

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.024

# 基于负水头供液决策的温室作物自动灌溉施肥方法\*

张芳<sup>1,2</sup> 薛绪掌<sup>2</sup> 张建丰<sup>1</sup> 郭文忠<sup>2</sup> 王利春<sup>2</sup> 陈菲<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 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:** 针对温室作物基质栽培过程中营养液供给不易精量控制、水肥利用率低等问题, 设计了基于负水头供液的决策方法和系统, 采用温室基质栽培番茄负水头耗液量作为精量决策指标, 通过自动化滴灌系统对同期内番茄常规基质栽培行进行3~4 h的错时灌溉, 以定时定量供液方法的番茄栽培行为对照, 研究了系统的运行状况、番茄产量和水肥利用率等问题。结果表明, 基于负水头供液决策的自动灌溉系统比定时定量供液系统的单株产量提高了6.70%, 水、肥量均节省28.13%。通过试验得出该系统运行良好, 可根据番茄日需水规律适量、及时、精准地供给营养液。

**关键词:** 负水头灌溉系统 基质栽培 决策系统 番茄

**中图分类号:** S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0148-07

## 引言

目前, 无土栽培已广泛用于各种果蔬和花卉的种植, 商业化无土栽培以基质栽培为主。基质栽培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<sup>[1]</sup>, 具有良好的发展前景。

国内外温室基质栽培供给营养液主要采用3种方式: 采用定时器按照固定的时间间隔向基质内供给既定量的营养液<sup>[2-4]</sup>, 这种决策供液方式没有考虑到作物在每天不同时段、不同生育期内对营养液的不同需求量变化, 因此会导致苗期及每天早、晚时段供液量过多, 坐果期和午间营养液消耗高峰期供液量不足<sup>[5]</sup>; 当累积辐射达到一定值时开始供给营养液<sup>[4,6-8]</sup>, 这种决策供液方式考虑了作物耗液需求的日动态变化, 但随着作物生长, 对于耗液强度的增加则需要依靠经验确定供液量<sup>[4,6,9]</sup>; 根据彭曼公式决策供给营养液, 这种方式需要参数较多, 且多根据经验选取, 缺乏理论依据。

基于上述各种决策方式的不足, 本文提出一种兼顾作物生育期和外界环境条件对作物耗液量影响的自动决策控制供液量和供液时间的方法及系统, 即负水头灌溉系统<sup>[10]</sup>结合自动化控制滴灌系统进行决策供液, 实现基质栽培中及时、精准决策供给营养液并高效管理营养液的目标。

## 1 基于负水头自动决策供液的温室作物灌溉施肥系统原理

### 1.1 系统决策方案设计

在不同生育期和不同温度、湿度、光照和风速等外界环境条件下, 负水头灌溉系统均可根据作物生长过程中自身对水分的需求, 利用负水头控制状态下的供水压力对作物进行供液, 从而精确且持续控制基质含水量为恒定<sup>[10]</sup>。

基于负水头自动决策供液系统的决策方法是, 在基质栽培环境下, 以营养液作为养分供给作物生长, 将每天划分成若干时段, 控制系统对安装负水头灌溉系统的单行栽培行(即决策行, 下文简称决策行)作物在第1时段内耗液量(即供液量 $W_t$ )进行采集, 之后将此耗液量乘以系数后的液量作为下一时段常规基质栽培行(下文简称被决策行)作物的供液量 $W_{t+1}$ , 如此循环决策控制供液量。

由于作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, 需要通过加大供液量的方法对富集的盐分离子进行淋洗, 所以需要在决策行一个时段耗液量的基础上乘以一个系数来加大被决策行的供液量, 实现对基质淋洗的目的。 $W_t$ 和 $W_{t+1}$ 关系为

收稿日期: 2014-07-31 修回日期: 2014-08-25

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAF07B02)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101903-1)和北京市自然科学基金资助项目(6142008)

作者简介: 张芳, 博士生, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: zf200612915@126.com

通讯作者: 张建丰, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤水分运动与灌区自动化研究, E-mail: jfzhang@mail.xaut.edu.cn

$$\begin{cases} W_2 = W_1(1 + \alpha)n \\ W_3 = W_2(1 + \alpha)n \\ \vdots \\ W_{t+1} = W_t(1 + \alpha)n \end{cases} \quad (1)$$

式中  $W_1$ ——决策行在第 1 时段内的耗液量, L  
 $W_2$ ——被决策行在第 2 时段内的供液量, L  
 $t$ ——24 h 内划分的任意时段  
 $\alpha$ ——淋洗系数, 为了保证在每次供液时均有排出液排出而设定  
 $n$ ——被决策行行数

对决策行供给营养液是由负水头灌溉系统供给的, 由于负水头灌溉系统本身特性, 所设定的吸力可以维持恒定的基质含水量<sup>[10]</sup>, 所以负水头灌溉系统不能供给多余的液量对决策行基质进行淋洗。为了避免决策行基质内盐分累积, 并使决策行和被决策行供液量一致, 需要通过一根滴灌管对决策行基质供给适宜液量进行淋洗, 淋洗量为  $\alpha W_1$ 。

## 1.2 决策指标的确定

由式(1)可知, 该决策系统对被决策行作物供给营养液时需要确定的决策指标主要是  $\alpha$  值和供液时段。

### 1.2.1 $\alpha$ 值

为了能够实现一天内进行多次供液并有 15% ~ 30% 的液体排出<sup>[4, 11-12]</sup>,  $\alpha$  值选择为 0.3。

### 1.2.2 供液时段

文献[10]中负水头灌溉系统在独立运行时, 浮球装置持续供液以维持其内部液面高度恒定, 从而

使吸力固定不变维持基质内含水量恒定。将此系统应用于决策供液系统中, 遇到的问题是对浮球装置内持续补给营养液时, 每个瞬时的补给量极少, 不易被精确采集到; 如果不及时补给营养液会使所设定的吸力增大, 基质含水量降低。所以为了能采集到补给液量, 需要划分适宜的时段补给液量, 使所设定吸力有微小变化后引起基质含水量变化较小, 从而不影响供液效果。以相邻两次浮球装置补给营养液的时段为决策供液的时段。供液时段通过试验获取。

## 2 系统实现

### 2.1 工作原理

图 1 为基于负水头自动决策供液的温室作物灌溉施肥系统工作原理图, 图 2 为系统结构图。根据负水头灌溉系统运行原理, 第  $t$  时段储液容器 b 内减少液量  $W_t$ 。第  $t+1$  时段起始时刻由控制器的处理器发送指令控制执行机构 1, 令储液容器 a 内的液体补给储液容器 b 至所设的液面高度, 补给液量为  $W_t$ , 为作物在  $t$  时段的耗液量, 同时由第 1 流量计采集并记录补给的液量。之后, 处理器发送指令控制执行机构 2, 将储液容器 a 内的营养液通过第 1 滴灌管向决策行供给淋洗液量  $\alpha W_t$ , 此液量由第 1 流量计采集并记录; 与此同时, 由处理器发送指令控制决策执行机构 3, 按照式(1)计算的供液量  $W_{t+1}$ , 将储液容器 a 内的营养液通过滴灌管向被决策行供液, 此液量由第 2 流量计采集并记录。

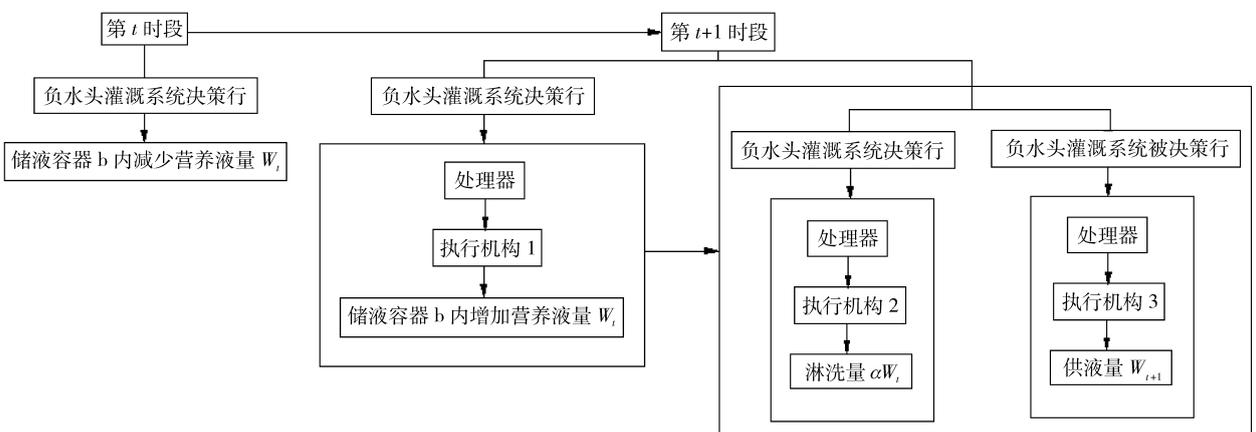


图 1 基于负水头自动决策供液系统工作原理图

Fig. 1 Schematic of automatic decision system for irrigation nutrient solution based on negative pressure

## 2.2 自动化决策供液系统组成

系统主要包括负水头供液决策栽培系统、被决策栽培系统、控制器及上位机, 如图 2 所示。

### 2.2.1 负水头供液决策栽培系统

此系统包括储液容器 a、执行机构 1、执行机构 2、过滤器 1、压力表 1、流量计 1、流量计显示仪 1 和

负水头灌溉系统。其中, 执行机构 1 包括潜水泵 1、控水阀; 执行机构 2 包括潜水泵 1、电磁阀 1 和滴灌管 1; 负水头灌溉系统包括储液容器 b、控压管、集气瓶、供液主管道和 多孔陶瓷盘。

### 2.2.2 被决策栽培系统

此系统包括储液容器 a、执行机构 3、过滤器 2、

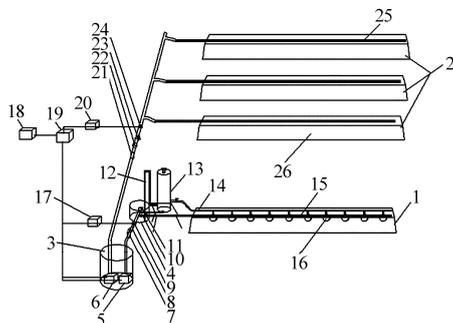


图2 基于负水头自动决策供液系统结构图

Fig.2 Structure of automatic decision system for irrigation nutrient solution based on negative pressure

1. 负水头灌溉系统决策行 2. 负水头灌溉系统被决策行 3. 储液容器 a 4. 储液容器 b 5. 潜水泵 1 6. 潜水泵 2 7. 过滤器 1 8. 压力表 1 9. 流量计 1 10. 电磁阀 1 11. 控水阀 12. 控压管 13. 集气瓶 14. 供液主管道 15. 滴灌管 1 16. 多孔陶瓷盘 17. 流量计显示仪 1 18. 上位机 19. 控制器 20. 流量计显示仪 2 21. 过滤器 2 22. 电磁阀 2 23. 压力表 2 24. 流量计 2 25. 滴灌管 26. 基质栽培袋

压力表 2、流量计 2 和流量计显示仪 2。其中执行机构 3 包括潜水泵 2、电磁阀 2 和数支并联的滴灌管。

### 2.2.3 控制器

控制系统的硬件结构由 AVR/mega128 处理器、AD 扩展模块、电源模块、串口通信模块、实时时钟模块以及外围传感器接口模块构成。系统软件的开发环境是 WinAVR, 软件以 UC/DS-II 实时操作系统为基础, 通过管理监测供液任务、上位机通信任务等实现系统的各个功能, 通过 AVR Studio 连接 JTAG 仿真器将程序下载至控制器中。

### 2.2.4 上位机

上位机软件使用 C++ 进行编写, 用于与控制器进行通讯, 实现数据采集和参数设置的功能, 具体功能包括: 采集控制器一段时间内的流量数据并保存至本地, 设置控制器采集数据的时间间隔, 校准控制器的系统时间等。

## 3 试验

### 3.1 试验方案设计

2013 年 8 月 10 日—12 月 7 日, 于北京市小汤山国家精准农业研究基地日光温室内进行试验。温室长 28 m, 跨度 8 m, 脊高 3.8 m, 实际种植面积为长 24 m、宽 6.5 m, 地面南北方向铺设栽培行。行距 80 cm, 每行均栽种 10 株番茄, 株距 50 cm。番茄试验品种为佳粉 18。基质配方为硅藻土、草炭和蛭石, 其体积比为 2:2:1, 基质容重为  $0.3 \text{ g/cm}^3$ , 总孔隙度为 80.5%, pH 值为 5.62, 电导率为  $0.98 \text{ dS/m}$ , 基质持水量为  $0.62 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。营养液采用日本山崎番茄配方配制, 番茄苗期、开花期和结果期分别供给

电导率为 1.5、2.0、2.8  $\text{dS/m}$  和 pH 值分别为 5.81、5.63、5.52 的营养液。流量计量程为  $5.05 \times 10^{-2} \sim 8.23 \times 10^{-1} \text{ L/min}$ , 测量精度为  $\pm 5\%$ 。

为了和目前较为普遍使用的定时定量供液法进行比较, 将负水头供液决策栽培方式和定时定量供液栽培方式同时在温室内进行对比试验。设置负水头灌溉系统决策行为 1 条栽培行, 被决策行和定时定量供液栽培行均为 3 条栽培行。采用反光膜包裹的基质袋进行栽种, 每行基质袋长 5 m, 上底宽 15 cm, 下底宽 30 cm, 高 15 cm, 横剖面呈等腰梯形, 决策行基质内每间距 50 cm 埋放一个多孔陶瓷盘, 并且决策行、被决策行和定时定量供液栽培行的基质表面均放置一根滴头间距为 50 cm 的压力补偿式滴灌管, 且滴灌管上每个滴孔和决策行每个多孔陶瓷盘均对应一株番茄的根系部位。基质袋底部边侧每间隔 50 cm 打孔, 便于基质袋内的多余营养液排出。负水头灌溉系统的控制吸力设为  $0.5 \text{ kPa}$ , 对应的基质含水量为  $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。定时定量供液栽培行的系统安装组成与负水头灌溉系统被决策行一致, 如图 1 所示, 但不同的是供液方式采用定时器控制供液时间和供液量。

8 月 10 日—9 月 18 日, 负水头决策供液方式和定时定量供液方式的栽培行每天管理方法和供液量相同, 即在苗期和开花期分别为  $0.25 \text{ L}/(\text{株} \cdot \text{d})$  和  $0.5 \text{ L}/(\text{株} \cdot \text{d})$ 。9 月 19 日—10 月 3 日对负水头灌溉系统决策行进行不同吸力对植株耗液量影响的试验, 定时定量供液栽培行供液量仍为  $0.5 \text{ L}/(\text{株} \cdot \text{d})$ 。10 月 4 日—12 月 7 日为番茄结果期, 两种决策方式开始分别进行处理, 定时定量供液方式采用供液量为  $0.75 \text{ L}/(\text{株} \cdot \text{d})$ , 每天 7:00—18:00 定时供液, 供液时间间隔 1 h。

此试验是番茄秋冬茬, 根据植株前期的蒸散量, 负水头自动决策供液方式将每天 24 h 分为 4 个时段进行供液, 即当日 18:00—次日 7:00、7:00—11:00、11:00—14:00 和 14:00—18:00。每个时段的开始时刻通过决策行的执行机构 1 向储液容器 b 内补给液量  $W_i$ , 时间设定为 10 min (10 min 内即可注满储液容器 b 设定的液面高度); 10 min 后通过执行机构 2 对决策行进行基质淋洗, 淋洗液量为决策行前 10 min 内流过第 1 流量计液量  $W_i$  的 0.3 倍; 开启执行机构 2 的同时, 通过执行机构 3 向被决策行供液, 供液量  $W_{i+1}$  按照式(1)计算,  $\alpha$  取 0.3,  $n$  取 3。

在每个时段结束时, 收集负水头灌溉系统被决策行栽培行和定时定量供液栽培行排出的液体, 测定电导率和 pH 值。

### 3.2 吸力和供液时段的确定

本系统针对储液容器 b 内液面高度下降引起吸力变化, 从而影响基质含水量的问题以及是否有适宜排出液量的问题做了以下试验, 从而确定吸力和解决如何划分时段进行供液的问题。

根据李邵<sup>[13]</sup>提出的 5~7 kPa 供水吸力处理下黄瓜果实整体品质较高的观点, 在本试验中将负水头灌溉系统决策行吸力依次设为 5、3、2、1、0.5 kPa,  $\alpha$  值取 0.3, 每 3 d 为一个吸力处理的试验期。9 月 19 日—10 月 3 日期间 10 株番茄的日平均耗液量见表 1。由于固定吸力条件下, 基质含水量会保持于恒定含水量, 试验过程中, 吸力为 5 kPa 时基质含水量为  $0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 日平均耗液量为 2 L/d, 采用的储液容器 b 直径为 50 cm, 此日平均耗液量换算成储液容器 b 内液面高度为 1.02 cm。按照每天 4 个时段进行供液, 即当日 18:00—次日 7:00、7:00—11:00、11:00—14:00 和 14:00—18:00, 每次向储液容器 b 内供给的液量很少, 淋洗量相应也少, 且基质含水量相对较低, 不足以饱和基质, 不能满足基质有排出液的要求, 番茄植株在午间稍有萎蔫现象, 且基质内营养元素供给不足, 新叶颜色稍黄。随着吸力的降低, 基质含水量提高, 日平均耗液量增加。当吸力为 0.5 kPa 时基质含水量为  $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 此值接近基质持水量  $0.62 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 日平均耗液量相对其他吸力处理下的耗液量为最多, 此时午间番茄植株不再出现萎蔫现象, 新叶颜色呈绿色, 植株生长状态正常, 且日平均排出液量为日平均供液量的 28.35%。

表 1 不同吸力处理番茄日平均耗液量

Tab.1 Average daily consumption volume of tomato under different suction conditions

吸力/kPa	日平均耗液量/(L·d <sup>-1</sup> )
5	2.0
3	2.2
2	4.8
1	6.4
0.5	7.5

由试验得出, 吸力为 0.5 kPa 时, 基质含水量为  $0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (接近基质持水量), 储液容器 b 内液面下降 1.02 cm 时, 基质含水量下降  $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 也就是说, 当吸力为 0.5 kPa 时, 储液容器 b 内液面下降 1 cm, 对基质含水量的影响不大, 所以可根据储液容器 b 内液面下降高度小于 (等于) 1 cm 所需的时间进行划分供液时段。  $\alpha$  值选择为 0.3, 日平均排出液量为日平均供液量的 28.35%, 符合试验要求。

### 3.3 试验效果

由于负水头控制系统在番茄苗期未能正常运行, 所以试验前期负水头自动决策供液方式和定时定量供液方式的栽培行供液管理模式相同, 9 月 19 日负水头灌溉系统可正常运行, 10 月 4 日番茄结果期两种决策方式开始分别进行处理, 所以采用结果期的数据进行比较。

#### 3.3.1 负水头灌溉系统吸力控制效果

番茄结果期时, 负水头灌溉系统决策行每天每个时段的耗液量最大值为 2.146 L, 即储液容器 b 内水位下降高度最大为 1.09 cm。当控压管内吸力增加 1.09 cm 后基质含水量下降  $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 负水头灌溉系统的吸力变化对基质含水量影响不大, 所以划分的供液时段适合此试验运行。

#### 3.3.2 节水效果

2013 年 10 月 4 日—12 月 7 日负水头灌溉系统决策行、被决策行和定时定量供液栽培行的总供液量分别为 380.55 L、1076.02 L 和 1497.25 L。试验数据表明, 负水头决策方式的被决策行供液量比定时定量供液栽培行供液量节水率高 28.13%。

图 3 所示为 11 月 20—29 日负水头灌溉系统决策行、被决策行和定时定量供液行单株番茄每时段供液量的过程, 可看出番茄在结果期时, 负水头灌溉系统可以根据番茄植株在一天中所处时段所需液量进行决策供液, 决策行和被决策行每天单株供液量变化呈抛物线型, 显示出番茄早晚耗液量少, 14:00—16:00 耗液量大; 而定时定量供液行供液量趋势为

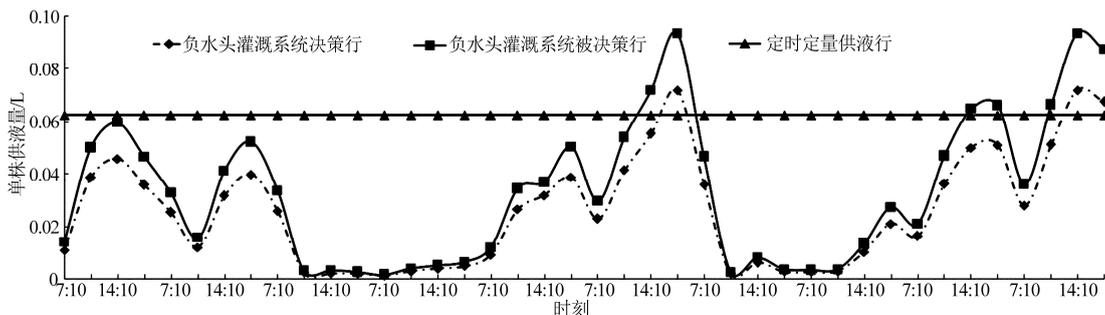


图 3 11 月 20—29 日单株番茄每时段供液量变化曲线

Fig. 3 Changing curves of irrigation volume one plant per time interval on Nov. 20-29

直线型,如11月25日、28日和29日,番茄植株在早晚供液量大,造成早晚水肥浪费,午间供液不足,使植株受到水分胁迫,并且22日、23日、26日和27日的供液量远远大于其所需的液量,水肥浪费严重。

### 3.3.3 节肥效果

表2为2013年10月4日—12月7日负水头灌溉系统被决策行和定时定量供液行的总用肥量,因为肥料溶于水,随水同时输入基质中,所以用水量与用肥量密切相关。试验数据表明,采用负水头灌溉系统被决策行供液量比定时定量供液行供液量节肥率高28.13%。

表2 负水头灌溉系统被决策行和定时定量供液行肥料用量(10月4日—12月7日)

Tab.2 Amount of fertilizers for two supply-ways on Oct.4 - Dec.7

肥料	液体中化合物质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	负水头灌溉系统被决策行施肥量/g	定时定量供液行施肥量/g
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	354.00	380.91	530.03
$\text{KNO}_3$	404.00	434.71	604.89
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	77.00	82.85	115.29
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246.00	264.70	368.32
$\text{EDTA}-2\text{NaFe}$	30.00	32.28	44.92
$\text{H}_3\text{BO}_3$	2.86	3.08	4.28
$\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$	1.61	1.73	2.41
$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22	0.24	0.33
$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.08	0.09	0.12
$(\text{NH}_4)_2\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.02	0.02	0.03

### 3.3.4 产量结果

11月14日第1次采摘,截止到12月7日,将负水头灌溉系统决策行、被决策行和定时定量供液行每次采摘的产量分别累计后计算单株平均产量,分别为2.30、2.23、2.09 kg,负水头灌溉系统被决策行单株产量与定时定量供液行单株产量相比,增产6.70%。

### 3.3.5 对基质排出液的影响

图4为11月27—29日负水头灌溉系统被决策行和定时定量供液行排出液的电导率和pH值变化趋势。国内外主要根据营养液的电导率和pH值对营养液进行调控管理<sup>[7-8,14-17]</sup>,很多研究人员利用提高供液量进行监测基质排出液的电导率和pH值,从而调控管理营养液,并认为坐果期和采收期的电导率为2.5~3.5 dS/m,排出液pH值为5.0~6.0为宜。Lizarraga等<sup>[4]</sup>认为排出液电导率与原液电导率的差值小于1 dS/m为宜。本试验中,负水头灌溉系统被决策行和定时定量供液行排出液电导率最高值分别为3.75 dS/m和3.59 dS/m,高于结果期原液的电导率(2.8 dS/m),由此可见,两种决策供液方式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。两种决策供液方式的排出液pH值均在适宜范围内,且相差很小。负水头控制吸力为0.5 kPa,淋洗量的系数 $\alpha$ 为0.3时,可使电导率和pH值处于正常范围,并趋近原液电导率和pH值,每个时段内排出液量占各自时段内总供液量的25%~45%。

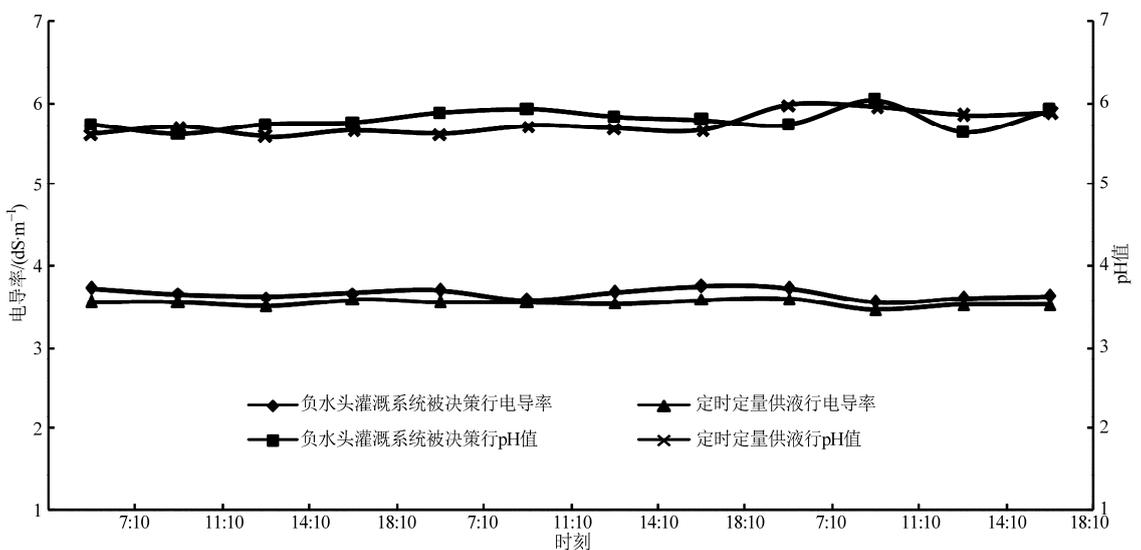


图4 11月27—29日负水头灌溉系统被决策行和定时定量供液行排出液电导率和pH值变化曲线

Fig.4 Changing curves of EC and pH value in drainage solution of two supply-ways on Nov.27 - 29

## 4 结论

(1)提出了基于负水头自动决策供液的温室作

物灌溉施肥系统,将负水头灌溉系统应用到温室基质栽培决策供给营养液系统中,与自动化滴灌控制系统相结合。系统针对吸力、淋洗系数 $\alpha$ 值、供液

时段等决策指标给出了确定方法。为了能够实现一天内进行多次供液且有 25% ~ 30% 的液体排出的目标,选择接近基质持水量的含水量所对应的吸力 0.5 kPa,  $\alpha$  值选择为 0.3,使基质有适宜液量排出,令基质内水分和养分处于平衡状态。根据储液容器 b 内液面下降高度小于(等于)1 cm 所需的时间将一天 24 h 划分成若干供液时段。

(2) 试验表明,负水头灌溉系统被决策行单株产量比定时定量供液行单株产量提高了 6.70%,水、肥量均节省 28.13%。系统经过试验,运行良

好,稳定可靠。

(3) 采用负水头自动决策供液的方法和系统,可根据番茄日需水规律,适量、精确、持续和稳定地自动决策供液,实现了一天供液多次、适宜淋洗量对基质淋洗的目标,使基质内水分和养分处于平衡状态,电导率和 pH 值处于正常范围,解决了由于植物生长造成基质内营养液性质变化的问题;根据植物实时所需的液量精确控制供液量,提高营养液利用效率和作物生产力的潜力。

#### 参 考 文 献

- 1 夏树让. 国内外无土栽培的应用及发展方向[J]. 农产品加工: 创新版, 2009(3): 35 - 37.
- 2 寿伟松, 雷娟利, 董文其, 等. 施肥量对基质培黄瓜生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 311 - 314.  
Shou Weisong, Lei Juanli, Dong Wenqi. The effect of fertilizer quantity on the growth and development of cucumber in the eco-organic soilless culture system[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(8): 311 - 314. (in Chinese)
- 3 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 drop irrigation[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2013, 17(5): 33 - 36. (in Chinese)
- 4 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.
- 5 Roh M Y, Lee Y B. Control of amount and frequency of irrigation according to integrated solar radiation in cucumber substrate culture [J]. Acta Horticulturae, 1996, 440: 332 - 337.
- 6 de G R. Automation of the water supply of glasshouse crops by means of calculating the transpiration and measuring the amount of drainage water [J]. Acta Horticulturae, 1988, 229: 219 - 231.
- 7 Abou-Hadid A F, El-Shinawy M Z, El-Oksh, et al. Studies on water consumption of sweet pepper under plastic houses [J]. Acta Horticulturae, 1994, 366: 365 - 371.
- 8 Harsharn S G, Maheshwari B, Parks S E. Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: an Australian case study [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(5): 841 - 846.
- 9 Hamer P J C. Simulating the irrigation requirements of a greenhouse crop [J]. Acta Horticulturae, 1997, 443: 147 - 154.
- 10 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 负水头灌溉对温室番茄生长、产量及其品质的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 225 - 229.  
Li Shao, Xue Xuzhang, Guo Wenshan, et al. Effects of negative pressure irrigation on the growth, yield and quality of tomato in greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp. 2): 225 - 229. (in Chinese)
- 11 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): 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(Supp.): 57 - 64. (in Chinese)
- 12 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.
- 13 李邵. 水肥耦合对温室黄瓜产量与品质形成的影响及其生理机制[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.  
Li Shao. Effects of water and fertilizer coupling on yield and quality formation of greenhouse cucumber and their physiological mechanism[D]. Yangzhou: University of Yangzhou, 2010. (in Chinese)
- 14 毛罕平, 谢明岗, 王多辉. 无土栽培营养液循环灌溉系统[J]. 排灌机械, 1997(2): 49 - 52.  
Mao Hanping, Xie Minggang, Wang Duohui. The soilless cultivation of nutrient recycling irrigation system[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1997(2): 49 - 52. (in Chinese)
- 15 王永, 司炜, 孙德敏, 等. 温室营养液循环检测系统中离子选择电极的数学建模与测量[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 230 - 233.  
Wang Yong, Si Wei, Sun Demin, et al. Modeling and measurement of ion-selective electrode of nutrient Solution measuring system in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 230 - 233. (in Chinese)
- 16 Incrocci L, Malorgio F, Bartola, et al. The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closed-loop substrate culture with saline water[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 107(4): 365 - 372.
- 17 李式军, 郭世荣. 设施园艺学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

## Automatic Irrigation Method for Greenhouse Crops Based on Negative Pressure Decision-making

Zhang Fang<sup>1,2</sup> Xue Xuzhang<sup>2</sup> Zhang Jianfeng<sup>1</sup> Guo Wenzhong<sup>2</sup> Wang Lichun<sup>2</sup> Chen Fei<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

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

**Abstract:** At present, substrate cultivation has been widely used for planting a variety of fruits, vegetables and flowers. Since the invention of nutrient solution used in substrate culture techniques, the decision-making irrigation methods mainly adopted three ways in greenhouse, i. e. irrigation scheduling respective by time clock and radiation, and a way based on Penmen equation. But there were some defects above the three ways, the first two ways were not considered the demand for water of crops in different time in a day and growth period, leading to the supply more or less, and there were too many parameters to be determined in the last way. The negative pressure irrigation system could supply water for the plants timely and accurately according to the consumption by the plants themselves at any time of a day and the influence of different external environment, which only involved a parameter—consumption, and was easy to operate. An automatic decision-making method and system of irrigating nutrient solution in substrate culture in greenhouse based on negative pressure, which allowed us to decide the supply amount for most crops based on a small amount of crops consumption. This automated decision-making system ensured the plant roots in the balanced condition of water and nutrient (EC and pH value), which achieved a more efficient nutrient solution management in the substrate culture. This automated decision-making system adopted the consumed amount of nutrient solution in a line of plants in a certain time, in which line the negative pressure irrigation system was installed. The value obtained from consumed amount of plants of a line multiplying by a leaching-coefficient was used as supply volume for the other plants in substrate culture by drip irrigation system in the next time. The coefficient is related to the amount of drained nutrient solution. Commonly, 25% ~ 30% of the applied nutrient solution should be drained, which could prevent salt accumulation in the substrate. Moreover, the time and frequency for supply in other lines in one day was determined by the consumed amount of nutrient solution in a line. The consumed amount in a line was measured by flow sensor which was connected with the singlechip in a fixed time, then an order was given by the singlechip to control the work of the magnetic valve and collect the values from flow sensors in the other lines. At the same time, tomato plants in the substrate culture lines were irrigated nutrient solution by time clock as control test. Experimental results showed that the yield per plant of tomatoes that the automatic decision-making system based on negative pressure increased by 6.70% compared with the irrigation scheduling by time clock, while the consumption of nutrient solution decreased by 28.13%. It proved that the automatic decision-making system ran well and was able to supply the tomato plants nutrient solution timely and accurately according to the water requirement regularity of tomato plants per day.

**Key words:** Negative pressure irrigation device Substrate culture Decision-making system Tomato