

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.032

基于 K-means 聚类算法的草莓灌溉策略研究

李莉¹ 王宏康¹ 吴勇¹ 陈士旺² 王海华¹ SIGRIMIS N A³

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083; 3. 雅典农业大学农业工程系, 雅典 11855)

摘要: 为进一步提高日光温室封闭式栽培下草莓灌溉水肥利用率,研究了基质含水率和温度影响下的草莓灌溉策略优化方法。采用土壤水分传感器对草莓果期基质含水率进行实时监测,通过对基质含水率随时间变化的规律分析,并结合日平均温度进行 K-means 聚类分析,提出一种草莓优化灌溉策略。试验结果表明,灌溉第 1 阶段基质含水率快速上升,在灌溉结束时达到峰值,每次灌溉基质含水率平均提高 21.5 个百分点;第 2 阶段快速下降,在 20 min 内基质含水率平均下降 3.5 个百分点;第 3 阶段变化趋于平稳,在 30 min 内基质含水率平均下降 1.2 个百分点。在每个灌溉周期内,含水率呈线性下降趋势,在整个果期内,其斜率随日平均温度的升高逐渐增加,由 0.011 4 增加至 0.036 5。研究表明,根据基质含水率变化和日平均温度区间进行定量灌溉,理论上果期每株草莓仅需要 4.51 L 水,可节水 15.4%,该方法能有效提高水肥利用率,实现节水节肥。

关键词: 草莓;灌溉策略;K-means 聚类算法;基质含水率;日平均温度;水肥一体化

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0295-08

OSID:



Investigation of Strawberry Irrigation Strategy Based on K-means Clustering Algorithm

LI Li¹ WANG Hongkang¹ WU Yong¹ CHEN Shiwang² WANG Haihua¹ SIGRIMIS N A³

(1. Modern Precision Agriculture System Integration Research Key Laboratory, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Department of Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, Athens 11855, Greece)

Abstract: Substrate cultivation is the development direction of greenhouse cultivation mode, and it is of great significance to study the modern precision irrigation method for substrate cultivation. On-demand irrigation is one of the main methods of modern precision irrigation. It is inseparable from real-time monitoring and feedback of water content. The water content is an important parameter in modern precision irrigation methods. Moisture sensor based on the principle of frequency domain reflection (FDR) was used in a substrate environment for monitoring water content. The moisture detection module of JZH-0 sensor adopted the principle of FDR, which had good performance on the soil moisture testing. However, it needed to be calibrated before using in different kinds of substrate. In order to further optimize the closed cultivation irrigation method in solar greenhouse and improve the water and fertilizer utilization rate, based on the theoretical research of on-demand irrigation, the existing integrated irrigation system of water and fertilizer, air temperature sensor and soil moisture sensor were mainly used for irrigation and real-time data monitoring and collection. The study on the irrigation strategy of closed greenhouse cultivation of strawberry in greenhouse was carried out by collecting the moisture content of the substrate under the experience of irrigation and the temperature in the greenhouse. The variation of moisture content of substrate in different time scales was firstly summarized. The result showed that the substrate water content of each irrigation rose rapidly, reaching a peak at the end of each irrigation time,

收稿日期: 2019-05-10 修回日期: 2019-06-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201003-4)和丽江市科技计划项目:汪懋华院士工作站

作者简介: 李莉(1978—),女,副教授,博士,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: lily@cau.edu.cn

通信作者: 王海华(1976—),男,副教授,博士,主要从事农业信息化研究,E-mail: whaihua@cau.edu.cn

with an average increase of about 21.5 percentage points; the second stage decreased rapidly, with an average decrease of 3.5 percentage points in 20 min; the third stage of the trend was stabilized, with an average decrease of 1.2 percentage points in 30 min. During each irrigation cycle, the water content of the substrate showed a linear downward trend, and the slope of the substrate could better reflect the daily variation of the matrix moisture. During the whole fruiting period of strawberry, the slope was increased with the increase of daily average temperature, which was increased from 0.011 4 to 0.036 5, reflecting the positive significance of temperature increase on crop water demand. Then, the daily variation of the moisture content of substrate was approximated to the daily water requirement of the crop to study the water requirement of the crop. Among the many factors affecting the water demand of crop, temperature with convenient measurement and high accuracy was chosen as the independent variables, because its influence effect was obvious and had strong coupling relationship with light intensity and relative humidity of air. The data was classified by K-means clustering algorithm. According to the classification results, an interval quantitative automatic irrigation strategy based on daily average temperature was proposed in closed greenhouse cultivation; three temperature intervals were set (13, 18] °C, (18, 22.5] °C, (22.5, 27) °C and in turn corresponded to the daily variation of water content of three substrates as 0.88 percentage points, 1.76 percentage points and 2.63 percentage points, respectively; calculating the daily average temperature of the day, and selecting the appropriate daily variation of moisture content of substrate according to the temperature range to which it belonged and irrigated the next day; it was revised on Monday in a weekly cycle. Theoretically only 4.51 L water was needed per strawberry plant in fruit stage, which can save 15.4% water. Under this strategy theoretically based on K-means clustering algorithm, the water and fertilizer utilization were effectively improved, and the closed greenhouse irrigation methods in solar greenhouses were further enhanced.

Key words: strawberry; irrigation strategy; K-means clustering algorithm; substrate moisture content; daily average temperature; integration of water and fertilizers

0 引言

2016年,我国节水灌溉面积3 284.7万 hm^2 ^[1],仅占总播种面积的18.7%。实际耕地灌溉每公顷用水量253.3 m^3 ,年农业用水量占全国总用水量的62.4%,总体上农田灌溉水有效利用系数约为0.536^[2],与发达国家的0.7~0.8相比,农业节水潜力巨大。为实现“十三五”计划中到2020年农田灌溉水有效利用系数提高到0.55以上的要求,必须大力发展节水农业,改进灌溉方法。基质栽培是温室封闭式栽培的主要形式,实时监测并利用基质水分、优化精细灌溉方法,对基质栽培具有重要意义。

含水率是现代精细灌溉方法中的重要参数和指标,但在基质栽培环境下,缺乏有关基质水分传感器与水分变化规律的研究^[3-8]。现阶段,国内外研究大多通过对已有电介质型土壤水分传感器进行标定、校准,实现基质水分检测,其中ECH2O系列性能最佳,但价格昂贵,仅适用于实验,无法应用于实际生产^[9-11]。采用频域反射(FDR)原理的土壤水分传感器价格实惠,其精度与误差满足实际生产需求,在国内得到广泛应用^[12-14]。现代精细灌溉方法研究主要方向之一为按需灌溉,包括根据作物的最适含水量阈值灌溉和根据作物蒸腾量、需水量等模型灌溉两个方向。在灌溉策略方面,文献[15-20]

针对作物需水量的不同影响因素,如含水量阈值、基质EC值、基质水势、光照累计辐射等,建立了不同的灌溉控制策略,并进行了验证,对于传统灌溉方式均有不同程度的改进和提高。文献[21-22]针对定时、水分阈值及按需等不同灌溉策略进行了对比试验和分析,得出水分阈值和按需灌溉提高灌溉频率、减少每次灌溉量进而减少水分散失的结论,达到节水的目的。国内研究主要针对基质环境下的短时水分迁移规律,并以此探究灌溉控制策略,建立灌溉系统,进行控制与试验^[23-25]。

针对上述研究现状,本文采集经验灌溉下草莓果期内的基质含水率,并总结其变化规律,灌溉工具为已有水肥一体化灌溉设备,选用的土壤水分传感器基于FDR原理,依据栽培基质进行标定校准后,试验分析其变化规律和温度对基质水分变化的影响作用,在此基础上提出基于K-means算法的草莓区间定量灌溉策略。

1 材料与方 法

1.1 试验地点及材料

试验地点为中国农业大学涿州科技园,栽培环境为混合基质,栽培作物为草莓,品种为红颜,于2017年11月7日于日光温室定植,根距为20 cm,采用水肥一体化设备进行灌溉,灌溉方式为滴灌,滴

箭放置在植株中心附近,规格为 4 L/h。试验时间处于果实采摘期。

1.1.1 基质

基质的物理特性不仅适合草莓生长,还会影响土壤水分传感器的标定校准。本试验采用混合基质,其主要成分为草炭、蛭石和珍珠岩,综合考虑容重、吸水透气以及根系的固定缓冲,配比 4:2:1;经干燥法检测,容重为 0.153 g/cm^3 ,总孔隙度为 87.1%,通气孔隙为 26.7%,持水孔隙为 60.4%,水气比为 2.26。其中草炭为德国进口,蛭石、珍珠岩产地为河北。表 1 为 3 种基质的理化特性。

表 1 基质理化特性

Tab.1 Substrate physical and chemical properties

基质	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙 度/%	通气孔 隙/%	持水孔 隙/%	水气比
蛭石	0.151	95.0	30.0	65.0	2.17
珍珠岩	0.093	60.3	29.5	30.8	1.04
草炭	0.169	89.8	24.4	65.4	2.68

1.1.2 传感器选型及放置

试验选用北京昆仑海岸传感技术有限公司 JZH-0 系列传感器,工作电压 DC 12V,该土壤水分传感器采用 FDR 方法检测体积含水率,量程 0~100%,精确度 $\pm 3\%$,分辨率 0.1,可长时间在线监测。传感器有两根不锈钢探针,探针长 62 mm,直径 5 mm,探针间隔 24 mm。其他参数指标包括温度量程 $-20\sim 60^\circ\text{C}$,准确度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (25°C),相对湿度量程 0~100%,精确度 $\pm 3\%$ (相对湿度 5%~95%, 25°C),土壤温度量程 $-20\sim 60^\circ\text{C}$,准确度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (25°C),光照强度 $0\sim 5\times 10^4 \text{ lx}$,精确度为量程的 $\pm 5\%$;选用网关型号为 KLHA-H1100。网关与传感器如图 1 所示,采集频率为 10 min 采集 1 次。

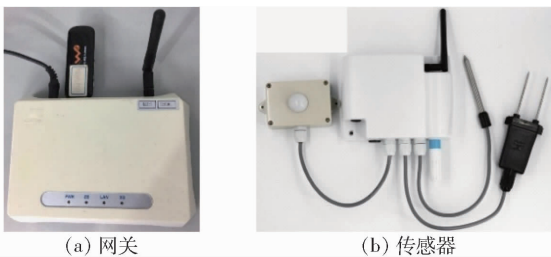


图 1 网关与传感器

Fig.1 Gateways and sensors

土壤水分传感器与土壤温度传感器放置在相邻两株植株中间,距离根系约 10 cm。整个果期内保持传感器静止,实时监测基质水分含量的变化并通过网关上传至服务器。

1.1.3 灌溉设备及营养液配比

试验采用现代精细农业系统集成研究教育部重

点实验室研发的 CAUA-12 型水肥一体化灌溉设备进行灌溉,设备如图 2 所示。草莓摘果期的营养液配置如表 2 所示。



图 2 CAUA-12 型水肥一体化灌溉设备

Fig.2 CAUA-12 integrated irrigation equipment for water and fertilizer

表 2 草莓营养液配置

Tab.2 Strawberry nutrient solution preparation

营养液	化学式	质量/g
A	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	930
	KNO_3	720
	MgSO_4	375
B	KH_2PO_4	145
	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	80
C	$\text{EDTA}-2\text{NaFe}$	300
	H_3BO_3	28.6
	$\text{MnSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	21.3
	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.2
	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.8
	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.2

其中营养液 A、B、C 配比为 1:1:0.1。按比例置于 CAUA-12 型水肥一体化灌溉设备的肥液桶中,设定其吸肥比例为 1:1:0.1。灌溉时长为 10 min,灌溉量固定,灌溉周期人为控制,需要根据实际情况调整。草莓果期氮肥、钾肥需求量较大,要结合叶面肥(磷酸二氢钾叶面肥)施肥。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤水分传感器标定

试验将传感器测量值与干燥法得到基质实际水分含量进行标定。试验使用装置为:方形容器(尺寸为 $40 \text{ cm}\times 20 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}$)、圆台形塑料容器(上端直径 16 cm,下端直径 10 cm,高度 12 cm)、电子秤和干燥箱。

在方形容器中对混合基质进行配比以获得不同体积含水率下的基质样本,根据基质最大持水量与数据采集密度计算加水量间隔,将基质从干燥到饱和配成 18 组不同体积含水率的样本,分别将样本基质搅拌均匀,均匀装入对应圆台塑料容器中,避免挤压基质,自然填装,填满后用保鲜膜封口,加盖静置于避光处。24 h 后称量塑料容器连同含水基质的质

量。将保鲜膜揭开,将传感器从容器上方正中心垂直插入基质直至探针完全没入基质,为减小读数误差,取多次读数的平均值为测量值,待传感器读数稳定后,每隔 10 s 采集 1 次数据,共采集 5 组数据,取其平均值作为传感器测得水分含量。将基质放入干燥箱,恒温 80℃ 干燥 24 h,干燥结束后取出基质冷却至室温称量,读数不变以后记录干燥基质的质量。干燥法测量得到基质体积含水率计算公式如下

$$\theta = \frac{W - W_d}{W_d - W_c} \rho \times 100\% \quad (1)$$

式中 θ ——基质体积含水率, %

W ——静置 24 h 后塑料容器与含水基质质量, g

W_d ——干燥后塑料容器与干燥基质质量, g

W_c ——塑料容器质量, g

ρ ——被测基质容重, g/cm³

根据课题组之前研究成果^[13],基质电导率与基质温度对测量值影响较小,可忽略不计。基质压实程度会对传感器产生干扰,可通过定期标定传感器的方法来降低误差,减少容重对测量值的影响。

1.2.2 K-means 聚类算法

K-means 聚类算法基本思想是:以空间中 k 个点为形心进行聚类,以数据点到原型的某种距离作为优化的目标函数,利用函数求极值的方法得到迭代运算的调整规则。通过迭代的方法,逐次更新各簇的形心值,直至得到最好的聚类结果。本文采取欧氏距离作为相似度测度,采用均值作为聚类准则函数,求解对应某一形心的最优分类。算法具体流程如下:

(1) 在样本数据集中随机选取 k 个样本点作为初始形心 $c_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 。

(2) 在第 j 次迭代中,对任意一个样本点 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 求其到 k 个形心的欧氏距离

$$E_d(t, i) = \sqrt{(p_i - c_i)^2} \quad (2)$$

(3) 将该样本归类到与其距离最小的形心所在的簇。

(4) 采用均值更新各簇的形心值

$$c_i = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} p_{ii} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

式中 n_i ——簇序号

(5) 重复步骤(2)~(4),直到各簇的形心值不再变化。

2 试验与结果分析

2.1 土壤水分传感器标定曲线

混合基质下传感器测量值与干燥法测量值之间

的关系如图 3 所示。

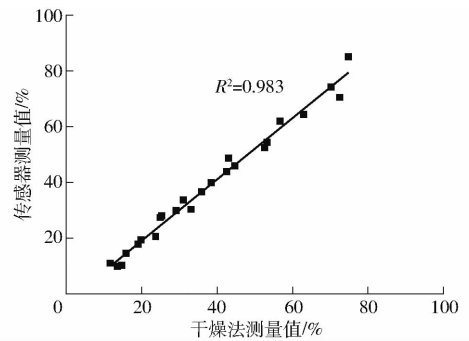


图 3 混合基质中传感器测量值与干燥法测量值之间的关系

Fig. 3 Relationship between sensor measurements and drying methods measurements in mixed substrate

从图 3 可以看出,传感器检测下限为 8%。传感器测量值基本呈现线性规律。混合基质的理化特性与土壤的理化特性在持水性能方面较为接近,传感器能较好地表征混合基质的体积含水率。测量结果的决定系数 R^2 为 0.983,线性度高,平均绝对误差 (Mean absolute error, MAE) 为 1.06%,均方根误差 (Root mean squared error, RMSE) 为 3.47%,平均测量值比干燥法测量值低 3.47 个百分点,与干燥法测量值接近。可认为该传感器测量值能表征实际水分含量。

对采集的传感器测量值按照标定方程换算后进行分析。由于每次灌溉时长远小于每次灌溉的间隔时间,所以将基质水分的变化分为 2 个阶段分别分析:第 1 阶段为灌溉开始后 60 min 内,以传感器采样周期 10 min 为间隔分析;第 2 阶段为灌溉后第 1 天至下次灌溉前 1 d,根据采集到的当天数据取平均值以天为间隔分析。

2.2 灌溉后基质含水率变化

草莓摘果期内共进行了 8 次灌溉数据分析,依照时间先后顺序进行排序,每次灌溉后 60 min 内的基质含水率变化曲线如图 4 所示。综合 8 次灌溉分析,基质含水率在灌溉后 10 min 左右达到峰值,说明传感器对于灌溉过程中基质水分突增具有良好的响应,能够及时反映出灌溉过程中基质含水率的变化,每次灌溉将基质含水率平均提高 21.5 个百分点。10~30 min 基质含水率快速下降,此时滴箭附近的基质水势明显大于远离滴箭位置的基质水势,基质水分由高水势向低水势运动,此过程水分向下入渗、向周边扩散,迁移相对较快,水分的入渗扩散使得基质水势差减小,水势趋近相同,基质水分快速迁移过程中,基质含水率在 20 min 平均下降 3.5 个百分点。30~60 min 基质水分变化趋于平稳,由于基质水势差减小,水分迁移速率降低,说明此时植株

附近水势差较小,水分均匀分布在植株附近,可以认为此时的基质含水率为经过灌溉后的基质含水率,此阶段基质含水率在 30 min 内平均下降了 1.2 个百分点,相较于灌溉前提高了 16.8 个百分点。

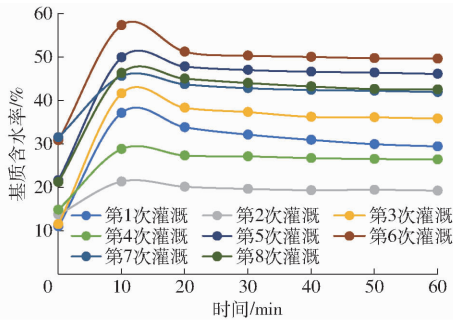


图 4 灌溉开始后 60 min 内基质含水率变化曲线
Fig. 4 Substrate moisture changing curves within 60 min after start of irrigation

综上所述,每次灌溉 10 min,滴箭出水量 4 L/h,每株草莓获得约 0.67 L 水,其基质含水率提高 16.8 个百分点,试验期间共进行 8 次灌溉,每株草莓总共获得 5.33 L 水。将灌溉时间与基质水分变化量的关系近似为线性关系,用于计算理论耗水量。

2.3 灌溉结束至下次灌溉前基质含水率变化

灌溉结束后至下次灌溉前的基质含水率变化曲线如图 5 所示。由于灌溉量固定,灌溉周期根据实际情况调整,因此每次灌溉后获取数据量不同,由于第 4 次和第 5 次灌溉之间仅隔 1 d,所以第 4 次灌溉不予讨论。综合 6 个灌溉周期分析,基质含水率呈逐渐减小、线性变化趋势。对每一个灌溉周期内基质水分变化曲线进行线性回归分析,结果如表 3 所示。6 个灌溉周期内基质含水率变化的 R^2 均大于 0.96,线性程度非常好,说明在同一生长时期内,每次灌溉后,基质水分均呈现线性下降趋势,即斜率表示的日变化率相对稳定;随着时间推移,基质含水率日变化率整体逐渐增加,从最初的 0.011 4 增加至 0.036 5,说明果期草莓需水量呈现逐渐增加的规律。

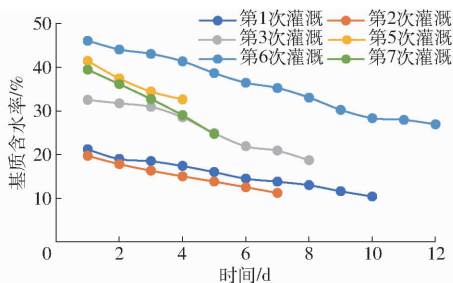


图 5 灌溉结束至下次灌溉前基质含水率变化曲线
Fig. 5 Substrate moisture changing curves from end of irrigation to next before irrigation

表 3 基质含水率变化曲线线性参数分析

Tab. 3 Analysis of linear parameters of substrate moisture changing curves

灌溉周期	R^2	斜率
第 1 次	0.991 5	0.011 4
第 2 次	0.994 5	0.013 8
第 3 次	0.968 4	0.021 6
第 5 次	0.972 7	0.029 4
第 6 次	0.989 6	0.018 6
第 7 次	0.997 0	0.036 5

结合图 5 分析,随着光照和温度升高,以及果实产量增加,为保证草莓开花结果,每个灌溉周期的最后一天基质含水率也呈增加趋势,最后平均值保持在 27%。

由于第 5 次灌溉后气温较高、光照较强,在此阶段果实长势较好,草莓日平均需水量较大,其基质含水率下降速度较快,为确保果实良好发育提前进行第 6 次灌溉。随后当地持续处于恶劣天气,受其影响基质含水率下降速率减慢,所以此次灌溉后隔 14 d 进行下一次灌溉,最后 1 d 基质含水率为 26.9%,处于较高水平。因此该周期内基质含水率日变化率明显小于前后两次的日变化率。

2.4 温度对基质含水率的影响

由于基质含水率日变化率随时间推移逐渐增加,预测温度、光照强度也随时间增加,而温度与光照强度具有强耦合性,因此初步考虑温度对于基质含水率的影响。由于基质含水率取决于每次灌溉的具体情况,因此要分析基质含水率变化与温度的关系需将每天的基质含水率变化量与当日平均温度对比分析,其每日的基质含水率变化量与日平均温度的关系如图 6 所示,日平均温度并不能与基质体积含水率日变化量存在较明显的耦合关系,平均变化量为 1.97 个百分点,方差为

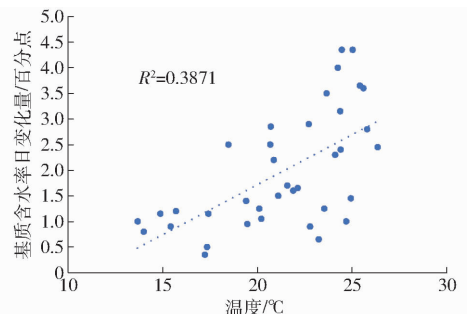


图 6 灌溉结束至下次灌溉前温室内日平均温度与日基质含水率变化量的关系

Fig. 6 Relationship between daily average temperature in greenhouse and variation of daily substrate moisture from end of irrigation to next before irrigation

1.25, 决定系数为 0.387 1。综上所述, 草莓结果期基质含水率下降趋势明显且稳定, 而日平均温度波动较大, 因此当日温度与基质含水率变化不

存在明显的相关关系。

采用 K-means 聚类算法对上述数据进行分析, 分别设定形心数为 2、3、4 个, 其结果如图 7 所示。

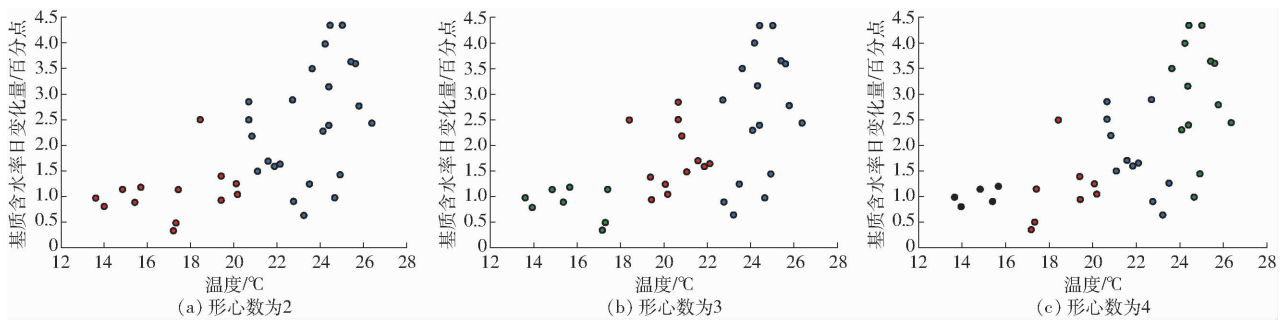


图 7 K-means 聚类结果

Fig. 7 K-means clustering results

分析形心数分别为 2、3、4 时各簇的特征, 具体参数如表 4 所示。当形心数为 2 时, 样本分为两类, 层次性明显, 第 1 簇形心坐标为 (17.2, 1.09), 日平均温度在 13 ~ 20.5°C 之间, 基质含水率日变化量平均值为 1.09 个百分点, 组内方差为 0.244 2; 第 2 簇形心坐标为 (23.5, 2.45), 日平均温度在 20.5 ~ 27°C 之间, 基质含水率日变化量平均值为 1.14 个百分点, 组内方差 1.148 5, 总方差为 0.830 8, 小于分组前方差, 但大于其他两组方差; 形心数为 4 时, 第 1 簇形心坐标为 (14.7, 1.01), 日平均温度在 13 ~ 16°C 之间, 基质含水率日变化量平均值为 1.01 个百分点, 组内方差 0.022 4; 第 2 簇形心坐标为 (18.7, 1.14), 日平均温度在 16 ~ 20.5°C 之间, 基质含水率日变化量平均值为 1.14 个百分点, 组内方差 0.375 9; 第 3 簇形心坐标为 (21.9, 1.79), 日平均温度在 20.5 ~ 23.6°C 之间, 基质含水率日变化量平均值为 1.79 个百分点, 组内方差 0.505 3; 第 4 簇形心坐标为 (24.8, 3.00), 日平均温度在 23.6 ~ 27°C 之间, 基质含水率日变化量平均值为 3.00 个百分点, 组内方差 1.022 7; 总方差最小, 为 0.593 9, 小于分组前方差, 但考虑到第 1 簇与第 2 簇平均值过于接

近, 实际灌溉中难以区分, 因此形心数为 4 时分类无现实意义, 予以排除。

形心数为 3 时, 层次清晰, 界限明确, 分类效果最好。第 1 簇形心坐标为 (15.7, 0.88), 日平均温度在 13 ~ 18°C 之间, 此簇温度最低, 基质含水率日变化量最低, 一般不超过 1.25 个百分点, 平均值为 0.88 个百分点, 其方差只有 0.086 8, 小于其他簇, 说明在温度较低时, 作物生长发育较为缓慢, 作物需水量较少, 同时温度对作物生长发育的限制作用明显; 第 2 簇形心坐标为 (20.5, 1.76), 日平均温度在 18 ~ 22.5°C 之间, 此簇温度适宜, 基质含水率日变化量有明显提高, 平均值为 1.76 个百分点, 方差为 0.344 6, 较第 1 簇增加, 说明作物需水量随温度升高而有明显提高, 温度升高促进作物生长; 第 3 簇形心坐标为 (24.4, 2.63), 日平均温度在 22.5 ~ 27°C 之间, 基质含水率日变化量平均值较其他簇最大, 但是分布较为分散, 方差最大, 为 1.409 7, 说明在温度较高时, 基质含水率变化量均值也显著提高, 与之前变化规律相同, 但是温度不再是影响作物需水的主要因素, 光照强度、空气湿度等其他因素对作物需水的影响增加。

2.5 基于温度的区间定量灌溉策略

由于作物生长所需水分主要从根部获得, 在未灌溉的条件下基质含水率一定会随着作物生长逐渐降低, 若忽略基质中的水分自然流失, 可近似认为作物需水量等于基质中水分减少量。灌溉策略应当能够在充分满足作物需水量的前提下, 减少水分自然流失, 最为切实可行的方法是提高灌溉频率, 降低灌溉量以减少水分流失。

基于上述分析, 提出一种基于日平均温度的日光温室封闭式栽培灌溉方法, 其策略如下: 设定 3 个温度范围 13 ~ 18°C、18 ~ 22.5°C、22.5 ~ 27°C, 并依次对应 3 个基质含水率日变化量 0.88、1.76、2.63

表 4 参数分析

Tab. 4 Analysis of parameters

形心数	形心坐标	平均值 / 百分点	组内方差	横轴区间 / °C	总方差
2	(17.2, 1.09)	1.09	0.244 2	(13, 20.5]	0.830 8
	(23.5, 2.45)	2.45	1.148 5	(20.5, 27)	
3	(15.7, 0.88)	0.88	0.086 8	(13, 18]	0.778 2
	(20.5, 1.76)	1.76	0.344 6	(18, 22.5]	
	(24.4, 2.63)	2.63	1.409 7	(22.5, 27)	
4	(14.7, 1.01)	1.01	0.022 4	(13, 16]	0.593 9
	(18.7, 1.14)	1.14	0.375 9	(16, 20.5]	
	(21.9, 1.79)	1.79	0.505 3	(20.5, 23.6]	
	(24.8, 3.00)	3.00	1.022 7	(23.6, 27)	

个百分点。计算当天的日平均温度,根据其所属温度区间选取合适的基质含水率日变化量,于第2天进行灌溉。每7d为一个周期,在周一进行修正,若基质含水率高于前一个周期初始值,则不进行灌溉,若低于前一个周期初始值,则进行补充。依据这一区间定量灌溉策略,理论上果期每株草莓仅需要4.51L水,相比实际耗水,节水约15.4%,节水能力有较大提高,具有可行性。

3 结论

(1)基于FDR原理的土壤水分传感器能够在短时间内对水分迁移作出响应,并能够长时间工作在基质环境下,能够应用于温室的实际生产和管理之中。

(2)基质含水率在灌溉第1阶段结束时达到峰值,能够较好地反映灌溉时长;灌溉结束后基质含水

率在20min内快速下降,然后趋于平稳;在每个灌溉周期内,基质含水率呈现线性下降趋势,其斜率能够较好反映基质含水率日变化量;在整个果期内,基质含水率下降速度随时间逐渐增加,斜率由0.0114增加至0.0365,反映出温度升高对作物需水量的影响增大。

(3)日均气温与基质含水率日变化量并无明显关系,但是通过K-means聚类算法分类,得到层次界限清晰的分簇。依据各簇的参数特征,得到温度区间与区间内基质含水率日变化量平均值,依据前一天日平均温度所处分类区间,选取对应基质含水率日变化量进行灌溉。该灌溉策略合理增加灌溉频率,理论上果期每株草莓仅需要4.51L水,可节水15.4%。由于灌溉方式为水肥一体化灌溉,施肥量随用水量的减少而减少,该灌溉策略也具有一定节肥效果。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 2017年农村统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国水利部. 2016年中国水资源公报[R]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201707/t20170711_955305.html.
- [3] 沈明卫, 郝飞麟. 灌溉方式对土壤中水分运动影响的模拟研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(2): 186-190.
SHEN Mingwei, HAO Feilin. Numerical simulation of the effect of irrigation method on soil water movement in greenhouse[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2006, 32(2):186-190. (in Chinese)
- [4] BHATNAGAR P R, CHAUHAN H S. Soil water movement under a single surface trickle source[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7):799-808.
- [5] 路河. 日光温室草莓生产需水规律的探讨[J]. 农业工程技术:温室园艺, 2008(4):40-41.
LU He. Discussion on the law of water demand for strawberry production in solar greenhouse[J]. Agriculture Engineering Technology (Greenhouse & Horticulture), 2008(4):40-41. (in Chinese)
- [6] 徐坤, 张西良, 李萍萍, 等. 便携式无土栽培基质多参数无线检测仪[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3):302-309.
XU Kun, ZHANG Xiliang, LI Pingping, et al. Development of portable wireless detector for multi-parameter of soilless cultivation substrates[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):302-309. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150344&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.044. (in Chinese)
- [7] 甘露, 范海燕, 吴文勇, 等. 无土栽培基质含水率特性参数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5):113-118.
GAN Lu, FAN Haiyan, WU Wenyong, et al. Water retention parameters of soilless-culture substrates[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):113-118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130521&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.021. (in Chinese)
- [8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):263-270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170634&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.034. (in Chinese)
- [9] NEMALI K S, MONTESANO F, DOVE S K, et al. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates; ECH2O and Theta probes[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(2):227-234.
- [10] SÁNCHEZ-MOLINA J A, RODRÍGUEZ F, GUZMÁN J L, et al. Water content virtual sensor for tomatoes in coconut coir substrate for irrigation control design[J]. Agricultural Water Management, 2015, 151:114-125.
- [11] 刘志刚, 李萍萍, 胡永光, 等. 电介质型水分传感器测定栽培基质含水率的标定模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):199-202.
LIU Zhigang, LI Pingping, HU Yongguang, et al. Calibration method for detection of matrix water content with dielectric-type

- moisture sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 199–202. (in Chinese)
- [12] CHOI K Y, CHOI E Y, KIM I S, et al. Improving water and fertilizer use efficiency during the production of strawberry in coir substrate hydroponics using a FDR sensor-automated irrigation system[J]. Horticulture Environment & Biotechnology, 2016, 57(5): 431–439.
- [13] 穆永航, 李莉, 王俊衡, 等. 基于频域法传感器的基质含水率检测性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 341–346.
MU Yonghang, LI Li, WANG Junheng, et al. Performance evaluation of substrate moisture detection based on frequency domain sensor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp. 1): 341–346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s052&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.052. (in Chinese)
- [14] 郭卫华, 李波, 张新时, 等. FDR系统在土壤水分连续动态监测中的应用[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 247–251.
GUO Weihua, LI Bo, ZHANG Xinshi, et al. FDR system and its application in the sequential dynamical measurement of soil moisture content[J]. Arid Zone Research, 2003, 20(4): 247–251. (in Chinese)
- [15] SHIN J H, SON J E. Application of a modified irrigation method using compensated radiation integral, substrate moisture content, and electrical conductivity for soilless cultures of paprika[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 198: 170–175.
- [16] THOMPSON R B, GALLARDO M, VALDEZ L C, et al. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors[J]. Agricultural Water Management, 2016, 88(1): 147–158.
- [17] FULCHER A F, BUXTON J W, GENEVE R L. Developing a physiological-based, on-demand irrigation system for container production[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 138(5): 221–226.
- [18] DURSUN M, OZDEN S. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors[J]. Scientific Research & Essays, 2011, 6(7): 1573–1582.
- [19] SIGRISMIS N, ARVANITIS K G, PASGIANOS G D, et al. Hydroponics water management using adaptive scheduling with an on-line optimiser[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2001, 31(1): 31–46.
- [20] NEMALI K S, IERSEL M W V. An automated system for controlling drought stress and irrigation in potted plants[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 110(3): 292–297.
- [21] INCROCCI L, MARZIALETTI P, INCROCCI G, et al. Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogenous container nursery crops[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131(1): 30–40.
- [22] HAGEN E, NAMBUTHIRI S, FULCHER A, et al. Comparing substrate moisture-based daily water use and on-demand irrigation regimes for oakleaf hydrangea grown in two container sizes[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 179(1014): 132–139.
- [23] 袁洪波, 李莉, 王海华, 等. 温室封闭式栽培自适应灌溉方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 222–228.
YUAN Hongbo, LI Li, WANG Haihua, et al. Adaptive irrigation method for closed cultivation in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 222–228. (in Chinese)
- [24] 卢佳骏. 草莓高架基质栽培的基质含水率扩散和草莓生理特性及滴灌控制系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
LU Jiajun. Study on water transport, physiology drip and irrigation control system of strawberry elevated substrate cultivation [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [25] 刘志刚. 电容传感器在栽培基质含水量检测中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
LIU Zhigang. Study on the application of the capacitance sensor in the substrates moisture detection [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)