

宋永嘉,刘 宾,魏暄云,等. 大数据时代无线传感技术在精准农业中的应用进展[J]. 江苏农业科学,2021,49(8):31-37.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.08.005

大数据时代无线传感技术在精准农业中的应用进展

宋永嘉¹, 刘 宾¹, 魏暄云¹, 巴 超², 衡家然³

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南郑州 450046; 2. 河南华北水利水电勘察设计有限公司, 河南郑州 450045;
3. 河南省岩石矿物测试中心, 河南郑州 450012)

摘要:精准农业是 21 世纪农业现代化的重要标志,对于推动我国农业发展与农村建设具有重要战略价值。近年来,随着大数据的全球风靡与不断创新,结合大数据技术的无线传感网络展现出广阔的应用前景,首先就大数据基本内涵、研究进展与行业发展趋势进行了分析,论述精准农业的概念、技术体系及其实施流程;随后总结并概括无线传感技术框架的物理组件、节点类型和技术特征,重点评述无线传感技术在精准农业领域的研究概况;最后系统分析了大数据时代下无线传感技术在精准农业方面的应用案例,并对未来行业发展趋势进行简要展望。本研究立足于大数据背景下,对于提升、丰富我国精准农业相关数据获取的技术方法具有一定参考价值。

关键词:精准农业;无线传感技术;大数据;物联网

中图分类号:S126 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)08-0031-07

人类社会的农业发展历史大致经历了如下发展阶段:以人力和牲畜为动力的原始农业 1.0 时代,以机械动力为代表的传统工业化农业 2.0 时代,多类型自动控制装备为主的新型自动化工业 3.0 时代,新型工业化农业 3.0 时代,以物联网、云存储以及大数据为代表的新兴智能化农业 4.0 时代^[1]。党的十九大报告指出:“实施乡村振兴战略,要坚持农业农村优先发展,按照产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕的总要求,建立健全城乡融合发展体制机制和政策体系,加快推进农业农村现代化”,这标志着以高产、优质、生态、智能为发展目标的农业 4.0 时代正式来临。截至 2019 年底,我国农作物耕种收综合机械化率突破 70%,小麦、水稻、玉米三大主产粮食作物生产基本实现机械化,目前我国农业整体水平基本处于 3.0 时代初期,产业化、信息化以及可持续化是我国农业迈入 4.0 时代的基本内涵与核心理念。如何深入推进我国农业现代化发展进程,助力于当前乡村经济建设与农民生活

水平提升,是长期以来从事农村区域发展相关研究以及社会普遍关注的热点议题之一^[2-4]。

精准农业(precision agriculture,简称 PA)、精细化作物管理(precision crop management,简称 PCM),出现于 20 世纪 70 年代后期,以遥感监测技术和微电子自动控制技术为技术优势的农业机械机电一体化设备、农业环境自动化监控设备以及田面地理信息智能捕获设备等一系列数字化装置为农作物的精细化管理提供了可能,从而为进一步推动农业现代化发展水平、缓解日益趋紧的资源与环境约束指明了全新的路径选择^[5]。近年来,精准农业在农田信息获取方面取得一系列显著进展,特别是基于遥感定位监测^[6]、无人机低空摄影、农业物联网、远程无线传感以及多源数据挖掘整合等一系列新兴信息化技术的运用与融合,为精准农业模式的大面积、跨地域的规模化推广实施创造了有利条件。被称为科学研究的第四范式,即基于大数据技术下的密集型计算研究模式,实现了人类社会从经验研究模式、理论研究模式到模拟研究模式的突破,成为 21 世纪科技创新与产业发展的显著标志^[7]。它由于具有海量数据集合性能(volume)、超高速的数据传输能力(velocity)、数据类型多样性形式(variety)以及数据所带来的巨大价值(value),即“4V”特征,为各行业数据获取、综合应用与决策支持提供了重要保障。尽管目前国内外关于精准农业领域的相关研究已经取得一系列重要进展,但是

收稿日期:2020-10-09

基金项目:河南省高校科技创新团队支持计划(编号:19IRTSTHN030)。

作者简介:宋永嘉(1968—),女,河北冀州人,教授,主要从事水利工程、水力学及河流动力学研究。E-mail: songyongjia@ncwu.edu.cn。

通信作者:刘 宾,硕士研究生,主要从事水利工程研究。E-mail: liubindwy@163.com。

对于大数据技术的应用方面尚处于起步阶段,相关文献也较少。因此,探讨大数据时代下新兴数据获取技术,特别是无线传感器在精准农业领域的研究概况、应用现状以及未来前景,对于促进我国精准农业基础研究和应用推广具有重要价值。

1 大数据时代下精准农业技术框架

1.1 大数据基本内涵与行业发展

1.1.1 大数据的概念及研究进展 自 21 世纪以来,随着资讯类型与规模剧增,数据以前所未有的速度与数量加速积累,人类社会正式进入大数据时代。以试验数据分析为中心的传统学科(诸如基因组学、信息科学、天体物理学以及环境监测科学等),其数据来源与渠道呈现出多元化,催生了有效整合与深度挖掘多源海量数据的现实需求;与此同时,谷歌、脸书、百度、阿里巴巴等全球知名互联网行业巨头所运营与处理的客户信息逐渐增加,已经相继突破 TB 级别,达到了 PB,甚至 EB 数量级规模。大数据的定义为利用常用软件工具获取、管理和处理数据所耗时间超过可容忍时间的数据集,其结果必须借助计算机对其进行统计、比对与解析。大数据的兴起与应用引起了学术界的高度重视,2008 年《Nature》出版发行了《Big Data》专刊,重点探讨大数据对于经济学、超级计算与数据处理技术等领域带来的机遇与挑战;2011 年《Science》也推出《Dealing with Data》专栏,就大数据理论研究过程中存在的一系列重大争议性议题进行了探讨,指出了大数据对未来科学研究与大众生活的重要应用价值^[8]。2012 年,欧洲信息学与数学研究协会会刊《ERCIM News》出版专刊《Big Data》,探讨大数据时代下密集型数据管理以及数据获取技术等重大问题,并介绍了欧洲科研机构所取得的最新进展^[9]。在此背景下,2012 年 6 月由中国计算机学会青年计算机科技论坛组织举办的以“大数据时代,智谋未来”为主题的学术研讨会,就国内外大数据挖掘处理、技术体系构建、平台开发与现实应用案例最新进展进行了系统讨论,为我国大数据领域后续研究奠定了良好基础。

1.1.2 大数据技术行业发展与应用 在应用方面,大数据相关技术与平台建设也取得了重要突破。2011 年麦肯锡公司发布了题为《Big data: the next frontier for innovation, competition and productivity》的评估报告,全面分析大数据对当前全人类生活习

惯、工作方式以及技术研究领域所产生的深远影响。2012 年 1 月召开的世界达沃斯经济论坛上更是将大数据作为其中的重要议题,并发布了《Big data, big impact: new possibilities for international development》的特别报告,将个人移动数据的融合利用与隐私保护提上议事日程。2012 年 3 月,美国奥巴马联邦政府正式提出大数据研究与发展计划,旨在运用大数据思维与技术解决方案解决全球环境、生物医学等领域重大问题。2013 年 5 月联合国框架下的 Global Pulse 项目正式发布名为《Big data for development: challenges and opportunities》的全球性发展评估报告,指出大数据时代下各国在海量数据获取与处理方面所面临的重大机遇与新的挑战。中国也在 2016 年底推出《大数据产业发展规划(2016—2020 年)》,以期建立技术产品先进可控、应用能力显著增强、生态体系繁荣发展、数据安全保障有力的总体目标^[10]。

1.2 精准农业技术体系概述

1.2.1 精准农业技术体系总体框架 由于精准农业具有跨学科、集成化和以应用为基本导向的典型特征,目前研究学界对其概念尚未形成统一共识,Zhang 等认为,所谓精准农业的基本内涵是指基于各类作物与生长环境的时空差异性,运用各种信息化技术要素、装备平台等获取农田单位信息,并由此利用变量控制策略实现农作物整个生产环节的精细化管理^[5]。杨晓北认为,精准农业是以 3S 技术(遥感、全球定位系统、地理信息系统)为技术支撑,合理、高效利用农业资源,提高作物产量和品质,降低生产经营成本,以改善农村生态环境和实现农业可持续发展为最终目的,最终完成双高一优(高产、高效、优质)的现代农业目标的技术体系与发展模式^[11]。由此可推测,在精准农业技术框架下,农业经营者依据地块土壤、气候、水肥、病害以及作物产量等差异性,进行综合化、集中式育苗、耕种、施肥、灌溉以及收割等全流程信息化管理调控,以期以较低的投入获取经济、社会与环境等各类效益的最大化,同时兼顾当地环境承载容量与资源禀赋的差异^[12]。

1.2.2 实施精准农业技术基本流程 精准农业的实施流程主要包括禀赋差异评估、生产过程管控以及综合效益预测 3 个主要步骤^[13]。国内相关学者则进一步将精准农业的工作主体步骤划分为农田信息获取、信息管理分析与决策制定及实施等部分^[5,14],奠定了精准农业的行业发展方向与实际应用场景。因此,本

研究主要参照上述步骤进行简要论述。

1.2.2.1 农田信息获取 作为实施精准农业的根本前提,基本农田信息对于农作物长势状况与最终产量具有决定性影响,高密度、高分辨率、快速且成本低廉的信息获取技术方案对于精准农业的应用推广具有重要意义^[15]。由于农田信息来源与类型的复杂性与多样性,目前从技术层面已经具有一定的应用推广的农田信息获取技术主要针对于农田土壤、作物、微气象、病虫害以及极端灾害等方面,而主流获取方法则包括常规田野调查、基于全球定位系统(GPS)定位定期监测、遥感及无人机多源影像监测以及无线传感器自动监测等。(1)常规田野调查,通常采用网格格式全面采样调查,侧重对土壤信息进行化验测试与分析,按照精准农业的要求,一般采取 100 m × 100 m 设置一个采样点^[16],该方法要耗费大量人力、物力,通常作为某一地块的基底性评估。(2)GPS 定位定期监测,通过 GPS 对采样点进行地理位置定位,并将其导入地理信息系统(GIS),可实现对整个农田地块空间矢量化、插值化、可视化等处理,为农田信息的科学管理与制定耕作计划提供重要参考,目前关于这一方面已经具备较为成熟的技术,相关文献资料已经大量见于报端^[17-19]。(3)遥感及其无人机等多源影像监测,主要通过遥感、无人机、三维激光扫描等各类摄影成像技术,获取较大范围内农田基础信息资料,弥补常规人为采样调查及 GPS 定位定期监测的不足,同时引入无人机与三维激光扫描等高精度且具有较强即时性的遥感成像技术,给精准农业的决策服务提供了更为准确与有力的技术支撑^[20-21]。(4)无线传感器自动监测,集传感器、微处理器以及无线通信为一体的远程自动监测方法,可大幅降低精准农业实施过程中的人力、物力消耗,已经成为农业信息化、智能化研究领域的热点之一。

1.2.2.2 信息管理与分析 将各类农田基本信息收集获取完成后,需要对其进行系统处理、分类、运算与分析,针对精准农业实施过程中所涉及的农田信息的复杂性、多源性以及可操作性,常规的信息管理与分析方法主要借助 GIS 系统,通过其强大的地理位置定位、空间插值以及地统计等分析方法,实现对农田信息管理的可视化、动态化以及风险预警等多重功能^[17-19,22]。目前,随着大数据技术的不断进步,基于遗传算法^[23]、神经网络^[24]、模糊运算^[25]、系统动力学模型^[26]以及计算机视觉和人工

智能语言^[27]等方法的应用,极大地拓展了精准农业实施过程中信息深度挖掘与处理能力。

1.2.2.3 决策制定及实施 综合不同来源、途径所获取的精准农业的相关数据与资料,在完成系统的信息处理分析之后制定的农业发展决策是执行精准农业的核心环节,对整个精准农业既定目标与农业现代发展进程具有决定性作用。目前,在决策制定与具体实施过程中相关学者、工程技术人员不断总结,并借鉴其他行业相关技术,土壤营养反演模型^[28]、作物生产模拟模型^[29]、专家评估模型^[30]及综合决策树模型等方法相继出现,对精准农业的决策制定具有重要的促进作用。然而,由于农业系统自身的时空异质性,特别是土壤肥力在其剖面垂直和水平的差异性以及降水、降雪等不同气象因子的极端不规律性都将为精准农业在实施过程中造成严重的干扰,因此,研发设计、不断积累创新基于无线传感网络技术对于提升精准农业信息化、智能化与集成化水平具有重要的现实意义。

2 无线传感网络技术特征及其研究概况

2.1 无线传感网络技术体系

2.1.1 无线传感器关键节点与类型 无线传感器技术是指基于无线传感器网络和射频识别而逐渐发展起来的无线近、中程信息传输技术,原为出于识别目的而开发的射频识别(RFID)设备,逐渐发展成为一系列具有信息交换能力的 RFID 传感器设备。与 RFID 相比,无线传感器网络(WSN)允许存在不同网络拓扑和多跳通信协议,因而被美国 Bloomberg《Businessweek》杂志在 1999 年评为 21 世纪最有影响改变世界的十大技术之一。目前,市面上主流的传感器设备多由其控制节点组成,这些节点在路由协议与介质访问控制(MAC)协议共同控制下创建无线专用网络,完成对诸如土壤-作物系统温度、湿度以及其他气象因子等基本信息的自动采集与传输至服务器。换句话说,控制节点是无线传感器的基本物理单元,按照其分工性能划分,可将其称为传感器节点(sener node,简称 SeN)、汇聚节点(sink node,简称 SiN)和网关节点(gateway node,简称 GwN)3 个类型。其中,传感器节点主要对土壤、微气象、微生物活动、作物生长状态等基本参数进行采集、初步处理,并且完成对其融合、归类与路由传输,最终将上述多类数据信息发送至汇聚节点;汇聚节点的核心功能是将由传感器节点获取

的信息数据进行汇编处理后,发送至服务器的网关节点,相当于整个无线传感网络的传输中转站;而网关节点则作为面向用户操作的控制终端,对数据进行存储、动态展示以及辅助决策系统构建。从物理部件来看,上述节点主要由传感器模块、微处理器模块、能源供给模块以及无线通信模块构成。其中传感器模块的主要功能在于为不同传感器节点提供可扩展接口;微处理器模块则用于处理各传感器节点的协调,并完成部分通信协议;能源供给模块是为传感器不同节点提供电源的能源中枢;无线通信模块则用于创建传感器节点之间的无线通信协议,承接并转译由传感器所采集的各类信息数据。

2.1.2 无线传感器网络的技术特征

2.1.2.1 具备多跳路由通信协议 无线传感器的通信原理是建立在各核心物理组件以及不同类型控制节点的基础之上,具有建立多跳路由通信协议的能力,没有采用传统控制器局域网(control area network, CAN)的专用通信网络。各控制节点通过能源供给模块提供稳定的能源保障,进而大幅改善了无线传感器自动控制与数据采集的工作效率与整体精度,为大规模的农业环境应用推广奠定了基础。

2.1.2.2 具有动态网络拓扑关系 在日常工作情景下,不同功能的控制节点需要就工作任务的变化而不断调整、加入或退出个别节点,具备动态网络拓扑关系的无线传感器可以根据上述改变进行无人监控下准确预测与分析,进而提升了无线传感网络的自动化信息处理能力。

2.1.2.3 自组织与无中心特性 由于无线传感器具有多跳路由与动态网络拓扑的技术优势,各控制节点通过分布式逻辑算法协调工作环境下各自的通信网络,彼此具有相对平等的关系,具备强大的自组织与无中心特性,因而无需人为干预,可实现快速、自动组网,即表现出较强的抗毁性与健壮性。

2.1.2.4 低成本、低价格与低能耗 对面向大范围精准农业作业环境而言,低成本、低价格和低能耗使无线传感技术在众多的新型信息技术之中脱颖而出,表现出巨大的技术优势与应用潜力。目前的传感器大多基于 ZigBee(紫蜂)技术研发制成,技术上已经日臻成熟,价格已经大幅下挫,而核心组件的控制节点多采用电池供电,能耗上也急剧降低,为农业环境领域提供了道路。

2.2 无线传感技术研究概况

2.2.1 无线传感器在国外研究现状 早在 2003

年,美国国家 8 科学基金委员会(national science foundation, 简称 NSF)首次全面制定无线传感技术研究规划,重点研究方向包括传感器网络特征、通信协议、数据查询以及安全保障等议题;在此推动下,美国加州大学伯克利分校、加州大学洛杉矶分校、加州理工学院、麻省理工学院等知名学府与研究机构开创了传感器技术基础理论和核心技术的研究先河,随后英国、日本、中国、德国等国家相继成立或拓展相应研究组织,促进了无线传感技术从核心理论到应用研究的发展步伐。鉴于目前无线传感技术已经被广泛应用于遥感、环境、地质及其生物监测方面,本文侧重于对其在农业,尤其是精准农业领域的研究进展进行论述,以期探究基于无线传感技术下实现精准农业的高产、高效、优质的实施路径。新西兰运用传感器网络监测当地葡萄园发生霜冻的潜在风险,并基于其数据制订相应的果园防护策略。澳大利亚在农场灌溉、施肥与牧群活动方面进行无线传感器监测,为牧区精准管理提供了较为成功的应用案例。就精准农业方面,特别是土壤系统监测、微气象动态监控、作物日常生长特征以及结合无人机低空摄影等方面,无线传感技术也取得了丰硕研究成果,一系列综述报告、专业论文^[31]相继正式发表,为精准农业进入传感大数据时代奠定了坚实基础。近 5 年来,在大数据技术的引领下,无线传感器网络与物联网技术^[32]、机器学习技术^[33]、智能便携式设备^[34]的不断融合创新,为无线传感技术在精准农业的应用指明了新的方向。

2.2.2 无线传感器在国内研究现状 从国内无线传感技术的研究脉络来看,我国在该领域的发展进度与国外研究基本保持同步。早在 1999 年由中国科学院组织发布的《知识创新工程试点领域方向研究》中首次将无线传感网络技术及其应用提升至国家科技发展战略高度,将无线传感器网络列为“五大重点研究项目”,为我国无线传感技术研究领域开启了良好的开端^[35]。自 2002 年起,相关研究机构与高校,诸如中国科学院电子所、自动化所、软件所及清华大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学等在无线传感器基础研究与多场景应用等方面取得一系列进展。2004 年,“面向传感器网络的分布自治系统关键技术及协调控制理论”被评为中国国家自然科学基金重点项目,标志着我国无线传感器网络研究迈入实质性发展阶段;2006 年,国家自然科学基金将水下移动传感器网络技术研发也列为重点研

究项目,对于我国无线传感技术体系构建做出了重要贡献^[36]。同年期间,国务院制定并颁布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,将传感器网络及智能信息处理列为重点领域下的优先主题,凸显了无线传感技术的重要战略意义。2008 年 9 月 11 日,代表我国无线传感技术研究与应用领域最高水准的传感器网络标准工作组正式成立,预示着我国深入参与该行业国际标准活动,为全球无线传感技术的全面发展奠定坚实的技术基础。在具体研究方面,国内学者已初步完成对农业环境下土壤湿度、温度、pH 值、含水率、密度、有机质等基础参数的实时动态监测^[37-40],在作物需水指标的检测方面也取得阶段性进展^[41]。

3 大数据下无线传感技术在精准农业的应用

3.1 旱区农业灌溉精细化管理

众所周知,制约旱区、半干旱区农业发展的关键因子为水分供给,因而在不同种植模式、作物类型下的灌溉耗水的动态监测及全周期测算分析对于确保旱区农业增产增收具有举足轻重的现实意义。Kim 等通过自行设计的可变速灌溉设施,结合无线传感器网络组件和实时动态监测软件,研发出一套可根据土壤湿度变化而自动感测与实时控制的智能灌溉系统^[42]。Harun 等基于物联网技术(IoT),初步搭建精准农业灌溉系统,通过硬件组件、网络架构以及软件过程实现对其精密控制与信息收集,并且在反馈回路中分析和监控来自传感器数据,结合预先计算结果激活控制程序设备阈值^[43]。Sadiq 等设计由传感器和微控制器为物理核心组件,运用 RFID 模块收集、传输传感器数据,并将其通过 Arduino Nano 和继电器与控制单元相衔接,农户基于上述自动化灌溉控制系统可设定特定作物所需要的水位,提供可承受的低成本、低功耗旱区灌溉解决方案^[44]。高军等将 ZigBee 技术的无线传感网络与 GPRS(通用分组无线服务)空间信息处理系统相结合组建节水灌溉系统,采用 CC2530 为无线节点,以单片机为控制核心、无线路由节点、无线网关、监控中心为核心物理基础,实施对土壤墒情和作物用水状况精准管理^[45]。闻珍霞等研发设计一套精准滴灌智能控制系统,该系统依据作物生长需求状态,实施定量定点、精准施肥与实时滴灌等一系列自动控制管理,从而实现精准农业对于增产增效、节水节肥和保护生态环境的战略考量^[46]。

3.2 农业综合环境自动化监测

传统农业生产活动容易受气象、水肥、病虫害、地质灾害以及市场波动等诸多因素的影响^[47]。因此,开发并研制适应于农业场景的自动监测系统具有广泛的应用前景,国内外相关研究领域针对上述问题开展了大量应用研究与实践探索。Abd El-Kader 等基于 APTEEN(能量有效的阈值敏感路由协议)对埃及精准农业实施过程无线传感网络的应用进行了系统回溯与整理,在马铃薯种植的适应性、施肥规划、病虫害防治以及精准灌溉管理等方面,取得丰富的实践经验^[48]。Srbnovska 等将 RTK-GPS(载波相位差分技术-全球定位系统)、电导率测试仪、WATERMARK(水印)无线传感器集成构成农业环境自动监测平台,研制并测试土壤温度自动测试状况,结果表明,传感器在精度具有较高水平($R^2 = 0.85$)^[49]。Feng 等对窄带物联网(NB-IoT)、远程专用网(LoRa-CNN)以及 ZigBee 无线通信技术的 3 款无线传感网络设备在精准农业的应用效果展开测试,结果表明,ZigBee 技术是非常适应于设施农业的信息采集方式,而 NB-IoT 和 LoRa-CNN 技术在田野尺度的集约式农业环境下具有更为显著的优势^[32]。Zervopoulos 等将传感器节点接到网络时钟上,实现网络协议同步化处理,并将其应用于希腊科孚岛(Corfu island)的橄榄林精准管理之中,实现了相对湿度、气温、紫外线辐射及土壤含水率的自动化监测^[50]。杨玮等设计并研制以 ZigBee 无线微型控制器、JN5139-M01 模块为核心的温室无线智能传感网络智能控制终端,该系统实现对温室环境诸因子(土壤温度、土壤水分等)的数据采集和有效控制^[51]。

3.3 作物生长生理实时化监控

除了对上述农业用水与环境监测之外,无线传感技术在精准农业的应用还体现在作物生长、生理自动化、智能化监控方面。Bencini 等自行设计了一套无线传感器网络系统(该系统由 GPRS 子系统、控制处理器及全球决策分析子系统组成),对意大利和法国 3 处葡萄园展开生理与病虫害实地监测,结果表明,该系统能够较为准确地反映葡萄生产周期等基本参数变化,能初步达到自动化监管的目的^[52]。Jiang 等设计一套基于具有动态拓扑结构的收敛树算法(DCTA)的无线传感系统,对台湾地区某兰花温室种植园进行应用测试,结果表明该算法能够可靠地收集兰花生理动态数据,整个试验过程

中数据平均成功传送率达到 92.5%^[53]。Zhao 等开发了一款多功能叶片生理参数监测的连续式小型无线传感器,该装置能够较为灵敏地捕获叶片温度、水化、光照度等指标变化,无论在室内还是室外环境均表现出较高的精度与适应性^[54]。高峰等基于无线传感器技术,研制出作物水分状况监测系统,该系统可实现信息采集节点的自动部署、数据自组织传输,可以实时、精确获取作物需水信息,包括引起作物水分亏缺的环境信息(例如温度、湿度、土壤温度、土壤湿度等)以及水分亏缺时作物水分生理指标微变化信息等,具有功耗低、成本低廉、鲁棒性好、扩展灵活等优点^[41]。

4 展望

尽管无线传感技术在精准农业领域已经取得一系列重要进展,特别是近 5 年来随着大数据思维、技术以及研究范式的引入、融合与创新应用,基于物联网、机器学习、人工智能及其智能设备等新兴信息技术的无线传感系统在农业数据获取、传输转换以及存储管理等方面已经具有明显进步,对于农业环境、作物生理等方面的监测效度、精度与适应性具有明显提升。然而,由于农业-作物系统所具有的高度异质性、极端变化性及监测长期性等问题,导致无线传感器在某些特定参数(例如土壤肥力、农作物光饱和指数等)的应用存在较大困难。另外,由于无线传感网络具有多通信融合困难、传感器自身成本及运行成本较高、传感器使用过程中能源供给难以快速解决、网络系统安全性有待提高等缺陷^[51],后续相应基础性研究及其应用实践过程中应进一步着手解决无线传感器网络与现行互联网网络融合问题;进一步加强与大数据技术的高度融入与集成创新,开发具有高度智能化、便携式的低功耗、低成本的农业传感器专用设备;与现有成熟、稳定的大面积、规模化农业环境监测技术,例如,新进组网完成的北斗导航系统、高精度遥感反演以及无人机低空实地监测等紧密结合,构建点-线-面多为一体自动监测系统,为我国精准农业稳步推进与农产品高品质建设提供更为翔实、科学的决策支撑。

参考文献:

[1] 李朋来. 向农业 4.0 时代迈进中的我国精准农业发展制度供给研究[J]. 科学管理研究, 2020, 38(1): 119-124.

- [2] Fei H T. Rural development in China: Prospect and retrospect[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1989.
- [3] Zhu L, Jiang Z Y. From brigade to village community: the land tenure system and rural development in China[J]. Cambridge Journal of Economics, 1993, 17(4): 441-461.
- [4] 张富刚, 刘彦随. 中国区域农村发展动力机制及其发展模式[J]. 地理学报, 2008, 63(2): 115-122.
- [5] Zhang N Q, Wang M H, Wang N. Precision agriculture—A worldwide overview[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2/3): 113-132.
- [6] Lamb D W, Brown R B. PA—precision agriculture: remote-sensing and mapping of weeds in crops[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(2): 117-125.
- [7] 邓仲华, 李志芳. 科学研究范式的演化——大数据时代的科学研究第四范式[J]. 情报资料工作, 2013(4): 19-23.
- [8] Science. Dealing with data[EB/OL]. (2011-02-11)[2020-09-01]. <https://science.sciencemag.org/content/331/6018>.
- [9] ERCIM News. Big data[EB/OL]. (2012-04-01)[2020-09-01]. <https://ercim-news.ercim.eu/images/stories/EN89/EN89-web.pdf>.
- [10] Shih H M, Xue J Y. Big data development in China[J]. East Asian Policy, 2018, 10(4): 91-102.
- [11] 杨晓北. 中美精准农业发展评价及路径选择[J]. 世界农业, 2018(9): 143-149.
- [12] 蒙继华, 吴炳方, 杜鑫, 等. 遥感在精准农业中的应用进展及展望[J]. 国土资源遥感, 2011(3): 1-7.
- [13] Pierce F J, Nowak P. Aspects of precision agriculture[J]. Advances in Agronomy, 1999, 67: 1-85.
- [14] 赵春江, 薛绪掌, 王秀, 等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 7-12.
- [15] Tian H K, Wang T H, Liu Y D, et al. Computer vision technology in agricultural automation—A review[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(1): 1-19.
- [16] Han S, Hummel J W, Goering C E, et al. Cell size selection for site-specific crop management[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(1): 19-26.
- [17] Garcia F J M. Analysis of the spatio-temporal distribution of *Helicoverpa armigera* Hb. in a tomato field using a stochastic approach[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(3): 253-259.
- [18] Liu G S, Jiang H L, Liu S D, et al. Comparison of kriging interpolation precision with different soil sampling intervals for precision agriculture[J]. Soil Science, 2010, 175(8): 405-415.
- [19] Córdoba M A, Bruno C I, Costa J L, et al. Protocol for multivariate homogeneous zone delineation in precision agriculture[J]. Biosystems Engineering, 2016, 143: 95-107.
- [20] Rovira-Más F, Zhang Q, Reid J F. Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(2): 133-143.
- [21] Friedli M, Kirchgessner N, Grieder C, et al. Terrestrial 3D laser scanning to track the increase in canopy height of both monocot and dicot crop species under field conditions[J]. Plant Methods, 2016,

- 12(1):1 – 15.
- [22] Yang X T, Li M, Zhao C J, et al. Early warning model for cucumber downy mildew in unheated greenhouses[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007, 50(5): 1261 – 1268.
- [23] Babatunde O, Armstrong L, Leng J, et al. Comparative analysis of genetic algorithm and particle swarm optimization: an application in precision agriculture [J]. Asian Journal of Computer and Information Systems, 2015, 3(1): 1 – 12.
- [24] Mohapatra A G, Lenka S K. Neural network pattern classification and weather dependent fuzzy logic model for irrigation control in WSN based precision agriculture[J]. Procedia Computer Science, 2016, 78: 499 – 506.
- [25] Papageorgiou E I, Markinos A T, Gemtos T A. Fuzzy cognitive map based approach for predicting yield in cotton crop production as a basis for decision support system in precision agriculture application [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(4): 3643 – 3657.
- [26] Fisher D K, Norvell J, Sonka S, et al. Understanding technology adoption through system dynamics modeling: implications for agribusiness management[J]. International Food and Agribusiness Management Review, 2000, 3(3): 281 – 296.
- [27] Patrício D I, Rieder R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: a systematic review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 69 – 81.
- [28] Thomasson J A, Sui R, Cox M S, et al. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(6): 1445 – 1453.
- [29] Cassman K G. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(11): 5952 – 5959.
- [30] Cook S E, Bramley R V. Precision agriculture – opportunities, benefits and pitfalls of site – specific crop management in Australia [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1998, 38(7): 753 – 763.
- [31] Lee W S, Ehsani R. Sensing systems for precision agriculture in Florida[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 2 – 9.
- [32] Feng X, Yan F, Liu X Y. Study of wireless communication technologies on Internet of things for precision agriculture [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 108(3): 1785 – 1802.
- [33] Mekonnen Y, Namuduri S, Burton L, et al. Review – machine learning techniques in wireless sensor network based precision agriculture[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(3): 037522.
- [34] Bayrakdar M E. A smart insect pest detection technique with qualified underground wireless sensor nodes for precision agriculture [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22): 10892 – 10897.
- [35] 蔡述庭. 无线电传感器网络中能源高效的视频信号压缩关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- [36] 马祖长, 孙怡宁, 梅 涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 4(4): 114 – 124.
- [37] 刘 卉, 汪懋华, 王跃宣, 等. 基于无线传感器网络的农田土壤温湿度监测系统的设计与开发[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(3): 604 – 608.
- [38] 蔡义华, 刘 刚, 李 莉, 等. 基于无线传感器网络的农田信息采集节点设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 176 – 178.
- [39] 李 震, Wang N, 洪添胜, 等. 农田土壤含水率监测的无线传感器网络系统设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 212 – 217.
- [40] 夏朝俊, 顾春新, 李 彬. 精准农业无线传感器网络的研究与实现[J]. 机电工程, 2015, 32(3): 439 – 442.
- [41] 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.
- [42] Kim Y, Evans R G, Iversen W M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2008, 57(7): 1379 – 1387.
- [43] Harun A N, Kassim M R M, Mat I, et al. Precision irrigation using wireless sensor network [C]. Kuala Lumpur: International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA), 2015.
- [44] Sadiq M T, Hossain M M, Rahman K F, et al. Automated irrigation system: controlling irrigation through wireless sensor network [J]. International Journal of Electronics and Electrical Engineering, 2019, 7(2): 33 – 37.
- [45] 高 军, 丰光银, 黄彩梅. 基于无线传感器网络的节水灌溉控制系统[J]. 现代电子技术, 2010, 33(1): 204 – 206.
- [46] 闻珍霞, 何 龙, 杨海清, 等. 发展自动控制精准滴灌技术加快节约型农业建设[J]. 农业装备技术, 2010, 36(3): 22 – 24.
- [47] 韩团军, 尹继武, 赵增群, 等. 基于 LoRa 的远程分布式农业环境监测系统的设计[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 236 – 240.
- [48] Abd El – Kader S M, El – Basioni B M M. Precision farming solution in Egypt using the wireless sensor network technology[J]. Egyptian Informatics Journal, 2013, 14(3): 221 – 233.
- [49] 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.
- [50] Zervopoulos A, Tsiapis A, Alvanou A G, et al. Wireless sensor network synchronization for precision agriculture applications [J]. Agriculture, 2020, 10(3): 89.
- [51] 杨 玮, 吕 科, 张 栋, 等. 基于 ZigBee 技术的温室无线智能控制终端开发[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 198 – 202.
- [52] Bencini L, Chiti F, Collodi G, et al. Agricultural monitoring based on wireless sensor network technology: real long life deployments for physiology and pathogens control [C]. Athens: 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2009.
- [53] Jiang J A, Wang C H, Liao M S, et al. A wireless sensor network – based monitoring system with dynamic convergecast tree algorithm for precision cultivation management in orchid greenhouses [J]. Precision Agriculture, 2016, 17(6): 766 – 785.
- [54] Zhao Y C, Gao S H, Zhu J, et al. Multifunctional stretchable sensors for continuous monitoring of long – term leaf physiology and microclimate[J]. ACS Omega, 2019, 4(5): 9522 – 9530.