

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.18.1175

水肥耦合对温室番茄产量、  
水分利用效率和品质的影响

李欢欢, 刘浩\*, 孙景生, 马筱建, 崔永生, 马岩川

(中国农业科学院农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点实验室, 河南新乡 453002)



李欢欢

**摘要:** 为指导日光温室番茄高产节水优质的灌溉施肥,以番茄为研究对象,设置3种施肥方式(总施肥量相同,施肥时间不同,其中 $F_1$ :不施底肥,番茄移栽后随水追施总肥量的30%,剩余70%平分6次追肥; $F_2$ :底肥施1/2,剩余平分6次追肥; $F_3$ :全施底肥不追肥)和3种土壤水势的灌水下限( $W_1$ : -30 kPa,  $W_2$ : -50 kPa,  $W_3$ : -70 kPa),研究滴灌条件下水肥耦合对番茄耗水量、产量、水分利用效率和品质的影响。结果表明:施肥方式对番茄的耗水量差异不具有统计学意义,而灌水下限对耗水量有极显著性影响,且耗水量与灌水量呈极显著的正相关关系( $P < 0.01$ );与产量最大处理 $F_2W_1$ 相比, $F_2W_2$ 处理产量降低6.91%,但节水14.83%,水分利用效率提高8.51%;TTS质量分数与平均单果重呈极显著负相关,而与除糖酸比外其他影响品质指标呈显著性正相关关系;综合考虑产量、WUE及TTS质量分数,利用TOPSIS综合评价方法,确定了温室滴灌条件下番茄节水调质的最优灌溉施肥模式为:移栽前施入底肥为总肥量的50%,移栽后灌水20 mm,进入开花坐果期以后,20 cm土层的土壤水势控制在-50 kPa以上,每次灌水定额为10 mm,剩余肥料每隔1次灌水追肥1次,将剩余50%的肥料分6次追肥。研究成果为制定日光温室番茄节水高产优质的灌溉模式提供了理论依据。

**关键词:** 番茄;产量;水分利用效率;品质;灌溉模式

**中图分类号:** S274.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2018)09-0886-06

李欢欢,刘浩,孙景生,等.水肥耦合对温室番茄产量、水分利用效率和品质的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(9):886-891.

LI Huanhuan, LIU Hao, SUN Jingsheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield, water use efficiency and quality of tomato in greenhouse[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2018, 36(9): 886-891. (in Chinese)

## Effects of water and fertilizer coupling on yield, water use efficiency and quality of tomato in greenhouse

LI Huanhuan, LIU Hao\*, SUN Jingsheng, MA Xiaojian, CUI Yongsheng, MA Yanchuan

(Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Ministry of Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China)

**Abstract:** In order to guide the fertigation of high yield and water-saving and best quality of tomato in greenhouse, effects of water and fertilizer coupling on water consumption, yield, water use efficiency and quality of tomato under drip irrigation were studied. Tomato was taken as the study object, 3 fertilization methods were set up, in which the total fertilizer quota was the same, but the fertilization frequency was different. In the first method  $F_1$ , there was base fertilizer, 30% of the total fertilizer quota was applied with water after tomato transplanting, and the remaining 70% was equally divided into 6

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-06-08; 网络出版时间: 2018-07-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180713.1337.034.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779259)

第一作者简介: 李欢欢(1988—),女,河南洛阳人,博士研究生(13939018910@163.com),主要从事节水灌溉理论与技术研究。

通信作者简介: 刘浩(1977—),男,内蒙古鄂尔多斯人,副研究员(liuhao-914@163.com),主要从事节水灌溉和作物高效用水技术研究。

portions and applied each afterwards. In the second method  $F_2$ , the base fertilizer is half the total fertilizer quota, the remaining half was equally divided into 6 portions and applied each then. In the third method  $F_3$ , the base fertilizer was the total fertilizer quota and applied once. There were 3 lower irrigation limits of soil matric potential ( $W_1$ : -30 kPa,  $W_2$ : -50 kPa,  $W_3$ : -70 kPa) in treatments 1 to 3. The results show that fertilization methods don't result in significant difference in water consumption for tomato, but the lower irrigation limit has a significant effect on water consumption, especially, the water consumption has a rather significant positive correlation with the irrigation quota ( $P < 0.01$ ). Compared with treatment  $F_2W_1$  with the maximum yield of tomato, the yield of treatment  $F_2W_2$  is decreased by 6.91%, the water saving efficiency, however, is raised by 14.83% and the water use efficiency is increased by 8.51%. TTS is negatively correlates with average fruit weight, but significantly positively correlates with the other factors except the sugar to acid ratio. By comprehensively considering production, WUE and TTS, and by using the TOPSIS comprehensive evaluation method, the optimal irrigation mode of water-saving with best quality of tomato under drip irrigation condition in greenhouse is determined, namely 50% of the total fertilizer is applied as the base fertilizer before transplanting, then irrigation quota is 20 mm after transplanting, the soil matric potential of 20 cm soil layer is controlled above -50 kPa, the irrigation requirement is 10 mm, and the remaining 50% of the fertilizer is equally divided into 6 times topdressing in flowering and fruit setting period. The results provide a theoretical basis for formulation of water-saving, high yield and best quality irrigation mode of tomato in greenhouse in north China.

**Key words:** tomato; yield; water use efficiency; quality; irrigation and fertilizer model

随着经济和人民生活水平的提高,消费者的消费观念发生了巨大的变化,越来越关注食品安全,而番茄因富含VC、可溶性蛋白质、番茄红素等对人体健康有益的营养品质而备受青睐,但不合理的灌溉和施肥不仅影响产量还影响品质,因此实现一种高产、节水、优质的灌溉施肥模式是势在必行。国内外学者对日光温室番茄进行了大量研究,但主要集中于以田间持水量、土壤水势、 $ET_c$ 以及 $ET_0$ 等为灌溉控制下限,以控制施肥量不同为施肥水平,研究水肥耦合对番茄产量、品质等的影响<sup>[1-3]</sup>。很多学者采用灰色关联法、主成分分析法、层次分析法等评价了番茄综合品质,并依据综合品质最优确定一种最优灌溉施肥模式<sup>[4-5]</sup>。此类研究仅考虑品质,而不考虑水分利用效率和产量是否满足可持续发展的要求。也有学者利用TOPSIS综合评价方法,建立了节水、高产、优质相统一模型,并利用该模型确定了日光温室番茄节水、高产、优质的灌溉模式<sup>[6]</sup>,但其没有考虑肥因素。

以上研究多是基于田间持水量、 $ET_c$ 、 $ET_0$ 等制定灌水下限和基于施肥量多少控制施肥,综合考虑品质、水分利用效率和产量确定一种最优的灌溉施肥模式研究较少,对于日光温室内番茄作物利用土壤水势控制灌水虽有报道,但其结合施肥方式(施肥总量相同,但施肥时期不同)对番茄产量、品质和

水分利用效率的影响鲜见报道。

文中以日光温室滴灌条件下番茄为研究对象,研究不同施肥方式(施肥总量相同,施肥时间不同)和灌水下限(基于土壤水势控制)对番茄产量、水分利用效率和品质的影响,综合考虑产量、WUE及TTS质量分数,利用TOPSIS综合评价方法,确定温室滴灌条件下番茄高产节水优质的灌溉施肥模式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本情况

试验于2014年3月—2014年7月在中国农业科学院新乡综合试验基地(113°47'E, 35°9'N, 海拔78.7 m)的日光温室中进行,该地区年均降雨量548.3 mm,年平均蒸发量1908.7 mm,属暖温带大陆性季风气候,多年平均气温14.1℃,日照时数达2398.8 h,无霜期200.5 d。试验所用温室占地510.0 m<sup>2</sup>(长60.0 m,宽8.5 m),下沉1.0 m,东西走向,坐北朝南,覆盖无滴聚乙烯薄膜,墙体内部镶嵌有60 cm厚的保温材料,室内无其他的补温设施。

试验区土壤为壤土类,(0,100]cm平均容重为1.5 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为21.5%(质量含水率),(0,60]cm土壤养分指标见表1,表中 $d$ 为土壤深度, $\omega$ 为土壤各物质质量比, $EC$ 为电导率。

表1 日光温室土壤理化指标  
Tab.1 Soil physical and chemical properties in solar greenhouse

d/cm	$\omega/(mg \cdot kg^{-1})$				pH	ECI/ $(\mu S \cdot cm^{-1})$
	有效磷	碱解氮	速效钾	有机质		
(0, 20]	8.82	42.63	203.92	1.64	8.47	229.0
(20, 40]	1.64	19.92	170.07	0.78	8.80	214.0
(40, 60]	1.35	19.52	132.00	0.77	8.82	191.8

## 1.2 试验设计

试验设计3种基于土壤水势控制下限的灌水处理W(采用土层深度为20 cm处的土壤水势控制灌溉,  $W_1$ : -30 kPa,  $W_2$ : -50 kPa,  $W_3$ : -70 kPa)和3种施肥方式F(即施肥量相同, 施肥时期不同, 均施入225 kg/hm<sup>2</sup> N肥(尿素  $\omega(N)$  为46%)、300 kg/hm<sup>2</sup> K<sub>2</sub>O(硫酸钾  $\omega(K_2O)$  50%)和120 kg/hm<sup>2</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(过磷酸钙  $\omega(P_2O_5)$  14%), 其中P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>全以底肥的形式施入, 施肥时间包括:  $F_1$ : 不施底肥, 全部随水追肥, 番茄移栽时将总肥量的30%肥料随定植水追肥, 剩余70%肥料分6次随水追施, 直至最后一穗果实长至核桃大小后停止追肥;  $F_2$ : 以底肥形式施入1/2, 另外1/2从第一穗果实长至核桃大小开始随水追肥, 每隔1次灌水追肥1次, 每次追肥量相同, 分6次追完, 约最后一穗果实长至核桃大小后停止追肥;  $F_3$ : 全部以底肥形式施入, 不进行追肥。各处理的灌水定额均为10 mm, 当土壤水势达到控制下限时进行灌溉。将3种水分处理和3种肥料处理进行完全组合后共计9个处理, 每个处理均设置3次重复。

番茄于3月12日移栽, 5月26日开始采摘, 共采摘15次, 历时50 d, 品种为“金顶新星”, 在温室中整畦种植, 畦长8.0 m, 宽1.1 m, 采用宽窄行种植方式, 宽行65 cm, 窄行45 cm, 株距30 cm。在宽行中起垄以便试验观测。在每行植株上铺设一条滴灌管, 滴头间距与株距相同。为确保幼苗的成活率, 定植后各处理均进行一次灌水, 灌水定额为20 mm。为了防止番茄苗徒长, 前3周不进行灌溉, 直至40 cm土层发生水分亏缺(40 cm土壤水势达到-60~-70 kPa)补充灌溉20 mm, 不同灌溉水平试验开始。

## 1.3 测定项目与方法

1) 土壤含水率: 采用TRIME测定, 每隔7 d测定1次, 测定深度为(0, 100] cm, 每20 cm一层。采用取土烘干法每隔1个生育期测定1次土壤含水率, 用以校正TRIME, 每20 cm为一层, 测定深度为表层以下100 cm处。

2) 耗水量和水分利用效率: 耗水量采用水量平

衡法计算<sup>[7]</sup>, 计算公式为

$$ET = I + U - D + (W_0 - W_t), \quad (1)$$

式中:  $ET$  为番茄耗水量;  $I$  为灌水量;  $U$  为地下水补给量;  $D$  为深层渗漏量;  $W_0, W_t$  分别为时段初和时段末100 cm土层内的土壤储水量。

由于试验地的地下水位较深(一般在5.0 m以下), 作物无法吸收利用, 故地下水补给量忽略, 即  $U=0$ 。因试验中各处理灌水定额较小(灌水定额为10 mm), 灌溉不会产生深层渗漏, 因此深层渗漏量  $D$  也忽略。

水分利用效率  $WUE$  采用公式(2)计算, 即

$$WUE = Y/ET \times 100\%, \quad (2)$$

式中:  $Y$  为番茄产量;  $ET$  为番茄耗水量。

3) 土壤水势: 在滴灌线上距滴头15 cm处(两植株之间)安置负压计, 监测地表以下20、40和60 cm处的土壤水势, 每天早晨8:00—8:30定时观测。

4) 气象资料: 温室内安装自动气象监测系统, 包括辐射、温度、湿度、风速等。

5) 产量与品质: 每次果实采摘后, 各处理选取有代表性的植株20株采用精度为5 g的电子秤称量计产, 每个小区产量单独核算。番茄采摘后每个处理选取有代表性番茄果实9颗用于测定包括可溶性固形物(TTS)、可溶性糖(SS)、VC、可溶性蛋白质(SP)和可溶性酸(SA)等各物质质量比<sup>[7]</sup>, 其中TTS质量分数采用手持测糖仪测定, VC质量比采用2, 6-二氯酚靛酚滴定法测定, SP质量比用考马斯亮蓝法测定, SS质量分数采用葱酮比色法测定, SA质量分数采用碱滴定法测定。

## 1.4 数据处理方法

采用DPS统计软件对试验数据进行统计分析, 多重比较用LSD法, 用Microsoft Excel软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水肥耦合对番茄灌水量和耗水量的影响

水肥耦合条件下的灌水量  $I$  和耗水量  $ET$  如表2所示, 由表2可知, 施肥方式和灌水下限对番茄灌水量和耗水量影响程度不同, 灌水次数最多为24次( $F_2W_1$ 和 $F_3W_1$ ), 最少为16次( $F_1W_3$ ), 总灌水量为160~240 mm。番茄耗水量变化介于241.7( $F_1W_3$ )~305.4 mm( $F_2W_1$ )之间, 各处理在整个生育期内耗水量随着生育进程呈先增大后减小的趋势, 在苗期耗水量最小, 日均耗水强度仅为0.85 mm/d, 5月份耗水量最大, 最大可达3.5 mm/d( $F_2W_1$ )。相同灌



水下限不同施肥方式的耗水量差异不具有统计学意义,但相同施肥方式的耗水量随土壤水势下限的增大而增大.经回归分析,耗水量与灌水量之间呈现良好线性递增关系( $R^2 = 0.862^{**}$ ).在相同施肥方式条件下,温室番茄的耗水量与灌水量有很大的关系,不论是总耗水量还是阶段耗水量均呈现出随着灌水量的增大而增加的趋势.任何时期水分亏

缺,其全生育期耗水量、阶段耗水量和日耗水量均随受旱程度的增大而下降.此因土壤受旱时土壤含水量下降,叶片气孔导度减小,叶面蒸腾强度低于不受旱时的蒸腾强度<sup>[8]</sup>;再者,受旱明显抑制了番茄叶面光合速率,降低光合产物的形成及向叶片的运移和转换,植株蒸腾面积相应减小,从而降低了蒸发蒸腾量.

表2 水肥耦合条件下灌水量和耗水量  
Tab.2 Irrigation quota and water consumption under water and fertilizer coupling condition

处理	I/mm					ET/mm				
	3月	4月	5月	6月	7月	3月	4月	5月	6月	7月
F <sub>1</sub> W <sub>1</sub>	20.0	20.0	80.0	90.0	10.0	20.5	52.3	98.0	83.2	38.8
F <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	20.0	10.0	80.0	70.0	10.0	20.5	50.5	89.1	73.0	34.1
F <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	20.0	20.0	70.0	50.0	0.0	20.5	50.5	83.1	65.4	22.2
F <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	20.0	30.0	100.0	80.0	10.0	20.5	51.5	108.6	88.7	36.2
F <sub>2</sub> W <sub>2</sub>	20.0	30.0	80.0	70.0	10.0	20.5	52.1	80.2	77.6	29.8
F <sub>2</sub> W <sub>3</sub>	20.0	10.0	60.0	70.0	10.0	20.5	50.9	75.4	69.2	28.0
F <sub>3</sub> W <sub>1</sub>	20.0	20.0	100.0	80.0	20.0	20.5	56.2	101.8	89.2	22.4
F <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	20.0	20.0	100.0	70.0	10.0	20.5	50.5	99.9	81.8	24.5
F <sub>3</sub> W <sub>3</sub>	20.0	20.0	80.0	50.0	10.0	20.5	47.7	94.9	72.0	22.8

## 2.2 水肥耦合对番茄产量及水分利用效率的影响

图1为水肥耦合条件下番茄产量和水分利用效率的变化.

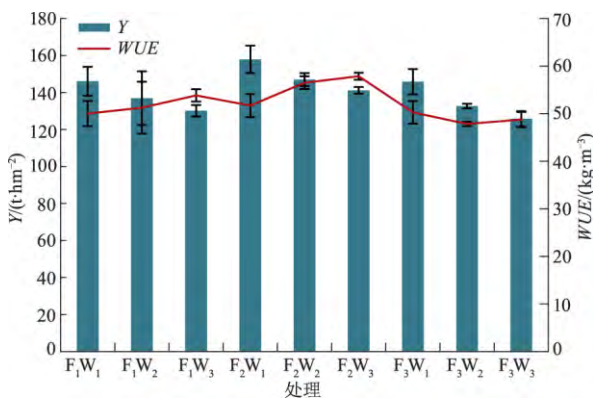


图1 水肥耦合条件下产量和水分利用效率的变化

Fig.1 Change of yield and WUE under water and fertilizer coupling condition

由图1可知,施肥方式和灌水下限对番茄产量有不同程度的影响,产量随灌水下限的增大而增大.随施肥方式的变化表现为F<sub>2</sub>时最大,F<sub>1</sub>时居中,F<sub>3</sub>时最小.产量在各处理中的变化为:F<sub>2</sub>W<sub>1</sub>最大,为157.90 t/hm<sup>2</sup>;F<sub>2</sub>W<sub>2</sub>次之,为146.99 t/hm<sup>2</sup>;F<sub>3</sub>W<sub>3</sub>最小,为125.80 t/hm<sup>2</sup>.不同施肥方式下,F<sub>1</sub>,F<sub>2</sub>和F<sub>3</sub>的平均产量分别为137.70,148.68和134.76 t/hm<sup>2</sup>.与F<sub>2</sub>处理相比,F<sub>1</sub>和F<sub>3</sub>平均产量分别下降7.38%和9.36%.不同灌水下限下,W<sub>1</sub>,W<sub>2</sub>和W<sub>3</sub>平均产量分别为149.94,138.85,132.36

t/hm<sup>2</sup>.与W<sub>1</sub>处理相比,W<sub>2</sub>和W<sub>3</sub>平均产量分别下降了7.40%,11.72%.通过方差分析可知,F显著影响番茄产量( $P < 0.05$ ),W极显著影响番茄产量( $P < 0.01$ ),而F×W交互作用对产量没有显著影响.虽然施肥量一致,但不施底肥(F<sub>1</sub>)或只施底肥(F<sub>3</sub>)均会降低番茄产量,底肥和追肥按1:1(F<sub>2</sub>)的比例可实现高产.这是因为底肥是用于番茄前期植株的营养生长,而这一时期植株个体小、生长缓慢,对养分的吸收也较少,因此底肥不易施肥过大,否则易引起肥料的淋失,而后期植株逐渐由营养生长转向生殖生长,这一时期施肥可使番茄对养分的吸收在时间和数量上更加吻合,从而提高作物产量.

由图1还可知,施肥方式和灌水下限对WUE有不同程度的影响,WUE随灌水下限增大而降低.随施肥方式的变化表现为F<sub>2</sub>最大,F<sub>1</sub>时居中,F<sub>3</sub>时最小.WUE值在各处理中变化:F<sub>2</sub>W<sub>3</sub>处理最大,为57.86 kg/m<sup>3</sup>;F<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理次之,为56.50 kg/m<sup>3</sup>;F<sub>3</sub>W<sub>2</sub>处理最小,为47.84 kg/m<sup>3</sup>.在不同施肥方式下,F<sub>1</sub>,F<sub>2</sub>和F<sub>3</sub>的平均WUE分别为51.70,55.3和48.96 kg/m<sup>3</sup>.与F<sub>2</sub>处理相比,F<sub>1</sub>和F<sub>3</sub>平均分别下降了6.59%和11.54%.不同灌水下限下,W<sub>1</sub>,W<sub>2</sub>和W<sub>3</sub>的平均WUE分别为50.66,51.87和53.49 kg/m<sup>3</sup>.与W<sub>3</sub>比,W<sub>1</sub>和W<sub>2</sub>分别下降了5.29%和3.01%.此因灌水下限极显著影响产量而对耗水量没有影响,故灌水下限对WUE的影响类似于产量.通过方差分析可知,F对WUE的影响达到极显著水

平( $P < 0.01$ ),  $W$  和  $F \times W$  交互作用对  $WUE$  的影响达到显著水平,即底肥和追肥按 1:1 比例进行分配、灌水下限为  $W_3$  或  $W_2$  时可以提高滴灌番茄的  $WUE$ .

总体而言,从产量和  $WUE$  方面看,与产量最大的  $F_2W_1$  处理比,虽然  $F_2W_2$  产量降低 6.91%,但可节水 14.83%,水分利用效率提高 8.51%,因此  $F_2W_2$  处理可实现高产高效节水的目的.

### 2.3 水肥耦合对番茄果实品质的影响

#### 2.3.1 水肥耦合对番茄果实品质指标的影响

不同施肥水式和灌水下限对番茄果实各项品质指标的影响结果如表 3 所示.由表 3 可知,在相同

施肥水式条件下,番茄平均单果质量( $ASW$ )和糖酸比( $SAR$ )随灌水下限的增大而增大, $SA$ 、 $VC$ 、 $SP$ 、 $TTS$  和  $SS$  质量比随灌水下限的增大而减小.在相同  $W$  条件下,不同  $F$  对各品质指标的影响没有明显规律.由方差分析可知, $W$  极显著影响番茄  $ASW$ 、 $VC$ 、 $SA$ 、 $TTS$  质量比和显著影响  $SP$  质量比,对  $SS$  和  $SAR$  含量没有显著影响. $F$  极显著影响  $ASW$  和  $SP$  质量比,显著影响  $VC$  质量比,对其他指标没有显著影响. $F \times W$  交互作用仅对  $VC$  质量比产生显著影响.从品质特性上看,在施肥量一定的情况下,调控施肥时间对改善番茄果实营养品质的作用较小,但可以显著提高果实的外观品质.

表 3 水肥耦合条件下番茄果实品质指标和方差分析  
Tab.3 Quality indexes of tomato and analysis of variance under water and fertilizer coupling condition

处理	$ASW/g$	$\omega(SA)/\%$	$\omega(VC)/(mg \cdot kg^{-1})$	$\omega(SP)/(mg \cdot g^{-1})$	$\omega(TTS)/\%$	$\omega(SS)/\%$	$SAR$
$F_1W_1$	202.44abc	0.39bc	123.57cd	0.26d	4.45bc	2.08a	5.33a
$F_1W_2$	199.62bc	0.41abc	134.33ab	0.30bcd	4.65ab	2.18a	5.32a
$F_1W_3$	194.74c	0.43ab	137.76a	0.32bc	4.67a	2.19a	5.15a
$F_2W_1$	211.03a	0.37c	120.50cd	0.25cd	4.47abc	2.04a	5.48a
$F_2W_2$	207.35ab	0.43ab	124.14c	0.26cd	4.52abc	2.18a	5.09a
$F_2W_3$	200.79abc	0.45a	127.16bc	0.29bcd	4.59ab	2.22a	4.87a
$F_3W_1$	206.86ab	0.39bc	113.84d	0.32abc	4.30c	2.05a	5.37a
$F_3W_2$	192.50c	0.40bc	136.72ab	0.34ab	4.60ab	2.14a	5.32a
$F_3W_3$	177.50d	0.42abc	143.31a	0.39a	4.68a	2.18a	5.20a
显著性检验				$P$			
$F$	0.000 3	0.534 9	0.013 4	0.000 8	0.497 5	0.912 0	0.949 6
$W$	<0.000 1	0.006 9	<0.000 1	0.013 5	0.002 3	0.069 9	0.069 9
$F \times W$	0.055 0	0.555 3	0.024 1	0.925 8	0.450 4	0.993 6	0.993 6

#### 2.3.2 水肥耦合条件下番茄品质之间的相互关系

温室番茄果实外观品质和营养品质等各单项品质指标之间的相关系数如表 4 所示.由表 4 可知, $ASW$  与  $VC$ 、 $SP$ 、 $TTS$  质量比等营养品质指标之间达显著负相关关系( $P < 0.05$ ),而与  $SAR$  之间关系不显著.各营养品质指标间的相关性虽显复杂,但总体表现出 3 个特点:①  $SAR$  与其他各品质指标之间

(除  $SS$  和  $SA$  外)的相关性均无达到显著水平( $P > 0.05$ ),这主要是因为其他品质指标均受灌水处理的影响,而不同灌水处理对  $SAR$  没有显著影响;②  $TTS$  质量比(或  $VC$  质量比)与除  $SAR$  以外其他营养品质指标之间均达到显著正相关;③  $TTS$  和  $VC$  质量比与  $ASW$  呈显著负相关关系,且  $TTS$  和  $VC$  质量比之间呈极显著正相关关系.

表 4 各品质指标的相互关系  
Tab.4 Correlations of various quality indexes

相关系数	$ASW$	$\omega(SA)$	$\omega(VC)$	$\omega(SP)$	$\omega(TTS)$	$\omega(SS)$	$SAR$
$ASW$	1.00	-0.35	-0.88**	-0.89*	-0.70*	-0.50	0.21
$\omega(SA)$	-0.35	1.00	0.43	0.23	0.58	0.93	-0.95
$\omega(VC)$	-0.88**	0.43	1.00	0.68	0.93**	0.67*	-0.24
$\omega(SP)$	-0.89**	0.23	0.68*	1.00	0.74*	0.34	-0.07
$\omega(TTS)$	-0.70*	0.58	0.93**	0.44	1.00	0.81*	-0.40
$\omega(SS)$	-0.50	0.93	0.67*	0.34	0.81**	1.00	-0.81
$SAR$	0.21	-0.95	-0.24	-0.07	-0.40	-0.81	1.00

### 2.4 温室滴灌番茄优质高效灌溉施肥模式

$SAR$ 、 $VC$  和  $TTS$  质量比是消费者评价果实品质常用指标.灌水下限和施肥方式以及两者交互作用对  $SAR$  没有显著影响,但灌溉制度极显著影响  $VC$  和  $TTS$  质量比. $TTS$  和  $VC$  之间达到极显著的正相

关系( $P < 0.01$ ),与果实外观品质( $ASW$ )呈显著负相关关系,经回归分析, $ASW$  与产量之间呈现良好线性递增关系( $R^2 = 0.827^{**}$ ),用  $ASW$  表达产量的外观品质,可使复杂问题简单化,故可采用  $TTS$  质量比综合反映番茄果实营养品质和外观品质的

总体水平.因此,将产量、WUE 和 TTS 质量比作为综合考虑高产、高效和优质有机统一的 3 个重要指标,三者视为同等重要地位(权重大小一致),使复杂的评判指标简单化,采用 TOPSIS 综合评价方法,评判指标统计如表 5 所示.

表 5 评判指标统计量  
Tab.5 Statistics of evaluation index

处理	D <sup>+</sup>	D <sup>-</sup>	统计量	名次
F <sub>1</sub> W <sub>1</sub>	0.06	0.05	0.46	4
F <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	0.07	0.04	0.39	7
F <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.07	0.05	0.40	6
F <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	0.04	0.08	0.66	2
F <sub>2</sub> W <sub>2</sub>	0.03	0.08	0.72	1
F <sub>2</sub> W <sub>3</sub>	0.04	0.08	0.66	3
F <sub>3</sub> W <sub>1</sub>	0.06	0.05	0.44	5
F <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	0.09	0.03	0.24	8
F <sub>3</sub> W <sub>3</sub>	0.10	0.03	0.23	9

由表 5 可知,温室滴灌条件下番茄节水调质的灌溉施肥模式为:移栽前施入底肥为总肥量的 50%,仅在移栽后灌水 20 mm,进入开花坐果期以后 20 cm 土层的土壤水势控制在 -50 kPa 以上,每次灌水定额为 10 mm,剩余肥料每隔 1 次灌水追肥 1 次,将剩余 50% 的肥料分 6 次追肥,土壤水分波动幅度小,植株生长状况良好,产量降低幅度较小,节水效果明显,可溶性固形物含量等品质得到明显改善.

### 3 结 论

1) 耗水量与灌水量之间呈现良好线性递增关系( $R^2 = 0.862^{**}$ ).

2) 从产量和 WUE 方面看,与产量最大的 F<sub>2</sub>W<sub>1</sub> 处理相比,虽然 F<sub>2</sub>W<sub>2</sub> 产量降低 6.91%,但可节水 14.83%,水分利用效率提高 8.51%.

3) TTS 质量比(或 VC 质量比)与除糖酸比以外其他营养品质指标之间均达到显著正相关,且 TTS 质量比与平均单果重呈显著负相关关系,与 VC 质量比呈极显著正相关关系.

4) 综合考虑产量、WUE 和 TTS 含量,采用 TOPSIS 综合评价方法,确定了温室滴灌条件下番茄节水调质灌溉施肥模式为移栽前施入底肥为总肥量的 50%,移栽后灌水 20 mm,进入开花坐果期以后,20 cm 土层的土壤水势控制在 -50 kPa 以上,每次灌水定额为 10 mm,剩余肥料每隔 1 次灌水追肥 1 次,将剩余 50% 的肥料分 6 次追肥.

#### 参考文献(References)

[1] WANG X, XING Y. Evaluation of the effect of irrigation

and fertilization by drip fertigation on tomato yield and water use efficiency in greenhouse [J]. International journal of agronomy, 2016(1): 1-10.

[2] 邢英英,张富仓,张燕,等.滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):713-726.

XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation [J]. Scientia agricultural sinica, 2015, 48(4): 713-726. (in Chinese)

[3] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等.水肥耦合对日光温室袋培番茄产量和品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(10):129-137.

WANG Pengbo, LI Jianming, DING Juanjuan, et al. Effect of water and fertilizer coupling on yield and quality of tomato cultivated with organic substrate in bag [J]. Journal of Northwest A & F University (natural science edition), 2015, 43(10): 129-137. (in Chinese)

[4] WANG C X, GU F, CHEN J L, et al. Assessing the response of yield and comprehensive fruit quality of tomato grown in greenhouse to deficit irrigation and nitrogen application strategies [J]. Agricultural water management, 2015, 161: 9-19.

[5] 杜清洁,李建明,潘铜华,等.滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):10-17.

DU Qingjie, LI Jianming, PAN Tonghua, et al. The compound effects of water and fertilizer on yield and quality of tomato under drip irrigation [J]. Agricultural research in the acid areas, 2015, 33(3): 10-17. (in Chinese)

[6] ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, SHI Yu, et al. Effects of tillage practices on water consumption, water use efficiency and grain yield in wheat field [J]. Journal of integrative agriculture, 2014, 13(11): 2378-2388.

[7] RIPOLL J, URBAN L, BRUNEL B, et al. Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype [J]. Journal of plant physiology, 2016, 190: 26.

[8] 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)

(责任编辑 陈建华)