

基于环境 VPD 决策的温室甜瓜灌溉系统设计与试验

张 智^{1,2} 王 正^{1,2} 刘杰成^{1,2} 孔婷婷^{1,2} 谢佳睿^{1,2} 张梦池^{1,2}

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部西北设施园艺重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为实现温室甜瓜栽培的精准自动灌溉,设计了一种基于甜瓜最优生长需求的灌溉决策系统。兼顾甜瓜产量、品质、水氮利用效率 3 个类别 10 个指标建立综合评价体系,引入融合最大隶属度的 AHP 法确定甜瓜栽培综合最优的日灌水水平,采用 K-means 聚类算法对日最优灌溉量与环境温湿度数据进行分析,建立了甜瓜不同生育期基于环境饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, VPD)聚类结果的定量灌溉决策模型。结果表明,灌水水平 120% 蒸腾蒸发量下甜瓜综合生长最优,不同生育期内 VPD 与灌溉量在聚类形心数为 3 时轮廓系数(0.72)最大,组间轮廓清晰,界限分明,且在 VPD 较高时,灌水量显著增高,聚类结果最优。自动灌溉系统采用 RS485 型温湿度传感器实时监测温室内的环境参数,由 STM32F103ZET6 单片机实现基于模型的灌溉控制,由电子流量计对灌水量计量反馈,并通过云平台实现远程监控功能。系统应用验证试验表明,甜瓜在产量、可溶性固形物含量和可溶性蛋白含量上略优于常规农艺管理,在节水方面优势显著,甜瓜全生育期累积节省灌水量 15.9%,并极大地降低劳动力成本,实现自动精量灌溉。

关键词: 甜瓜; 层次分析法; 饱和水汽压差; K-means 聚类算法; 灌溉系统

中图分类号: S652; S274.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)10-0371-08

OSID:



Design and Experiment of Greenhouse Melon Irrigation System
Based on Enviromental VPD Decision

ZHANG Zhi^{1,2} WANG Zheng^{1,2} LIU Jiecheng^{1,2} KONG Tingting^{1,2} XIE Jiarui^{1,2} ZHANG Mengchi^{1,2}

(1. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to realize the precise automatic irrigation of melon cultivation in facilities, an irrigation decision-making system based on the growing demand of melon was designed. Taking into account the three categories of melon yield, quality, and water and nitrogen use efficiency, a comprehensive evaluation system was established involving ten indicators, and the AHP method integrating the maximum membership degree was adopted to determine the comprehensive optimal daily irrigation level for melon cultivation. The K-means clustering algorithm was used to analyze the daily optimal irrigation amount and ambient temperature and humidity, and a quantitative irrigation decision model based on the clustering results of vapor pressure deficit (VPD) was established for melon in different growth stages. The results showed that the comprehensive growth of melon was optimal under the irrigation level of 120% evapotranspiration. When the number of cluster centroids was 3, the contour coefficient was the largest of 0.72. The contours and boundaries between groups were clear, and the irrigation amount was increased significantly with the increase in VPD, and the clustering results were the best. For the automatic irrigation system, RS485 sensors of temperature and humidity were used to detect the greenhouse environmental parameters in real time, and model-based irrigation control was realized by microcontroller of STM32F103ZET6, and electronic flowmeter was used to measure and feedback the amount of irrigation water, and then remote monitoring function was realized through cloud platform. The system application verification test showed that the melon produced by this system was slightly better than

收稿日期: 2022-06-23 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-YL(XN)04)、陕西省科技创新团队项目(2021TD-34)、西安市科技计划项目(2021JH-05-0024)和国家大宗蔬菜产业技术体系专项(CARS-23-D06)

作者简介: 张智(1978—),女,副教授,博士,主要从事设施园艺环境工程研究,E-mail: zhangzhione@126.com

that of conventional agronomic management in yield, soluble solids and soluble protein, and it had significant advantages in water saving, with 15.9% reduction in irrigation amount for the whole growth period, which also greatly reduced labor costs, and realized automatic precision irrigation.

Key words: melon; analytic hierarchy process; VPD; K-means clustering algorithm; irrigation system

0 引言

甜瓜是一种重要的园艺作物,我国甜瓜的栽培面积和产量均居于世界首位^[1]。甜瓜在生长中对水分十分敏感,水分施用不恰当会对其产量和品质产生严重影响^[2],因此甜瓜种植中的水肥管理一直是研究的热点。科学的水肥管理不仅可以提高水肥利用效率、减少资源浪费,还能改善温室内温湿度状况,减少病害和用药,实现设施甜瓜种植的提质增效^[3]。岳文俊等^[4]的研究表明,60%的蒸发灌水处理下甜瓜的灌溉水生产率达到最高,80%的蒸发灌水处理能使果实的维生素C含量达到最高,而100%的蒸发灌水处理时甜瓜的产量能够达到最高;李建明等^[5]的研究表明,80%的蒸发灌水处理能够使甜瓜果实的糖酸比达到最高;韩瑞锋^[6]的研究发现,在果实膨大期补充120%的蒸腾蒸发灌溉量,能使温室中甜瓜形态与产量综合指标达到最佳;任瑞丹^[7]研究发现120%的蒸腾蒸发灌溉量可以使甜瓜的有机肥利用效率最好。可见,甜瓜生长的不同指标对水分响应并不一致,而科学地兼顾多指标确定灌水水平是实现甜瓜栽培产量、品质、效率协同最优的关键。

当前我国农村人口老龄化程度日趋严重,传统的农业灌溉、施肥模式需要耗费大量人力物力,导致资源浪费严重、利用率低,已经不能适应现代农业水、肥、农艺一体化综合精准控制的年代要求^[8]。因此,急需应用自动化技术实现水肥一体智能灌溉,推进集约型农业的健康快速发展^[9-10]。袁洪波等^[11]设计了温室水肥一体化营养液调控系统;蔡振华等^[12]研制了微灌水肥作业自动化智能控制系统;黄语燕等^[13]设计了水肥一体化循环灌溉系统;这些研究促进了水肥灌溉自动化设备硬件集成发展。在物联网与局域网络的研究中,蔡长青等^[14]基于全球移动通信GSM模块设计了温室智能灌溉水肥一体化监控系统;GOAP等^[15]通过物联网解决方案实现数据采集与智能处理,进而决策灌溉方案;ZigBee等技术也被应用于远程自动灌溉系统,这些研究使得水肥自动化设备得以实现远程联动,降低了人力资源的投入。在控制方法上,朱德兰等^[16]基于模糊PID方法实现控制,快速平稳地满足实际施肥灌溉需求;李加念等^[17]基于PWM(Pulse width

modulation)以输出相应的占空比来控制吸肥电磁阀的开闭,来实现灌溉液中电导率(EC)的动态调控;这些控制方法的应用有效提升了设备的稳定性。然而,在控制决策上,目前灌溉系统仍多以简单阈值或单一指标的模型为主,忽略了作物生长对水分供应的响应,难以满足不同环境及生育期动态变化的水分需求,也限制了水分生产潜力的进一步提升。

本研究在建立甜瓜水分需求模型的基础上,构建自动灌溉系统,实现精准灌溉。以甜瓜产量、品质及水氮利用效率指标综合最优为目标,采用AHP(Analytic hierarchy process)模糊层级分析确定最优的水肥配方,引入聚类分析构建以环境饱和和水汽压差(VPD)为决策依据的甜瓜全生育期自动灌溉决策模型,以此为基础,设计低成本、运行稳定的自动灌溉系统,以实现基于甜瓜生长需求的自动灌溉管理。

1 基于甜瓜综合生长最优的灌水量决策模型

1.1 基于最大隶属度的综合评价

甜瓜水肥试验于2020年3—11月进行,以灌水量和施氮量为试验因子,依据蒸腾蒸发量(ETc)设置3个灌水水平(W1:80%ETc,W2:100%ETc,W3:120%ETc),依据目标产量法设计2个施氮水平(N1:183.7 kg/hm²,N2:369.5 kg/hm²),完全组合共6个处理,测定产量、品质及效率3类共10个指标。兼顾产量、品质和效率,建立甜瓜生长综合评价体系,并根据各指标综合评分结果得到最佳水氮管理制度,来确定日最佳灌水量。

1.1.1 甜瓜综合评价层次模型

本文兼顾“产量-品质-水氮利用效益”3方面构建了甜瓜综合评价层次模型(图1)。将甜瓜的所有指标分为三大类:产量效益(C₁)、品质效益(C₂)和水氮利用效益(C₃),指标层包含公顷产量(C₁₁)、商品果率(C₁₂)、可溶性固形物含量(C₂₁)、可溶性总糖含量(C₂₂)、可溶性蛋白含量(C₂₃)、游离氨基酸含量(C₂₄)、维生素C含量(C₂₅)、硝酸盐含量(C₂₆)、灌溉水利用效率(C₃₁)、氮素利用效率(C₃₂)10个指标。其中,品质指标均为试验测定;产量指标中,公顷产量为单株产量与种植密度乘积;商品果率为单位面积商品果数占单位面积总果实数百分比,商品果为质量大于0.5 kg且无开裂及表观破损的果实;效率

指标中的水分利用效率 (kg/m^3) 及氮素利用效率 (kg/kg) 按照文献[18–19]方法确定。

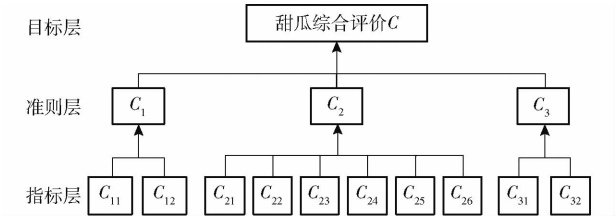


图 1 甜瓜综合评价层级模型

Fig. 1 AHP evaluation hierarchy diagram

使用基于最大隶属度的 AHP 法对不同灌溉和施氮处理组合下的设施栽培甜瓜进行评价,利用最大隶属度对所有数据进行无量纲化处理,建立正负向评估结果和评价矩阵^[20]。

本评估系统共包括 10 个指标,构建评估指标矩阵为

$$X = [C_{11} \ C_{12} \ C_{21} \ C_{22} \ C_{23} \ C_{24} \ C_{25} \ C_{26} \ C_{31} \ C_{32}]$$

评价的 5 个水平等级为

$$E = \{\text{很好, 好, 中等, 差, 很差}\}$$

参照 NY/T 427—2016 以及文献[21–23],甜瓜各指标的评估标准如表 1 所示。

表 1 水氮处理下评价系统指标的评估标准

Tab. 1 Evaluation criteria of indicators in evaluation system of water-nitrogen coupling treatment

指标	很好	好	中等	差	很差
$C_{11}/(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	13	11	9	7	5
$C_{12}/\%$	95	90	85	80	75
$C_{21}/\%$	12	11	10	9	8
$C_{22}/\%$	10	9	8	7	6
$C_{23}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
$C_{24}/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	1 500	1 300	1 100	900	700
$C_{25}/(\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1})$	70	60	50	40	30
$C_{26}/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	200	300	400	500	600
$C_{31}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	17	15	13	11	9
$C_{32}/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	70	60	50	40	30

注:除 C_{26} 为负向指标外,其他指标均为正向指标。

1.1.2 基于模糊 AHP 的权重计算与评价结果

AHP 层次分析法可以衡量两个指标的相对重要性并构建判断矩阵。本试验设计甜瓜各指标相对重要性和优劣顺序的调查问卷,并根据调查评分结果建立判断矩阵。利用 Yaahp 10.01 软件进行 AHP 法的权重计算^[24],判断矩阵分别为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1.667 & 2 \\ 0.6 & 1 & 2 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$
$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0.333 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.333 & 2 & 1 & 0.5 & 2 \\ 3 & 1 & 2 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 0.5 & 1 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$
$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

权重计算结果如表 2 所示。

表 2 AHP 法权重计算结果

Tab. 2 Result of AHP method weight calculation

	指标	局部权重	最终权重	一致性检验参数
目标层 C	C_1	0.467 5	0.467 5	$C_R = 0.028\ 0$ $\lambda_{\max} = 3.029\ 1$
	C_2	0.333 8	0.333 8	
	C_3	0.198 7	0.198 7	
准则层 C_1	C_{11}	0.750 0	0.350 6	$C_R = 0$ $\lambda_{\max} = 2.000\ 0$
	C_{12}	0.250 0	0.116 9	
准则层 C_2	C_{21}	0.156 7	0.052 3	$C_R = 0.333\ 8$ $\lambda_{\max} = 6.300\ 0$
	C_{22}	0.196 6	0.065 6	
	C_{23}	0.111 7	0.037 3	
	C_{24}	0.136 3	0.045 5	
	C_{25}	0.272 8	0.091 1	
	C_{26}	0.125 9	0.042 0	
准则层 C_3	C_{31}	0.500 0	0.099 3	$C_R = 0.198\ 7$ $\lambda_{\max} = 2.000\ 0$
	C_{32}	0.500 0	0.099 3	

将各评价指标划分为正负向指标,利用三角形极值和梯形隶属函数计算隶属度。然后根据每个隶属度构造模糊综合评价矩阵 R 为

$$R = (r_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 r_{ij} ——指标隶属度

对于正向指标,评价等级为很好的隶属度计算公式为

$$r_{b1}(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq e_1) \\ \frac{x - e_2}{e_1 - e_2} & (e_2 < x < e_1) \\ 0 & (x \leq e_2) \end{cases} \quad (2)$$

评价等级为好、中等、差的隶属度计算公式为

$$r_{bk}(x) = \begin{cases} 1 & (x = e_k) \\ \frac{x - e_{k+1}}{e_k - e_{k+1}} & (e_{k+1} < x < e_k) \\ \frac{e_{k-1} - x}{e_{k-1} - e_k} & (e_k < x < e_{k-1}) \\ 0 & (x \leq e_{k+1}, x \geq e_{k-1}) \end{cases} \quad (3)$$

评价等级为很差的隶属度计算公式为

$$r_{bs}(x)=\begin{cases}1 & (x\leqslant e_5) \\ \frac{e_4-x}{e_4-e_5} & (e_5<x<e_4) \\ 0 & (x\geqslant e_4)\end{cases}\quad (4)$$

式中 x ——实际值 e ——评价等级

对于负向指标,隶属度计算公式参考正向指标计算公式与文献[25-26]。

权重矩阵 C 和模糊评判矩阵 R 通过加权计算最终获得模糊综合评价结果矩阵 B ,即

$$B=C\cdot R=[b_1\quad b_2\quad \cdots\quad b_m]\quad (5)$$

$$\text{其中 } b_j=\min\left(1,\sum_{i=1}^n c_i r_{ij}\right)\quad (j=1,2,\cdots,m)\quad (6)$$

式中 c_i ——各处理中每一个指标的权重

b_j ——每个处理最终的综合评价结果

通过上述公式计算,各水氮处理的综合评价结果以及各等级隶属度排名如表3所示。从结果可以看出,灌水对甜瓜综合评分的影响由大到小依次为W3、W2、W1,且整体来说在低氮水平下更优。因此120%蒸腾蒸发量的灌水水平配施183.7 kg/hm²低氮水平营养液为甜瓜设施栽培中最佳水氮管理制度,产量品质效率协同最优。

表3 综合评价结果

Tab.3 Comprehensive evaluation results

处理	评价等级隶属度					得分	分级	排名
	很差	差	中等	好	很好			
W1N1	0.290	0.250	0.210	0.103	0.147	2.568	差	5
W1N2	0.281	0.335	0.178	0.093	0.113	2.421	很差	6
W2N1	0.034	0.252	0.323	0.134	0.257	3.330	中等	3
W2N2	0.149	0.182	0.277	0.224	0.168	3.081	中等	4
W3N1	0.097	0.105	0.186	0.243	0.369	3.683	很好	1
W3N2	0.109	0.091	0.185	0.261	0.354	3.660	很好	2

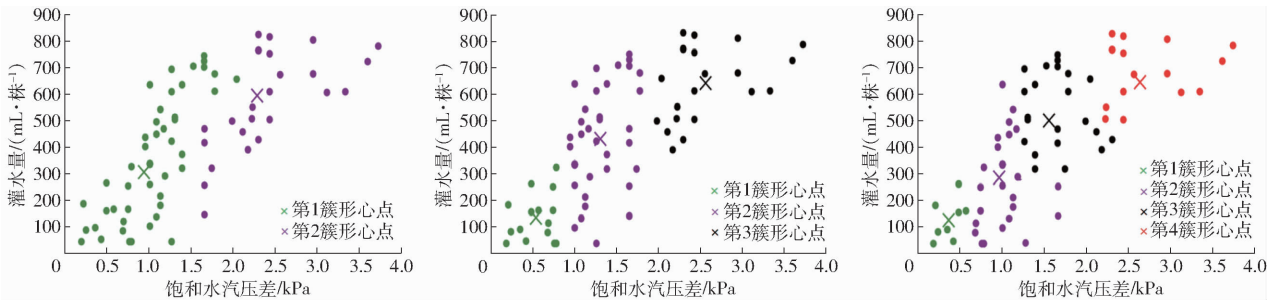


图2 甜瓜开花坐果期 K-means 聚类分析结果

Fig.2 K-means clustering analysis results of blossom and fruit setting period of melon

以开花坐果期为例,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,总方差为0.993 6,小于分组前方差,轮廓系数为0.71,但VPD在1.50~2.50 kPa时层次不明显,在实际灌溉中难以区分。

1.2 基于 K-means 的灌溉决策模型

1.2.1 模型决策条件

基于甜瓜综合评价结果,以120%日蒸腾蒸发量为基准建立灌溉决策模型。以前期甜瓜栽培试验数据为基础,建立基于环境参数的灌溉方案。因环境温湿度存在耦合关系,引入饱和水汽压差(VPD, kPa)作为灌溉决策因子。VPD反映空气水势,影响着植物气孔的闭合,从而控制着植物蒸腾、光合等生理过程,对作物水分蒸腾蒸发有显著影响,其数值可由空气相对湿度(R_H)和气温(T)计算,公式为[27-29]

$$VPD=0.611e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}\left(1-\frac{R_H}{100}\right)\quad (7)$$

1.2.2 数据分析

将甜瓜生长分为伸蔓期、开花坐果期和结果期,对日均VPD与日灌水量进行分析。由于各个时期内日均VPD对应灌水量的数据点具有分散性的特点,数据散落面积大,因此引入K-means聚类分析方法建立甜瓜全生育期灌溉决策模型。其基本思想是: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。算法具体流程如下[30]:①输入算法实现以及作图所需函数。②提取Excel表中的所有数据。③利用函数,确定形心点个数以及每一簇样本的大小。④更新形心点的位置,直到形心点位置不再发生变化。⑤画出聚类后的图形。

依据甜瓜生长特征,应用K-means聚类算法分析结果如图2所示。K-means算法能将数据进行优化处理,利用Python语言对该算法进行模型的编程。

形心数为4时,总方差为0.995 4,小于分组前方差,轮廓系数为0.65,VPD在1.00~2.50 kPa时层次不明显,实际灌溉中难以区分,因此形心数为4时的分类无现实意义。形心数为3时,第1簇形心坐标为(0.52, 119.79),日平均VPD在0~

0.75 kPa 之间,此簇灌水量最低;第 2 簇形心坐标为 (1.33 , 421.13), 日 平 均 VPD 在 0.75 ~ 2.00 kPa 之间,此簇灌水量适宜,较第 1 簇增加,说明作物需水量随 VPD 升高而有明显提高;第 3 簇形心坐标为 (2.61 , 657.87), 日 平 均 VPD 在 2.00 ~ 4.00 kPa, 尽管总方差略高但差异微小,而此时轮廓系数更大,组间轮廓清晰,界限明确,分类效果最好。且在 VPD 较高时,灌水量显著提高,说明温度、相对湿度是影响灌水量的重要因素。

表 4 甜瓜开花坐果期各项参数

Tab.4 Various parameters of melon blossom and fruit setting period

形心数	形心坐标	灌水量平均值/ (mL·株 ⁻¹)	轮廓系数	VPD/kPa	总方差
2	(0.93,302.91)	302.91	0.71	0 ~ 2.50	0.993 6
	(2.38,608.87)	608.87		1.50 ~ 4.00	
	(0.52,119.79)	119.79		0 ~ 0.75	
3	(1.33,421.13)	421.13	0.72	0.75 ~ 2.00	0.999 6
	(2.61,657.87)	657.87		2.00 ~ 4.00	
	(0.43,119.79)	119.79		0 ~ 1.00	
4	(0.98,297.92)	297.92	0.65	0.50 ~ 2.00	0.995 4
	(1.65,509.57)	509.57		1.00 ~ 2.50	
	(2.68,654.05)	654.05		2.00 ~ 4.00	

注:轮廓系数(Silhouette coefficient)是聚类效果的评价方式,其值介于[-1,1],越趋近于 1 代表内聚度和分离度都相对较优。

应用 K-means 聚类算法对甜瓜伸蔓期、开花坐果期和膨果期 3 个生育期分析,单株定量灌溉量如表 5 所示。在苗期不做处理,从伸蔓期开始按照 VPD 决策灌溉,超过 VPD 最大分类值时以最高量灌溉。

表 5 甜瓜不同生育期内不同 VPD 区间的灌水量

Tab.5 Irrigation amount for different VPD intervals in different growth periods of melon

生育期	VPD/kPa	灌水量/(mL·株 ⁻¹)
伸蔓期	0 ~ 1.25	142.4
	1.25 ~ 2.35	384.2
	2.35 ~ 4.00	666.4
开花坐果期	0 ~ 0.75	119.8
	0.75 ~ 2.00	421.1
	2.00 ~ 4.00	657.8
膨果期	0 ~ 1.50	127.3
	1.50 ~ 2.50	396.9
	2.50 ~ 4.00	756.3

2 灌溉系统设计

2.1 系统总体架构与硬件选型

灌溉系统由数据采集组件、通信组件、决策组

件、监控组件、灌溉组件组成(图 3、4)。其中数据采集组件由插针式土壤温湿度与 EC 传感器、环境光照与温湿度一体传感器和 485 型流量计构成。通信组件由 485 模块和 4G 物联模块构成。决策组件由 STM32 单片机与控制模型构成。监控组件由现场 LCD 监控显示屏和 4G 远程物联监控平台组成。灌溉组件包括储水桶、营养液储罐、继电器、潜水泵、供液支管、供液毛管和滴箭。

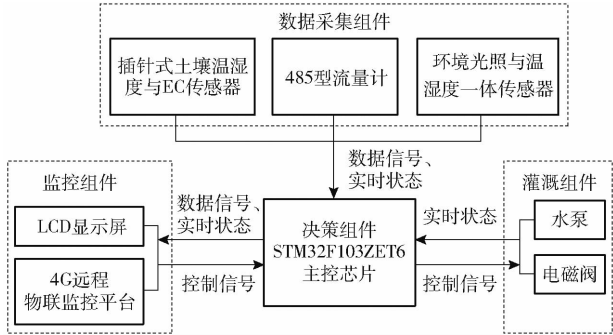


图 3 基于环境 VPD 决策的温室甜瓜灌溉系统拓扑结构图

Fig.3 Topology diagram of greenhouse melon irrigation system based on environmental VPD decision

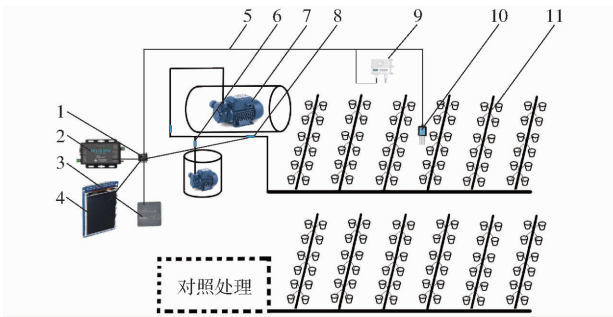


图 4 基于环境 VPD 决策的温室甜瓜灌溉系统布置示意图

Fig.4 Layout diagram of greenhouse melon irrigation system based on environmental VPD decision

1. SP3485 模块 2. 物联模块 3. STM32F103ZET6 主控芯片
4. LCD 显示屏 5. 四芯屏蔽线 6. 电磁阀 7. 潜水泵 8. 485 型
流量计 9. 环境光照与温湿度一体传感器 10. 插针式土壤温湿
度与 EC 传感器 11. 滴箭

决策组件 STM32F103ZET6 主控芯片和通信组件 485 信号收发模块集成于单片机板上;数据采集组件插针式土壤温湿度与 EC 传感器、环境光照与温湿度一体传感器和 485 型流量计与通信组件 485 模块之间采用 485 协议有线连接;监控组件中现场 LCD 显示屏与单片机串口有线连接,远程监控平台通过 4G 模块与单片机串口有线连接收发数据。各传感器及流量计的实时数据和继电器开关状态信号经通信组件传输给决策组件,经模型决策后控制水泵及电磁阀的开关,所有检测数据实时传输给 LCD 监控与 4G 远程监控平台,实现灌溉控制。现场 LCD 监控显示屏和 4G 远程物联监控平台设有手动启停控制,并设置优先于自动控制逻辑,来应对农业

生产上的特殊情况。

系统各组件部分的硬件参数如表 6 所示。试验棚种植甜瓜 72 株,依据需求选用 400 L 的卧式储水

桶和 60 L 的营养液储液桶,灌溉组件中的支管、毛管和滴箭为原水肥试验配置,潜水泵根据管路长短和滴箭流量选型。

表 6 系统硬件规格型号及价格
Tab.6 Specifications and performance of system hardware

组件名称	组件构成	规格型号	数量	单价/元
数据采集组件	插针式土壤温湿度与 EC 传感器	RS485 型普瑞森社	1	280
	环境光照与温湿度一体传感器	RS485 型普瑞森社 0-65535	1	99
	485 型流量计	Meacon 电磁数显流量计	1	1 476
通信组件	485 收发模块	SP3485	1	5
	4G 物联模块	塔石 E29V	1	109
决策组件	单片机	STM32F103ZET6	1	120
灌溉组件	潜水泵	EGP4500L,130W,扬程 3.8 m,流量 4 800 L/h	2	58
	1 路继电器	TONGLING 5VDC	3	2
	灌溉蓄水桶	材质聚氯乙烯(PVC),容积 400 L	1	355
	营养液储罐	材质聚氯乙烯(PVC),容积 60 L	1	45
	支管	材质聚乙烯(PE),内径 25 mm	1(60 m)	30
	毛管	材质高密度聚乙烯(DPE),内径 16 mm	1(180 m)	180
	滴箭	4 L/h 四出滴箭,含稳流器	144	2
监控组件	LCD 显示屏	3.5 寸,分辨率 480 像素×320 像素	1	98
总价				3 207

2.2 系统软件设计

基于环境 VPD 决策的温室甜瓜灌溉系统软件在 Keil uVision5 软件平台下开发,依靠 C 语言实现显示界面及控制逻辑与数据库的操作、组件间的通信。系统工作流程如图 5 所示。系统配备了手动模式,以备在停电、断网、自动控制模型故障时使用。

3 系统应用验证

3.1 试验场地与方法

试验在陕西省杨凌区锦田合作社的两个小跨度塑料拱棚中进行(34°17'N,108°02'E,海拔 450 m),拱棚长度 8 m,跨度 4 m,脊高 2.1 m,两侧配电机控制顶侧通风系统开闭。甜瓜品种为千玉 6 号,采用基质盆栽,营养液为综合评价最优的肥料配方。2021 年 7 月 5 日播种到 72 穴育苗盘,育苗基质为基质与珍珠岩混合基质,2021 年 8 月 5 日定植,10 月 15 日拉秧。试验组使用本系统进行甜瓜自动灌溉种植,对照组依托本地有经验的农民进行人工管理,2 组种植田间管理方式一致。试验组中应用自动灌溉系统完成室内温湿度、光照强度、基质温湿度和 EC 信息的采集及集中管理,并依据实时数据解析进行灌溉(图 6)。2 组均安装电子流量计,计量全生育期灌溉水用量。使用 SPSS 软件对 2 组甜瓜产量与品质进行分析。

3.2 试验结果与分析

应用本自动灌溉系统和对照组甜瓜整个生育期总用水量和果实品质对比如表 7 所示。试验处理甜

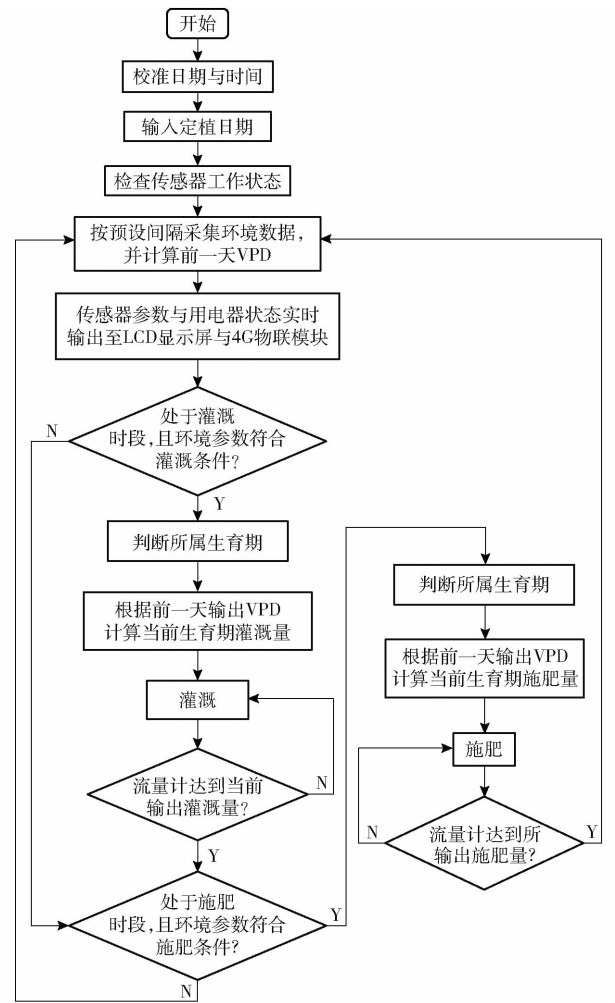


图 5 基于环境 VPD 决策的温室甜瓜灌溉系统
控制流程图

Fig.5 Control flow chart of greenhouse melon irrigation system
based on environmental VPD decision



图 6 系统实际运行图

Fig.6 Actual operation diagram of system

表 7 甜瓜指标对比

Tab.7 Melon indicator comparison

处理	产量指标		品质指标			单株全生育期 灌水量/L
	单果质量/g	产量/ (t·hm ⁻²)	可溶性固形物 含量/%	维生素 C 含量/ (mg·(100g) ⁻¹)	可溶性蛋白含量/ (mg·g ⁻¹)	
试验	261.16	9.79	9.88	53.83	0.44	13.20
对照	255.36	9.58	9.80	42.76	0.39	15.69
显著性	NS	NS	NS	*	NS	

注：* 表示显著,NS 表示不显著。

瓜果实折算产量为 9.79 t/hm²，相较于对照处理高 2.2%，试验处理的甜瓜可溶性固形物含量和可溶性蛋白含量相较于对照处理分别高 0.98% 和 12.8%，2 组处理无显著差异；试验处理的甜瓜果实维生素 C 含量显著高于对照处理，达 25.9%。从灌水量来看，试验处理的甜瓜平均每株全生育期总用水量比对照处理少 15.9%，说明采用本系统种植甜瓜，在保证产量及品质的基础上，可有效节约水资源，也节省了大量人工成本。

4 结论

(1) 兼顾甜瓜产量、品质及水氮利用效率构建综合评价体系，利用 AHP 模糊层级分析法确定了 120% 的蒸腾蒸发量为甜瓜的最优灌水水平。基于

K-means 聚类分析构建了以环境 VPD 为决策因子的甜瓜全生育期灌溉模型，形心数为 3 时聚类效果最优。

(2) 基于甜瓜灌溉决策模型设计了远程自动灌溉管理系统，在硬件选择上兼顾低成本和设备轻量化，以高性能低能耗的 STM32 系列芯片作为主控芯片，通过数据采集组件、通信组件、决策组件、监控组件、灌溉组件实现环境参数的自动采集和甜瓜生长全生育期的水肥自动灌溉。

(3) 系统应用试验表明，甜瓜在产量、品质上略优于人工经验种植下的同茬果实，但节水优势显著，全生育期累积节水 15.9%，证明本系统采用的基于 VPD 与灌溉量的甜瓜灌溉决策模型合理，且有效降低了劳动力的投入，适用于甜瓜节水高效生产。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.

[2] 王京伟, 牛文全, 张明智, 等. 覆膜方式毛管密度和灌水下限对温室甜瓜生长的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 117 – 125.

WANG Jingwei, NIU Wenquan, ZHANG Mingzhi, et al. Response of muskmelon growth to film covering, drip pipes density and irrigation lower limits in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 117 – 125. (in Chinese)

[3] 马艳红. 日光温室薄皮甜瓜-番茄水肥一体化轮作高效生产模式[J]. 北方园艺, 2021(1): 173 – 175.

[4] 岳文俊, 何文学, 丁春梅, 等. 不同滴灌水肥处理对温室甜瓜养分吸收、产量和品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(12): 2370 – 2380.

YUE Wenjun, HE Wenxue, DING Chunmei, et al. Effects of different water and fertilization on nutrient uptake, yield and quality of greenhouse muskmelon under drip irrigation condition[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(12): 2370 – 2380. (in Chinese)

[5] 李建明, 樊翔宇, 闫芳芳, 等. 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 Jianming, FAN Xiangyu, YAN Fangfang, et al. Effect of different irrigation amount based on transpiration model on yield and quality of muskmelon[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 156 – 162. (in Chinese)

[6] 韩瑞锋. 水分对温室甜瓜生长、光响应特性及果实品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.

HAN Ruifeng. Effect of water on the growth, characteristics of light response and fruit quality of greenhouse muskmelon[D]. Yangling: Northwest A&F University,2011. (in Chinese)

[7] 任瑞丹. 灌溉量对全有机营养甜瓜和番茄水肥利用及产量和品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.

REN Ruidan. Effects of irrigation on water yield and quality of melon and tomato cultivated with total organic nutrition [D]. Yangling: Northwest A&F University,2020. (in Chinese)

[8] 李天来,许勇,张金霞. 我国设施蔬菜、西甜瓜和食用菌产业发展的现状及趋势[J]. 中国蔬菜,2019,1(11):6-9.

[9] 齐飞,魏晓明,张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报,2017,33(24):1-9.

QI Fei, WEI Xiaoming, ZHANG Yuefeng. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the CASE,2017,33(24):1-9. (in Chinese)

[10] 艾玉虎. 浅谈农业机械自动化在现代农业中的应用[J]. 南方农机,2022,53(6):59-61.

[11] 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 CASE, 2016, 32(8):27-32. (in Chinese)

[12] 蔡振华,庄重,靳晨,等. 微灌水肥作业自动化智能控制系统研究[J]. 农业工程,2021,11(5):41-44.

CAI Zhenhua,ZHUANG Zhong,JIN Chen, et al. Research on automatic intelligent control system of micro irrigation water and fertilizer operation[J]. Agricultural Engineering, 2021,11(5):41-44. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 蔡长青,侯首印,张桢,等. 温室智能灌溉水肥一体化监控系统[J]. 江苏农业科学,2017,45(10):164-166.

CAI Changqing, HOU Shouyin, ZHANG Zhen, et al. Integrated monitor system of water and fertilizer of greenhouse intelligent irrigation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2017,45(10):164-166. (in Chinese)

[15] GOAP A, SHARMA D, SHUKLA A K, et al. An IoT based smart irrigation management system using machine learning and open source technologies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155:41-49.

[16] 朱德兰,阮汉钺,吴普特,等. 水肥一体机肥液电导率远程模糊 PID 控制策略[J]. 农业机械学报,2022,53(1):186-191.

ZHU Delan, RUAN Hancheng, WU Pute, et al. Strategy on remote fuzzy PID control for fertilizer liquid conductivity of water fertilizer integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):186-191. (in Chinese)

[17] 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等. 基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(16):22-30.

LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruijue, et al. Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16):22-30. (in Chinese)

[18] PIRI H, NASERIN A. Effect of different levels of water, applied nitrogen and irrigation methods on yield, yield components and IWUE of onion-ScienceDirect[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 268:109361.

[19] 华一帆. 播种方式与不同类型氮肥互作对小麦产量和氮素吸收利用的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2022.

HUA Yifan. Effects of sowing pattern and different nitrogen fertilizers on grain yield, nitrogen uptake and utilization of wheat [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2022. (in Chinese)

[20] 陈冲. 基于 GIS 和模糊 AHP 的购物中心选址优化研究[D]. 扬州:扬州大学,2020.

CHEN Chong. Research on shopping center location optimization based on GIS and fuzzy AHP arithmetic—a case study of Yangzhou[D]. Yangzhou: Yangzhou University,2020. (in Chinese)

[21] 薄皮甜瓜质量分级要求;DB14/T 1572—2018[S]. 2018.

[22] 绿色食品 西甜瓜;NY/T 427—2016[S]. 2016.

[23] 孙涛,甘海玲,周道明,等. 陕北有机基质栽培薄皮甜瓜品种筛选[J/OL]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022. [2022-06-15]. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.12.014.

SUN Tao, GAN Hailing, ZHOU Daoming, et al. Slection of muskmelon varieties cultivated on organic substrate in northern Shaanxi[J/OL]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2022. [2022-06-15]. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.12.014. (in Chinese)

[24] HE Zhihao, SU Chunjie, CAI Zelin, et al. Multi-factor coupling regulation of greenhouse environment based on comprehensive growth of cherry tomato seedlings[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 297:110960.

[25] XIAO Chao, ZOU Haiyang, FAN Junliang, et al. Optimizing irrigation amount and fertilization rate of drip-fertigated spring maize in northwest China based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Agricultural Water Management, 2021, 257:107157.

[26] MEENA S R, MEENA S D, PRATAP S, et al. Strategic analysis of the Indian agri-food supply chain[J]. OPSEARCH 56, 2019,56(3):965-982.

[27] ZHANG Rongfei, XU Xianli, LIU Meixian, et al. Hysteresis in sap flow and its controlling mechanisms for a deciduous broad-leaved tree species in a humid Karst region[J]. Science China(Earth Sciences), 2019,62(11):1744-1755.

[28] CARELLA A, GIANGUZZI G, SCALISI A, et al. Fruit growth stage transitions in two mango cultivars grown in a mediterranean environment[J]. Plants, 2021, 10(7):1332-1332.

[29] 张大龙,宋小明,杜清洁,等. 温室环境因子驱动甜瓜水分传输机理分析与模拟[J]. 农业机械学报,2017,48(2):232-239,214.

ZHANG Dalong, SONG Xiaoming, DU Qingjie, et al. Mechanism analysis and simulation of water transport driven by environmental factors for greenhouse muskmelon[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017, 48(2):232-239,214. (in Chinese)

[30] 李莉,王宏康,吴勇,等. 基于 K-means 聚类算法的草莓灌溉策略研究[J]. 农业机械学报,2020,51(1):295-302.

LI Li, WANG Hongkang, WU Yong, et al. Investigation of strawberry irrigation strategy based on K-means clustering algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):295-302. (in Chinese)