

梁新书, 廉晓娟, 张金良, 等. 基于土壤水分的自动滴灌模式对温室黄瓜产量及水肥利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(24): 141–145.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.24.034

# 基于土壤水分的自动滴灌模式对温室黄瓜产量及水肥利用效率的影响

梁新书<sup>1</sup>, 廉晓娟<sup>1</sup>, 张金良<sup>1</sup>, 张雪飞<sup>2</sup>, 杨 军<sup>1</sup>, 王正祥<sup>1</sup>, 张余良<sup>1</sup>, 王 艳<sup>1</sup>

(1. 天津市农业资源与环境研究所, 天津 300192; 2. 天津市农业科学院信息研究所, 天津 300192)

**摘要:**以日光温室黄瓜为研究对象, 以传统滴灌模式为对照, 研究基于土壤水分的自动滴灌模式(启动灌溉施肥的土壤水分含量下限为 75% 田间持水量, 灌水定额为 5 mm, 肥料氮浓度为 120 g/m<sup>3</sup>)对黄瓜生长、水肥利用效率及土壤理化性质的影响。结果显示, 与传统滴灌模式相比, 采用基于土壤水分的自动滴灌模式进行黄瓜水肥管理可使土壤根层水分含量保持在 75%~100% 田间持水量, 可维持黄瓜植株正常生长, 黄瓜产量提高 8.9%。该模式在整个生长季可有效节水 52.2%, 节肥 49.0%, 使灌溉水利用效率提高 127.7%, 肥料偏生产力提高 113.5%。另外, 该模式还可降低 0~20 cm 土层土壤养分和盐分的累积及 40~60 cm 土层含水量, 避免水分的深层渗漏。研究结果表明, 黄瓜基于土壤水分的自动滴灌模式是温室黄瓜丰产高效的重要水肥管理方式之一。

**关键词:**自动灌溉; 滴灌; 黄瓜; 土壤水分; 日光温室

**中图分类号:** S642.201 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)24-0141-05

我国设施蔬菜种植面积发展十分迅速<sup>[1]</sup>, 但是, 目前设施蔬菜生产大多采用大水大肥的管理模式, 有研究表明, 在经验畦灌条件下, 灌溉水的 50%~60% 渗漏到耕层以下, 大大降低了水分利用率<sup>[2]</sup>。传统过量施肥会引起土壤养分累积、酸化、盐渍化、地下水和大气污染等一系列问题, 对我国设施蔬菜种植体系的可持续发展利用构成了很大的威胁<sup>[3-6]</sup>。与此同时, 传统灌溉施肥以畦灌或沟灌为主, 这种方式费力费时, 所需劳动力成本在逐渐加大, 亟需自动控制的农业节水节肥技术。因此, 设施蔬菜灌溉施肥实现精准化和自动化控制是蔬菜安全生产的发展方向 and 必然趋势, 对节约水肥资源、提高劳动生产率和促进现代农业可持续发展具有重要意义<sup>[7]</sup>。

我国蔬菜灌溉施肥技术相对于农业发达国家比较落后, 系统成套性较差, 自动化及智能化程度较低。但是, 针对我国的国情和农业发展目标, 国内学者在蔬菜作物合理的灌溉施肥指标及配套的灌溉施肥设备研发等方面已取得很大进展。在蔬菜节水方面, 国内学者研究灌水定额主要借助蒸渗仪<sup>[2,8]</sup>、蒸腾仪<sup>[8-9]</sup>、蒸发皿<sup>[10]</sup>等仪器和测量土壤含水量<sup>[11-12]</sup>等方法。在蔬菜施肥方面, 多种蔬菜作物的需肥规律及平衡施肥研究也有了一定的结果<sup>[13-17]</sup>。另外, 水肥一体化技术被认为是一项高效的灌溉施肥技术, 目前此技术的研究

也逐渐成熟<sup>[18-19]</sup>。但是, 相比于农业发达国家, 我国蔬菜自动化灌溉施肥技术还有很大差距<sup>[20]</sup>。

黄瓜是设施蔬菜中种植面积较大且经济价值较高的作物, 但由于其需水需肥量大且根系较浅, 因此灌水施肥操作非常频繁且费时费力, 加之过量灌溉施肥问题尤为突出, 所以, 本试验以温室黄瓜为研究对象, 分析基于土壤水分的自动滴灌模式对温室黄瓜产量及水肥利用效率的影响, 旨在为基于土壤水分的自动滴灌模式能在设施蔬菜生产上推广应用提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点基本情况

试验于 2016 年 3 月 11 日—2016 年 7 月 10 日在天津市北辰区雨农蔬菜种植专业合作社 8 号日光温室进行。日光温室长 70 m, 室内跨度 9.8 m, 后墙高 2.2 m, 脊高 3.6 m, 供试温室内部温光条件见图 1。供试土壤为重黏土, 砂粒、粉粒及黏粒的比例分别为 1.3%、30.7% 及 68.0%。基础土样水解氮含量为 196.7 mg/kg, 速效磷含量为 116.0 mg/kg, 速效钾含量为 573.3 mg/kg, 有机质含量为 2.8%, 全盐含量为 0.38%, pH 值为 7.81, 容重为 1.2 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量(FC)为 30.8%。

### 1.2 试验设计

定植前撒施商品有机肥 22.5 t/hm<sup>2</sup>, 过磷酸钙 750 kg/hm<sup>2</sup>, 用旋耕机翻耕。做畦方式为传统的高平畦, 畦宽 80 cm, 沟宽 50 cm。供试作物为黄瓜, 2 叶 1 心的黄瓜幼苗于 2016 年 3 月 11 日定植, 每畦 2 行, 行内株距为 30 cm, 畦内行距为 40 cm, 种植密度为 51 300 株/hm<sup>2</sup>。定植后灌水 75 mm, 1 周后浇缓苗水 12 mm, 待根瓜坐住(4 月 18 日)后开始处理。试验共分 2 个处理:

传统滴灌模式(CK): 按照当地农民温室黄瓜滴灌管理习

收稿日期: 2018-09-12

基金项目: 国家科技支撑计划(编号: 2015BAD23B01-5); 天津市科技支撑重点项目(编号: 17YFZCNC00280); 天津市农业科学院院长基金(编号: 17009)。

作者简介: 梁新书(1988—), 男, 山东济宁人, 博士, 助理研究员, 主要从事设施蔬菜节水研究工作。E-mail: liangxinshu512@163.com。

通信作者: 王 艳, 硕士, 副研究员, 主要从事土壤和水资源高效利用等研究工作。E-mail: wangyanzhs@sina.com。

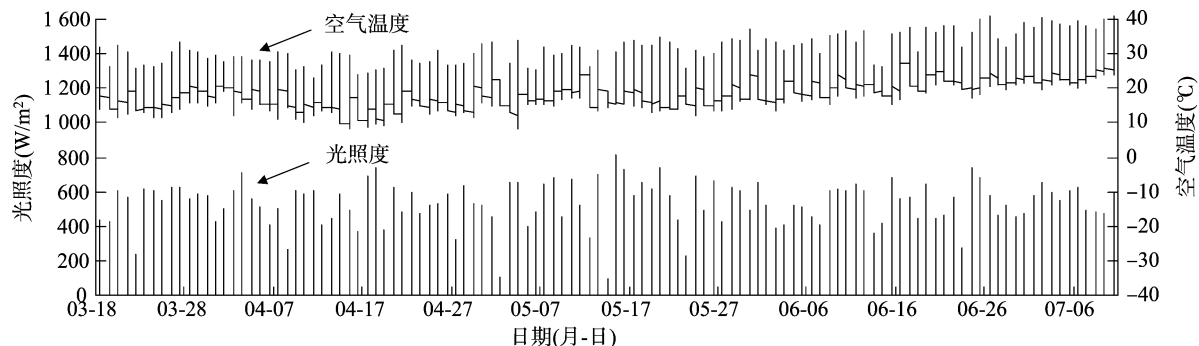


图1 日光温室内光照度和空气温度状况

惯进行水肥控制,隔 1 次水冲 1 次肥,每次灌溉定额为 18 mm,每次纯养分(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O)投入量为 90 kg/hm<sup>2</sup>;结果前期(5 月 30 日之前)氮磷钾比例为 20:15:15,结果中后期氮磷钾比例为 10:5:35。

基于土壤水分的自动滴灌模式[automatic drip irrigation based on soil moisture,简称 ADI-SW];此模式借助笔者所在课题组研发的灌溉施肥设备完成,此设备土壤水分传感器实时监测土壤墒情,可设定的参数包括判定是否启动灌溉的时间、灌水量和施肥量。此模式设定每天 08:00 控制系统开始判定,当 15 cm 深度土壤水分下降到一定阈值(黄瓜结果期土壤相对含水量阈值设为 75% FC,由前期预试验得出,水分传感器此时对应的土壤容积含水量读数为 37.6%)时,控制器开启定量灌水施肥,每次小定额供应水肥。每次灌水定额为 5 mm,每次施纯 N 浓度为 120 g/m<sup>3</sup>,氮磷钾比例为 1:0.3:1.5,折算后每次纯养分(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O)投入量为 16.8 kg/hm<sup>2</sup>,肥料种类为尿素、磷酸二氢钾和硝酸钾。

每个小区的面积为 3.9 m×7.5 m,每个处理设 3 次重复,随机区组排列。2 个处理均采用滴灌系统,滴头间距为 30 cm,保证每个滴孔对应 1 株植株,并安装了精度为

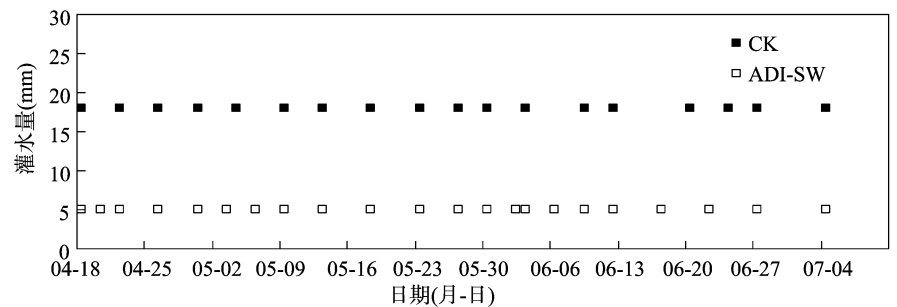
0.000 1 m<sup>3</sup> 的水表。试验过程中除水肥管理不同外,其余田间管理均与当地农民常规管理一致,具体灌溉施肥制度见图 2。

1.3 测定项目与方法

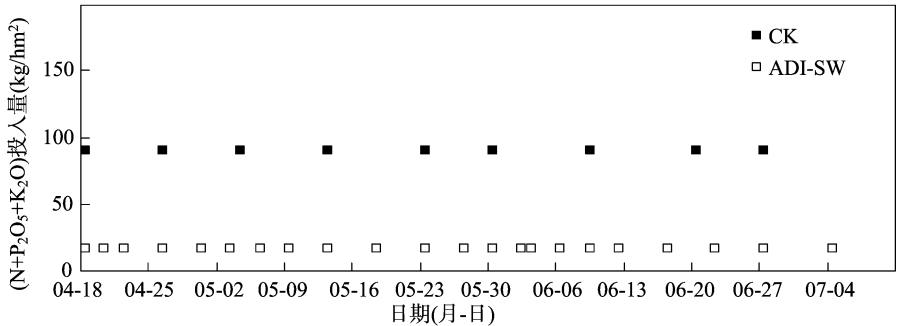
1.3.1 安装气象站监测温室内光辐射强度、空气温度及空气湿度的变化 温室内安装 1 个小型自动环境气象站(HOBO U30,ONSET-NRC,美国)并配置相应的传感器,利用数据自动采集器记录。光辐射强度(S-LIB-M003)及空气温度传感器(S-THB-M002)高度为距离地面 1.5 m;测量土温传感器(S-TMB-M006)埋深 10 cm;所有数据保存间隔为 30 min。

1.3.2 测定根层土壤水分动态变化 土壤水分传感器(S-SMD-M005)在处理前埋深 15 cm 来监测土壤容积含水量的变化。数据保存间隔为 30 min。

1.3.3 测定植株生长参数(株高、茎粗、叶片数及叶面积) 处理后每隔 7 d 每小区选取 3 株代表性植株,测定黄瓜的生长量。用米尺测量株高;用游标卡尺测量茎粗;记录叶片数;选取黄瓜最大叶片,测量其长度和宽度,然后根据黄瓜成熟叶片叶面积公式(叶面积=0.879 67×长×宽-63.239 6)计算



a. 不同灌溉制度的比较



b. 不同施肥制度的比较

图2 黄瓜传统滴灌模式和基于土壤水分的自动滴灌模式的具体灌溉施肥制度

可得最大叶面积。

1.3.4 经济产量 分别统计每小区黄瓜的产量,折算成单位面积产量;并且记录每小区商品瓜数(条),并折算成单株瓜数(条)。

1.3.5 水肥利用率的测定 分别记录各处理下黄瓜整个生长期的灌水与施肥总量,结合黄瓜产量计算水肥利用率。灌溉水利用效率为单位面积黄瓜产量与灌水总量的比值;肥料偏生产力为单位面积黄瓜产量与纯 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 及 K<sub>2</sub>O 投入量之和的比值。

1.3.6 测定拉秧后土壤的理化性质 在拉秧期取土样,取 0~20 cm、20~40 cm 及 40~60 cm 土层土样分析土壤水解氮、速效磷、速效钾、全盐含量及 pH 值。碱解氮含量采用碱解扩散法测定,有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗显色法测定,速效钾含量采用醋酸铵-火焰光度计法测定,全盐含量采用质量法测定,pH 值采用电位法测定,土水比为 1 g:2.5 mL。

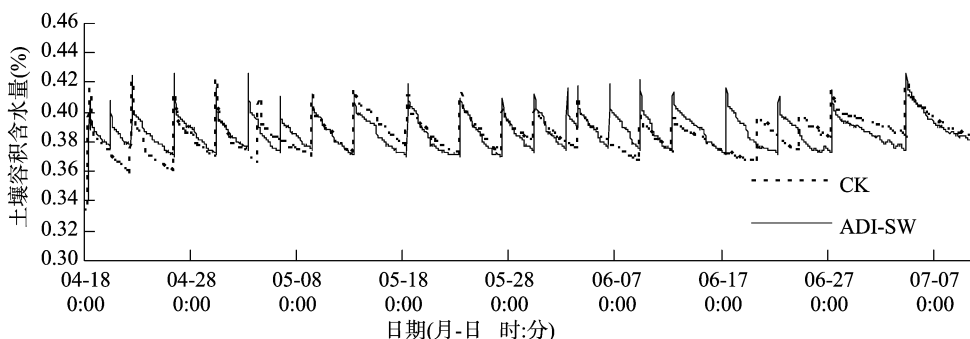


图3 传统滴灌模式和基于土壤水分的自动滴灌模式下根层土壤容积含水量的动态变化

## 2.2 黄瓜生长参数的分析

从黄瓜生长参数的数据(图4)可以得出,随着生长周期的延长,传统滴灌模式和基于土壤水分的自动滴灌模式两处理在株高、茎粗、叶片数及叶面积上均没有显著差异。表明相对于传统滴灌模式,基于土壤水分的自动滴灌模式在水肥投入减少的情况下并没有引起黄瓜生长受限。

## 2.3 黄瓜产量及产量组成分析

从黄瓜产量及产量组成数据(表1)可以得出,相比于传统滴灌模式,基于土壤水分的自动滴灌模式处理显著提高黄瓜产量 8.9%,而对瓜条数及平均单果质量均没有产生显著影响。表明相对于传统滴灌模式,基于土壤水分的自动滴灌模式在水肥投入减少的情况下仍能确保黄瓜高产。

## 2.4 灌溉水利用率和肥料偏生产力分析

从黄瓜产量及产量组成数据(表2)可以看出,相比于传统滴灌模式,基于土壤水分的自动滴灌模式处理在节水 52.2%、节肥 49.0% 的前提下,可使灌溉水利用效率提高 127.7%,肥料偏生产力提高 113.5%。说明智能滴灌模式是一种有效的节水节肥的水肥管理方式。

## 2.5 拉秧后不同土层土壤理化性状

从不同土层土壤理化性状的数据(图5)可以看出,黄瓜拉秧后,相比于传统滴灌模式,基于土壤水分的自动滴灌模式处理显著降低了 0~20 cm 土层的速效磷、速效钾含量及 40~60 cm 土层的全盐含量。虽然其他土层理化性状数据差异不显著,但总的趋势是,基于土壤水分的自动滴灌模式处理

## 1.4 数据处理与分析

数据处理采用 Excel 2010 及 SPSS 17.0,2 个处理的方差分析采用独立样本 *t* 检验,在 0.05 水平上进行比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 根层土壤水分动态变化

从土壤容积含水量的动态变化数据(图3)可以看出,传统滴灌模式共灌水 18 次,而基于土壤水分的自动滴灌模式共灌水 22 次。处理开始后,传统滴灌模式每次灌水前传感器监测的土壤容积含水量下限的范围为 35.86%~38.35%,变异幅度较大,会造成每次灌溉前根层土壤缺水严重或根本不缺水的情况会发生,如此不合理的灌溉往往会导致水分的浪费;而基于土壤水分的自动滴灌模式处理下启动灌水施肥程序前传感器监测的土壤容积含水量下限范围为 37.03%~37.56%,变异幅度较小,此数值对应的相对含水量均为 70%~75% FC,能够保证根层土壤处于适宜水分范围内。

可降低土壤碱解氮、速效磷、速效钾和全盐的含量,提高土壤 pH 值。另外,基于土壤水分的自动滴灌模式处理可有效降低深层土壤(40~60 cm)的含水量,避免土壤深层渗漏,减少水分的浪费。说明基于土壤水分的自动滴灌模式可降低土壤养分和盐分的累积,避免土壤酸化,是一种有效保护土壤环境的水肥管理方式。

## 3 结论与讨论

水分和养分是作物生长发育的两大必需要素,合理的灌溉施肥措施是蔬菜作物高产高效的关键。一般认为,按照蔬菜作物生长阶段对水分和养分的需求,定量地供给到作物根系附近,就可以实现作物丰产高效的目的。有研究表明,按照设施黄瓜需水需肥规律,采用自动灌溉施肥系统,实行每日供应水肥可达到节水节肥丰产的效果。但是,当异常天气出现时,按照黄瓜需水需肥规律进行自动水肥管理效果不理想,所以还需配备相应的土壤水分监测传感器进一步调整灌溉施肥决策,进而实现变量控制作物水肥供应<sup>[21]</sup>。

本试验中,基于土壤水分的自动滴灌模式借助土壤水分测定仪监测土壤墒情,当土壤水分下降到一定阈值(结果期阈值为 75% FC,15 cm 土层深度水分传感器读数为 0.376)时,借助控制器进行定量灌水施肥,每次灌水定额为 5 mm,可以保证土壤水分保持在根层土壤,另外,从拉秧后不同土层的含水量数据也可看出,滴灌智能模式的灌溉强烈影响 0~40 cm 土层的土壤含水量,没有造成水分向更深土层的渗

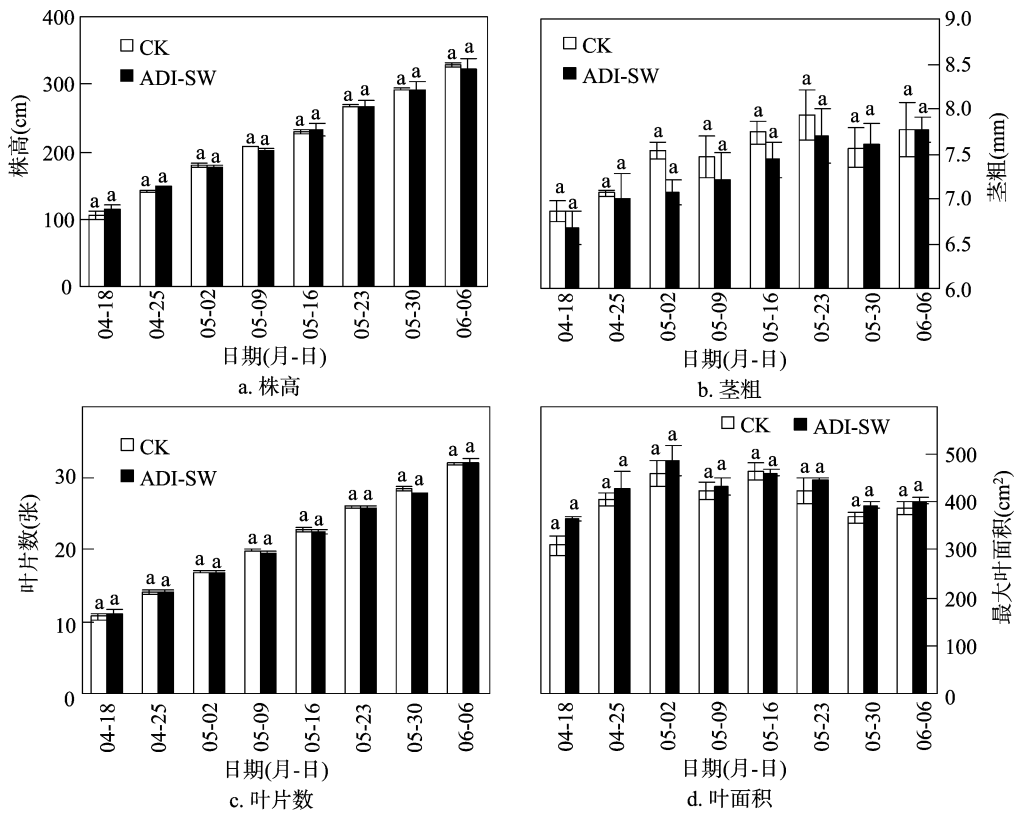


图4 传统滴灌模式和基于土壤水分的自动滴灌模式对黄瓜生长参数的影响

| 表 1 传统滴灌模式和基于土壤水分的自动滴灌模式对<br>黄瓜产量及产量组成的影响 |              |               |                            |
|---|--------------|---------------|----------------------------|
| 处理  | 瓜条数<br>(条/株) | 平均单果质量<br>(g) | 产量<br>(t/hm <sup>2</sup> ) |
| CK  | 9.0 ± 1.3 a  | 196.0 ± 3.5 a | 90.4 ± 3.2 b               |
| ADI - SW                                  | 9.6 ± 0.3 a  | 199.2 ± 3.5 a | 98.5 ± 1.8 a               |

注:同列数据后标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。  
表 2 同。

| 表 2 传统滴灌模式和基于土壤水分的自动滴灌模式对<br>黄瓜灌溉水利用率和肥料偏生产力的影响 |             |                   |                |
|---|-------------|-------------------|----------------|
| 处理  | 灌水量<br>(mm) | 灌溉水利用率<br>(kg/mm) | 比 CK 增加<br>(%) |
| CK  | 411         | 220.0 ± 18.2 b    | —              |
| ADI - SW  | 97          | 501.0 ± 9.7 a     | 127.7          |

| 处理       | N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + K <sub>2</sub> O 施肥量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 肥料偏生产力<br>(kg/kg) | 比 CK 增加<br>(%) |
|----------|---|-------------------|----------------|
| CK       | 900   | 100.4 ± 8.0 b     | —              |
| ADI - SW | 459   | 214.4 ± 3.8 a     | 113.5          |

漏<sup>[22]</sup>。根系是作物吸收水分和养分的重要器官,黄瓜的根系主要分布在 0 ~ 30 cm 土层中,基于土壤水分的自动滴灌模式可以使土壤有效水分和养分的分布与黄瓜根系分布保持空间一致性,并且使根层土壤的含水量始终基本处于 75% ~ 100% FC 之间,这可能是可实现黄瓜丰产高效的重要原因<sup>[11-12,23]</sup>。采用土壤含水量下限和小定额水肥供应的基于土壤水分的自动滴灌模式可以实现水肥管理的变量控制,能够解决由土壤、气候、人事操作等变化所引起的水肥管理措施

也需随之改变的问题,可以更好地提高温室黄瓜水肥利用率。现阶段,依据土壤相对含水量的水平进行温室黄瓜灌溉已被广泛证明是可取的,但是,国内土壤水分传感器设备却存在差异,因此,不同的水分传感器在应用前应充分了解其特性,应提前测定土壤相对含水量为 75% 田间持水量时土壤水分传感器所对应的数值,可把此值作为灌溉程序启动的土壤水分下限值。本试验结果表明,基于土壤水分的自动滴灌模式可以更好地实现设施黄瓜节水节肥与可持续种植。

参考文献:

[1] 符娜,刘小刚,杨启良. 设施蔬菜水肥高效调控的研究进展[J]. 安徽农业科学,2013,41(31):12314-12316,12331.  
[2] 高丽红,王树忠,任华中,等. 日光温室果菜农艺节水综合技术研究 与示范[J]. 中国科技成果,2009,10(23):13-15.  
[3] 张福锁,马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J]. 土壤与环境,2000,9(2):154-157.  
[4] 李银坤,武雪萍,武其甫,等. 不同水氮处理对温室黄瓜产量、品质 及水分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2010(3):21-24,30.  
[5] Hvistendahl M. China's push to add by subtracting fertilizer[J]. Science,2010,327(5967):801.  
[6] Wang Z,Li S. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on plant growth and nitrate accumulation in vegetables[J]. Journal of Plant Nutrition,2004,27(3):539-556.  
[7] 白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3477-3492.  
[8] 孙丽萍,温永刚,王树忠,等. 灌水量对日光温室黄瓜灌溉水分配

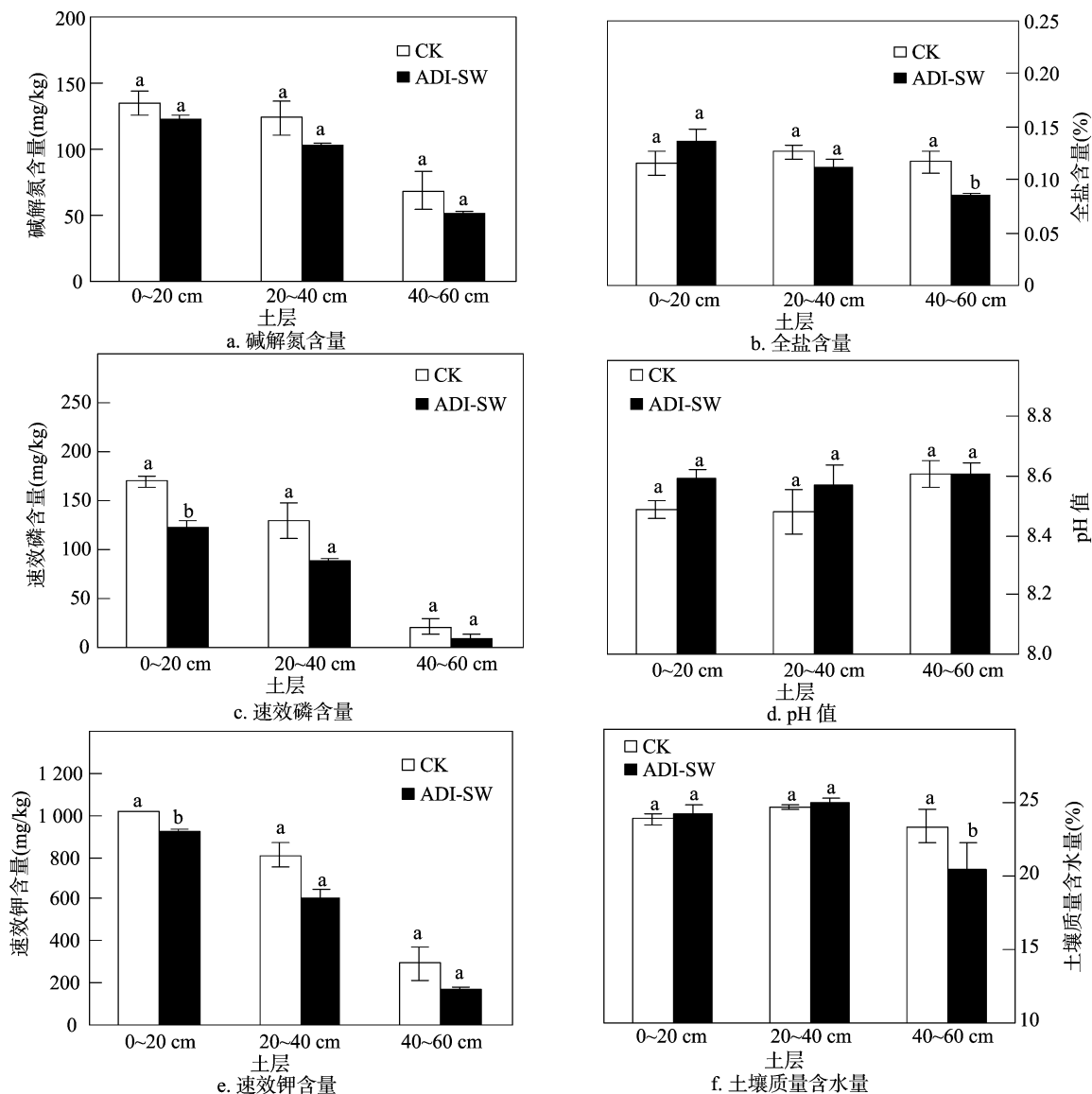


图5 传统滴灌模式和基于土壤水分的自动滴灌模式对黄瓜拉秧后不同土层土壤理化性状的影响

的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(4): 173-178.

[9] 孔祥悦, 王永泉, 睦晓蕾, 等. 灌水量对温室自根与嫁接黄瓜根系分布及水分利用效率的影响[J]. 园艺学报, 2012, 39(10): 1928-1936.

[10] 赵伟霞, 蔡焕杰, 单志杰, 等. 无压灌溉日光温室番茄高产指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 16-21.

[11] 贺志群, 邹志荣, 陈小红, 等. 温室黄瓜节水灌溉指标的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 77-80.

[12] 魏恒文, 杨培岭. 日光温室黄瓜智能灌溉控制指标研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 63-65.

[13] 陈清, 张福锁, 李晓林. 蔬菜生产的氮素调控技术与应用[J]. 中国蔬菜, 2005(增刊1): 57-63.

[14] Ren T, Christie P, Wang J, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(1): 25-33.

[15] 高兵, 李俊良, 陈清, 等. 设施栽培条件下番茄适宜的氮素管理和灌溉模式[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2034-2042.

[16] 高丽, 李红岭, 王铁臣, 等. 水氮耦合对日光温室黄瓜根系生

长的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 58-64.

[17] 李俊良, 张经纬, 王丽英, 等. 根层调控对设施番茄生长及氮素利用的影响[J]. 中国蔬菜, 2011(增刊1): 31-37.

[18] 黄绍文. 设施番茄水肥一体化技术[J]. 中国蔬菜, 2013(13): 40-41.

[19] 高祥照, 杜森, 钟永红, 等. 水肥一体化发展现状与展望[J]. 中国农业信息, 2015, 173(4): 14-19.

[20] 白由路. 我国肥料发展若干问题的思考[J]. 中国农业信息, 2014(22): 5-9.

[21] 张金良, 梁新书, 廉晓娟, 等. 自动灌溉施肥模式对温室黄瓜产量及水肥利用的影响[J]. 节水灌溉, 2017(5): 1-4, 10.

[22] 谷丽丽, 魏珉, 侯加林, 等. 精准灌溉施肥对日光温室土壤性状及黄瓜产量品质的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4507-4516.

[23] Liang X S, Gao Y N, Zhang X Y, et al. Effect of optimal daily fertigation on migration of water and salt in soil, root growth and fruit yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in solar-greenhouse[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e86975.