

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.008

# 温室番茄基质栽培供液决策方法研究

张芳<sup>1,2</sup>, 张建丰<sup>1</sup>, 薛绪掌<sup>2</sup>, 王利春<sup>2</sup>, 李银坤<sup>2</sup>, 申亚宾<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 为研究温室番茄基质栽培过程中供给营养液的决策方法, 采用水分传感器监测基质含水量作为决策控制供液量和时间的指标, 设计 3 个试验, 即在番茄各生育期内设定基质含水量上、下限值进行供液; 以基质持水量为供液上限, 分别以设定的基质含水量和间隔 1 h 监测的基质含水量为下限进行非定时和定时供液。通过对比研究供液量、供液次数、可利用养分含量、基质电导率和 pH 对植株长势、果实品质和产量的影响, 确定适宜的供液决策方法。结果表明, ①在番茄各生育期设定基质含水量上、下限条件下的供液量和供液次数不能满足植株对养分的需求, 植株长势和果实品质较差, 产量较低; ②以基质持水量为上限, 基质含水量阈值为下限条件下, 虽满足植株对养分需求, 但由于根系环境较劣而影响植株长势; ③以基质持水量和间隔 1 h 监测的基质含水量为供液上、下限条件下, 供给养分充足, 植株长势正常, 果实品质较优, 产量增加。由此可见, 以基质持水量和间隔 1 h 监测的基质含水量为上、下限定供液的方法, 可根据番茄日需水规律实现基质栽培下营养液的高效决策管理。

**关键词:** 基质栽培; 营养液; 决策方法; 番茄

**中图分类号:** S274.3; S641.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2016)03-0295-07

## Research on the decision method of supplying nutrient solution of tomatoes with substrate culture in greenhouse

ZHANG Fang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianfeng<sup>1</sup>, XUE Xuzhang<sup>2</sup>, WANG Lichun<sup>2</sup>, LI Yinkun<sup>2</sup>, SHEN Yabin<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** To research the decision method of supplying nutrient solution of tomatoes with substrate culture in greenhouse, using the substrate water content monitored by moisture sensor as decision index of the amount and time for supplying nutrient solution, three experiments are conducted, which set the threshold ranges of upper and lower limit of substrate water content in the each growth periods of tomatoes to supply solution, and set the substrate water capacity as upper limit and those as lower limits which the known thresholds of substrate water content and the substrate water contents by monitoring every 1 hour to supply solution with off-time and fixed timing. Appropriate decision method of supplying nutrient solution is determined, through comparing effects of amount and time for supplying nutrient solution, available nutrient content, electrical conductivity and pH in the substrate, plant growth, fruit quality and yield in the three experiments. The results show three points. The first, the amount and time for supplying nutrient solution can not meet the requirements of plants for nutrients under the condition of the different threshold ranges of upper and lower limit of substrate water content in each growth period of tomatoes, so that it gets poorer plant growth, fruit quality and lower yield. The second, though the demand of plants for nutrients is met under the condition that the substrate water ca-

**收稿日期:** 2016-01-06

**基金项目:** 北京市自然科学基金资助项目(6142008); 国家 863 计划资助项目(2012AA101903-1); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项资助项目(KJ CX20140415)

**作者简介:** 张芳, 女, 博士生, 研究方向为农业水土工程。E-mail: zf200612915@126.com

**通讯作者:** 张建丰, 男, 教授, 博导, 主要研究方向为土壤水分运动与灌区自动化等。E-mail: ljfzhang@mail.xaut.edu.cn

capacity and the known thresholds of substrate water content respectively as upper and lower limits, plant growth are affected by the bad root environments. The third, under the condition that the substrate water capacity and the substrate water contents by monitoring every 1 hour respectively as upper limit and lower limits, the demand of plants for nutrients are met, thus it gets the normal plant growth, better fruit quality and the higher yield. The third decision method can realize the efficient decision management of nutrient solution with substrate culture, according to the daily water demand regulation of tomatoes.

**Key words:** substrate culture; nutrient solution; decision method; tomato

全球 90% 以上的无土栽培为基质栽培, 基质栽培是用固体介质固定植物根系, 通过添加一定量的营养液供植物吸收利用<sup>[1]</sup>, 具有水肥利用效率高、高产优质、防止连作障碍和不易传染根系病害等优点。目前, 植物通过营养液吸收水分和养分的栽培过程中, 大多采用定时定量法、累积太阳辐射法和彭曼公式法来决策供给营养液的时间和液量。文献<sup>[2]</sup>经过上述 3 种方法试验后, 发现累积太阳辐射法和彭曼公式法均可在每日 8:00~20:00 时段内按照植物需水量进行决策供液, 供液量趋势呈早晚量少、午间量多的抛物线型, 而相同时段内定时定量法供给的液量呈一条直线, 贯穿抛物线中心。其中, 累积太阳辐射法虽考虑了植物蒸腾需求的日动态变化, 但随植物生长需水强度增加, 供液量则需靠经验确定; 而彭曼公式法需监测较多参数才可计算出植物需水强度进行供液; 定时定量法<sup>[3-5]</sup>对植物早晚过量供液, 午间耗液高峰时却供液不足。此 3 种方法均没有直接监测基质水分状况, 若采用水分传感器监测基质水分状况, 既可根据植株所处的生育期和外界环境对植株需水量进行供液, 随时满足植株的所需液量, 并且方法简单, 监测指标数量少, 易于获得。此外, 文献<sup>[2]</sup>指出, 根据累积辐射法和彭曼公式对基质每天供液频次应为 6~13 次, 文献<sup>[6-8]</sup>认为夏天每天供液 20~30 次对维持根系基质含水量很有必要, 尤其作物快速生长阶段, 但文献<sup>[9]</sup>认为高频次供液增加了基质湿润度, 会减少根系氧气可用率。对于开放式基质栽培, 文献<sup>[10-12]</sup>认为每天过量 15%~30% 供给作物营养液, 其过量部分自行流失不再使用, 以此避免基质中盐分积累而达到养分平衡。为避免植株受到旱涝胁迫, 提高水肥利用效率和产量, 正确供给营养液是非常重要的。本研究以番茄为研究对象, 探索基质栽培下基于水分传感器决策供液对植株长势、果实品质及产量的影响, 以期对番茄基质栽培的营养液高效管理提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验 T<sub>1</sub> 于 2013 年 4~7 月在北京市农林科学

院日光温室内进行试验, 试验 T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 分别于 2013 年 8~12 月和 2014 年 4~8 月在北京小汤山国家精准农业研究示范基地日光温室内进行试验。

温室透光率均为 75% 左右。供试品种为番茄, 品名为仙客 8 号。基质配方为草炭、蛭石和珍珠岩, 其体积比为 5:3:1, 基质容重为 0.3 g/cm<sup>3</sup>, 总孔隙度为 80.5%, pH 值为 6.95, EC 值为 0.98 mS/cm, 基质持水量(Substrate capacity, 简称为 SC)为 0.62 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。营养液采用日本山崎番茄配方配制, 于番茄定植~开花前、开花~第一穗花坐果前和第一穗花坐果~采收结束 3 个生育期分别供给浓度(用电导率表示)为 1.0 mS/cm、1.5 mS/cm、2.5 mS/cm 的营养液<sup>[13]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验 T<sub>1</sub>: 设 1 个处理, 即根据番茄 3 个生育期分别设定基质含水量上、下限, 如表 1 所示。采用单盆单株栽种, 设 3 个重复, 每个重复以南北方向栽种 10 株番茄, 每个重复之间的行距为 80 cm, 株距为 50 cm, 盆长、宽和高分别为 30 cm、25 cm 和 20 cm。

试验 T<sub>2</sub>: 将番茄第一穗花坐果~采收结束时期的基质含水量上、下限分别设 5 个处理, 如表 1 所示, 前期供液方法采用常规方法。试验采用反光膜包裹的基质袋栽种番茄, 每个处理设 3 个重复, 每个重复以南北方向栽种 10 株, 行距 80 cm, 株距 50 cm。每行基质袋长 5 m, 上底宽 15 cm, 下底宽 30 cm, 高 15 cm, 基质袋底部侧边每间隔 50 cm 设排液孔, 孔下设置收集容器。

试验 T<sub>3</sub>: 设 1 个处理。试验采用 8 个基质栽培槽, 每 2 个槽竖向排列为 1 个重复, 共 4 个重复, 每个重复竖向错开布置。单个槽长 60 cm, 宽 42 cm, 高 18 cm, 每个槽内两列错开共栽培 3 株番茄, 株距 30 cm, 行距 80 cm。基质槽底面中心设排液孔, 孔径 2 cm, 排液孔下放置排液收集容器。

3 个试验及其每个处理均设独立的营养液源和供液管道, 管道上依次连接潜水泵、过滤器、压力表、电磁阀、流量计和滴灌管。试验 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> (5 个处理) 中每行重复的第 3 株和第 8 株植株基部水平距离

10 cm 处分别竖向插入 1 支水分传感器,即每个处理共 6 支水分传感器;每行重复均设一根滴头间距为 50 cm 的压力补偿式滴灌管,滴头滴速均为 1.2 L/h。试验 T<sub>3</sub> 每个重复的第 1 个栽培槽内,水平距

离排液孔 10 cm 处各竖向插入 1 支水分传感器,共 4 支水分传感器;每个重复平行设置 3 根滴头间距为 10 cm 的压力补偿式滴灌管,滴头滴速均为 1.2 L/h。每株番茄与邻近滴头的水平距离为 10 cm。

表 1 试验 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 基质含水量控制上限和下限

Tab. 1 Upper and lower limits threshold ranges of substrate water content with experiment T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub>

试验	生育期	供液限值/(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		试验	处理	供液限值/(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	
		上限	下限			上限	下限
T <sub>1</sub>	番茄定植~开花前	90%SC	65%SC	T <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	0.620	0.590
	开花~第一穗花坐果前	90%SC	75%SC		A <sub>2</sub>	0.620	0.600
	第一穗花坐果~采收结束	90%SC	85%SC		A <sub>3</sub>	0.620	0.618
			A <sub>4</sub>		0.620	0.618	
			A <sub>5</sub>		0.630	0.618	

试验 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> (5 个处理)均由 6 支水分传感器所测基质含水量的均值与表 1 所示的基质含水量上、下限值比较,若低于下限则开始供液,高于上限则停止供液。试验 T<sub>3</sub> 番茄定植~开花前和开花~第一穗花坐果期每日 7:00~18:00 整点时刻供液 0.22 L/株,番茄第一穗花坐果~采收结束时期的供液量按式(1)计算。

$$W = (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \times V \times \alpha \quad (1)$$

式中,  $W$  为整点时刻供液量(L);  $\theta_{\max}$  为供液上限 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),取基质持水量 0.62 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>;  $\theta_{\min}$  为供液下限 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),即整点时刻 4 支水分传感器所测得的基质含水量平均值;  $V$  为基质栽培槽内基质体积 (cm<sup>3</sup>);  $\alpha$  为供液系数,根据文献[10-12]提出的每次供液后排出液量的最大值,取  $\alpha = 1.3$ 。

### 1.3 测定项目与方法

基质含水量由水分传感器每 10 min 监测一次;每小时供液量由控制器统计 1 h 内流过流量计的液量。每小时排液量为 1 h 内供给的营养液充满基质孔隙后,由排液孔流入收集槽的液量。采用 5:1 和 2.5:1 水基质比提取法,提取基质浸出液<sup>[14]</sup>。营养液、排出液和基质浸出液的电导率及 pH 通过雷磁 DDS-307 型电导率仪和 pH-HJ90B 酸度计测量。

植株叶片颜色和果实外表病变状况由目测所得。番茄成熟时进行采摘,由电子天平(精度 0.1 g)称重后记录鲜重,最后统计总产量。第二穗果成熟时,随机选取 5 个果实测定纵横径、总可溶性固形物和可滴定总酸含量。果实纵、横径由游标卡尺测量果实上下和左右最大长度,总可溶性固形物含量采用折射仪法(日本数字手持折射仪 PR-32)测定,总酸含量采用指示剂滴定法(GB/T 12293-90)测定。

营养液配制采用软化水,试验 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 的软化水电导率分别为 0.045 mS/cm、0.026 mS/cm 和 0.026 mS/cm,酸碱度分别为 7.08、7.01 和 7.01。选用山崎番茄配方为 1 个剂量,即为基础浓度,以 0.2 的浓度梯度差配制一系列不同浓度的营养液,测出每级浓度(Concentration,简称为 C)营养液所对应的电导率(Electrical conductivity,简称为 EC),得到试验 T<sub>1</sub> 营养液浓度(C)与电导率(EC)间关系为  $EC = 1.0950C - 0.1079$ ,相关系数  $R^2 = 0.9934$ ,试验 T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 的 C-EC 关系均为  $EC = 1.0079C + 0.1165$ , $R^2 = 0.9994$ 。

### 1.4 数据计算与处理

营养液累积使用量(L/株) =

$$\text{累积供液量(L/株)} - \text{累积排液量(L/株)} \quad (2)$$

营养液电导率(EC)对应的浓度(剂量) =

$$(EC + 0.1079) / 1.0950 \text{ 或 } (EC - 0.1165) / 1.0079 \quad (3)$$

营养液可利用总盐含量(g/株) = 营养液累积使用量(L/株) × 营养液电导率(EC)对应的浓度(剂量) × 1 个剂量的总盐含量(g/L)  $(4)$

营养液各大量元素可利用总含量(mol/株) = 营养液累积使用量(L/株) × 营养液电导率(EC)对应的浓度(剂量) × 1 个剂量时每升营养液含各大量元素摩尔数(mol/L)  $(5)$

营养液各微量元素可利用总含量(g/株) = 营养液累积使用量(L/株) × 营养液电导率(EC)对应的浓度(剂量) × 1 个剂量时每升营养液含各微量元素克数(g/L)  $(6)$

数据采用 Microsoft office excel 处理,利用 SPSS-16.0 软件中 Duncan 比较法进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 对供液频率和供液量的影响

由表2可看出, 试验  $T_1$  番茄定植~开花前, 开花~第一穗花坐果前和第一穗花坐果~采收结束3个生育期内的平均次供液量随基质含水量下限提高而减少。供液次数随生育进程推进而增加, 前2个生育期内相邻两次供液的间隔时间均是8天, 而第一穗花坐果~采收结束时期每次供液间隔时间由7天逐渐变为2天, 原因是该时期基质含水量下限提高和番茄植株耗液量增加。

试验  $T_2$  (5个处理) 于第一穗花坐果~采收结束时期的供液次数分别是试验  $T_1$  的2.8倍、3.4倍、3.6倍、5.2倍和2.9倍, 并且处理  $A_1 \sim A_4$  的总供液量比试验  $T_1$  分别提高了9.0%、12.0%、7.3%、13.7%。处理  $A_1 \sim A_4$  的平均次供液量随基质含水量下限提高而减少, 与处理  $A_1$  相比, 处理

$A_2 \sim A_5$  的平均次供液量分别降低了14.8%、23.2%、44.3%和36.9%; 供液次数随基质含水量下限提高而增加, 与处理  $A_1$  相比, 处理  $A_2 \sim A_5$  的供液次数分别增加了20.5%、28.2%、87.2%和5.1%。处理  $A_5$  平均次供液量和供液次数的变化趋势与处理  $A_1 \sim A_4$  不同, 可能是因为供液上限略高于基质持水量, 有少量多余营养液需要排出而使基质含水量较高, 延长了番茄植株耗液的时间。

试验  $T_3$  平均次供液量随生育进程推进分别呈现减少再增加的趋势。由于番茄定植~开花前和开花~第一穗花坐果2个生育期内供液量由定时定量法全部和部分供给, 所以前2个生育期的平均次供液量多于第一穗花坐果~采收结束时期的平均次供液量。第一穗花坐果~采收结束时期, 试验  $T_3$  的供液量比  $T_1$  和  $T_2$  (处理  $A_1 \sim A_5$ ) 分别提高了2.0倍、1.7倍、1.7倍、1.8倍、1.6倍和3.1倍。试验  $T_3$  在3个生育期内的总排液量占供液量的37%左右。

表2 试验  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  各生育期供液量和供液次数

Tab. 2 Amounts and times of supplying nutrient solution in growth periods with experiment  $T_1$ ,  $T_2$  and  $T_3$

试验	处理	平均单次供液量/(L/(株·次))			供液次数/次			总供液量/(L/株)
		番茄定植~开花前	开花~第一穗花坐果前	第一穗花坐果~采收结束	番茄定植~开花前	开花~第一穗花坐果前	第一穗花坐果~采收结束	第一穗花坐果~采收结束
$T_1$	—	2.83	2.45	2.06	1	2	14	28.90
	$A_1$	—	—	0.81	—	—	39	31.50
	$A_2$	—	—	0.69	—	—	47	32.36
$T_2$	$A_3$	—	—	0.62	—	—	50	31.03
	$A_4$	—	—	0.45	—	—	73	32.85
	$A_5$	—	—	0.51	—	—	41	20.91
$T_3$	—	0.22	0.12	0.14	216	228	624	86.38

注:表中数据为根据原数据计算后保留2位小数的结果。

试验  $T_1$  和  $T_3$  于第一穗花坐果~采收结束时期历时分别为50 d和54 d, 由表3可知, 试验  $T_1$  和  $T_3$  于此阶段的可利用营养液量分别为28.90 L/株和54.11 L/株, 试验  $T_3$  的可利用营养液量比  $T_1$  增加了87.7%。其中, 试验  $T_3$  的可利用总盐含量、大量元素含量和微量元素含量比试验  $T_1$  均增加了87.7%, 说明相对于试验  $T_1$ , 试验  $T_3$  的供液方法可提高营养液供给量, 同时增加番茄植株可吸收的盐分含量、大量元素含量和微量元素含量。

图1显示了试验  $T_3$  第一穗花坐果~采收结束前期(定植后44~48 d)、中期(定植后66~70 d)和后期(定植后83~87 d)各连续5天的供液量变化过程, 可看出每日供液量过程呈抛物线型, 前期和中期

每日的供液量几乎均呈双峰, 因为中午时段植株出现光合午休现象, 耗液量降低, 供液量也随之降低。前、中和后期番茄植株供液量高峰区随生育进程推进在每日内出现的时间偏后, 供液高峰区分别集中于每日9:00~18:00、10:00~18:00和11:00~18:00。还可看出随生育进程推进, 供液量呈现先升高再降低的趋势, 其中随番茄果实生殖生长, 植株耗液量逐渐升高, 则供液量高峰出现在第一穗花坐果~采收结束中期; 随着果实陆续被采摘, 植株耗液量降低, 则第一穗花坐果~采收结束后期的供液量出现下降趋势。

由此可知, 试验  $T_3$  是按照番茄植株生长特点和实际耗液量进行供液的。

表3 试验 T<sub>1</sub> 和 T<sub>3</sub> 不同生育期可利用的液量和养分含量  
 Tab.3 The available amounts and the nutrient contents of supplying nutrient solution in growth periods with experiment T<sub>1</sub> and T<sub>3</sub>

生育期	番茄定植 ~开花前		开花~第一 穗花坐果前		第一穗花坐果 ~采收结束		总量		
	T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	
可利用营养液量/(L/株)	2.83	5.18	4.9	9.05	28.9	54.11	36.63	68.34	
可利用总盐含量/(g/株)	4.69	9.11	11.03	20.86	82.15	154.2	97.87	184.18	
可利用 大量 元素 含量/ (mol/株)	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> -N	2.91E-03	5.65E-03	6.84E-03	1.29E-02	5.09E-02	9.56E-02	6.07E-02	1.14E-01
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	3.04E-02	5.90E-02	7.14E-02	1.35E-01	5.32E-01	9.99E-01	6.34E-01	1.19E+00
	P	2.91E-03	5.65E-03	6.84E-03	1.29E-02	5.09E-02	9.56E-02	6.07E-02	1.14E-01
	K	1.74E-02	3.37E-02	4.08E-02	7.72E-02	3.04E-01	5.71E-01	3.62E-01	6.82E-01
	Ca	6.51E-03	1.26E-02	1.53E-02	2.89E-02	1.14E-01	2.14E-01	1.36E-01	2.56E-01
	Mg	4.34E-03	8.43E-03	1.02E-02	1.93E-02	7.60E-02	1.43E-01	9.05E-02	1.70E-01
	S	4.34E-03	8.43E-03	1.02E-02	1.93E-02	7.60E-02	1.43E-01	9.05E-02	1.70E-01
可利用 微量 元素 含量/ (g/株)	Fe	1.82E-02	3.54E-02	4.28E-02	8.11E-02	3.19E-01	5.99E-01	3.80E-01	7.16E-01
	B	2.17E-03	4.22E-03	5.10E-03	9.65E-03	3.80E-02	7.13E-02	4.53E-02	8.52E-02
	Mn	2.17E-03	4.22E-03	5.10E-03	9.65E-03	3.80E-02	7.13E-02	4.53E-02	8.52E-02
	Zn	2.17E-04	4.22E-04	5.10E-04	9.65E-04	3.80E-03	7.13E-03	4.53E-03	8.52E-03
	Cu	8.69E-05	1.69E-04	2.04E-04	3.86E-04	1.52E-03	2.85E-03	1.81E-03	3.41E-03
	Mo	4.34E-05	8.43E-05	1.02E-04	1.93E-04	7.60E-04	1.43E-03	9.05E-04	1.08E-03

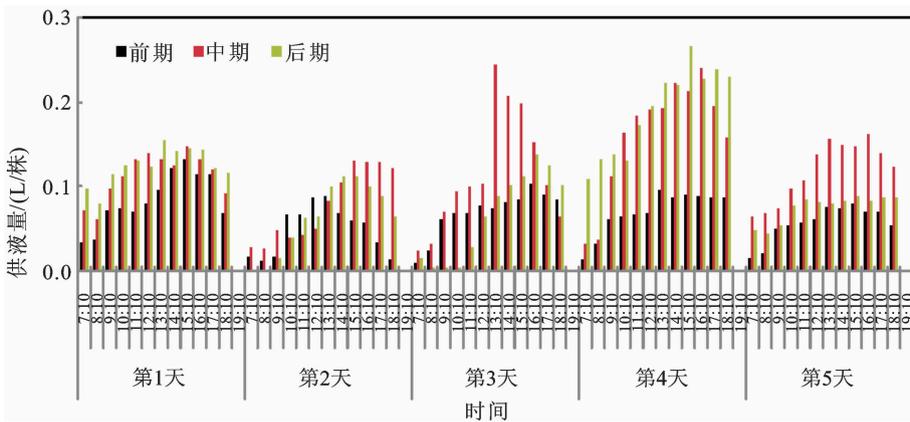


图1 试验 T<sub>3</sub> 第一穗花坐果~采收结束的前、中和后期供液量变化过程

Fig.1 The change processes of supplying amounts of nutrient solution at early, middle and late stages in the first cluster until the end of the harvest with experiment T<sub>3</sub>

## 2.2 对基质电导率和 pH 的影响

由表4可看出,试验 T<sub>1</sub> 和 T<sub>3</sub> 的基质电导率随生育进程推进呈增加趋势,且均高于各生育期供给的营养液浓度。试验 T<sub>1</sub> 每次供液后均无排出液,而 T<sub>3</sub> 则相反;第一穗花坐果~采收结束时期,与供给的营养液浓度(2.5 mS/cm)相比,试验 T<sub>1</sub> 和 T<sub>3</sub> 的基质电导率分别增加 2.35 mS/cm 和 1.01 mS/cm,可看出,在基质电导率超过营养液供给浓度时,有液体排出可降低基质电导率。试验 T<sub>2</sub> 中 A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub> 每次供

液后均无排出液,并且4个处理的基质电导率随供液上限增加而升高;与 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 和 A<sub>4</sub> 的基质电导率相比,A<sub>5</sub> 的基质电导率分别降低了 5.0%、6.9%、10.9% 和 12.0%,这是因为 A<sub>5</sub> 在每次供液时均有排出液,从而降低了盐分积累。与供给的营养液浓度(2.5 mS/cm)相比,A<sub>1</sub>~A<sub>5</sub> 的基质电导率增加了 2.47~3.15 mS/cm。

试验 T<sub>1</sub> 和 T<sub>3</sub> 的基质 pH 值随生育进程推进呈下降趋势,即酸性逐渐加强,下降幅度分别为 5.4%~

7.2%和 0.3%~2.7%;第一穗花坐果~采收结束时期,试验 T<sub>3</sub>的 pH 比试验 T<sub>1</sub>提高了 12.0%。试

验 T<sub>2</sub>中 A<sub>1</sub>~A<sub>5</sub> 第一穗花坐果~采收结束时期的基质 pH 在 5.06~5.24 范围内。

表 4 试验 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>和 T<sub>3</sub>各生育期基质电导率和 pH 值

Tab. 4 The electrical conductivity and pH in substrate in growth periods with experiment T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> and T<sub>3</sub>

试验	处理	基质电导率/(mS/cm)			pH 值		
		番茄定植~开花前	开花~第一穗花坐果前	第一穗花坐果~采收结束	番茄定植~开花前	开花~第一穗花坐果前	第一穗花坐果~采收结束
T <sub>1</sub>	—	1.60±0.05	2.20±0.06	4.85±0.05	5.90±0.13	5.58±0.15	5.18±0.15
	A <sub>1</sub>	—	—	5.23±0.58	—	—	5.22±0.21
	A <sub>2</sub>	—	—	5.34±0.62	—	—	5.24±0.17
T <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	—	—	5.58±0.56	—	—	5.18±0.14
	A <sub>4</sub>	—	—	5.65±0.76	—	—	5.06±0.19
	A <sub>5</sub>	—	—	4.97±0.68	—	—	5.20±0.16
T <sub>3</sub>	—	1.50±0.02	2.05±0.03	3.51±0.03	5.98±0.08	5.82±0.12	5.80±0.11

### 2.3 对番茄植株长势、果实品质及产量的影响

由表 5 可看出,试验 T<sub>1</sub>番茄植株在第一穗花坐果~采收结束初期出现叶片黄化现象,此特征表示生长过程中营养元素缺乏,如氮、钾、钙、镁、硫等元素;采摘时,果实出现脐腐病,可能是由缺钙引起。试验 T<sub>2</sub>番茄植株叶片呈绿色,为正常生长状态,但第一穗花坐果~采收结束中期果实出现脐腐病,表示缺钙。试验 T<sub>3</sub>番茄植株叶片呈绿色,为正常生长状态,果实无病变。

相对于试验 T<sub>1</sub>,试验 T<sub>2</sub>提高了供液上下限,增加了供液量,处理 A<sub>1</sub>~A<sub>5</sub>的果实产量比试验 T<sub>1</sub>分别提高了 9.9%、7.0%、8.7%、2.3%和 12.2%。试

验 T<sub>2</sub>中,随供液下限的提高,处理 A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub>的果实产量呈下降趋势,这是受较高的基质电导率和较低的 pH 值影响所致。与处理 A<sub>1</sub>相比,处理 A<sub>2</sub>~A<sub>4</sub>的果实产量分别降低了 2.7%、1.1%和 6.9%;而处理 A<sub>5</sub>的果实产量提高了 2.1%,这是因为 A<sub>5</sub>的基质电导率比 A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub>稍低,从而减小了对产量抑制的作用。

与试验 T<sub>1</sub>相比,试验 T<sub>3</sub>果实可溶性固形物含量、糖酸比、横径、纵径和产量分别提高了 39.8%、131.9%、45.2%、34.8%和 71.5%。与试验 T<sub>2</sub>(处理 A<sub>1</sub>~A<sub>5</sub>)相比,试验 T<sub>3</sub>的果实产量分别提高了 56.1%、60.3%、57.8%、67.6%和 52.9%。

表 5 试验 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>和 T<sub>3</sub>的叶色、果实品质和产量

Tab. 5 The leaf color, fruit quality and yield with experiment T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> and T<sub>3</sub>

试验	处理	测定指标							
		叶片颜色	果实外表病变	果实可溶性固形物含量/%	果实可滴定酸含量/%	果实糖酸比	果实横径/cm	果实纵径/cm	产量/(kg/株)
T <sub>1</sub>	—	黄绿	有	3.67±0.12	0.87±0.01	4.23±0.12	6.57±0.14	5.64±0.13	1.72±0.11
	A <sub>1</sub>	绿	有	—	—	—	7.04±0.21	6.50±0.25	1.89±0.21
	A <sub>2</sub>	绿	有	—	—	—	7.02±0.19	6.14±0.27	1.84±0.28
T <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	绿	有	—	—	—	7.25±0.25	6.19±0.22	1.87±0.19
	A <sub>4</sub>	绿	有	—	—	—	6.72±0.23	5.80±0.24	1.76±0.23
	A <sub>5</sub>	绿	有	—	—	—	7.38±0.27	6.56±0.29	1.93±0.21
T <sub>3</sub>	—	绿	无	5.13±0.06	0.52±0.01	9.81±0.19	9.54±0.24	7.60±0.26	2.95±0.18

### 3 讨论与结论

主要依靠营养液供给植株吸收利用养分的基质栽培中,依据基质含水量上、下限管理营养液的方法

研究相对较少。目前,基质或土壤内施底肥后,单纯供给水或另外施用营养液的番茄栽培技术中,常用的供给水分或营养液方法是固定供给上限,设其接近田间持水量;在作物不同生育期设定不同下限,设

下限均为田间持水量的百分比,并随生育期的延长,下限逐渐增加,但小于上限。本文中试验  $T_1$  的供液方法是依据上述方法和范围进行划分的,但试验  $T_1$  中不施底肥。通过试验  $T_1$  可知,供液时间间隔较长,供液次数和平均次供液量较少,造成营养元素缺乏,叶色呈黄绿色,番茄果实出现脐腐病,基质内电导率偏高,pH 偏酸性,说明此种供液上、下限指标并不适用于不施底肥的基质栽培。因为当基质内混有底肥后,种植过程中主要考虑水分管理问题;营养液型基质栽培(不施底肥)依靠营养液提供水分和养分,所以养分供给也是需要考虑的主要方面,以此提高供液次数和增加供液量来及时补充营养元素,满足番茄植株生长。

试验  $T_2$  中处理  $A_1 \sim A_5$  的供液上、下限均设定在基质持水量左右。结果表明,第一穗花坐果~采收结束时期的供液次数分别是试验  $T_1$  的 2.8 倍、3.4 倍、3.6 倍、5.2 倍和 2.9 倍,处理  $A_1 \sim A_5$  的供液量比试验  $T_1$  分别提高了 9.0%、12.0%、7.3%、13.7%,处理  $A_1 \sim A_5$  的果实产量比试验  $T_1$  分别提高了 9.9%、7.0%、8.7%、2.3% 和 12.2%。试验  $T_2$  (处理  $A_1 \sim A_5$ ) 虽然提高了供液量,但并未改善基质电导率和 pH 值,尤其电导率均偏高,原因是根系在代谢过程中的分泌物及脱落、死亡的根表皮细胞会存留在基质内;此外,植物根系对营养液中氮磷钾的吸收量往往大于对钙镁硫的吸收量,故在基质中会出现钙镁离子富集的盐分累积现象。虽然叶色呈绿色,但果实仍有脐腐病,可能是基质盐类浓度较高,使番茄根系受到盐害,阻碍了番茄果实对钙素的吸收。另外,提高处理  $A_5$  供液上限可使每次供液后均有排出液,相对处理  $A_1 \sim A_4$  来说,处理  $A_5$  降低了基质电导率,说明供液时有排出液淋洗基质可降低基质电导率。由试验  $T_2$  可知,营养液型基质栽培的供液量不仅取决于基质含水量的上、下限值,还需通过加大供液量对基质进行淋洗,与文献[10-12]观点一致。

试验  $T_3$  每天固定了供液时间和上限,同时还提高一定比例的液量,可达到每天 12 次供液,且有多余液量流出,与文献[2]观点相符。并且试验  $T_3$  的 3 个生育期的排出液电导率分别为 1.50 mS/cm、2.05 mS/cm 和 3.51 mS/cm,与 Lizarraga 等<sup>[2]</sup> 提出排出液电导率与原液电导率的差值在 1 mS/cm 为适宜的观点一致。由此可见,一天内多次供液和适宜的供液量可将基质中富集的盐分淋洗出,使番茄根系处于养分和水分平衡的环境中。另外,试验  $T_3$

完全按照番茄植株的生长特点和实际耗液量进行供液,避免了定时定量法在植株早上和晚上供液过大,午间供液过少的弊端。相对于试验  $T_1$  和  $T_2$  (处理  $A_1 \sim A_5$ ),试验  $T_3$  提高了果实产量,改善了果实品质。

营养液型基质栽培中,利用水分传感器监测基质含水量,以基质持水量和基质实时含水量为供液上、下限的供液决策方法,可以根据植株生长特点和需水规律及时供给适宜的营养液量,避免耗液量大时供液不足、耗液量小时供液过多而使植株受到水分胁迫或水肥浪费的情况出现,精确管理水肥供液时间和供液量,维持养分充足且均衡,确保植株长势正常,增加产量,达到节水省肥的效果,实现基质栽培下营养液的高效管理。

#### 参考文献:

- [1] 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005, 21 (增刊 1): 1-4.  
GUO Shirong. Research progress, current exploitations and developing trends of solid cultivation medium[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (S1): 1-4.
- [2] LIZARRAGA A, BOESVELD H, HUIBERS F, et al. Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navarra, Spain [J]. Irrigation and Drainage, 2003, 52 (2): 177-188.
- [3] 罗云米, 龚久平, 洪云菊. 黄瓜基质栽培技术研究[J]. 西南园艺, 2000, 28(3): 3-5.  
LUO Yunmi, GONG Jiuping, HONG Yunju. A study of substrates for cucumber[J]. Southwest Horticulture, 2000, 28(3): 3-5.
- [4] 吴小涵, 刘士哲. 鱼翅瓜基质袋营养液滴灌高产优质栽培技术[J]. 广东农业科学, 2004, (5): 41-43.  
WU Xiaohan, LIU Shizhe. The culture technique of high yield and quality of nutrient solution by drip irrigation in substrate bags for Cucurbitaceae var. medullosa [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2004, (5): 41-43.
- [5] 焦永刚, 郭敬华, 董灵迪, 等. 滴灌条件下固体基质栽培番茄的水分需求规律研究[J]. 河北农业科学, 2013, 17(5): 33-36.  
JIAO Yonggang, GUO Jinghua, DONG Lingdi, et al. Study on the water requirement rule of tomato cultivated by solid substrate with drip irrigation[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2013, 17(5): 33-36.
- [6] JENSEN M H. Hydroponics[J]. Hortscience, 1997, 32 (6): 1018-1021.

- 电系统建设与管理[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [8] 白桦,迟凤岭,胡琼静.以风—水互补方式促进我国风电产业发展[J].中国软科学,2013,01:176-181.  
BAI Hua, CHI Fengling, HU Qiongjing. Complementarity between wind power and hydropower in promotion of wind power industry in China[J]. China Soft Science, 2013,01:176-181.
- [9] 谭志忠,刘德有,欧传奇,等.风电-抽水蓄能联合系统的优化运行模型[J].河海大学学报(自然科学版),2008,36(1):58-62.  
TAN Zhizhong, LIU Deyou, OU Chuanqi, et al. Optimal operation model for wind-powered pumped storage system[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2008,36(1):58-62.
- [10] BROOK D, KEY T, FELTON L. Increasing the value of wind generation through integration with hydroelectric generation[C]//Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2005, 2:1923-1925.
- [11] 包小庆,李阵刚.风电/水电互补研究[J].新能源, 1997, 19(3):34-37.  
BAO Xiaoqing, LI Zhengang. Study on wind/water power generation complementation [J]. New Energy, 1997,19(3):34-37.
- [12] RABY M, RIOS S, JERARDINO S, et al. Hydro thermal system operation and transmission planning considering large wind farm connection [J]. Power Tech, 2009 IEEE Bucharest, 2009:1-8.
- [13] 尚志娟.风水互补微电网的优化运行研究[D].北京:北京交通大学,2011.  
SHANG Zhijuan. Research on optimal operation of wind and hydro power complementary in micro grid optimal operation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [14] SUN Jun, XU Wenbo, FENG Bin. Adaptive parameter control for quantum-behaved particle swarm optimization on individual level [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, 2005:587-602.
- (责任编辑 杨小丽)

(上接第 301 页)

- [7] TUZEL Y G A, ELTEZ R Z, TUZEL I H. Comparison of open and closed systems on yield and quality of greenhouse grown tomatoes [J]. Acta Horticulturae, 2002, 579:585-590.
- [8] REIS M, INACIO H, ROSA A, et al. Grape marc compost as an alternative growing media for greenhouse tomato [J]. Acta Horticulturae, 2000, 554:75-81.
- [9] SCHRPPER F G, LIETH J H. Irrigation control in hydroponics [C]//SAVVAS D, PASSAM H. Hydroponic production of vegetable and ornamentals. Athens: Embryo publications, 2002:103-141.
- [10] 陈春宏,杨志杰,周强,等.引进现代化温室的作物肥水管理[J].上海农业学报,1998,14(增刊1):57-64.  
CHEN Chunhong, YANG Zhijie, ZHOU Qiang, et al. A preliminary study on the water and nutrient management under modern greenhouse cultivation [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 1998, 14(S1):57-64.
- [11] GALLARDO M, THOMPSON R B, RODRIGUEZ J S, et al. Simulation of transpiration, drainage, N uptake, nitrate leaching, and N uptake concentration in tomato grown in open substrate [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(12):1773-1784.
- [12] MERIC M K, TUZEL I H, TUZEL Y, et al. Effects of nutrition systems and irrigation program on tomato in soilless culture [J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1):19-25.
- [13] 王振龙.无土栽培教程[M].北京:中国农业大学出版社,2008:23-314.
- [14] 杜森,高祥照.土壤分析技术规范[M].北京:中国农业出版社,2006:73,93.
- (责任编辑 王卫勋,王绪迪)