

物联网关键技术在设施农业中应用探讨

贾文坤^{1,2,3}, 李孟楠⁴, 李雨⁵, 孟蕾⁵, 卢娜⁵, 韩平^{1,2,3},
潘立刚^{1,2,3}, 王纪华^{1,2,3*}

- (1. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097; 2. 农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 北京 100097; 3. 农产品产地环境监测北京市重点实验室, 北京 100097; 4. 北京信息科技大学, 北京 100192; 5. 三峡大学计算机与信息学院, 宜昌 443002)

摘要: 农业物联网是将大量的传感器节点构成监控网络, 通过各种传感器采集信息, 以便发现问题, 并且准确地确定发生问题的位置, 从而大量使用各种自动化、智能化、远程控制的生产设备。而设施农业是现代化农业的具体体现和标志, 可以获取农业生产高效率与高收益, 因此将农业物联网应用到设施农业中, 将突破以人力为中心、依赖于孤立机械的农业生产模式转向以信息和软件为中心的生产模式。依据物联网架构设施农业物联网分为感知层、传输层和应用层 3 部分, 分别对应信息感知技术、信息传输技术与信息应用技术。本文通过对国内外设施农业物联网技术最新进展的调研和分析, 总结了设施农业物联网在信息感知技术、信息传输技术、信息应用技术以及大数据与设施农业物联网等方面的研究进展, 并针对设施农业物联网技术的发展, 分别从感知层、传输层、应用层等方面问题提出了建设性意见。

关键词: 物联网; 设施农业; 传感器; 人工神经网络; 模糊控制

Application of key internet of thing technologies in facility agriculture

JIA Wen-Shen^{1,2,3}, LI Meng-nan⁴, LI Yu⁵, MENG Lei⁵, LU Na⁵, HAN Ping^{1,2,3},
PAN Li-Gang^{1,2,3}, WANG Ji-Hua^{1,2,3*}

- (1. Department of Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China; 2. Department of Risk Assessment Lab for Agro-products (Beijing), Ministry of China, Beijing 100097, China; 3. Beijing Municipal Key Laboratory of Agriculture Environment Monitoring, Beijing 100097, China; 4. Department of Risk Assessment Lab for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China; 5. College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

ABSTRACT: Agriculture Internet of Things (IoT) refers to using a large number of sensor nodes to constitute a monitoring network and use sensors to collect information so that problems can be found and located accurately. Therefore, agriculture IoT makes extensive use of various automated, intelligent, and remote-control production devices. Facility agriculture is a concrete embodiment and symbol of modern agriculture and can generate high efficiency and high profits for agriculture. Therefore, the application of agriculture IoT into facility agriculture will shift the agricultural production mode centered on manual labor and dependent on isolated machines to one centered on information and software. According to the architecture of IoT, facility agriculture IoT is divided into three parts:

基金项目: 国家 863 计划(2013AA10230202)

Fund: Supported by National Hi-Tech Research and Development Program of China (2013AA10230202)

*通讯作者: 王纪华, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量检测技术与信息技术的交叉、集成。E-mail: wangjh@nrcita.org.cn

*Corresponding author: WANG Ji-Hua, Ph.D, Professor, Department of Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China. E-mail: wangjh@nrcita.org.cn

the perception layer, the transmission layer, and the application layer which corresponds to information perception technology, information transmission technology, and information application technology respectively. Based on the investigation and analysis of the latest developments in Chinese and foreign facility agriculture IoT technologies, this paper summarized the research progress of facility agriculture IoT in information perception technology, information transmission technology, and information application technology, as well as big data and Iot facilities agriculture, etc. Based on the developments in facility agriculture IoT technologies, some constructive suggestions from the aspects of the perception layer, transmission layer, and application layer were put forward.

KEY WORDS: internet of things; facility agriculture; sensors; artificial neural network; fuzzy control

1 引言

设施农业是根据农作物生长所需的最适宜生态条件,在人工和各种设施的干预下进行环境调控,使其生长不受气候条件的影响,从而获取农业生产高效率与高收益,是现代化农业的具体体现和标志^[1]。

农业物联网是通过农业信息感知设备,将农业系统中的农产品与其环境和生产因素与互联网相连接,通过信息之间的交换与通讯,对农业对象和过程进行智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络^[2,3]。设施农业监控系统体系一般有3层。第1层是感知层,感知层要把农业环境参数信息采集上来,是物联网体系结构的核心。第2层是传输层,负责将感知层获取的信息进行传递和处理。第3层是应用层,负责将采集得到的数据按需求进行分类和处理,是实现对农产品的生产监管与智能管理的手段^[4]。设施农业物联网系统应做到对实时农情的监测与管理,智能信息推送以及监测信息可溯源的功能。从而实现设施农业的自动化管理,提高工作效率,降低劳动成本,因此物联网技术在设施农业中有着越来越高的应用价值^[5]。

2 设施农业物联网技术研究进展

2.1 设施农业物联网信息感知技术

设施农业信息感知技术主要包括农业传感技术、无线射频识别(radio frequency identification devices, RFID)技术、条码技术等。其中传感器作为设施农业物联网的前端部件,是设施农业物联网技术的基础^[6]。设施农业中需要检测的环境因素主要有温度、湿度、二氧化碳浓度、光照度、土壤温度和含水量等,每一种环境因素都具有相应传感器对其进行数据检测^[7]。温度传感器普遍采用模拟传感器,其测量误差小且响应速度快,使用简单,适合在温室大棚等设施农业中使用。湿度传感器利用空气中的水蒸气吸附于传感器的感湿材料后,元件的阻抗和介质常数等特性发生很大变化,从而对湿度进行检测。此外,二氧化碳浓度传感器、光照强度传感器等也在设施农业中普遍得到使用^[8]。

光学传感技术作为近年来兴起的一门技术也被运用

在设施农业物联网的信息感知过程。Liu等^[9]应用可见/近红外光谱技术实现了设施农业中农作物叶片乙酰乳酸合成酶、可溶性蛋白、非可溶性蛋白的快速无损检测。Bao等^[10]应用可见/近红外光谱实现了除草剂胁迫下的农作物谷氨酸含量快速检测。也有学者建立了反射光谱与农作物中叶片氮累积量的定量模型^[11]。殷哲等^[12]设计了一种近红外传感器可以快速准确地检测土壤中的含水率。杨亚娜等^[13]利用近红外光谱对土壤中的锌含量进行快速分析并检验了稳定性。

此外,RFID技术是一种可以实现多目标识别的信息感知技术,被广泛应用于农业信息感知过程^[14]。Hamrita等^[15]应用RFID开发了土壤参数检测系统,实现对设施农业内的土壤湿度、温度实时监测,并对作物的生长情况进行了研究。也有学者利用RFID技术设计了设施农业自动识别检测系统,种植者可以通过RFID数据获取有效的数据信息^[16]。范庭芳等^[17]利用有源RFID系统对设施农业大棚中的农作物生长环境因素进行监控,并将各个标签捕获的信息存储并显示。周长明等^[18]则利用RFID电子标签和GPS组成定位模式,对试验田中的采样植株信息进行标定。

2.2 设施农业物联网信息传输技术

设施农业物联网的数据信息传输采用线路传输、无线传输和移动通信技术^[19]。线路传输的技术已经成熟,并在设施农业中得到较多应用,一般应用于规模较小、距离较近的设施农业生产。然而布线多、成本高、规模小是线路传输方式的最大缺点和主要的推广障碍。

物联网信息传输技术应用最为广泛的是无线通讯技术,其中无线传感器网络是一种无中心节点的全分布式系统。通过随机投放的方式,众多传感器节点被密集部署于监控区域。各传感器以无线通信方式,通过分层的网络通信协议和分布式算法,可自组织地快速构建网络系统^[20]。

GPRS和3G数字通讯技术在设施农业领域已经开始应用,具有网络稳定、终端价格低和技术成熟等优势,并且几乎不需要单独架设复杂的硬件设备,可以共享共用通信系统^[21]。赵炜等^[22]结合无线传感器网络自身的特点,对设施农业传感器网络系统进行了整体设计,设计实现了传感

器节点硬件、网络支撑软件、信息决策技术和终端用户监控平台等功能,并在温室中实验验证了系统的有效性。高峰等^[23]为实现判断设施农业中作物水分亏缺程度,采用无线传感器网络技术设计了水分状况监测系统,可以精确获取作物水分亏缺的环境信息,初步试验证明了系统的合理性与实用性。张锋等^[24]设计了无线传感器网络系统对设施农业内的各项环境因素进行采集获取,通过无线传输手段发送给监测终端,使得环境信息可以实现实时汇总与分析。周鹿扬等^[25]基于传感器网络对水产设施农业环境管控系统进行设计,系统功能实现了数据采集,从而便于对水产环境信息数据监控查询,提供了高效精准的生产环境管控方式。

物联网信息传输技术中应用较为广泛的是 ZigBee 技术,这是一种具有统一标准的短距离无线通信技术,具有低功耗、低成本和通用性强等特点,具有很强的自组织、自愈能力和高安全性^[26]。

田敏等^[27]设计了一套基于物联网的设施农业监控系统,将设施农业环境传感器连接到 ZigBee 网络中,监测设施农业内温度、湿度、二氧化碳浓度、光照强度等数据,通过手机 APP 与无线网络构成的系统完成对设施农业环境的监测与控制。李金莹等^[28]通过设施农业与物联网技术、WiFi 与 3G 等通信技术相结合的方式,完成了设施农业系统总体构架设计的温室内部模块、田间管控中心模块、物联网共性平台模块和应用平台模块的功能与器件选型,实现了设施农业自动控制系统的整体功能。Yang 等^[29]通过 ZigBee 无线传感器网络的网络节点采集设施农业的温湿度,通过模糊控制分析采取最优控制模型。仲伟波等^[30]设计并实现了以 STM32W108 为核心芯片的设施农业 ZigBee-WiFi 无线网关,实现了 ZigBee 与 WiFi 网络之间的数据互通,并根据频谱特性,采用信道选择和复用的方式减少了二者之间的信号干扰,拓展了设施农业装备的感知和监控范围。郭亭亭等^[31]利用微控制器和 ZigBee 作为核心器件,搭建喷药车,通过预先铺设轨道并设置预期喷药浓度和喷药间隔时间,实现智能喷药车的智能循迹喷药。

2.3 设施农业物联网信息应用技术

物联网信息应用技术是实现设施农业信息化与智能化的关键。农业物联网的应用上就是将感知输出的各种数据信息,通过数据挖掘和知识发展,建立基于业务逻辑的管理控制策略和模型,最终实现对设施农业生产的具体管理措施^[32]。实质上这就是对数据进行处理,最终实现对设施农业实现智能控制与决策。

常用的智能控制方法有模糊控制理论、人工神经网络和专家控制理论等。模糊控制系统的基本思想是用机器去模拟人对系统的控制。对于用传统控制理论无法进行分析和控制的复杂的和无法建立数学模型的设施农业系统,有经验的操作者或专家却能取得比较好的控制效果,这是因

为他们丰富经验。因此可以将这种经验指导下的行为过程总结成一些规则,并根据这些规则设计出控制器。然后运用模糊理论,模糊语言变量和模糊逻辑推理的知识,把这些模糊的语言上升为数值运算,从而完成对这些规则的具体实现,达到以机器代替人对设施农业环境进行自动控制的目的^[33]。

人工神经网络是人类研究模仿人的大脑神经系统而进行智能化处理信息的一个重要方法,应用于非线性系统的建模与辨识。通过建立模拟人脑的人工神经元来构成简单信息处理单元,再通过互联组成网络,从而接收并处理信息。网络的信息处理由处理单元之间的相互作用来实现,它是通过把问题表达成处理单元之间的连接权值来处理^[34]。

刘淑梅等^[35]为建立日光温室中短期气温预报模型,利用 BP 神经网络建模和曲线拟合的方法,对日光温室 1~7 d 气温预报模型进行了研究,结果表明模型可以较准确的预报室内 1~7 d 的最低气温,并模拟日光温室气温的逐时变化。路静霞等^[36]以采集的植物电信号生理指标,综合时域和频域中的典型特征值,利用极限学习机算法对温室生长的胡椒科草本植物碧玉生长的环境因子建立模型,极限学习机算法的均方根误差小于 0.97,训练效果很好。吴晓强等^[37]基于模糊神经网络设计了温室温度智能控制系统,利用专家经验和知识行为转化为相对应的模糊控制规则,结合神经网络控制理论设计了一套控制系统,仿真结果表明系统响应速度和抗干扰水平可以达到较高的水平。密立鹏等^[38]利用智能控制与 PID 控制相结合的控制方法,对设施农业环境参数监测、数据记录实时控制与一体化,最终实现对设施农业环境的实时监测与自适应控制。

3 物联网在农产品质量安全中的应用

农产品质量安全问题是农业生产者追求的目标,也是消费者所关注的热点。建设农产品质量安全信息平台,实现农产品供应链全过程的安全管理与监控,是目前农业领域发展的重点。在保障农产品质量安全的过程中,物联网技术扮演着十分重要的角色。通过将农产品与农业设施进行物联,并提供农产品生产各环节的实时信息,利用 RFID 技术、无线传感技术等方法对信息进行采集、传输和处理。最终提供农产品质量保障与安全维护,提高了对农产品的监管与可跟踪能力^[39]。

濮永仙^[40]基于物联网技术建立了针对设施农业中作物病害诊断与监测并进行智能生产管理的服务平台。首先,通过在设施农业温室内安装视觉传感器,获取农作物常见病害特征,通过贝叶斯网算法将这些特征进行分析,从而判断出农作物病害类型。之后,移动终端可以通过 3G、GPRS 等通讯网络获取作物病害信息,并可以通过上位机对温室内环境进行控制,采取喷药、补光、通风等操作。从而提供了作物在温室种植期质量安全的保障。金炜等^[41]

基于物联网技术设计了一套温室草莓种植监控与质量安全溯源方案。PC机通过无线网关连接无线中继器实现对温室各传感器的控制,同时通过将PC接入互联网实现对温室的远程监控。在草莓种植期间,通过视频监控的方式记录草莓施肥、灌溉、喷药等情况并将数据采集,结合产后检验与物流信息,上传至云服务器。消费者通过物联网应用标识技术就可以查询到农产品的质量安全信息。罗世亮^[42]以物联网处理技术为载体结合专家系统,通过条形码、摄像头、传感器和电子标签等方式对脐橙病害信息进行感知,并将数据存储至数据库层,通过解释机、推理机以及知识获取等手段进行信息处理,设计人机交互界面将病害信息传递至专家或用户,实现对脐橙病虫害防治的智能化识别、定位、监控和管理。并且根据系统诊断意见进行早期预防,减少虫害发生,消除或者降低农药的使用,提高脐橙的品质和产量。赵国等^[43]基于物联网技术提出了一套蔬菜质量安全专用追溯系统。系统由具有无限数据通讯功能的农药残留检测设备、检测系统监控平台、溯源信息共享及监管平台组成。设施农业内的系统监控平台,将农药残留数据信息传输至蔬菜质量检测中心服务器,同时利用RFID技术将信息传输至数据库模块,模块通过二维条形码使用户掌握蔬菜农药残留信息。最终系统为农产品质量安全保障提供了一个有效的监管与追溯平台。穆亚梅^[44]以物联网技术为载体,结合专家系统软件,采用SQLserve2005数据库进行数据原始积累或结论存储的方式,建立了针对苹果病虫害防治的系统。系统可以进行决策、选择和诊断,并将诊断结果提交给用户,用户再根据需要随时访问病害信息存储站点,从而实现苹果病虫害防治的智能化识别、定位、监控和管理。

4 大数据下的设施农业物联网

随着设施农业的发展,农业物联网传感信息的数量与形式越来越多样化,设施农业的信息处理与应用面对着各种挑战^[45]。正是物联网物—物相连的本质要求,决定了农业物联网的信息量无疑是巨大的^[46]。因此在对信息应用的过程中,需要具备大数据理念来处理分析数据信息。大数据目前没有统一的定义,而是一个基本的概念,其基本特征包括:大量、多样、高速和真实性。泛指数据集的大小超过了一般获取、存储、管理和分析数据的范围,从中分析有用信息可以知道设施农业现代化的发展^[47]。农业种植管理所覆盖区域较广、涉及的领域和内容也较宽泛、影响因素多、决策较困难,其中所涵盖的农业数据十分复杂。同时伴随着上述物联网与智慧农业的快速发展,农业数据更呈现出爆炸性增长的趋势。基于农业种植自身的复杂性和特殊性,农业数据必将从由结构化关系型数据类型,向半结构化和非结构化的数据类型转变,大数据的理论与技术将会不断应用于进一步发展农业现代化与信息化的历程

中去^[48]。

刘勃等^[49]从数据采集、挖掘、应用三个方面入手,分析了大数据和WebGIS与农业的结合应用方式,提出了体系框架和解释。杨余旺等^[50]提出建立了设施农业云系统来解决农业研究问题,并从总体结构、关键技术等方面进行了详细的论述。阎晓军等^[51]构建具有统一入口的分布式信息技术系统,并且通过虚拟化技术为每个接入用户提供统一的数据接入和访问服务,从而建立了北京设施农业物联网云服务平台。

5 总结与展望

近年来,我国农业物联网技术已经得到了充分的进步,但在这一发展过程当中普遍还存在一些问题^[52,53]。

5.1 设施农业物联网感知层问题与讨论

在设施农业物联网感知层,传感器是感知技术的核心。然而目前对设施农业环境监测所需用的成熟的传感器技术还仅仅是温度、湿度、光照强度和土壤强度等,并没有对设施农业生态环境综合信息以及作物的实时信息进行监测。对土壤重金属含量、农药残留等有害物质监测的研究还较少,缺乏对设施农业农情立体、实时、动态的信息感知传感与监测。

此外,在物联网感知过程中使用的RFID技术已被使用广泛,但仍存在一些技术问题。比较典型的是安全问题^[54],RFID系统没有可靠的安全机制,难以对环境数据信息进行很好的保密,标准与成本问题同样是制约RFID技术发展的因素。

5.2 设施农业物联网传输层问题与讨论

在设施农业物联网传输层,各种通讯协议的发展已经较为完备,一些设施农业物联网通讯系统已经具备较高的可靠性、经济性、通用性和扩展性。其中技术发展存在的问题在于随着农业物联网的发展,所感知设施农业状态信息越来越复杂多样,并且需要实时监测。那么这些大量的数据存储是一个不小的问题^[55]。

此外,如何将多类型不同的数据,存在不同的信息来源进行统一整编,并设计一个综合的网络提高信息传送的效率,这都是尚待解决的问题。

5.3 设施农业物联网应用层问题与讨论

在设施农业物联网的应用层,目前普遍的技术应用体现在信息的感知和数据的传输上,终端的智能控制应用环节会较为欠缺。因而设施农业物联网系统普遍出现有感知无决策、有决策无控制的情况,并没有形成感知-决策-控制的应用系统闭环。

此外,缺乏对农业知识模型和应用控制模型的建立,虽然农业物联网汇集了大量的农业数据,但这写农业感知数据并没有得到充分的挖掘利用,导致目前设施农业控制

系统普遍还是单一控制标准, 智能化程度较低。

5.4 物联网在农产品质量安全应用中问题与讨论

在农产品质量安全监管的各个环节与流通过程中, 需要涉及多个部门、多种农作物、多种物联网设备以及多相关领域。因此, 涉及农产品质量安全物联网系统是一件极为庞杂的工作。在物联网感知层, 为了确保农产品质量安全信息的自动化传输, 需要选择合适的物联网设备, 其中较常见运用的是 RFID 标签和读写器。而传输层主要通过互联网对农产品质量安全信息进行传输。最终在应用层实现对农产品质量安全进行管控。

然而物联网在针对农产品质量安全保障与应用中还存在一些亟待解决的问题。首先, 没有完善且明确的使用标准, 物联网的结构尚需得到完善。此外, 物联网应用在农产品质量安全保障中更多的被应用于农产品的追溯过程, 在生产过程中对农产品进行实时监控还并不多见。

从整体来看, 农业物联网缺乏实用技术产品, 产业发展滞后, 一些技术标准体系的设定和建立还不够完善。旨在解决上述问题, 可以给出如下建议。第一, 发展新型传感器敏感材料、机理以及工艺方法。使得便于开发可以反映作物生长状态、营养组分、病变情况、农药残留等生理生化信息传感器与装备。第二, 制定与发展面向复杂农业应用环境的大容量的数据实时通信标准与技术, 并且具备可靠性和自适应能力较高的网络部署与管理。第三, 发展建立农业智能决策模型, 利用大数据的思想, 开展云计算技术与云服务平台的设计, 从而对现有的海量农业环境信息进行信息融合、知识发现与数据挖掘。从而提取有价值的农业环境信息, 便于对设施农业环境进行控制。第四, 面向不同的农业领域建立大型数据库和信号处理算法库, 从而便于对农业信息数据进行处理分析, 以及便于操控智能设施农业控制技术装备, 对设施农业环境进行改善。

设施农业物联网技术作为一种不同学科技术的综合应用, 融合了传感器技术、自动化技术、微电子技术、通讯技术、计算机等各类技术。相信伴随着这些诸多技术的快速发展, 设施农业物联网同样有着明朗的前景与使用价值。在未来数据处理与应用过程中, 物联网将会与大数据概念相融合, 从而便于挖掘更多的设施农业实用环境信息, 促进设施农业向智能化、规模化和产业化发展。

参考文献

- [1] 肖伯祥, 郭新宇, 王传宇, 等. 农业物联网情景感知计算技术应用探讨[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 21-31.
Xiao B, Guo XY, Wang CY, *et al.* Discussion on application of context aware computing technology in agriculture internet of things [J]. J Agric Sci Technol, 2014, 16(5): 21-31.
- [2] 许世卫. 我国农业物联网发展现状及对策[J]. 中国科学院院刊, 2013, 6(2): 686-692.
Xu SW. Current status of agriculture IOT in China [J]. Bull Chin Acad Sci, 2013, 6(2): 686-692.
- [3] 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]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222-232.
Ge WJ, Zhao CJ. State-of-the-art and developing strategies of agriculture internet of things [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2014, 45(7): 222-232.
- [4] 何勇, 聂鹏程, 刘飞, 等. 农业物联网与传感仪器研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 216-227.
He Y, Nie PC, Liu F, *et al.* Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2013, 44(10): 216-227.
- [5] 贾宝红, 钱春阳, 宋治文, 等. 设施蔬菜物联网管理系统的构建及应用[J]. 天津农业科学, 2015, 21(4): 51-53.
Jia BH, Qian CY, Song ZW, *et al.* Application and research direction of the internet of things on facility agriculture [J]. Tianjin Agric Sci, 2015, 21(4): 51-53.
- [6] 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(2): 200-210.
Li J, Guo MR, Gao LL. Application and innovation strategy of agricultural internet of things [J]. Trans CSAE, 2015, 31(2): 200-210.
- [7] 高峰, 卢尚琼, 徐青香, 等. 无线传感器网络在设施农业中的应用进展[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(5): 762-769.
Gao F, Lu SQ, Xu QX, *et al.* Wireless sensor system and its application agriculture [J]. J Zhejiang For Coll, 2010, 27(5): 762-769.
- [8] 白泽生, 刘竹琴. 设施农业环境自动化检测方案的设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(11): 41-44.
Bai ZS, Liu ZQ. Design of automated inspection scheme of facility agricultural environment [J]. Electr Des Eng, 2011, 19(11): 41-44.
- [9] Liu F, Kong WW, Tian T, *et al.* Estimation of acetolactate synthase activity in brassica napus under herbicide stress using near-infrared spectroscopy [J]. Trans ASABE, 2012, 55(4): 1631-1638.
- [10] Bao YD, Kong WW, Liu F, *et al.* Quantitative analysis of total amino acid in barley leaves under herbicide stress using spectroscopic technology and chemo metrics [J]. Sensors, 2012, 12(10): 13393-13401.
- [11] Shao YN, Zhao CJ, Bao YD, *et al.* Quantification of nitrogen status in rice by least squares support vector machines and reflectance spectroscopy [J]. Food Bio Technol, 2012, 5(1): 100-107.
- [12] 殷哲, 雷廷武, 董月群, 等. 近红外土壤含水率传感器设计与实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 73-79.
Yin Z, Lei TW, Dong YQ, *et al.* Design and experiment of near infrared sensor for soil moisture measurement [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2013, 44(7): 73-79.
- [13] 杨亚娜, 潘涛, 李妙敏, 等. 近红外光谱用于土壤锌的快速分析及其稳定性[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(4): 150-154.
Yang YN, Pan T, Li MM, *et al.* Near-infrared spectroscopy applied to rapid analysis of zinc in soil and its stability [J]. Sci Technol Eng, 2014, 14(4): 150-154.
- [14] 李明学, 黄立平. RFID 在农业中的引用[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(20): 6333-6334.
Li MX, Huang LP. Application research of RFID in agriculture [J]. J Anhui Agric Sci, 2007, 35(20): 6333-6334.
- [15] Hamrita TK, Hoffacker EC. Development of a smart wireless soil monitoring sensor prototype using RFID technology [J]. Appl Eng Agric, 2005, 21(1): 139-143.

- [16] Nanseki T, Sugahara K, Fukatsu T. Farming operation automatic recognition system with RFID [J]. *Agric Inf Res*, 2007, 16(3): 132-140.
- [17] 范庭芳, 钱松荣. 一种应用于设施农业的有源 RFID 系统设计[J]. *微型电脑应用*, 2012, 28(4): 53-56.
Fan TF, Qian SR. An active RFID system design applying to the facility agriculture [J]. *Microcomputer Appl*, 2012, 28(4): 53-56.
- [18] 周长明, 刘鹏. 农业试验田数据采集系统开发[J]. *计算机应用于技术*, 2013, 39(10): 124-127.
Zhou CM, Liu P. Development of an agriculture experimental field-data acquisition system [J]. *Computer Technol Appl*, 2013, 39(10): 124-127.
- [19] 李作伟, 丁捷, 毛彭军, 等. 设施农业物联网关键技术及工程化应用探讨[J]. *农业工程*, 2012, 2(2): 35-40.
Li ZW, Ding J, Mao PJ *et al.* Study on key technology and engineering application of facility agriculture internet of things [J]. *Agric Eng*, 2012, 2(2): 35-40.
- [20] 姚亮, 马俊贵. 设施农业智能化控制研究现状及展望[J]. *农业工程*, 2015, 5(1): 20-22.
Yao L, MA JG. Research status and prospect of facilities agricultural intelligent control [J]. *Agric Eng*, 2015, 5(1): 20-22.
- [21] 李琳. SIM 卡在物联网环境下应用的新思考[J]. *电信技术*, 2010, (1): 19-21.
Li L. SIM card under the environment of Internet of things applications of new thinking [J]. *Telecommun Technol*, 2010, (1): 19-21.
- [22] 赵炜, 唐振民, 曹宏鑫, 等. 设施农业无线传感器网络系统设计与实现[J]. *中国农机化*, 2012, (6): 126-130.
Zhao W, Tang ZM, CAO HX, *et al.* Design and implementation of wireless sensor networks system in facility agriculture [J]. *Chin Agric Mech*, 2012, (6): 126-130.
- [23] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 基于无线传感器网络的作物水分状况监测系统研究与设计[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 107-112.
Gao F, Yu L, Zhang WN, *et al.* Research and design of crop water status monitoring system based on wireless sensor networks [J]. *Trans CSAE*, 2009, 25(2): 107-112.
- [24] 张峰, 黄树州, 林继良. 基于物联网技术的设施农业在线监控系统[J]. *物联网技术*, 2014, 578(02): 34-38.
Zhang F, Huang SZ, Lin JL. Facility agriculture based on the technology of Internet of things online monitoring system [J]. *IOT Technol*, 2014, 578(02): 34-38.
- [25] 周鹿扬, 程文杰, 徐建鹏, 等. 基于物联网的设施农业环境管控系统设计与应用[J]. *农业灾害研究*, 2015, 5(11): 55-56, 58.
Zhou LY, Cheng WJ, Xu JP, *et al.* Design and Application of facility agriculture environment management and control system based on internet of things [J]. *J Agric Cata*, 2015, 5(11): 55-56, 58.
- [26] Chen J, Hu T, Wu JH, *et al.* Application of internet things in facility agriculture [J]. *App Mech Matr*, 2014, (685): 517-523.
- [27] 田敏, 费小伟, 赵帝植. 基于物联网的设施农业监控系统研究[J]. *无线互联科技*, 2016, (6): 28-31.
Tian Min, Fei XW, Zhao DZ. Facility agriculture monitoring system based on Internet of things [J]. *Wireless Int Technol*, 2016, (6): 28-31.
- [28] 李金莹, 张日升, 杨宏业. 基于物联网技术的设施农业自动控制系统[J]. *电子设计工程*, 2014, 22(21): 97-101.
Li JY, Zhang RS, Yang HY. Networking technology based automatic control system of agricultural facilities [J]. *Electr Des Eng*, 2014, 22(21): 97-101.
- [29] Yang MT, Chen CC, Kuo YL. Implementation of intelligent air conditioner for fine agriculture [J]. *Energy Build*, 2013, (60): 364-371.
- [30] 钟伟波, 李忠梅, 石婕, 等. 一种用于设施农业的 ZigBee-WiFi 网关研制[J]. *计算机科学*, 2014 41(6): 34-38.
Zhong WB, Li, ZM, Shi J, *et al.* Design and implementation of Zigbee-WiFi for facility agriculture [J]. *Computer Sci*, 2014 41(6): 34-38.
- [31] 郭亭亭, 杨然兵, 尚书旗. 基于 MSP430 和 ZigBee 的智能喷药系统的研发[J]. *农机化研究*, 2014, (2): 201-204.
Guo TT, Yang RB, Shang SQ. Development of intelligent spraying system based on MSP430 and Zigbee [J]. *J Agric Mech Res*, 2014 (2): 201-204.
- [32] 秦怀斌, 李道亮, 郭理. 农业物联网的发展及关键技术应用进展[J]. *农机化研究*, 2014, (4): 246-249.
Qin HB, Li DL, Guo L. Recent advances in development and key technologies of internet of things in agriculture [J]. *J Agric Mech Res*, 2014, (4): 246-249.
- [33] 韩力群. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
Han LQ. Intelligent control theory and application [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [34] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
Xu LN. Neural network control [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009.
- [35] 刘淑梅, 薛庆禹, 黎贞发. 基于 BP 神经网络的日光温室气温预报模型[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(1): 176-184.
Liu SM, Xue QY, Li ZF. An air temperature predict model based on BP neural networks for solar greenhouse in North China [J]. *J Chin Agric Univ*, 2015, 20(1): 176-184.
- [36] 路静霞, 于海明, 陈士进, 等. 基于植物电信号的环境因子预测模型[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 229-234.
Lu JX, Yu HM, Chen SJ, *et al.* Environment factor prediction models based on plant electrical signals [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2013, 44(11): 229-234.
- [37] 吴晓强, 黄云战, 赵永杰. 基于模糊神经网络的温室温湿度智能控制系统研究[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(4): 63-66.
Wu XQ, Huang YZ, Zhao YJ. Research on control system of greenhouse temperature and humidity based on fuzzy neural network [J]. *J Chin Agric Mech*, 2016, 37(4): 63-66.
- [38] 密立鹏, 宋建成, 王天水. 设施农业温室大棚网络型自适应控制系统的开发[J]. *农机化研究*, 2014, (7): 125-130.
Mi LP, Song JC, Wang TS, *et al.* Development of adaptive control system based on ethernet network in facilities agricultural greenhouse [J]. *J Agric Mech Res*, 2014, (7): 125-130.
- [39] 张丽, 余华, 马新明. 基于物联网的农产品质量安全信息系统平台[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40: 216-225.
Zhang L, Yu H, Ma XM. The agricultural product quality safety information system based on Internet of things platform [J]. *Chin Sci: Inf Sci*, 2010, 40: 216-225.
- [40] 濮永仙. 基于物联网的大棚作物生产智能管理系统研究[J]. *智能计算机与应用*, 2015, 5(6): 103-108.
Pu YX. The research on intelligent management of greenhouse system based on IOT technology in crop productin [J]. *Intell Comp Appl*, 2015, 5(6): 103-108.
- [41] 金炜, 顾玉琦, 陈浩. 基于物联网的农产品种植监控与质量安全溯源

- [J]. 安徽农业科学, 2014, 42(30): 10788-10790.
- Jin W, Gu YQ, Chen H. Agricultural products planting monitoring and quality based on the internet of things [J]. J Anhui Agric, 2014, 42(30): 10788-10790.
- [42] 罗世亮, 任斌. 基于物联网的脐橙园病虫害防治专家系统[J]. 北京联合大学学报, 2016, 30(2): 56-59.
- Luo SL, Ren B. The expert system design of the pest control in the navel orange orchard based on the internet of things [J]. J Beijing Union Univ, 2016, 30(2): 56-59.
- [43] 赵国, 孙霞, 王相友. 基于物联网技术和生物传感器技术的蔬菜质量安全溯源系统研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(3): 747-756.
- Zhao G, Sun X, Wang XY. Research on vegetable quality safety traceability system based on internet of things and biosensor [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(3): 747-756.
- [44] 穆亚梅. 基于物联网的苹果树病虫害防治专家系统设计与应用可行性研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2014, (1): 30-33.
- Mu YM. The apple tree pest management expert system design based on Internet of things and application feasibility study [J]. Autom Instr, 2014, (1): 30-33.
- [45] 李秀峰, 陈守合, 郭雷风. 大数据时代农业信息服务的技术创新[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(4): 10-15.
- Li XF, Chen SH, Guo LF. Technological innovation of agricultural information service in the age of big data [J]. J Agric Sci Tech, 2014, 16(4): 10-15.
- [46] 张浩然, 李中良, 邹腾飞, 等. 农业大数据综述[J]. 计算机科学, 2014, 41(11): 387-393.
- Zhang HR, Li ZL, Zou TF, et al. Overview of agriculture big data research [J]. Computer Sci, 2014, 41(11): 387-393.
- [47] 李学龙, 龚海刚. 大数据系统综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(1): 1-44.
- Li XL, Gong HG. A survey on big data system [J]. Chin Sci: Inform Sci, 2015, 45(1): 1-44.
- [48] 孟祥宝, 谢秋波, 刘海峰, 等. 农业大数据应用体系架构和平台建设[J]. 广东农业科学, 2014, 14: 173-179.
- Meng XB, Xie QB, Liu HF, et al. Architecture and platform construction of big data application in agriculture [J]. J Guangdong Agric Sci, 2014, 14: 173-179.
- [49] 刘勃, 毛克彪, 马莹, 等. 农业大数据浅析及 WebGIS 结合应用[J]. 遥感信息, 2016, 31(1): 124-129.
- Liu Q, Mao KB, Ma Y, et al. Analysis on agricultural big data and its application combined with Web GIS [J]. Remote Sensing Inf, 2016, 31(1): 124-129.
- [50] 杨余旺, 陈超. 探讨基于云计算的设施农业云系统设计[J]. 农业网络信息, 2011, 12: 5-8.
- Yang YW, Chen C. Design of a facility agriculture cloud system based on cloud computing [J]. Agric Network Inf, 2011, 12: 5-8.
- [51] 阎晓军, 王维瑞, 梁建平, 等. 北京市设施农业物联网应用模式构建[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 149-155.
- Yan XJ, Wang WR, Liang JP, et al. Application mode construction of internet of things for facility agriculture in Beijing [J]. Trans CSAE, 2012, 28(4): 149-155.
- [52] 周明. 物联网应用若干关键问题的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- Zhou M. Research on several key issues in internet of things applications [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [53] 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, 6(1): 679-685.
- Yu XR. Perspectives on developing agriculture internet of things in China [J]. Bull Chin Acad Sci, 2013, 6(1): 679-685.
- [54] 杨光, 耿贵宁, 都婧, 等. 物联网安全威胁与措施[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(10): 1335-1340.
- Yang G, Geng G, Du J, et al. Security threats and measures for the internet of things [J]. J Tsinghua Univ (Sci Tech), 2011, 51(10): 1335-1340.
- [55] 李春辉. 大数据在农业物联网中的应用研究[D]. 齐齐哈尔: 齐齐哈尔大学, 2015.
- Li CH. Research on the application of big data in agricultural internet of things [D]. Qiqihar: Qiqihar University, 2015.

(责任编辑: 白洪健)

作者简介



贾文坤, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品安全信息化关键技术研究与农业智能仪器设计研发。

E-mail: jiawenshen@163.com



王纪华, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量检测技术与信息技术的交叉、集成。

E-mail: wangjh@nercita.org.cn