

基于水分、电导率传感器的黄瓜有机栽培灌溉决策研究

李友丽¹ 郭文忠¹ 赵倩¹ 李银坤¹ 杨子强² 薛绪掌¹

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 宁夏吴忠国家农业科技园区管理委员会, 吴忠 751100)

摘要: 以时序灌溉决策为对照(CK), 设置基于水分传感器的单因子灌溉决策处理 T1 和基于水分、电导率传感器的双因子灌溉决策处理 T2, 监测基质含水率及灌溉液、回液的电导率决策灌溉量, 测量黄瓜生长指标、叶片 SPAD 值、气孔导度和光合速率日变化以及果实品质、产量和灌溉量, 分析灌溉液生产效率, 研究黄瓜椰糠有机栽培的营养液灌溉决策。结果表明: 不同灌溉决策下黄瓜的生长发育和品质产量差异不明显; 处理 T2 的总灌溉量较 CK、T1 减少了 49.08% 和 31.85%, 灌溉液生产效率与 CK、T1 相比分别提高了 103.92% 和 60.59%。基于水分、EC 传感器的双因子灌溉决策为黄瓜椰糠有机栽培提供了较合理的营养液灌溉制度, 适用于设施黄瓜椰糠有机栽培的营养液自动灌溉管理。

关键词: 黄瓜; 灌溉决策; 水分传感器; 电导率传感器; 有机栽培; 有机营养液

中图分类号: S625.5⁺8; S274.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)06-0263-08

Irrigation Scheduling Based on Moisture and Electric Conductivity Sensors in Organic Culture of Cucumber

LI Youli¹ GUO Wenzhong¹ ZHAO Qian¹ LI Yinkun¹ YANG Ziqiang² XUE Xuzhang¹

(1. Beijing Research Centre of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. Management Committee of Wuzhong National Agricultural Sci-Tech Garden in Ningxia, Wuzhong 751100, China)

Abstract: An experiment was carried out to study irrigation schedule based on moisture and electric conductivity (EC) sensors in cucumber production based on organic culture. Coconut bran was the substrate of cultivation. Three irrigation strategies were implemented which was scheduled by digital timer (CK), moisture sensors (T1), as well as moisture and EC sensors together (T2). Coir moisture content, EC of input nutrient solution and drainage were monitored, which was used to determine irrigation volume. The growth parameters were measured, including SPAD value of leaves, stomatal conductance, photosynthetic rates, fruit quality and yield, as well as irrigation amount, and production efficiency of consumed nutrient solution was calculated. The results showed that under the three irrigation strategies, difference in plant growth, yield and quality of harvested cucumber was insignificant. Total irrigation amount of T2 was 49.08% less than that of CK, and 31.85% less than that of T1. Use efficiency of nutrient solution of T2 was 103.92% higher than that of CK and 60.59% more than that of T1, respectively. In conclusion, the irrigation strategy based on incorporated application of moisture and EC sensors offered better nutrient solution use efficiency. The strategy can be used in automatic management of nutrient solution supply in organic culture of cucumber in greenhouse.

Key words: cucumber; irrigation schedule; moisture sensor; electric conductivity sensor; organic cultivation; organic nutrient solution

引言

基质栽培在土地、水、肥等资源有效利用和病虫

害防治等多方面较土壤栽培具有明显优势,但其持水性、缓冲性等较差,极易出现水肥供应不足或过量以及盐渍化等问题,科学的营养液灌溉制度至关重

收稿日期: 2016-10-12 修回日期: 2017-02-06

基金项目: 北京市基金面上项目(20146142008)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD05B02)、北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJX20140415)和星火计划项目(2015GA600005)

作者简介: 李友丽(1985—),女,助理研究员,主要从事设施蔬菜水肥一体化技术研究, E-mail: liyl@nrcita.org.cn

通信作者: 薛绪掌(1967—),男,研究员,主要从事农业灌溉节水研究, E-mail: xuexz@nrcita.org.cn

要^[1]。自动灌溉削弱了人为干扰的不良影响,提高了生产效率,是现代农业发展的重点。灌溉决策是自动灌溉控制系统的核心,其优质性和广适性决定了自动控制系统的应用价值,相关研究已成为农业灌溉节水的热点^[2]。

最常用的时序控制法,根据经验设定启动时间和灌溉量(灌溉时长),或将灌溉液与回液 EC 的差值作为辅助调整灌溉量的参考因子^[3-4],该方法简单但未能充分考虑环境因子和作物生长发育的影响^[5-6]。光照强度是影响作物耗水量最主要的环境因子,累积光辐射法被认为是较好的管理方法^[6-7],针对不同作物和基质开展的研究,其相关成果已在生产中得以应用^[8-9]。同时,有研究发现累积光辐射法没有考虑温度和湿度的影响(占30%)^[6];累积光辐射值仅是启动灌溉的决策因子,灌溉量仍为经验值,该方法有待进一步优化。全膜覆盖下,基质含水量下降值被认为是作物耗水量,基于水分传感器监测值灌溉或计算灌溉量能较好满足作物水分供应^[10-11]。然而,GALLARDO等^[12]认为基质栽培需要提供过量的灌溉液淋洗基质以避免盐分累积,张芳等^[13]发现1.3倍计算灌溉量可充分淋洗基质内盐分。基质盐分积累是营养液中未被吸收的“无效离子”累积、基质吸附阳离子或释放养分影响营养液化学平衡的结果,当盐分浓度超过一定值时才会对作物生长造成影响。每次均采用过量灌溉,既导致营养液浪费,又污染环境。充分考虑盐分淋洗制度,对进一步优化灌溉决策,提高营养液利用效率具有非常重要的意义。

21世纪以来,有机农业发展迅速,有机蔬菜栽培面积逐年增加。但是,配套的设施设备和栽培技术相对落后,机械化、自动化程度极低,特别是水肥管理方面。椰糠作为一种有机栽培基质已得到大面积应用,而椰糠有机栽培的灌溉策略研究甚少。因此,本文拟利用传感器原位监测技术,以水分传感器决策计算灌溉量,以 EC 传感器决策淋洗基质,来探究黄瓜椰糠有机栽培的营养液自动灌溉决策,旨在优化黄瓜椰糠有机栽培的营养液灌溉制度,实现水肥一体化智能装备管控下有机营养液的高效利用,并为设施蔬菜无土有机栽培的营养液高效利用和智能管控提供依据和参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

试验于2015年8月17日—11月10日在北京市昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地5号日

光温室中开展,其栽培基质为椰糠:质量为1.95 kg/条,压缩比5:1,膨胀量8.619 kg,吸水膨胀的体积为100 cm×15 cm×10 cm,EC为4.22 mS/cm,使用前清水泡胀并淋洗,至淋洗液 EC 小于等于0.7 mS/cm时待用。供试作物为黄瓜(中农26),定植密度30 000株/hm²。营养液为自主发酵的有机营养液,灌溉液 EC 范围参照山崎黄瓜营养液配方^[14],滴箭灌溉。营养液灌溉管理设备为北京农业智能装备技术研究中心自主研发的有机水肥一体化智能装备与系统:包括有机营养液发酵系统、AWF型水肥一体化智能装备(5通道)和滴灌灌溉系统等(图1)。有机营养液发酵区制备有机营养液,AWF型水肥一体化智能装备与系统根据自动灌溉决策进行营养液配制与田间灌溉管理^[15]。

1.2 试验设计

目前,生产中营养液管理多采用定时定点灌溉,即时序法。田间试验中,当栽培基质如椰糠定植条包裹塑料膜,可认为椰糠含水量下降值即为黄瓜的耗液量,参考田间灌溉量计算公式^[16],根据椰糠的实际含水率和设定的含水率上限值,便得出计算灌溉量。实际生产中,基质栽培营养液灌溉易导致基质盐分积累,影响作物生长,需要灌溉过量的营养液以避免基质盐分积累。张芳等^[13]在基质(草炭)栽培的研究中发现每次以1.3倍计算灌溉量灌溉营养液可以充分淋洗基质盐分。然而,过量营养液灌溉既造成营养液浪费,又导致土壤等环境污染。有研究^[4]认为回液 EC 高于灌溉液 EC 时说明基质养分浓度偏高,需增加灌溉量淋洗基质。因此,本试验营养液自动灌溉决策以时序法^[6]为对照,分别设置2个处理:基于水分传感器的单因子灌溉决策(T1)和基于水分、EC传感器的双因子灌溉决策(T2),每天07:00—18:00整点时刻系统分析传感器返回的数据,按表1灌溉策略进行营养液灌溉管理。

营养液灌溉量计算公式^[16]为

$$M_1 = 0.001(q_1 - q_2)V \frac{p}{\eta}$$

式中 M_1 ——灌溉量 V ——基质体积

q_1 ——椰糠基质的最大含水率,为48.95%
(体积含水率)

q_2 ——整点时刻水分传感器测定的含水率

p ——土壤湿润比,取100%

η ——水分利用效率,取1

将灌溉策略编写程序,导入有机水肥一体化智能装备的操作系统。

试验各处理均设3次重复,共9个试验小区,随

机排布,支流管道并联于主灌溉管道上,主管与支管间安装电磁阀和流量计,使各小区灌溉单独管理。在 AWF 型水肥一体化智能装备的混液桶和栽培灌溉区 T3 的回液桶中装有 EC 传感器,分别监测灌溉

液和回液的 EC,其中监测灌溉液 EC 的作用为参与营养液配制和处理 T2 自动灌溉的决策。在各栽培小区的椰糠中布置水分传感器,实时监测椰糠含水率,如图 1 所示。

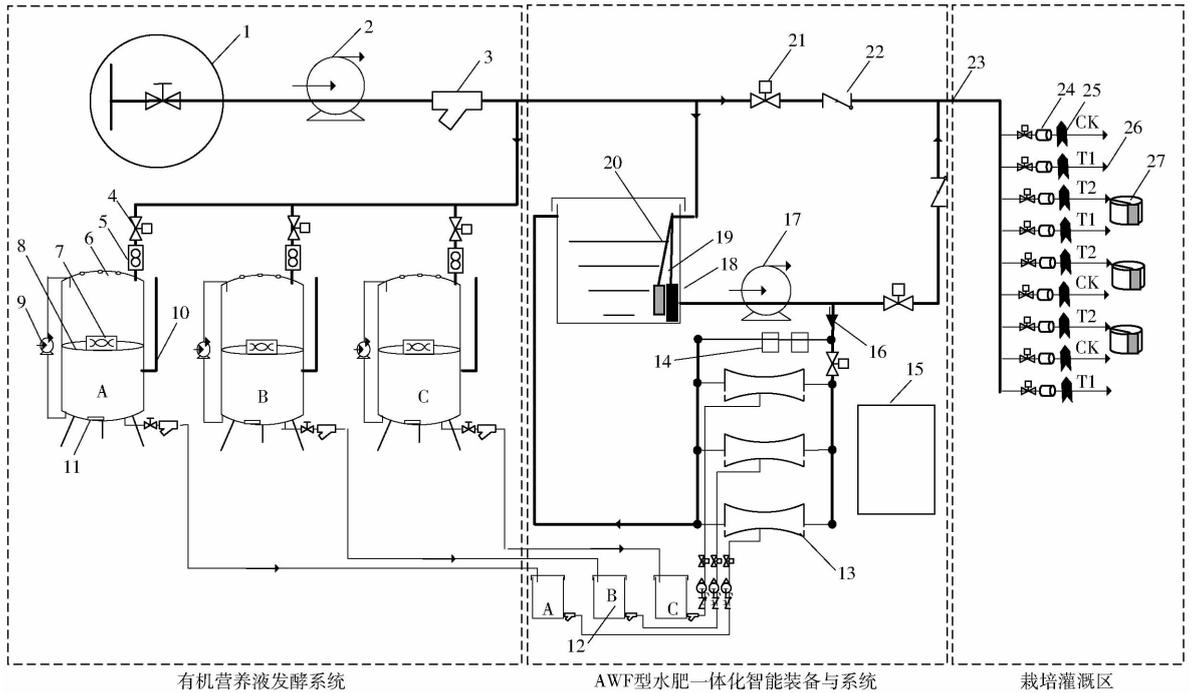


图 1 有机水肥一体化智能装备与系统平面图

Fig. 1 Structure diagram of organic fertigation system

1. 水源 2. 灌溉水泵 3. 过滤器 4. 电磁阀 5. 流量传感器 6. 发酵罐 7. 曝气装置 8. 过滤层 9. 循环泵 10. 通气管
 11. 液位传感器 12. 储液箱 13. 吸肥器 14. 肥液检测装置 15. 控制柜 16. 配肥管道 17. 施肥水泵 18. 混液桶 19. 液位传感器 20. EC 传感器 21. 灌溉电磁阀 22. 灌溉逆止阀 23. 田间灌溉电磁阀配液电磁阀 24. 流量计 25. 基质水分传感器 26. 灌溉小区 27. 回液桶

表 1 营养液自动灌溉决策试验设计

Tab. 1 Design of decision making for automatic irrigation of nutrient solution

处理	决策因子	启动灌溉时间	启动灌溉	实际灌溉量
CK	时间	07:00—18:00 整点时刻	是	0.4 mm
T1	基质含水率	07:00—18:00 整点时刻	基质含水率小于等于 q_1	计算灌溉量 $1.3M_1$ 回液 EC 与灌溉液 EC 的差值小于等于
T2	基质含水率、灌溉液与回液 EC 的差值	07:00—18:00 整点时刻	基质含水率小于等于 q_2	1.00 mS/cm 时,为计算灌溉量 M_1 回液 EC 与灌溉液 EC 的差值大于 1.00 mS/cm 时,为 $1.3M_1$ [13]

1.3 测定项目与方法

有机水肥一体化智能系统读取并存储灌溉液和 T2 回液的 EC、基质含水率、单次灌溉量和累积灌溉量。

在每个处理的各重复小区中随机选定 3 株黄瓜,根据黄瓜生育期和外界气温变化情况,分别在苗期-初花期(1 次)、盛果期(2 次,使用保温棉被前、后各 1 次)监测植株的株高增长量,茎粗(各测量周期内第 1 次测量前,先标记近生长点展开叶片的叶柄基部下 1 cm 处,同周期内连续监测此处植株的茎粗),单叶片的叶面积(各测量周期内

第 1 次测量前,先标记新出叶片,连续监测该叶片的长与宽,两者的乘积再乘以系数 0.739 为该叶片面积 [17]), 单次监测周期为 10 ~ 15 d, 每 2 ~ 3 d 测量 1 次; 定期监测功能叶片的叶绿素含量 (SPAD-502 型叶绿素含量测定仪) 和气孔导度 (SC-1 型稳态气孔计), 采用 LI-6400XT 型便携式光合仪测定盛果期叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度的日变化; 盛果期取样测黄瓜品质: 维生素 C 含量 (2,6-二氯酚酚滴定法), 硝酸盐含量 (浓 H_2SO_4 -水杨酸法), 可溶性总糖含量 (蒽酮比色法), 粗蛋白含量 (凯氏定氮法)

和可滴定酸含量(碱测定法)^[18];分别统计每个处理每个重复的商品瓜产量,计算灌溉液生产效率(黄瓜产量与灌溉总量的比值)。

采用流量计自动记录灌溉量,Decagon 微型气象监测系统监测温室内气象数据。

1.4 数据分析

所有数据均采用 Excel 处理,利用 SPSS 17.0 进行差异显著性分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

通过利用 Decagon 微型气象监测系统监测温室

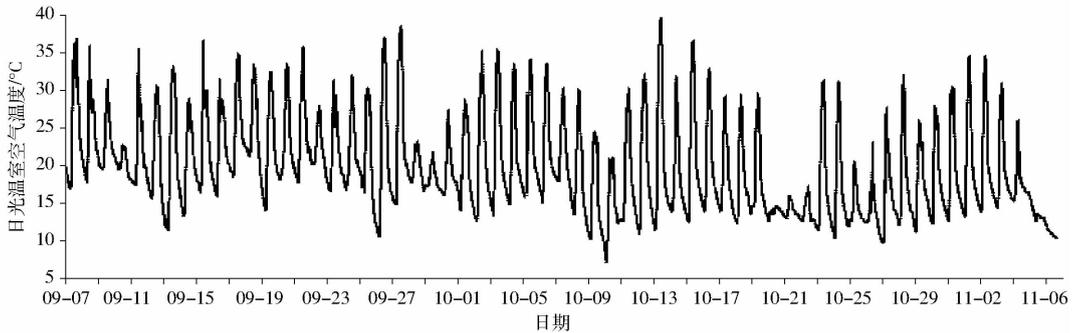


图2 日光温室内空气温度变化情况

Fig.2 Temperature variation of solar greenhouse

2.1 不同灌溉决策对黄瓜植株生长的影响

营养液是基质栽培下黄瓜植株生长所需水分和养分的唯一来源,灌溉决策直接影响植株营养生长,包括株高、茎粗、叶面积等,合理的灌溉管理可确保作物生长良好,避免营养液浪费,提高水分、养分利用率。

2.1.1 不同灌溉决策对株高的影响

9月8日—9月25日黄瓜处于营养生长期-初花、初果期,从图2中可知该时期内仍有高温天气,如灌溉量过大极易导致徒长,反之则生长缓慢,甚至出现花打顶现象,故合理灌溉是确保黄瓜植株正常生长的关键。图3中,整个监测周期内时序决策灌

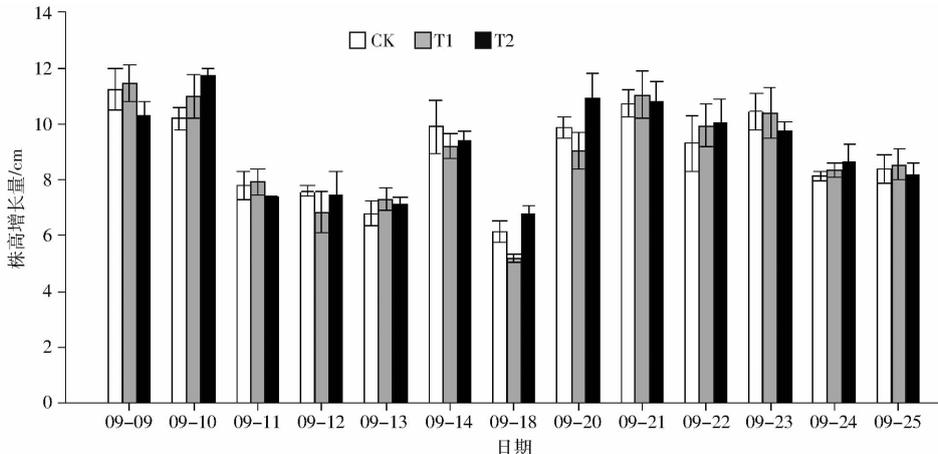


图3 2015年9月9日—9月25日黄瓜株高增长量

Fig.3 Daily increment of cucumber plant height during September 9 and 25, 2015

气象数据(图2),发现9月份温室内温度仍偏高,日平均气温均在20~25℃,大部分夜间平均气温在18℃以上,甚至高达22.8℃,此时黄瓜处于营养生长期-初果期,需注意土壤湿度(灌水量)与夜间温度,避免徒长。10月7日后出现明显降温,10月7日—10月21日的日平均气温已低于20℃,夜间温度也下降至12~15℃,该时期黄瓜生长较好;10月下旬再次降温,白天(07:00—18:00)平均气温已在25℃以下,近1/2天数低于20℃,为确保黄瓜正常生长,夜间覆盖保温被,减缓室内热量散失,使夜间的最低温度维持在12℃以上。

溉与基于水分传感器的单因子决策处理、基于水分和EC传感器的双因子决策处理下黄瓜的株高增长量变化趋势一致,温度适宜时株高日增长量为8~12 cm,温度偏低时株高增长量较小;分析不同灌溉决策下黄瓜株高日变化量,发现三者之间差异不明显,说明基于水分传感器的灌溉决策和基于水分传感器、EC传感器的灌溉决策对植株高度变化的影响不显著。

2.1.2 不同灌溉决策对茎粗的影响

植株生长点是营养体的细胞分裂增长速度最快、代谢活性最强的部位。距离生长点越近的营养器官组织活性越强,生长速率越快,同时更易受

外界因素的影响,包括气象因子、栽培介质、水分和养分等。在蔬菜栽培中,水肥管理对近生长点植株茎粗增长速率和最终的茎粗均有影响,生产管理中将该指标作为判断水分管理合理与否的依据。由图 4 可知,不同灌溉决策对茎粗增长速率有一定影响。第 1 个测量周期(营养生长期),不同处理的植株茎粗增长速率差异不明显,第 2、3 个测量周期(结果期),CK 和 T1 的增长速率差异不显著,且均大于处理 T2,分析认为这可能与结果期营养生长与生殖生长并存、植株蒸腾作用和生理代谢需水量增大有关。同时发现相同环境条件下不同灌溉决策对黄瓜植株茎粗生长也存在一定影响。第 2 个测量周期内,不同处理下植株茎粗初始值较接近,而茎粗值趋于恒定时,CK 与 T1 的值相近,且大于 T2;第 3 个测量周期内,不同处理植株茎粗初始值为 T2 大于 CK 和 T1,但茎粗增长趋于稳定时,不同处理下植株茎粗不存在明显差异。

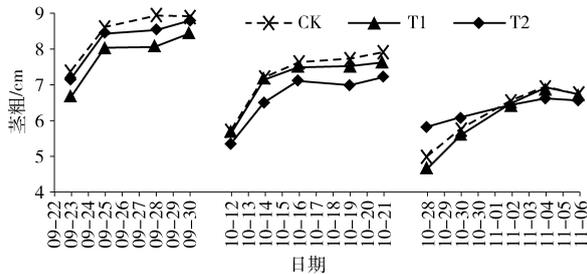


图 4 黄瓜植株茎粗变化情况

Fig. 4 Stem diameter variation of cucumber

2.1.3 不同灌溉决策对新生叶片生长的影响

营养液管理对新生叶片的扩展速率和完全展开功能叶片的面积均有重要影响。选定距离生长点最近的新出叶片,定期测量其长与宽,计算叶面积,对比不同处理下扩展速率及叶片完全展开的面积。发现(图 5)新叶扩展速率和完全展开时的叶片面积形成均受灌溉策略的影响,不同测量周期内均呈现出基于水分传感器的单因子灌溉决策处理 T1 的新叶扩展速率、完全展开的功能叶片叶面积与时序灌溉对照 CK 接近,基于水分传感器、EC 传感器的双因子决策处理 T2 均小于对照 CK 和处理 T1,但差异不显著。

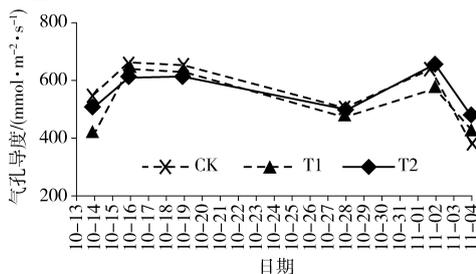


图 6 黄瓜叶片气孔导度和叶绿素含量 (SPAD 值)

Fig. 6 Stomatal conductance and chlorophyll content (SPAD value) of cucumber leaves

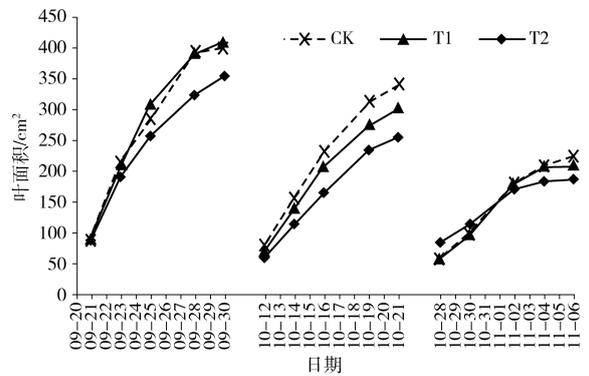


图 5 黄瓜新出叶片的叶面积变化情况

Fig. 5 Leaf area variation of cucumber leaves

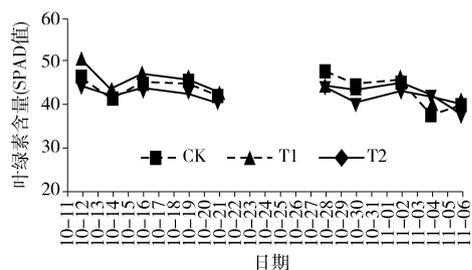
2.2 不同灌溉决策对黄瓜植株生理作用的影响

2.2.1 黄瓜叶片气孔导度和叶绿素含量

气孔导度是指气孔对水蒸气、CO₂ 等气体的传导度,它表示气孔张开程度,影响植株的蒸腾作用、光合作用和呼吸作用。气孔可以根据环境条件的变化来调节自己的开度而使植物在损失水分较少的情况下获取最多的 CO₂。因此,当其他环境条件一致时,水分供应情况对气孔开度有直接影响。从图 6 发现,对照与 2 个处理间气孔导度变化规律一致,同一测定时间点上气孔导度差异不明显。同时可看出,不同自动灌溉决策对盛果期黄瓜叶片叶绿素含量 (SPAD 值) 的影响差异不显著。

2.2.2 黄瓜叶片光合作用

在盛果期选择晴天测量不同灌溉策略下黄瓜叶片净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 和胞间 CO₂ 浓度 C_i 的日变化,分析灌溉制度对其光合作用的影响。从图 7 结果可以看出,3 种不同灌溉策略控制下,叶片净光合速率日变化规律一致,即先逐渐增大,在中午 12:00 达到峰值,然后逐渐下降;不同处理各时间点的净光合速率差异不明显,但时序决策灌溉 CK 的 P_n 峰值较处理 T1、T2 低。不同处理的蒸腾速率 T_r 日变化趋势相同,均在上午 10:00 达到最大;基于水分传感器和增加 EC 传感器辅助决策处理 T1、T2 的蒸腾速率 T_r 均高于对照,但差异不明显。同时可看到,处理 T1、T2 的气孔导度 G_s 和胞间 CO₂ 浓度与对照 CK 相比不存在差异。这说明处理



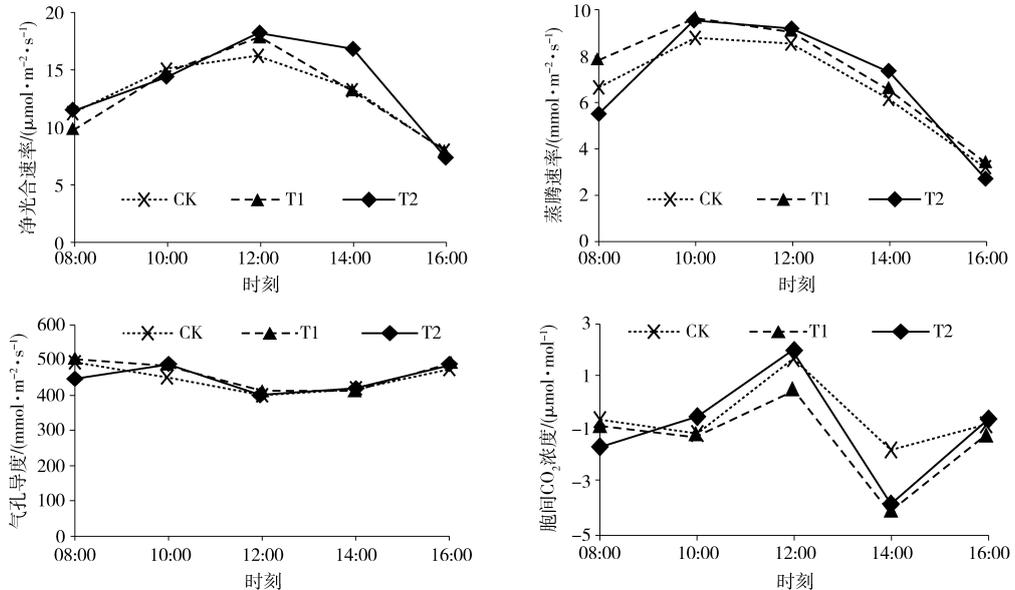


图7 黄瓜叶片净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 和胞间 CO_2 浓度 C_i 日变化

Fig. 7 Diurnal variations of net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration of cucumber leaves

T1、T2 2种灌溉决策的营养液供应满足了黄瓜的营养液需求,未对其叶片光合作用造成影响。

2.3 自动灌溉决策对黄瓜品质的影响

3种灌溉决策下基质栽培黄瓜的品质如表2所示,基于水分、EC传感器的双因子决策处理T2的可

溶性总糖和还原性维生素C含量最高,粗蛋白和可滴定酸含量稍低于对照而较处理T1高,硝酸盐含量与对照CK接近而低于T1。对照CK、处理T1和处理T2 3种不同自动灌溉决策管理下,黄瓜各品质指标的差异均未达到显著水平。

表2 不同灌溉决策对黄瓜品质的影响

Tab. 2 Quality of cucumber based on different irrigation strategies

处理	粗蛋白质量分数/ %	可溶性总糖质量分数/ %	还原性维生素C质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	可滴定酸质量分数/ %	硝酸盐质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	1.10 ± 0.13^a	2.70 ± 0.17^a	99.23 ± 6.21^a	0.084 ± 0.003^a	70.70 ± 8.84^a
T1	0.97 ± 0.09^a	2.66 ± 0.04^a	100.57 ± 8.42^a	0.077 ± 0.003^b	85.80 ± 5.70^a
T2	1.01 ± 0.06^a	2.79 ± 0.11^a	108.67 ± 4.62^a	0.078 ± 0.004^{ab}	71.50 ± 7.00^a

注:同列数值后不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

2.4 自动灌溉决策对黄瓜产量、灌溉量及灌溉液生产效率的影响

营养液管理影响黄瓜植株生长和生理代谢,最终影响黄瓜产量形成。科学合理的灌溉制度下,营养液的适量供应,可满足作物的水分、养分需求,确保产量。从表3可看出,基于水分传感器的单因子灌溉决策T1和基于水分、EC传感器的双因子灌溉决策T2的产量低于时序法对照CK,且处理T1较处理T2低,但均未达到显著水平,说明基于水分传感器或水分和EC传感器的自动灌溉决策可为黄瓜提供充足水分和养分,确保产量形成;而处理T2较T1更有利于黄瓜产量形成。

黄瓜定植缓苗后,利用水肥一体化智能装备,在系统控制下将自制高氮、高磷和高钾有机营养液配比混合,根据灌溉策略进行自动灌溉管理,流量计记录累计灌溉量(不包括缓苗前灌溉量)。发现基

于水分传感器的单因子灌溉决策T1的单株灌溉量和总灌溉量分别为1.35 L/d和3240 m^3/hm^2 ,显著低于对照CK(1.81 L/d和4336 m^3/hm^2),节约灌溉液25.97%。基于水分、EC传感器的双因子决策灌溉T2的单株灌溉量和总灌溉量分别为0.92 L/d和2208 m^3/hm^2 ,相比对照CK和处理T1分别节约灌溉量49.08%和31.85%。处理T1和T2的灌溉液生产效率分别为13.93 kg/m^3 和22.37 kg/m^3 ,分别较对照(10.97 kg/m^3)提高了26.98%和103.92%,且处理T2相比处理T1提高了60.59%。这说明基于水分传感器和基于水分、EC传感器的自动灌溉策略更能为黄瓜基质栽培提供合理的灌溉制度,有效降低灌溉量;而基于水分、EC传感器的双因子灌溉决策优化了基质盐分累积的淋洗制度,使灌溉制度得到了进一步完善。

表 3 基于不同灌溉策略的黄瓜产量、灌溉量及灌溉液生产效率

Tab.3 Yield, irrigation and production efficiency of irrigation solution based on different irrigation strategies

处理	产量/(kg·hm ⁻²)	增产率/ %	单株灌溉量/ (L·d ⁻¹)	累积灌溉量/ (m ³ ·hm ⁻²)	节水比 率/%	灌溉液生产效率/ (kg·m ⁻³)	灌溉液生产效 率提高比率/%
CK	47 647.30 ± 4 956.36 ^a		1.81 ± 0.08 ^a	4 336 ± 180 ^a		10.97 ± 0.78 ^c	
T1	45 142.50 ± 3 784.51 ^a	-5.27	1.35 ± 0.12 ^b	3 240 ± 282 ^b	25.97	13.93 ± 0.27 ^b	26.98
T2	46 766.00 ± 6 822.54 ^a	-1.85	0.92 ± 0.01 ^c	2 208 ± 1 ^c	49.08	22.37 ± 1.03 ^a	103.92

3 讨论

对于基质栽培,营养液灌溉量的合理性原则是既要满足作物对水分、养分的需求,又不至于造成肥、水流失浪费,或引起基质盐分累积等问题^[19]。回液量占灌溉液量比例、回液 EC 与灌溉液 EC 的差值可作为评价灌溉制度的标准,如回液量比例偏小或 EC 差值偏大,认为灌溉量偏小不能满足作物的水肥供应,或基质盐分积累,影响根系生长和水分、养分吸收;反之,灌溉量过大,造成营养液浪费,污染环境^[20-21]。有研究认为有 10%~30% 的灌溉液排出较合适^[22],SMITH^[5]认为排出液达到 30%~35% 可以较好淋洗基质盐分。本研究中,基于水分传感器单因子决策处理 T1 以 1.3 倍计算灌溉量为实际灌溉量,确保每次灌溉均有 30% 左右的排出液用以淋洗基质。处理 T1 黄瓜单株日均灌溉量和总灌溉量均显著低于时序法对照 CK;与对照相比所监测的黄瓜生长、生理及品质指标不存在差异;产量降低了 5.27%,但差异不显著,说明全覆盖的椰糠有机栽培系统中,基于水分传感器的单因子灌溉决策以 1.3 倍的计算灌溉量灌溉,既降低了营养液用量又使基质盐分得到了充分淋洗,确保了黄瓜的生长、产量和品质。

基质盐分偏高不仅会影响某些元素(如 Ca)吸收,还可能造成生理伤害,如根系腐烂等^[23]。但是,基质的盐分积累是一定时间段内非理想灌溉管理导致的结果,故具有过程性,如每次灌溉均增加灌溉液淋洗基质,一定程度上仍会造成灌溉液的浪费。本研究处理 T2 中,EC 传感器实时监测回液 EC,当其与灌溉液 EC 的差值大于 1 mS/cm 时,灌溉 1.3 倍计算灌溉量(同 T1)的营养液,一方面补充基质水分,另一方面淋洗基质盐分。结果显示,该处理的黄瓜长势、产量和品质较好,总灌溉量显著低于对照 CK 和处理 T1,而灌溉液生产效率显著高于 CK 和

T1。当排出液 EC 在适宜范围内,未出现基质盐分偏高,不会对黄瓜生长产生影响,故不需要使用过量的灌溉液淋洗基质。因此,认为增加 EC 传感器监测回液 EC 辅助决策灌溉,有效优化了淋洗制度,进一步降低了营养液灌溉量,提高了营养液利用效率,获得了更合理的灌溉决策。

上述关于灌溉决策的研究是在设施黄瓜椰糠有机栽培中开展的,栽培基质椰糠属于有机基质的一种,其理化性状与草炭、稻壳、菇渣等有机基质及岩棉、陶粒等惰性基质均存在一定差异,结合栽培基理化性状对营养液管理的影响,本研究结果可为设施黄瓜的其他基质栽培营养液灌溉管理提供参考,但相关灌溉决策需继续优化。有机基质栽培中,有机液和有机基质中除含有作物生长所需的 N、P、K 等多种养分元素外,还含有丰富的有机质和大量微生物等,这对基质阳离子交换能力和作物吸收养分元素均有影响,进而导致有机栽培灌溉管理与无机栽培存在差异,故本研究中基于水分、EC 传感器的灌溉决策在黄瓜非有机基质栽培中的应用有待进一步研究。

4 结束语

科学的营养液灌溉制度要为基质栽培作物提供适量的水分和养分,并创造良好的根系环境,既要避免灌溉量过大造成营养液浪费和基质溶氧量下降,又要避免淋洗不充分导致基质盐分积累。从本研究结果可知,基于水分、EC 传感器的双因子灌溉决策相比时序灌溉法提供了更接近椰糠有机栽培时黄瓜真实耗水量的灌溉制度,相比基于水分传感器的单因子灌溉决策进一步优化了椰糠基质淋洗制度,使营养液用量大幅降低,实现了节水节肥和灌溉水生产效率的提高。因此,基于水分、EC 传感器的双因子灌溉决策为黄瓜椰糠有机栽培提供了较合理的营养液灌溉制度,可用于设施黄瓜椰糠有机栽培的营养液自动灌溉管理。

参 考 文 献

- 李婷婷,马蓉丽,成妍,等. 中国蔬菜基质栽培研究新进展[J]. 农学学报,2013,3(4):30-34.
LI Tingting, MA Rongli, CHENG Yan, et al. New research progress of substrate cultivation for vegetables in China[J]. Journal of Agriculture, 2013,3(4):30-34. (in Chinese)
- 金永奎,易明珠,颜爱忠. 高效节水灌溉自动控制模式研究及应用[J]. 中国农机化学报,2016,37(5):253-257.

- JIN Yongkui, YI Mingzhu, YAN Aizhong. Research and application on automatic control mode of efficient water-saving irrigation [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016,37(5):253-257. (in Chinese)
- 3 肖克辉, 肖德琴, 罗锡文. 基于无线传感器网络的精细农业智能节水灌溉系统[J]. *农业工程学报*, 2010,26(11):170-175. XIAO Kehui, XIAO Deqin, LUO Xiwen. Smart water-saving irrigation system in precision agriculture based on wires sensor network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010,26(11):170-175. (in Chinese)
- 4 陈春宏, 杨志杰, 周强. 引进现代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. A preliminary study on the water and nutrient management under modern greenhouse cultivation[J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 1998,14(Supp.):57-64. (in Chinese)
- 5 SMITH D L. *Rockwool in horticulture*[M]. London:Grower Books, 1998.
- 6 ALBERTO L, HARM B, FRANS H, et al. Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navarra, Spain[J]. *Irrigation and Drainage*, 2003,52(2):177-188.
- 7 ABOU-HADID A F, EI-SHINAWY M Z, EI-OKSH I, et al. Studies on water consumption of sweet pepper under plastic houses [J]. *Acta Horticulture*, 1994,366:365-371.
- 8 ROH M Y, LEE Y B. Predictive control of concentration of nutrient solution according to integrated solar radiation during one hour in the morning[J]. *Acta Horticulturae*, 1996, 440:256-261.
- 9 MERIC M K, TUZEL I H, OZTEKIN G B. Effects of nutrition systems and irrigation programs on tomato in soilless culture[J]. *Agricultural Water Management*, 2011,99:19-25.
- 10 刘维峰, 吴扬俊. 节水灌溉方式的选择[J]. *北京农业工程大学学报*, 1994(1):75-79. LIU Weifeng, WU Yangjun. Selection of water-saving irrigation patterns [J]. *Journal of Beijing Agricultural Engineering University*, 1994(1):75-79. (in Chinese)
- 11 汪羽宁. 控制灌溉的土壤水分探头合理埋设深度研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010. WANG Yuning. Sensor placement for precise irrigation scheduling using soil moisture information[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (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 张芳, 张建丰, 薛绪掌, 等. 温室番茄基质栽培供液决策方法研究[J]. *西安理工大学学报*, 2016,32(3):295-301,337. ZHANG Fang, ZHANG Jianfeng, XUE Xuzhang, et al. Research on the decision method of supplying nutrient solution of tomatoes with substrate culture in greenhouse[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2016,32(3):295-301,337. (in Chinese)
- 14 郭世荣. *无土栽培学*[M]. 北京:中国农业出版社, 2003:77-132,423-425.
- 15 李友丽, 李银坤, 郭文忠, 等. 有机栽培水肥一体化系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(增刊):274-279. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s042&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.042. LI Youli, LI Yinkun, GUO Wenzhong, et al. Design and test of integrated water and fertilizer system in organic cultivation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(Supp.):274-279. (in Chinese)
- 16 杨志刚, 灌溉下限与嫁接方式对温室黄瓜生长及水分利用效率的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011. YANG Zhigang. The effect of irrigation lower limit and grafting methods on growth and water use efficiency of cucumber in greenhouse[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 17 裴孝伯, 李世诚, 张福墀, 等. 温室黄瓜叶面积计算及其与株高的相关性研究[J]. *中国农学通报*, 2005,21(8):80-82. PEI Xiaobo, LI Shicheng, ZHANG Fuman, et al. Study on leaf area calculation and its correlation with plant height of cucumber in greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005,21(8):80-82. (in Chinese)
- 18 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. *果蔬采后生理生化实验指导*[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2007.
- 19 陈玉良, 冯恭衍, 李益. 灌溉液的 pH、EC 值及灌溉量对温室黄瓜无土栽培的影响初探[J]. *上海蔬菜*, 1998(4):39-40. CHEN Yuliang, FENG Gongyan, LI Yi. The effect of pH, EC value and irrigation amount of irrigation solution on soilless cultivation of cucumber in greenhouse[J]. *Shanghai Vegetables*, 1998(4):39-40. (in Chinese)
- 20 HARDGRAVE M R. Recirculation systems for greenhouse vegetables[J]. *Acta Horticulture*, 1993,342:85-92.
- 21 SCHRODER F G, LIETH J H. Irrigation control in hydroponics[M] // SAVVAS D, PASSAM H. *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*. Athens: Embryo Publications, 2002: 103-141.
- 22 VILARNAU A. EI agua es escasa[M] // URRESTARAZU M. *Manual de cultivo sin suelo*. Universidad de Almeria Spain; Editorial Mundi-Prensa, 2000, 101:37-45.
- 23 CADAHIA C, MARTINEZ M, GIL C, et al. Tomato culture fertigation in peat bags and saline conditions[J]. *Acta Horticulture*, 1993, 335:101-107.