和根冠比的影响如图 5 所示,W1F1 处理的干物质积累量最大,为 12 021.54 kg/hm²,显著高于其他处理,干物质积累量与施肥量和灌水量均正相关,施肥量对番茄干物质积累量影响显著,相同施肥水平下,灌水对番茄干物质积累量影响不明显,结果表明,施肥处理对番茄干物质积累量的影响大于

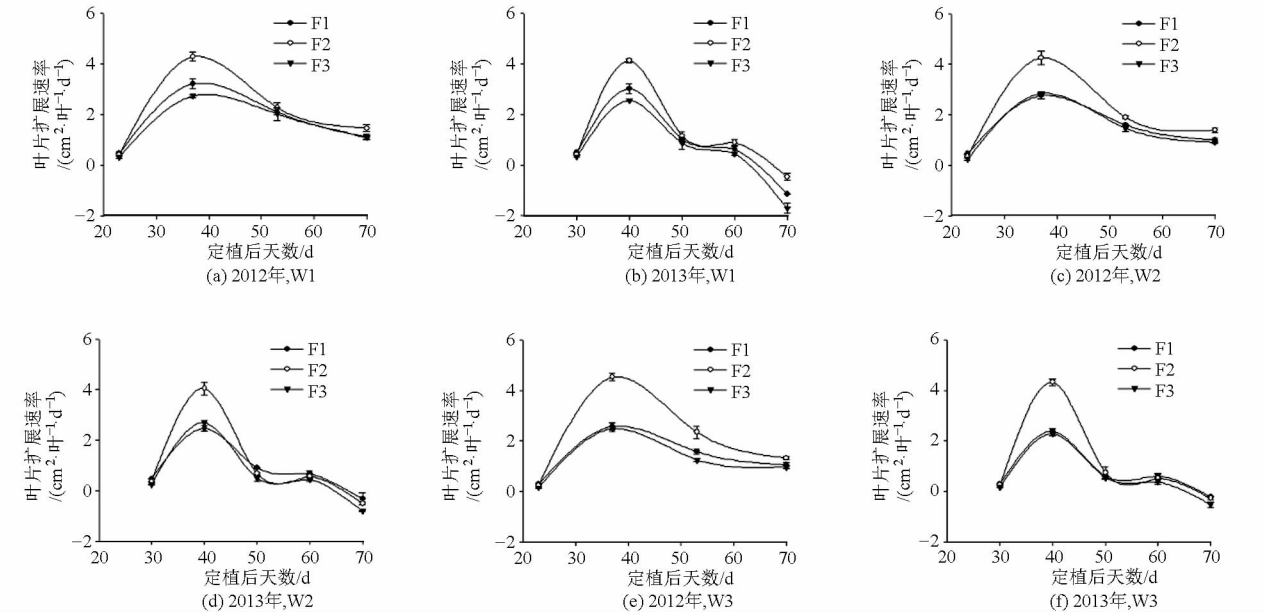


图4 水肥供应对番茄整个生育期叶片扩展速率的影响

Fig.4 Effects of irrigation and fertilization on tomato leaf growth rate at whole growth stages

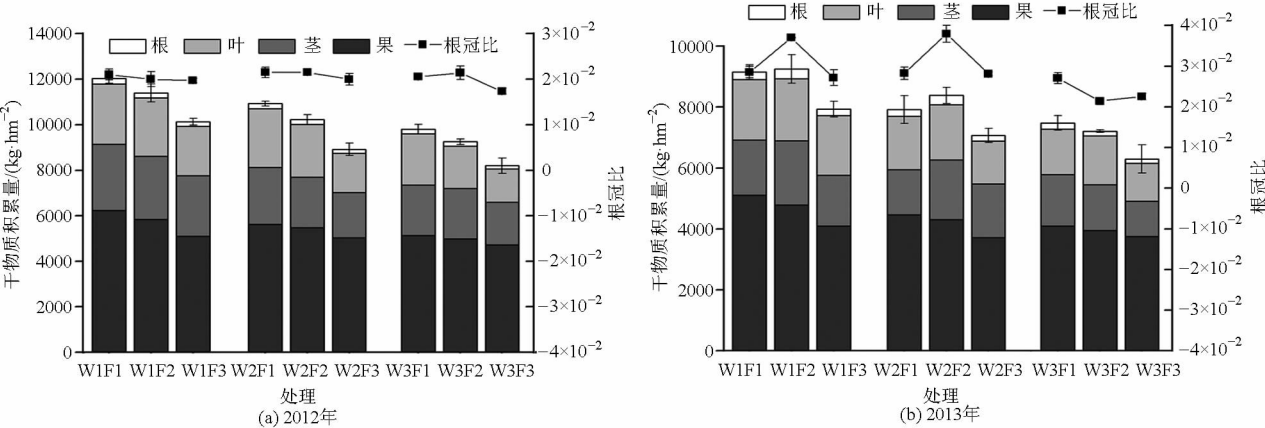


图5 水肥供应对番茄干物质积累量和根冠比的影响

Fig.5 Effects of irrigation and fertilization on tomato dry biomass and root shoot ratio at whole growth stages

灌水处理。W1 处理的根系平均干物质积累量为 221.93 kg/hm²，比 W2、W3 处理分别高 6.96%、20.40%，茎、叶和果实都有相同的规律，但 W2 和 W1 处理的果实无显著性差异，2012 年 W1 处理比 W2 处理高 5.99%，2013 年高 5.59%。

根冠比是植株根系和冠层干物质积累量的比值，主要用来表征光合产物在植株体内的分配特征，也是衡量植物营养指标的关键参数。2012 年不同灌水处理之间的根冠比无显著性差异，2013 年不同灌水和施肥处理差异极显著，灌水和施肥处理交互作用对番茄根冠比影响显著，不同灌水处理下，F2 处理的根冠比显著高于 F1、F3 处理，结果表明，F2 处理有利于番茄对土壤养分的吸收和利用。

2.3 水肥供应对番茄产量、果数和单果质量的影响

不同灌水水平和施肥水平对番茄产量、果数和单果质量的影响如表 2 所示，从 2 年试验可以看出，

灌水和施肥对番茄产量影响显著，水肥交互作用对番茄产量影响极显著，水肥综合影响效果明显，在 2012 年，相同灌水水平下，W1 处理的番茄平均产量最大，比 W2、W3 处理分别高 5.99% 和 13.54%，在 2013 年，W1 处理的番茄平均产量最大，比 W2、W3 处理分别高 9.02% 和 16.20%，在相同施肥投入下，增加灌水量，番茄产量显著增加，2013 年番茄产量增加值大于 2012 年，可能与 2012 年施肥处理残留肥料有关，另外与气象因素有关，2013 年的耗水量大于 2012 年。2012 年，在相同灌水水平下，F1 处理番茄平均产量比 F2、F3 处理高 3.93% 和 12.39%，2013 年分别高 4.56% 和 14.16%。结果表明，番茄产量对灌水的敏感程度大于施肥。灌水和施肥对番茄果数、单果质量均无显著性影响，番茄果数与灌水量和施肥量呈正相关关系，2012 年，W1 处理的果数平均值比 W2、W3 处理高 6.16% 和 14.25%，2013

表 2 水肥供应对番茄产量、果数和单果质量的影响

Tab.2 Effects of irrigation and fertilization on tomato yield, fruit number and fruit weight per plant

灌水水平	施肥水平	2012 年			2013 年		
		产量/(t·hm ⁻²)	果数/个	单果质量/g	产量/(t·hm ⁻²)	果数/个	单果质量/g
W1	F1	96.7 ± 1.25 ^a	13.2 ± 0.15 ^b	183.5 ± 0.27 ^a	97.1 ± 1.75 ^a	15.0 ± 0.29 ^a	186.3 ± 0.30 ^a
	F2	90.6 ± 1.68 ^b	14.8 ± 0.76 ^a	153.2 ± 10.66 ^c	91.1 ± 1.44 ^b	14.3 ± 0.29 ^a	183.9 ± 6.71 ^{ab}
	F3	79.3 ± 2.01 ^d	12.6 ± 0.05 ^{bc}	157.3 ± 3.36 ^{bc}	77.9 ± 1.27 ^e	12.7 ± 0.41 ^{cd}	177.0 ± 8.63 ^{abc}
W2	F1	87.3 ± 1.67 ^{bc}	13.3 ± 1.16 ^b	164.4 ± 11.21 ^{bc}	85.0 ± 1.24 ^c	14.5 ± 0.53 ^{ab}	168.6 ± 3.70 ^c
	F2	85.1 ± 2.19 ^c	12.4 ± 0.91 ^{bc}	171.6 ± 8.14 ^{ab}	81.9 ± 1.57 ^d	13.4 ± 0.06 ^{bc}	176.6 ± 2.60 ^{abc}
	F3	78.2 ± 1.19 ^{de}	12.4 ± 0.71 ^{bc}	158.5 ± 6.65 ^{bc}	75.2 ± 0.47 ^e	12.8 ± 0.71 ^c	169.4 ± 10.38 ^{bc}
W3	F1	79.6 ± 3.03 ^d	13.0 ± 0.35 ^b	152.7 ± 1.66 ^c	77.8 ± 0.65 ^e	13.2 ± 0.29 ^c	170.1 ± 5.2b ^c
	F2	77.5 ± 2.20 ^{de}	11.3 ± 0.15 ^{cd}	172.3 ± 7.21 ^{ab}	75.1 ± 1.21 ^e	13.0 ± 0.65 ^c	167.4 ± 5.67 ^c
	F3	73.4 ± 2.56 ^e	10.5 ± 0.05 ^d	174.3 ± 6.91 ^{ab}	70.0 ± 0.87 ^f	11.7 ± 0.47 ^d	172.0 ± 4.77 ^{abc}
显著性检验 P 值							
灌水		0.004 **	0.155	0.97	0.002 **	0.144	0.247
施肥		<0.001 ***	0.074	0.623	0.011 *	0.027 *	0.729
水肥交互		0.001 **	0.004 **	0.001 **	0.007 **	0.327	0.145

注:表中不同字母表示不同处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著性水平, *、**、***分别表示 $P \leq 0.05$ 、 $P \leq 0.01$ 和 $P \leq 0.001$ 。

年为 3.07% 和 9.81%,单果质量与番茄产量无正相关关系。

2.4 番茄产量与果数、单果质量的关系

连续 2 年番茄产量与果数、单果质量的关系如图 6 所示,果数、单果质量与番茄产量都有线性关系,番茄产量随着果数和单果质量的增加而增加,但果数和番茄产量有极显著关系,番茄的单果质量与产量无显著性关系。番茄与果数的决定系数 ($R^2 = 0.535$) 大于番茄与单果质量的决定系数 ($R^2 = 0.109$),结果表明,番茄产量增加与果数的关系大于与单果质量的关系。这与 Aujla 等采用水肥供应对茄子的试验结果相近,茄子的产量与个数呈强相关关系 ($R^2 = 0.8028$),因而,不同水肥供应对鲜果质量的主要影响因素是茄子个数^[16]。

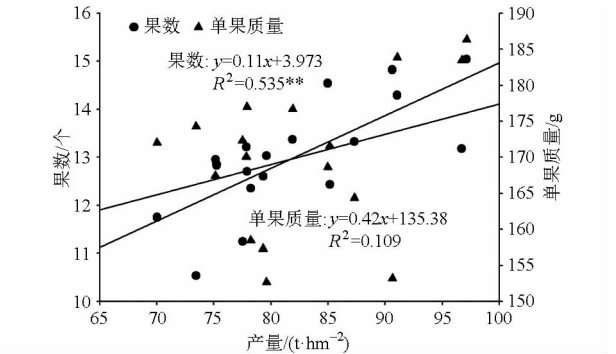


图 6 水肥供应条件下番茄产量与果数、单果质量的关系
Fig.6 Relationships between tomato yield and fruit number, fruit weight per plant

2.5 水肥供应对番茄水分利用效率和耗水量的影响

作物水分利用效率是农田蒸腾耗水所制造的生物产量,是衡量作物对土壤水分吸收和利用过程的重要指标,不同水肥供应对番茄水分利用效率和耗

水量的关系如图 7 所示。灌水量(ET)对番茄水分利用效率的影响极显著,水分利用效率与灌水量呈负相关,W3F1 处理的水分利用效率最高,2012 年为 44.96 kg/m³,2013 年为 47.66 kg/m³,减小灌水量,水分利用效率将增高,2012 年 W3 处理的水分利用效率比 W1、W2 处理高 27.32% 和 18.70%,2013 年 W3 处理的水分利用效率分别比 W1、W2 处理高 31.24% 和 20.83%。施肥处理与番茄的水分利用效率呈正相关,增加施肥量,水分利用效率将降低,2012 年 F3 处理的水分利用效率分别比 F1、F2 处理高 13.31% 和 10.01%,2013 年 F3 处理的水分利用效率分别比 F1、F2 处理高 14.83% 和 10.67%。这说明灌水对番茄水分利用效率的影响大于施肥对番茄水分利用效率的影响。耗水量与作物生长状况密切相关,是作物生长过程的净耗水量,具有不可逆性,从 2 年的试验可以看出,作物耗水量与灌水量正相关,与施肥量无显著性关系,施肥对作物耗水有促进作用,相同灌水处理下,不同施肥处理之间的耗水

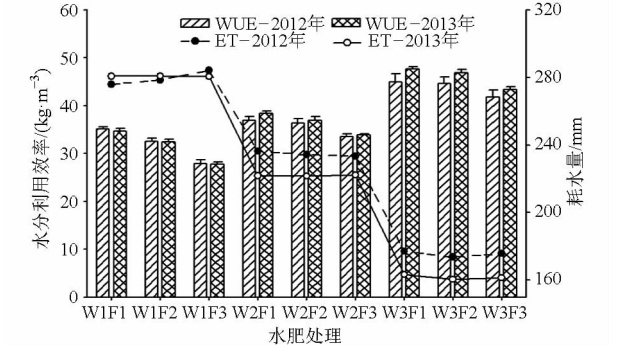


图 7 水肥供应对番茄水分利用效率和耗水量的影响
Fig.7 Effects of irrigation and fertilization on water use efficiency and water consumption of tomato

量相近。结果表明,作物耗水量对灌水处理的响应大于施肥处理。

2.6 优化番茄产量和水分利用效率确定灌水、施肥指标

本文以灌水量和施肥量为自变量,分别以蕃茄产量、水分利用效率为因变量,进行回归分析,回归分析结果如表 3 所示,结果表明,水肥供应量对番茄产量和水分利用效率影响均为极显著水平 ($P < 0.01$),决定系数均在 0.99 以上。根据 2012 年的最大灌水量、最小灌水量、最大施肥量和最小施肥量,通过极值问题求解方法,分别计算表 3 中番茄产量、水分利用效率的最大值,当回归方程达到最大值时的灌水量和施肥量分别为 151.12 mm、453.58 kg/hm²,同理,求得 2013 年回归方程达到最大值时的灌水量和施肥量分别为 207.76 mm、461.08 kg/hm²。假定番茄产量和水分利用效率同等重要,二者所占比例均为 0.5,进行归一化处理,并加权平均,则得到综

合产量和水分利用效率的归一化方程,分别为:
2012 年

$$Y_{Y+I} = 1.18 - 4.83 \times 10^{-3}I + 7.62 \times 10^{-4}F + 6.80 \times 10^{-6}I^2 - 1.42 \times 10^{-6}F^2 + 3.62 \times 10^{-6}IF$$

2013 年

$$Y_{Y+I} = 1.33 - 7.11 \times 10^{-3}I + 1.18 \times 10^{-3}F + 1.21 \times 10^{-5}I^2 - 1.75 \times 10^{-6}F^2 + 3.02 \times 10^{-6}IF$$

式中 Y_{Y+I} ——综合考虑番茄产量和水分利用效率的归一化方程

F ——施肥量,kg/hm²

综合考虑 2 年田间试验结果,本文推荐番茄田间管理优化灌水量和施肥量分别为:151.12 ~ 207.76 mm 和 453.58 ~ 461.08 kg/hm²,即推荐施肥量下限 N - P₂O₅ - K₂O 用量为 213.45 - 106.72 - 133.41 kg/hm²,推荐施肥量上限 N - P₂O₅ - K₂O 用量为 216.98 - 108.49 - 135.61 kg/hm²。

表 3 水肥供应与番茄产量和水分利用效率的回归关系

Tab.3 Regression relationship between tomato yield and water use efficiency

年份	指标	回归方程	决定系数 R^2	显著性 P
2012	蕃茄产量	$Y = 51.0 + 5.06 \times 10^{-2}I + 5.57 \times 10^{-2}F - 2.30 \times 10^{-4}I^2 - 1.25 \times 10^{-4}F^2 + 4.05 \times 10^{-4}IF$	0.992	0.002
	水分利用效率	$Y = 84.8 - 4.67 \times 10^{-1}I + 4.40 \times 10^{-2}F + 7.31 \times 10^{-4}I^2 - 7.24 \times 10^{-5}F^2 + 1.44 \times 10^{-4}IF$	0.996	0.001
2013	蕃茄产量	$Y = 73.6 - 3.07 \times 10^{-1}I + 9.57 \times 10^{-2}F + 6.26 \times 10^{-4}I^2 - 1.69 \times 10^{-4}F^2 + 3.94 \times 10^{-4}IF$	0.995	0.001
	水分利用效率	$Y = 91.5 - 5.31 \times 10^{-1}I + 6.61 \times 10^{-2}F + 8.51 \times 10^{-4}I^2 - 8.48 \times 10^{-5}F^2 + 9.56 \times 10^{-5}IF$	0.999	0

3 讨论

本试验研究了不同水肥供应对温室番茄生长、干物质分配、果数、产量和水分利用效率的影响,综合考虑番茄产量和水分利用效率,通过多元回归求得最高产量和最佳水分利用效率的灌水量和施肥量,通过归一化处理,最终确定推荐温室番茄田间管理的灌水量和施肥量,为温室番茄田间管理提供科学依据。通过 2 年试验结果表明,番茄的生长指标与灌水量和施肥量呈正相关,在番茄移栽后 23 d,最佳水肥处理为 W2F1,这与番茄的耗水有关,结果与侯加林等^[17]和张燕等^[18]提出过高的灌水量在番茄生长旺盛期会抑制株高增长的试验结果一致。在不同滴灌施肥条件下^[19],增加灌水量和施肥量能提高番茄干物质积累量,但水分过多会造成“徒长现象”,建议在滴灌施肥下,重点考虑施肥量和灌水量的合理配比。在水肥供应对番茄干物质积累的结果中,干物质积累量与施肥量正相关,施肥量对番茄干物质积累量的响应大于灌水,叶片扩展速率在整个生育期的变化趋势,先迅速增加,随着生育期的推进,叶片增加速率迅速下降,再进一步放缓,直至趋

于稳定,不同灌水处理之间的叶片扩展速率无显著性差异,叶片扩展速率对水肥响应规律与干物质积累量相同。这与黄红荣等^[20]研究结果相同,采用滴灌施肥研究番茄干物质的分配情况,结果表明根的干物质比例在整个生育期内变化不明显,干物质的积累和运转受水分和肥料双重影响,以肥料影响为主。有学者^[21]在温室条件下,研究施肥量和灌水量对番茄生长的影响结果与本试验结果相同,施肥对番茄生长的影响大于灌水,而灌水对番茄生长的影响大于水肥交互作用。

本试验结果表明,灌水和施肥对番茄产量影响显著,水肥交互作用对番茄产量影响极显著,水肥综合影响效果明显,结果与王鹏勃等^[22]在陕西省杨凌现代农业创新示范园日光温室内进行水肥耦合对番茄产量影响研究结果相同,单株施肥量、灌水量以及水肥交互作用对番茄产量影响都显著,影响顺序由大到小为:灌水、施肥、水肥交互作用。本试验表明水肥交互作用对番茄产量的影响大于施肥对番茄产量的影响,这样的结果可能与水肥交互作用对番茄的促进作用明显引起的,体现了以水促肥、以肥调水的耦合效应,通过水肥间的促进效应达到提高番茄产量的效果。

本试验研究结果表明,不同水肥供应对番茄水分利用效率影响显著,灌水对番茄水分利用效率的影响极显著,水肥交互作用对番茄水分利用效率不显著,灌水对番茄水分利用效率的影响大于施肥对番茄水分利用效率的影响。Sharma 等^[23]和杜建军等^[24]认为,施肥对水分利用效率有促进作用,在相同灌水条件下,施肥可以有效提高水分利用效率,还有研究者表示,适量增加肥料用量,可以提高灌溉水分利用效率,当超过一定施肥量后,则会降低灌溉水分利用效率,这些结果与本文的结果相一致。施肥有效提高水分利用效率,可能有以下两方面原因,一是施肥能促进番茄根系生长发育,提升根系吸收水分和养分的能力,增加作物光合产物,提高产量和单位水分的生产力;另一方面可能是施肥促进番茄生长,在生长过程中土壤中有效水消耗量随之增加,使得根系周围的土壤水移动到番茄根系附近,增加了

土壤水的吸收效率,进一步提高土壤水的有效使用^[25]。

4 结束语

一般很难做到获得最高水分利用效率的同时得到最高产量,减少灌水量将会获得更高的水分利用效率,基于这一特点,在获取最高水分利用效率时,则不能同时考虑作物产量。本文根据番茄需水需肥特点,考虑水肥供应对番茄生长和产量的影响,同时以综合考虑番茄产量和水分利用效率同等重要为目标,即番茄产量和水分利用效率的权重系数各为 0.5,提出了温室番茄栽培的灌水量和施肥量,推荐灌水量为 151.12 ~ 207.76 mm,施肥量为 453.58 ~ 461.08 kg/hm²,其中氮肥用量为 213.45 ~ 216.98 kg/hm²,磷肥用量为 106.72 ~ 108.49 kg/hm²,钾肥用量为 133.41 ~ 135.61 kg/hm²。

参 考 文 献

- 1 Godfray H C, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people [J]. Science, 2010, 327: 812 - 818.
- 2 申孝军, 陈红梅, 孙景生, 等. 调亏灌溉对膜下滴灌棉花生长, 产量及水分利用效率的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 40 - 43.
Shen Xiaojun, Chen Hongmei, Sun Jingsheng, et al. Response of different water deficit on cotton growth and water use efficiency and yield under mulched drip irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 40 - 43. (in Chinese)
- 3 王肖娟, 危常州, 张君, 等. 灌溉方式和施氮量对棉田氮肥利用率及损失的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2751 - 2758.
Wang Xiaojuan, Wei Changzhou, Zhang Jun, et al. Effects of irrigation mode and N application rate on cotton field fertilizer N use efficiency and N losses [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2751 - 2758. (in Chinese)
- 4 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合, 产量及水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82 - 90.
Li Jianming, Pan Tonghua, Wang Linghui, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 82 - 90. (in Chinese)
- 5 Mahajan G, Singh K G. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation [J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1 - 2): 202 - 206.
- 6 Marino S, Aria M, Basso B, et al. Use of soil and vegetation spectroradiometry to investigate crop water use efficiency of a drip irrigated tomato [J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59: 67 - 77.
- 7 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 137 - 141.
Gou Mangmang, Qu Zhongyi, Yang Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 137 - 141. (in Chinese)
- 8 齐广平, 张恩和. 膜下滴灌条件下不同灌溉量对番茄根系分布和产量的影响 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 463 - 467.
Qi Guangping, Zhang Enhe. Effect of drip irrigation quota on root distribution and yield of tomato under film mulch [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(3): 463 - 467. (in Chinese)
- 9 Badr M A, Abou Hussein S D, El-Tohamy W A, et al. Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands [J]. Gesunde Pflanzen, 2010, 62(1): 11 - 19.
- 10 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.
Sun Wentao, Zhang Yulong, Wang Silin, et al. Coupling effects of water and fertilizer on tomato yield under drip fertilization in greenhouse [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(2): 202 - 205. (in Chinese)
- 11 Kuscu H, Turhan A, Ozmen N, et al. Optimizing levels of water and nitrogen applied through drip irrigation for yield, quality, and water productivity of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2014, 55: 103 - 114.
- 12 王新, 刁明, 马富裕, 等. 滴灌加工番茄叶面积、干物质生产与积累模拟模型 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 161 - 168.
Wang Xin, Diao Ming, Ma Fuyu, et al. Simulation of leaf area, dry matter production and accumulation of processing tomato with drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 161 - 168. (in Chinese)
- 13 Chapagain B P, Wiesman Z. Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield and quality of greenhouse tomato [J]. Scientia Horticulturae, 2004, 99(3 - 4): 279 - 288.
- 14 Kang Shaozhong, Zhang Jianhua. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on

- water use efficiency [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2437 – 2446.
- 15 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 110 – 121.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1): 110 – 121. (in Chinese)
- 16 Aujla M S, Thind H S, Buttar G S. Fruit yield and water use efficiency of eggplant (*Solanum melongema* L.) as influenced by different quantities of nitrogen and water applied through drip and furrow irrigation [J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(2): 142 – 148.
- 17 侯加林, 王一鸣, 徐云, 等. 番茄生长发育非线性模拟模型 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 80 – 84.
Hou Jialin, Wang Yiming, Xu Yun, et al. Simulation model of tomato growth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 80 – 84. (in Chinese)
- 18 张燕, 张富仓, 袁宇霞, 等. 灌水和施肥对温室滴灌施肥番茄生长和品质的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 206 – 212.
Zhang Yan, Zhang Fucang, Yuan Yuxia, et al. The effect of irrigation and fertilization on growth and quality of tomato under fertigation in greenhouse [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 206 – 212. (in Chinese)
- 19 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 70 – 80.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Zhang Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 70 – 80. (in Chinese)
- 20 黄红荣, 李建明, 张军, 等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄光合、产量和干物质分配的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 6 – 12.
Huang Hongrong, Li Jianming, Zhang Jun, et al. Effect of water and fertilizer coupling on photosynthesis, production and dry matter distribution of tomato under drip irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(7): 6 – 12. (in Chinese)
- 21 Singandhupe R B, Rao G G S N, Patil N G, et al. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 327 – 340.
- 22 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(2): 314 – 323.
Wang Pengbo, Li Jianming, Ding Juanjuan, et al. Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(2): 314 – 323. (in Chinese)
- 23 Sharma S P, Leskovar D I, Crosby K M, et al. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 75 – 85.
- 24 杜建军, 李生秀, 高亚军, 等. 氮肥对冬小麦抗旱适应性及水分利用的影响 [J]. 西北农业大学学报, 1999, 27(5): 1 – 5.
Du Jianjun, Li Shengxiu, Gao Yajun, et al. Effects of N fertilizer on the mechanism of adaptation to water stress and water use of winter wheat [J]. Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis, 1999, 27(5): 1 – 5. (in Chinese)
- 25 樊兆博, 刘美菊, 张晓曼, 等. 滴灌施肥对设施番茄产量和氮素表观平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 970 – 976.
Fan Zhaobo, Liu Meiju, Zhang Xiaoman, et al. Effect of dripper fertigation on tomato yield and apparent N balance in a greenhouse [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 970 – 976. (in Chinese)