

# 负水头供水源位置对番茄生长和水分利用率的影响

张芳<sup>1</sup>, 高子乐<sup>2</sup>, 冯跃华<sup>2</sup>, 孙晋锴<sup>2</sup>, 姜楠<sup>1</sup>, 冯峰<sup>1</sup>, 薛绪掌<sup>3</sup>

(1.黄河水利职业技术学院 水利工程学院, 河南 开封 475004;

2.河南省豫东水利工程管理局, 河南 开封 475002; 3.北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** [目的] 研究负水头灌溉对番茄生长、灌水方式和水分利用率等的具体影响, 旨在为完善负水头灌溉技术体系和提高水资源高效利用等提供科学依据。[方法] 采用单盆单株的盆栽试验方法, 利用负水头灌溉技术, 研究了供水源位置对番茄长势、灌水量、产量和水分利用率的影响。[结果] 负水头供水源位置对于番茄的生长和水分利用率有显著影响。与双盘埋设于根系两侧并交替供水相比, 单盘竖向埋设于根系一侧供水和供水盘水平埋放于根系底部供水的单株产量分别增产 14.3% 和 0.5%; 根系两侧并交替供水的番茄植株生长趋势和地上部植株干物质质量相对较小, 但与其他两种供水位置相比其根冠比均提高 33.3%; 另外, 根系两侧并交替供水的单株番茄总灌水量可降低 24.7% 和 17.4%。较其他两种供水源位置的单株水分利用率分别提高 43.8% 和 14.8%; 根系趋向供水源处生长。[结论] 不同的负水头灌溉水源埋设位置显著影响番茄生长的参数是不同的, 就设计的试验组次而言, 在有效利用水资源, 促进番茄植株生长和提高番茄产量等方面, 双盘埋设于根系两侧并交替供水的方式最优, 能有效降低灌水量, 提高水分利用率, 是最优处理, 可以在实践中予以推广。

**关键词:** 负水头灌溉; 水分利用率; 番茄; 水分利用率; 长势

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)03-0080-06

**中图分类号:** S275, S152.7

**文献参数:** 张芳, 高子乐, 冯跃华, 等. 负水头供水源位置对番茄生长和水分利用率的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 80-85. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.011; Zhang Fang, Gao Zile, Feng Yuehua, et al. Effects of water supply location in a negative pressure irrigation system on tomato growth and water use efficiency [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 80-85.

## Effects of Water Supply Location in A negative Pressure Irrigation System on Tomato Growth and Water Use Efficiency

Zhang Fang<sup>1</sup>, Gao Zile<sup>2</sup>, Feng Yuehua<sup>2</sup>, Sun Jinkai<sup>2</sup>, Jiang Nan<sup>1</sup>, Feng Feng<sup>1</sup>, Xue Xuzhang<sup>3</sup>

(1. Department of Hydraulic Engineering, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng, Henan

475004, China; 2. Henan East Water Conservancy Engineering Administration, Kaifeng, Henan 475002, China;

3. Research Center of Intelligent Equipments, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

**Abstract:** [Objective] The specific effects of negative head irrigation system on tomato growth, irrigation method, and water utilization efficiency were studied in order to provide scientific references for improving the technical system of negative head irrigation and for improving the efficient utilization of water resources. [Methods] A pot experiment was conducted to study the effects of water supply location on tomato growth, water requirement, yield, and water use efficiency by using negative pressure irrigation technology. [Results] The location of the negative pressure water supply location had a significant effect on the growth and water use efficiency of tomato. The yields of plants irrigated with a single water-supplying disc buried vertically on one side of the root system and with a single water-supplying disc buried horizontally at the bottom of the root system were 14.3% and 0.5%, respectively, lower than the yield per plant irrigated with a water-supplying disc buried on each side of the root system and alternately supplying water. The growth and dry weight trends of above ground parts of tomato plants with alternate water supply on both sides of the

收稿日期: 2022-09-22

修回日期: 2023-01-28

资助项目: 河南省自然科学基金资助项目“负水头调控下灌水器出水通量曲线动态响应机制”(222300420237); 河南省高等学校重点科研项目计划“负水头灌溉下土壤水分空间分布及其对番茄耗水规律的影响研究”(20B416002); 开封市黄河流域生态保护和高质量发展创新专项计划项目(2019013); 河南省科技攻关项目(GG202258)

第一作者: 张芳(1984—), 女(汉族), 河南省开封市人, 博士, 讲师, 主要从事农业节水灌溉方向的研究。Email: zf200612915@126.com。

root system were relatively small, but the root-shoot ratio was 33.3% greater than observed with the other two water supply locations. Moreover, the total water requirement of per plant for tomato plants irrigated with the alternate water supply on both sides of the root system was 24.7% and 17.4%, respectively, lower than with the other two water supply locations, and water use efficiency of single plant was 43.8% and 14.8% greater, respectively. Roots tended to grow more at the water supply source. [Conclusion] Different negative water head buried irrigation water source locations significantly affected tomato growth parameters. In terms of effective utilization of water resources, promotion of tomato plant growth, and increase of tomato yield, the optimal treatment was the system of disks buried on both sides of the root system and supplying water alternately. This system can effectively reduce irrigation water amount and improve water utilization rate, and should be promoted as an effective production practice.

**Keywords:** negative pressure irrigation; water use efficiency; tomato; water requirement; growth

目前,中国较为普遍采用的灌溉技术主要有滴灌和喷灌等。随着人们对水资源节约集约高效利用的不断重视,一些新的节水技术也在不断发展中,负水头灌溉技术就是新的技术之一<sup>[1]</sup>。负水头灌溉技术可以依靠土壤物理特性和植物吸水特性,让植物根据自身所处的环境和生育期在缺水时主动及时地吸取水分,减少了地表蒸发和水分渗漏。随着负水头灌溉技术在设备材料和安装方法等方面的日趋成熟,先后有不少研究者开展相关试验,分析了负水头对番茄、黄瓜、豆角、菠菜、小油菜生长、生理等指标的影响,明确了负水头对各种作物的耗水量、产量、品质和水分利用率等指标的影响机制,以及最适宜菠菜<sup>[2-3]</sup>、大豆<sup>[4]</sup>、黄瓜<sup>[5-6]</sup>、番茄<sup>[7-11]</sup>、小油菜<sup>[12]</sup>等作物生长的供水水头相关参数<sup>[13]</sup>。李霞等<sup>[7-11]</sup>提出有利于番茄生长的供水水头为 $-4\sim-7$  kPa,为负水头灌溉技术的完善与推广提供了理论和实践依据。另外,有相关文献提出,在交替供水情况下,当一半根系交替处于干燥状态会发出信号“提示”叶片闭合气孔,减少蒸发,降低对水分和养分的吸收,从而可能会导致植株生长相对较慢<sup>[13-17]</sup>。

目前有关负水头灌溉应用基础与关键技术的试验研究,基本上都是根据试验场地大小、盆栽容器尺寸、供水盘尺寸或安装简便程度等,主观地将供水盘埋设于根系附近,却忽略了供水盘作为供水源,其埋放位置对植物耗水量的影响,较少考虑供水盘对根系吸收水分的位置、范围、均匀性和速率等方面的影响,以及对植物的耗水规律、生长生理性状、产量、品质和节水效果的作用机制。显然,为深化认识负水头灌溉对作物生长及水分利用效率的影响机制,实现农业节水高产,开展基于负水头灌溉的供水位置对作物生长和节水的影响作用是非常必要的。

为此,本研究围绕负水头供水源空间位置的影响效应,开展番茄栽培试验,分析负水头供水源埋设位置对番茄生长、灌水量、产量和水分利用率的影响作

用,寻求负水头技术应用中提高水分利用率的方法,认识负水头供水源空间埋设位置对番茄生长的节水效果,并为负水头灌溉技术的实践应用提供一定的数据参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点及时间

负水头灌溉供水源空间埋设位置对番茄生长的影响试验于2020年7—10月在豫东水利工程管理局惠北水利科学试验站的大棚内开展。番茄定植于7月20日,苗龄5叶1心,8 d后试验开始处理,第四穗果后摘去植株生长点,10月11日结束试验。试验期间大棚内的日均温度约为28℃。

### 1.2 试验材料

试验采用番茄(品名京番402)为试验对象。采用负水头供水盆栽装置<sup>[18]</sup>进行供水,此装置由储水桶、控压管、导气管和供水盘组成。供水盘为圆盘状,直径 $\Phi$ 为19 cm,厚度为1.5 cm,内部具有空腔通道,多孔硅藻土陶瓷材质。番茄栽种由直径 $\Phi$ 32 cm,高25 cm的容器盛装(图1)。

### 1.3 土壤条件

试验采用的土壤由黏壤土和珍珠岩组成,其体积比为4:1,容重为 $1.25\text{ g/cm}^3$ ,田间持水率 $\theta_f$ (占土体的体积)为27.6%。试验前土壤有机质含量21.56 g/kg,全氮0.46 g/kg,全磷0.89 g/kg,全钾17.38 g/kg。每个盆栽容器内施基肥,尿素8.50 g/盆,磷酸二铵8.50 g/盆,硫酸钾5 g/盆,追肥施用尿素4.20 g/盆,鸡粪20 g/盆。

### 1.4 负水头供水盆栽装置节水原理

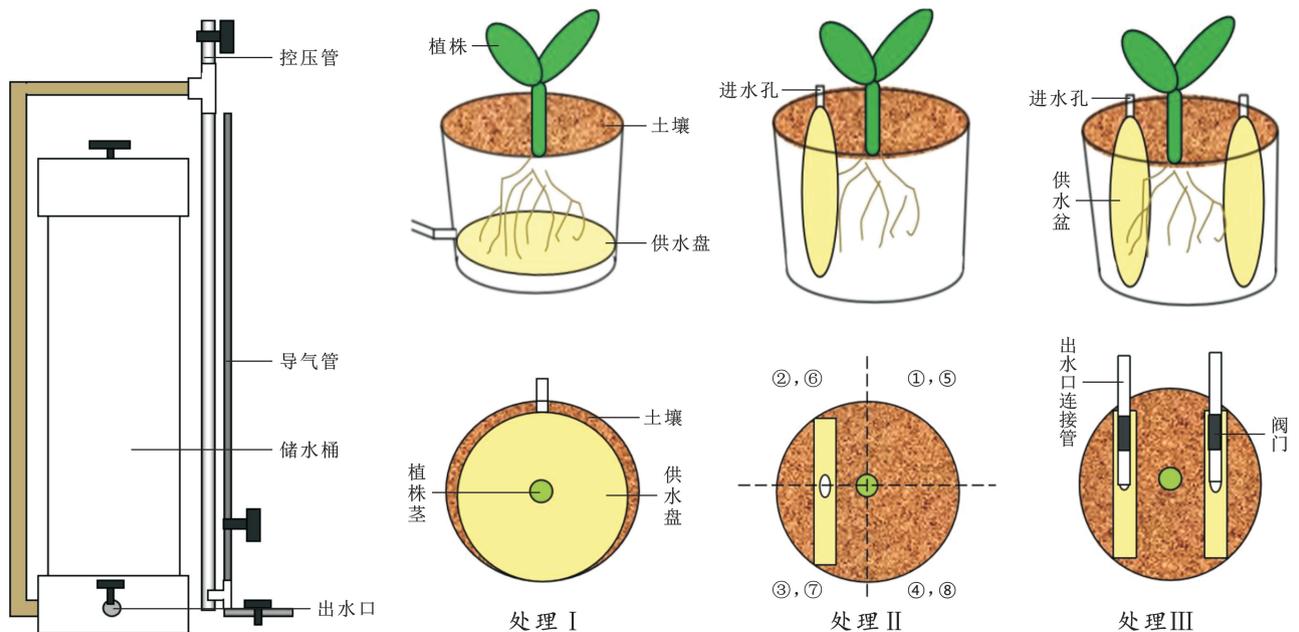
将负水头供水盆栽装置和土壤看作一个整体系统,基于能量守恒原理,当供水盘周围土壤水势因地表蒸发和植株蒸腾导致减小时,若其小于供水盘内水势,供水盘中的水会通过盘的多孔表面渗入土壤孔隙,补给土壤消耗的水量。当供水盘内部与其外部周

围土壤水势一致时,供水盘内水分不再运动,土壤含水量维持稳定。由于供水盘内水量减少,储水桶内水会进入供水盘,此时储水桶内水位降低,压强下降。基于连通器原理,大气依次经过导气管和控压管内一定高度的水体后进入供水桶,平衡供水桶内压强<sup>[1]</sup>。维持供水盘内外水势一致的负压值等于控压管内水位高度减去储水桶进气口与供水盘中心高度差的差值。负压可以维持土壤含水量处于一个变化幅度极小的范围内,只要控制适宜的负压,就可以及时补充土壤含水量的减少量,所以一定时段内储水桶内水位变化量就是对应时段植物的灌水量。因此,负水头供水转变了传统灌溉的理念,将根系的“被动灌水”变成“主动吸水”,“浇地”变为“浇根”,有效减少渗漏和蒸

发,从而节约了水资源。

### 1.5 试验设计

根据供水源埋设位置设 3 种处理:①将单个供水盘水平埋放于根系底部(处理 I);②将单个供水盘于根系一侧竖向埋设(处理 II);③将 2 个供水盘分别竖向埋设于根系两侧,每周交替供水(处理 III),两供水盘中间用塑料板作为隔档(图 1),每个处理 5 个重复,每个重复种植 1 株番茄。处理 I, II 和 III 的负水头均设为 -5 kPa。处理 III 在盆栽容器内装土时放置一块厚 0.5 cm 的塑料隔板,塑料隔板通过盆栽容器中心且与双盘平行,并与盆栽容器边壁贴合,不能过水,高度低于土壤表面 2 cm,便于定植植株。试验初期在土壤表面覆有一层透明薄膜。



注:土壤分为上下两层,以植株茎秆为圆心,把土壤分为 4 个象限,第①—④在土壤上层,⑤—⑧在土壤下层;处理 I—III 具体含义见 1.5 试验设计具体内容。下同。

图 1 负水头供水装置及试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of water supplying device with negative pressure and experiment design

### 1.6 测试内容及方法

本试验观测灌水量、植株生长、土壤含水量、水分利用率等参数。每日 8 时观测 1 次水位,根据两次观测的水位下降高度和装置内径,换算出前一天的植株灌水量。试验过程中无渗漏情况,蒸发量不计,采用累积法计算番茄各生育期灌水量和总灌水量。处理开始后,每间隔 7 d 测量株高、茎粗和叶片总数。番茄各处理记录鲜果重量,总产量采用累积法计算。结束试验前,在植株茎旁侧沿土壤纵剖面向下每 5 cm 取土,采用烘干法计算土壤含水量。

试验结束后,将容器内土壤由上向下均分为两层,土壤表面向下 0—10 cm 和 10—20 cm 分别为第

一层和第二层,每层以主根为原点,在水平方向划分 4 个象限。按照先上层后下层顺序和象限分布,将两个分层中包含的土壤部分和根系部分依次编号为①—④和部分⑤—⑧。采用水洗法测取每个象限中的根密度。另外分别测定根冠比、鲜果水分生产率、干物质水分生产率、灌水量。

采用两种方法计算水分利用率,一是用单株产量与单株总需水量的比值表示,  $WUE_y$ ; 二是用单株干物质质量(根+茎+叶)与单株总需水量的比值表示,  $WUE_b$ , 即

$$WUE = \frac{y}{W} \times 100\%, \quad WUE_b = \frac{W_d}{W}$$

式中: $y$  为单株产量,kg/株; $W_d$  为单株干物质量(根+茎+叶,g/株); $W$  为单株总需水量,kg/株。

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 20 整理分析试验数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 供水源埋设位置对株高、茎粗与叶片数的影响

植株株高、茎粗和叶片总数受自身特性和所处土壤水分等环境要素的影响,所以是体现番茄长势的重要指标<sup>[15]</sup>。由图 2 可知,定植后第 8—22 d 之间 3 个

处理的株高、茎粗和叶片数长势基本一致,差异较小( $p < 0.05$ )。随着生育进程延长,定植后 29 d 开始直至摘除生长点后,处理 I 的效果比较明显,与处理 II 和 III 相比,其株高分别增长了 43.6% 和 30.3% ( $p > 0.05$ ),茎粗分别增长了 15.9% 和 17.6% ( $p > 0.05$ ),叶片数分别增长了 13.8% 和 21.0% ( $p < 0.05$ );处理 III 的株高次之,处理 II 的株高最低。但是,处理 II 茎粗和叶片数却比处理 III 的高,也就是处理 III 的茎粗和叶片数最低。可见,供水水源位置对番茄植株生长趋势具有一定影响。

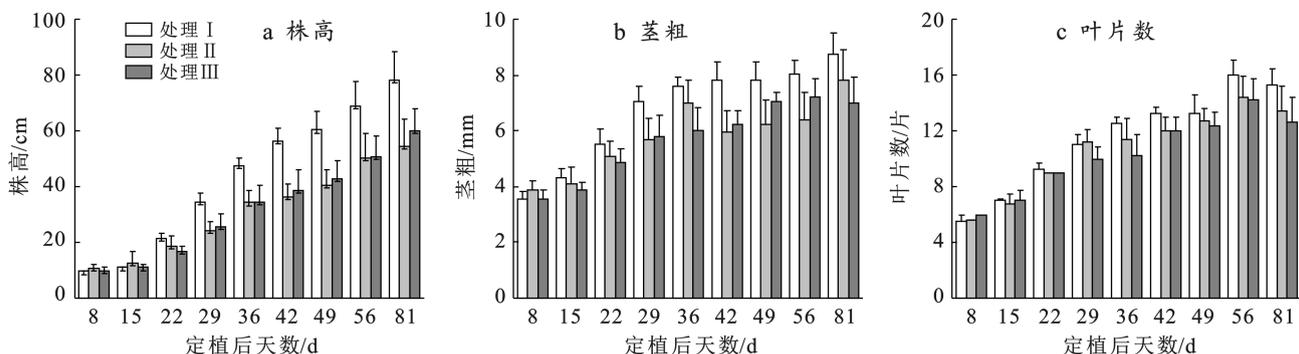


图 2 番茄植株的生长变化

Fig.2 Growth changes of tomato plants

### 2.2 供水源埋设位置对不同象限土壤含水量的影响

由表 1 数据看出,负水头供水源的埋设位置对土壤含水量的空间分布具有重要影响。处理 I 的供水源埋设位置在栽种容器底部水平放置,处于第二层的⑤—⑧象限内,又由于土壤表面有蒸发,所以土壤含水量沿土壤剖面由下向上呈现降低趋势,在水平方向上差异相对较小。处理 II 的供水源埋设位置在栽种容器一侧放置,处于第一层和第二层的②,③,⑥,

⑦内,所以,此区域的土壤含水量高于①,④,⑤,⑧内的土壤含水量,并且沿土壤剖面由下向上呈降低趋势。虽然处理 III 的供水源埋设位置分布于栽种容器两侧,但属于交替供水方式,在第一层和第二层的①,④,⑤,⑧内取样时,由于栽种容器中部沿土壤剖面方向设有挡板,相较于处理 I 和 II 来说,此区域的土壤含水量要明显高于②,③,⑥,⑦内的土壤含水量。

表 1 每层土壤各象限中土壤含水量

Table 1 Soil moisture content in each quadrant of each soil layer

处理	各象限土壤含水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )							
	第一层土壤(0—10 cm)				第二层土壤(10—20 cm)			
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
I	16.84	17.42	18.70	18.75	23.75	23.50	24.13	23.88
II	16.50	16.50	18.50	17.38	21.87	22.45	23.13	22.23
III	21.22	17.14	20.63	22.38	22.50	21.88	21.50	22.38

### 2.3 供水源埋设位置对根重密度分布和根冠比的影响

由表 2 可知,负水头供水源的埋设位置对根重密度的分布同样具有重要影响。处理 I 的供水源处于⑤—⑧内,与处理 II 和 III 同土层相比,其根系密度分布较为均匀。处理 II 的供水源处于②,③,⑥,⑦内,此区域的根系密度是①,④,⑤,⑧内 1.51 倍,进一步证明了根系倾向于水分含量高的区域增殖。处

理 III 第一层的根系密度是处理 I 和 II 同土层的 1.36 倍和 1.43 倍,处理 III 第二层的根系密度是处理 I 和 II 同土层的 1.23 倍和 2.91 倍,这可能是由于土壤两侧交替供水,总有一侧根系处于相对干燥状态,在湿润状态下促进了根系生长,以便较好地维持植株灌水量。

由表 3 数据看出,对于植株地上部干物质质量来

说,处理 I > 处理 II > 处理 III; 但就根系干物质而言,处理 III > 处理 I > 处理 II; 处理 I 的根冠比与处

理 II 情况相同,均 < 处理 III, 由此说明处理 III 交替供水促进了植株干物质重,提高了根冠比。

表 2 每层土壤各象限中根重密度

Table 2 Root weight density in each quadrant of each soil layer

处理	各象限根重密度/(g×10 <sup>-4</sup> cm <sup>3</sup> )							
	第一层土壤(0—10 cm)				第二层土壤(10—20 cm)			
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
I	10.73	9.56	8.52	9.69	6.12	5.2	1.12	2.89
II	10.45	13.95	6.78	5.55	0.95	4.82	0.45	0.27
III	14.89	15.62	11.58	10.26	10.62	3.01	3.12	2.15

表 3 每层土壤各象限中番茄植株干物质分配和根冠比

Table 3 Dry matter distribution and root-shoot ratio of tomato plants in each quadrant of each soil layer

处理	地上部干物质质量(g/株)	根系干物质质量(g/株)	根冠比
I	60.70±25.43	5.22±1.02	0.09±0.01
II	55.75±27.42	4.87±1.45	0.09±0.01
III	54.26±22.60	6.74±1.34	0.12±0.01

#### 2.4 供水源埋设位置对灌水量、产量和水分利用率的影响

由图 3 可知,随着生育进程的增长,番茄苗期、开花坐果期和盛果期的单株灌水量呈增长趋势,植株由营养生长向生殖生长转变,对水肥的需求增加,所以番茄植株需水强度增大是符合自然生长规律的。苗期,处理 I、II 和 III 的单株番茄灌水量较小,差异也相对较小;开花坐果期和盛果期单株灌水量明显逐渐增加,单株番茄灌水量排序为: I > II > III, 盛果期是灌水量最大的时期,与处理 I 和 II 相比,处理 III 的单株番茄灌水量可节水 22.4% 和 11.5%。

由表 4 可知,处理 II 的单株产量最高,与处理 I、III 相比,处理 II 的单株产量分别增产 14.3% 和 0.5%。

表 4 不同处理对番茄单株产量、植株干物质质量、总灌水量和水分利用率的影响

Table 4 Effects of different treatments on per plant yield, dry matter, total irrigation amount and water use efficiency of tomato

处理	产量(kg/株)	植株干物质质量(g/株)	总灌水量(kg/株)	WUE <sub>y</sub> /%	WUE <sub>b</sub>
I	1.68±0.15	65.92±27.63	38.62±4.21	43.50±3.74	1.71±0.18
II	1.92±0.12	60.56±29.54	35.23±3.95	54.50±4.71	1.72±0.25
III	1.82±0.14	61.00±23.76	29.10±3.87	62.54±5.34	2.10±0.21

由于试验结束相对较早,第 4 穗果的果实发育不足,对产量具有一定影响。在本试验中,为了能精准测量到番茄的耗水量,在土壤表面覆膜,由于前期大棚白天晚上温度差较小,处理 I 的供水盘平放可满足水分需求,植株生长较好,在后期早午温差较大,土壤表面的膜内蒸发水量较大,膜内集聚的水分很多,水

处理 I 的植株干物质质量与处理 II、III 相比,分别提高 0.9% 和 0.8%。虽然处理 III 的产量和植株干物质质量不是最高,但是单株总灌水量是最低,水分利用率 WUE<sub>y</sub> 和 WUE<sub>b</sub> 均为最高。与处理 I 和 II 相比,处理 III 分别节水 24.7% 和 17.4%,水分利用率 WUE<sub>y</sub> 分别提高 43.8% 和 14.8%,水分利用率 WUE<sub>b</sub> 是其 1.23 倍和 1.22 倍。说明供水源交替给根系供水,总体来说可在不降低产量的条件下,有效降低灌水量,明显提高水分利用率。

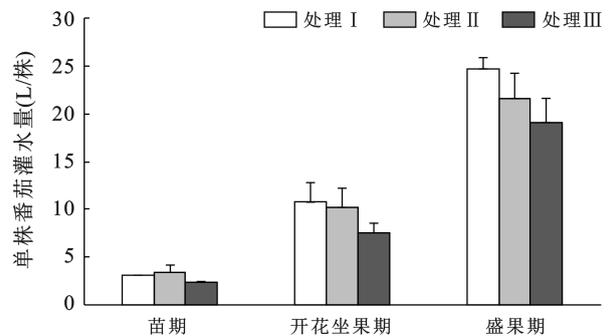


图 3 苗期、开花坐果期和盛果期的单株番茄灌水量  
Fig.3 Irrigation amount of per tomato plant in seeding, blooming-setting and full productive stages

分又进入土壤,致使土壤水分较高,进而影响果实的生长。为了缓解此种情况,揭膜后,处理 II 供水盘竖放促进了植株和果实增长。同时,但也不排除供水盘对土壤水分湿润度的影响问题。所以本试验还要进一步研究土壤水分再分布、大棚温度和供水盘的出水速率等方面对番茄生长的影响。

### 3 结论

(1) 负水头灌溉水源供水位置对番茄生长有显著影响,但不同埋设位置对番茄生长的影响参数是不同的,有的对长势影响大,有的对产量影响大,有的则对水分利用率影响大,即影响对象具有不一致性。在试验组次内,与处理Ⅱ、Ⅲ相比,处理Ⅰ可使提高番茄植株生长趋势,增加地上部植株干物质量,在三维空间内相对均匀地控制土壤含水量分布;而处理Ⅱ较处理Ⅰ可提高单株产量,增加14.3%,处理Ⅲ的增产却不明显。

(2) 负水头灌溉水源供水位置对水分利用效率也有显著影响。与处理Ⅰ、Ⅱ相比,处理Ⅲ的根冠比均提高了33.3%,单株番茄总灌水量可降低24.7%和17.4%,水分利用率  $WUE_y$  分别提高43.8%和14.8%,水分利用率  $WUE_b$  是其1.23倍和1.22倍。

(3) 综合评价,在本项研究的试验组次内,处理Ⅲ可在不降低产量的条件下,能有效降低灌水量,提高水分利用率,是最优处理。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张芳,薛绪掌,张建丰,等.负水头供水盘埋设方式对番茄生长和水分利用率的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):239-244.
- [2] 邹朝望.负水头灌溉技术基础研究[D].湖北:武汉大学,2007.
- [3] 耿伟,万克江,薛绪掌,等.负压供水下菠菜某些生理指标的变化[J].农业系统科学与综合研究,2006,22(4):248-251.
- [4] 耿伟,王春艳,薛绪掌,等.负压供水下盆栽大豆叶片的光合生理研究[J].节水灌溉,2007(1):5-8.
- [5] 李邵,薛绪掌,郭文善,等.不同供水吸力对温室黄瓜光合特性及根系活力的影响[J].应用生态学报,2010,21(1):67-73.
- [6] 李邵,薛绪掌,郭文善,等.供水吸力对温室黄瓜产量与水分利用率的影响[J].中国农业科学,2010,43(2):337-345.

- [7] 李霞,解迎革,薛绪掌,等.不同基质含水量下盆栽番茄蒸腾量、鲜物质积累量及果实产量的差异[J].园艺学报,2010,37(5):805-810.
- [8] 姜红娜,李银坤,陈菲,等.负水头灌溉施肥对日光温室番茄生长及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2015(6):65-69.
- [9] 李银坤,徐凡,薛绪掌,等.负水头供液施肥对温室番茄水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2016(12):42-45.
- [10] Ogbaji P O, Shahrajabian M H, Xue Xuzhang. Changes in germination and primarily growth of three cultivars of tomato under diatomite and soil materials in auto-irrigation system [J]. International Journal of Biology, 2013,5(3):80.
- [11] 毛思帅,李豫宁,胡跃高,等.负水头供给营养液对不同番茄品种生长特性的影响[J].北方园艺,2012(10):28-32.
- [12] 赵秀娟,宋燕燕,岳现录,等.负压灌溉下不同钾水平对小油菜生长的影响[J].中国农业科学,2017,50(4):689-697.
- [13] Steudle E. Water uptake by roots: Effects of water deficit [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(350):1531-1542.
- [14] Liang Jiansheng, Zhang Jianhua, Wong M H. How do roots control xylem sap ABA concentration in response to soil drying? [J]. Plant and Cell Physiology, 1997,38(1):10-16.
- [15] 张强,徐飞,王荣富,等.控制性分根交替灌溉下氮形态对番茄生长、果实产量及品质的影响[J].应用生态学报,2014,25(12):3547-3555.
- [16] 蒲敬轩,樊雅琼,冯许钰,等.分根区交替灌溉对土壤水分养分条件及作物生长的影响[J].中国土壤与肥料,2022(9):209-215.
- [17] 杨依凡,涂攀峰,邓兰生,等.滴灌下根区交替灌溉在葡萄上的应用研究进展[J].安徽农学通报,2020,26(20):52-54.
- [18] 薛绪掌,许高平,王璞,等.一种改进的负水头供水盆栽装置:CN201320291701.6[P].2013-10-16.

(上接第79页)

- [37] 许波,张忠良,王永东,等.高矿化度水灌溉条件下土壤盐结皮层与下层土壤盐分特征差异初探[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):116-120.
- [38] 刘易,冯耀祖,黄建,等.微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):146-152.
- [39] 郭全恩.土壤盐分离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.

- [40] 李珊,杨越超,姚媛媛,等.不同土地利用方式对山东滨海盐碱土壤理化性质的影响[J].土壤学报,2022,59(4):1012-1024.
- [41] 顾梦鹤,李明红,刘调平,等.民勤青土湖区不同土地利用类型土壤盐渍化特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(1):117-121.
- [42] 亢晨波,郭汉清,张焱,等.复垦区不同土地利用类型土壤水分持蓄特征分析[J].山西农业科学,2022,50(5):653-659.