



岳焕芳,李友丽,安鑫语,张雪梅,赵倩,胡潇怡.基于水分传感器的灌溉决策对基质栽培草莓生长、产量与品质的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(11):39-49.

YUE Huanfang, LI Youli, AN Xinyu, ZHANG Xuemei, ZHAO Qian, HU Xiaoyi. The impact of irrigation decisions based on moisture sensor on the growth, yield and quality of strawberries cultivated in substrate[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11): 39-49.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.11.05

基于水分传感器的灌溉决策对基质栽培草莓生长、产量与品质的影响

岳焕芳¹ 李友丽^{2*} 安鑫语³ 张雪梅¹ 赵倩² 胡潇怡¹

(1. 北京市农业技术推广站, 北京 100029;

2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097;

3. 天津农学院, 天津 300384)

摘要 为探明不同灌溉决策对草莓生长、产量和品质的影响,根据水分传感器位置和基于水分传感器决策灌溉停止的方法设置4个处理:T1、T2和T3处理水分传感器位置分别为距植株和基质表面0、0 cm,7.5、0 cm,0、10 cm,灌溉停止由基质田间持水量和水分传感器监测值计算的灌溉量决策;T4处理水分传感器位置同T1处理,灌溉停止由水分传感器监测值直接触发,测定不同处理的草莓光合特性、水分利用效率和产量等指标。结果表明:4个处理总灌溉量依次为T4>T2>T3>T1,T2和T4处理分别提高了栽培中后期草莓叶片光合作用水分利用效率。T2处理单果重最高,单株产量为107.8 g,较其他处理显著提高了36.8%、18.1%和10.1%($P<0.05$);T2处理的果实硬度和可溶性糖含量最高,且栽培中期显著高于其他处理($P<0.05$);贮藏期间,T2处理腐败率最低、腐败速度最慢,第7天T2处理的腐烂率相比T1、T3和T4处理分别降低了25.0%、14.2%和7.7%。综上,水分传感器布设距植株7.5 cm、基质表面0 cm和灌溉停止由基质田间持水量和水分传感器监测值计算的灌溉量决策(T2)更利于草莓增产、提质,适用于草莓基质栽培中后期的灌溉管理。

关键词 水分传感器;灌溉决策;草莓;产量;品质

中图分类号 S627;S365

文章编号 1007-4333(2024)11-0039-11

文献标志码 A

The impact of irrigation decisions based on moisture sensor on the growth, yield and quality of strawberries cultivated in substrate

YUE Huanfang¹, LI Youli^{2*}, AN Xinyu³, ZHANG Xuemei¹, ZHAO Qian², HU Xiaoyi¹

(1. Beijing Agricultural Technology Extension Station, Beijing 100029, China;

2. Beijing Research Centre of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China;

3. Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract In order to investigate the effects of different irrigation decisions on strawberry growth, yield and quality, four treatments were set according to the position of moisture sensor and the method of irrigation stop based on water sensor, which were used for irrigation management in the middle and late stage of strawberry substrate cultivation. T1, T2 and T3 processed moisture sensors located at distances of 0, 0 cm, 7.5, 0 cm, 0, 10 cm, irrigation stop was decided by the irrigation amount calculated by the field water holding capacity of the substrate and the monitoring value of the moisture sensor. T4 processed the same position of the moisture sensor as T1, irrigation stop was directly triggered by the monitoring value of the moisture sensor. The photosynthetic characteristics, water use efficiency and yield of strawberries under different treatments were determined. The results showed that the total irrigation amount of the four treatments was T4>T2>T3>T1, T2 and T4 treatments significantly improved the photosynthesis and water use efficiency of strawberries in the middle and late stages of cultivation. T2 treatment had the highest single fruit weight, single plant yield was 107.8 g, which significantly increased by 36.8%, 18.1% and 10.1% ($P<0.05$); T2 treatment had the highest fruit hardness and soluble sugar content, and was significantly higher than other treatments in the middle stage of cultivation ($P<0.05$); During storage, T2 treatment had the lowest rot rate and the slowest rot rate, the rot rate of T2 treatment on the 7th day compared with T1, T3 and T4 treatments decreased by 25.0%, 14.2% and 7.7% respectively. In conclusion, the moisture sensor layout at 7.5 cm from the plant and 0 cm from the substrate surface, and the irrigation stop decision based on the field water holding capacity of the substrate and the monitoring value of the moisture sensor (T2) is more conducive to strawberry yield and quality improvement, and is suitable for irrigation management in the middle and late stages of strawberry substrate cultivation.

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 云南省科技计划项目(202302AE090020);北京市农林科学院改革与发展项目;2024年特色作物创新团队项目(BAIC04-2024)

第一作者: 岳焕芳(ORCID:0009-0001-1882-4505),高级农艺师,主要从事节水灌溉技术试验示范和推广研究,E-mail:yuehuanfang@163.com

通讯作者: 李友丽(ORCID:0009-0007-3743-9841),高级农艺师,主要从事设施蔬菜水肥一体化技术研究,E-mail:liyl@necita.org.cn

and 0, 10 cm from the plant and substrate surface, respectively. The field water capacity of matrix and the monitoring value of moisture sensor were used to calculate the irrigation amount. The position of the moisture sensor in T4 treatment was the same as that of T1. The irrigation stop was triggered directly by the moisture sensor monitoring value. The photosynthetic characteristics, water use efficiency and yield of strawberries under different treatments were determined. The results showed that the total irrigation quantity of the four treatments showed the order of $T4 > T2 > T3 > T1$, and T2 and T4 treatments respectively improved the photosynthesis and water use efficiency of strawberry leaves in the middle and later stages of cultivations. The single fruit weight in T2 treatment was the highest, with a single plant yield of 107.8 g, significantly increasing by 36.8%, 18.1% and 10.1% compared with other treatments ($P < 0.05$). The fruit hardness and soluble sugar content in T2 treatment were the highest, and significantly higher than other three treatments during the middle cultivation stage ($P < 0.05$). During storage, the decay rate was the lowest and the decay rate was the slowest in T2 treatment. On the 7th day, the decay rate in T2 treatment decreased by 25.0%, 14.2% and 7.7%, respectively, compared with T1, T3 and T4 treatments. In summary, the moisture sensor layout distance is 7.5 cm from the plant, 0 cm from the substrate surface and the decision to stop irrigation based on the field water holding capacity of the substrate and the monitoring values values of the moisture sensors (T2) are more conducive to increasing strawberry yield and quality, and are suitable for irrigation management in the middle and later stages of strawberry substrate cultivation.

Keywords moisture sensor; irrigation decision; strawberry; yield; quality

草莓味道鲜美、风味独特,营养丰富,深受消费者喜爱;其采摘周期长,经济价值高,在我国草莓种植面积呈逐年递增趋势,产量居世界首位^[1]。草莓通过叶片进行光合作用,光合产物形成产量和品质物质,品质指标主要包括维生素C等营养品质指标及果实硬度、色泽等商品品质指标^[2-3],这也是生产者和消费者重点关注的指标,对经济效益存在重要影响。草莓生长和果实品质受品种^[4]、环境因子^[5-7]、灌溉^[8]、施肥^[9]等多方面因素影响。生产中,因温室环境受季节变换影响,随采收期推进,草莓中后期叶片光合能力变弱,果实品质易呈现下降的趋势,如畸形果增多,糖、酸和氨基酸等物质含量下降^[10]。在草莓栽培中后期加强生产管理对促进植株生长、果实保质提质十分重要。

灌溉是草莓栽培(特别是基质栽培)管理中最频繁的操作之一,直接影响草莓生长、果实产量和品质形成。已有研究表明水肥管理对草莓栽培后期生长有一定影响^[11-12],结果期灌溉量过多或过少都会显著影响草莓单果重和品质^[12-13]。张智等^[8]研究发现中等灌溉水平有利于草莓可溶性糖含量、糖酸比和可溶性蛋白含量提升。然而,当前草莓生产仍主要依靠种植者的经验进行灌溉管理,灌溉过量、不足或不及时等现象经常出现,草莓产量和品质缺乏保障。因此,针对草莓栽培开展灌溉决策方

法研究具有重要意义。

设施栽培下,一般认为监测与植株耗水情况密切相关的栽培介质含水量,可以直接或间接决策灌溉管理^[14-15]。土壤水分传感器可以连续监测、获取土壤含水量数据^[16-17],通过比较施肥机控制系统设置参数与启动和停止灌溉2个时刻栽培介质含水量实时值,进行灌溉管理。电容式或频域反射式(FDR)水分传感器具有成本低、可靠性好和维护方便等优点,且有不少FDR水分传感器(如EC-5传感器)被证明适用于基质^[17]。近年来基于水分传感器的灌溉方法在国内得到了广泛研究和应用^[18]。然而,土壤水分传感器是监测传感器附近有限区域的土壤或基质的含水量,且土壤或基质在空间上存在异质性,加之滴灌属局部灌溉,故水分传感器的位置会影响灌溉效率^[19-20]。水分传感器布设位置优化研究已成为基于水分传感器灌溉决策研究的重点^[21],在番茄^[22]、黄瓜^[23]和生菜^[24]等栽培上取得了不少研究成果。但是,针对草莓基质栽培的相关研究鲜见报道。同时,实际应用中一般只使用土壤或基质含水量低临界值来启动预设灌溉量的灌溉,缺少对采用含水量高临界值停止灌溉方法的应用和评价。为此,本研究拟以水分传感器布设位置和水分传感器决策灌溉停止方法为因素设置处理,通过分析灌溉策略对草莓栽培中后期叶片光合特征、水分利用效率、产

量和果实品质的影响,旨在获得利于草莓栽培中后期果实品质提升的灌溉策略,以期为草莓优质、高产和高效栽培提供技术保障。

1 材料与方法

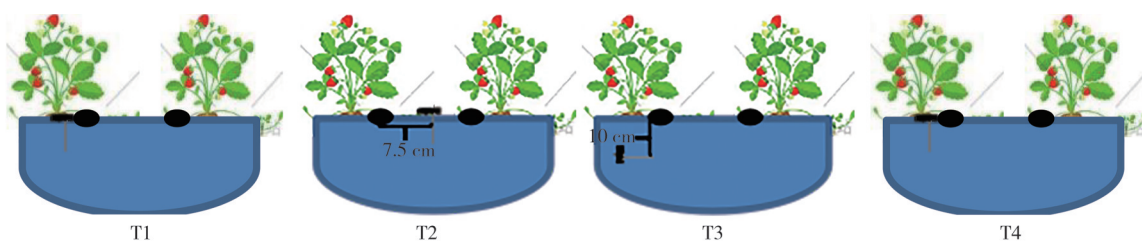
1.1 试验材料

试验于 2023 年 2—5 月在昌平区嘉年华 D4 日光温室进行。温室为钢架结构,长 50 m、宽 8 m。供试草莓品种为‘圣诞红’,采用高架栽培,基质为复合基质(田间持水量为 41%),定植密度 5 336 株/667 m²。滴灌灌溉,滴头间距 15 cm、流量 1.38 L/h。灌溉首部设备为北京市农林科学院智能装备技术研究中心自主研发的单通道施肥机(FAE-1000)。施肥机内嵌不同处理的灌溉策略,在其系统程序控制下实现各试验区的自动灌溉管理。各试验区主管上安装智能水表(0.001 m³)独立统计灌溉量。灌溉液 EC 值为 2.0 mS/cm,肥料为复合型水溶性肥

(N:P₂O₅:K₂O=11:11:35)。

1.2 试验处理

本试验于 2023 年 2 月 20 日开始进行灌溉处理,至 5 月 3 日草莓拉秧时结束。根据水分传感器距离植株和基质表面的位置设置 3 个处理:T1、T2 和 T3 处理水分传感器位置分别为距植株和基质表面 0、0 cm,7.5、0 cm,0、10 cm,灌溉停止由基质田间持水量和水分传感器监测值计算的灌溉量决策,具体计算方法见公式(1)和(2);为探究基质含水量高临界值直接触发停止灌溉的影响,本试验设置了 T4 处理,水分传感器位置同 T1 处理,灌溉停止由水分传感器监测值直接触发。所有处理灌溉频率决策方法相同,为累积辐照法。采用适用于基质栽培的 EC-5 传感器(±2%VWC, DECAGON METER Group, 美国)^[6]监测基质含水量,水分传感器的布设位置如图 1 所示。每个处理 3 次重复,独立灌溉管理,其他日常生产管理完全一致。



T1、T2 和 T3 处理水分传感器位置分别为距植株和基质表面 0、0 cm,7.5、0 cm,0、10 cm;T4 处理水分传感器位置同 T1 处理。下同。

The position of water sensor in T1, T2 and T3 treatment was 0、0 cm, 7.5、0 cm, and 0、10 cm from the surface of plant and substrate, respectively, and the position of water sensor in T4 treatment was the same as that in T1 treatment. The same below.

图 1 4 个处理水分传感器布设位置

Fig. 1 Moisture sensor layout position for 4 treatments

本试验采用累积光辐照法用于决策灌溉频率。在试验温室中部位置安装有太阳总辐射传感器(±0.05 W/m², DAVIS6450, 美国),用于采集温室内太阳辐射(R_s , W/m²),采集周期为 1 min/次;然后根据公式(1)计算累积辐射(W , J/cm²),当累积辐射达到设定阈值(500 J/cm²)时,灌溉启动。前 3 个处理的灌溉量(M , L)由基质田间持水量、水分传感器监测值和基质体积等参数通过公式(2)计算获得,并由排出液 EC 值辅助调整。累积辐射和灌溉量计算公式如下:

$$W = \sum_{i=0}^n R_{si} \times 60 / 10\,000 \quad (1)$$

式中: W 为累计辐射, J/cm²; n 为时间, min; R_{si} 为第 i min 太阳辐射传感器采集的辐射值, W/m²。

$$M = 1\,000 \times (q_1 - q_2) \times V \times \frac{\rho}{\eta} \quad (2)$$

式中: M 为灌溉量, L; q_1 为基质田间持水量, %; q_2 为当前时刻水分传感器监测值, %; V 为基质体积, m³; ρ 为土壤湿润比, 取 100%; η 为水分利用效率, 取 1。

基质栽培一般需要一定的排出液量,用于淋洗基质避免盐分累积。本试验通过监测排出液的 EC 值,将其与本次灌溉液的 EC 进行比较,根据两者差值调整灌溉量。当两者 EC 差值 > 0.5 mS/cm 时,实际灌溉量调整为 1.3 倍。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 光合特性测定

在栽培中期(3月中旬)和栽培后期(4月中旬)

的晴天上午9:30—11:30,各处理重复小区随机选择5株长势一致的草莓植株,采用Li-6400XT型光合仪测定第3片展平功能叶的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)。

1.3.2 水分利用效率计算

利用净光合速率和蒸腾速率计算瞬时水分利用效率(IWUE)。计算公式如下:

$$IWUE = \frac{Pn}{Tr} \tag{3}$$

式中:Pn为净光合速率,μmol/(m²·s);Tr为蒸腾速率,mmol/(m²·s)。

利用全生育期草莓单株灌溉量(I)和单株产量(Y),计算水分利用效率(WUE)。计算公式如下:

$$WUE = \frac{Y}{I} \tag{4}$$

式中:Y为单株产量,g;I为单株灌溉量,L。

1.3.3 果实产量测定

各处理重复小区选取6株具有代表性草莓植株进行标记,用于产量监测。自3月1日开始,每周采收1次,分小区独立记录果实质量,测定单果重。统计全生育期以及3月1日至拉秧期间草莓的单株产量。

1.3.4 果实品质测定

采收大小一致、着色均匀、无机械损伤且无病虫害的成熟果实,带回实验室进行果实品质测定。一份用于测定果实硬度(GY-1便携式硬度计)和可溶性固形物(PAL-1折光仪)、可溶性糖(蒽酮比色法)、维生素C含量(2,6-二氯酚靛酚比色法)测定;一份用于采后贮藏的果实品质测定,即各重复小区草莓果实用保鲜盒独立包装,放置在4℃冰箱冷藏,每天观察记录果实失重率和腐烂率,并进行感官评价。

腐烂率:以草莓果实表面出现水渍状病斑作为果实腐烂的判别依据,每隔24 h统计腐烂果的个数。计算公式如下:

$$\text{腐烂率} = \frac{\text{腐烂个数}}{\text{总个数}} \times 100\% \tag{5}$$

失重率:每隔24 h测定一次果实质量。计算公式如下:

$$\text{失重率} = \frac{\text{初始质量} - \text{第}n\text{天质量}}{\text{初始质量}} \times 100\% \tag{6}$$

感官评价。对草莓果实颜色、光泽度、果实形态、水渍斑和腐败程度进行评定赋分,评价标准见表1。

表1 感官评分表

Table 1 Sensory rating table

颜色 Colour		光泽度 Gloss		果实形态 Fruit morphology		水渍斑 Water stain		腐败程度 Corrup	
状态	分值	状态	分值	状态	分值	状态	分值	状态	分值
玫红色	2	光亮	2	果实完整,无萎缩	2	无	2	无明显腐败	2
少部分深红	1.5	略暗淡	1.5	果实较完整,稍萎缩	1.5	1~3个	1.5	轻度腐败	1.5
紫红色	1	暗淡	1	果实局部褐变,明显萎缩	1	1/4<面积<1/2	1	中度腐败	1
褐变	0	非常暗淡	0	严重萎缩,霉变	0	面积>1/2	0	重度腐败	0

1.4 数据处理及统计分析

采用Excel软件进行数据统计和作图,利用SPSS 20.0统计软件(Tukey检验)进行差异显著性分析,显著性水平为P<0.05。

2 结果与分析

2.1 基于水分传感器的灌溉策略对基质栽培草莓灌溉量的影响

监测不同处理基质含水量变化(图2),基质含水量根据灌溉频率呈现不同的波动。T1处理基质

含水量变化范围为26.13%~44.26%,T2为26.09%~44.85%,T3为28.26%~42.45%,T4为31.27%~43.12%。不同处理草莓全生育期的灌溉量如图3所示,4个处理草莓全生育期的灌溉量依次为14.6、16.5、15.5和17.4 L/株,排序为T4>T2>T3>T1,其中T4和T2处理相比T1分别增加了19.18%和13.01%。由此可知,水分传感器布置位置和基于水分传感器决策灌溉停止的方法均对灌溉量存在影响,且后者影响更大。

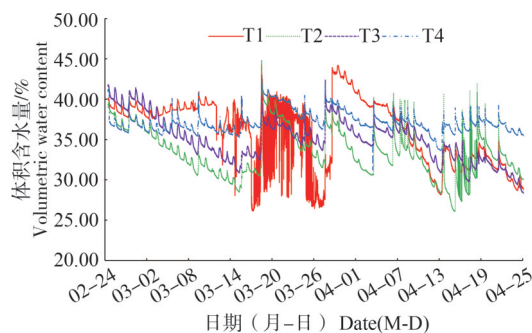


图 2 不同处理基质体积含水量变化趋势

Fig. 2 Variation trend of volume water content of matrix under different treatment conditions

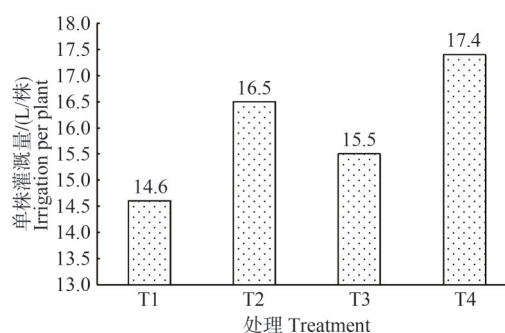


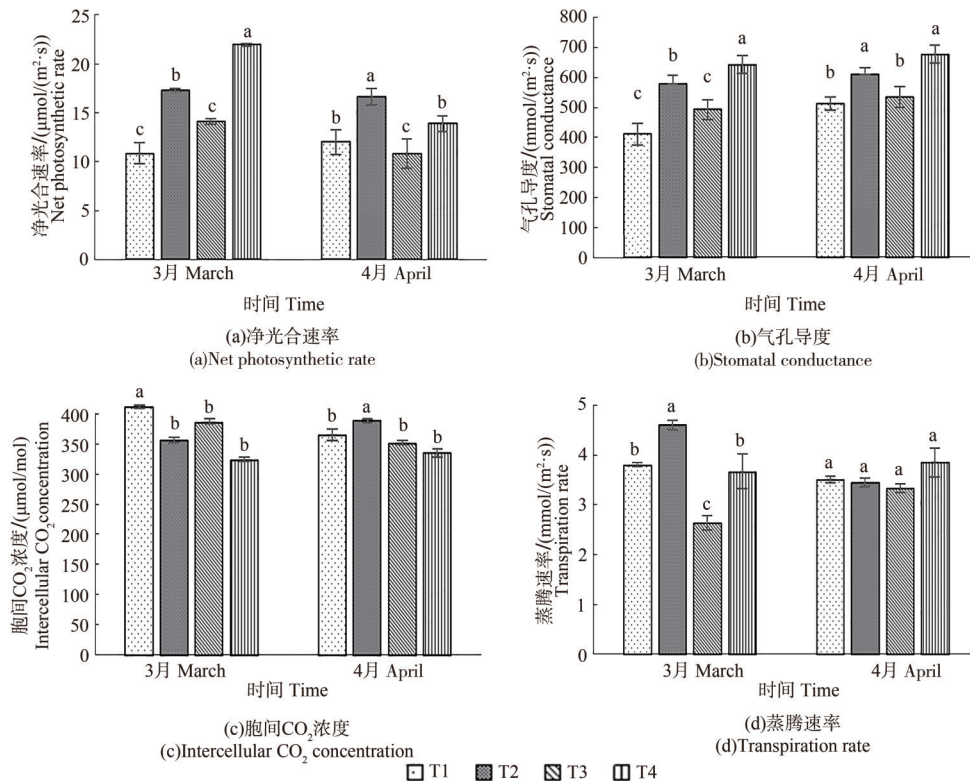
图 3 不同处理下基质栽培草莓单株灌溉量

Fig. 3 Irrigation amount of each strawberry plant under different treatments

2.2 基于水分传感器的灌溉策略对草莓光合特性的影响

对不同处理草莓叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率进行测定(图 4)。草莓栽培中期(3 月)T4 处理的叶片净光合速率和气孔导度显著高于其他处理($P < 0.05$),然后依次为 T2、T3 和 T1 处理,且 T2 处理与后两者差异显著($P < 0.05$);胞间 CO_2 浓度呈现相反结果,即 T1 处理最高且显著高于其他处理($P <$

0.05);T2 处理蒸腾速率最高,其次是 T1 和 T4 处理(差异不显著),T3 处理显著低于其他处理($P < 0.05$)。草莓栽培后期(4 月)T2 处理叶片净光合速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度显著高于 T1 和 T3 处理($P < 0.05$),叶片净光合速率和胞间 CO_2 浓度显著高于 T4 处理($P < 0.05$),蒸腾速率与其他处理之间差异不显著。由上可知,草莓栽培中期 T4 处理更有利于叶片光合作用增强且对蒸腾作用影响较小,草莓栽培后期则是 T2 处理最佳。



不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different letters indicate significant differences($P < 0.05$). The same below.

图 4 不同处理对草莓叶片光合特性的影响

Fig.4 Effects of different treatments on photosynthetic characteristics of strawberry leaves

2.3 基于水分传感器的灌溉策略对水分利用效率的影响

不同处理的草莓水分利用效率见图5。草莓栽培中期 T4 处理 IWUE 最高(8.32 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$), T2 处理(4.56 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)次之,2个处理相比 T1 显著提高了181.5%和54.2%($P<0.05$),T1 和 T3 处理差异不显著。在栽培后期,T2 处理叶片

IWUE 为 4.75 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$,显著高于其他 3 个处理($P<0.05$),增幅分别为 48.9%、51.4% 和 13.9%。与光合特征相似,T4 和 T2 处理分别更利于栽培中、后期叶片瞬时水分利用效率提高。从图 5(b)可知,T2 处理的 WUE 最高(13.10 g/L),分别比 T1、T3 和 T4 处理提高了 12.93%、3.97% 和 29.70%。

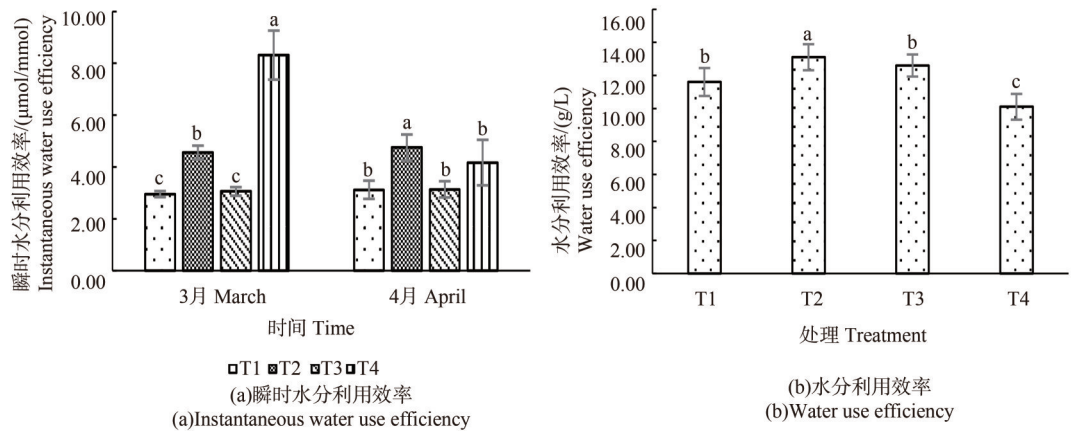


图5 不同处理对草莓水分利用效率的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on water use efficiency of strawberry

2.4 基于水分传感器的灌溉策略对草莓产量的影响

不同处理草莓栽培中后期果实单果重和单株产量如图6所示。从图6(a)可知,4个处理草莓果实单果重第1~3周呈现增加趋势,第5~6周呈现稳定

趋势,第7周呈现下降趋势。从整体看 T2 处理单果重最稳定,第2周起显著高于其他处理(第3、7周与 T3 处理无显著差异),第3~7周 T1 和 T4 处理之间差异不显著。灌溉处理期间,各处理果实平均单果重分别为 24.15、27.59、26.97 和 25.23 g,其中 T2

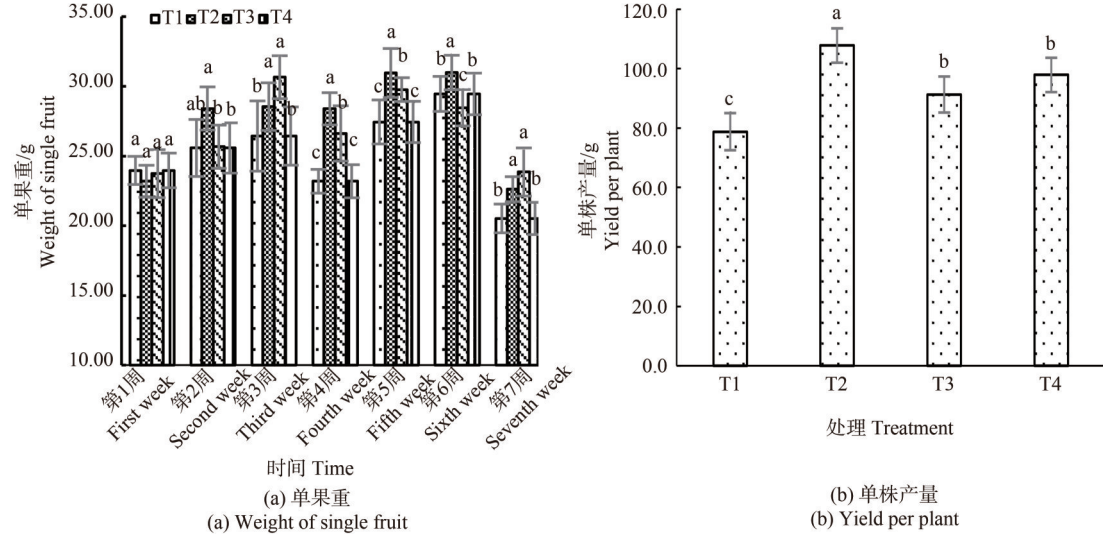


图6 不同处理对草莓产量的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on strawberry yield

处理相比 T1、T3 和 T4 处理提高了 14.4%、2.3% 和 9.35%。4 个处理的单株产量分别为 78.8、107.8、91.3 和 97.9 g(图 6(b))。T2 处理单株产量最高且显著高于其他处理($P<0.05$),增幅分别为 36.8%、18.1% 和 10.1%;T3 和 T4 处理之间差异不显著,但显著高于 T1 处理($P<0.05$)。这说明水分传感器布设在距离草莓植株 7.5 cm、基质表面 0 cm 处(T2 处理)可以获得更稳定、更高的产量。

2.5 基于水分传感器的灌溉策略对草莓果实品质的影响

测定不同处理草莓果实硬度和可溶性固形物、

可溶性糖、维生素 C 含量(图 7)。可以看出,T2 处理草莓果实硬度和可溶性固形物、可溶性糖、维生素 C 含量最高(栽培中期维生素 C 含量除外),且栽培中期的果实硬度和可溶性糖显著高于其他处理($P<0.05$),栽培后期的果实硬度显著高于 T3、T4 处理($P<0.05$),可溶性固形物和可溶性糖分别显著高于 T3 和 T1 处理($P<0.05$)。另外,T4 处理栽培中期的可溶性固形物和维生素 C 较 T1 处理显著提高($P<0.05$),栽培中期可溶性糖和栽培后期果实硬度均显著低于 T1 处理($P<0.05$)。综上,T2 处理更利于草莓栽培中后期的果实品质提升。

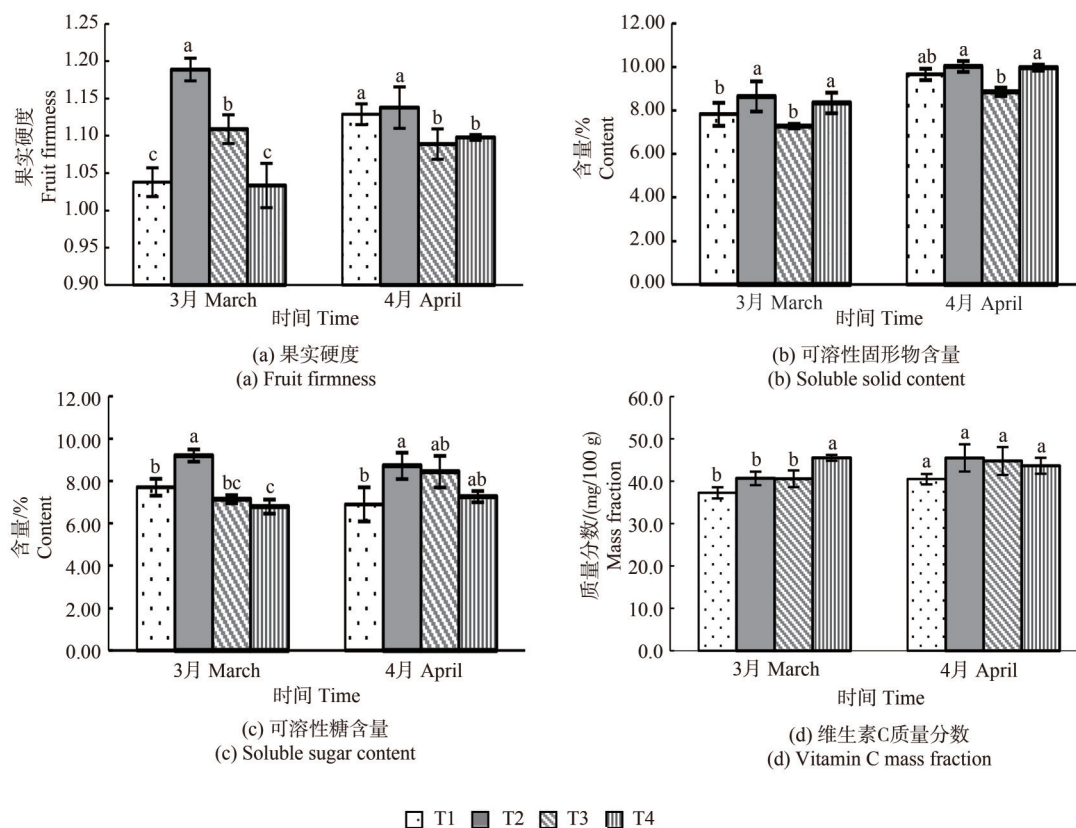


图 7 不同处理对草莓果实品质的影响

Fig. 7 Effects of different treatments on strawberry fruit quality

2.6 基于水分传感器的灌溉策略对草莓贮藏品质的影响

对不同处理的草莓果实贮藏品质变化进行测定(图 8)。贮藏期间 4 个处理果实失重率随时间增加而增大;T4 处理失重率始终最低,且第 2 天起与其他 3 个处理差异达到显著水平($P<0.05$),其他处理间不存在差异;第 7 天 4 个处理的失重率分别达 38.1%、37.7%、37.7% 和 31.93%(图 8

(a))。果实腐败率变化同失重率(图 8(b))。贮藏期间,T1 处理腐烂率最高、腐败速度最快;T2 果实腐败率最低、腐败速度最慢,且第 2 天起 2 个处理之间差异达到显著水平,第 7 天 T2 处理的腐烂率相比 T1、T3 和 T4 处理分别降低了 25.0%、14.2% 和 7.7%。4 个处理果实感官评分呈下降趋势,且第 4 天起下降速度明显增大,处理之间的差异也增大,即分别从第 4 天的 8.44、8.86、8.61 和 8.81 降

到第7天的3.36、4.41、4.47和5.80; T1处理在整个贮藏期的感官评价均最低,且第6天起显著低于其他处理($P<0.05$); T4处理在第4天起感官评分

高于其他3个处理,并在第7天达到显著水平,较其他3个处理提高了72.6%、31.5%和29.8%(图8(c))。

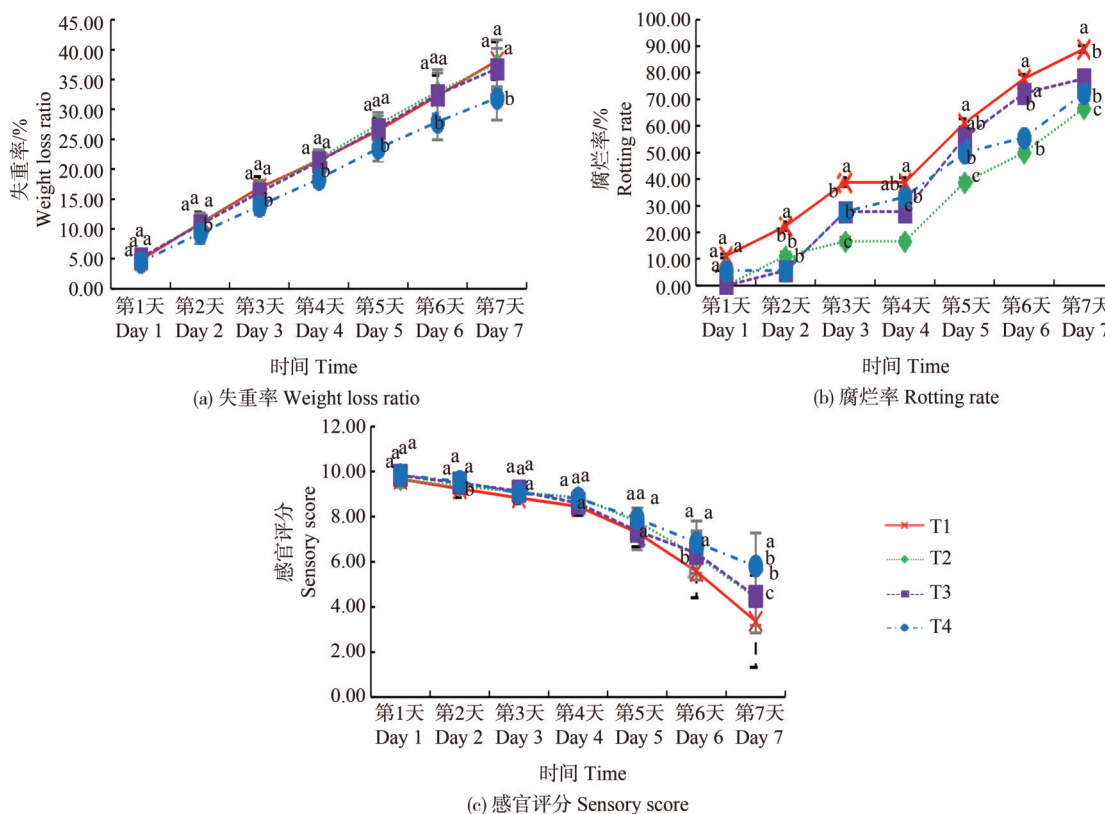


图8 不同处理对草莓贮藏品质的影响

Fig. 8 Effects of different treatments on storage quality of strawberry

3 讨论

国内外关于土壤水分异质性的规律研究较多^[25],水分在不同土壤质地条件下运移规律不同。在不同垂直和横向分布的土壤水分含量并不一致,所以将水分传感器布设到不同位置,会影响灌溉决策执行,特别是将土壤水分作为灌溉决策因子,布设位置会直接影响灌溉量。光合作用是作物生长物质积累的基础,不同的灌溉管理会影响草莓的光合作用进行,如果遭受干旱胁迫会不同程度的影响植物的光合速率^[26]。高凡等^[27]和钱小琴^[28]研究表明灌溉模式可能影响植物气孔开度,从而影响草莓的光合作用。林球等^[29]以太阳辐射强度作为灌溉管理的核心指标,不同的灌溉频率会对草莓的光合能力产生影响。本试验结果表明,T2处理灌溉量比T1和T3处理分别增加了13.01%和6.45%,T2处

理的水分利用效率高于其他处理,可能是因为T2处理的布设方式,更能代表作物水分盈亏状况,确保根系附近水分适宜;利用监测值触发灌溉,水分利用效率更高,更适合作物生长。影响作物光合作用的原因主要包括气孔限制和非气孔限制^[30]。本研究结果表明不同灌溉处理对草莓光合作用产生影响,其中T2处理的气孔导度和胞间CO₂浓度均有所提升,气孔导度的增加加速了气体交换,促进了CO₂的吸收,从而提升了光合速率。T2处理植株叶片的净光合速率、气孔导度和胞间CO₂浓度显著高于T1和T3处理,促进了草莓叶片的光合作用。基于水分传感器触发灌溉停止(T4处理)增强了草莓叶片的光合作用,3月净光合速率比T1处理显著提高了102.3%,对蒸腾作用未产生显著影响。

灌溉决策会影响作物产量和品质,王凤姣等^[31]在籽棉上的研究,以及曹少娜等^[22]在基质栽

培番茄上的研究均证明了水分传感器不同布设位置会影响作物的产量。本研究结果与前人一致, T2处理的单株产量分别比 T1 和 T3 处理提高了 36.8% 和 18.1%。可能是因为草莓喜欢湿润的土壤环境, 在距植株 7.5 cm、基质表面 0 cm 处竖插水分传感器, 可以确保根区土壤水分处于理想区间。因基质缓冲性较差, 实时持水量与灌溉频率关系密切, 本研究由累积光辐射法决策灌溉频率, 如果改变灌溉频率, 合适的传感器布设位置可能需要进一步研究。

果实品质指标主要包括硬度、可溶性固形物含量等鲜食品质, 以及失重、腐烂等采后贮藏保鲜品质, 都是评价品质优劣的重要指标。李建明等^[32]研究表明合理调控灌溉才能保证甜瓜果实的优质; 朱润华等^[33]证实了灌溉量为田间持水量的 80% 时, 草莓果实糖酸比最高。草莓果实含水量高、不耐贮藏、货架期短, 成为制约草莓经济价值提升的重要因素, 灌溉会直接影响草莓果实含水量, 从而对草莓硬度等贮藏性能产生影响^[34]。本试验结果表明, T2 处理草莓果实硬度和可溶性固形物、可溶性糖、维生素 C 含量最高。从采后贮藏保鲜品质来看, T2 处理降低了果实腐烂率, 提高了综合感官评分。从不同的触发策略来看, T4 处理可溶性固形物和维生素 C 含量更高, 可能是因为 T4 灌溉量大于 T1 处理, 促进了果实膨大和可溶性固形物积累。与 T1 处理相比, 贮藏第 7 天, T4 处理的果实腐烂率降低了 18.8%, 感官评分提高了 72.6%, 有效延长了果实货架期。

4 结 论

不同的灌溉决策会影响草莓的生长、产量和品质等。水分传感器布设距植株 7.5 cm、基质表面 0 cm 和灌溉停止由基质田间持水量和水分传感器监测值计算的灌溉决策, 草莓单果重最大且稳定, 单株果实产量显著提高, 更利于水分利用效率提升, 果实腐败率和腐败速度最低, 且腐败率从贮藏第 2 天起显著低于其他处理。因此, 草莓基质栽培合理布设水分传感器位置, 科学灌溉决策, 利于产量形成和果实品质提升。

参考文献 References

[1] 潘妮, 程雪, 沈文彪, 陆巍. 富氧水对草莓生长发育及光合作用的影响[J].

南京农业大学学报, 2023, 46(2): 278-286

Pan N, Cheng X, Shen W B, Lu W. Effects of hydrogen-rich water on growth and photosynthesis of strawberry [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(2): 278-286 (in Chinese)

[2] 李丽. 速冻草莓品质评价体系的建立研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016
Li L. Study on establishment of quality evaluation system for Individual Quick Freezing (IQF) strawberry [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016 (in Chinese)

[3] 严嘉玮, 路洪艳, 李莉, 罗自生, 李栋栋, 宋钧, 班兆军. 2 种草莓成熟过程中果实特征品质指标的变化[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 125-132
Yan J W, Lu H Y, Li L, Luo Z S, Li D D, Song J, Ban Z J. Variations in quality characteristics of two strawberry cultivars during fruit ripening [J]. *Food Science*, 2017, 38(4): 125-132 (in Chinese)

[4] 桑婷, 赵云霞, 杨冬艳, 郭世荣, 谢华. 基于 AHP 和 DTOPSIS 法的设施鲜食草莓品种品质综合评价[J]. 分子植物育种, 2022, 1-24
Sang T, Zhao Y X, Yang D Y, Guo S R, Xie H. Comprehensive quality evaluation of fresh strawberry varieties based on AHP and DTOPSIS [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 1-24 (in Chinese)

[5] 陈若男. 不同夜温下积温和累积辐射量与草莓品质量化关系研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020

Chen R N. Quantitative relationship between accumulated temperature and cumulative radiation and strawberry quality at different night temperatures [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020 (in Chinese)

[6] 刘泽宇. 不同温室生态环境对草莓果实品质的影响研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2018

Liu Z Y. Effects of different greenhouse eco-environment on fruit quality of strawberry [D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2018 (in Chinese)

[7] 徐超, 高芮, 王明田, 杨再强, 韩玮, 郑盛华. 苗期高温对草莓果实营养品质影响的模糊综合评价及模型建立[J]. 中国农业气象, 2020, 41(12): 785-793

Xu C, Gao R, Wang M T, Yang Z Q, Han W, Zheng S H. Fuzzy comprehensive evaluation and model establishment of the effect of high temperature in the seedling stage on the nutritional quality of strawberry fruit [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(12): 785-793 (in Chinese)

[8] 张智, 李曼宁, 杨志, 蔡泽林, 洪婷婷, 丁明. 基于多指标协同的草莓水肥耦合综合调控[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 267-276

Zhang Z, Li M N, Yang Z, Cai Z L, Hong T T, Ding M. Comprehensive regulation of water and fertilizer coupling based on multi index collaboration of strawberry [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 267-276 (in Chinese)

[9] 朱冬梅. 设施栽培下草莓养分吸收及水肥耦合技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013

Zhu D M. Research of strawberry nutrient absorption and fertigation technology under facility cultivation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese)

[10] 高凡, 郑然, 郭家选, 李玉中, 董少康, 沈元月, 李兴亮. 不同灌溉模式下草莓对水分胁迫的生理响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 1-6

Gao F, Zheng R, Guo J X, Li Y Z, Dong S K, Shen Y Y, Li X L. Physiological response of strawberry to water stress under different deficit irrigations [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(1): 1-6 (in Chinese)

[11] 杨小奎. 黄腐酸钾对草莓氮素吸收分配及产量品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018

Yang X K. Effects of potassium fulvic acid potassium on nitrogen absorption and distribution, and fruit yield and quality of strawberry [D].

- Taian: Shandong Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [12] Perrot-Maitre D, Davis P. Case Studies of Markets and Innovative Financial Mechanisms for Water Services from Forests [R/OL]. [2023-05-01]. http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_134.pdf
- [13] Xu X M, Robinson J, Else M A. Effects of nitrogen input and deficit irrigation within the commercial acceptable range on susceptibility of strawberry leaves to powdery mildew [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2013, 135(4): 695-701
- [14] Luca I, Rodney B T, María D F F, Stefania D P, Alberto P, Cecilia S, Youssef R, Marisa G. Irrigation management of European greenhouse vegetable crops[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 242(1): 1-15
- [15] Romero R, Muriel J L, García I, de la Peña D M. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 114: 59-66
- [16] Gallardo M, Thompson R B, Fernández M D. *Water Requirements and Irrigation Management in Mediterranean Greenhouses: The Case of the Southeast Coast of Spain* [M]. Italy: FAO, 2013
- [17] 赵伟霞, 李久生, 王珍, 栗岩峰, 张志云. 土壤含水率监测位置对温室滴灌番茄耗水量估算的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(1): 37-43
Zhao W X, Li J S, Wang Z, Li Y F, Zhang Z Y. Estimation of water consumption as affected by measurement locations of soil water content in drip irrigated tomato in solar greenhouses[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(1): 37-43 (in Chinese)
- [18] 代志伟, 程曼, 袁洪波, 蔡振江. 温室灌溉控制策略研究进展[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 63-72
Dai Z W, Cheng M, Yuan H B, Cai Z J. Review of irrigation control strategy for greenhouse [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(9): 63-72 (in Chinese)
- [19] Yu L, Gao W, Shamshiri R, Tao S, Ren Y, Zhang Y, Su G. Review of research progress on soil moisture sensor technology [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021(4): 32-42
- [20] 倪纪恒, 王媛媛, 李龙兴, 朱恺豪, 高洪燕. 水分传感器位置和基质含水量对一品红生长和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(12): 110-116
Ni J H, Wang Y Y, Li L X, Zhu K H, Gao H Y. Influences of water sensor position and substrate moisture content on growth and quality of poinsettia[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(12): 110-116 (in Chinese)
- [21] 魏恒文, 陈希东, 尹明玉. 智能滴灌系统中土壤水分传感器埋设深度研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 16-20
Wei H W, Chen X D, Yin M Y. Burying depth of soil moisture sensors in intelligent drip irrigation system[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(4): 16-20 (in Chinese)
- [22] 曹少娜, 李建设, 高艳明, 吴素萍, 刘梦锦, 李娟. 水分传感器埋设位置对温室基质栽培番茄生长特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(6): 933-942
Cao S N, Li J S, Gao Y M, Wu S P, Liu M J, Li J. Effects of embedding position of moisture sensors on growth characteristics of tomato in substrate culture in greenhouse [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(6): 933-942 (in Chinese)
- [23] 李堃, 李建设, 吴素萍, 曹云娥, 高艳明. 基于实时控制灌溉系统的温室黄瓜土壤水分传感器合理埋设位置研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 18-23
Li K, Li J S, Wu S P, Cao Y E, Gao Y M. Research of soil moisture sensor location based on the real-time control of irrigation systems on greenhouse cucumber[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(7): 18-23 (in Chinese)
- [24] 刘志刚. 基于基质湿润和根系生长特性的温室生菜灌溉技术[D]. 镇江: 江苏大学, 2014
Liu Z G. Study on the irrigation technology for lettuce cultivation in greenhouse based on the substrate wetting and root growth characteristics [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014 (in Chinese)
- [25] Li H D, Shen W S, Zou C X, Jiang J, Fu L N, She G H. Spatio-temporal variability of soil moisture and its effect on vegetation in a desertified aeolian riparian ecotone on the Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 479: 215-225
- [26] Ma P, Bai T H, Ma F W. Effects of progressive drought on photosynthesis and partitioning of absorbed light in apple trees [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(4): 681-690
- [27] 高凡, 郑然, 郭家选, 李玉中, 董少康, 沈元月, 李兴亮. 不同灌溉模式下草莓对水分胁迫的生理响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 1-6
Gao F, Zheng R, Guo J X, Li Y Z, Dong S K, Shen Y Y, Li X L. Physiological response of strawberry to water stress under different deficit irrigations[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(1): 1-6 (in Chinese)
- [28] 钱小琴. 灌溉方式对草莓产量、品质和水分代谢的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009
Qian X Q. Effect of irrigation modes on production, quality and water metabolism of strawberry [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [29] 林绿, 王红宁, 肖建红. 灌溉频率对基质栽培‘红颜’草莓叶片光合特性、产量及品质的影响[J]. 中国果树, 2020(5): 81-86
Lin L, Wang H N, Xiao J H. Effect of irrigation frequency on photosynthetic characteristics, yield and quality of strawberry leaves cultivated in substrate ‘Hongyan’ [J]. *China Fruits*, 2020(5): 81-86 (in Chinese)
- [30] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Reviews of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345
- [31] 王凤姣, 王振华, 李文昊. 水分传感器位置和灌水阈值对棉花生理及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(10): 958-962
Wang F J, Wang Z H, Li W H. Effect of water sensor location and irrigation threshold on physiology and yield of cotton [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(10): 958-962 (in Chinese)
- [32] 李建明, 樊翔宇, 闫芳芳, 李惠, 蔡东升. 基于蒸腾模型决策的灌溉量对甜瓜产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 156-162
Li J M, Fan X Y, Yan F F, Li H, Cai D S. Effect of different irrigation amount based on transpiration model on yield and quality of muskmelon [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 156-162 (in Chinese)
- [33] 朱润华, 阳圣莹, 白胜, 蒋浩宏, 周霓, 李曦怡. 灌溉量对草莓生长及果实品质与生理化的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(2): 94-97
Zhu R H, Yang S Y, Bai S, Jiang H H, Zhou N, Li X Y. Effects of partial irrigation volume on growth, fruit quality and physiology and biochemistry of strawberry [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2019, 47(2): 94-97 (in Chinese)
- [34] 张会芳, 刘桂珍, 张超. 草莓果实硬度影响因素及其调控措施研究进展[J]. 长江蔬菜, 2009(12): 4-7
Zhang H F, Liu G Z, Zhang C. Progress of influencing factors and control measures on strawberry fruit firmness [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2009(12): 4-7 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介：岳焕芳，硕士，高级农艺师。在北京市农业技术推广站主要从事节水农业相关试验研究和示范推广工作，对京郊主要设施作物和粮食作物灌溉施肥制度、水肥设备等进行了系统研究，集成研发了水肥一体机、智能灌溉控制设备等多种水肥相关产品。发表科技论文 32 篇，获得专利 23 项，获得软件著作权 2 项，参编书籍 4 本，参编地方标准 3 项。获得全国农牧渔业丰收奖、北京市农业技术推广奖、农业节水科技奖等奖项 5 项。



通讯作者简介：李友丽，硕士，高级农艺师。主要从事设施园艺水肥精准管控技术与装备研究，主要研究领域为设施蔬菜精准灌溉决策方法、设施蔬菜节水提质与果实品质调控、水肥一体化智能管控装备系统研发与科技推广服务等。先后主持或参与了“十三五”重点研发计划、“十二五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金青年基金、河北省重点研发计划、宁夏回族自治区重点研发计划、北京市农林科学院青年基金等项目 40 多项，开发了有机水肥一体化智能装备和营养液灌溉管控系统，提出了基质栽培高效灌溉技术模式 3 套。发表论文 20 余篇；授权国家发明专利 12 项，实用新型 13 项，软件著作权 9 项；获批北京市新产品新技术 3 项。获北京市农业技术推广奖二等奖 1 项（排名第 5）、宁夏回族自治区科技进步二等奖 1 项（排名第 6）、北京市事业单位工作人员脱贫攻坚专项奖励“嘉奖”1 次。