

控水对日光温室樱桃番茄品质、产量和水分利用效率的影响

刘宇曦¹ 武隆楷¹ 王娟娟² 李衍素¹ 贺超兴¹ 于贤昌¹ 王君^{1*}

(¹ 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081; ² 全国农业技术推广服务中心, 北京 100026)

摘 要: 为了明确结果期水分调控对樱桃番茄产量和品质的影响, 以千禧和红玉为试验材料, 对不同土壤相对含水量(40%~50%、60%~70%、80%~90%)下日光温室冬春茬和秋冬茬樱桃番茄品质、产量和水分利用效率进行研究。结果表明, 随着土壤相对含水量降低, 樱桃番茄的果实可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、VC 含量显著提高, 水分利用效率也明显提高; 但叶片净光合速率、气孔导度、叶绿素含量以及单果质量、产量随着土壤相对含水量降低呈现出先增加后降低的变化趋势。通过熵权法和 TOPSIS 法相结合, 综合分析樱桃番茄品质、产量和水分利用效率各项指标, 得出樱桃番茄结果期最佳土壤相对含水量为 40%~50%。

关键词: 樱桃番茄; 控水; 品质; 产量; 水分利用效率

设施园艺在我国国民经济发展中占有重要位置, 2016 年我国设施蔬菜栽培面积达 391.47 万 hm^2 , 净产值逾 5 700 亿元(左绪金, 2019)。樱桃番茄(*Solanum lycopersicum*)以其较高的营养价值、独特的风味, 深受消费者喜爱, 是目前设施栽培最广泛的园艺作物之一(李颖莉等, 2004)。随着人民生活水平提高, 消费者对樱桃番茄的需求开始由数量型向质量型转变, 生产高品质樱桃番茄已经成为国内外研究者关注的课题。水分是影响樱桃番茄产量与品质的重要因素(Phene et al., 1990; Zhang et al., 2017), 在设施樱桃番茄实际生产过程中, 生产者往往凭经验进行灌溉, 不仅造成水资源浪费, 降低水分利用效率, 还会增大设施内土壤和空气湿度, 导致樱桃番茄品质下降。因此, 加强设施

樱桃番茄栽培过程中的水分管理对于提高樱桃番茄品质和水分利用效率具有重要意义。

水分会影响番茄的品质、产量和水分利用效率, 冯腾腾等(2016)研究扬州地区春大棚灌水量对番茄产量和品质影响时发现, 整个生育期每 667 m^2 灌水量为 90 m^3 可以有效提高番茄可溶性固形物、可溶性糖、番茄红素含量及糖酸比, 但产量较灌水量 120 m^3 处理降低 11.92%, 差异达显著水平。番茄整个生育期土壤相对含水量为 60%~70% 时, 相较于土壤相对含水量 70%~80% 的处理, 可溶性固形物、VC、可溶性糖含量及糖酸比均显著提高, 水分利用效率也提高了 33.65%, 差异达显著水平, 但产量降低了 2.86%(武慧平等, 2012)。可见, 水分管理可以作为提高番茄品质的重要手段, 其中结果期水分亏缺灌溉对品质提升尤为重要。Lahoz 等(2016)研究发现, 从结果期开始进行亏缺灌溉, 灌水量为常规灌水量的 75% 时番茄可溶性固形物含量相对于常规灌水处理提高 8.4%, 但产量降低 16.4%。当番茄果实膨大期土壤相对含水量为 40%~50% 时, 可溶性固形物含量、可滴定酸含量、硬度、水分利用效率等指标相较于土壤相对含水量 70%~80% 处理显著提高, 但产量降低了 36.29%(郝舒雪, 2019)。结果期亏缺灌溉不仅可以使番茄品

刘宇曦, 女, 硕士研究生, 专业方向: 蔬菜学, E-mail: lyx15652465350@163.com

* 通信作者 (Corresponding author): 王君, 女, 助理研究员, 专业方向: 设施蔬菜栽培生理和分子生物学, E-mail: wangjun01@caas.cn

收稿日期: 2020-01-21; 接受日期: 2020-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD1001903), 山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY010707), 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-25-C-01), 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-IVFCAAS), 农业农村部园艺作物生物学与种质创制重点实验室项目

质最大化, 还可获得较高的水分利用效率。吴泳辰等(2016)研究发现, 番茄结果期重度亏缺灌溉, 水分利用效率高达 $40.59 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。但是, 亏缺灌溉不可避免地降低产量。如何兼顾产量和品质优化亏缺灌溉参数, 获得最大的水分利用效率, 是番茄优质高效栽培一直致力解决的方向。

之前的研究多集中于大、中果型番茄水分调控, 关于日光温室不同种植茬口结果期水分调控对樱桃番茄品质和水分利用效率的影响目前尚缺乏深入、具体的研究。本试验以不同品种樱桃番茄为试材, 从结果期开始进行水分调控, 明确提高日光温室冬春茬和秋冬茬樱桃番茄品质和水分利用效率的灌溉参数, 以期为水分管理在日光温室樱桃番茄生产上的应用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2019 年 1—12 月在中国农业科学院南口中试基地日光温室进行。冬春茬供试樱桃番茄品种为品质好但不抗番茄黄化曲叶病毒 (TYLCV)

的千禧, 由农友种苗(中国)有限公司提供。因秋冬茬病毒病高发, 故秋冬茬选用品质略差但抗 TYLCV 的红玉作为试验材料, 由寿光欣欣然园艺有限公司提供。茬口安排详见表 1。栽培畦宽 0.8 m, 长 8.3 m, 单行栽培, 双干整枝, 留 9 穗果后打顶。供试育苗基质为无土营养基质, 按草炭: 蛭石 = 2 V: 1 V 的比例混合。设施内樱桃番茄栽培土壤理化性质见表 2。

采用土壤栽培, 共设置 3 个处理, 水分调控通过设置不同的土壤相对含水量来实现, 分别设置为土壤田间持水量的 40%~50% (T1)、60%~70% (T2)、80%~90% (T3)。除结果期灌水量不同外, 其余均正常管理。定植后至第 1 穗果坐果期间各处理灌水量一致, 此后开始处理直至拉秧, 具体处理时间见表 1。每个处理安装一套独立的水分监测和灌溉系统(北京紫藤连线科技有限公司生产), 灌溉方式为滴灌, 每 5 min 监测 1 次。每个处理 3 次重复, 1 个栽培畦为 1 次重复, 每个栽培畦种植 22 株, 随机区组排列。不同处理小区之间设置 1.2 m 宽水分隔离区, 并起高 20 cm 的垄避免水肥干扰。

表 1 樱桃番茄茬口及取样安排

茬口	定植 (年-月-日)	开始水 分处理	取样 1 (用于生长指标测定)	取样 2 (用于光合参数测定)	开始采收	拉秧(年-月-日)
冬春茬	2019-01-25	定植后 65 d	定植后 90 d	定植后 97 d	定植后 104 d	2019-06-19 (定植后 146 d)
秋冬茬	2019-08-14	定植后 55 d	定植后 80 d	定植后 87 d	定植后 70 d	2019-12-21 (定植后 132 d)

表 2 日光温室土壤理化性质

茬口	容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	有机质/%	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	土壤电导 率/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	处理前土壤田 间持水量/%
冬春茬	1.12	2.12	163.30	191.84	42.15	6.89	731	39.46
秋冬茬	1.30	1.98	90.83	304.83	116.30	7.09	837	32.69

1.2 测定方法

土壤田间持水量: 开始水分处理前(表 1)在田间按“W”形随机取 20 个点, 采用烘干称重法进行测定(袁娜娜, 2014)。

生长指标: 每个处理随机选取 18 株长势良好的植株, 用卷尺测量株高(茎基部到生长点的距离), 用游标卡尺测量茎粗(地上部 1 cm 位置的茎粗)。

光合参数: 选择晴朗天气, 在光强相对稳定的 9: 00—11: 30, 每个处理随机选取 18 株群体中的代表性植株, 使用 Li-6400 便携式光合测定仪(美

国 Li-Cor 公司)对功能叶(上数第 6 片叶)的净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)进行测定, 测定时设定 PFD 为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 $350 \sim 360 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同时每株选取茎部叶片(上数第 6 片叶), 采用丙酮浸提法测定叶片光合色素含量(陈建勋和王晓峰, 2006)。

果形和硬度: 在第 3 穗花开花时吊牌, 每个处理选取 12 株, 于盛果期摘取第 3 穗果所有完熟果实, 采用游标卡尺测量果实纵径、横径, 果形指数 = 果实纵径 / 横径; 采用邵氏硬度计(日本 Asker 公

司)测定果实硬度。

果实品质指标:使用果形指数和硬度测量样品,可溶性固形物含量采用手持糖度计(PAL-1,日本 ATAGO 公司)测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可滴定酸含量采用酸碱滴定法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定;VC 含量采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定(李合生,2000);番茄红素含量采用高效液相色谱分析法测定(薛颖等,2002);并组织 15 人的品尝小组对每个处理的樱桃番茄进行品质打分,从外观、口感两方面综合评分,采用 10 分制,10 分最好,1 分最差,6 分为可以接受,取其平均值。

产量:定期对各小区的产量进行统计,计算单株产量和每 667 m² 产量。

水分利用效率:整个生育期结束后,根据总产量与总灌水量来计算水分利用效率(刘世全等,2014)。

水分利用效率(kg·m⁻³)=总产量/总灌水量

1.3 数据处理

数据的单因素方差分析采用 SPSS 20.0 软件,差异显著性检验($\alpha = 0.05$)采用 Duncan 新复极差

法。品质、产量和水分利用效率的综合分析采用熵权 TOPSIS 法(孙振球,2002;冯文权,2008)。

2 结果与分析

2.1 控水对日光温室樱桃番茄品质的影响

2.1.1 控水对日光温室樱桃番茄果形指数和硬度的影响 由表 3 可知,随着土壤相对含水量增加,各茬口樱桃番茄果实纵径、横径均呈先升高后降低的趋势,而硬度逐渐降低。冬春茬各处理樱桃番茄果形指数差异不显著,T1 处理硬度显著高于 T2、T3 处理;秋冬茬 T1 处理樱桃番茄果形指数显著低于 T2、T3 处理,硬度显著高于 T3 处理。

2.1.2 控水对日光温室樱桃番茄营养品质的影响

由表 4 可知,随着土壤相对含水量增加,各茬口樱桃番茄的 VC、可溶性蛋白含量逐渐降低。其中 T1 处理樱桃番茄的 VC、可溶性蛋白含量最高,显著高于 T2、T3 处理。冬春茬 T2 处理樱桃番茄的番茄红素含量显著高于 T1、T3 处理;秋冬茬 T1 处理樱桃番茄的番茄红素含量显著高于 T3 处理。

2.1.3 控水对日光温室樱桃番茄风味品质的影响

由表 5 可知,随着土壤相对含水量的增加,各

表 3 控水对日光温室樱桃番茄果形指数和硬度的影响

茬口	处理	纵径/cm	横径/cm	果形指数	硬度/kg·cm ⁻²
冬春茬	T1	3.35 ± 0.10 b	2.68 ± 0.12 b	1.25 ± 0.04 a	2.85 ± 0.15 a
	T2	3.54 ± 0.22 a	2.87 ± 0.17 a	1.23 ± 0.08 a	2.27 ± 0.10 b
	T3	3.40 ± 0.07 b	2.78 ± 0.12 ab	1.22 ± 0.04 a	2.14 ± 0.04 b
秋冬茬	T1	3.83 ± 0.09 b	3.24 ± 0.11 b	1.18 ± 0.03 b	3.41 ± 0.30 a
	T2	4.14 ± 0.18 a	3.36 ± 0.20 a	1.23 ± 0.04 a	3.26 ± 0.15 a
	T3	4.12 ± 0.09 a	3.35 ± 0.15 a	1.23 ± 0.04 a	3.05 ± 0.26 b

注:表中同列数据后不同小写字母表示差异显著($\alpha = 0.05$),下表同。

表 4 控水对日光温室樱桃番茄果实营养品质的影响

茬口	处理	VC/mg·kg ⁻¹	番茄红素/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	可溶性蛋白/mg·g ⁻¹
冬春茬	T1	398.50 ± 7.37 a	28.81 ± 0.54 b	1.78 ± 0.05 a
	T2	362.79 ± 11.51 b	30.25 ± 0.73 a	1.63 ± 0.02 b
	T3	337.23 ± 5.95 c	25.32 ± 0.55 c	1.56 ± 0.03 c
秋冬茬	T1	324.61 ± 7.91 a	23.60 ± 0.77 a	1.47 ± 0.09 a
	T2	248.64 ± 13.71 b	22.51 ± 0.48 ab	1.28 ± 0.05 b
	T3	227.92 ± 8.97 b	22.04 ± 0.64 b	1.11 ± 0.04 c

茬口樱桃番茄的可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸含量逐渐降低。冬春茬 T1 处理樱桃番茄的可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、品尝打分结

果比 T2 处理分别增加 5.58%、12.52%、17.02%、11.15%,比 T3 处理分别增加 8.56%、19.69%、19.57%、16.37%,差异均达显著水平。秋冬茬 T1 处理樱桃番茄的可溶性固形物、可溶性糖、糖酸比、品尝打分结果比 T2 处理增加 9.87%、13.22%、5.62%、15.34%,比 T3 处理增加 16.82%、37.58%、11.47%、21.22%,差异达显著水平。由此可知,T1 处理樱桃番茄风味品质最佳。

2.2 控水对日光温室樱桃番茄生长和叶绿素含量的影响

由表 6 可知,随着土壤相对含水量的增加,冬

表 5 控水对日光温室樱桃番茄果实风味品质的影响

茬口	处理	可溶性固形物/%	可溶性糖/%	可滴定酸/%	糖酸比	品尝打分
冬春茬	T1	10.40 ± 0.08 a	6.20 ± 0.23 a	0.55 ± 0.04 a	11.36 ± 0.51 a	9.17 ± 0.52 a
	T2	9.85 ± 0.06 b	5.51 ± 0.11 b	0.47 ± 0.02 b	11.88 ± 0.26 a	8.25 ± 0.42 b
	T3	9.58 ± 0.13 c	5.18 ± 0.09 c	0.46 ± 0.01 b	11.28 ± 0.14 a	7.88 ± 0.23 b
秋冬茬	T1	7.57 ± 0.13 a	4.54 ± 0.19 a	0.40 ± 0.01 a	11.47 ± 0.12 a	8.57 ± 0.53 a
	T2	6.89 ± 0.23 b	4.01 ± 0.24 b	0.37 ± 0.01 a	10.86 ± 0.29 b	7.43 ± 0.79 b
	T3	6.48 ± 0.14 c	3.30 ± 0.21 c	0.32 ± 0.02 b	10.29 ± 0.19 c	7.07 ± 0.67 b

表 6 控水对日光温室樱桃番茄生长和叶绿素含量的影响

茬口	处理	株高/cm	茎粗/mm	叶绿素 a/mg · g ⁻¹	叶绿素 b/mg · g ⁻¹	总叶绿素/mg · g ⁻¹
冬春茬	T1	229.99 ± 5.29 b	16.73 ± 0.68 a	1.28 ± 0.03 b	0.48 ± 0.02 b	1.76 ± 0.04 b
	T2	239.78 ± 11.64 a	17.09 ± 0.52 a	1.37 ± 0.04 a	0.58 ± 0.05 a	1.95 ± 0.09 a
	T3	231.87 ± 7.89 ab	16.91 ± 0.66 a	1.24 ± 0.03 b	0.48 ± 0.02 b	1.72 ± 0.05 b
秋冬茬	T1	213.98 ± 4.17 b	16.78 ± 0.66 a	1.58 ± 0.03 b	0.36 ± 0.02 ab	2.31 ± 0.04 b
	T2	224.33 ± 11.05 a	16.95 ± 0.63 a	1.93 ± 0.04 a	0.44 ± 0.06 a	2.74 ± 0.09 a
	T3	217.83 ± 7.34 ab	16.91 ± 0.58 a	1.62 ± 0.08 b	0.33 ± 0.04 b	2.36 ± 0.10 b

春茬和秋冬茬樱桃番茄株高、叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量均呈先升高后降低的趋势,茎粗各处理之间差异不显著。其中 T2 处理樱桃番茄株高、叶绿素含量最高。冬春茬和秋冬茬 T2 处理樱桃番茄的株高显著高于 T1 处理,总叶绿素含量显著高于 T1、T3 处理。

2.3 控水对日光温室樱桃番茄叶片光合参数的影响

由表 7 可知,随着土壤相对含水量增加,樱桃番茄叶片的净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs) 先增加后降低。其中 T2 处理樱桃番茄叶片 Pn、Gs 最高。冬春茬和秋冬茬 T2 处理樱桃番茄的 Pn 显著高于 T1 处理,Gs 显著高于 T1、T3 处理。冬春茬

和秋冬茬 T1 处理樱桃番茄的蒸腾速率 (Tr) 显著低于 T2、T3 处理。

2.4 控水对日光温室樱桃番茄产量和水分利用效率的影响

由表 8 可知,在整个结果期内,随着土壤相对含水量的增加,各茬口樱桃番茄的单果质量、单株产量和每 667 m² 产量均先升高后降低,水分利用效率逐渐降低。其中 T2 处理樱桃番茄单果质量、单株产量和每 667 m² 产量最高。冬春茬 T2 处理樱桃番茄单果质量、单株产量和每 667 m² 产量分别比 T1 处理增加 13.19%、18.82%、18.37%,比 T3 处理增加 8.88%、6.88%、6.89%,差异均达显著水平;秋冬茬 T2 处理樱桃番茄单果质量、单株产量和每

表 7 控水对日光温室樱桃番茄叶片光合参数的影响

茬口	处理	Pn/μmol · m ⁻² · s ⁻¹	Ci/μmol · mol ⁻¹	Gs/mol · m ⁻² · s ⁻¹	Tr/mmol · m ⁻² · s ⁻¹
冬春茬	T1	13.79 ± 1.21 c	272.40 ± 17.94 b	0.28 ± 0.01 b	2.93 ± 0.39 b
	T2	16.50 ± 1.12 a	288.93 ± 22.74 a	0.32 ± 0.02 a	3.26 ± 0.56 a
	T3	15.09 ± 0.45 b	279.74 ± 22.09 ab	0.30 ± 0.02 b	3.54 ± 0.57 a
秋冬茬	T1	11.75 ± 0.91 b	287.73 ± 26.55 a	0.22 ± 0.01 c	1.77 ± 0.10 b
	T2	12.60 ± 0.82 a	294.98 ± 19.30 a	0.25 ± 0.01 a	2.04 ± 0.12 a
	T3	12.22 ± 0.68 ab	298.43 ± 20.51 a	0.24 ± 0.02 b	1.97 ± 0.12 a

表 8 控水对日光温室樱桃番茄产量和水分利用效率的影响

茬口	处理	单果质量/g	单株产量/kg	每 667 m ² 产量/kg	灌水量/m ³ · (667 m ²) ⁻¹	水分利用效率/kg · m ⁻³
冬春茬	T1	19.71 ± 0.22 b	1.70 ± 0.04 c	2 554.91 ± 65.33 c	176.02	14.51
	T2	22.31 ± 0.50 a	2.02 ± 0.08 a	3 023.96 ± 113.51 a	236.23	12.80
	T3	20.49 ± 0.51 b	1.89 ± 0.03 b	2 829.07 ± 52.90 b	296.45	9.54
秋冬茬	T1	21.13 ± 0.57 b	2.29 ± 0.03 b	3 498.18 ± 41.24 b	99.59	35.13
	T2	23.70 ± 0.77 a	2.39 ± 0.04 a	3 653.17 ± 61.96 a	169.06	21.61
	T3	23.16 ± 0.54 a	2.37 ± 0.05 ab	3 621.74 ± 83.49 ab	208.44	17.38

667 m² 产量分别比 T1 处理增加 12.16%、4.37%、4.43%，差异达显著水平。T1 处理的水分利用效率最高，冬春茬 T1 处理水分利用效率分别比 T2、T3 处理提高了 13.36%、52.10%；秋冬茬 T1 处理水分利用效率分别比 T2、T3 处理提高了 62.56%、102.13%。

2.5 综合评价控水对樱桃番茄品质、产量和水分利用效率的影响

2.5.1 熵权法分析控水对樱桃番茄综合品质的影响

樱桃番茄的品质指标很多，只从单一指标进行分

析很难判断控水对其品质的影响，需要将单一品质指标结合起来对不同处理进行综合评价。利用熵权法对可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、品尝打分结果、VC、番茄红素、可溶性蛋白、硬度等 8 项品质指标进行赋权，经计算得到樱桃番茄评价指标熵值 H_i 和权重（表 9）。根据权重计算得到 T1、T2、T3 处理冬春茬综合品质分别为 54.68、50.17、46.44，秋冬茬综合品质分别为 50.65、39.79、36.67。

2.5.2 熵权法和 TOPSIS 法结合分析控水对樱桃番茄综合品质、产量和水分利用效率的影响

由于

表 9 樱桃番茄单一品质指标所占权重

茬口	指标	可溶性固形物	可溶性糖	可滴定酸	品尝打分结果	VC	番茄红素	可溶性蛋白	硬度
冬春茬	H_i	0.194 9	0.192 8	0.086 3	0.178 3	0.223 9	0.332 3	0.190 8	0.129 4
	权重	0.124 4	0.124 7	0.141 2	0.127 0	0.119 9	0.103 2	0.125 1	0.134 5
秋冬茬	H_i	0.211 2	0.262 0	0.272 0	0.157 9	0.145 5	0.184 2	0.242 7	0.264 2
	权重	0.126 0	0.117 9	0.116 3	0.134 5	0.136 5	0.130 3	0.121 0	0.117 5

控水对樱桃番茄品质、产量、水分利用效率的影响均不同，本试验综合考虑反映樱桃番茄品质、产量和水分利用效率等指标，利用熵权法和 TOPSIS 相结合，用熵权法对樱桃番茄综合品质、产量和水分利用效率进行赋权（虞娜等，2012），经计算得到樱桃番茄评价指标熵值 H_i 和权重（表 10）。进一步计算各评价方案的正理想解距离 D^+ 和负理想解距离 D^- ，接近度 C_i 越高代表方案越理想，樱桃番茄的综合评价结果越好。经计算得出冬春茬和秋冬茬各处理的评价顺序均为 T1 > T2 > T3（表 11）。

表 10 樱桃番茄综合评价指标所占权重

茬口	指标	综合品质	产量	水分利用效率
冬春茬	H_i	0.233 8	0.264 4	0.277 2
	权重	0.344 4	0.330 7	0.324 9
秋冬茬	H_i	0.150 1	0.296 9	0.157 1
	权重	0.354 7	0.293 5	0.351 8

表 11 控水对日光温室樱桃番茄影响的 TOPSIS 综合分析

茬口	处理	正理想解距离 D^+	负理想解距离 D^-	接近度 C_i	排序
冬春茬	T1	0.031 8	0.081 6	0.719 0	1
	T2	0.031 3	0.060 3	0.658 5	2
	T3	0.082 6	0.018 6	0.184 0	3
秋冬茬	T1	0.007 3	0.154 7	0.954 9	1
	T2	0.118 3	0.037 2	0.239 2	2
	T3	0.154 7	0.005 8	0.036 3	3

3 讨论

研究表明，当番茄亏缺灌溉的时间在第 1 花序转白期时，第 1、2 花序果实的细胞数目和体积基本上已经定型，且都是在相同的土壤水分条件下生长，不同的土壤水分处理只是对果实转白后的成熟过程产生影响；而对于以后的花序，果实的开花、膨大和成熟都是在不同土壤水分条件下进行的，当水分缺少时，有利于果实干物质的积累，土壤水分亏缺处理对后几穗果品质的影响更明显（刘明池和陈殿奎，2002）。罗安荣（2011）在对日光温室春茬樱桃番茄千禧果实进行品质测定时发现，水分处理对结果前期、中期、末期的果实品质影响基本相同，水分亏缺越多果实品质提升效果越明显，长期水分亏缺并未导致樱桃番茄品质出现裂变。基于前人研究结果，樱桃番茄从第 3 花序开始，果实的开花、膨大和成熟都是在设定的土壤相对含水量下进行，且品质变化趋势基本相同，故本试验选取第 3 穗果进行品质测定具有一定的代表性。本试验结果表明，随土壤相对含水量降低，樱桃番茄果实可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、VC 含量和硬度等逐渐增加，这与前人的研究结果一致（安顺伟等，2010；Chen et al., 2013；方栋平等，2015）。而冬春茬和秋冬茬樱桃番茄果形指数测定结果与岳霆（2017）的研究结果存在差异，可能是由于种植

环境、品种不同导致的。冯腾腾等(2016)研究表明随着灌水量增加,番茄糖酸比先增加后降低。本试验中水分调控对冬春茬樱桃番茄糖酸比的影响不显著,其原因可能是糖、酸含量均有增加,但增加程度不一致。本试验还发现樱桃番茄番茄红素含量在不同茬口呈现不同的变化趋势,冬春茬研究结果与牛晓丽等(2011)的研究结果一致,秋冬茬研究结果与 Leskovar 等(2003)和郑凤杰等(2016)的研究结果一致。造成这一差异的原因可能是番茄红素还受到温度、光照等其他环境因素的影响。目前关于水分对番茄红素含量的影响研究较多,但由于不同研究者所控制的肥料用量、供试土壤肥力、光照等环境条件不同,尚无一致结论。

土壤相对含水量对番茄水分利用效率影响的研究结果也有所差异。本试验结果表明,结果期樱桃番茄水分利用效率随土壤相对含水量的降低而增加,这与王聪聪等(2011)的研究结果基本一致。但有研究表明,施肥量一定时,在一定范围内增加灌水量有利于水分利用效率的提高,水分含量过高会引起水分利用效率降低(李建明等,2014)。这种差异性可能是因为处理时期不同或水肥耦合对水分利用效率的综合影响。土壤相对含水量会对樱桃番茄株高、叶绿素含量和光合作用等造成影响,从而影响产量。本试验发现,随着土壤相对含水量增加,樱桃番茄株高、叶绿素含量、净光合速率、气孔导度等都先增加后降低,产量也呈现相同的变化趋势,说明土壤相对含水量过高或过低均不利于日光温室樱桃番茄生长发育,这与周啸尘(2014)的研究结果基本一致。

如何解决番茄的品质、产量和水分利用效率之间的矛盾一直是学者们的研究重点。前人研究多采用大中果型番茄,通过盆栽试验或者单茬口的田间土壤栽培试验进行研究。然而盆栽试验和实际生产过程中差距较大,且不同茬口温度、光照等环境条件不同,也会使结论产生差异。为了更好地应用到实际生产中,本试验选取了市场需求大、研究价值更高的樱桃番茄,通过日光温室栽培技术,更为系统地研究了控水对冬春茬和秋冬茬樱桃番茄品质调控的影响。其中,土壤水分监测仪的使用,能够精确控制土壤相对含水量,为差异化节水灌溉提供科学依据,在未来具有很高的应用价值。采用熵权法

和 TOPSIS 法结合的方式评价水分调控策略的效果已被广泛应用于农业领域。季延海等(2019)利用熵权法和 TOPSIS 模型研究灌溉量对限根栽培番茄生长和品质的影响时直接对所有指标进行赋权,获得的结果可能与实际存在偏差,如产量所占权重明显小于其他指标,仅为 0.077 4。本试验考虑了对樱桃番茄所有品质指标、产量和水分利用效率直接赋权所产生的偏差,利用熵权法将樱桃番茄单一品质指标转化为能反映樱桃番茄品质总体特征信息的综合指标,再对综合品质、产量和水分利用效率进行赋权,这样避免了主观赋权法中人为因素对评价指标权重的影响,使得分析结果更直观、更合理。本试验结果为利用水分调控生产高品质樱桃番茄提供了一定的理论基础和实践依据。

4 结论

在樱桃番茄结果期进行亏缺灌溉,能够显著提高樱桃番茄的可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、VC 等含量,同时也可以提高水分利用效率,但对樱桃番茄产量积累有一定抑制作用。利用熵权法和 TOPSIS 法相结合综合分析得出,樱桃番茄结果期土壤含水量为田间持水量的 40%~50% 时综合评价结果最佳。

参考文献

- 安顺伟,王永泉,李红岭,王实娟,高丽红. 2010. 灌水量对日光温室番茄生长、产量和品质的影响. 西北农业学报, 19(3): 188-192.
- 陈建勋,王晓峰. 2006. 植物生理学实验指导. 广州: 华南理工大学出版社.
- 方栋平,张富仓,李静. 2015. 灌水量和滴灌施肥方式对温室黄瓜产量和品质的影响. 应用生态学报, 26(6): 138-145.
- 冯腾腾,周啸尘,郁娅池,马家芸,薛林宝. 2016. 灌水量对大棚番茄产量与品质的影响. 北方园艺, (10): 54-58.
- 冯文权. 2008. 经济预测与决策技术. 武汉: 武汉大学出版社.
- 郝舒雪. 2019. 不同生育期水分胁迫及复水对番茄生理特性、品质及产量的影响(硕士论文). 杨凌: 西北农林科技大学.
- 季延海,李炎艳,武占会,刘佳,刘明池. 2019. 灌溉量对限根栽培番茄生长和品质的影响. 中国蔬菜, (10): 19-25.
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- 李建明,潘铜华,王玲慧,杜清洁,常毅博,张大龙,刘媛. 2014. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响. 农业工程学报, 30(10): 82-90.

- 李颖莉, 董建平, 郝华利. 2004. 日光温室越冬樱桃番茄栽培技术总结. 西北园艺, (7): 19-20.
- 刘明池, 陈殿奎. 2002. 亏缺灌溉对樱桃番茄产量和品质的影响. 中国蔬菜, (6): 4-6.
- 刘世全, 曹红霞, 张建青, 胡笑涛. 2014. 不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响. 中国农业科学, 47(7): 1362-1371.
- 罗安荣. 2011. 温室樱桃番茄产量品质及水分生产函数 (硕士论文). 杨凌: 西北农林科技大学.
- 牛晓丽, 周振江, 李瑞, 胡田田. 2011. 水肥供应对番茄中番茄红素含量的影响. 园艺学报, 38 (11): 2111-2120.
- 孙振球. 2002. 医学统计学. 北京: 人民卫生出版社.
- 王聪聪, 孙磊, 郭凤台, 孙景生, 刘浩. 2011. 土壤水分状况对温室滴灌番茄水分利用效率及果实品质的影响. 灌溉排水学报, 30 (2): 88-91.
- 武慧平, 朱铭强, 张盼盼, 王富刚, 亢福仁, 卜耀军. 2012. 土壤含水量对温室樱桃番茄生长发育及果实品质的影响. 干旱地区农业研究, 30 (4): 32-36.
- 吴泳辰, 韩国君, 陈年来. 2016. 调亏灌溉对加工番茄产量、品质及水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 35 (7): 104-107.
- 薛颖, 武兴德, 陈杭. 2002. 高效液相色谱法测定番茄及其制品中的番茄红素. 中国食品卫生杂志, (5): 17-19.
- 虞娜, 吴昌娟, 张玉玲, 邹洪涛, 范庆锋, 张玉龙. 2012. 基于熵权的 TOPSIS 模型在保护地番茄水肥评价中的应用. 沈阳农业大学学报, 43 (4): 456-460.
- 袁娜娜. 2014. 室内环刀法测定土壤田间持水量. 中国新技术新产品, (9): 184.
- 岳霆. 2017. 水分对设施番茄果实发育和产量的影响. 农业科技通讯, (7): 212-214.
- 郑凤杰, 杨培岭, 任树梅, 蒋光昱, 贺新. 2016. 河套灌区调亏畦灌对加工番茄生长发育、产量和果实品质的影响. 中国农业大学学报, 21 (5): 89-96.
- 周啸尘. 2014. 灌水量与追肥量对番茄产量和品质的影响 (硕士论文). 扬州: 扬州大学.
- 左绪金. 2019. 我国设施蔬菜产业发展现状及其未来发展路径探析. 现代农业研究, 41 (5): 49-50.
- Chen J, Kang S, Du T, Qiu R, Guo P, Chen R. 2013. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. *Agricultural Water Management*, 129: 152-162.
- Lahoz I, Pérez-de-Castro A, Valcárcel M, Macua J I, Beltrán J, Roselló S, Cebolla-Cornejo J. 2016. Effect of water deficit on the agronomical performance and quality of processing tomato. *Scientia Horticulturae*, 200: 55-65.
- Leskovar D I, Bang H, Kolenda K, Franco J A, Perkins-Veazie P. 2003. Deficit irrigation influences yield and lycopene content of diploid and triploid watermelon. *Acta Horticulturae*, 628: 147-151.
- Phene C J, Huttmacher R B, Davis K R, McCormick R L. 1990. Water-fertilizer management of processing tomatoes. *Acta Horticulturae*, 277: 137-144.
- Zhang H, Xiong Y, Huang G, Xu X, Huang Q. 2017. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District. *Agricultural Water Management*, 179: 205-214.

Effects of Water Control on Quality, Yield and Water Use Efficiency of Cherry Tomato in Solar Greenhouse

LIU Yuxi¹, WU Longkai¹, WANG Juanjuan², LI Yansu¹, HE Chaoxing¹, YU Xianchang¹, WANG Jun^{1*}
(¹*Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;* ²*National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100026, China*)

Abstract: In order to figure out the effect of water regulation during fruiting period on cherry tomato yield and quality, this paper took cherry tomato ‘Qianxi’ and ‘Hongyu’ as experimental material and studied the effects of 3 treatments with different relative soil water contents (40%-50%, 60%-70%, and 80%-90%) on cherry tomato quality, yield and water use efficiency in winter-spring crop and autumn-winter crop in solar greenhouse. The results showed that the contents of soluble solids, soluble sugar, titratable acid, VC and water use efficiency of cherry tomato were significantly increased along with the increasing of soil relative water content. But, the leaf net photosynthetic rate, stomatal conductance, chlorophyll content, single fruit weight and total yield would show a changing tendency of first increasing then decreasing along with the reducing of soil relative water content. Combining entropy weight method with TOPSIS method, the paper comprehensively analyzed various indexes of cherry tomato including quality, yield and water use efficiency. The optimum relative soil water content was 40%-50% during cherry tomato fruiting period.

Keywords: cherry tomato; water control; quality; yield; water use efficiency