

大棚种植川贝母分区变量灌溉系统研制

廖敏, 栗超, 张宇, 杨亚军, 张强

(1. 西华大学现代农业装备研究院, 成都 610039; 2. 西华大学机械工程学院, 成都 610039)

摘要: 名贵中药材川贝母喜湿、怕高湿特性成为人工灌溉的难点, 智能化精准灌溉系统可实现川贝母按需节水灌溉。该研究开发了基于无线传感器网络的川贝母分区变量灌溉系统。在人工种植试验过程中, 采用电容法和土壤水分测定仪获得了川贝母生长需水及灌溉用水数据, 建立了川贝母生长含水率模型和灌溉含水率模型。为了实现川贝母分区变量灌溉, 建立了灌溉模糊控制决策模型, 该模糊控制器为双输入单输出结构, 利用遗传算法优化模糊控制量化因子、比例因子、模糊控制规则和隶属函数, 实现遗传算法优化的模糊控制对川贝母灌溉用水进行精确决策和川贝母分区变量灌溉。在川贝母种植大棚内应用了该分区变量灌溉技术和系统, 结果表明, 模糊控制决策的灌溉有一定节水效果, 遗传算法优化后的模糊控制每次灌溉土壤含水率增量主要分布在 5%~7%, 灌溉土壤含水率增量有明显下降。特定种植密度下灌溉试验结果表明, 优化后川贝母变量灌溉误差能控制在±5%附近, 满足川贝母按需灌溉需求, 分区变量灌溉效果明显; 随川贝母种植密度增加, 所需灌溉用水也增大, 二者基本呈线性关系 ($R^2=0.975$); 川贝母分区变量灌溉节水率与种植密度比之间呈抛物线关系, 优化后标准种植密度的年节水率为 27.6%。该研究可为川贝母种植密度和灌溉节水提供参考和技术支持。

关键词: 模糊控制; 遗传算法; 变量灌溉; 节水灌溉; 川贝母

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.014

中图分类号: S274.1; S274.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0108-09

廖敏, 栗超, 张宇, 等. 大棚种植川贝母分区变量灌溉系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 108-116. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.014 <http://www.tcsae.org>
Liao Min, Su Chao, Zhang Yu, et al. Development of the partition variable irrigation system for greenhouse planting *Fritillaria cirrhosa*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 108-116. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.014 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国很多果园或大棚配备微喷或滴灌设备, 但自动灌溉系统应用较少, 大多数采用人工调控。不同作物对水分的需求有明显差别, 作物在不同生长阶段对水分的需求也不一样, 例如, 果农靠个人经验灌溉柑橘, 缺乏科学灌溉依据, 未必最适宜果树需求^[1], 需结合作物种类和生长情况综合确定灌水量。农业用水的关键为节水, 人工凭经验灌溉会造成作物用水不精确、水资源浪费^[2]。农业节水以高效用水为核心, 其中对作物实施精准灌溉一直是节水灌溉的研究重点, 即解决何时灌和灌多少的问题^[3-4]。

川贝母属于多年生草本植物, 主要生长在高海拔地区, 喜冷凉气候条件, 具有耐寒、喜湿、怕高湿、喜荫蔽的特性。目前川贝母人工种植技术还未成熟, 通常为大棚种植, 对环境温湿度要求较高。川贝母灌溉一般是人工浇灌, 不同年份、不同季节、不同土壤条件和种植密度的贝母生长需水都不一样, 不同种植小区需要采用不同的灌溉决策, 人工灌溉的方式很难满足川贝母用水需求, 可能引起贝母高湿或者干旱造成巨大损失, 且人力成本较高、水资源利用率低。目前分区变量灌溉技术

在国内外已经获得了成功应用^[5-8]。对川贝母等经济价值高的药材实施变量、精准灌溉的需求越来越急迫, 因此需要研发一种可控的川贝母分区、精准灌溉技术。

目前, 以色列、美国、荷兰、西班牙、意大利、法国、印度、南非等国都在应用水肥一体化滴灌技术^[2,9]。中国水肥一体化技术研究起步较晚, 但进步很快, 且日趋成熟。李久生等^[10]在国内率先开展了变量灌溉理论和控制技术的研究, 发展了适用于缺水地区的非充分变量灌溉理论。一些学者针对荔枝、柑橘等果园以及花卉、茶园提出了结合作物生长参数分析的精确灌溉系统解决方案, 根据作物需水信息和环境条件, 按一定策略进行适时、适量、定位灌溉^[11-14]。这种智能化、精确化灌溉节水思想为本研究提供了技术支持。

该研究针对川贝母精准灌溉需求, 基于分区变量灌溉的思想^[15-18], 应用遗传算法优化的模糊控制器设计方法^[19], 优化模糊控制器的量化因子、比例因子、隶属函数和模糊规则, 建立川贝母变量灌溉决策模型, 以提高模糊控制器在川贝母分区变量灌溉中的控制效果, 满足川贝母按需灌水的需求, 以期达到精准、节水灌溉目的。

1 系统总体结构设计

利用无线传感器网络、分布式控制、最优化等技术^[20-21], 设计变量灌溉控制器, 开发基于无线传感器网络的川贝母分区变量灌溉系统, 采集大棚内川贝母灌溉用水信息, 由灌溉系统决策输出用于不同区域的川贝母变量灌溉控

收稿日期: 2021-03-26 修订日期: 2021-07-15

基金项目: 四川省科技厅项目 (2019YFN0084, 2019GFW007)

作者简介: 廖敏, 博士, 教授, 研究方向为现代农业装备与技术。

Email: 848264319@qq.com

制方案, 实现满川贝母按需灌溉控制。

如图 1 所示, 川贝母分区变量灌溉系统^[22]包括灌溉主机、灌溉电磁阀、喷头、传感器、电脑客户端、移动客户端、远程服务器和水塔。根据灌溉具体需求, 一个远程服务器能匹配多个灌溉主机、多个电脑客户端和多个移动客户端, 一个灌溉主机能匹配多个灌溉电磁阀和多个传感器, 一个灌溉电磁阀能匹配多个喷头。

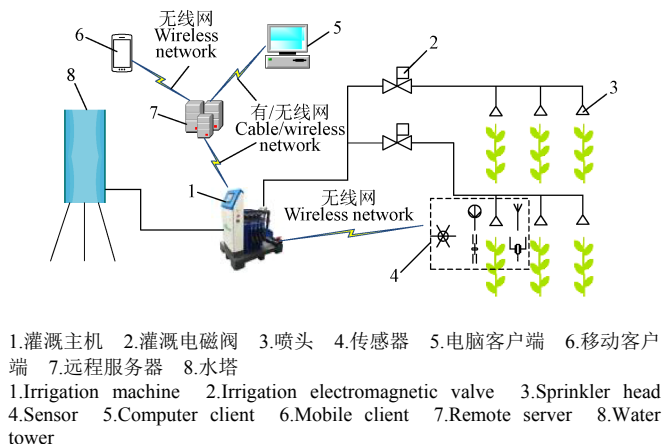


图 1 川贝母分区变量灌溉系统总体结构

Fig.1 Overall structure of partition variable irrigation system for *Fritillaria cirrhosa*

灌溉主机包括主控系统、灌溉泵、进水电磁阀、工控显示屏, 主控系统包括核心处理器、数据采集模块、Wi-Fi 模块、以太网模块、天线、控制电路、电源、降压电路。核心处理器通过串行外围设备接口 (Serial Peripheral Interface, SPI) 总线与数据采集模块相连, 数据采集模块与天线连接, 进水电磁阀与灌溉泵通过控制电路与核心处理器连接, 工控显示屏、Wi-Fi 模块和以太网模块分别与核心处理器连接。上述模块通过电源和降压电路供电。主控系统中的各个信息采集和控制模块采用的芯片型号分别是: 核心处理器为 STM32F103VET6, 数据采集模块为 SI4438, Wi-Fi 模块为 ESP8266, 以太网模块为 W5500, 天线为 2450AT18A100E。

灌溉主机的主控系统通过信号线与灌溉电磁阀的受控端连接, 灌溉主机通过水路管网与灌溉电磁阀连接, 灌溉主机通过无线网络 (433 M 射频) 与传感器通信, 灌溉主机的进水电磁阀与水塔通过水路管网连接, 远程服务器通过无线 (Wi-Fi) 或有线网络接入因特网分别与灌溉主机和电脑客户端连接, 移动客户端通过无线 (GPRS/3G/4G/5G、Wi-Fi 等) 与远程服务器连接。

传感器是信息采集终端, 包括终端处理器、终端数据传输模块、终端天线、空气温湿度传感器、光强度传感器、土壤温湿度传感器以及终端充电电路、终端电源和终端太阳能充电器。终端处理器通过 SPI 总线与终端数据传输模块连接, 终端数据传输模块与终端天线连接, 空气温湿度传感器、光强度传感器通过集成电路 (Inter-Integrated Circuit, IIC) 总线与终端处理器连接, 土壤温湿度传感器通过模拟/数字转换电路与终端处理器连接。上述部件通过终端电源供电, 终端太阳能充电器

通过终端充电电路与终端电源连接。传感器中的各个信息采集和传输模块采用的芯片型号分别是: 终端处理器为 STM32F103C8T6, 终端数据传输模块为 SI4438, 空气温湿度传感器为 SHT30, 光强度传感器为 BH1750, 土壤温湿度传感器为 LM393, 终端天线为 2450AT18A100E。

2 川贝母分区变量灌溉控制方法

为了实现川贝母分区变量灌溉, 首先建立川贝母生长含水率模型, 表示川贝母生长需水情况。再建立川贝母灌溉含水率模型, 表示川贝母灌溉用水情况。最后基于川贝母生长含水率模型和灌溉含水率模型进行川贝母分区变量灌溉控制策略研究。

2.1 川贝母生长含水率模型

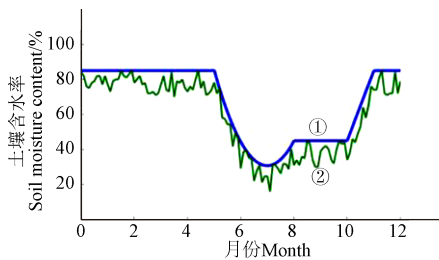
目前川贝母主要种植在高原地区 (如四川阿坝、丹巴等地), 川贝母生长需水是波动变化的, 与川贝母的生长年份、气候、季节、土壤、种植密度等有关。气候又与季节有关, 季节变化将引起空气湿度、温度变化。不同种植区域的种植密度和土壤含水率可能不同, 因此在川贝母人工种植试验过程中, 考察了川贝母年份、季节、土壤和种植密度对川贝母生长需水的影响。由于种植技术还不成熟, 技术人员在种植大棚内不断探索和试验较适宜川贝母生长的土壤含水率。在 2018-04-10—2020-12-31 期间, 采用电容法测试川贝母叶片或鳞茎的电容值, 间接判断川贝母生长需水情况。当川贝母叶片或鳞茎水分减少时, 电容值也逐渐减小, 反之, 电容值增大。在川贝灌溉过程中, 技术人员不断试验和总结经验, 观察川贝母的生长情况 (例如缺水和浇水过多时, 川贝母嫩叶会变黄), 确定了川贝母叶片或鳞茎电容值在某一范围时, 川贝母处于较佳生长状态, 利用 TZS-II 土壤水分测定仪结合称重法获得川贝母生长需水数据。通过对标准种植密度的 3 年生川贝母生长需水监测与数据统计, 采用分段多项式拟合法建立川贝母生长含水率模型, 公式为

$$\begin{cases} y = 85, & 0 \leq x < 5 \\ y = 13.75x^2 - 192.25x + 702.75, & 5 \leq x < 8 \\ y = 45, & 8 \leq x < 10 \\ y = 40x - 355, & 10 \leq x < 11 \\ y = 85, & 11 \leq x \leq 12 \end{cases} \quad (1)$$

式中 y 为川贝母生长需水, %; x 为月份。

如图 2 所示, 曲线①是标准种植密度的 3 年生川贝母生长含水率模型。依据《川贝母生产技术规程》(DB51/T 900—2009), 川贝母种植密度范围一般为 900~1 100 粒/m², 具体的实际种植密度应根据农艺需要调整。经农艺专家根据单位面积植株数确定, 该研究中川贝母标准种植密度为 1 000 株/m²。其他年份的多年生川贝母生长需水趋势与图 2 中 3 年生川贝母生长需水基本一致, 但具体生长需水多少有所不同。总体上, 除川贝母生长期影响外, 川贝母生长需水与川贝母种植密度有关, 密度大, 生长需水越大。此外, 川贝母生长较佳含水率与其品种和土壤条件也有一定关系, 需要长期监测和统计分析。该研

究中川贝母品种是暗紫贝母, 土壤为配方有机基质土。一般川贝母种植时间为 4 年, 1 年生和 2 年生川贝母不开花也不结果, 第 3 年开始有花期, 第 4 年开始结果。川贝母的生长期大致划分为播种期 (4 月底)、出苗期 (5 月初)、初花期 (6 月初)、盛花期 (7 月初)、幼果期 (7 月中旬)、熟果期 (8 月初)、休眠期 (10 月到次年 4 月初)。8 月中旬, 川贝母开始倒苗, 到 9 月底完全倒苗。从图 2 中可知, 川贝母出苗期到倒苗期间生长需水比其余时期生长需水小。



注: 曲线①为川贝母生长含水率模型, 表示川贝母生长较佳含水率; 曲线②为川贝母灌溉含水率模型, 表示灌溉完成后的土壤含水率。

Note: Curve ① is the growth moisture content model of *Fritillaria cirrhosa*, which indicates the better growth moisture content of *Fritillaria cirrhosa*; curve ② is the irrigation water content model of *Fritillaria cirrhosa*, which indicates the soil moisture content after irrigation.

图 2 三年生川贝母土壤含水率模型

Fig.2 Soil moisture content model of 3-year-old *Fritillaria cirrhosa*

2.2 川贝母灌溉含水率模型

川贝母种植在大棚中, 不同种植区域的光照、土壤情况、种植密度等条件有差异, 导致不同区域的土壤含水率有差异。在川贝母灌溉完成后, 利用土壤水分测定仪采集不同分区的土壤含水率, 获得川贝母灌溉用水数据, 如图 2 所示。通常, 人工灌溉时, 以灌溉后土壤含水率不超过川贝母生长含水率为原则。如果灌溉管理得当, 灌溉含水率模型曲线②的总体趋势与川贝母生长含水率模型曲线①基本一致。

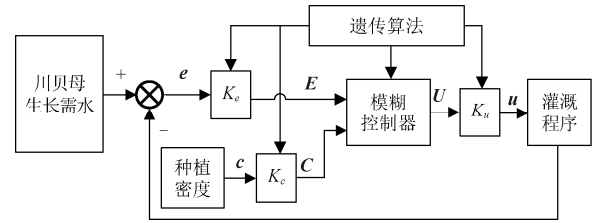
2.3 川贝母分区变量灌溉控制策略

2.3.1 川贝母变量灌溉决策模型

灌溉作业能调节川贝母种植土壤的含水率, 但由于川贝母年份、土壤、种植密度等条件不同, 川贝母生长需水和灌溉用水很难相等, 这是一个动态过程, 不易用准确的数学公式 (或模型) 来计算这种动态性。模糊控制适用于多输入、具有不确定因素的非线性控制系统, 不需要构建精准的数学模型, 其优点在于具有较高的稳定性和适应能力, 广泛应用于智能控制方面^[23-24]。

川贝母变量灌溉决策模型如图 3 所示。川贝母灌溉决策模型采用遗传算法优化的模糊控制方法, 输出灌溉土壤含水率增量。灌溉程序利用灌溉土壤含水率增量按一定策略执行灌溉。

从图 3 可知, 川贝母灌溉决策模型决定于川贝母生长需水、灌溉用水、种植密度、模糊控制器和遗传算法。川贝母生长需水与灌溉用水求差运算结果作为模糊控制系统的输入数据。种植密度与种植区域 (分区) 有关, 不同分区的种植密度由农艺专家依据川贝母植株数确定, 在灌水量决策模型中反映为标准种植密度下川贝母生长需水的系数。



注: ⊗为比较器, 表示川贝母生长需水与灌溉用水求差运算; e 为求差运算后土壤含水率差值, %; c 为种植密度, 粒· m^{-2} ; u 为灌溉土壤含水率增量, %; E 、 C 、 U 分别为 e 、 c 、 u 的模糊控制语言变量; K_e 、 K_c 分别为输入变量 e 和 c 对应的量化因子; K_u 为模糊控制比例因子。

Note: ⊗ is a comparator to indicates a difference operation between water demand for *Fritillaria cirrhosa* growth and irrigation water of planting soil; e is difference value of soil moisture content after feedback summation, %; c is planting density, grain· m^{-2} ; u is an increment of soil moisture content after irrigation, %; E , C , and U respectively indicate fuzzy control linguistic variables of e , c , and u ; K_e and K_c are respectively quantification factors of the input variable e and c ; K_u is scale factor of fuzzy control.

图 3 川贝母变量灌溉决策模型

Fig.3 Variable rate irrigation decision model of *Fritillaria cirrhosa*

该研究中模糊控制器结构为双输入单输出, 输入变量为川贝母生长需水与灌溉用水的差值 e (%), 种植密度 c , 输出变量为灌溉土壤含水率增量 u (%). 输入变量 e 、 c 的精确值范围分别为 (e_{\min}, e_{\max}) 和 (c_{\min}, c_{\max}) , 输出变量 u 的精确值范围为 (u_{\min}, u_{\max}) , 作为模糊控制的基本论域。输入变量 e 、 c 的模糊论域为 $[-P, P]$ (P 为常数), 输出变量 u 的模糊论域为 $[0, P]$, 模糊控制量化因子 K_e 、 K_c 计算公式^[25-26]如下:

$$K_x = P / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

式中下标 x 分别为输入变量 e 和 c 。模糊控制比例因子 K_u 计算公式^[25-26]如下:

$$K_u = (u_{\max} - u_{\min}) / P \quad (3)$$

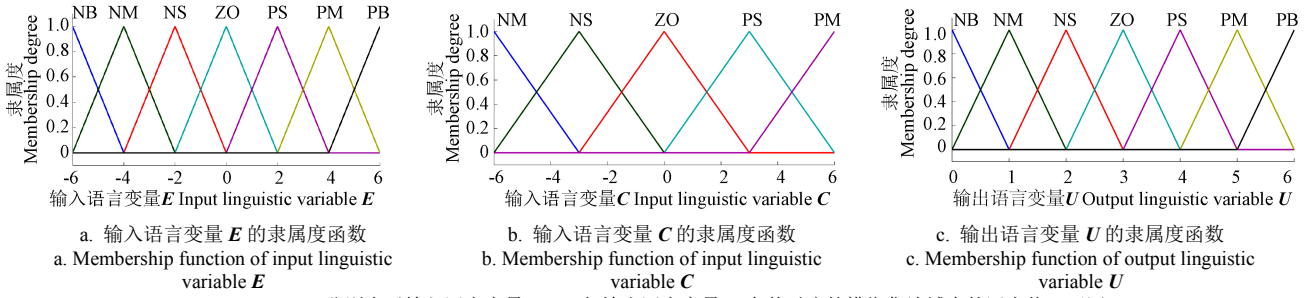
该研究中 $P=6$ 。

精确值模糊化处理后的输入语言变量 E 、 C 与输出语言变量 U 分别在其对应的模糊集论域中, 将模糊集论域划分为多个模糊集合, 常用的模糊集合可以由 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 等语言值来表示, 分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。隶属函数是模糊集合中用到的函数, 表示元素属于某模糊集合的“真实程度”, 常用的隶属函数有三角形、梯形等隶属函数^[25-26]。如图 4 所示, 该研究中初步确定输入语言变量 E 、 C 和输出语言变量 U 的隶属度函数为梯形和三角形, 然后通过遗传算法进行优化和完善。

模糊控制规则建立在输入语言变量的基础上, 通常根据操作者经验和专家知识得出^[26]。该研究中由川贝母种植农艺专家和灌溉专家共同确定模糊控制规则, 如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules

输入语言变量 C Input linguistic variable C	输入语言变量 E Input linguistic variable E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NM	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NS	NB	NB	NB	NB	NS	ZO	PM
ZO	NB	NB	NB	NB	NS	PS	PB
PS	NB	NB	NM	NS	ZO	PM	PB
PM	NB	NB	NS	ZO	PS	PM	PB



注: NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 分别表示输入语言变量 E 、 C 与输出语言变量 U 在其对应的模糊集论域中的语言值。下同。
Note: NB, NM, NS, ZO, PS, PM, and PB are respectively indicate lingual values of input linguistic variables E , C , and output linguistic variable U in its corresponding fuzzy set domain. Same as below.

图 4 模糊控制的隶属度函数

Fig.4 Membership function of fuzzy control

1 条模糊控制规则对应 1 条模糊推理语句, 模糊推理语句 R_j 的表达形式^[27]为

$$R_j: \text{IF } e = A \text{ and } c = B, \text{ then } u = Z \quad (4)$$

式中 j 为推理语句编号; A 表示输入变量 e 的对应输入语言变量 E 的语言值; B 表示输入变量 c 的对应输入语言变量 C 的语言值; Z 表示输出变量 u 的对应输出语言变量 U 的语言值。

模糊控制规则之间具有“或”的关系, 总的模糊控制规则 R 为

$$R = R_1 \vee R_2 \vee \cdots \vee R_n \quad (5)$$

式中 n 代表模糊控制规则数量, 整个系统的模糊规则 R 确定以后, 在给定的输入语言变量 (E 、 C) 下, 输出语言变量 (U) 的计算公式^[27]如下:

$$U = (E \times C)^T \cdot R \quad (6)$$

由模糊控制规则和模糊控制推理计算以后的输出语言变量 (U) 是一个模糊集合, 对其进行反模糊化处理, 采用重心法反模糊法^[27], 计算公式如下:

$$U' = \frac{\sum_{r=1}^m u_r \mu(u_r)}{\sum_{r=1}^m \mu(u_r)} \quad (7)$$

式中 m 为输出语言变量 (U) 所对应论域范围; r 为论域值求和变量; u_r 为输出语言变量 (U) 模糊论域范围中的论域值; $\mu(u_r)$ 表示论域值为 u_r 时输出语言变量 (U) 的隶属度值; U' 为一个确定的论域值。则输出变量 u 的精确值计算式^[27]如下:

$$u = U' \cdot K_u \quad (8)$$

式中输出变量 u 的精确值代表灌溉土壤含水率增量, %, 作为灌溉程序的输入量控制灌溉程序实现川贝母的变量、精准灌溉; K_u 为模糊控制比例因子。

灌溉程序采用“灌溉→浸润→监测土壤含水率→计算川贝母所需土壤含水率和灌溉后土壤含水率的差值→判断是否结束灌溉”的策略, 如果未达到灌溉结束条件, 则循环执行灌溉程序; 否则, 结束灌溉。其中灌溉和浸润时间可以根据需要设定, 灌溉循环周期数由系统根据灌溉土壤含水率增量按设定时间自动确定。

2.3.2 遗传算法优化的模糊控制器

模糊控制的各因子、隶属度函数及规则选取是模糊

控制器决策关键, 属于参数寻优问题, 遗传算法是一种全局优化算法, 其计算效率和稳定性高^[28-30]。本研究采用遗传算法优化模糊控制器。

遗传算法用于模糊控制器参数优化, 包括对模糊控制量化因子 K_e 、 K_c 、比例因子 K_u 、模糊控制规则和隶属函数进行优化。遗传个体采用二进制编码。量化因子 (K_e 、 K_c)、比例因子 K_u 均采用 8 位二进制表示, 依次将 K_e 、 K_c 与 K_u 编码排列在一起构成长度为 24 (3×8) 位的二进制码。隶属度函数是优化坐标顶点, 每一个坐标顶点都采用 8 位二进制表示, 输入语言变量 E 的隶属度函数中有 19 个坐标顶点, 编码有 152 (19×8) 位二进制码, 输入语言变量 C 的隶属度函数中有 13 个坐标顶点, 编码有 104 (13×8) 位二进制码, 输出语言变量 U 中有 19 个坐标顶点, 编码有 152 (19×8) 位二进制码, 则隶属度函数编码的总长度为 408 (152+104+152) 位。模糊控制规则编码采用 3 位二进制表示, 模糊控制器中输入语言变量 E 的论域中有 7 个模糊集合, 输入语言变量 C 的论域中有 5 个模糊集合, 模糊控制规则总共有 35 (7×5) 条, 对应的模糊控制规则编码为 105 (35×3) 位二进制码。遗传个体基因由量化因子与比例因子编码、隶属度函数编码和模糊控制编码构成, 即遗传个体基因为 537 (24+408+105) 位二进制码。针对川贝母不同灌溉分区, 采用式 (9) 的目标函数来评价控制器的性能。

$$f(i) = \frac{a_u u(i)}{a_e e(i) + a_c c(i)} \quad (9)$$

式中 i 为遗传算法个体; a_e 、 a_c 、 a_u 为常数, 分别为输入变量 $e(i)$ 、 $c(i)$ 和输出变量 $u(i)$ 的适应度函数的权重系数, 分别取 0.5、0.4、0.1, 数值越大表明重视程度越高, 即相应变量在优化问题中越重要。

计算个体适应度值需要将目标函数转换成最值问题, 适应度函数计算公式为

$$F(i) = \frac{1}{1 + f(i)} \quad (10)$$

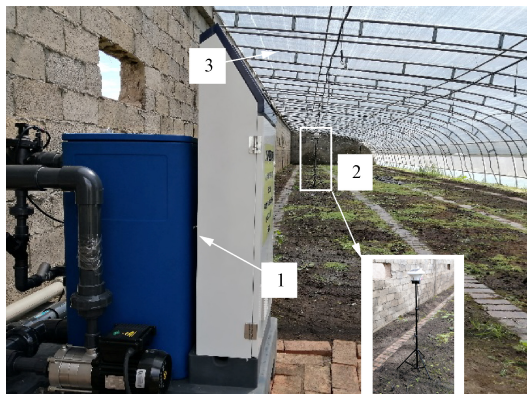
式中 $F(i)$ 表示个体 i 的适应度值, 将所有个体的适应度由高到低排序, 设定遗传算法种群规模为 40, 最大进化代数为 100, 采用轮盘赌选择算法, 交叉概率和变异系数分别取值为 0.7、0.05, 执行遗传算法, 对量化因子 K_e 、 K_c 与比例因子 K_u 、隶属度函数、模糊控制规则进行优化并

输出最优化结果。如图 3 所示,把遗传算法输出的最优化结果输入到模糊控制器进行控制得到最优化灌溉土壤含水率增量决策结果,实现遗传算法优化的模糊控制对川贝母灌溉用水的精确决策,不同种植密度、不同季节、不同生长阶段获得不同灌溉用水,达到川贝母分区变量灌溉的目的。

3 系统应用实例

3.1 分区变量灌溉系统工作过程

课题组在阿坝县人工种植川贝母约 4 hm^2 ,依托四川省科技示范村项目,选择其中一个大棚实施川贝母分区变量灌溉。大棚面积约 400 m^2 ,棚内分成 3 厢,每厢宽度 2 m 、长约 50 m 。实施分区灌溉时,将每厢长度方向按 10 m 分区,整个大棚分成 15 个灌溉区。在大棚内配备一套川贝母分区变量灌溉系统,如图 5 所示,安装了灌溉主机、灌溉电磁阀、温湿度传感器、喷头。



1.灌溉主机 2.传感器 3.喷头
1.Irrigation machine 2.Sensor 3.Sprinkler head

图 5 川贝母分区变量灌溉试验基地

Fig.5 Partition variable irrigation experimental base for *Fritillaria cirrhosa*

灌溉系统客户端工作界面如图 6 所示。实施灌溉之前,需要进行参数设置,通过电脑客户端或者移动客户端(如手机 APP)进行网络连接和灌溉参数设置。根据图 2 中川贝母生长含水率模型数据,设置好川贝母灌溉

所需土壤含水率,误差范围在 $\pm 10\%$ 之间。在实际应用中,灌溉用水在这个范围内就可以满足川贝母按需灌溉的要求。此外,灌溉有关参数设置也可以在灌溉主机上进行。

土壤含水率由温湿度传感器按照系统设置的灌溉时间参数采集,并将数据通过 433 M 网络传递给灌溉主机,灌溉主机通过互联网将灌溉数据上传到远程服务器,电脑客户端和移动客户端与远程服务器进行通信,实现灌溉参数传递和灌溉过程控制。

在电脑客户端能监控灌溉分区、灌溉状态、温湿度等工作过程,如图 6 所示。同样地,通过移动客户端和灌溉主机也可以实现灌溉过程控制。客户端和灌溉主机联合可以实现对川贝母现场/远程灌溉参数设置和过程监控。

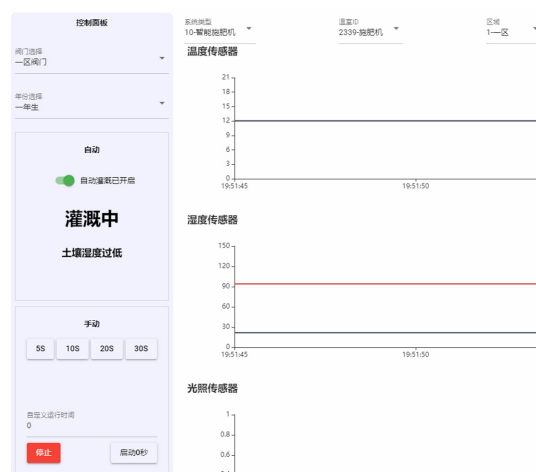


图 6 灌溉系统客户端工作界面

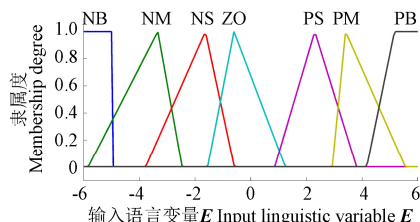
Fig.6 Irrigation system client work interface

3.2 分区变量灌溉控制

3.2.1 基于遗传算法的模糊控制参数优化

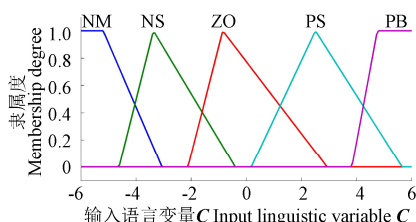
1) 优化前 $K_e=0.4$ 、 $K_c=30$ 、 $K_u=2.5$,采用遗传算法优化后得到 $K_e=0.5$ 、 $K_c=34$ 、 $K_u=2.9$ 。

2) 基于遗传算法的隶属函数优化结果如图 7 所示。对比图 4 和图 7 可知,输入语言变量 E 、 C 和输出语言变量 U 的隶属度函数都有改变,总体趋势是模糊语言变量的论域范围减小。



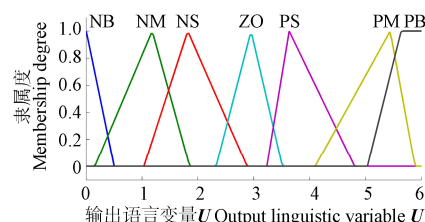
a. 优化后输入语言变量 E 的隶属度函数

a. Optimized membership function of input linguistic variable E



b. 优化后输入语言变量 C 的隶属度函数

b. Optimized membership function of input linguistic variable C



c. 优化后输出语言变量 U 的隶属度函数

c. Optimized membership function of output linguistic variable U

图 7 优化后的隶属度函数

Fig.7 Optimized membership functions

3) 基于遗传算法的模糊控制规则优化结果如表 2 所示。从表 2 中可知,在种植密度 c 不变情况下,随着土壤含水率差值 e 增大,灌溉土壤含水率增量 u 逐渐增大;在土壤含水率差值 e 较大时,灌溉土壤含水率增量 u 随种植密度 c 增加而增大。

3.2.2 分区变量灌溉模糊控制

川贝母种植密度应根据农艺需要确定,目前还没有在标准中明确规定。根据《川贝母生产技术规程》(DB51/T 900—2009),一般以 $900 \sim 1100$ 粒/ m^2 播种。根据《农业机械试验条件 测定方法的一般规定》(GB/T

5262—2008), 在每个分区内以五点法确定测量点位, 每点位取样面积为 0.25 m^2 , 分别统计各个点位中川贝母植株数, 计算算术平均值, 获得各个分区的种植密度。为了说明遗传算法优化的川贝母分区变量灌溉节水的有效性, 用川贝母实际种植密度与标准密度的比值, 即密度比 β , 进行灌溉用水对比分析。表 3 是该研究中 15 个灌溉分区的密度比。从表 3 中发现, 川贝母各个分区的密度比主要分布在 $0.8 \sim 1.2$ 附近。标准种植密度是考察重点, 因此本研究选择标准种植密度 ($\beta=1.0$) 和较大密度比 ($\beta=1.2$) 进行对比。

表 2 优化后的模糊控制规则
Table 2 Optimized fuzzy control rules

输入语言变量 C Input linguistic variable C	输入语言变量 E Input linguistic variable E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NM	NB	NB	NB	NB	NB	NB	ZO
NS	NB	NB	NB	NB	NS	ZO	PS
ZO	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PM
PS	NB	NB	NM	NS	ZO	PM	PM
PM	NB	NB	NM	NS	PM	PB	PB

表 3 灌溉分区的密度比
Table 3 Density ratio of irrigation partition

分区 编号 Partition No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
密度比 Density ratio	0.96	0.75	1.05	1.25	0.85	1.14	1.07	0.95	1.22	0.91	0.83	0.95	1.02	1.09	1.15

1) 1) 密度比 $\beta=1.0$ 时, 优化前后川贝母变量灌溉结果见图 8。在图 8a 中, 虚线 SMC1 代表模糊控制决策的输入变量 e , 由川贝母生长含水率模型和灌溉完成后的土壤含水率 (灌溉用水) 的差值确定, 即表示川贝母的灌溉需求; 实线 SMC2 代表优化前输出变量 u , 是分区变量灌溉优化前模糊控制决策的灌溉土壤含水率增量; 点划线 SMC3 代表遗传算法优化后输出变量 u , 是分区变量灌溉优化后模糊控制决策的灌溉土壤含水率增量。从图 8a 可知, 优化前灌溉土壤含水率增量曲线与川贝母灌溉需求曲线规律一致, 模糊控制下灌溉土壤含水率增量并未超出川贝母灌溉需求, 说明模糊控制决策的灌溉有一定节水效果; 优化后灌溉土壤含水率增量主要分布在 $5\% \sim 7\%$ 。对比图 8a 中曲线 SMC2 和 SMC3 发现, 优化后灌溉土壤含水率增量有明显下降, 说明遗传算法优化的模糊控制决策的灌溉节水效果较好。

在图 8a 中, 川贝母的灌溉需求和优化后灌溉土壤含水率增量的差, 称为灌溉误差, 则灌溉误差 Δ_q 表示为

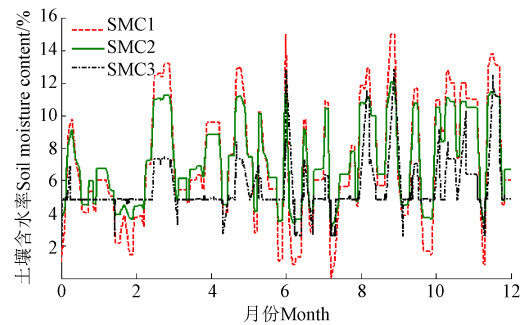
$$\Delta_q = u_q - ua_q \quad (11)$$

式中 u_q 为第 q 次灌溉时对应的川贝母的灌溉需求, %; ua_q 为第 q 次灌溉时对应的优化后灌溉土壤含水率增量, %; 由式 (11) 计算优化后模糊控制灌溉误差, 如图 8b 所示。由图 8b 可知, 灌溉误差基本控制在 $\pm 5\%$ 之内, 符合川贝母灌溉用水误差范围要求。

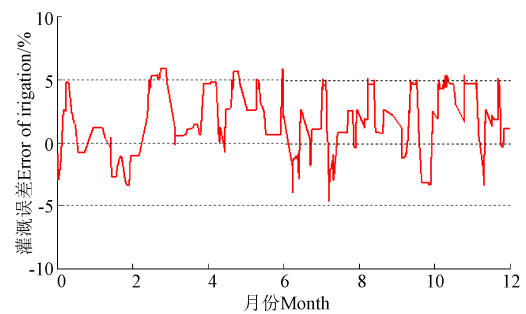
另外, 该研究的遗传算法优化模糊控制节水率计算公式如下:

$$\gamma = \frac{\sum_{q=1}^n (ub_q - ua_q)}{\sum_{q=1}^n ub_q} \times 100\% \quad (12)$$

式中 γ 为优化后川贝母灌溉的年节水率, %; n 为一年内灌溉程序的执行次数; ub_q 为第 q 次灌溉时对应的优化前灌溉土壤含水率增量, %; ua_q 为第 q 次灌溉时对应的优化后灌溉土壤含水率增量, %。通过式 (12) 计算可知, 优化前后川贝母灌溉年节水率为 27.6%。



a. 灌溉需求与优化前后灌溉土壤含水率增量
a. Irrigation demand and increment of soil moisture content before and after optimization



b. 优化前后模糊控制的灌溉误差
b. Irrigation error of fuzzy control before and after optimization
注: SMC1 为川贝母的灌溉需求; SMC2 为优化前灌溉土壤含水率增量; SMC3 为优化后灌溉土壤含水率增量。下同。
Note: SMC1 is *Fritillaria cirrhosa* irrigation demand; SMC2 is increment of soil moisture content before optimization; SMC3 is increment of soil moisture content after optimization. Same as below.

图 8 优化前后变量灌溉控制结果 (密度比 $\beta=1.0$)

Fig.8 Variable irrigation control results before and after optimization (density ratio $\beta=1.0$)

2) 密度比 $\beta=1.2$ 时, 优化前后川贝母变量灌溉结果见图 9。在图 9a 中, 优化前灌溉土壤含水率增量在 12% 左右, 优化后灌溉土壤含水率增量部分在 12% 以下, 说明优化后灌溉用水有所下降。图 9b 是 $\beta=1.2$ 时的灌溉误差, 由图 9b 可知, 灌溉误差基本控制在 $\pm 5\%$ 以内。

通过式 (12) 计算可知, $\beta=1.2$ 时, 优化前后川贝母灌溉节水率为 4.9% , 低于标准种植密度下的灌溉节水率。

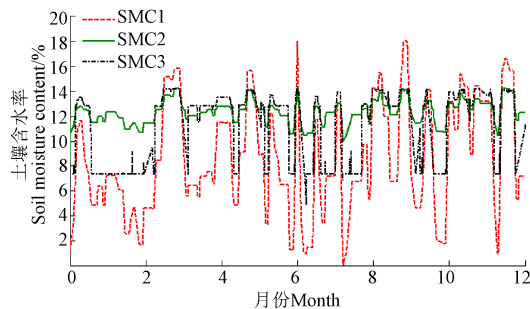
对比图 8 和图 9 发现, 川贝母灌溉用水与种植密度有关, 密度越大, 灌溉用水越多, 与实际情况相符。为了说明川贝母种植密度与灌溉用水、节水率的关系, 定义灌溉用水比 q_β 为

$$q_\beta = \frac{ua_\beta}{ua_1} \quad (13)$$

式中 ua_β 、 ua_1 分别表示密度比为 β 和 1 时优化后模糊控制灌溉的年灌溉用水, %。由此可知, 灌溉用水比 q_β 表示一

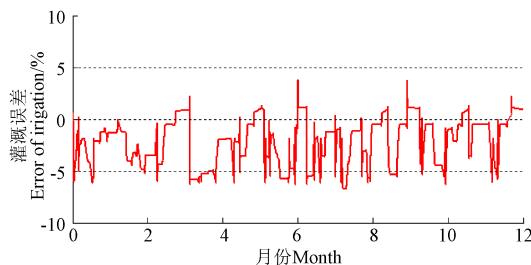
定种植密度与标准种植密度条件下灌溉用水比例。

图 10 说明了川贝母种植密度与灌溉用水、节水率的关系,其中图 10a 表示种植密度与灌溉用水的关系,图 10b 表示种植密度与灌溉节水率的关系。在图 10a 中,拟合决定系数 R^2 为 0.975,均方根误差 RMSE 为 0.068,平均绝对误差 MAE 为 0.055,表明随川贝母种植密度比增加,即种植密度增加,所需灌溉用水也增大,基本上呈线性关系。这与图 8 和图 9 结果一致。



a. 灌溉需求与优化前后灌溉土壤含水率增量

a. Irrigation demand and increment of soil moisture content before and after optimization

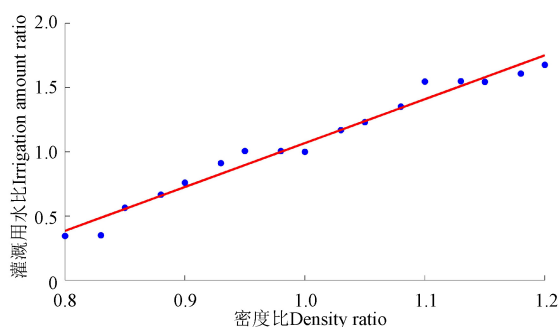


b. 优化前后模糊控制的灌溉误差

b. Irrigation error of fuzzy control before and after optimization

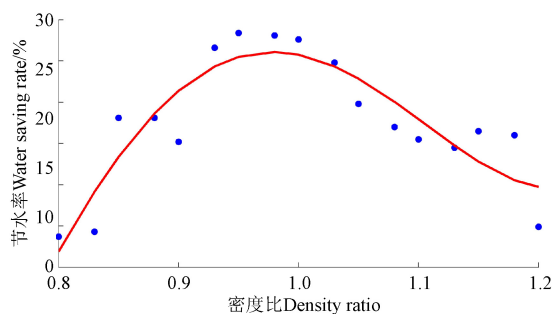
图 9 优化前后变量灌溉控制结果 ($\beta=1.2$)

Fig.9 Variable irrigation control results before and after optimization ($\beta=1.2$)



a. 种植密度与灌溉用水关系

a. Relationship between planting density and irrigation amount



b. 种植密度与灌溉节水率关系

b. Relationship between planting density ratio and water saving rate

图 10 种植密度与灌溉用水和节水率的关系

Fig.10 Relationships between planting density, irrigation amount and water saving rate

由图 10b 可发现,川贝母灌溉节水率与种植密度比之间呈抛物线关系,不同川贝母种植密度的灌溉节水率不同,在标准种植密度(密度比 $\beta=1.0$)附近,遗传算法优化模糊控制灌溉节水率最高。

通过川贝母分区变量灌溉系统试验和调试发现,遗传算法和模糊控制算法较为成熟,计算效率较高,在网络畅通的情况下,整个系统的响应在 1~2 s 之内,系统实时性能满足应用要求。经测试,在实际灌溉作业中,每次启动灌溉到灌溉自动结束,川贝母所需土壤含水率和灌溉后土壤含水率的差值基本能控制在 $\pm 6\%$ 以内,系统延迟变化并未引起灌溉控制效果恶化;在系统可靠性方面,进行了数据库、数据通信、资源共享等方面的优化设计,目前系统运行较稳定。为了提高模糊控制系统的可靠性和稳定性,可采用积分控制等方法进行改善。

4 结 论

1) 研制了大棚种植川贝母分区变量灌溉系统,利用遗传算法优化的模糊控制策略实现了川贝母分区变量灌溉。

2) 特定种植密度下灌溉用水表明,遗传算法优化后川贝母变量灌溉误差基本控制在 $\pm 5\%$ 以内,实现了川贝母按需灌溉控制;模糊控制下灌溉用水并未超出川贝母灌溉需求,有一定节水效果;遗传算法优化后灌溉土壤含水率增量主要分布在 5%~7%,较优化前明显下降,说明遗传算法优化的模糊控制决策的灌溉节水效果较好,遗传算法优化的模糊控制决策模型合理、有效,达到了节水灌溉的目的。

3) 川贝母种植密度与灌溉用水、节水率的关系发现,随川贝母种植密度增加,所需灌溉用水也增大,基本呈线性关系,分区灌溉效果明显;川贝母分区变量灌溉节水率与种植密度比之间呈抛物线关系,优化后标准种植密度的年节水率为 27.6%。

【参 考 文 献】

- [1] 杨伟志, 孙道宗, 刘建梅, 等. 基于物联网和人工智能的柑橘灌溉专家系统[J]. 节水灌溉, 2019(9): 116-120, 124. Yang Weizhi, Sun Daozong, Liu Jianmei, et al. Citrus irrigation expert system based on internet of things and artificial intelligence[J]. Water Saving Irrigation, 2019(9): 116-120, 124. (in Chinese with English abstract)
- [2] 韩云, 张红梅, 宋月鹏, 等. 国内外果园水肥一体化设备研究进展及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 191-195. Han Yun, Zhang Hongmei, Song Yuepeng, et al. Research progress and development trend of water and fertilizer integrated equipment in orchards at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 191-195. (in Chinese with English abstract)
- [3] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 基于茎直径变化的无线传感器网络作物精量灌溉系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 7-12. Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Preliminary study on crop precision irrigation system based on wireless sensor networks for stem diameter microvariation[J]. Transactions

- of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- [4] Evans R G, King B A. Site-specific sprinkler irrigation in a water-limited future[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(2): 493-504.
- [5] 李茂娜, 孙宇, 严海军, 等. 基于土壤表观电导率的变量灌溉管理分区方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 172-180.
- Li Maona, Sun Yu, Yan Haijun, et al. Method for variable rate irrigation management zone delineation based on apparent soil electrical conductivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 172-180. (in Chinese with English abstract)
- [6] Sui R, Yan H. Field Study of variable rate irrigation management in humid climates[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(3): 327-339.
- [7] 孙宇, 李茂娜, 王云玲, 等. 圆形喷灌机条件下变量灌溉对苏丹草产量与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 32-38.
- Sun Yu, Li Maona, Wang Yunling, et al. Effects of variable rate irrigation on sudangrass yield and quality under center-pivot irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 32-38. (in Chinese with English abstract)
- [8] Hedley C B, Bradbury S, Ekanayake J. Spatial irrigation scheduling for variable rate irrigation[J]. Proceedings of the New Zealand Grassland Association. 2010. 72: 97-102.
- [9] Meyer-Aurich A, Gandorfer M, Trost B. Risk efficiency of irrigation to cereals in northeast Germany with respect to nitrogen fertilizer[J]. Agriculture System, 2016(149): 132-138.
- [10] 李久生, 李益农, 栗岩峰, 等. 现代灌溉水肥精量调控原理与应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 373-384.
- Li Jiusheng, Li Yinong, Li Yanfeng, et al. Principle and application of precise regulating water and fertilizers for modernized irrigation technologies[J]. Journal of China Institute for Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 373-384. (in Chinese with English abstract)
- [11] 韩安太, 何勇, 陈志强, 等. 基于无线传感器网络的茶园分布式灌溉控制系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 173-180.
- Han Antai, He Yong, Chen Zhiqiang, et al. Design of distributed precision irrigation control system based on wireless sensor network for tea plantation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 173-180. (in Chinese with English abstract)
- [12] 谢家兴, 余国雄, 王卫星, 等. 基于无线传感网的荔枝园智能节水灌溉双向通信和控制系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S2): 124-130.
- Xie Jiaying, Yu Guoxiong, Wang Weixing, et al. Bidirectional communication and control system of intelligent water-saving irrigation in litchi orchard based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(S2): 124-130. (in Chinese with English abstract)
- [13] 余国雄, 王卫星, 谢家兴, 等. 基于物联网的荔枝园信息获取与智能灌溉专家决策系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 144-152.
- Yu Guoxiong, Wang Weixing, Xie Jiaying, et al. Information acquisition and expert decision system in litchi orchard based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(20): 144-152. (in Chinese with English abstract)
- [14] 赵伟霞, 李久生, 杨汝苗, 等. 基于土壤水分空间变异的变量灌溉作物产量及节水效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 1-7.
- Zhao Weixia, Li Jiusheng, Yang Rumiao, et al. Yields and water-saving effects of crops as affected by variable rate irrigation management based on soil water spatial variation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [15] Vories E, Stevens W, Rhine M, et al. Investigating irrigation scheduling for rice using variable rate irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 314-323.
- [16] Stone K C, Bauer P J, Busscher W J, et al. Variable rate irrigation management using an expert system in the eastern coastal plain[J]. Irrigation Science, 2015, 33: 167-175.
- [17] Sui R, Daniel K F, Krishna N R. Yield response to variable rate irrigation in corn[J]. Journal of Agricultural Science, 2015, 7(11): 11.
- [18] Haghighi A, Leib B G, Washington-Allen R A, et al. Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 117: 154-167.
- [19] 高子茵, 杜明刚, 李慎龙, 等. 基于遗传算法优化和模糊控制动态优化的自动变速器换挡规律设计[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 684-696.
- Gao Ziyin, Du Minggang, Li Shenlong, et al. Design of shifting rules of automatic transmission based on genetic algorithm optimization and fuzzy control dynamic optimization[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 684-696. (in Chinese with English abstract)
- [20] Srbínovska M, Gavrovski C, Dimcev V, et al. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks[J]. Journal of Cleaner Production, 2015(88): 297-307.
- [21] Sudha M N, Valarmathi M N, Anni S B, et al. Energy efficient data transmission in automatic irrigation system using wireless sensor networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(7): 215-221.
- [22] 西华大学. 一种川贝母智能灌溉系统及方法: 202110296363. 4[P]. 2021.
- [23] 郭迎庆, 周敏, 吴景, 等. 基于遗传算法优化的磁流变减振结构模糊控制研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1500-1507, 1856.
- Guo Yingqing, Zhou Min, Wu Jing, et al. Study on fuzzy control of magneto-rheological structure based on genetic algorithm optimization[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(4): 1500-1507, 1856. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张伶俐, 王润涛, 张长利, 等. 基于调亏理论和模糊控制的寒地水稻智能灌溉策略[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 52-58.
- Zhang Lingyi, Wang Runtao, Zhang Changli, et al. Intelligent irrigation strategy based on regulated deficit theory and fuzzy control for rice in cold region[J]. Transactions of the Chinese

- Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(13): 52-58. (in Chinese with English abstract)
- [25] 辛明影, 刘峰, 孙大烈, 等. 模糊控制器的优化设计(II): 三角形隶属函数优化的研究[J]. 东北农业大学学报, 2002(3): 296-299.
- Xin Mingying, Liu Feng, Sun Dalie, et al. The optimized design of the fuzzy controller (II): The disquisition of optimized triangle subjection function[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2002(3): 296-299. (in Chinese with English abstract)
- [26] 廉小亲. 模糊控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [27] 刘金琨. 智能控制(第4版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [28] Kuo S F, Merkey G. Decision support for, irrigation project planning using a genetic algorithm[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(3): 243-266.
- [29] 张帆, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于改进多父辈遗传算法的农机调度优化方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 192-198.
- Zhang Fan, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Agricultural machinery scheduling optimization method based on improved multi-parents genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 192-198. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李医民, 胡寿松, 李莉. 温室系统生态位智能控制方法研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 103-106.
- Li Yimin, Hu Shousong, Li Li. Intelligent control methods of greenhouse system niche[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(6): 103-106. (in Chinese with English abstract)

Development of the partition variable irrigation system for greenhouse planting *Fritillaria cirrhosa*

Liao Min, Su Chao, Zhang Yu, Yang Yajun, Zhang Qiang

(1. Modern Agricultural Equipment Research Institution, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: *Fritillaria cirrhosa* is one of the most precious traditional Chinese medicines. Some characteristics, like being fond of humidity and fearing of high humidity, have posed a great challenge to the artificial irrigation of *Fritillaria cirrhosa*. The intelligent precision irrigation system can be expected to realize the water-saving irrigation on demand in recent years. In this study, a partition system of variable rate *Fritillaria Cirrhosa* irrigation was developed using the wireless sensor network. An investigation was made on the impact of growth age, planting season, soil, and planting density on the required irrigation water of *Fritillaria cirrhosa* in the process of artificial cultivation between April 2018 and December 2020. A capacitance analyzer was also selected to detect the soil moisture content. The water demand was thus obtained for the *Fritillaria cirrhosa* growth and irrigation water in planting soil. As such, the required and planting soil moisture content model was established for the growth of *Fritillaria cirrhosa*. The results showed that the required soil moisture content of *Fritillaria Cirrhosa* growth increased, with the increase of planting density, in addition to the factor of *Fritillaria cirrhosa* growth age. A fuzzy control strategy model was established for the application of partition variable irrigation of *Fritillaria cirrhosa*. A double-input and simple-output structure was adopted for the fuzzy controller. The input variables were the planting density c and the difference value e between the required soil moisture content for *Fritillaria cirrhosa* growth and the planting one. The output variable was the increment of soil moisture content u during irrigation. Genetic Algorithm (GA) was utilized to optimize the quantification factors of fuzzy control, K_e and K_c , the scale factor K_u , the fuzzy control rules, as well as the membership function, in order to achieve an accurate decision on the irrigation water of *Fritillaria cirrhosa*. The irrigation water was also applied under the different planting densities, seasons, and growing ages. A field irrigation process was conducted in the greenhouse of *Fritillaria cirrhosa* using the partition variable irrigation technology, according to the increment of irrigation soil moisture content u . The experimental results showed that a better water-saving effect of irrigation was achieved using fuzzy control optimized by GA. The increment of soil moisture content was distributed between 5% to 7%, and the consumption of irrigation water decreased significantly. The error of optimized variable irrigation was around $\pm 5\%$ under the specific planting density of *Fritillaria cirrhosa*, where satisfied the irrigation demand as required water amount of *Fritillaria cirrhosa* growth. The required irrigation water also increased linearly, with the increase of planting density of *Fritillaria cirrhosa*. Correspondingly, there was a parabolic relationship between the water-saving rate of partition variable irrigation and the planting density ratio of *Fritillaria cirrhosa*. The optimum water-saving rate was achieved, where the standard planting density and the annual water-saving rate reached more than 27.6%. This finding can provide a sound reference and technical support to the strategy of planting density and water-saving irrigation for *Fritillaria Cirrhosa*.

Keywords: fuzzy control; genetic algorithms; variable rate irrigation; water saving irrigation; *Fritillaria cirrhosa*