

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.050

基于指数平滑预测的高效变量喷灌方法

董鑫 周利明 刘阳春 张俊宁 汪凤珠 李亚硕

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对现有灌溉系统只能实现大田经验均一灌溉、缺乏决策指导的问题,基于田间 ZigBee 无线网络实时采集的田间预埋水分传感器信息,提出一种基于二次平滑预测算法的变量灌溉指导数据处理方法,根据理论设定值自行调整平滑权重,使其预测数据达到最优,得到变量作业处方图;研制了基于 PLC 的喷灌机变量控制系统,通过模拟百分率计时器对喷灌机逐跨调节,并实时调整行走步长与速度,实现变量灌溉。田间对比试验结果表明,变量灌溉效率及节水方面均优于传统灌溉。

关键词: 变量灌溉; 指数平滑预测; 行走控制; 无线通信

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0372-07

Efficient Variable Irrigation Method Based on Exponential Smoothing Prediction

DONG Xin ZHOU Liming LIU Yangchun ZHANG Junning WANG Fengzhu LI Yashuo

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: It is of great practical significance to develop high-efficiency farmland water-saving irrigation technology. Existing irrigation systems lack decision-making guidance, can only achieve uniform irrigation in the field. In order to solve this problem, the ZigBee wireless network was used to do the real-time data acquisition of embedded moisture sensor in paper. And then put forward a variable irrigation data processing method based on the quadratic smoothing prediction algorithm. This method can adjust smooth weight according to the theory value to achieve the optimal prediction data, finally get the variable operation prescription map. The sprinkler machine variable control system was developed here. This system is mainly composed of Siemens s7-200 programmable logic controller, PC, soil water sensor, GNSS position information module, etc. It can adjust the sprinkler machine step by step by simulating the percentage timer, and real-time adjust the walk step length and speed to realize variable irrigation. In order to evaluate the performance of the system, the effect evaluation experiment of traditional irrigation and variable irrigation was carried out. Field contrast test results indicated that variable irrigation operation efficiency was higher than traditional irrigation about 23.19%. The practical application shows that the designed variable irrigation system has good applicability and operability, can significantly improve the irrigation effect, and achieve the purpose of saving water and increasing income.

Key words: variable irrigation; exponential smoothing method; walking control; wireless communication

0 引言

数据显示,我国农业用水量大约占总用水量的70%。然而,我国全部耕地中只有40%能够确保灌溉,每年因缺水造成的农业损失高达1 500亿元。因此发展高效农田节水灌溉技术具有重要的现实意义。

变量灌溉^[1-4]是精准农业的核心组成部分之一,在提高耕地生产效率及水分利用效率方面具有显著效果,通过在空间内实时施用精确水量,解决因不同位置土壤结构空间变异导致土壤墒情存在差异^[5-7],不同的农作物、不同的灌溉制度带来的灌溉差异等问题。现有灌溉系统大多只能实现大田经验

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700500)
作者简介: 董鑫(1987—),男,工程师,主要从事农业机械化和精准农业研究,E-mail: eniang@126.com
通信作者: 周利明(1982—),男,高级工程师,主要从事精准农业测控技术研究,E-mail: haibo1129@163.com

均一灌溉,因此变量灌溉更有助于改善提高现有灌溉状况。圆形喷灌机技术成熟,作业稳定,在此基础上产生了众多变量喷施方案,目前常用方法有:采用可变孔径喷头,实现变量喷洒;喷头单体安装脉冲电磁阀,利用脉冲宽度调节变量等^[8-9]。上述方法都提出了有效的变量喷施方式,但都忽略了与地理信息的结合。没有有效的变量喷施依据,就无法达到因地制宜的高效灌溉。因此,本文利用预埋传感器形成土壤数据参照,在灌溉同时,依据传感数据自主学习预测不同区域灌溉时长,形成灌溉指导数据,以此指导喷灌机在不同区域调节行走时长、变化灌溉时间,形成具有区域针对性有效的喷灌作业^[10-11]。

1 喷灌环境构建

1.1 喷灌环境概述

系统采用 DYP-244 型圆形喷灌机,以圆心为圆形喷灌机中心点,布设跨度为 244 m 的喷灌机构,喷灌机构分为 4 跨,驱动功率约为 4 kW,形成的喷灌面积共为 186 943 m²。喷灌机采用多种流量喷头组合,沿桁架方向阶跃状变化逐级增大喷幅喷灌。

1.2 变量灌溉系统硬件构成

喷灌变量控制系统主要由西门子 s7-200 型 PLC 控制器、计算机、传感器、GNSS 位置信息模块组成。PLC 控制器,主要执行对喷灌机行走、启停、位置判断等逻辑控制。数据分析采用计算机,主要负责田间数据的采集与计算分析等工作。田间预埋传感器采用 Stevens Hydra Probe II 型土壤传感器,Hydra Probe II 型土壤传感器是多种测量要素集于一身的传感器,一次测量即可获得土壤含水率、电导率、盐度和土壤温度数据等多种要素数据。喷灌机身还包括和芯星通 UM220-III N 型双系统高性能 GNSS 模块,实时提供喷灌机位置信息,喷头配有单独电动球阀,用来通断喷雾。

系统工作流程如图 1 所示,当系统启动后田间预埋传感器会传输数据至计算机端,计算机端对数据进行分析计算,并预测绘制灌溉数据图。PLC 控制喷灌机进入传感器区域进行喷灌,并控制喷灌机行走速度与喷头开闭,依照灌溉数据进行灌溉。

2 关键技术设计与实现

2.1 喷灌机行走控制

喷灌机的变量喷灌方法众多,由于喷灌是慢节奏灌溉作业,气温气候、土壤土质不同等对灌溉效果影响较大^[12-14],无法完全实现合理高效灌溉。因此喷灌控制依据预测灌溉数据指导的变速变量灌溉调节方法,即通过数据指导变换行走时长来调节不同

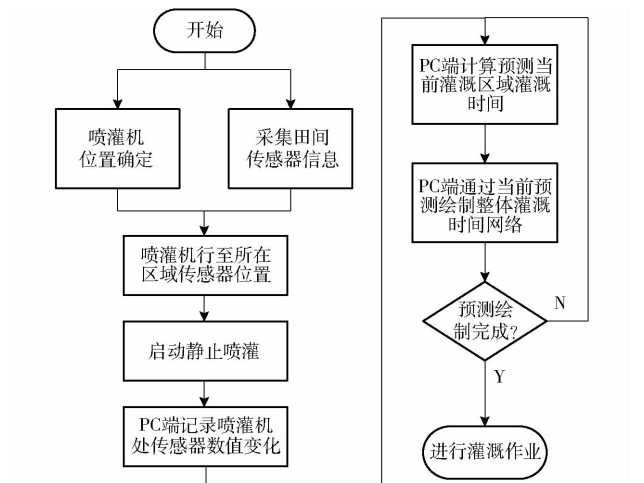


图 1 系统流程图

Fig. 1 Flow chart of system

区域喷灌时长,使其按需灌溉。为使喷灌机与控制数据相结合,喷灌机行走控制基于 PLC 控制器,利用 PLC 程序模拟百分率计时器,实现喷灌机行走速度及行走方向的调节。

喷灌机是以跨度为单位的长距离灌溉设备,所以会产生喷灌机首尾所需灌溉量不同的情况,但是喷灌机行走是同步的,由于不同区域土壤墒情不同,各喷头保持一致灌溉,喷灌机覆盖区域会产生水量过多或过少情况,为达到全地块的按需均匀喷施,以跨为单位对小灌量区域对应喷头进行断续开闭处理,使其达到在喷灌机首尾同步行走的情况下,内外区域灌溉时长严格对应预测数据。喷灌机各喷头端配有电动阀,电动阀全开至全闭时间为 4 s,因此将 10 s 作为喷头开闭动作的时间单位,当喷灌机覆盖的内外区域出现喷灌时间不一致后,就将 10 s 喷头开闭动作均匀规划进灌溉短时间区域,最终使短时灌溉区域喷灌机行走时长与长时灌溉区域行走时长保持一致,灌溉量与指导数据一致,保持喷灌机各跨行走同步性。

当喷灌机运行一个周期后,对灌溉地块重新进行数据对比,对于未达到预期效果地块,由上述策略进行再次补灌,最终使其达到理想灌溉效果。

系统界面如图 2 所示,百分率计时器实际上是一台以 1 min 为限值的数字式智能计算装置,当它接入喷灌机的控制回路中时,它以设定的运行时间百分率(1 min 的 0~99%),定时启动喷灌机最末端搭架车的驱动电动机,再由末节喷灌机依次向内逐跨行走,使喷灌机按要求连续或断续行驶。调整百分率设定值即调整 1 min 内驱动电动机启、闭的时间比例,从而调节喷灌机运行速度来实现预期要求的水量。

2.2 田间传感器布设

田间预埋土壤传感器主要采集土壤含水率数



图 2 系统控制界面

Fig.2 System control interface

据^[15-16],传感器采用 RS-485 通信协议,依托 ZigBee 网络与计算机端数据传输,并依据传感器数据地址,对传感器作分组处理。

如图 3 所示,布设点位置主要根据喷灌机行走轨迹划分,覆盖喷灌机灌溉的整片区域。由于喷灌机具有喷幅经圆心逐级扩大的特性,所以由内向外均匀分布传感器,传感器数值能够代表所在扇形区域的土壤水分情况。传感器预埋深度依照作物要求。以试验地块为例,地块以草药及花卉种植为主,花卉耕作层为 20 cm,为监测植被根系下土壤储水情况,因此每个点位传感器预埋深度为 30 cm。传感器通过 ZigBee 网络将数据传输至计算机端后,由计算机端对数据处理分析,即可得出灌溉地块的灌溉数据网络。

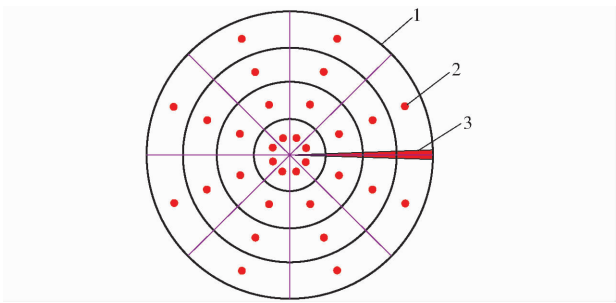


图 3 田间传感器布设示意图

Fig.3 Sketch of field sensor layout

1. 喷灌机行走轨迹 2. 预埋传感器 3. 喷灌机喷幅

ZigBee 是基于 IEEE 802.15.4 标准的低功耗局域网协议,具有低功耗、低成本、高安全性等特点。本文无线传输网络由多个网络节点构成,采用星形拓扑结构设计。各传感器所设节点为从节点,并且受各节点间传输距离较远因素影响,各节点还充当彼此间中继路由作用,使链路畅通。主节点与数据服务器连接,数据服务器用来接收并存储数据。田间传感器布设如图 4 所示。

2.3 变量灌溉指导数据计算

灌溉是大面积作业,由于作业地块土壤层受耕种作物不同或局部气候等影响,会使其不同区域土层储水情况不同^[17-19],一个位置灌溉时长就不确



图 4 田间传感器布设现场图

Fig.4 Scene of sensor setup site

定。为使灌溉合理,将灌溉决策中加入自学习预测灌溉时长功能。参考土壤墒情对作物生长适宜程度来确定预设土壤含水率低于 11% 时为土地需灌溉条件,土壤含水率 18% 为理想灌溉效果,并按预设值计算出灌溉预测数据。

系统将预埋传感器土壤水分信息作为主要参考计算数据,经过预测算法得出变量灌溉处方信息。通过喷灌机机载的 GPS 位置信息^[20]与传感器预埋位置信息相比对,即可确定喷灌机所在区域,再由灌溉预测处方数据得出喷灌机所在区域的灌溉时长,依此进行灌溉作业,即可完成变量喷施。

系统数据采集是从喷灌机对一组传感器静止灌溉开始的,通过对此组传感器区域土壤到理想含水率所需灌溉时长进行预测,推演至整片灌溉区域所需灌溉指导数据。

如图 5 所示,在实际应用中传感器数字跳变只能代表传感器所在位置静止灌溉效果,由于传感器代表的是所在的灌溉区域,所以不能将传感器位置灌溉时间作为此区域的灌溉时间。一个区域是喷灌机行走后的覆盖面,还要根据喷灌机喷幅宽度在区域内划分网格,以网格作为静止灌溉单位,一个区域灌溉时长即为网格区块灌溉时长的总和。

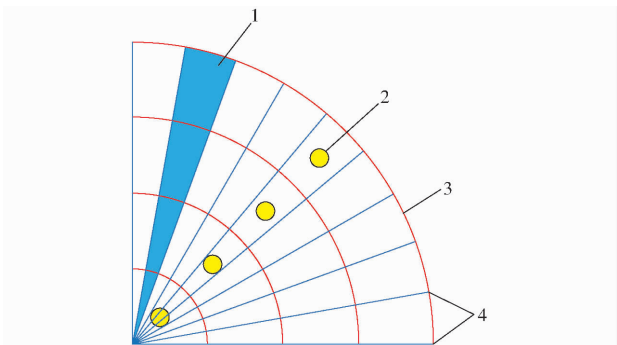


图 5 传感器区域网格划分

Fig.5 Meshing of sensor regions

1. 网格区块 2. 传感器 3. 喷灌机行走轨迹 4. 喷灌机喷幅

灌溉过程中,地面存有积水,这些积水会在停止灌溉后继续渗透,如达到预定水分值才停止灌溉就

会由于之后的积水渗透造成过灌,所以要在达到预定值前停止灌溉,使土壤在积水渗透之后达到水分预设值。积水渗透时间取一个经验固定阈值,参与到后期计算,得到准确灌溉时长。

综上所述,预测算法的计算过程为:当喷灌起始作业时,将喷灌机移至距离最近传感器上,开始静止灌溉,记录当前传感器水分值及时间,并将记录的时间作为计算的样本数据,参与预测计算。当控制端完成预测计算并形成灌溉指导数据后,则结束静止灌溉,喷灌机进入正常行走灌溉状态。

样本数据采样工作是在喷灌机进行静止灌溉开始,将传感器从灌溉起始到每提升 1% 的数值跳动作为一个时间记录区间,这个区间时长作为预测计算的样本数据。由于观察样本数据基本是呈线性趋势的数列,因此为降低计算负担,增加计算效率,预测算法采用二次指数平滑预测算法^[21],二次指数平滑预测数学模型为:

一次指数平滑

$$S_t^{(1)} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) S_{t-1}^{(1)} \tag{1}$$

二次指数平滑

$$S_t^{(2)} = \alpha S_t^{(1)} + (1 - \alpha) S_{t-1}^{(2)} \tag{2}$$

$$a_t = 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)} \tag{3}$$

$$b_t = \frac{\alpha}{1 - \alpha} (S_t^{(1)} - S_t^{(2)}) \tag{4}$$

$$\hat{Y}_{t+T} = a_t + b_t T \tag{5}$$

式中 $S_t^{(1)}$ ——第 t 周期的一次指数平滑值
 Y_t ——第 t 周期样本数据
 $S_t^{(2)}$ ——第 t 周期的二次指数平滑值

表 2 一次指数平滑计算结果

Tab.2 One time exponential smoothing calculation result

参数	样本传感器含水率/%				
	11	12	13	14	15
数值跳变累积时间	960	1 060	1 167	1 272	1 380
$S_t^{(1)} (\alpha = 0.7)$	990.670	1 039.201	1 128.660	1 228.998	1 334.699
$S_t^{(1)} (\alpha = 0.8)$	980.467	1 044.093	1 142.419	1 246.084	1 353.217
$S_t^{(1)} (\alpha = 0.9)$	970.233	1 051.023	1 155.402	1 260.340	1 368.034

由表 2 可看出,平滑系数 $\alpha = 0.9$ 时,计算结果最接近于原始数据,也可通过计算各平滑系数下平滑值的平均误差来确定最佳 α 值,公式为

$$\eta = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - S_t^{(1)}|}{t} \tag{6}$$

式中 η ——平滑值的平均误差

根据式(1)计算得 α 为0.7、0.8、0.9时平均误

$S_{t-1}^{(2)}$ ——第 $t - 1$ 周期的二次指数平滑值
 α ——加权系数(也称为平滑系数)
 $a_t、b_t$ ——二次指数平滑中间变量
 T ——第 t 期的向后推移期数
 $\hat{Y}_{t+T}$ ——预测结果

3 变量灌溉应用效果

3.1 区域灌溉时间预测

以传感器第 1 个数值跳动作为预测起点,记录每次数值跳动从起始灌溉到此次跳动的时间,并将时间数值作为预测样本数据,进行预测计算。

将灌溉的前 5 个数值跳动时间作为预测的数据样本,在预测过程中插入不同平滑系数,根据结果最终确定最佳平滑系数,并预测出达到理想灌溉所需时间。

以一个传感器区块为例、传感器测量初始含水率为 10% 的计算过程如下。

观察表 1 样本数据可知由于是累积时间,所以时间序列波动大,长期趋势变化幅度大,呈现明显且迅速的上升趋势,所以确定 α 为 0.7 ~ 0.9 之间。将 $\alpha = 0.7$ 代入计算得一次平滑 $S_0^{(1)} = 1\,062.333\text{ s}$, $S_1^{(1)} = 990.670\text{ s}$, $S_2^{(1)} = 1\,039.201\text{ s}, \dots$ 。

由此过程得出一次指数平滑计算结果,如表 2 所示。

表 1 预测样本数据

Tab.1 Forecast sample data

样本传感器含水率/%	11	12	13	14	15
数值跳变累积时间/s	960	1 060	1 167	1 272	1 380

差为 38.924、24.24、11.323,平滑系数 $\alpha = 0.9$ 时平均误差最小。

经过上述一次平滑计算后,依据一次计算结果及最佳平滑系数,进行二次平滑计算。

根据二次指数平滑公式得出表 3。

由表 3 可知, $S_{15}^{(1)} = 1\,368.034\text{ s}$, $S_{15}^{(2)} = 1\,356.104\text{ s}$, $\alpha = 0.9$, 则根据二次指数平滑数学模型, $a_{15} = 1\,379.964\text{ s}$, $b_{15} = 107.37\text{ s}$ 。

表 3 二次指数平滑计算结果

Tab.3 Two time exponential smoothing calculation result

样本传感器 含水率/%	数值跳变 累积时间	s	
		$S_t^{(1)}(\alpha=0.9)$	$S_t^{(2)}(\alpha=0.9)$
11	960	970.233	979.098
12	1 060	1 051.023	1 043.831
13	1 167	1 155.402	1 144.245
14	1 272	1 260.340	1 248.731
15	1 380	1 368.034	1 356.104

表 4 预测结果

Tab.4 Forecast result

样本传感器含水率/%	16(T=1)	17(T=2)	18(T=3)	19(T=4)	20(T=5)	21(T=6)
预测值 Y_{15+T}/s	1 487.334	1 594.704	1 702.074	1 809.444	1 916.814	2 024.184

灌溉地块土壤情况基本相同,渗水效率基本相同,将传感器的每跳变 1% 看作一级的话,各区域传感器都是从初始值逐级跳变,各区域间只存在传感器初始值不同,所以跳变级次不同,由此根据样本区域预测结果可推导出其他区域所需灌溉时间,公式为

$$T_x = Y_{11+(18-Y_x)}N_x \tag{8}$$

式中 T_x ——预测区灌溉时间
 Y_{11} ——样本区含水率 11% 的样本时间
 Y_x ——预测区含水率初始值
(18 - Y_x)——预测区的向后推移期数

表 5 对比结果数据

Tab.5 Comparison result

灌溉方式		初始含水率 均值/%	灌溉后含水率 均值/%	标准差/%	灌溉时间/h	灌溉行程/圈	工作效率
一次对比	传统灌溉	11.979 69	19.713 58	0.481 190	22.0	2	0.315 4
	变量灌溉	12.156 72	18.627 81	0.144 519	18.0	1	0.359 5
二次对比	传统灌溉	12.111 09	19.896 25	0.378 739	22.2	2	0.350 7
	变量灌溉	12.053 59	18.843 65	0.142 819	18.2	1	0.373 1
三次对比	传统灌溉	11.913 13	16.890 47	0.346 481	21.8	2	0.228 3
	变量灌溉	11.675 47	18.696 56	0.261 007	20.6	1	0.340 8

根据试验数据进行灌溉效果分析,将传统灌溉与变量灌溉前后土壤含水率检测数值分别代入均值公式,灌溉前数值通过计算比较 2 次灌溉前期土壤含水率差异性,灌溉后数值进行计算通过均值结果与预期值(18%)比较来判定与理想灌溉值的接近程度。将传统灌溉与变量灌溉后土壤含水率检测数值分别代入标准差公式,通过计算结果判定灌溉均匀性。将传统灌溉、变量灌溉前后均值与灌溉时间结合计算作业效率。

由表 5 可知,对比工作效率,变量灌溉由于按需定点喷施,减少了蒸发等因素造成的水量损失,所以效率高于传统灌溉,并且灌溉效果更接近于预期土

预测传感器数值为 16 时,累积时间由式(1)~(5)得 $Y_{16}=1\,487.334\,s,\cdots$ 。

最终,由表 4 可知,预测区达到理想灌溉(土壤含水率 18%)所需要的时间是 1 702.074 s,此传感器区域的总灌溉时间则为

$$T_q = Y_{18}N_q \tag{7}$$

式中 T_q ——传感器区域灌溉时间
 N_q ——网格区块数量

3.2 灌溉试验及结果分析

为测试变量灌溉效果,在同一地块做传统喷灌与变量喷灌对比试验。同一地块受多种因素影响,干湿区域分布不同,因此试验地块 2 次试验时间均间隔 15 d,使其试验环境尽量达到一致,并且,试验结果以灌溉效率、灌溉均匀性为判断依据,灌溉后对传感器数据进行分析。

根据前期预设值,传感器含水率数值为 18% 作为理想灌溉效果值,超过 18% 作为过灌值,低于 15% 为欠灌值,进行灌溉试验。试验结果如表 5 和图 6 所示。

壤含水率值。在灌溉均匀性方面变量灌溉也高于传统灌溉,体现出变量灌溉的高效性。

4 结论

(1)提出基于 PLC 控制的远程喷灌系统,实现精确控制喷灌机逐跨平稳行走,实现了喷灌机的自动化作业。

(2)基于 ZigBee 网络,实现了控制端与执行端的远程通信,实现远距离空旷范围的无线操控,减轻了田间远距离布线难度,有效实现了喷灌机的精确控制。

(3)以变量灌溉为目的,根据田间传感器数值

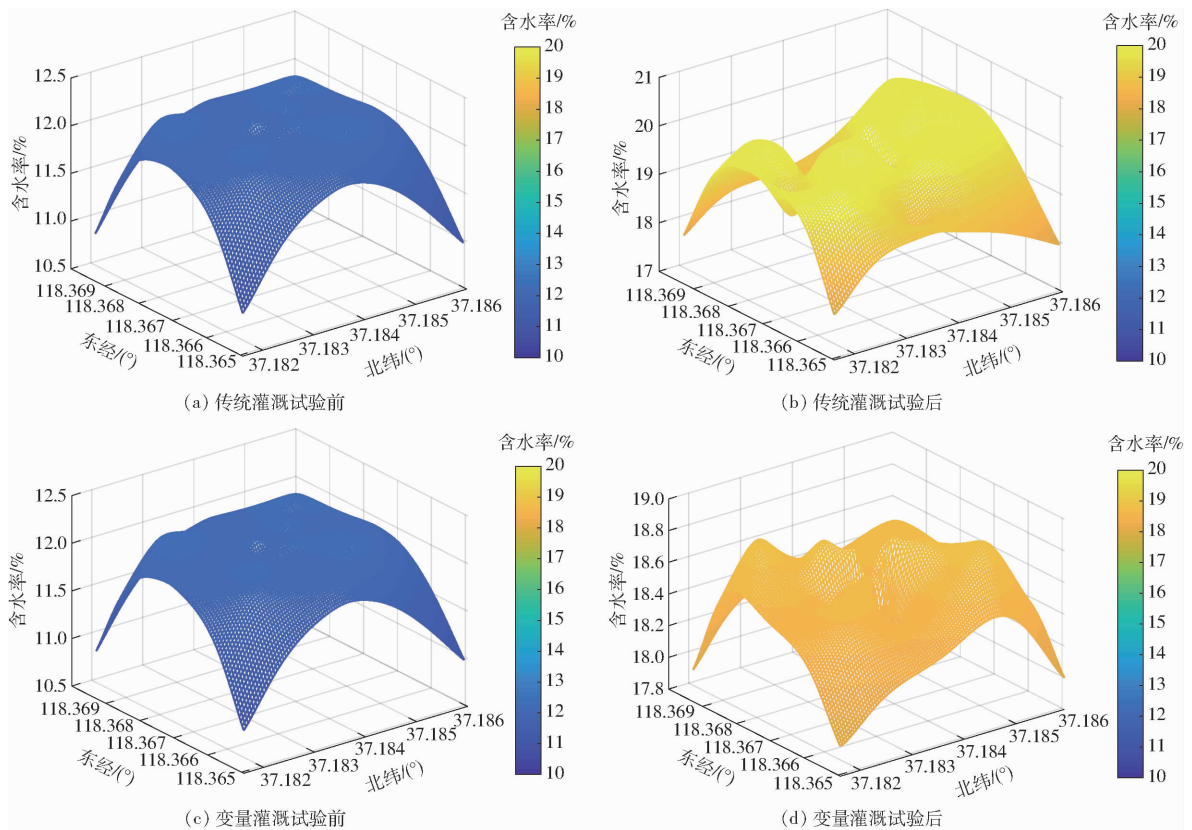


图 6 灌溉试验数据模型对比

Fig. 6 Comparison of irrigation test data models

分析,基于二次指数平滑预测算法,预测构建田间灌溉数据指导喷灌作业,使喷灌机运行获得精确的数据参照,并通过动态评定,确定最佳预测平滑系数,

使预测结果更加准确。

(4)通过变量灌溉与传统灌溉对比试验,验证了变量灌溉的有效性和高效性。

参 考 文 献

- 1 赵伟霞,李久生,栗岩峰,等. 大型喷灌机变量灌溉技术研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(13):1-7.
ZHAO Weixia,LI Jiusheng,LI Yanfeng, et al. Review on variable rate irrigation with continuously moving sprinkler machines [J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(13):1-7. (in Chinese)
- 2 赵伟霞,李久生,杨汝苗,等. 田间试验评估圆形喷灌机变量灌溉系统水量分布特性[J]. 农业工程学报,2014,30(22):53-62.
ZHAO Weixia,LI Jiusheng,YANG Rumiao, et al. Field evaluation of water distribution characteristics of variable rate center pivot irrigation system [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(22):53-62. (in Chinese)
- 3 严海军,马静,王志鹏,等. 圆形喷灌机泵注式施肥装置设计与田间试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):100-106.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150914&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.014.
YAN Haijun,MA Jing, WANG Zhipeng, et al. Design and field experiment on fertilizer injection device in center pivot irrigation system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(9):100-106. (in Chinese)
- 4 李淑华,郝星耀,周清波,等. 基于 Web 的自动灌溉控制系统数据实时推送设计与开发[J]. 农业工程学报,2015,31(15):133-139.
LI Shuhua,HAO Xingyao,ZHOU Qingbo, et al. Design and development of real time data push in web-based automatic irrigation control system[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(15):133-139. (in Chinese)
- 5 杨绍辉,杨卫中,王一鸣. 土壤墒情信息采集与远程监测系统[J]. 农业机械学报,2010,41(9):173-177.
YANG Shaohui,YANG Weizhong,WANG Yiming. Remote collecting and monitoring system of soil moisture content information [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):173-177. (in Chinese)
- 6 冀荣华,李鑫,张舒蕾,等. 基于 GM(1,1)模型群的农田土壤墒情短期预测[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):401-407.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s061&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.061.
JI Ronghua,LI Xin,ZHANG Shulei, et al. Short-term prediction of soil moisture in field based on GM (1,1) model group [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):401-407. (in Chinese)
- 7 张晓月,李荣平,焦敏,等. 农田土壤墒情监测与预报系统研发[J]. 农业工程学报,2016,32(18):140-146.

- ZHANG Xiaoyue, LI Rongping, JIAO Min, et al. Development of soil moisture monitor and forecast system [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 140–146. (in Chinese)
- 8 徐艳蕾, 包佳林, 付大平, 等. 多喷头组合变量喷药系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 47–54.
XU Yanlei, BAO Jialin, FU Daping, et al. Design and experiment of variable spraying system based on multiple combined nozzles [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 47–54. (in Chinese)
- 9 严海军, 姚培培, 朱勇, 等. 圆形喷灌机喷头配置技术与软件研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 84–88.
YAN Haijun, YAO Peipei, ZHU Yong, et al. Nozzle configuration and software for center pivot irrigation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 84–88. (in Chinese)
- 10 杨洋, 孙兆军. 基于 UWP 技术的智能节水灌溉系统设计[J]. 节水灌溉, 2017(6): 93–97.
YANG Yang, SUN Zhaojun. Research intelligent water saving irrigation system design based on UWP technology [J]. Water Saving Irrigation, 2017(6): 93–97. (in Chinese)
- 11 赵燕东, 马扬飞, 王勇志. 绿地精准灌溉控制系统设计与最优灌溉量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 46–50.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120309&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.009.
ZHAO Yandong, MA Yangfei, WANG Yongzhi. Green land precision irrigation control system and analysis of optimal irrigation amount [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 46–50. (in Chinese)
- 12 张运鑫, 韩振中, 沈莹莹, 等. 农业灌溉用水量统计中样点灌区选择方法研究[J]. 节水灌溉, 2018(4): 78–81.
ZHANG Yunxin, HAN Zhenzhong, SHEN Yingying, et al. A study on the selection method of sample point irrigation area in agricultural irrigation water consumption statistics [J]. Water Saving Irrigation, 2018(4): 78–81. (in Chinese)
- 13 张育斌, 魏正英, 简宁, 等. 水肥精量配比灌溉系统设计[J]. 农机化研究, 2017, 38(12): 107–111.
ZHANG Yubin, WEI Zhengying, JIAN Ning, et al. Design of water and fertilizer precision ratio irrigation system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 38(12): 107–111. (in Chinese)
- 14 周丽丽, 薛彬, 孟范玉, 等. 喷灌定额和灌水频次对冬小麦产量及品质的影响分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 235–243. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180129&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.029.
ZHOU Lili, XUE Bin, MENG Fanyu, et al. Effects of irrigation quota and irrigation frequency on yield and quality of winter wheat under sprinkler irrigation system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 235–243. (in Chinese)
- 15 闫华, 邢振, 薛绪掌, 等. 土壤剖面水分传感器探头仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 245–251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171030&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.030.
YAN Hua, XING Zhen, XUE Xuzhang, et al. Simulation and experiment on soil moisture profile sensor probe [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 245–251. (in Chinese)
- 16 刘卫平, 高志涛, 刘圣波, 等. 基于铱星通信技术的土壤墒情远程监测网络研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 316–322. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151143&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.043.
LIU Weiping, GAO Zhitao, LIU Shengbo, et al. Remote monitoring network for soil moisture based on iridium communication technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 316–322. (in Chinese)
- 17 高志涛, 田昊, 赵燕东, 等. 土壤剖面水分线性尺度测量方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 257–264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170433&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.033.
GAO Zhitao, TIAN Hao, ZHAO Yandong, et al. Linear scale measurement method for soil profile moisture [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 257–264. (in Chinese)
- 18 管孝艳, 杨培岭, 吕焯, 等. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 44–50.
GUAN Xiaoyan, YANG Peiling, LÜ Ye, et al. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 44–50. (in Chinese)
- 19 万博雨, 付聪, 郑世健, 等. 基于神经网络的温室土壤水分动态预测模型研究[J]. 节水灌溉, 2017(11): 72–76.
WAN Boyu, FU Cong, ZHENG Shijian, et al. Dynamic prediction model of greenhouse soil moisture based on neural network [J]. Water Saving Irrigation, 2017(11): 72–76. (in Chinese)
- 20 张小超, 王一鸣, 汪友祥, 等. GPS 技术在大型喷灌机变量控制中的应用[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 102–105.
ZHANG Xiaochao, WANG Yiming, WANG Youxiang, et al. Application and study on GPS technology for irrigation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 102–105. (in Chinese)
- 21 黎锁平, 刘坤会. 平滑系数自适应的二次指数平滑模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2004(2): 95–99.
LI Suoping, LIU Kunhui. Quadric exponential smoothing model with adapted parameter and its applications [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004(2): 95–99. (in Chinese)