

# 基于马利奥特装置的无土栽培营养液管理控制系统研究

赵燕东<sup>1,2</sup> 高宇<sup>1,2</sup> 施伟<sup>3</sup> 张馨<sup>3</sup> 郑文刚<sup>3</sup> 薛绪掌<sup>3</sup>

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 林草生态碳中和智慧感知研究院, 北京 100083;  
3. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 营养液配置及灌溉控制技术已成为无土栽培中的关键技术,然而目前营养液管理控制中存在配置流程繁琐、营养液配比不精准及灌溉策略单一等问题,阻碍了无土栽培技术的大面积推广应用。针对上述问题,设计了一种基于马利奥特装置的营养液管理控制系统,该系统主要由营养液配制系统与营养液灌溉控制系统两部分组成。通过 EC(电导率)和 pH 值传感器实时获取营养液成分,建立配液系统,依据不同作物营养需求自动、快速配置目标营养液。根据不同用户的需求,结合作物栽培区的气象参数和应用环境,制定了 3 种不同的灌溉策略:参比蒸散灌溉模式、光照辐射灌溉模式、定时灌溉模式。实验表明,该系统可以快速、准确地实现营养液的管理控制,为作物的无土栽培技术的大面积推广应用奠定了基础。

**关键词:** 无土栽培; 马利奥特装置; 营养液; 配液系统; 灌溉策略

中图分类号: S24      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2022)06-0380-08      OSID: 

## Study of Nutrient Solution Management System Based on Mariotte Device

ZHAO Yandong<sup>1,2</sup> GAO Yu<sup>1,2</sup> SHI Wei<sup>3</sup> ZHANG Xin<sup>3</sup> ZHENG Wen'gang<sup>3</sup> XUE Xuzhang<sup>3</sup>

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China  
2. Forest and Grass Ecological Carbon Neutral Wisdom Perception Research Institute, Beijing 100083, China  
3. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** Nutrient solution configuration and irrigation control technology have become the key technology in soilless culture. However, the current nutrient solution management control has problems such as cumbersome configuration process, inaccurate nutrient solution ratio and single irrigation strategy, which hinder the development of soilless culture technology. Aiming at the above-mentioned various problems, nutrient solution management and control system was designed based on the Mariotte device. The system was mainly composed of nutrient solution preparation system and nutrient solution irrigation control system. Through EC (conductivity) value and pH value sensors, the components of the nutrient solution were obtained in real time, the mathematical model of liquid preparation and prescription was established, and the target nutrient solution was automatically and quickly configured according to the nutritional needs of different crops. According to the needs of different users, combined with the meteorological parameters and application environment of the crop cultivation area, three different irrigation strategies were formulated. Experiments showed that the system can quickly and accurately realize the management and control of the nutrient solution, laying a part of the foundation for the production of soilless cultivation of crops.

**Key words:** soilless cultivation; Mariotte device; nutrient solution; dosing system; irrigation strategy

### 0 引言

20 世纪 80 年代以来,计算机技术、通信技术和

智能传感技术的快速成熟,使得无土栽培开始朝着自动化、智能化方向发展。无土栽培技术的核心是生长环境的研究和优化。作物生长环境优化是提高

收稿日期: 2021-07-06    修回日期: 2021-08-16  
**基金项目:** 农业物联网技术北京市工程实验室建设项目 (PT2021-28)、国家重点研发计划项目 (2020YFD1000500) 和北京市农林科学院创新能力专项 (KJCX20210402)  
**作者简介:** 赵燕东 (1965—),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn  
**通信作者:** 薛绪掌 (1967—),男,研究员,博士,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: xuexz@nrcita.org.cn

无土栽培生产效率、降低生产成本的最重要手段,而其中营养液的管理控制是生产环境优化面临的关键问题<sup>[1-3]</sup>。

关于营养液的管理控制,国内外均进行了系统的研究。当前的营养液控制方法大致可以分为 3 类:基于 EC (电导率) 和 pH 值的营养液控制方法;基于营养物利用的营养液控制方法;基于作物模型的营养液控制方法。其中,基于 EC 和 pH 值的营养液控制方法操作简单,易于推广。当前国内外主要根据营养液的 EC 和 pH 值来进行营养液的调控,同时在实际生产中使用最广泛,有关营养液管理控制系统的大多数研究也基于这种控制模式<sup>[4-15]</sup>。

国外的大型智能水肥灌溉设备主要采用文丘里吸肥器,目前以色列和荷兰为代表的发达国家水肥一体化技术已相当成熟,已开发应用了完善成熟的智能灌溉施肥系统,如荷兰 PRIVA 公司研发的 Nutri-line 系列、以色列 NETAFIM 公司研发的 Netajet 系列等全自动灌溉施肥机,都能对电导率和酸碱度进行实时监测,从而为作物提供水分和养分。国内的许多院校和企业也进行了先进灌溉施肥机的研发和引进,已经开展了水肥一体化技术的研究<sup>[16-17]</sup>。

当前国内外自动配液灌溉系统一般由供水、检测、控制、灌溉等主要装置通过管路连接组成。其自动配液主要采用文丘里作为相应配液系统核心部件,结构繁杂,采用文丘里时其相应吸液量与液体出口压力成正比。当其系统供液出口压力变化时,其吸液率也将随之变化。由于无土栽培作物对培养液的依赖度较高,以文丘里为配液核心的设备,一旦供液压力出现变化,将会导致其营养液配制偏离设定目标,较难获得理想的控制效果,进而对相应作物生长造成不利影响。

本文设计一种基于马利奥特装置的营养液管理控制系统。马利奥特装置使高浓度原液进行自流供液,供液压力均衡,供液压力稳定后不易发生变化,供液流速取决于空气阀开度,供液时长取决于电磁阀开闭间隔时长<sup>[18-20]</sup>。搭建整体系统结构,建立配液系统,提供 3 种灌溉策略,以快速、准确地实现营养液的管理控制,为作物的无土栽培生产奠定基础。

1 系统总体构成

基于马利奥特装置的营养液管理控制系统由两部分组成:由马利奥特装置、控制机箱、传感器和配液桶等构成的营养液配制系统,如图 1 所示;营养液灌溉控制系统。

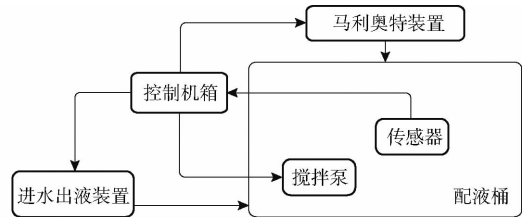


图 1 营养液管理控制系统框图

Fig.1 Block diagram of nutrient solution management control system

2 系统硬件设计

配液桶置于型材结构框架下方,马利奥特装置安装在型材结构框架上方。在配液桶中安装 EC 传感器、pH 值传感器及水位传感器,传感器探头均置于配液桶溶液中。控制系统安装于控制机箱中,工控机液晶显示器上可实时显示相应配液状态。配液桶下方安装有供液泵,通过供液泵可将配液桶中已经配置完成的营养液输送至无土栽培种植区域,供作物生长。整体外部结构如图 2 所示。

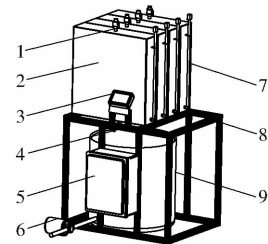


图 2 营养液管理控制系统结构图

Fig.2 Structure diagram of nutrient solution management control system

- 1. 进液口球阀 2. 原液箱 3. 工控机 4. 电磁阀 5. 控制机箱
- 6. 供液泵 7. 液位软管 8. 型材支架 9. 配液桶

当配液桶中的液位低于最低水位,基于水位传感器,系统开始自动补水,当配液桶中水位达到最高水位时则停止补水。考虑到营养液在配置时,会受到搅拌泵的影响,在最低水位和最高水位会出现电磁阀反复开、断的现象,选用了机械式水位传感器,通过修改电路,使系统能够自锁,避免了这个问题的干扰。系统在给配液桶进行补水的同时,可通过控制原液箱下的电磁阀进行相应原液的补充添加。同时系统通过 EC 传感器与 pH 值传感器开始实时检测反馈配液桶中的 EC 与 pH 值。如若 EC 与 pH 值达到相应设定目标值则停止加液,反之继续补充相应原液与酸液,以满足实际应用场合的需求。

设备机箱控制电路采用 220 V 交流电与 24 V 蓄电池兼容供电模式,正常工作时采用 220 V 交流电供电。当交流电电压不稳或者停电时,设备机箱可自动切换至 24 V 蓄电池供电,进而保证设备能够正常稳定工作。

控制机箱通过 485 总线采集使用设施里搭建的小气候监测气象站数据,根据气象反馈数据系统可制定相应灌溉策略,通过控制供液泵完成相应栽培区域营养液灌溉<sup>[21-25]</sup>。系统架构设计框图如图 3 所示。通过液晶显示器显示系统工作状态;通过电气模块操作控制相应原液电磁阀、搅拌泵、供液泵等器件;通过 485 总线与 STC102 微型 RTU(远程终端单元)、在线 EC 传感器和 pH 值传感器等连接,进行数据采集。

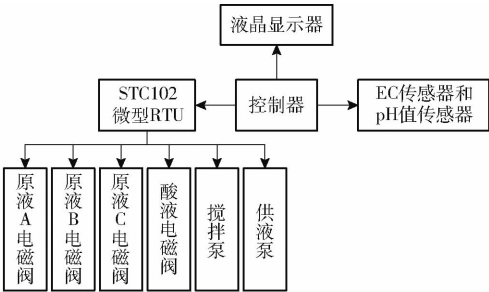


图 3 系统架构设计框图

Fig. 3 System architecture design diagram

控制机箱内部实物图如图 4 所示。应用过程中,结合实际应用环境和需求,添加修改部分器件。



图 4 控制机箱内部实物图

Fig. 4 Physical map inside control box

3 软件设计与实现

营养液管理控制系统的核心功能为接受用户的控制参数输入,设定目标值,自动完成配液、灌溉的过程,同时对数据进行存储,用户可以随时查询历史数据。

开发软件为 Visual Studio,开发语言为 C#,运行环境为 Windows XP 系统。

3.1 人机交互界面设计

由于采用了串口屏,人机交互部分的软件设计工作主要为 RS232 串口数据的交互以及交互数据的设计,所有需要显示的数据、用户设置的数据等都通过串口与控制器交互。触摸屏主要界面内容和运

行基本情况如图 5 所示。

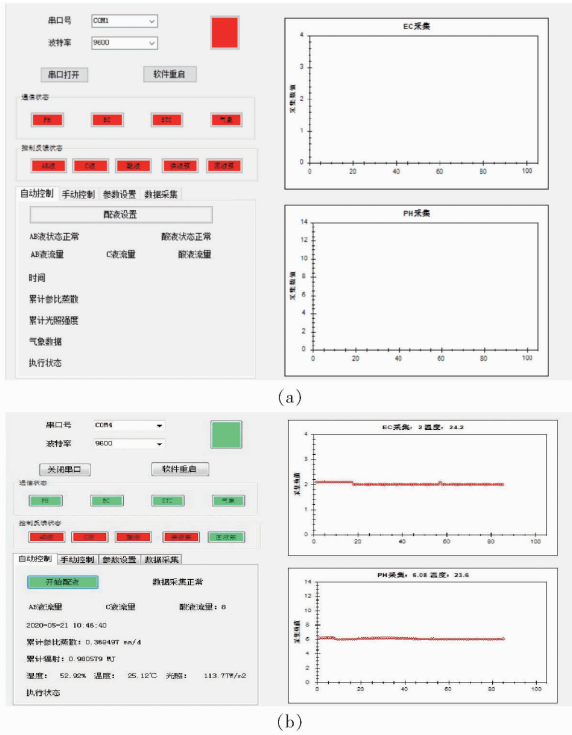


图 5 系统运行界面

Fig. 5 System operation interface

3.2 营养液配置过程

系统配液流程图根据所需营养液基本配方(原液 A、B 等量添加,原液 C 加入量为原液 A 的 1/10)绘制,如图 6 所示。系统设有安全范围,配液完成后,在设定目标值  $\pm 0.1$  误差范围内时,系统则正常进行灌溉。如果超出设定范围,系统则停止工作并报错,等待维护。基本过程如下:①向配液桶加水(电磁阀和液位计控制),到达目标水位后测定 EC。②根据配液桶的 EC、原液 A 和原液 B 的 EC,按模型计算量同时加原液 A、原液 B,边加边用搅拌泵搅拌。③加原液 5 min 后测定混液 EC,按模型计算量<sup>[26]</sup>加原液 A、B,当 EC 大于目标值,进入下一步。④按照原液 A 累加量的 1/10 加入原液 C,用搅拌泵搅拌。⑤根据 pH 值模型计算加酸量,边加边搅拌,加完后再继续搅拌 5 min,读取 pH 值,当 pH 值大于目标值时,继续加入酸液,直到混合液的 pH 值小于目标 pH 值。

4 配液因素关系建立

4.1 电导率与配方原液所需量关系建立

进行 6 次电导率实验,将测得原液 A、B、C 和水的电导率  $E_{c1}$ 、 $E_{c2}$ 、 $E_{c3}$ 、 $E_{c4}$  作为已知量。实验中根据配方向体积  $V$  已知的混合液中加入等体积  $V_1$ 、 $V_2$  的原液 A、B。测量混合液电导率,记录达到该混合液电导率时已加入的原液 A 体积。

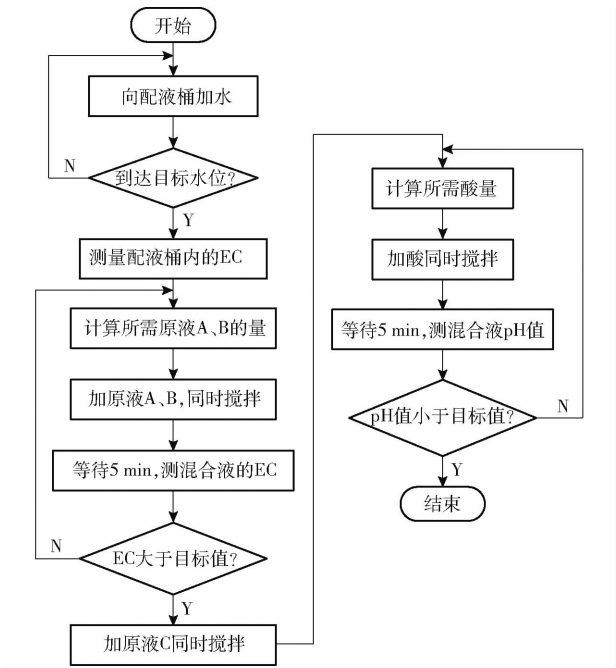


图 6 配置营养液流程图

Fig. 6 Flow chart of nutrient solution configuration

根据实验关系式结合已知量得出

$$V_1 E_{c_1} + V_2 E_{c_2} = V(E_c - E_{c_0}) a \tag{1}$$

式中  $E_{c_0}$ ——混合液起始电导率, mS/cm

$E_c$ ——混合液当前电导率, mS/cm

$a$ ——待定系数

根据营养液配方,原液 A、B 等量加入,得到

$$V_1(E_{c_1} + E_{c_2}) = V(E_c - E_{c_0}) a \tag{2}$$

$$a = \frac{V_1(E_{c_1} + E_{c_2})}{V(E_c - E_{c_0})} \tag{3}$$

$$V_1 = a \frac{V(E_c - E_{c_0})}{E_{c_1} + E_{c_2}} = ab \tag{4}$$

式中  $b$ ——可计算得出的已知量

实验过程中,加不同体积原液 A 并测出当前的混合液电导率,结合已知数值可计算出  $b$ ,获取待定系数  $a$ 。根据实验中的数据作图,获得待定系数  $a = 0.8088$ ,如图 7 所示。

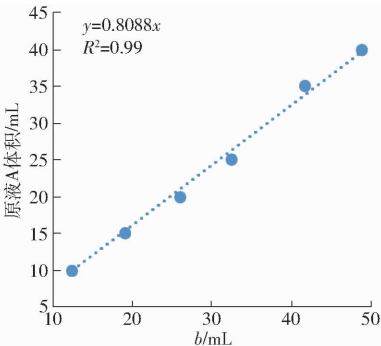


图 7 电导率实验结果

Fig. 7 Conductivity test results

则式(4)可转换为

$$V_1 = 0.8088 \frac{V(E_c - E_{c_0})}{E_{c_1} + E_{c_2}} \tag{5}$$

当设定营养液目标电导率后,即式(5)中的  $E_c$  已知,结合原液 A 电导率  $E_{c_1}$ 、原液 B 电导率  $E_{c_2}$ 、混液罐里电导率传感器测得的起始电导率  $E_{c_0}$  和混液罐里的配液体积  $V$ ,得到配置一次营养液所需原液 A 体积,同时得到原液 B 体积和原液 C 体积。其中,根据营养液配方,原液 A 和原液 B 加入体积是 1:1;原液 A 和原液 C 加入体积是 10:1,原液 C 内加入的是 EDTA 亚铁钠和其他微量元素,其电导率对配置营养液的整体电导率的影响可忽略不计。

4.2 pH 值与配方酸液所需量的关系建立

进行了 4 次 pH 值实验,先配置 pH 值为 6.86 的校准液进行零点校准,然后用配置好的 pH 值为 4.00 和 9.18 的校准液进行斜率校准,测得混合液体积为 1 000 mL、电导率设置为目标电导率。先测混合液 pH 值为  $p_0$ ,加 1 mL 酸,测得当前 pH 值为  $p_1$ ;再加 1 mL 酸,测得当前 pH 值为  $p_2$ ;再加 1 mL 酸,测得当前 pH 值为  $p_3$ 。

根据实验数据得到对应关系,结果如图 8 所示。

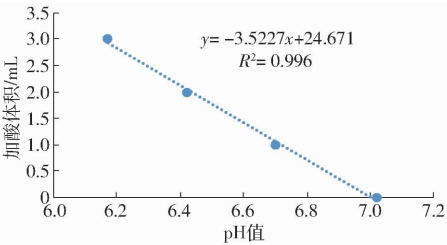


图 8 pH 值实验结果

Fig. 8 pH test results

通过 pH 值实验数据绘制加酸量与 pH 值变化量关系图,结果如图 9 所示。

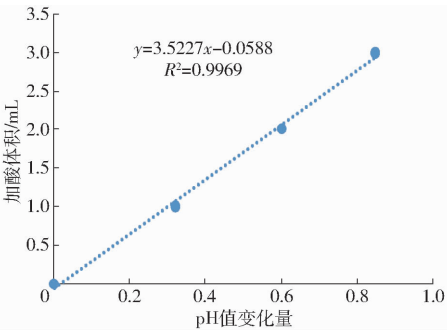


图 9 加酸量与 pH 值变化量关系曲线

Fig. 9 Relationship between acid addition and pH change

由图 9 可得

$$V_p = 3.5227(p_0 - p)E_{c_i}/1.820 \tag{6}$$

式中  $V_p$ ——加酸体积

$p$ ——目标 pH 值

$E_{c_i}$ ——目标电导率, mS/cm

配置营养液前设定目标 EC、pH 值,当调节 pH 值时,结合 pH 值传感器测得  $p_0$  和  $E_{c_i}$ ,计算得到配置一次营养液所需酸液体积。

4.3 加液时间和 EC、pH 值的关系建立

马利奥特装置具有流速恒定的特点。设有 4 个原液箱,分别装原液 A、原液 B、原液 C 和酸液。在每个原液箱正上方有原液输入端,其上安装有进液口控制球阀。原液箱正面下方开设有通气口,通过连接液位软管可以直观显示当前瓶内液位状态。当确保液位软管直径一致时,根据原液箱物理特性可以确保 4 个原液罐正下方原液流速恒定且相同。原液控制电磁阀一端安装在原液箱正下方,另一端垂直于配液桶。系统通过 4 个相应电磁阀的开关时间长短,控制 4 个原液箱的供液量。

测得容量 100 L 原液箱流量为 54 mL/s,设原液 A 对应电磁阀打开时长为  $T_A$ ,酸液电磁阀打开时长为  $T_p$ ,可得原液 B 电磁阀打开时长为  $T_B = T_A$ ,原液 C 电磁阀打开时长为  $T_C = T_A/10$ 。

结合式(5)得,加原液 A 时长与目标电导率的关系为

$$T_A = V_1/54 = 0.8088 \frac{V(E_c - E_{c_0})}{E_{c_1} + E_{c_2}}/54 =$$
$$0.015 \frac{V(E_c - E_{c_0})}{E_{c_1} + E_{c_2}} \quad (7)$$

结合式(6)得,加酸液时长  $T_p$  与目标 pH 值的关系为

$$T_p = V_p/54 = 0.036(p_0 - p)E_{c_i} \quad (8)$$

基于上述内容,编写系统营养液配液程序。  
主要围绕当地水源的 EC、pH 值和种植作物生长所需目标 EC、pH 值进行实验。该配液方式在当地使用有一定的代表性。每个地方水源不同,配液方式会有一定变化。在不同地方使用时,需要在当地进行相应实验,建立当地具有代表性的配液系统。

5 灌溉策略设计与选取

本文营养液管理控制系统根据采集到的气象站反馈数据,计算作物每日水量蒸发量,从而制定每日的灌溉量,进行灌溉。采用的灌溉策略主要有参比蒸散灌溉模式、光照辐射灌溉模式、定时灌溉模式<sup>[29-34]</sup>。

参照于参比蒸散灌溉模式<sup>[35]</sup>,具体操作过程为:

(1)通过气象站采集 10 min 的气象数据(光照度、风速、温度和相对湿度)预算单日潜在蒸散量  $E_{tp1}$  (mm/d),  $E_{tp1}$  的计算采用 FAO-56 推荐的 Penmen-Monteith 公式。计算得到 10 min 内的潜在

蒸散量  $E_{tp2}$  (mm/(10 min))。  
(2)  $E_{tp2}$  (mm/(10 min)) 每 10 min 累计一次得到参比蒸散量  $E_{tp3}$  (mm)。  
(3)根据计算所得的参比蒸散量(图 10),得到累计参比蒸散量(图 11)。按累计参比蒸散量每 0.5 mm 自动灌溉一次营养液。

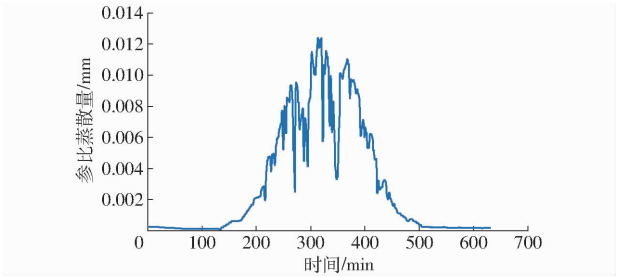


图 10 参比蒸散量

Fig. 10 Reference evapotranspiration

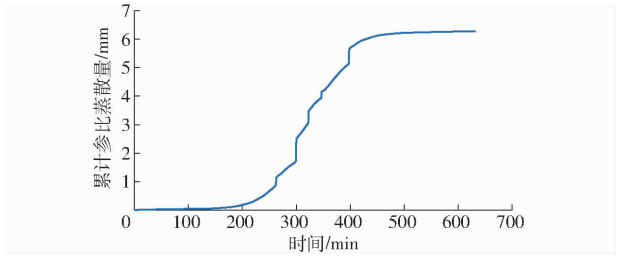


图 11 累计参比蒸散量

Fig. 11 Cumulative reference evapotranspiration

在实际应用中,结合营养液管理控制系统所处的应用环境、作物种类、无土栽培类型等,进行灌溉策略的选择。如:基质栽培容水量大,可选用定时灌溉,每天分中、晚 2 次或早、中、晚 3 次灌溉;岩棉栽培容水量小,可选用参比蒸散灌溉或光照辐射灌溉;植物工厂水培,可选用光照辐射灌溉或参比蒸散灌溉。

6 营养液管理控制系统测试

实验于 2020 年 8—11 月在北京市昌平区国家精准农业示范基地 11 号温室内进行,作物为西瓜。

11 号温室采用基质栽培,其硬件结构设计如前文所述。选用容量 100 L 原液箱,1 000 L 配液桶采用下沉安装设计,使系统整体更为紧凑,营养液管理控制系统整体如图 12 所示。设置营养液目标 EC 和目标 pH 值,本次实验目标 EC 取 2.3 mS/cm,目标 pH 值为 6.3。由于基质栽培容水量相对较大,确保每次灌溉营养液与目标设定值相同,无需根据彭曼公式计算参比蒸散量,进行每次不同特定量的灌溉。因而本次西瓜基质栽培实验的灌溉策略采用定时灌溉。每天 07:00 与 14:00 开始灌溉,每次灌溉 5 min。西瓜基质栽培区如图 13 所示。西瓜的生长状况如图 13、14 所示。



图 12 营养液管理控制系统实物图

Fig. 12 Physical map of nutrient solution management control system



图 13 成长中的西瓜

Fig. 13 Growing watermelon



图 14 成熟的西瓜

Fig. 14 Ripe watermelon

实验培养的西瓜品质较优,产量正常。本文营养液管理控制系统配液正常,配液质量达到了营养液配方的要求。

连续 7 d 内每天 00:00 测量营养液电导率和 pH 值,结果如图 15、16 所示。

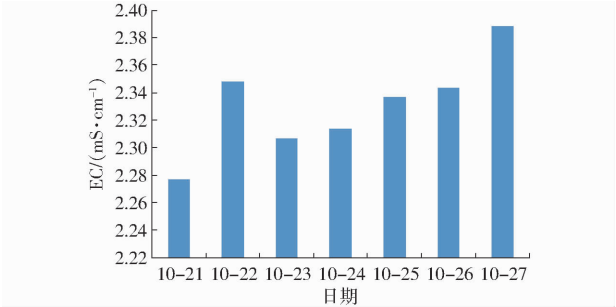


图 15 连续 7 d 内 EC 柱状图

Fig. 15 EC changes within seven days

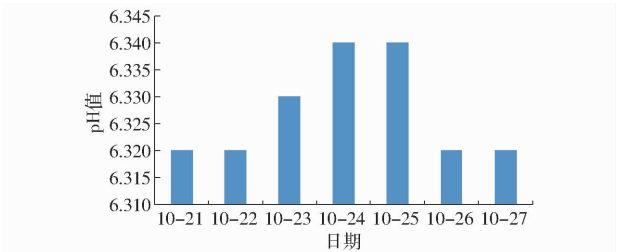


图 16 连续 7 d 内 pH 值柱状图

Fig. 16 The pH value changes within seven days

由目标 EC 为 2.3 mS/cm, pH 值为 6.3, 计算得标准差  $\sigma_{EC} = 0.032\ 784\ \text{mS/cm}$ ,  $\sigma_{pH} = 0.008\ 806$ 。配液质量达到了西瓜营养液配方要求,一周时间内系统配液稳定性良好。

对营养液管理与控制系统实验期间每周存储数据进行分析处理,实验期间 EC、pH 值如图 17、18 所示。

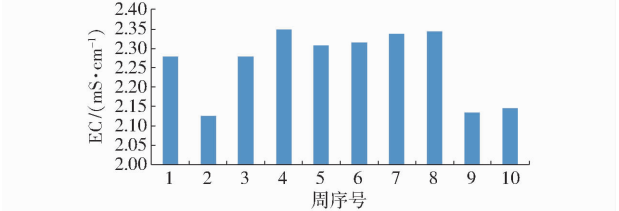


图 17 EC 变化柱状图

Fig. 17 EC value changes

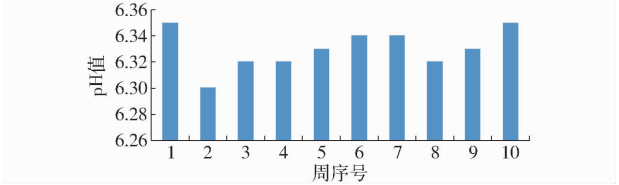


图 18 pH 值变化柱状图

Fig. 18 The pH value changes

经计算  $\sigma_{EC} = 0.090\ 4\ \text{mS/cm}$ ,  $\sigma_{pH} = 0.015\ 635$ 。营养液管理控制系统配液稳定性好。

## 7 结论

(1)设计了一种基于马利奥特装置的营养液管理控制系统,通过马利奥特装置实现供液压力均衡稳定,使高浓度原液能进行自流供液,简化了系统整体结构,节约了成本,并建立了营养液配置系统。

(2)在北京市昌平区国家精准农业示范基地 11 号温室,以西瓜无土栽培生产过程为研究对象,验证了基于马利奥特装置的营养液管理控制系统的性能,实验结果表明,该系统可以快速、准确地实现营养液的管理与控制。

## 参 考 文 献

[1] 束胜,康云艳,王玉,等.世界设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J].中国蔬菜,2018(7):1-13.  
SHU Sheng, KANG Yunyan, WANG Yu, et al. The development situation, characteristics and trend analysis of the world's

- protected horticulture[J]. *China Vegetables*, 2018(7):1-13. (in Chinese)
- [2] 江景涛,杨然兵,鲍余峰,等.水肥一体化技术的研究进展与发展趋势[J].*农机化研究*,2021,43(5):1-9.  
JIANG Jingtao, YANG Ranbing, BAO Yufeng, et al. Research progress and development trend of water and fertilizer integration [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021,43(5):1-9. (in Chinese)
- [3] 易文裕,程方平,熊昌国,等.农业水肥一体化的发展现状与对策分析[J].*中国农机化学报*, 2017,38(10):111-115,120.  
YI Wenyu, CHENG Fangping, XIONG Changguo, et al. Development status and countermeasures of integrative water and fertilizer in agriculture[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2017,38(10):111-115,120. (in Chinese)
- [4] MARGARET A C, JACKIE B L, PETER M A T, et al. Effects of nutrient solution electrical conductivity on the compositional and sensory characteristics of greenhouse tomato fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 74: 132-140.
- [5] 毛罕平,胡云辉,左志宇,等.设施栽培中母液加入量与营养液 EC/pH 值的回归模型[J].*农机化研究*,2012,34(2):149-152.  
MAO Hanping, HU Yunhui, ZUO Zhiyu, et al. Regression model of the mother liquid dosage and the value of EC/pH in facility cultivation[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012,34(2):149-152. (in Chinese)
- [6] ALBERTO P, FERNANDO M, INCROCCI L, et al. A comparison between two methods to control nutrient delivery to greenhouse melons grown in recirculating nutrient solution culture[J]. *Scientia Horticulturae*, 2002, 95(2): 89-95.
- [7] DANIELE M, MATTSON N S, LIETH H. An empirical model to simulate sodium absorption in roses growing in a hydroponic system[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 118(3): 228-235.
- [8] DANIELE M, INCROCCI L, MAGGINI R. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato[J]. *Agricultural Water Management*, 2010,97(7): 971-980.
- [9] DAVID L E, DIANE E, TOM H. Effects of oxygen-enriched nutrient solution on greenhouse cucumber and pepper production [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(4): 602-607.
- [10] MARCELIS L, BRAJEUL E, ELINGS A, et al. Modeling nutrient uptake of sweet pepper[J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 691: 285-292.
- [11] MARCELIS L, DIELEMAN J, BOULARD T, et al. CLOSYS: closed system for water and nutrient management in horticulture [J]. *Acta Horticulturae*, 2006, 718: 375-382.
- [12] CARMASSI G, INCROCCI L, MAGGINI R, et al. An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rock wool culture with saline water[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88(1): 73-82.
- [13] GALLARDO M, THOMOPSON T 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.
- [14] SAVVAS D, MANTZOS N, BAROUCAS P E. Modelling salt accumulation by a bean crop grown in a closed hydroponic system in relation to water uptake[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 111(4): 311-318.
- [15] SAVVAS D, CHATZIEUSTRATIOU E, PERVOLARAKI G, et al. Modelling Na and Cl concentrations in the recycling nutrient solution of a closed-cycle pepper cultivation[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 99(2): 282-291.
- [16] 李坚,刘云骥,王丹丹,等.日光温室小型水肥一体灌溉机设计及其控制模型的建立[J].*节水灌溉*,2017(4):87-91.  
LI Jian, LIU Yunji, WANG Dandan, et al. Design of a small integrated water and fertilizer irrigation machine for solar greenhouse and its control model establishment[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(4):87-91. (in Chinese)
- [17] 黄语燕,王涛,刘现,等.水肥一体化循环灌溉系统的设计与试验[J].*节水灌溉*,2019(8):94-97,101.  
HUANG Yuyan, WANG Tao, LIU Xian, et al. Design and test of water and fertilizer integrated circular irrigation system[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(8):94-97,101. (in Chinese)
- [18] 谢森传,沈言珩.马利奥特(Mariotte)瓶装置的改进及应用[J].*水文地质工程地质*,1985(2):18-19.
- [19] 王永义,王专翠.对马利奥特瓶的一些改进意见[J].*地下水*,1997(4):179-181.
- [20] 姚仰平,陈伟,陈含.马氏瓶回流原理分析[J].*力学与实践*,2020,42(1):22-27.  
YAO Yangping, CHEN Wei, CHEN Han. Analysis of back-flow principle of mariotte bottle[J]. *Mechanics in Engineering*, 2020,42(1):22-27. (in Chinese)
- [21] 张新伟,杨会民,陈毅飞,等.水肥一体化设备设计及试验[J].*农机化研究*,2021,43(9):98-104.  
ZHANG Xinwei, YANG Huimin, CHEN Yifei, et al. Design and simulation analysis of water fertilizer machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021,43(9):98-104. (in Chinese)
- [22] 李冬冬,张立新,李春志,等.基于 PLC 控制的棉田水肥一体化控制系统设计[J].*农机化研究*,2021,43(6):100-104.  
LI Dongdong, ZHANG Lixin, LI Chunzhi, et al. Design of integrated control system of water and fertilizer in cotton field based on PLC control[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021,43(6):100-104. (in Chinese)
- [23] 袁洪波,王海华,庞树杰,等.日光温室封闭式栽培系统的设计与试验[J].*农业工程学报*, 2013,29(21):159-165.  
YUAN Hongbo, WANG Haihua, PANG Shujie, et al. Design and experiment of closed culture system for solar greenhouse [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013,29(21):159-165. (in Chinese)
- [24] 袁洪波,李莉,王俊衡,等.温室水肥一体化营养液调控装备设计与试验[J].*农业工程学报*, 2016,32(8):27-32.  
YUAN Hongbo, LI Li, WANG Junheng, et al. Design and test of regulation and control equipment for nutrient solution of water and fertilizer integration in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*,2016,32(8):27-32. (in Chinese)
- [25] 金永奎,周良富,孙竹,等.水肥一体机吸肥性能影响因素试验分析[J].*农机化研究*,2021,43(10):95-101.  
JIN Yongkui, ZHOU Liangfu, SUN Zhu, et al. Experimental analysis on influence factors of fertilizer suction performance of

- integrated irrigation and fertilizer applicator[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021,43(10):95 – 101. (in Chinese)
- [26] 张森,潘林沛,阳清亮,等. 基于斜率-截距校正算法的番茄营养液 ISE 监测[J]. *农业机械学报*,2018,49(5):342 – 347. ZHANG Miao, PAN Linpei, YANG Qingliang, et al. ISE monitoring of macronutrients in hydroponic tomato cultivation based on slope and bias correction method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018,49(5):342 – 347. (in Chinese)
- [27] 赵燕东,郑焱,周海洋,等. 基于海棠茎干含水率的智能灌溉控制策略研究[J]. *农业机械学报*,2020,51(7):323 – 331. ZHAO Yandong, ZHENG Yan, ZHOU Haiyang, et al. Research of intelligent irrigation control strategy based on stem water content of crabapple[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51 (7): 323 – 331. (in Chinese)
- [28] 刘笑吟,王海明,王钥,等. 节水灌溉稻田蒸发蒸腾过程及其比例变化特征研究[J]. *农业机械学报*,2021,52(7):271 – 282. LIU Xiaoyin, WANG Haiming, WANG Yue, et al. Characteristics of rice transpiration and soil evaporation and their proportion variation in water-saving irrigated paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021,52(7):271 – 282. (in Chinese)
- [29] 王佳明,陈思,荆腾,等. 无土栽培远程灌溉控制系统[J]. *排灌机械工程学报*,2020,38(9): 959 – 965. WANG Jiaming, CHEN Si, JING Teng, et al. Remote irrigation control system for soilless culture[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020,38(9):959 – 965. (in Chinese)
- [30] 张丽霞,杨永辉,尹钧,等. 水肥一体化对小麦干物质和氮素积累转运及产量的影响[J]. *农业机械学报*,2021,52(2): 275 – 282,319. ZHANG Lixia, YANG Yonghui, YIN Jun, et al. Effects of drip fertigation on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen together with yield in wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(2):275 – 282,319. (in Chinese)
- [31] 张芳,薛绪掌,张建丰,等. 基于负水头供液决策的作物自动灌溉施肥方法[J]. *农业机械学报*,2014,45(增刊):148 – 154. ZHANG Fang, XUE Xuzhang, ZHANG Jianfeng, et al. Automatic irrigation method for greenhouse crops based on negative pressure decision-making[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45( Supp. ):148 – 154. (in Chinese)
- [32] 李友丽,郭文忠,赵倩,等. 基于水分、电导率传感器的黄瓜有机栽培灌溉决策研究[J]. *农业机械学报*,2017,48(6):263 – 270. LI Youli, GUO Wenzhong, ZHAO Qian, et al. Irrigation scheduling based on moisture and electric conductivity sensors in organic culture of cucumber[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(6):263 – 270. (in Chinese)
- [33] 熊静,陈清,王敬国,等. 供液方式对番茄基质栽培盐分累积与养分利用率的影响[J]. *农业机械学报*,2017,48(2):224 – 231. XIONG Jing, CHEN Qing, WANG Jingguo, et al. Effect of culture systems on salt accumulation in substrate and nutrient use efficiency of tomato[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48 (2): 224 – 231. (in Chinese)
- [34] 张育斌,魏正英,朱新国,等. 精量水肥灌溉系统控制策略及验证[J]. *排灌机械工程学报*,2017,35(12):1088 – 1095. ZHANG Yubin, WEI Zhengying, ZHU Xinguo, et al. Control strategy for precision water-fertilizer irrigation system and its verification[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017,35(12):1088 – 1095. (in Chinese)
- [35] 郭晓磊,薛绪掌,赵倩,等. 灌溉策略对冬小麦水分利用和生长的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019,39(2):194 – 201. GUO Xiaolei, XUE Xuezhang, ZHAO Qian, et al. Influence of irrigation strategies on water using and growth of winter wheat based on weighting lysimeters[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019,39(2):194 – 201. (in Chinese)