

农业机械学报

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery

ISSN 1000-1298, CN 11-1964/S

《农业机械学报》网络首发论文

题目： 基于物联网智慧种植的简易草莓大棚水分利用效率分析
作者： 吴久江，汪星，李群，汪有科
收稿日期： 2019-05-11
网络首发日期： 2019-10-25
引用格式： 吴久江，汪星，李群，汪有科. 基于物联网智慧种植的简易草莓大棚水分利用效率分析. 农业机械学报.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20191025.1454.017.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于物联网智慧种植的简易草莓大棚水分利用效率分析

吴久江^{1,2} 汪星³ 李群^{1,2} 汪有科^{1,4}

- (1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 宁夏大学农学院, 银川 750021;
4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探索简易塑料草莓大棚的人工智能种植, 根据关中地区简易大棚的特点构建了大棚环境感知、计算机后台种植模型智能处置决策、用户手机微信告知及执行检查评价等环节的简易大棚物联网架构。该系统基于标准化技术体系分期给用户下达工艺单, 基于环境感知由后台计算机给每个种植户下达处置要求, 实施区应用效果良好, 单个大棚产量和收入分别增加 79.7%和 169.6%, 农药残留和投入分别降低 15.6%和 23.5%, 节约灌水量 29.8 m³, 水分产量利用效率和水分经济利用效率分别提高 137.6%和 255.4%。

关键词: 物联网; 人工智能; 智慧种植; 简易塑料大棚; 水分利用效率

中图分类号: S126 **文献标识码:** A

Analysis of Water Use Efficiency in Simple Strawberry Greenhouse Based on Smart of Internet of Things

WU Jiujiang^{1,2} WANG Xing³ LI Qun^{1,2} WANG Youke^{1,4}

- (1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, shaanxi 712100, China
3. College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China
4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The high-end intelligent greenhouses representing the highest level of modern facilities agriculture are mainly concentrated in developed countries. China has very few intelligent greenhouses with advanced levels, and they all rely on foreign imports. Not only are they costly, but they are also difficult to promote in large areas, which is not suitable for China's national conditions. However, China is still dominated by small-scale farmers, and more than 90% of the facilities are still simple plastic greenhouses. It is considered that wisdom cultivation cannot be realized. Therefore, in order to explore the artificial intelligence planting in the simple plastic strawberry greenhouse, according to the characteristics of the simple greenhouse in the Guanzhong area, the simple greenhouse Internet of Things (IoT) structure of the greenhouse environment perception, the computer background planting model intelligent disposal decision, the user mobile phone WeChat notification and the implementation of the inspection and evaluation are constructed. The system releases the process list to the user based on the standardized technical system, and the disposal request is issued to each grower by the background computer based on the environment perception. The system obtains good results after being applied in the project implementation area. Single greenhouse yield and income increased by 79.7% and 169.6% respectively, pesticide residues and inputs decreased by 15.6% and 23.5%, respectively, saved irrigation by 29.8 m³, water production efficiency and water economic efficiency were respectively Increase by 137.6% and 255.4%.

Key words: Internet of Things; artificial intelligence; smart planting; simple plastic greenhouse; water use

收稿日期: 2019-05-11 修回日期: 2019-07-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504703)

作者简介: 吴久江 (1994-), 男, 博士生, 主要从事农业物联网研究, E-mail: 746376599@qq.com

通信作者: 汪有科 (1956-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物高效用水和水土保持研究, E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

efficiency

0 引言

草莓素有“水果皇后”的美誉，我国草莓的年产量和栽培面积均超过了世界总量的 1/3，稳居世界第一，但草莓品质、单产及水分利用效率却远远低于西方发达国家^[1]。而随着近年来物联网技术在设施农业领域的广泛应用，可以实现对作物的远程监控和精确管理^[2]，为提高草莓生产提供了新的途径。

代表现代设施农业最高水平的高端智能温室主要集中在荷兰、日本等发达国家，基于大型连栋温室研制出先进的设施环境智能控制系统^[3-8]，可根据作物对环境的不同需求，由计算机对设施内的环境因子，例如空气温湿度、光照强度、CO₂ 浓度等进行全面有效的自动检测与调控^[9]；并对作物栽培管理^[10-11]、病虫害防治^[12-13]、作物产量产期预测^[14]进行全方位跟踪与服务，形成了一套系统化的种植技术体系，提高了作物产量并降低管理成本和农业成本^[15]。其中荷兰利用智能温室种植系统使草莓产量达 4.5~6.0 kg/m²，收入 449.7~899.6 元/m²，水分循环利用率 90%以上。

我国真正具有先进水平的智能大棚极少，且都依赖国外进口，不仅成本高，而且很难大面积推广^[16]。虽然国内对农业物联网研究也取得了一定进展^[17-20]，但总体上尚处于初始阶段，与国外差距较大，研究也主要集中在自动化程度较高的示范园大棚中^[21-22]。我国目前仍以小农户分散经营为主^[23]，90%以上的设施结构仍为简易型塑料大棚^[24]，基础设施薄弱、自动化程度低下的情况仍较为突出^[25]，针对其研发的物联网系统未见报道，被认为其无法实现物联网技术。

针对以上不足，本文基于农业技术（Agriculture technology, AT）、信息技术（Information technology, IT）和数据技术（Database technology, DT）的深度整合，结合陕西省关中地区设施草莓种植现状，设计一种适用于简易塑料大棚的农业物联网智慧种植系统，并对其实际应用效果和水分利用效率进行分析。

1 系统总体架构

基于物联网的草莓大棚智慧种植系统分为信息获取和种植大脑两部分。信息获取包括数据采集模块、边缘服务器、传输网络及云服务器，种植大脑主要由专家系统组成。系统使用 C/S 和 B/S 混合架构，形成“数据获取-智能分析-决策下达”设计结构，如图 1 所示。其中大棚结构简陋、自动化程度较低，采用种植户代替智能控制设备进行决策执行的方式。

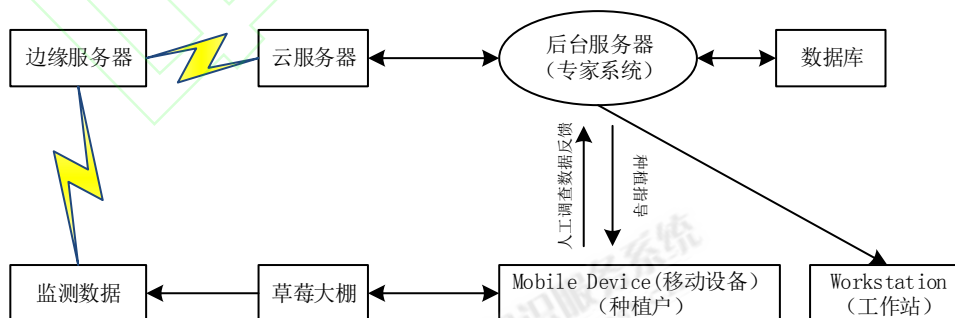


图 1 系统总体架构

Fig. 1 Overall system architecture diagram

2 信息获取

2.1 数据采集模块与可视化

数据采集模块包括棚内数据、棚外数据和人工调查数据，及时准确掌握草莓大棚的基本生产要素。人工调查数据包括肥药使用记录、园艺修剪记录、图像资料等传感器无法监测的数据，需要种植户进行记录

并手动上传至专家系统。棚内数据采用湖南省拓安仪器有限公司生产的传感器对棚内环境数据进行实时监测，空气温湿度探头 ESM-TH，空气湿度测量精度为±3%，空气温度测量精度为±0.2℃，二氧化碳探头 ESM-CO₂，测量精度为±60 mg/m³，PH 值探头 ESM-PH，测量精度为±0.02，土壤 EC 探头 ESM-EC，测量精度为±2%，土壤温湿度探头 ESM101-01TH，土壤湿度测量精度为±3%(m³/m³)，土壤温度测量精度为±0.2℃，光照强度探头 ESM-L，测量精度为±5%。其中串行通信接口为 RS-485，采用标准 Modbus-RTU 通信协议进行数据传输，并在棚外布置小型气象站监测棚外环境数据。

本文基于 WebSocket API 实现浏览器与服务器之间的双向通信；并利用 Ajax 技术实现异步数据交互，降低服务器负担以及提高网络传输效率；并引入 Highcharts 实现数据在计算机与手机的图表化。

2.2 边缘服务器与云服务器

边缘服务器负责收集传感器数据并上传至云服务器，云服务器则会综合更广泛的云端资源，并对上传的数据包进行计算、分析，然后存储至数据库供专家系统调用。其中采用窄带物联网（Narrow band Internet of Things, NB-IoT）作为无线通信网络。

3 种植大脑

3.1 数据库设计

数据库采用 MySQL+MongoDB 的混合存储策略，并基于专家系统设计需要构建知识库、综合数据库、人工调查数据库等，其中知识库存放专家提供的知识和经验，包括病虫害数据库、模型库、规则库等，是决定专家系统优劣的重要因素，知识库可以通过知识获取不断改正和丰富知识库内容，部分数据类型见表 1。为缓解数据库压力，加快计算过程和数据的读取速度，加入 Redis 缓存数据库。

表 1 部分数据库结构
Tab. 1 Partial database structure

数据库	类型	内容
知识库	病虫害数据库	病虫害图像、作物表现特征、解决方案等
	模型库	作物模型、气象模型、土壤水分平衡模型等
	规则库	告警规则、各生育阶段环境参数配置规则等
综合数据库	棚内数据	CO ₂ 浓度、土壤温湿度、空气温湿度、土壤 EC 值等
	气象数据	空气温湿度、光照强度、辐射强度、日照时数、降雨量等
	土壤数据	土壤容重、田间持水量、土壤成分组成等
人工调查数据库	大棚管理记录	大棚卷膜时间、棚内灌水时间、除草记录等
	作物生长记录	生育期交替时间记录、长势记录等
	病虫害记录	病虫害发生时间、影响范围等

3.2 模型处置决策

3.2.1 参数报警设置

本系统根据种植需要分别设置环境参数报警和水分参数报警。简易塑料大棚因结构简单，做不到对环境的恒定控制，为了使草莓生长环境适宜，需要根据专家知识、经验以及大棚自身的调节能力在草莓不同生育阶段需求设置不同环境参数和水分参数参考阈值，当参数超过上、下限范围时，专家系统则会发出报警信号，并结合传感器数据与气象数据，利用专家知识库的推理机不断推理，得出最终执行决策并自动下发至种植户手机端指导农户实施管理。主要控制决策包括卷膜高度与时间，棚顶覆膜的材料与数量，灌水量和灌水时间。

3.2.2 决策准确率设计

为降低成本，单个大棚内布置的传感器数量较少，且大棚内没有先进的自动化设备，为保证系统报警的准确率，减少错误决策的发生，系统分别设计了环境参数和水分参数的报警规则。

棚内环境参数采集以 3min/次的频率上传至专家系统，当某一个环境参数出现异常时，系统将会发送报告至专家系统，为避免传感器监测误差和温室内因人为因素造成偶然情况的发生，规定在一段时间内，如果环境参数报警比例达到设定规则，则系统下发报告与执行决策，如果未达到设定规则，系统会认为出现误报，并将报告发回后台工作人员并继续进行环境监测，并不会下发至种植户，环境数据告警工作流程如图 2 所示。

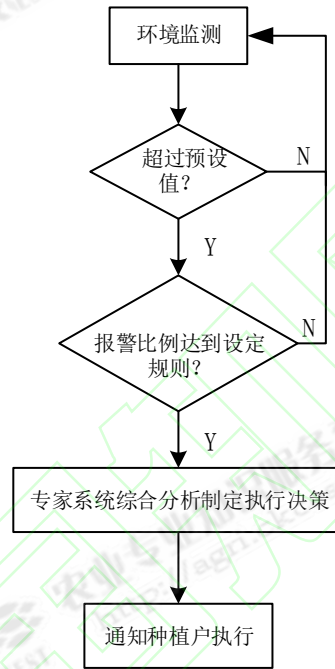


图 2 环境参数告警功能流程图

Fig. 2 Environmental parameter alarm function flow chart

棚内灌水方式采用滴灌，考虑其湿润方式、水分探针布置误差、垄上不平整等原因，采用通过模型计算作物需水量与水分探针相结合的形式保证灌水的合理性。

专家系统的推理机通过采集有效数据结合模型库不间断进行作物需水量的计算，其中参考作物蒸发-蒸腾量计算是重要的参考依据，由于棚内风速可忽略不计，所以不采用 FAO 推荐的彭曼-蒙特斯公式 (Penman-Monteith, P-M)，而采用适合大棚的修正 P-M 公式^[26]，具体公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{1713(e_s - e_a)}{T_{mean} + 273}}{\Delta + 1.64\gamma} \quad (1)$$

其中

$$\Delta = \frac{4098 \left(0.6108 \exp \frac{17.27T}{T + 237.3} \right)}{(T + 237.3)^2} \quad (2)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P_a \quad (3)$$

$$P_a = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (4)$$

式中 ET_0 ——参考作物蒸发-蒸腾量，mm/d

Δ ——饱和水气压曲线斜率, kPa/K

R_n ——地表净辐射, MJ/(m²·d)

G ——土壤热通量, MJ/(m²·d)

γ ——干湿表常数, kPa/K

T_{mean} ——日平均温度, °C

e_s ——饱和水气压, kPa

e_a ——实际水气压, kPa

P_a ——大气压, kPa

Z ——当地海拔高度, m

作物需水量公式为

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (5)$$

式中 ET_c ——作物需水量, mm/d

K_c ——作物系数

通过模型计算作物需水量与水分探针监测数据相比较,并设计最大误差规则,确保大棚灌水的合理性。为避免灌水过多,系统分别设置灌水总量和灌水总时间报警,双重保险原则确保灌水的准确性。

3.2.3 工艺单设计

工艺单基于草莓生长规律需求主要分为栽培技术和环境处置两部分,为针对不同目标,专家系统结合知识库不定期自动下达工艺单内容。其中栽培技术包括植保管理、园艺管理、水肥管理、农残管理、健康诊断等一系列需要种植户完成的具体工作内容;环境处置是专家系统根据草莓适宜生长环境需求而作出的阶段性基础环境处置措施,部分工艺单结构如表 2 所示。其中专家系统针对病虫害与极端天气会提前自动下达工艺单做好预防措施。

表 2 部分工艺单结构

Tab. 2 Partial process sheet structure

项目	内容
植保管理	肥药标准、土壤酸碱调节、作物生长调控、微量元素补充等
园艺管理	老叶病叶清理、枝条修剪、匍匐茎清理等
水肥管理	配肥原则、肥水配比、施肥方式等
土壤复壮	土壤疏松、打孔填料等
健康诊断	生育期识别、病虫害防治等
环境处置	卷膜高度与时间、扣棚时间、保温措施等

3.2.4 执行检查

简易塑料大棚缺乏智能控制设备,为保证种植户切实完成专家系统下达的处置决策,设计了两项执行检查标准:①对于棚内环境参数检查,专家系统规定在一段时间内,通过异常环境参数的变化趋势判断决策是否得到执行。②专家系统规定种植户定期上传草莓生长图像与管理记录,判断种植户是否完成工艺单相关内容。

3.3 微信功能设计

3.3.1 信息交流功能

针对农业大棚自动化程度较低的实际,微信公众号成为了专家系统与种植户间信息交流的主要手段。

基于微信平台基础，利用 Java、Python、css、Javascript 等开发“种植大脑”微信公众号并接入服务器，公众号包括 3 个菜单，分别是服务中心、更多服务、个人中心，如图 3 所示。

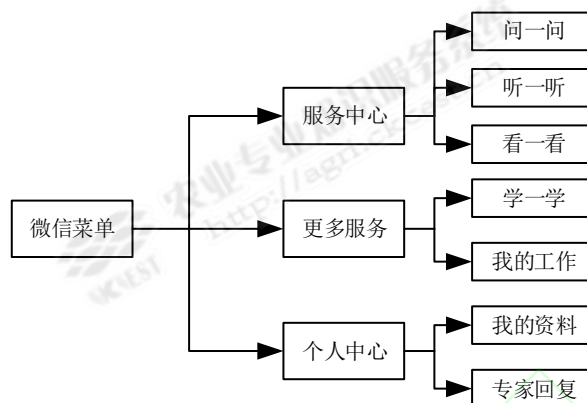


图 3 微信公众号结构图

Fig. 3 WeChat public account structure chart

种植户关注微信公众号并绑定特定 IP 可以通过“看一看”实时掌握棚内环境信息、棚外气象信息以及随时随地接收专家系统的决策信息。图 4 为手机微信端棚内环境参数界面，图中记录了某一时刻棚内环境参数情况，环境信息展示采用了图像加文字的形式，其中绿色区域为环境参数正常范围；浅蓝色与浅红色代表了环境参数预警区域，代表环境参数即将出现异常，专家系统会下发预警至种植户手机端；深蓝色和深红色则为环境参数报警区域，说明当前环境参数已偏离正常范围，专家系统根据实时数据并结合数据库下达具体的控制决策至种植户手机端，例如进行卷膜、通风、施肥、灌水等相关措施。图 4 中空气温湿度、土壤温湿度、土壤 EC 值、棚内 CO₂ 浓度的指针均指向绿色区域表明当前状态为正常范围，光照强度指针指向红色区域，说明目前光照强度不足，应实施补光措施。

种植户单方面的接收执行决策并不能完全解决草莓种植过程中的所有问题，所以微信公众号增加了“问一问”模块；种植户可以把种植过程中出现的种植问题以文字、图像或语音的形式通过微信公众号“问一问”功能发送至系统后台，利用人工智能专家解决普通生产问题，草莓专家解决疑难问题。图 5 为某一次提问管理内容，提问者通过图像加文字的形式对问题进行详细描述，草莓专家根据问题给予适宜的解决方法。



图 4 棚内环境参数项界面

Fig. 4 Environmental parameters in greenhouse

图 5 提问管理后台界面

Fig. 5 Question management background screenshot

3.3.2 智慧推送

智慧推送包括知识智慧推送和周报推送两项内容，知识智慧推送是针对草莓种植，根据其不同生育阶段和适宜生长条件推送有关园艺、水肥、植保、环境管控等一系列相关文章，包括病虫害识别与防治、环境监测参数详解、水肥配比等（图 6）。目的是为了让种植户了解草莓种植的相关知识以提高种植户的种植技术。

为了种植户更好管理大棚，专家系统每周会定期发送周报。周报内容会展示本周草莓大棚内各环境参数变化情况，提出管理中的不足和改进措施，并结合气象数据预测下周环境变化趋势提前做出管理意见，为下一阶段专家系统的决策以及种植户的管理提供参考与指导。



图 6 知识智慧推送界面

Fig. 6 Knowledge intelligent push service

4 研究区与研究方法

4.1 研究区概况

试验区位于陕西省渭南市白水县，试验时间为 2018 年 9 月~2019 年 3 月（草莓整个生育阶段）。该试验区地处关中平原与陕北高原过渡带（109°63'E、35°24'N），海拔 787m，是典型的黄土高原沟壑区地貌，气候属于南温带湿润气候区，干燥多风。多年平均气温 11.4℃，平均降水量 577.8mm，且时空分布不均，其中土壤容重为 1.36g/cm³，用环刀法测得当地田间持水率为 35%。

4.2 试验设计

随机选择 A、B、C 3 家种植户草莓大棚安装该物联网系统作为试验大棚，接受后台人工智能（简称种植大脑）决策，实行精细化管理，3 家草莓大棚数量分别为 8、12、10，并另选一种植户 D 为传统经验管理作为对照试验，草莓大棚数量为 6。试验大棚与对照大棚草莓品种均为红颜，单个大棚种植面积约为 667 m²，南北走向，主要由塑料钢架组成，大棚内共起 9 垄，垄上覆黑色薄膜，垄高 35 cm，垄底宽 45 cm，垄上宽 30 cm，垄间距 25 cm，每垄定值草莓苗约为 660 株，单个大棚总定值苗数约为 6000 株，棚内灌溉方式采用滴灌，并安装水表统计耗水量，无其他自动化设施。

5 结果与分析

5.1 时尺度上环境参数变化规律

图 7 为 10 月 8 日 3 户草莓棚内外部分环境参数平均值。从图 7 可以看出，棚内外温湿度具有较好一

致性，且棚内增温速率大于棚外增温速率，全天棚内温度均大于棚外温度，平均温差为 3.5℃，气温日较差为 9.9℃；全天最大相对湿度差为 20.9%，平均相对湿度差为 6.5%。图 8 为棚内外温度与相对湿度拟合回归图，由图可知，棚内外温度线性正相关 ($y = 1.55964x - 2.76203$)，决定系数较高 ($R^2=0.78942$)。棚内外相对湿度为线性正相关 ($y = 1.04082x - 8.16924$)，决定系数也较高 ($R^2=0.81304$)。可根据未来一段时间段内棚外气象数据预测棚内环境参数变化趋势，对极端天气的预警和病虫害的预防具有一定的指导作用。

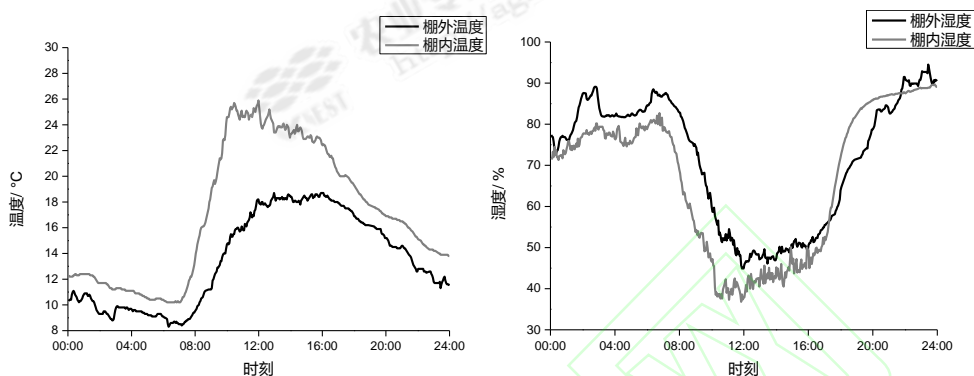


图 7 时尺度上棚内外温度与相对湿度变化曲线

Fig. 7 Change chart of indoor and outdoor temperature and relative humidity on hourly scale

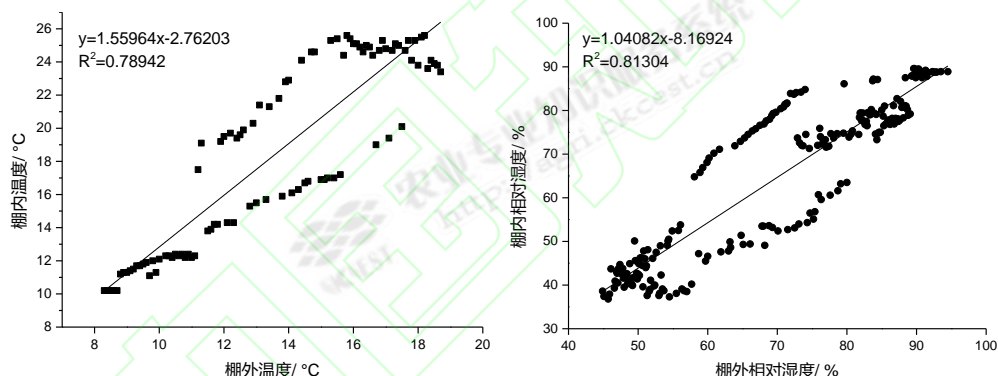


图 8 时尺度上棚内外温度与相对湿度回归分析

Fig. 8 Regression analysis chart of indoor and outdoor temperature and relative humidity on hourly scale

5.2 专家系统决策准确性分析

图 9 为 9 月 12 日~10 月 31 日（草莓苗期阶段）3 户草莓棚内温度与相对湿度日平均变化曲线，从图中可以看出温湿度变化幅度较大，主要受棚外气象因素影响。棚内温湿度根据专家知识进行参考阈值预设，其中草莓苗期阶段温度参考阈值范围为 15~25℃，实际温度超出参考范围的天数为 4d，超出比例为 8%，适宜温度天数比例占 92.00%；草莓苗期相对湿度参考预值范围为 30%~50%，实际相对湿度超出参考范围的天数为 5d，比例为 10%，适宜相对湿度天数比例占 90.00%。环境参数超出参考范围的原因可能是因为简易大棚基础设施薄弱，利用种植户代替智能设备的方式做不到精确控制，存在操作上的误差。但草莓苗期适宜生长环境天数依然占有较高的比例，说明“以人代机”的模式依然具有较好的准确性，起到了提高草莓生长的作用。

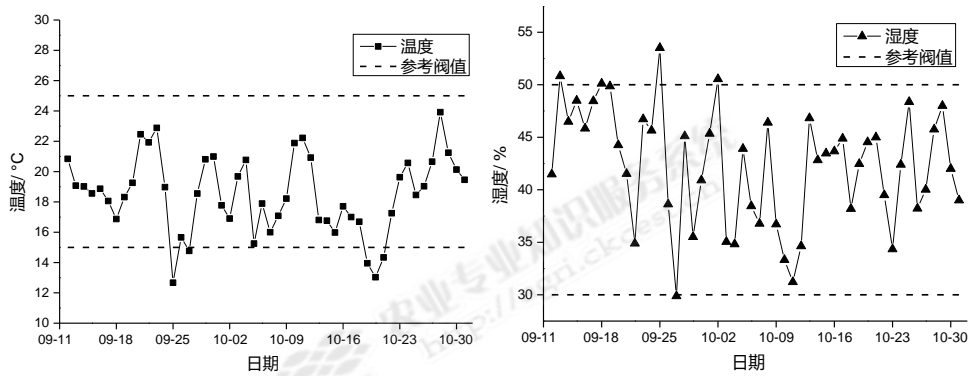


图 9 棚内温度和相对湿度日均变化曲线

Fig. 9 Daily temperature and relative humidity variation chart in greenhouse

5.3 水分效率分析

图 10 为大棚草莓苗期至膨果期土壤体积含水率的变化曲线，图中虚线表示草莓苗期、花期、膨果期 3 个主要生育阶段土壤水分参考阈值，前期土壤水分较高的原因是草莓定值期耗水量较大，以致苗期前期阶段水分依然较高。从第 2 次灌水开始统计，土壤水分含水率超出参考范围的天数一共为 41d，超出比例为 23.98%，原因是种植户缺乏现代化灌溉设备，且种植户从接收专家系统决策到具体执行有一定的时滞性，所以做不到水分的即灌即停，但适宜水分天数依然占有 76.02%的较高比例。其中在苗期阶段（9 月 12 日~10 月 31 日），因为遵循专家系统的指导，试验大棚草莓苗存活率为 99.0%，而对照大棚存活率仅为 60.6%。

在整个试验阶段（2018 年 9 月~2019 年 3 月），试验大棚按照工艺单施肥配药规则和精细化环境控制，对病虫害做到提前预防；但对照大棚只有发生病虫害时才会有所反应，不仅错过了最佳预防时间，且种植户缺乏对市场上农资产品的全面认识，最终导致草莓病虫害控制较差、农药残留较高和药物投入较多，导致产量和品质处于较低水平。经统计，试验大棚相比对照大棚农药残留与药物投入分别减少 15.6%和 23.5%。

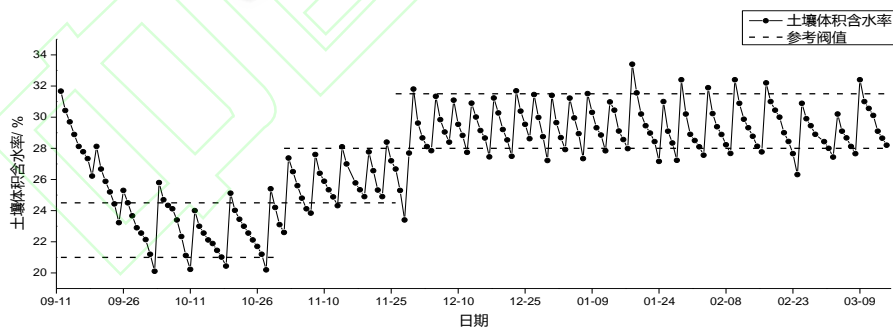


图 10 草莓全生育阶段土壤体积含水率变化曲线

Fig. 10 Soil volumetric moisture content during whole growing stage of strawberry

对每一户单个草莓大棚的平均产量和耗水量进行统计，如表 3 所示。其中根据市场调查，从草莓的品质、卖相、口感、上市时间等考虑，试验大棚草莓平均单价为 60 元/kg，对照大棚为 40 元/kg。

表 3 单个草莓大棚水分效率统计

Tab. 3 Single strawberry greenhouse water efficiency statistics

试验户	总耗水量/ m ³	产量/ kg	平均单价/ 元 · kg ⁻¹	水分效率	
				产量/ kg · m ⁻³	经济/ 元 · m ⁻³
A	92.4	1750	60	18.90	1136
B	96.6	1940	60	20.10	1204
C	90.5	1810	60	20.00	1200
D	123.0	1020	40	8.29	332

从表 3 得知, 在整个草莓生育阶段, 3 个试验户单个草莓棚平均耗水量为 93.2m³、产量为 1833kg、收入 110000 元、水分产量利用效率为 19.70kg/m³、水分经济利用效率为 1180 元/m³, 相比之下, 对照大棚总耗水量为 123.0 m³、收入 40800 元、产量 1020kg、水分产量利用效率 8.29 kg/m³、水分经济利用效率 332 元/m³。相较于对照大棚, 试验棚的产量、收入、水分产量利用效率、水分经济利用效率分别提高 79.7%、169.6%、137.6%、255.4%, 总耗水量减少 29.8m³。

6 讨论

物联网技术在农业中的应用尚处于初期阶段, 但的确对农业生产方式变革带来了一定的影响^[27]。前人对农业物联网系统的环境监控系统设计^[28-29]、数据传输稳定性^[30-32]、智慧灌水系统^[33-34]等方面做了较多研究。但大多数建立在自动化程度较高的实验基地或示范区, 对物联网技术在简易大棚中应用研究未见报道。本文利用物联网技术将环境监测与栽培技术相结合形成了一套适用于当地的草莓种植模型, 能够较好地应用于简易草莓塑料大棚中, 指导农户进行科学管理, 对草莓生产有较大提升, 并弥补了物联网技术在简易塑料大棚中应用的空白。但本系统缺乏智能控制设备, 专家系统下达的决策并不能得到精准执行, “以人代机”的模式依然存在着操作上和时效性的误差。虽然较原经验式管理, 草莓产量、水分利用效率、耗水等均得到了较大改善, 但与大型智慧温室相比依然存在较大差距, 其中本文草莓的产量、水分产量利用效率、水分经济效率分别只有大型智慧温室的 29.1%、6.3%、3.7%, 耗水却是其 4 倍^[35], 主要原因是大型智慧温室有系统化的草莓种植标准、经验更为丰富的管理人员和先进的监控设备等, 其中约 90%的水分能够得到循环利用。

本文系统初期可根据草莓专家知识和经验提供的适宜草莓生长环境参数预设值作为种植参考, 但结合实地种植, 应对草莓专家经验模型进行优化: 当一个生育周期结束, 通过人工手动录入单个草莓大棚的产量、品质、水分效率、病虫害等不同目标情况, 专家系统通过对大棚历史数据进行对比、分析, 得到最优目标时需要的生产条件并录入数据库, 实现对专家经验模型的初步优化, 为下一次生产提供参考。但该系统模式在农业中的应用时间较短, 经验模型优化、复杂数学模型的应用与优化等还需要大量数据支持和长时间验证。

7 结论

(1) 设计了一种适用于简易型塑料草莓大棚的农业物联网智慧管理系统。该系统利用环境控制模型、工艺单模式、执行检查系统和微信互动模式等技术将环境监测与草莓栽培技术相结合, 能够较好地指导种植户对大棚进行精细化管理, 保证草莓的产量和质量, 并填补了物联网技术在简易塑料大棚中应用的空白。

(2) 基于标准化技术体系及工艺单下达模式, 单个试验大棚有效提高草莓产量 79.7%和收入 169.6%, 并减少农药残留 15.6%和药物资金投入 23.5%。

(3) 相比原经验式管理, 物联网系统的技术实现了单个草莓大棚节水 29.8m³、并分别提高水分产量

利用效率 137.6%和水分经济利用效率 255.4%。

参考文献

- [1] 吴晓云, 高照全, 李志强, 等. 国内外草莓生产现状与发展趋势[J]. 北京农业职业学院学报, 2016, 30(2): 21-26.
WU Xiaoyun, GAO Zhaoquan, LI Zhiqiang, et al. Present situation & trend of strawberry cultivation in China and abroad[J]. Journal of Beijing Vocational College of Agriculture, 2016, 30(2): 21-26. (in Chinese)
- [2] TZOUNIS A, KATSOULAS N, BARTZANAS T, et al. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 31-48.
- [3] 成福伟. 发达国家现代农业园区的发展模式及借鉴[J]. 世界农业, 2017(1): 13-17.
- [4] 姚於康. 国外设施农业智能化发展现状、基本经验及其借鉴[J]. 江苏农业科学, 2011(1): 3-5.
- [5] 唐珂. 国外农业物联网技术发展及对我国的启示[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(6): 700-707.
TANG Ke. Technology development of agricultural Internet of Things in foreign countries and its inspiration to China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(6): 700-707. (in Chinese)
- [6] PAWLOWSKI A, GUZMAN J, RODRÍGUEZ F, et al. Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event-based control[J]. Sensors, 2009, 9(1): 232-252.
- [7] PAHUJA, ROOP, VERMA H. K, et al. A wireless sensor network for greenhouse climate control[J]. IEEE Pervasive Computing, 2013, 12(2): 49-58.
- [8] 李瑾, 郭美荣, 高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 200-209.
LI Jin, GUO Meirong, GAO Liangliang. Application and innovation strategy of agricultural Internet of Things[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp2): 200-209. (in Chinese)
- [9] SRBINOVSKA 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.
- [10] AIELLO G, GIOVINO I, VALLONE M, et al. A decision support system based on multi-sensor data fusion for sustainable greenhouse management[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 4057-4065.
- [11] FERENTINOS K P, KATSOULAS N, TZOUNIS A, et al. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment[J]. Biosystems Engineering, 2017, 153: 70-81.
- [12] PARK D, KANG B, CHO K, et al. A study on greenhouse automatic control system based on wireless sensor network[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 56(1): 117-130.
- [13] PARK D, PARK J. Wireless sensor network-based greenhouse environment monitoring and automatic control system for dew condensation prevention[J]. Sensors, 2011, 11(4): 3640-3651.
- [14] KATSOULAS N, FERENTINOS K. P, TZOUNIS A, et al. Spatially distributed greenhouse climate control based on wireless sensor network measurements[J]. Acta Horticulture, 2017, 1154: 111-120.
- [15] SRBINOVSKA 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.
- [16] 李莉莉. 华东型连栋塑料温室环境智能控制系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
LI Lili, The research of intelligent environment control system for multi-span plastic greenhouse in east China[D].

Shanghai: Shanghai Jiao tong University, 2013. (in Chinese)

[17] 赵立安, 李修华, 周永华, 等. 基于农业物联网的火龙果生长环境大数据分析[J]. 节水灌溉, 2018(3): 58-62.

ZHAO Li'an, LI Xiuhua, ZHOU Yonghua, et al. Big data analysis of Pitaya fruit growing environment based on agricultural Internet of Things[J]. Water Saving Irrigation, 2018(3): 58-62. (in Chinese)

[18] 廖建尚. 基于物联网的温室大棚环境监控系统设计方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 233-243.

LIAO Jianshang. Design of agricultural greenhouse environment monitoring system based on Internet of Things[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 233-243. (in Chinese)

[19] 仇天月, 陈旭, 马超, 等. 基于 Android 智能手机的农业物联网信息采集和发布系统的研究[J]. 上海农业学报, 2014, 30(2): 6-9.

QIU Tianyue, CHEN Xu, MA Chao, et al. An android based on information collection and dissemination system of agricultural Internet of Things[J]. Acta Agriculture Shanghai, 2014, 30(2): 6-9. (in Chinese)

[20] 包志炎, 王学斌, 张海波, 等. 基于物联网和云架构的渠灌闸门智能控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11):222-228.

BAO Zhiyan, WANG Xuebin, ZHANG Haibo, et al. Intelligent control system of canal irrigation sluice based on Internet of Things and cloud architecture[J/OL].Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2017,48(11):222-228.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171127&journal_id=jcsam.DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.027. (in Chinese)

[21] 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222-230.

GE Wenjie, ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and developing strategies of agriculture Internet of Things[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2014, 45(7): 222-230. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140735&journal_id=jcsam.DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.035. (in Chinese)

[22] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1-20.

LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for Internet of Things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2018, 49(1): 1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180101&journal_id=jcsam.DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001. (in Chinese)

[23] 余欣荣. 关于发展农业物联网的几点认识[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(6): 679-685.

YU Xinrong. Perspective on developing agriculture Internet of Things in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(6): 679-685. (in Chinese)

[24] 徐增祥, 金涛, 田洪暄. 农业物联网设备在日光温室中的应用及推广模式[J]. 天津农业科学, 2018, 24(11): 38-41.

XU Zengxiang, JIN Tao, TIAN Hongxuan. Development and application of agriculture IoT equipment in solar greenhouse[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2018, 24(11): 38-41. (in Chinese)

[25] 齐飞, 李恺, 李邵, 等. 世界设施园艺智能化装备发展对中国的启示研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 183-195.

QI Fei, LI Kai, LI Shao, et al. Development of intelligent equipment for protected horticulture in world and enlightenment to China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 183-195. (in Chinese)

- [26] 陈新明, 蔡焕杰, 李红星, 等. 温室大棚内作物蒸发蒸腾量计算[J]. 应用生态学报, 2007,18(2): 317-321.
CHEN Xinming, CAI Huanjie, LI Hongxing, et al. Calculation of crop evapotranspiration in greenhouse[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007,18(2): 317-321. (in Chinese)
- [27] 孙忠富, 杜克明, 郑飞翔, 等. 大数据在智慧农业中研究与应用展望[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 63-71.
SUN Zhongfu, DU Keming, ZHENG Feixiang, et al. Prospect of research and application of big data in smart agriculture[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(6): 63-71. (in Chinese)
- [28] 杜尚丰, 何耀枫, 梁美惠, 等. 物联网温室环境调控系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊 1): 296-301.
DU Shangfeng, HE Yaofeng, LIANG Meihui, et al. Greenhouse environment network control system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2017, 48(Supp1): 296-301. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s045&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.045. (in Chinese)
- [29] 秦琳琳, 陆林箭, 石春, 等. 基于物联网的温室智能监控系统设计[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 261-267.
QIN Linlin, LU Linjian, SHI Chun, et al. Implementation of IoT-based greenhouse intelligent monitoring system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2015, 46(3): 261-267. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150338&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.038. (in Chinese)
- [30] 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(增刊 2): 124-130.
XIE Jiaxing, 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 CSAE, 2015, 31(Supp2): 124-130. (in Chinese)
- [31] 张猛, 房俊龙, 韩雨. 基于 ZigBee 和 Internet 的温室群环境远程监控系统设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(增刊 1): 171-176.
ZHANG Meng, FANG Junlong, HAN Yu. Design on remote monitoring and control system for greenhouse group based on ZigBee and internet[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(Supp1): 171-176. (in Chinese)
- [32] 韩华峰, 杜克明, 孙忠富, 等. 基于 ZigBee 网络的温室环境远程监控系统设计与应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 158-163.
HAN Huafeng, DU Keming, SUN Zhongfu, et al. Design and application of ZigBee based telemonitoring system for greenhouse environment data acquisition[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 158-163. (in Chinese)
- [33] 陈智芳, 宋妮, 王景雷. 节水灌溉管理与决策支持系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 1-6.
CHEN Zhifang, SONG Ni, WANG Jinglei. Water-saving irrigation management and decision support system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp2): 1-6. (in Chinese)
- [34] 吴秋明, 缴锡云, 潘渝, 等. 基于物联网的干旱区智能化微灌系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 118-122.
WU Qiuming, JIAO Xiyun, PAN Yu, et al. Intelligent micro-irrigation system based on Internet of Things in arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 118-122. (in Chinese)
- [35] 杨光. 顶尖高科技让小草莓玩出大“智慧”[J]. 农药市场信息, 2019(7): 64.