

综合研究

我国智慧农业研究和应用最新进展分析*

申格, 吴文斌[※], 史云, 杨鹏, 周清波

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业部农业遥感重点实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】对我国智慧农业的研究和应用最新进展进行梳理和评述, 并对未来智慧农业的发展方向进行展望。【方法】文章在系统总结智慧农业研究文献基础上, 深入分析了农业感知、传输、分析、控制、应用等智慧农业核心领域研究进展和应用状况, 并科学展望了未来智慧农业发展方向。【结果】研究认为, 传感器、GPS、遥感及RFID等技术形成了农业智能感知的技术体系, 传感器技术目前应用最为广泛。智慧农业中数据传输方式要包括有线通信传输、无线通信传输及无线传输与有线传输结合等3种方式, 无线传输与有线传输结合的方式是目前常用的数据传输方式, ZigBee技术是应用最为广泛的无线传输方式。模拟模型、大数据技术及云计算技术是智能诊断分析的关键技术。智慧农场、智慧果园、智慧养殖、农业经营、农业管理与服务等是目前智慧农业的主要应用领域。【结论】数据安全标准、数据融合、数据挖掘、关键技术及系统集成等技术问题、围绕天地空一体化的遥感数据获取体系对智慧大田的深入研究、智慧农业发展模式及推广模式创新研究等则是未来智慧农业研究发展的方向。

关键词: 智慧农业; 感知; 传输; 分析; 控制; 应用

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20180201

0 引言

农业农村农民问题是关系国计民生的根本性问题, 是国民经济的基础。党中央和政府一直重视“三农”问题, 把解决好“三农”问题作为工作的重中之重, 从“农业现代化”、“城乡一体化”、城乡融合发展到“振兴乡村”都体现了这一点。然而, 当前我国正处于传统农业向现代农业转变的关键时期, 农业发展面临农产品价格“天花板”封顶和生产成本“地板”抬升等新挑战, 农业资源环境制约、农业生产结构失衡和农业发展质量效益不高等新问题日益突出, 迫切需要加快转变农业发展方式, 从粗放发展模式向精细管理、科学决策的发展模式转变, 走产出高效、产品安全、资源节约和环境友好的农业现代化道路。

收稿日期: 2018-04-05

第一作者简介: 申格(1990—), 男, 汉族, 山东济宁人, 博士研究生。研究方向: 农业遥感。Email:shenge_yanzhou@163.com

[※]通信作者简介: 吴文斌(1976—), 男, 汉族, 湖北潜江人, 博士生导师、研究员。研究方向: 农业土地系统。Email:wuwenbin@caas.cn

*基金项目: 中国农业科学院协同创新任务“智慧农业关键技术与系统集成”、中央级科研院所基金科研业务费专项“智慧农业2035研究”

信息技术代表着当今先进生产力的发展方向，其强大的带动性、渗透性和扩散性已全面渗透到各个领域^[1]。农业信息化成为引领我国现代农业发展、创新农业管理服务和破解农业发展难题的必然选择。我国农业信息化先后经历了电脑农业、数字农业、精准农业等阶段。21 世纪以来，人类全面迈进了以互联网为中心的信息技术时代。随着物联网、大数据、云计算和移动互联网等新一代信息技术迅速发展，农业信息化正从传统的数字化、网络化向智能化、智慧化的高端方向发展。我国农业发展进入农业 4.0 阶段，即新的智慧农业发展阶段。智慧农业以信息知识为核心，将新兴的遥感网、传感网、大数据、互联网、云计算、人工智能等现代信息技术与智能装备、智能机器人深入应用到农业生产、加工、经营、管理和服务等全产业链环节，实现精准化种植、互联网化销售、智能化决策和社会化服务，形成以数字化、自动化、精准化和智能化为基本特征的现代农业发展形态。可见，智慧农业涉及多部门、多领域、多学科的交叉和集成，具有独特的系统性和复杂性。

虽然近年来我国智慧农业研究和应用发展迅速，如大田和养殖物联网试验研究取得明显进展、农业遥感技术研发稳步推进、农业大数据挖掘与分析算法日益发展、农业信息服务平台技术日益提升。但是，总体看我国智慧农业研究仍处于起步阶段，尚有很多关键科学技术问题没有解决。智慧农业的科学定义和内涵仍不清晰、现有研究存在明显的碎片化、不同学科之间缺乏有机衔接和整合、关键核心技术的研发和集成仍较薄弱、没有形成统一的标准规范等。基于此，本文拟对智慧农业研究文献进行系统梳理和归纳，弄清我国智慧农业研究现状，系统阐述智慧农业研究的关键技术方法及其重点应用领域，为发展和丰富智慧农业学科体系、推动我国未来智慧农业发展提供参考。

1 智慧农业研究总体现状

近年来，智慧农业研究受到国内科研院校和学者的高度关注。通过大量文献检索分析发现，智慧农业研究从 2012 年开始快速发展，研究热度逐年增加（图 1）；从研究地区热度密度分布看（图 2），东部地区研究热度高，尤其是江浙、京津、东三省等区域，而西部地区的研究热度总体要低，华中地区的湖北等省对智慧农业研究关注度较高；从研究重点看，目前智慧农业研究主要集中在智慧农业理论解读^[2-6]、传感器、大数据、监测系统、智能机械等技术研发^[7-10]以及地方应用案例^[11-13]。

智慧农业是农业信息化发展的高级阶段，是全新的农业发展理念，其与电脑农业、数字农业、精准农业等农业信息化发展模式既相关又不同。表 1 总结出这 4 种农业信息化发展模式的异同点。电脑农业、数字农业及精准农业是将关键信息技术应用到农业生产过程中，实现提高农业生产效率和效益的目标。智慧农业则是实现全要素、全链条、全产业、全区域的智能化，不仅是农业生产过程，也包括农业经营、农业管理、农业服务等环节^[14-17]，这是与其他 3 种农业信息化发展模式的重大不同点。因此，智慧农业的内涵和外延更加宽泛，其所涉及的理论、技术、系统和装备更加综合和复杂。

2018年4月

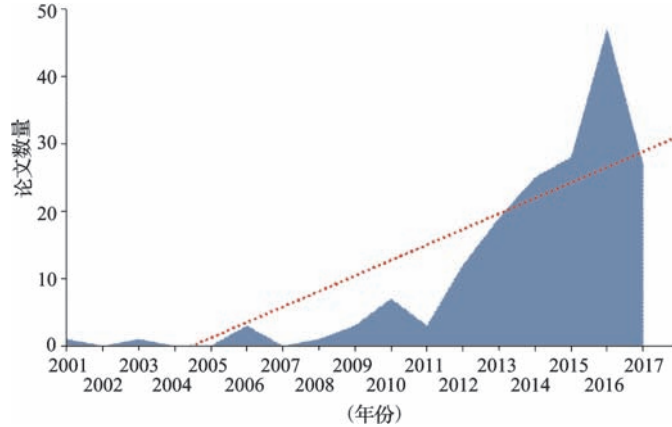


图1 2001—2017年智慧农业研究发表文献数

Fig.1 The number of literature of intelligent agriculture research published from 2001 to 2017

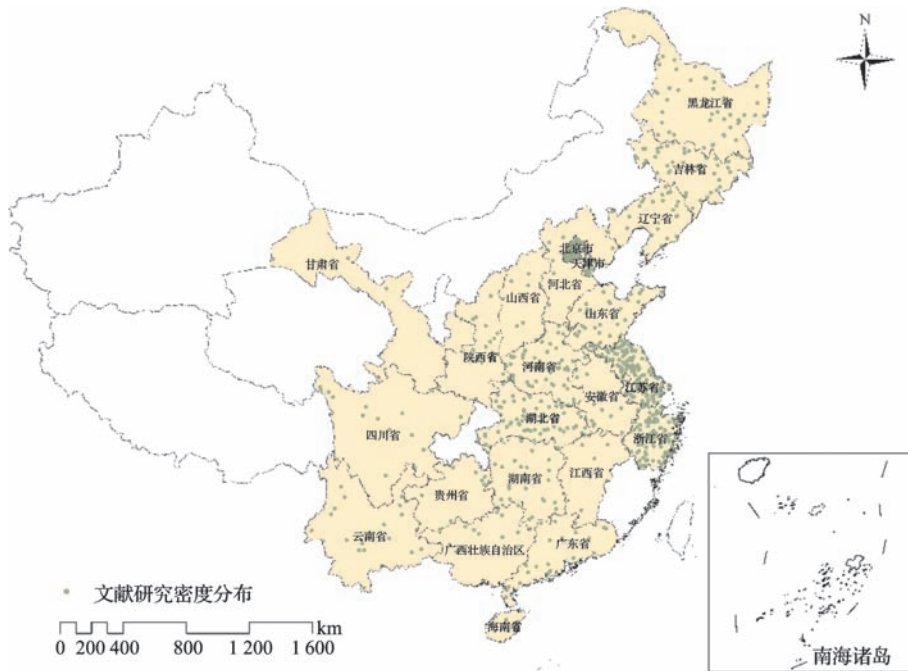


图2 不同地区智慧农业文献研究热度分布图

Fig.2 Heat distribution map of intelligent agricultural in different regions

注：以省为单位，对文献作者单位信息进行可视化显示，以点的密集度表征不同省份智慧农业的研究热度。

表1 4种农业信息化发展模式对比

Table 1 Comparison of four kinds of agricultural information development models

	关键技术	应用对象	实质
电脑农业	农业专家知识	生产	农业专家系统
数字农业	数字化	生产	农业生产管理体系
精准农业	3S技术	生产	农业管理系统
智慧农业	物联网技术	生产、经营、管理、服务	农业发展理念

智慧农业的核心目标是实现农业全过程的智能化，其实质是数据驱动。围绕“数据”的核心主线，智慧农业的核心研究领域包括感知、传输、分析、控制、应用等 5 个方面。感知是基础，是利用各类传感器采集和获取各类农业信息和数据的过程；传输是关键，是将经感知采集到的信息和数据通过一定方式传输到上位机待进行存储的过程；分析是核心，利用感知传输的数据进行挖掘分析，支撑农业预警、控制和决策的过程；控制是保障，将针对决策系统的控制命令传输到数据感知层、进行远程自动控制装备和设施的过程；应用是目的，实现农业生产过程、生产环境、农作物病虫害等的智能管理。每一核心问题都有各自的关键理论和技术方法体系，将这些理论、技术方法高度集成可以形成系列的智慧农业系统。

2 农业感知

2.1 传感器技术

传感器技术是智慧农业的关键技术之一，大田种植、设施园艺以及水产养殖中的环境参数都是通过物理传感器来进行实时采集。其中温度传感器、湿度传感器、光照强度传感器、CO₂ 浓度传感器是目前应用最为广泛的传感器。在大田方面，很多学者集成空气温湿度传感器、土壤温湿度传感器、作物传感器，构建无线传感网络，自动快速获取农田环境和作物参数^[18-19]。然而，大田区域大、面积广，传感器的规模化应用成本高，因此，目前多适用于规模较集中的设施园艺，包括农业大棚^[20]、园艺大棚^[21]、植物工厂^[22]等。水环境理化性质监测的 pH 值传感器、浑浊度传感器、溶解氧传感器以及水位传感器等在水产养殖环境监测中使用最为广泛，取得了较为理想的监测效果^[23]。近几年，传感器应用到包括农业机器人在内的智能机械设计中。此外，农产品物流追踪中通过传感器可以监测到农产品运输中的温湿度等信息，保证食品安全。然而，现阶段传感器多依赖于国外进口，价格较高，限制了大田中的推广使用。目前传感器大多是基于单功能设计，功能集成较弱，造成数据冗杂，加大数据传输压力；传感器性能易受环境因素干扰也是普遍存在的核心问题。

2.2 遥感技术

遥感技术凭其快速、简便、宏观、无损及客观等优点，广泛应用于农业生产各个环节，是各类农业生产过程生长与环境信息的重要来源。遥感技术在智慧农业中利用高分辨率传感器，采集地面空间分布的地物光谱信息，在不同的作物生长期，根据光谱信息，进行空间定性、定位分析，提供大量的田间时空变化信息^[14]。目前遥感技术在智慧农业应用中主要包括：作物种植面积遥感监测与制图、作物长势监测与产量估算、农业灾害遥感监测、土地资源遥感以及作物生态环境信息监测等^[24-25]。总体来说上述应用技术方法体系已比较成熟，遥感监测结果可以为实现农业尤其是大田管理的智能化提供可靠的监测数据，辅助进行正确的管理决策。近几年来，微小型无人机遥感技术平台凭借其操作简单、灵活性高、作业周期短等特点，在农业观测和信息采集中发挥了重要作用。蔡伟杰^[26]利用无人机搭载了各种传感器用以监测植保作业数据，提高了监测效果与效率。

2018年4月

将卫星、无人机与物联网技术集成构建天空地一体化农业遥感信息获取技术体系是发展智慧农业的趋势和有效手段,可以实时获得更为丰富、更为精确的农田地块信息,但也带来了海量遥感数据融合处理的问题。

2.3 GPS

GPS (Global Positioning System) 在智慧农业中应用主要体现在3方面:空间定位、土地更新调查、监测作物产量^[24]。定点定位是GPS在智慧农业中最重要的作用。首先可以测量农田采样点、传感器的经纬度和高程信息,确定其精确位置,辅助农业生产中的灌溉、施肥、喷药等田间操作。在翻耕机、播种机、施肥喷药机、收割机、智能车辆等智能机械上安装GPS,可以精确指示机械所在的位置坐标,对农业机械田间作业和管理起导航作用^[27]。此外GPS在农产品运输管理中也发挥着关键作用,通过GPRS无线传输系统将车辆当前的经纬度、车速等数据实时发送到远程控制中心,控制中心再将传回的GPS数据与电子地图建立关系,可以对行车情况进行监控,实现智能控制和管理,并且可以根据产品和消费者信息自动生成最佳的配送策略,提高效率^[28]。

2.4 RFID 技术

RFID (Radio Frequency Identification) 技术广泛应用于智慧农业食品安全质量溯源模块和农产品物流系统。运用RFID技术构建农产品安全质量溯源系统,可以查询农产品所有环节的详细信息,实现全过程的数据共享、安全溯源及透明化管理,既可以提高农产品的附加值,也可从根本上解决并防止安全事故的发生。在现代农场智慧农业系统建设研究中,盐城市七星农场利用RFID技术采集、汇总和分析食品与农产品安全监测数据,完成对食品和农产品安全的全方位监控以及科学预警,实现“从农田到餐桌”的全过程信息化管理^[29];彭改丽在温室内建立无线射频网络,采用RFID技术进行无线数据采集,避免了传统温室内走线冻土给农作物带来的不便^[30]。目前,RFID技术存在着易受干扰、信息安全、标准化等技术问题;因电子辐射产生的环境问题及成本问题,克服技术问题,减小技术成本,提高RFID使用效率,将是RFID未来发展的核心任务。

3 数据传输

3.1 有线通信传输技术

有线通信传输方式通过光波、电信号这些传输介质来实现信息数据传递,具有信号传送稳定、快速、安全、抗干扰、不受外界影响、传输信息量大等优点。智慧农业中有线通信传输方式通常使用RS485/RS432总线、CAN总线网线或电话线等有线通信线路现场布线来进行数据的传输,其中最为常用的为RS485/RS432总线。通过RS485总线串联上下位机实现通信,提高了系统的抗干扰能力,使智能农业监控系统性能稳定、使用灵活^[31]。孙国辉^[32]基于嵌入式系统设计,采用S3C2440芯片为主控芯片,用RS485串口作为通信接口用来实现温室大棚中传感器数据的传输和信息的反馈,降低了成本。此外视频监控系統多是利用有线传输方式来进行视频数据的传输。但是,由于有线通信传输布线复杂,且易受环境影响而老化;再加上无线通信技术发展的冲击,使该方案实际上

很少单独使用在智慧农业的研究中。

3.2 无线通信传输技术

无线通信传输包括两种方式：无线局域网通信和无线移动通信，两者的区别主要体现在传输媒介不同。目前应用较为广泛的无线通信传输方式包括蓝牙（Bluetooth）、红外通讯技术（IrDA）、WIFI、紫峰（ZigBee）、超宽带（UWB）以及移动网络等。表 2 比较了各种无线传输方式的特点^[33-34]。可以看出，不同的无线传输方式具有不同的特点。基于 ZigBee 技术的短距无线通信方式具有数据传输可靠、安全、支持网络节点多、成本低、兼容性高等特点，是目前智慧农业中应用最为广泛的无线传输方式之一。传感器与 ZigBee 中的通信节点组合，形成无线传感器网络（WSN），通过控制芯片将采集节点数据集成，然后通过 ZigBee 网络对数据进行传输，广泛应用在设施农业^[35]及农业灌溉^[36-37]中的信息传输和反馈。此外研究中常将 ZigBee 和其他无线传输方式形成无线组合网络来实现数据传输，尤其是移动网络技术（2G GSM 网络、2.5G GPRS 网络以及 3G、4G 网络）的发展，使传输距离不受限制，传输速率也越来越快，成为智慧农业应用中的热点。任华等^[38]、严璋鹏等^[39]、周新淳等^[40]分别采用 ZigBee+3G、ZigBee+GPRS、4G+ZigBee+WIFI 等无线组合传输技术解决了农业大棚中局域及远距离有效数据传输的问题，实现了大棚的精细化管理和控制。林元乖等^[28]将 ZigBee、GSM、GPRS 等通信技术集成嵌入，分别负责农业园区中传感器、运输车辆中传感器的数据传输，建立了农产品环境监测系统和农产品运输管理系统。

表 2 不同无线传输通信方式比较

Table 2 Comparison of different wireless transmission modes

标准	ZigBee	Bluetooth	WIFI	UWB	IrDA	移动网络
工作频段	868/915MHz 2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz	>2.4GHz	红外光	各运营商不同
传输速率	20~250kbps	1Mbps	11Mbps	最高 1Gbps	16Mbps	不同网络不同
传输距离 (m)	10~100	10~100	1~100	10	1~10	依赖移动基站
电池寿命 (d)	100~1 000	1~8	1~4	100~1 000	200~600	/
网络节点	最多 65 535	1~7	30	100	2	/
关键特性	可靠、低功耗、 价格便宜	价格便宜、 方便	速度快、 灵活性好	定位精准	低功耗、 成本低廉	组网灵活、易升 级、成本较高

3.3 有线传输与无线传输结合

无线传输方式与有线传输方式都有各自的优缺点，单独利用某种通信方式很难实现全过程的数据传输任务。如大田灌溉监测系统中，监测节点之间距离较长，超出了 ZigBee 技术的可传输距离范围。一般来说，农业生产基地与监测控制中心或数据服务器间相距较远，移动基站成本较高，且需传输数据量大，加大了成本，在这种情况下仅利用无线传输方式实现数据传输并不科学。所以，将无线传输方式与有线传输方式集成是现阶段智慧农业中较为通用的通信方式，广泛应用在在温室大棚^[20, 41-42]、设施园艺^[43]、农业灌溉^[44-45]、水产养殖^[23]等多个领域。在无线与有线集成的过程中，网关发挥着至

2018年4月

关重要的作用，M2M 网关是智慧农业中最为常用的网关模块。根据文献研究，该文将智慧农业中数据传输过程及每个过程所使用的传输方式进行创新优化，构建了智慧农业数据传输体系（图 3）。具体为：不同传感器采集的监测数据利用 ZigBee 无线技术进行收集集成并传输至边缘网关进行汇总，然后利用网关模块的串口变换连接 RS485 有线传输模块将数据包传输到服务器。若传感节点距离较远，超出 ZigBee 的可传输距离，则首先利用 RS485 总线将传感器节点集成，然后再通过 ZigBee 进行后续的传输。照明、灌溉、风机等继电器设备则通过 RS485 总线和 ZigBee 发送控制命令，自动进行操作。摄像头等监控设备通过比较常用的流媒体技术进行控制。由服务器向应用终端的数据传输技术则相对较成熟，目前常用的终端包括 PC 及手机等移动终端，PC 终端选择应用基础良好的宽带进行数据传输，而移动终端则选择了目前广泛使用的 WIFI 无线技术。该智慧农业数据传输体系既考虑了应用距离与范围，又顾及了成本问题，在智慧农业各个领域具有一定的推广价值。

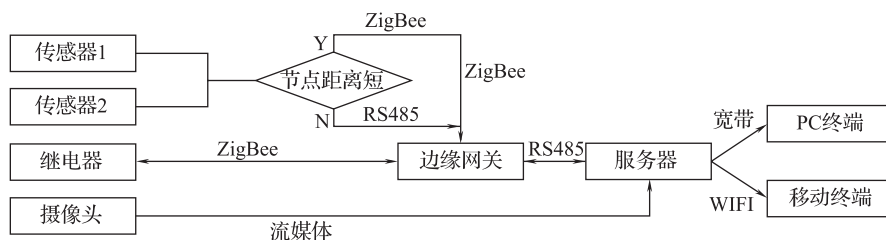


图 3 智慧农业数据传输体系
Fig.3 Data transmission system of intelligent agriculture

4 数据分析

4.1 地理信息系统

地理信息系统（GIS）凭借其强大的数据管理和数据分析功能可以实现农业信息的存储、分析和智能处理。GIS 技术可对大田物联网系统的空间数据和感知数据进行存储管理，利用 GIS 空间分析方法和大田相关农学模型集成分析物联网监测数据^[46]。GIS 具有可视化和制图功能，便于用户直观的查询、分析与统计可视化数据；与 RS 技术结合，形成各种农业专题图，例如农作物产量长势图、病虫害监测图、农业气候区划图等，可以为正确决策提供帮助，这也是目前 GIS 在智慧农业的主要用途之一。林峰峻^[47]在象山县智慧农业综合服务平台设计研究中，以 GIS 地图为基础，将农业相关状况信息在 GIS 地图上可视化，方便决策者了解整个象山的农业状况。此外，在农产品物流管理过程中，可以通过 GIS 地图协助物流分析、车辆派遣、路线计算等^[48]。

4.2 模拟模型

计算机模拟模型将采集获得的农业信息进行模拟分析，构造出环境参数与目标参数之间的定量关系，支撑农业预测、农业预警、农业决策。目前在农业领域中常运用的模型分为两类：统计模型和智能计算模型。统计模型主要有多元线性回归模型、Logistic 回

归模型和自回归移动平均模型；其中多元线性回归模型可以综合分析多种变量的关系来得到目标变量的表达函数，在产量预测、节水灌溉、病虫害预测等有广泛应用。智能计算模型在农业上的应用以神经网络为代表，包括 BP 神经网络、径向基函数神经网络、Elman 网络等，其中 BP 神经网络由于其可塑性强、结构简单等特点，使用最为广泛。岳梦婕^[49]针对生长周期未完成的金针菇产量预测问题，利用权值优化的 BP 神经网络进行建模，取得较好的预测效果和可行性，但是算法的时间尺度有待改进。近几年随着遥感技术的发展，各种物理反演模型应运而生，将反演模型加入模型库，基于各种遥感数据，可以实现作物产量、长势、病虫害等的实时监测和模拟预测，并能进行指导精确施肥和节水灌溉。

4.3 大数据技术

大数据核心技术是数据挖掘，利用各种分析工具对海量数据作比较、聚类 and 分类归纳分析，建立模型和数据间的关系，对已有数据集剖析，对未知数据进行预测。常用的数据挖掘方法包括统计分析、聚类、决策树、关联规则、人工神经网络、遗传算法等。智慧农业中，常用大数据技术进行农作物的产量预测、作物生长过程和环境优化控制等方面。杨凌雯^[50]针对现有智慧农业系统专业性太强的问题，提出了改进的 K-C4.5p 决策树算法和残差主成分回归算法，用于地力等级分析和产量预测，效率和准确率大幅提升，可以实现对生产数据的动态分析和预测。总体而言，农业大数据技术在智慧农业中的研究还处于初始阶段。由于数据量大且类型复杂，大数据的存储、智能融合处理将是研究的热点。此外农业大数据的实时性是其显著特点，如何兼并数据处理的实时性和精确性将是大数据研究的方向。

4.4 云计算技术

云计算具有动态可扩展性、高可靠性、低成本和绿色节能等优点，可以实现按需使用，降低了用户终端的要求，提高了使用效率^[51]。智慧农业最终是面向各个层次对象，包括政府、企业、个人等，凭借云计算强大的计算能力，能够最大限度地整合数据资源，提高农业智能系统的交互能力，满足各类用户主体的需求，解决各个层次的数据传输和应用问题，因此云计算技术在智慧农业发展中越来越受重视。阎晓军等^[52]建设了北京农业云服务平台，实现了基地和市级两级控制管理，为各种应用系统提供了一个共享平台。李尤丰等^[53]提出了基于动态云的智慧农业架构，可减轻数据存储、数据处理、资源配置等压力。基于该动态云的智慧农业架构已在南京和安徽地区中得到稳定应用，而如何提高用户访问速度和效率将是该系统要考虑的问题。徐润森等^[54]针对智能农业监控平台建设中的问题，设计了基于云计算的智能农业监控平台建设架构，面向个人、机构、政府、平台管理等门户提供多个云应用技术，平台体系结构灵活、部署方便且成本低廉。

5 自动控制与自主作业

自动控制通过自动化控制系统，自动发出指令，控制水泵、阀门、电动卷帘、通风窗等继电器设备，将温、光、水、肥、气等因素调控到适于作物生长发育的最佳环境条

2018年4月

件。目前我国智慧农业自动控制系统设计技术方案主要包括基于单片机、PLC控制系统、基于嵌入式系统的控制系统、基于云平台技术的控制系统等。基于单片机的控制系统可集中控制环境信息，操作简单、价格低廉，应用较为广泛，但其可靠性无法得到保证；PLC控制系统能够进行传统的继电器逻辑控制、计数及计时操作，并且性能可靠，对外部环境抗干扰能力强，编程简单，是目前智慧农业中较为常用的自动控制方案，但是成本相对较高；嵌入式系统具有安装方便、开发周期短、并发处理能力强、可系统升级等优点，近年来得到广泛应用。

目前，通常采用简单的阈值设定实现控制系统对温度、湿度、光线照射强度、二氧化碳浓度等环境因子以及水阀、通风窗等继电器设备的自动化监控。为更加精准控制，PID控制算法、模糊控制算法、预测控制、神经网络等控制算法应用至系统设计中，可以优化控制系统对环境要素变化的阈值判断，实现高精度、高可靠性的控制系统。现阶段通常引入单一控制算法来优化控制系统，其中模糊控制算法应用最为广泛。张丽良等^[55]基于嵌入式控制系统，利用模糊控制算法，建立了农业大棚环境优化控制系统，解决了解耦问题；安宁^[56]基于PLC控制程序，采用模糊控制算法，设计了蝴蝶兰温室大棚智能控制系统，实现了集现场数据采集、系统远程控制、种植环境自动化调节于一体。需要说明的是，模糊控制算法稳态精度太低，只能实现粗略控制。由于环境数据容易发生变化，单一的控制算法已难以满足需求，将多种算法结合，综合算法的各个优势，成为发展的方向。韩明月^[57]采用了模糊控制和神经网络分析结合的方法，既能建立模糊的系统模型，又能通过数据训练得到最优化的控制方法，实现自动灌溉和温度自动控制。

同时，随着我国农业劳动力数量减少、农村老龄化加速，以农业机器人为代表的自主作业系统成为发展趋势。不同形式、不同用途的农业机器人与自主作业系统相继出现，如自动驾驶拖拉机、喷药机器人、采收机器人、除草机器人、修剪机器人、挤奶机器人、嫁接机器人、苗盘搬运机器人、农用无人机等。中国农业科学院南京农机化所研发了“精确变量播种施肥机”，具有播量模型在线标定功能，可实现不同品种、不同类型种子、肥料的播量模型实时标定，机手在驾驶室可实时接收作业地块的播种施肥处方图，结合研制的自动辅助驾驶系统，可实现播种施肥作业的“一键化”操作。虽然目前农业机器人与自主作业系统种类繁多，但是仅有自动驾驶拖拉机、喷药无人机和挤奶机器人达到了较好的产业化水平。由于现有农业机器人与自主作业系统在应对复杂农业场景下的环境感知、行为规划、高效作业等方面存在明显瓶颈，在与人力比拼中难以具有明显优势。因此，由易到难、重点突破、人机并存成为当今农业机器人与自主作业系统研究和产业化推进的主流观点。未来农业机器人与自主作业需要重点突破自主行为规划、适合复杂农业场景的智能感知、面向农业作业的高效柔性执行器件，为大型农机智能协同作业、农机机器人搬运/监测/耕作/采收等具体应用提供基础理论和技术支撑^[58]。

6 应用服务

6.1 智慧农场

智慧农场是现阶段发展智慧农业的基本形态，主要包括大田种植和设施农业两方面。大田种植方面，赵胜利^[46]将多种技术集成建立了大田作物生长感知与智慧管理物联网平台，可实现数据采集、管理、分析及应用，在 5 省 17 个试验区进行了推广应用。随着无人机技术的发展，为获取丰富、精确、小尺度的农田信息提供了可能，天空地一体化的遥感数据获取体系将为发展智慧农业尤其是实现智慧大田提供技术保障。中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研制开发了天空地一体化农田地块大数据平台，利用卫星遥感技术、无人机与车载地面样方调查装备及农业物联网等相关系统，智能获取每个地块的周边环境因素、土地利用类型、农作物长势、农户生产决策信息等农业生产大数据，将从科学上解答农民每年“种什么”、“怎么种”等问题，该平台在三江源地区进行了示范和推广。设施农业是智慧农业发展应用中最为广泛的领域之一，包括温室大棚、植物工厂等，不同地区都已开始大力发展。现阶段已研发构建了大量的智能设施农业环境监测系统^[34, 59]、生产管理控制系统^[52, 60-61]及视频监控系统^[62-63]等。基于这些智慧农业决策系统支持，现阶段可以实现设施农业生产环境信息的无线采集监测，并进行环境优化控制；对生产过程进行精细化管理控制，包括作物生长感知、精准施肥、病虫害监测及节水喷灌等，并在一定程度上可以实现农产物安全监测和流通的信息化。

6.2 智慧果园

实现果园的智慧化种植、管理也是智慧农业的重要应用。章璐杰^[43]基于物联网技术构建了智慧葡萄园管理系统，系统中实现了数据库存储优化、基于 n-of-N 模型和生命周期存储策略的数据流处理模型及最远优先 K-means 数据挖掘算法，可以完成葡萄园环境信息的采集、存储、处理与挖掘，实现葡萄整个生长周期的自动监测和控制，具有比较好的普适性和通用性。濮永仙^[64]以瓜果种植为研究对象，建立了物联网智能农业瓜果生产系统，可以实现瓜果生产要素的精细化和智能化控制，具有基于支持向量机对病虫害预警诊断以及产品安全溯源等功能。此外，包括采摘机器人、除草机器人、嫁接机器人、苗盘搬运机器人等不同功能的农业机器人在果园中也得到广泛应用，可以实现除草、果实采摘等的智能化。

6.3 智慧养殖

目前畜禽水产养殖的研究大多集中在利用无线传感器实现养殖环境的实时监测、数据监测及设备调控等，利用无线传感网络对动物生理特征和健康信息进行监测。畜禽养殖方面，利用传感器网络可以实现猪舍等养殖环境的信息监测，通过系统的智能分析得到养殖环境的变化情况，并根据变化情况实时进行反馈调控，使养殖环境保持最优状态，实现精细化管理^[47, 65]。此外利用无线传感器网络对牲畜的健康信息监测也是在畜禽养殖上的重要应用。中国农业大学李道亮团队对物联网技术在水产养殖的应用进行了较为系统的研究，在数据感知、数据传输与数据应用方面都取得了突出成果：实现了海水、淡

2018年4月

水、半咸水等不同应用场景下的传感器精确测量；提出了复杂养殖环境下时空融合的无线传输方法，提高了无线传输网络在复杂水产养殖场景下的稳定性；提出了水产养殖实时数据在线处理模型与方法，构建了基于实时数据与知识库联合驱动鱼类生长动态优化模型，为实现水产养殖精准智能调控提供了关键的技术。

6.4 互联网化经营

农业经营主要是利用网络技术实现农业经营的信息化，通过现代信息技术为农户在互联网上提供销售、购买和支付等方面的一条龙智能服务，使农产品打破传统销售的时间限制、空间限制，解决农产品推广、积压、流通等问题。阿里在农村建立淘宝村，经营农产品网点超40万个；京东开展智慧农村，建立县级服务中心，已在全国建立1500个县级服务中心，推动了农村电子商务的发展。“聚筹网”、“尝鲜众筹”、“大家种”等多种农业众筹模式可为消费者提供个性化服务，是农业经营创新的主要手段。此外，农村现代电商物流模式也开始创新发展，逐步解决农村物流问题。

6.5 智能化管理与服务

农业智慧管理包括智慧预警、智慧控制、智慧指挥、智慧调度等内容^[14]。推进农业智慧化管理，重点是通过农业大数据的开发和应用，建立智慧农业综合化的信息服务平台来进行决策、指挥和调度。南京市以“11N”为核心进行市智慧农业中心建设，抓好农业大数据，建立农资监管信息系统、重点农业项目信息管理系统、农产品质量安全追溯管理系统等多个系统，为部门行业监管、应急指挥调度、领导科学决策等提供了有力支撑^[66]。北京市通过建设北京设施农业物联网云服务平台、智能决策服务和反馈控制系统，实现了病虫害远程诊断、监控预警、指挥决策，以及肥、水、药智能控制和设施农产品质量安全监管与追溯等。同时，互联网的发展使得农业服务模式发生转变，由以公益性服务为主的传统模式向市场化、主体多元化、服务专业化转变，实现更为全面的社会化服务。通过网络媒介，既可以使农民获取先进的技术信息，掌握最新的农产品价格走势等市场行情，自主决策农业生产，也可以使消费者了解最新的产品信息。象山县利用现代信息技术建立了智慧农业综合服务平台，为企业、农户、政府开展农业生产提供支撑，提供多种农业服务，实现了全县农业服务的智能化。

7 研究展望

在“乡村振兴”的战略背景下，智慧农业是未来农业发展的根本方向。总体上看，虽然我国智慧农业研究取得了明显进展，但研究水平还处于起步阶段。未来的一段时间内，智慧农业研究将会以理论、技术、装备和系统研究为核心，因地制宜与产业融合应用，提升农业信息化发展水平。

首先，智慧农业关键技术创新研究将是未来研究核心。创新开发集多功能一体的国产传感器，实现实时、动态、连续的信息感知，并强化传感器的采集精确度和抗干扰性。形成包括物联网标准、智慧硬件（传感器、农业机器人等）的统一开发技术标准，优化数据传输方式，既保证效率，又确保稳定和安全。目前研究集中在数据的采集过程，而

对数据处理、挖掘研究较少，大力发展云计算、大数据技术，数据融合、数据存储、数据挖掘等数据处理方法将是研究的重点；如何实现互联网、物联网、大数据的深度融合，并在生产中开发集大田种植、设施园艺、畜禽水产养殖物联网一体的技术平台是推动智慧农业发展的关键。智慧大田中的技术将是突破的重点，地块尺度的农田大数据建设将是今后智慧农业数据建设的一个重要方面，其中天地空一体化的遥感数据获取体系将是重要的技术手段；农产品物流、农业电子商务等其他生产过程之外的技术手段探讨也是要加强领域。

其次，智慧农业发展规划研究也是一项极其重要的任务。技术支持是“硬条件”，而规划设计则是“软实力”。目前对智慧农业的研究大多集中在技术层面，而对于智慧农业的发展规划、模式设计等则鲜有研究。智慧农业发展是一个长期性的过程，政府必须做好顶层设计，把握住发展的大方向，保证智慧农业的良性发展；各地应因地制宜，避免盲目跟从，创新研究适合本地的智慧农业发展模式。技术推广的运行机制及物流配送的战略性规划也将是探讨研究的重点。因此，在未来的研究中，应加大智慧农业发展模式及推广模式的研究。

参考文献

- [1] 陈威, 郭书普. 中国农业信息化技术发展现状及存在的问题. 农业工程学报, 2013, 29 (22): 196~205.
- [2] 李道亮. 城乡一体化发展的思维方式变革——论现代城市经济中的智慧农业. 人民论坛·学术前沿, 2015 (17): 39~47.
- [3] 朱小兵. 马克思生态技术观与我国智慧农业发展路径初探. 东华理工大学, 2016.
- [4] 任端阳. 我国农业知识产权与智慧农业发展对策研究. 中国科学技术大学, 2017.
- [5] 张继梅. 我国智慧农业的发展路径及保障. 改革与战略, 2017 (7): 104~107.
- [6] 韩秀艳, 孙涛. 我国智慧农业发展路径设计及其优化策略研究. 陕西农业科学, 2016, 62 (12): 98~101.
- [7] 李幸. 传感器技术在物理农业中的应用研究. 苏州大学, 2016.
- [8] 程帅明, 姜鹏飞, 张振, 等. 基于大数据的智能农业传感器设计. 智能城市, 2017 (2): 44~46.
- [9] 田光兆, 安秋, 姬长英, 等. 基于 Gray-EKF 算法的智能农业车辆同时定位与地图创建. 农业工程学报, 2012, 28 (19): 17~25.
- [10] 杨彦鑫, 阮解琼, 黄兆波, 等. 基于 ZigBee 的智能农业灌溉系统研究. 农业与技术, 2017, 37 (4).
- [11] 张育斌, 张倩, 王志琴, 等. 宁波市智慧农业发展战略与政策选择探讨. 浙江农业科学, 2014, 1 (5): 625~628.
- [12] 赵恒. 苏南在智慧农业发展方面的有益探索——以常熟为例. 苏州大学, 2016.
- [13] 甘江英. 江西智慧渔业发展对策研究. 渔业致富指南, 2017 (18): 14~16.
- [14] 李道亮. 物联网与智慧农业. 农业工程, 2012, 2 (1): 1~7.
- [15] 赵春江. 对我国未来精准农业发展的思考. 农业网络信息, 2010 (4): 5~8.
- [16] 谢东升. “互联网+”现代农业的创新发展机制研究. 贵州大学, 2016.
- [17] 亓相涛, 袁崇亮. 物联网在智能农业方面的应用现状及发展趋势研究. 电脑编程技巧与维护, 2016 (20): 83~84.
- [18] 邹金秋, 周清波, 杨鹏, 等. 无线传感网获取的农田数据管理系统集成与实例分析. 农业工程学报, 2012, 28 (2): 142~147.
- [19] 袁小平, 徐江, 侯攀峰. 基于物联网的智慧农业监控系统. 江苏农业科学, 2015, 43 (3): 376~378.
- [20] 张新, 陈兰生, 赵俊. 基于物联网技术的智慧农业大棚设计与应用. 中国农机化学报, 2015, 36 (5): 90~95.
- [21] 林之博, 陈耿新, 林洁纹, 等. 基于 ZigBee 的智能农业物联网系统研发. 自动化与信息工程, 2015, 36 (5): 19~23.
- [22] 王冠. 基于嵌入式的植物工厂智能监控系统的研究. 天津理工大学, 2015.
- [23] 李慧, 刘星桥, 李景, 等. 基于物联网 Android 平台的水产养殖远程监控系统. 农业工程学报, 2013, 29 (13): 175~181.

2018年4月

- [24] 佟彩, 吴秋兰, 刘琛, 等. 基于3S技术的智慧农业研究进展. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015(6): 856-860.
- [25] 陈仲新, 任建强, 唐华俊, 等. 农业遥感研究应用进展与展望. 遥感学报, 2016, 20(5): 748-767.
- [26] 蔡伟杰. 面向农业植保智能化作业的无人机地面站系统研究. 深圳大学, 2017.
- [27] 赵坤. 多功能高精控制智慧农业智能车研究应用. 湖北大学, 2016.
- [28] 林元乖, 龙顺宇, 杨伟. 基于物联网技术的智能农业应用系统. 物联网技术, 2013(3): 71-74.
- [29] 张松茂. 现代农场智慧农业系统建设研究. 南京邮电大学, 2014.
- [30] 彭改丽. 物联网在智能农业中的应用研究. 郑州大学, 2012.
- [31] 张晓朋. 基于485总线和虚拟仪器的智能农业监控系统设计. 计算机测量与控制, 2017, 25(2): 85-87.
- [32] 孙国辉. 智能农业监控系统. 黑龙江大学, 2016.
- [33] 付玉志. 基于ZigBee技术的智慧农业实时采集和远程控制系统. 浙江大学, 2015.
- [34] 缪玲. 基于Android平台的智慧农业信息采集系统的开发. 南京邮电大学, 2015.
- [35] 徐鸽. 基于ZigBee的智能农业大棚监控系统设计. 湖南农业大学, 2014.
- [36] 赵爽丽, 王斌, 姜重然. 基于ZigBee的智能农业灌溉系统研究. 农机化研究, 2016, 38(6): 244-248.
- [37] 杨彦鑫, 阮解琼, 黄兆波, 等. 基于ZigBee的智能农业灌溉系统研究. 农业与技术, 2017, 37(4).
- [38] 任华, 邹承俊. 基于物联网的智能农业系统研究与实现. 物联网技术, 2014(6): 66-68.
- [39] 严璋鹏, 彭程. 基于物联网技术的智慧农业实施方案研究. 西安邮电大学学报, 2013, 18(4): 105-108.
- [40] 周新淳, 张瞳, 吕宏强. 基于物联网的精准化智慧农业大棚系统设计. 国外电子测量技术, 2016, 35(12): 44-49.
- [41] 王冬. 基于物联网的智能农业监测系统的设计与实现. 大连理工大学, 2013.
- [42] 李建飞, 靖文. 基于ZigBee和LabVIEW的智能农业大棚温湿度监测系统设计. 现代农业科技, 2013(5): 205-205.
- [43] 章璐杰. 基于物联网的智慧葡萄园管理系统的优化研究. 浙江大学, 2017.
- [44] 赵海丹. 基于LNMP的智能农业服务平台的研究. 浙江大学, 2015.
- [45] 牛鸽. 面向智慧农业种植过程的数据采集平台的研究. 浙江理工大学, 2016.
- [46] 赵胜利. 作物生长感知与智慧管理物联网平台架构与实现. 南京农业大学, 2015.
- [47] 林峰峻. 象山县智慧农业综合服务平台设计与实现. 大连理工大学, 2015.
- [48] 方慧, 何勇. 3S技术与智慧农业. 高科技与产业化, 2015, 11(5): 62-63.
- [49] 岳梦婕. 面向智慧农业种植领域数据处理算法的研究. 浙江理工大学, 2016.
- [50] 杨凌雯. 基于数据挖掘的智慧农业生产系统的研究. 浙江理工大学, 2016.
- [51] 徐超. 云计算技术在中国农村信息化建设中的应用. 山东大学, 2010.
- [52] 阎晓军, 王维瑞, 梁建平. 北京市设施农业物联网应用模式构建. 农业工程学报, 2012, 28(4): 149-154.
- [53] 李尤丰, 王智钢. 基于动态云的智慧农业架构研究. 计算机技术与发展, 2014(3): 190-193.
- [54] 徐润森, 薛艳肖. 基于云计算的智能农业监控平台架构研究. 互联网天地, 2015(3): 23-28.
- [55] 张丽良, 高宏伟, 向小林. 嵌入式系统中农业大棚环境控制技术的研究. 沈阳理工大学学报, 2016, 35(3): 12-16.
- [56] 安宁. 花卉温室大棚智能控制系统设计与实现. 北京工业大学, 2016.
- [57] 韩明月. 面向智慧农业的物联网自动控制系统设计. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [58] Wang Y, Yang X, Chen Y, et al. A biorobotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish. *Science Robotics*, 2017, 2(10): eaan8072.
- [59] 赵晓璐, 刘琨. 基于ZigBee技术的智慧农业实时采集和远程控制系统. 农业工程技术, 2017, 37(6): 35-36.
- [60] 刘家玉, 周林杰, 荀广连, 等. 基于物联网的智能农业管理系统研究与设计——以江苏省农业物联网平台为例. 江苏农业科学, 2013, 41(5): 377-379.
- [61] 张浩伟. 基于智能控制和云平台技术的远程植物工厂系统研究. 天津工业大学, 2017.
- [62] 陈荣荣, 顾靖峰. 智能农业温室环境远程监控系统在蔬菜基地的实践应用. 农业装备技术, 2014(1): 24-27.
- [63] 李茹. 基于物联网的智能农业远程监控系统的设计. 曲阜师范大学, 2016.
- [64] 濮永仙. 物联网智能农业系统在瓜果生产中的应用研究. 科技广场, 2016(1): 92-97.
- [65] 王冉, 徐本崇, 魏瑞成, 等. 基于无线传感网络的畜禽舍环境监控系统的设计与实现. 江苏农业学报, 2010, 26(3): 562-566.
- [66] 吴晓行. 南京市智慧农业发展现状及对策探析. 江苏科技信息, 2017(3): 6-10.

The latest progress in the research and application of smart agriculture in China

Shen Ge, Wu Wenbin^{*}, Shi Yun, Yang Peng, Zhou Qingbo

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: [**Purpose**] This paper reviews and comments on the latest progress in the research and application of smart agriculture in China and prospects the future development of smart agriculture. [**Method**] On the basis of systematically summarizing the research literature on smart agriculture, this paper deeply analyzes the research progress and application status of smart agricultural core areas such as agricultural perception, transmission, analysis, control, and application, and scientifically forecasts the direction of smart agricultural development in the future. [**Result**] According to the research, sensors, GPS, remote sensing, and RFID technologies have formed the technical system of agricultural intelligence perception, and sensor technology is currently the most widely used. The mode of data transmission in smart agriculture includes wired communication transmission, wireless communication transmission and combination of these two ways. The combination of wireless transmission and wired transmission is the commonly used data transmission mode, and ZigBee technology is the most widely used non line transmission mode. Simulation models, big data technologies, and cloud computing technologies are key technologies for smart diagnostic analysis. Smart farms, smart orchards, smart farming, agricultural management, agricultural management and services are the main application areas of smart agriculture. [**Conclusion**] Technical issues such as data security standards, data fusion, data mining, integration of key technologies and system, in-depth research on intelligent fields based on remote sensing data acquisition system surrounding the integration of sky and space, innovative research on smart agricultural development models and promotion models are the direction of the future research and development of the smart agriculture.

Key words: smart agriculture; perception; transmission; analysis; control; application