第42卷 第3期　　华 中 农 业 大 学 学 报　　Vol.42 No.3
2023年 5月　　Journal of Huazhong Agricultural University　　May 2023,29～38

郑倩,李鹏云,周迪.基于文献计量学的智慧农业研究现状及趋势分析[J].华中农业大学学报,2023,42(3):29-38.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.03.004

基于文献计量学的智慧农业研究现状及趋势分析

郑倩,李鹏云,周迪

华中农业大学图书馆,武汉 430070

摘要　智慧农业融合了现代信息技术、农业机械装备和生物技术,是现代农业的发展趋势。我国正处在从传统农业向智慧农业的转型初期,为给我国智慧农业的发展和研究提供参考借鉴,本研究运用文献计量学方法,分析了SCIE数据库收录的全球智慧农业领域的40 812篇相关文献,对智慧农业的核心知识元素、研究主题和前沿热点进行了深入分析。结果显示,2016年后全球智慧农业领域文献量大幅度增长,中国是全球在该领域发展最为迅速的国家。对智慧农业近10年的632篇高被引论文关键词进行共现聚类显示,智慧农业的核心知识元素包括遥感、人工智能、无人机、物联网和大数据;智慧农业可分为三大研究主题:以生物大数据为代表的现代生物技术,以物联网、人工智能和遥感为代表的信息技术,以无人机和农业机器人为代表的智能农机装备。智慧农业的发展是多学科交叉融合实现农业生产高度精确化、智能化、高效化的过程。关键词演化分析显示,以物联网为代表的信息感知、处理和管理以及以机器学习和深度学习为代表的人工智能算法是近年来智慧农业研究的前沿热点。从政策制定、人才培养和核心技术等方面对智慧农业的未来发展进行了讨论,提出通过布局重点领域、培养新型应用型人才和开发原创性成果等方面实现我国农业转型升级。

关键词　智慧农业;精细农业;文献计量学;研究态势;可视化分析

中图分类号　S126;G250.73　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2023)03-0029-10

随着物联网、大数据、云计算、人工智能、第五代移动通信(5G)等新一代信息技术在农业领域的广泛应用,以及农业机械或装备的智能化发展,以智慧农业为表现形态的“农业4.0”时代已经到来[1-2]。关于智慧农业的概念,国内外学者在不同时期从不同角度进行了阐述[3-6]。技术视角学者认为,智慧农业是新一代信息通信技术与农业现代化深度融合的科学技术体系。产业视角学者认为,智慧农业是现代信息技术融入农业全产业链发展,是现代农业发展的高级形态。赵春江院士在最近的文献中指出:智慧农业是“以信息和知识为核心要素,通过现代信息技术和智能装备等与农业深度跨界融合,实现农业生产全过程的信息感知、定量决策、智能控制、精准投入、个性化服务的全新农业生产方式,是农业信息化发展从数字化到网络化再到智能化的高级阶段”[7]。智慧农业融合了农业生物技术、信息技术和农业智能化装备三大生产力要素,具备先进的生产力特征,也是未来最活跃的农业生产力[7]。

近年来,我国在智慧农业发展方面进行了一系列部署,自2016年以来,党中央国务院提出了乡村振兴战略规划、国家大数据战略以及《数字乡村发展战略纲要》等国家重大战略和规划。2021年中央一号文件《中共中央 国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见》提出,“发展智慧农业,建立农业农村大数据体系,推动新一代信息技术与农业生产经营深度融合”。2022年中央一号文件进一步提出“推进种业领域国家重大创新平台建设”“启动农业生物育种重大项目”“加快实施农业关键核心技术攻关工程”。2023年中央一号文件首次提出加快生物育种产业化步伐,更加重视生物育种带来的产业变革。在国家政策大力引领下,我国农业智能装备、北斗农机自动导航驾驶、无人农场、高通量植物表型平台等智慧农业科技取得了巨大的进步[8-10]。

文献计量学是以文献或文献相关媒介为研究对象,采用数学、统计学等计量方法,研究文献和文献工作系统的数量关系和规律,以及探讨科学技术动

收稿日期:2023-03-01
基金项目:湖北省知识产权局专利信息公共服务基础资源建设项目;华中农业大学图书馆馆内科研项目
郑倩,E-mail:qianzheng@mail.hzau.edu.cn
通信作者:周迪,E-mail:zd@mail.hzau.edu.cn

态特征的一门学科[11]。近年来，文献计量学已被应用于智慧农业领域的研究态势分析。如任妮等[12]从智慧农业核心的信息技术出发，基于Web of Science数据库，利用文献计量和知识图谱等方法，对全球智慧农业的研究概况、研究群体的竞争力、研究重点与热点等进行深入分析及可视化展示；杨道邦等[13]对CNKI和Web of Science数据库中与智慧农业相关的2 025篇期刊文献进行计量分析和可视化分析，梳理和归纳了国内外智慧农业的研究现状、热点和趋势，并对国内外研究进行对比分析；洪帅等[14]通过分析CNKI数据库中245篇智慧农业主题相关文献，梳理了中国智慧农业研究演进脉络并分析了前沿趋势。现阶段智慧农业文献计量学的相关研究，在文献检索上主要是在数据库中简单地对“智慧农业”进行主题检索，缺少技术要素的检索，或在技术层面上侧重于现代信息技术与农业的深度融合，针对智慧农业融合现代信息技术、生物技术、工程技术等多学科的特点进行文献计量分析的研究尚未见报道。为全面了解全球智慧农业的发展脉络和研究动态，本研究从智慧农业的三大生产力要素——农业生物技术、信息技术和工程技术出发，基于SCIE（科学引文索引）检索并分析了来自全球193个国家的40 812篇智慧农业相关文献，利用可视化软件VOSviewer绘制了智慧农业领域近10年632篇高被引论文的知识图谱，对其研究现状、热点、趋势进行了分析，旨在揭示全球智慧农业领域的学术研究态势，为未来理论研究、学科建设和实践决策提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究文献数据来源于Web of Science（WoS）核心合集中的科学引文索引（science citation index expanded，SCIE）数据库，检索年限为1960－2022年，文献类型限定为论文和综述，语种限定为英语（检索日期为2022年11月15日）。本研究用于检索的关键词以赵春江[7]关于智慧农业的概念和特征为依据，参考教育部《新农科人才培养引导性专业指南》中智慧农业新农科人才培养目标：“通过互联网、物联网、大数据、云计算、人工智能等现代信息技术与农业深度融合，注重农业智慧生产、作物信息学、智能装备、农业产业链经营与管理等知识能力的训练，培养具有‘三农’情怀、良好的理学基础和人文素养、能够将现代生物技术、信息技术、现代工程技术、现代农业管理知识与农学有机融合，能胜任现代农业及相关领域的教学科研、产业规划、经营管理、技术服务等工作的拔尖创新型、复合型人才”，采用智慧农业关键技术组合不同农业领域（如作物、畜禽、水产、果蔬、园艺、植物保护、育种等）的检索方法，检索得到的40 812篇文献用于发文量和贡献度分析。

高被引论文数据来自基本科学指标（essential science indicators，ESI）数据库（2022年11月10日更新，覆盖2012年到2022年8月的数据），ESI数据库所标注的高被引论文是指近10年来累计被引频次进入各学术领域前1%的优秀论文，能够反映学科研究热点与前沿。在WoS-SCIE检索结果页面对40 812篇文献进一步精炼，选择“高被引论文”，筛选出796篇高被引论文，人工去除不相关文献和作者关键词信息缺失的文献后，得到的632篇高被引论文用于知识图谱分析。

1.2 研究方法

使用WoS数据库平台中自带的分析功能和Excel软件对年度发文量、国家/区域、研究机构、学者的贡献度和影响力进行分析。使用可视化软件VOSviewer 1.6.17对高被引论文的关键词进行共现网络分析。先对作者关键词进行人工清洗，合并同义关键词，如：将“Internet of Things（IoT）”“Internet-of-Things”和“iot”合并成“Internet of Things”（物联网），去除数字等无义关键词。将高被引论文数据集导入VOSviewer后，计数方法设置为full counting，分析单元选择author keywords，关键词词频阈值设为3，对符合条件的175个关键词绘制可视化知识图谱。

2 结果与分析

2.1 发文量及发文主体分析

对智慧农业领域相关的40 812篇文献的年度发文趋势进行分析，结果显示，早期智慧农业发展缓慢，其研究主要涉及遥感技术在农业中的应用。1991年起智慧农业研究文献逐渐增长，2016年后进入快速发展期，发文量由2016年的1 838篇增长到2021年的7 124篇，文献数量飞速增长。中国（占比28.6%）和美国（占比23.8%）是发文最多的国家，且发文量明显高于其他国家，在全球智慧农业研究领域具有竞争优势。美国在智慧农业领域的研究起步较早，可检索到的最早文献发表于1974年；中国在1995年才开始发表该领域的第一篇相关文献，晚于美国至少20年，但在2011年后表现出较快的增长速

度，并于2017年年度发文量超过美国，成为全球在该领域年度发文量最多的国家。在文献影响力方面，美国的文献总被引频次最高，中国次之，在文献篇均被引频次方面，欧美发达国家要普遍高于发展中国家，其中荷兰位居全球第一。

在智慧农业领域发文较多的机构有中国科学院、美国农业部、法国国家农业食品与环境研究院、中国农业科学院等，而中国农业大学、瓦格宁根大学和浙江大学是发文量进入前10的高校，在此领域的科研实力较强。在学术影响力方面，美国的马里兰大学帕克分校、康奈尔大学和加利福尼亚大学戴维斯分校3所高校的篇均被引频次最高，比较而言，中国和印度研究机构的篇均被引频次较低。智慧农业领域发文量较高的中国学者有北京农林科学院的赵春江、杨贵军、冯海宽和李振海，中国科学院空天信息创新研究院的黄文江，南京农业大学的曹卫星和朱艳，浙江大学的何勇，华南农业大学的兰玉彬等；国外学者有美国农业部水文与遥感实验室的William P. Kustas和Martha C. Anderson，斯坦福大学的David B. Lobell，墨尔本大学的Pablo J. Zarco-Tejada等。其中，Pablo J. Zarco-Tejada发表的文献篇均被引频次最高，在智慧农业领域具有极高的影响力。

2.2　核心知识元素分析

借助VOSviewer可视化工具对智慧农业领域ESI高被引论文的关键词进行词频和共现分析，可以了解该领域的知识要素和研究重点。出现频次大于3的175个关键词中“遥感”这一关键词的节点最大，频次为87，是智慧农业研究中的重要内容；其次为“深度学习”“机器学习”“精细农业”“无人机”“物联网”“卷积神经网络”“人工智能”和“大数据”。农业遥感通过安装在卫星、飞行器（包括飞机和无人机）或农业机械上的传感器在远离目标和非接触目标物体条件下获取目标信息，在作物表型检测、土地使用监测、作物产量预测、精细农业、生态系统服务等农业领域得到了广泛应用[15]。使用无人机系统作为传感/通信平台是一项突破性技术，它作为一种低成本的替代技术引入环境监测、高空间和高时间分辨率图像采集，在农业生产中主要用于农田灌溉管理、施肥喷药、杂草管理等[16]。遥感技术的发展产生了海量的农业大数据，这就需要大量的技术知识来处理和管理，而人工智能因为利用大数据的潜力最近在农业领域中获得了极大的关注[17]。现阶段的人工智能一般指区别于人类自然智能的、可通过理性行为和数学优化等方法对输入数据进行模式化“学习”（如拟合、特征匹配等），并在特定条件下解决“目标问题”（如对象检测、关联分析、数据分类和趋势预测等）的决策系统，也指代可真正实现“智能”行为的算法[18]。机器学习是基于已有数据建立数学模型，用于识别、分类、量化及预测的人工智能方法[19]。深度学习是近年来发展最快和最受关注的机器学习方法，其概念源于人工神经网络，通过建立类似于人脑的分层模型结构，对输入数据逐级提取从底层到高层的特征，从而建立从底层信号到高层语义的映射关系[20]。在许多应用中，深度学习模型优于浅层机器学习模型和传统的数据分析方法，其代表算法有广泛用于图像识别和物体检测的卷积神经网络（CNN）[19-20]。农业物联网集农业信息感知、数据传输、智能信息处理技术于一体，将传感器、射频识别（RFID）、视觉采集终端等感知设备从大田种植、设施园艺、畜禽养殖、水产养殖、农产品物流等领域采集的农业数据，利用无线传感器网络、电信网和互联网等多种现代信息传输通道进行可靠传输，在数据融合和处理的基础上结合智能化终端实现农业的自动化生产、最优化控制、智能化管理等[21]。

2.3　研究主题分析

在VOSviewer关键词共现聚类视图中，智慧农业领域关键词形成了9个聚类，代表性的关键词依次是“高通量表型分析”“物联网”“深度学习”“机器学习”“遥感”“生态系统服务”“产量预测”“干旱监测”“无人机”。根据智慧农业的三大生产力要素——农业生物技术、信息技术和工程技术，智慧农业领域可分为三大研究主题：

1）以生物大数据为代表的现代生物技术。生物技术在农业中的一个重要应用就是培育高产、优质、抗病虫害、抗逆的植物品种和优良的动物品系，促进种植业和养殖业发展。生物技术应用过程中产生的生物大数据是智慧农业的重要数据来源。在聚类视图中，生物技术和生物大数据的相关研究包括以“高通量表型分析”和“产量预测”为代表的聚类，出现频次较高的关键词中，与生物大数据相关的有“高通量表型分析”“基因组学”“表型组学”“代谢组学”“宏基因组学”等；与分子育种技术相关的有“全基因组选择”“基因组预测”“CRISPR/Cas9”“基因组编辑”等；与应用领域相关的有“气候变化”“育种”“作物改良”“非生物胁迫”“产量预测”等。近年来，高通量测序（也即新一代测序）技术的发展和随之带来的一系列

组学应用是生物领域一个巨大的发展，生物大数据的积累是当今生命科学领域的一个重要特征[22]。随着先进传感器、机器视觉、人工智能、自动化技术在农业中的应用，作物高通量表型平台发展起来，提供了大量作物生长发育、产量、抗病性、非生物胁迫耐受性等不同性状的表型数据，解决了制约作物育种和功能基因组研究的瓶颈[10]。环境可控的室内表型平台、大田植物表型平台、航空机载平台等不同表型获取技术，能够以无损、快速和高通量的方式监测和量化作物生长和生产相关的多层次表型性状，然后通过数量性状位点（QTL）定位、标记辅助选择、基因组选择以及全基因组关联分析（GWAS），对作物进行遗传改良以满足不断变化的气候条件和市场需求[23]。整合了基因组、表型组、转录组、代谢组、表观基因组等数据的多组学研究，结合生物信息学和计算机技术的分析方法，加速了大量未知基因的功能解析。Zander等[24]系统研究了植物响应茉莉酸的整合多组学框架，鉴定茉莉酸调控机制的新组成部分，对培育抗虫作物品种有重要意义。Gui等[25]构建了1个玉米属综合数据库（ZEAMAP数据库），整合了玉米群体的基因组、转录组、表型组、代谢组、表观基因组、遗传变异以及遗传定位结果等多组学数据，促进了玉米的遗传育种和改良。全基因组选择最早在动物育种中提出，随后，该技术被植物育种家采用，用全基因组标记选择预测基因组估计育种值（GEBV）[26-27]。全基因组选择作为新一代育种技术，通过构建预测模型，可以对目标性状进行预测和定向选择，从而缩短世代间隔，加快育种进程，节约大量成本[28]。全基因组选择与基因组编辑、转基因等技术结合，使作物育种更加快速和精确，是未来农业技术发展的重要方向之一[29]。信息技术、智能装备和生物技术的融合引领作物育种向智能设计育种发展，世界种业进入到“育种4.0”时代[30-31]。

2）以物联网、人工智能和遥感为代表的信息技术。信息技术被广泛应用于农业生产的各个环节，在聚类图谱中包含多个聚类，分别是以“物联网”“深度学习”“机器学习”“遥感”“生态系统服务”“产量预测”“干旱监测”为代表的聚类，可归纳为物联网、人工智能、遥感三类。

①物联网。包括以“物联网”为代表的聚类，出现频次较高的关键词有“精细农业”“智慧农业”“数字农业”“物联网”“大数据”“区块链”“传感器”“云计算”等，应用的领域有“食品安全”“供应链”“溯源”“安全”“隐私”等。在信息技术应用到农业领域的过程中产生了许多与智慧农业相关的名词术语，如精细农业（precision agriculture）、数字农业（digital agriculture）、智能农业（intelligent agriculture），这些名词概念与智慧农业的侧重点有所不同，但信息和知识要素的本质不变，随着技术水平的不断发展，终将走向智慧农业[7]。通过传感器和通讯技术监测动植物生长状态、生长环境、自动化作业、农产品质量安全等，物联网被广泛应用于大田种植、设施园艺、畜禽养殖、水产养殖、农产品溯源等[32-33]。在食品安全领域，物联网主要被用于在食品供应链上追踪食品、监测食品安全和质量，最常用的通信技术是互联网、射频识别（RFID）和无线传感器网络（WSN）[34]。尽管物联网设备有很多优点，但也存在数据存储中心化和网络安全问题，而区块链技术具有去中心化、分布式、可追溯等优势，允许物联网设备相互交换数据，或将其安全、可靠地发送到云服务器[35]。Salah等[36]提出了1种利用以太坊区块链和智能合约进行商业交易的方法，以便在整个农业供应链中对大豆产品进行跟踪和追溯。Wang等[37]构建了基于区块链的稻米供应链信息监管模型，采用多种加密算法对供应链中企业的敏感数据进行加密，以满足监管机构高效监管的需要。物联网产生的大量数据需要进行计算、存储、访问和分析，云计算通过配置大量的计算资源共享模块，为终端设备提供计算和服务，其服务类型包括基础设施即服务（infrastructure as a service，IaaS）、平台即服务（platform as a service，PaaS）和软件即服务（software as a service，SaaS）[38]。

②人工智能。包括以“机器学习”和“深度学习”为代表的聚类。出现频次较高的关键词有“深度学习”“卷积神经网络”“计算机视觉”“高光谱成像”“机器学习”“随机森林”“支持向量机”“人工神经网络”“特征提取”“图像分割”“迁移学习”等；应用的领域有“目标检测”“图像处理”“作物产量预测”“植物病虫害”“果实检测”等。农作物拥有独特的颜色、纹理、形状等特征，人工智能技术可以通过图像识别和机器学习等技术，进行农田杂草检测和识别、农作物分类、农作物病虫害诊断、农作物长势监测和产量预测等。Jin等[39]提出了一种新的基于深度学习的杂草检测模型YOLOv3，该模型能准确识别蔬菜作物并将所有其他绿色物体分类为杂草。Jiang等[40]结合无人机可见光相机对水稻抗旱动态响应的不同阶段进行表型数据采集，基于改进后的VGG-16神经

网络模型提取水稻群体抗旱表型(如卷叶、含水量及抗旱指数等)。Wu等[41]通过无人机搭载高清相机获取玉米群体的田间图像,通过CNN模型实现对玉米叶枯病的精细鉴定。Ma等[42]利用卫星图像、气象数据、玉米历史产量等数据,开发了基于Bayesian networks的玉米产量预测模型,并验证了该模型的预测准确性。在食品行业,图像处理系统和人工智能可以根据产品尺寸和形状进行产品分类、缺陷检测、微生物检测和食品质量分级[43]。

③遥感。包括以"遥感"和"生态系统服务"为代表的聚类。出现频次较高的关键词中,涉及的技术方法包括"遥感""地理信息系统""卫星图像""陆地卫星(Landsat)""归一化差异植被指数(NDVI)""叶面积指数(LAI)""中分辨率成像光谱仪(MODIS)""时间序列""合成孔径雷达(SAR)""Google Earth Engine(GEE)"等,应用领域有"土地利用""土地覆被""生态系统服务""灌溉""作物产量""作物分类""作物监测"等。遥感在农业中的应用是基于不同农作物在植株和叶片结构、叶肉细胞、叶绿素、含水量等方面存在理化性质差异,导致植株冠层和叶片反射和发射的光谱不同,通过研究其光谱规律进行分析[15]。Google Earth Engine(GEE)是一个基于云的地理空间信息处理平台,常用于大规模环境监测和分析。Tamiminia等[44]根据2010—2019年间GEE相关的同行评审文献的分析,指出GEE相关研究数据主要来自中分辨率的光学卫星图像,特别是存档超过40年的陆地卫星数据,而线性回归和随机森林是卫星图像处理中最常用的算法。在实际应用中,光学遥感成像易受云雾干扰而无法获取遥感数据,而合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)不受天气影响,可全天时全天候对农作物生长、病虫害和土壤特性进行监测,是农业遥感领域的一个研究热点[45-46]。Zhan等[47]基于Sentinel-1A合成孔径雷达遥感时序数据和水稻移栽期前后呈现出下降-上升的"V"形特征,提出了一种雷达遥感水稻自动分类方法ARM-SARFS,适用于区域尺度的水稻空间分布自动制图。Wang等[48]基于Sentinel-1A合成孔径雷达数据和机器学习算法对中国东部沿海湿润地区盐渍土水分制图。

3)以无人机和农业机器人为代表的智能农机装备。智能农机相关研究包括以"无人机"为代表的聚类以及与"遥感""物联网""人工智能"交叉融合的聚类,出现频次较高的关键词有"无人机""高光谱""多光谱成像""激光雷达""面向对象的影像分析技术(OBIA)""农业机器人""温室""智能农业";应用领域有"杂草检测""智慧灌溉""智慧种植""植物病害""果实检测"等。利用无人机搭载成像装置或传感器收集信息,用于农业监测、管理和决策,是目前智慧农业的一个主要研究趋势。Malambo等[49]利用无人机系统高分辨率图像生成的3D点云估算大田种植的玉米和高粱的植株高度。Deng等[50]利用多旋翼无人机同时搭载窄波段Mini-MCA6和宽波段Sequoia 2种多光谱传感器收集田间多个采样点的玉米多光谱图像,对比分析了多光谱传感器的性能及其在精准农业应用中的优势。Xu等[51]开发了1种集成3个摄像头(RGB、多光谱和热成像)和1个激光雷达传感器的无人机,用于植物表型分析和精细作业。智慧农机具有智能感知、自动导航、精准作业和智慧管理的功能,为无人农场提供了物质支撑[8]。Virlet等[52]建立了一个全自动机器人田间表型平台,搭载有高分辨率可见光、叶绿素荧光和热红外摄像机、2台高光谱成像仪和2台3D激光扫描仪,通过在轨道装置上沿XYZ三维坐标方向重复移动感应箱,获取田间作物的全方位表型性状。Tang等[53]综述了数字图像处理技术和深度学习算法在水果识别和定位中的应用,指出了提高水果采摘机器人识别和定位成功率需要解决光照变化和遮挡环境下的目标识别、动态干扰环境下的目标跟踪、三维目标重建和农业机器人视觉系统容错。对智慧农机的视觉感知、作业路径、工作时间等数据进行人工智能分析和改进优化,有利于提高智慧农机的工作效率和准确性。Yan等[54]提出了一种改进的YOLOv5s苹果目标检测方法,为苹果采摘机器人实时准确检测多个目标提供了技术支持。

2.4　前沿热点分析

利用VOSviewer,基于关键词共现网络对智慧农业领域关键词进行演化分析,结果显示,遥感技术在较早的时期就被大量研究应用;"物联网""机器学习""深度学习"是近年来的研究热点。

早期的地理信息系统、土地利用效率、土地覆盖面积等分析多采用中/低空间分辨率的遥感影像。随着高分辨率遥感卫星的发射,"Sentinel-1""Sentinel-2"和"Google Earth Engine"加上人工智能方法的应用成为该领域的最新研究热点。这些前沿技术大幅提高了农作物分类和信息数据的准确度,实现了高精度的作物长势特征的大面积监测、农田土壤

水分动态监测、农作物分类和生物量预测等[55-56]。从“遥感”关键词的词频来看，遥感技术出现在大量农业研究文献中，在智慧农业研究领域占有重要地位。

随着网络技术和5G的发展，以物联网为代表的信息感知、信息处理和信息管理成为近年来智慧农业领域的前沿热点。近年来，物联网领域研究热点包括“安全”“供应链”“传感器”“边缘计算”“雾计算”等。智慧农业的快速发展对传感器的敏感性、精确性、实用性提出了更高要求。由于终端设备类型和数据的不断增加，云端物联网面临数据安全和延迟等问题，已无法满足快速处理数据的要求。面对这些挑战，计算范式正在从集中式云计算转向分布式边缘计算[57]。近年来，一些新的计算范式已经出现，如：透明计算、移动边缘计算、雾计算和微云（Cloudlet）等，利用网络边缘的分布式资源来提供实时和情景感知服务[58]。Firouzi等[59]提出了边缘-雾-云物联网的整体参考架构，并讨论了主要的设计和部署考虑因素（如服务模型、基础设施设计、供应、资源分配、卸载、服务迁移、性能评估和安全问题）。

机器学习和深度学习是近年来智慧农业领域的研究重点和热点。随着大数据时代的到来，形成了“机器学习”“深度学习”“神经网络”“人工智能”“农业机器人”“语义分割”“产量预测”“植物病害”等前沿热点。人工智能技术立足于神经网络，同时发展出多层神经网络，进行深度机器学习。随着大数据不断积累，深度学习和强化学习等算法根据不同的训练数据不断训练，拥有自优化的能力[60]。随着深度神经网络（DNN）和卷积神经网络（CNN）等模型的成熟，人工智能被大规模应用到农业研究各个领域，包括数据采集、多组学整合、全基因组选择、基因挖掘、病虫害诊断、杂草检测等方面。在作物表型检测中选择不同的分割算法（如R-CNN，VGG等）对可见光或多光谱图像的特定区域或动态变化进行数字化提取。在育种领域，深度学习模型用于性状预测，有助于提高全基因组选择精确度。Ma等[61]构建了基于CNN的DeepGS模型对籽粒性状进行预测。Liu等[62]使用的双CNN模型，相比于单个模型，有更好的预测效果。Sandhu等[63]利用MLP（多层感知器）和CNN 2种深度学习算法在春小麦不同性状的预测中都获得了较好的预测精确度。然而目前的人工智能还只是应用在数据收集、处理和分析等特定场景或单一任务，距离人类认知水平，甚至超越人类智慧的人工智能还有很长一段距离[18]。未来的人工智能算法还需要融合多尺度、多维度和大规模验证，提高图像表型与农艺性状的解析力，加快基因挖掘和分子育种，实现农业生产智能化和自动化，为农作物精准管控、全基因组选择育种和农业生产智能管理提供解决方案。

3 结论与展望

随着土地资源的减少、极端气候带来的环境恶化，全球人口持续增长，传统农业生产方式亟待转型。本研究运用文献计量学方法，统计和分析了智慧农业领域发表的文献，表明智慧农业作为一门交叉学科，集成了信息技术、工程技术和生物技术。

3.1 研究结论

从科研文献产出的时间来看，中国在智慧农业领域研究起步要比欧美发达国家晚至少20年。然而，中国是全球在该领域发展最为迅速的国家。近年来，我国智慧农业相关研究发文量增长迅速，2017年年度发文量超过欧美国家，目前是全球在该领域发文最多的国家，但科研影响力还有待提高。基于知识图谱分析，智慧农业的核心知识元素可概括为：遥感、人工智能、无人机、物联网和大数据。根据智慧农业的三大生产力要素——农业生物技术、信息技术和工程技术，以及VOSviewer生成的关键词共现聚类视图，智慧农业领域未来5年仍将聚焦三大研究主题：以生物大数据为代表的现代生物技术，以物联网、人工智能和遥感为代表的信息技术，以无人机和农业机器人为代表的智能农机装备。

1）现代生物技术融合生物大数据加速生物育种。农业遥感和作物高通量表型提供了大量作物生长发育、产量、抗病性、非生物胁迫等不同性状的表型数据，结合基因组、转录组、代谢组、表观基因组等多组学数据，利用生物信息学分析方法，加速了大量未知基因的克隆和功能解析。基于大量表型和基因型数据，优化深度学习模型用于性状预测，提高了全基因组选择的精确度。全基因组选择与基因组编辑、转基因等技术结合，使作物育种更加快速和精确，是未来农业技术发展的重要方向之一。

2）信息技术为智慧农业提供了系统支撑。以农业物联网、人工智能和遥感为代表的信息技术大量应用在农业生产过程中，实现农业的数字化、精准化、智慧化发展。信息技术的快速发展对农业物联网感知技术提出了更高要求，亟需提高传感器的敏

感性、精确性、实用性。面对终端设备类型和数据的不断增加，云端物联网出现数据安全和延迟等问题，计算范式正在从集中式云计算转向分布式边缘计算。透明计算、移动边缘计算、雾计算和微云等新的计算范式已经出现，以满足实时、快速处理数据的要求。构建区块链和农产品质量监管体系，对农业生产和供应进行跟踪和追溯，提高了整个产业链的信息透明度。

3)智能农机装备为智慧农业提供基础保障。以无人机和农业机器人为代表的智能农机装备将物联网、大数据、人工智能等信息技术引入农业生产，实现智能感知、自动导航、精准作业和智慧管理。利用无人机或农业机器人搭载多种成像装置或多光谱传感器，结合数字图像处理技术和深度学习算法，提高智慧农机装备的工作效率和准确性，是目前智慧农业的一个主要研究趋势。

3.2 展　望

目前，我国智慧农业进入了快速发展时期，也是追赶国际领先技术的关键时期。基于文献计量学分析和我国农业发展特点，对我国以智慧农业为技术特征的农业强国建设，提出以下3点建议：

1) 加强政府支持和智慧农业相关政策制定。农业是国之根本，是我国的第一产业，是国家长治久安和人民丰衣足食的重要保障。自2016年以来，国家相关部门陆续发布一系列措施，促进农业生产向智能化转型，加快生物育种产业化步伐。在国家政策大力引领下，我国农业智能装备、无人机、无人农场、智能管理等智慧农业科技取得了巨大的进步。建议在重点领域，包括生物育种、智能算法、智能装备等智慧农业核心技术，加强政府支持，布局和实施一批智慧农业重点项目。对智慧农业技术产品提供政策性补贴，加强引导和示范，鼓励农户和企业向智慧农业转变。加快农村信息化基础设施建设和信息传输，推进智能化作业和规模化生产。

2)加强智慧农业学科建设和人才培养。作为多学科交叉合作的研究领域，智慧农业整合生物学、信息学、计算机科学和工程学等多学科和交叉学科人才的共同协作，这对仅具有单向知识背景的研究者是一个巨大的挑战，不少科研单位探索创建智慧农业相关专业和研学平台。建议在高校开设智慧农业相关课程，大量开展智慧农业实践课程，培养符合智慧农业需求的人员；鼓励信息、工程、人工智能等领域人才进入农业领域开展相关科学研究与应用推广。华中农业大学于2020年正式获批智慧农业本科生专业，是全国第一批设立智慧农业专业的学校。2022年，华中农业大学成立智慧农业书院，为培养具有创新型、复合型的智慧农业领域人才创造了条件。未来研究需要构建跨学科背景下的智慧农业知识体系、培训模式和跨学科合作机制，加强生物技术、信息技术、工程技术专家的交流和合作，充分利用多方面的师资力量，打造多学科交叉融合的创新型复合人才队伍。

3)加强智慧农业关键核心技术攻关。近年来，我国智慧农业在取得了大量成果的同时，还应该明确，我国智慧农业仍缺乏基础研究和核心技术积累。当今热点领域包括农业传感器、高性能芯片、智能终端、农业机器人、农业专用卫星、农业人工智能等，需要加强研发，并鼓励原创性成果，开辟智能农业新赛道。建议联合科研单位和企业，优化现有传感器的准确性、稳定性，研发高精度农业传感器，并逐步降低其成本，打破国外技术垄断；加强智能农机装备的研发、专利布局和生产，建设无人农场，推进智慧生产的示范作用；开发人工智能算法，深度融合人工智能与农业大数据，建立高精度的农业模型；通过对人、机、物等的全面连接，对农产品从生产到销售进行全流程跟踪式监测和管理，构建覆盖农业全产业链、全价值链的全新农业生产和服务体系；健全农业大数据安全管理制度，完善网络安全技术手段，保障农业网络和信息安全。

参考文献 References

[1] 赵春江.智慧农业发展现状及战略目标研究[J].智慧农业，2019(1)：1-7.ZHAO C J.State-of-the-art and recommended developmental strategic objectivs of smart agriculture[J].Smart agriculture，2019(1)：1-7 (in Chinese with English abstract).

[2] 罗锡文，廖娟，臧英，等.我国农业生产的发展方向：从机械化到智慧化[J].中国工程科学，2022，24(1)：46-54.LUO X W，LIAO J，ZANG Y，et al.Developing from mechanized to smart agricultural production in China[J].Strategic study of CAE，2022，24(1)：46-54 (in Chinese with English abstract).

[3] YANG X，SHU L，CHEN J N，et al.A survey on smart agriculture：development modes，technologies，and security and privacy challenges[J].IEEE/CAA journal of automatica sinica，2020，8(2)：273-302.

[4] 汪懋华.助力乡村振兴推进“智慧农业”创新发展[J].智慧农业，2019，1(1)：3.WANG M H.Helping rural revitalization and promoting the innovative development of “smart agriculture”[J].Smart agriculture，2019，1(1)：3 (in Chinese).

[5] JAYARAMAN P P，YAVARI A，GEORGAKOPOULOS D，et al.Internet of Things platform for smart farming：experiences and

lessons learnt[J/OL]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 16(11):1884[2023-03-01].https://doi.org/10.3390/s1611188.4.

[6] 李道亮.物联网与智慧农业[J].农业工程,2012,2(1):1-7.LI D L.Internet of Things and wisdom agriculture[J].Agricultural engineering,2012,2(1):1-7 (in Chinese with English abstract).

[7] 赵春江.智慧农业的发展现状与未来展望[J].华南农业大学学报,2021,42(6):1-7.ZHAO C J.Development status and future prospect of smart agriculture[J].Journal of South China Agricultural University,2021,42(6):1-7 (in Chinese with English abstract).

[8] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J].华南农业大学学报,2021,42(6):8-17,5.LUO X W,LIAO J,HU L,et al.Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J].Journal of South China Agricultural University,2021,42(6)8-17,5 (in Chinese with English abstract).

[9] 胡静涛,高雷,白晓平,等.农业机械自动导航技术研究进展[J].农业工程学报,2015,31(10):1-10.HU J T,GAO L,BAI X P,et al.Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10 (in Chinese with English abstract).

[10] YANG W N, FENG H, ZHANG X H, et al. Crop phenomics and high-throughput phenotyping: past decades, current challenges, and future perspectives[J]. Molecular plant, 2020, 13(2): 187-214.

[11] 邱均平.文献计量学的定义及其研究对象[J].中国图书馆学报,1986,12(2):71.QIU J P.Definition of bibliometrics and its research object[J].Journal of library science in China,1986,12(2):71(in Chinese).

[12] 任妮,郭婷,孙艺伟,等.全球智慧农业领域研究态势分析[J].农业图书情报学报,2021(9):48-63.REN N,GUO T,SUN Y W,et al.An analysis of global smart agriculture research situation[J].Journal of library and information science in agriculture,2021(9):48-63 (in Chinese with English abstract).

[13] 杨道邦,林婕虹,邓杰,等.基于CiteSpace的国内外智慧农业研究进展[J].广东农业科学,2021,48(4):140-150.YANG D B,LIN J H,DENG J,et al.Research progress of smart agriculture based on CiteSpace at home and abroad[J].Guangdong agricultural sciences,2021,48(4):140-150(in Chinese with English abstract).

[14] 洪帅,王天尊,符晓艺.中国智慧农业研究演进脉络梳理及前沿趋势分析[J].江苏农业科学,2023,51(4):28-38.HONG S,WANG T Z,FU X Y.Research evolution and frontier trend analysis of smart agriculture in China[J].Jiangsu agricultural sciences,2023,51(4):28-38(in Chinese).

[15] WEISS M,JACOB F,DUVEILLER G.Remote sensing for agricultural applications: a meta-review[J/OL].Remote sensing of environment,2020,236:111402[2023-03-01].https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402.

[16] BOURSIANIS A D, PAPADOPOULOU M S, DIAMANTOULAKIS P, et al. Internet of Things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: a comprehensive review[J/OL]. Internet of Things, 2022, 18: 100187[2023-03-01].https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187.

[17] JUNG J, MAEDA M, CHANG A J, et al. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems[J].Current opinion in biotechnology,2021,70:15-22.

[18] 周济,陈佳玮,沈利言,等.人工智能——推动植物研究发展的新动力[J].南京农业大学学报,2022,45(5):1060-1071. ZOU J, CHEN J W, SHEN L Y, et al. Artificial intelligence: advancing plant research beyond the state of the art[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2022, 45(5): 1060-1071 (in Chinese with English abstract).

[19] JANIESCH C,ZSCHECH P,HEINRICH K.Machine learning and deep learning[J].Electronic markets,2021,31(3):685-695.

[20] LECUN Y,BENGIO Y,HINTON G.Deep learning[J].Nature,2015,521(7553):436-444.

[21] 李道亮,杨昊.农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J].农业机械学报,2018,49(1):1-20. LI D L, YANG H. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2018,49(1):1-20 (in Chinese with English abstract).

[22] 张学工,江瑞,汪小我,等.从生物大数据到知识大发现:10年进展与未来展望[J].科学通报,2016,61(36):3869-3877. ZHANG X G,JIANG R,WANG X W,et al.From big biological data to big discovery: the past decade and the future[J].Chinese science bulletin, 2016, 61(36): 3869-3877 (in Chinese with English abstract).

[23] LI D L, QUAN C Q, SONG Z Y, et al. High-throughput plant phenotyping platform (HT3P) as a novel tool for estimating agronomic traits from the lab to the field[J/OL].Frontiers in bioengineering and biotechnology, 2021, 8: 623705[2023-03-01]. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.623705.

[24] ZANDER M, LEWSEY M G, CLARK N M, et al. Integrated multi-omics framework of the plant response to jasmonic acid[J]. Nature plants,2020,6(3):290-302.

[25] GUI S T,YANG L F,LI J B,et al.ZEAMAP,a comprehensive database adapted to the maize multi-omics era[J/OL].iScience,2020,23(6):101241[2022-03-01].https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101241.

[26] MEUWISSEN T H E,HAYES B J,GODDARD M E.Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps[J].Genetics,2001,157(4):1819-1829.

[27] LORENZANA R E,BERNARDO R.Accuracy of genotypic value predictions for marker-based selection in biparental plant populations[J]. Theoretical and applied genetics, 2009, 120(1): 151-161.

[28] MCGOWAN M, WANG J, DONG H, et al. Ideas in genomic selection with the potential to transform plant molecula breeding: a review[J]. Plant breeding reviews, 2021,45: 273-319.

[29] XU Y B,LIU X G,FU J J,et al.Enhancing genetic gain through genomic selection: from livestock to plants[J /OL]. Plant communications,2020,1(1):100005[2023-03-01].https://doi.org/10.1016/j.xplc.2019.100005.

[30] 张颖,廖生进,王璟璐等.信息技术与智能装备助力智能设计育种[J].吉林农业大学学报,2021,43(2):119-129. ZHANG Y, LIAO S J, WANG J L, et al. Information technology and intelligent equipment facilitating smart breeding[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021, 43(2): 119-129 (in Chinese with English abstract).

[31] WALLACE J G, RODGERS-MELNICK E, BUCKLER E S. On the road to breeding 4.0: unraveling the good, the bad, and the boring of crop quantitative genomics[J]. Annual review of genetics, 2018, 52: 421-444.

[32] FRIHA O, FERRAG M A, SHU L, et al. Internet of Things for the future of smart agriculture: a comprehensive survey of emerging technologies[J]. IEEE/CAA journal of automatica sinica, 2021, 8(4): 718-752.

[33] PHASINAM K, KASSANUK T, SHABAZ M. Applicability of Internet of Things in smart farming[J/OL]. Journal of food quality, 2022: 7692922[2023-03-01]. https://doi.org/10.1155/2022/7692922.

[34] BOUZEMBRAK Y, KLÜCHE M, GAVAI A, et al. Internet of Things in food safety: literature review and a bibliometric analysis[J]. Trends in food science & technology, 2019, 94: 54-64.

[35] ALKHATEEB A, CATAL C, KAR G, et al. Hybrid blockchain platforms for the Internet of Things (IoT): a systematic literature review[J/OL]. Sensors, 2022, 22(4): 1304[2023-03-01]. https://doi.org/10.3390/s22041304.

[36] SALAH K, NIZAMUDDIN N, JAYARAMAN R, et al. Blockchain-based soybean traceability in agricultural supply chain[J]. IEEE access, 2019, 7: 73295-73305.

[37] WANG J, ZHANG X, XU J P, et al. Blockchain-based information supervision model for rice supply chains[J/OL]. Computational intelligence and neuroscienc, 2022: 2914571[2023-03-01]. https://doi.org/10.1155/2022/2914571.

[38] DÍAZ M, MARTÍN C, RUBIO B. State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of Internet of Things and cloud computing[J]. Journal of network and computer applications, 2016, 67: 99-117.

[39] JIN X J, SUN Y X, CHE J, et al. A novel deep learning-based method for detection of weeds in vegetables[J]. Pest management science, 2022, 78(5): 1861-1869.

[40] JIANG Z, TU H F, BAI B W, et al. Combining UAV-RGB high-throughput field phenotyping and genome-wide association study to reveal genetic variation of rice germplasms in dynamic response to drought stress[J]. New phytologist, 2021, 232(1): 440-455.

[41] WU H, WIESNER-HANKS T, STEWART E L, et al. Autonomous detection of plant disease symptoms directly from aerial imagery[J]. The plant phenome journal, 2019, 2(1): 1-9.

[42] MA Y C, ZHANG Z, KANG Y H, et al. Corn yield prediction and uncertainty analysis based on remotely sensed variables using a Bayesian neural network approach[J/OL]. Remote sensing of environment, 2021, 259: 112408[2023-03-01]. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112408.

[43] CHEN T C, YU S Y. The review of food safety inspection system based on artificial intelligence, image processing, and robotic[J]. Food science and technology, 2022, 42(15): 45-46.

[44] TAMIMINIA H, SALEHI B, MAHDIANPARI M, et al. Google Earth Engine for geo-big data applications: a meta-analysis and systematic review[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2020, 164: 152-170.

[45] ZHANG X, WU B F, PONCE-CAMPOS G, et al. Mapping up-to-date paddy rice extent at 10 M resolution in China through the integration of optical and synthetic aperture radar images[J/OL]. Remote sensing, 2018, 10(8): 1200[2023-03-01]. https://doi.org/10.3390/rs10081200.

[46] LI H P, ZHANG C, ZHANG S Q, et al. Crop classification from full-year fully-polarimetric L-band UAVSAR time-series using the random forest algorithm[J/OL]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2020, 87: 102032[2023-03-01]. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102032.

[47] ZHAN P, ZHU W Q, LI N. An automated rice mapping method based on flooding signals in synthetic aperture radar time series[J/OL]. Remote sensing of environment, 2021, 252: 112112[2023-03-01]. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112112.

[48] WANG J J, WU F, SHANG J L, et al. Saline soil moisture mapping using Sentinel-1A synthetic aperture radar data and machine learning algorithms in humid region of China's east coast[J/OL]. CATENA, 2022, 213: 106189[2023-03-01]. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106189.

[49] MALAMBO L, POPESCU S C, MURRAY S C, et al. Multitemporal field-based plant height estimation using 3D point clouds generated from small unmanned aerial systems high-resolution imagery[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2018, 64: 31-42.

[50] DENG L, MAO Z H, LI X J, et al. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: a comparison between different cameras[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2018, 146: 124-136.

[51] XU R, LI C Y, BERNARDES S. Development and testing of a UAV-based multi-sensor system for plant phenotyping and precision agriculture[J/OL]. Remote sensing, 2021, 13(17): 3517[2023-03-01]. https://doi.org/10.3390/rs13173517.

[52] VIRLET N, SABERMANESH K, SADEGHI-TEHRAN P, et al. Field scanalyzer: an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring[J]. Functional plant biology, 2016, 44(1): 143-153.

[53] TANG Y C, CHEN M Y, WANG C L, et al. Recognition and localization methods for vision-based fruit picking robots: a review[J/OL]. Frontiers in plant science, 2020, 11: 510[2023-03-01]. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00510.

[54] YAN B, FAN P, LEI X Y, et al. A real-time apple targets detection method for picking robot based on improved YOLOv5[J/OL]. Remote sensing, 2021, 13(9): 1619[2023-03-01]. https://doi.org/10.3390/rs13091619.

[55] YANG S T, GU L J, LI X F, et al. Crop classification method based on optimal feature selection and hybrid CNN-RF networks for multi-temporal remote sensing imagery[J/OL]. Remote sensing, 2020, 12(19): 3119[2023-03-01]. https://doi.org/10.3390/rs12193119.

[56] ZHANG Y, SHAO Z F. Assessing of urban vegetation biomass in combination with LiDAR and high-resolution remote sensing images[J]. International journal of remote sensing, 2021, 42(3): 964-985.

[57] SHI W S, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things journal, 2016, 3(5): 637-646.

[58] REN J, ZHANG D Y, HE S W, et al. A survey on end-edge-

cloud orchestrated network computing paradigms: transparent computing, mobile edge computing, fog computing, and cloudlet [J].ACM computing surveys, 2019, 52(6): 1-36.

[59] FIROUZI F, FARAHANI B, MARINŠEK A. The convergence and interplay of edge, fog, and cloud in the AI-driven Internet of Things (IoT) [J/OL]. Information systems, 2022, 107: 101840 [2023-03-01].https://doi.org/10.1016/j.is.2021.101840.

[60] 兰玉彬, 王天伟, 陈盛德, 等. 农业人工智能技术:现代农业科技的翅膀[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(6): 1-13.LAN Y B, WANG T W, CHEN S D, et al. Agricultural artificial intelligence technology: wings of modern agricultural science and technology [J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(6): 1-13(in Chinese with English abstract).

[61] MA W L, QIU Z X, SONG J, et al. A deep convolutional neural network approach for predicting phenotypes from genotypes[J]. Planta, 2018, 248(5): 1307-1318.

[62] LIU Y, WANG D L, HE F, et al. Phenotype prediction and genome-wide association study using deep convolutional neural network of soybean [J/OL]. Frontiers in genetics, 2019, 10: 1091 [2023-03-01].https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01091.

[63] SANDHU K S, LOZADA D N, ZHANG Z W, et al. Deep learning for predicting complex traits in spring wheat breeding program[J/OL]. Frontiers in plant science, 2021, 11: 613325[2023-03-01].https://doi.org/10.3389/fpls.2020.613325.

Current status and trend of studying smart agriculture based on bibliometric analysis

ZHENG Qian, LI Pengyun, ZHOU Di

Library of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, *China*

Abstract Smart agriculture integrates modern information technology, agricultural machinery and equipment, and biotechnology, which is the development trend of modern agriculture. China is in the early stage of transitioning from traditional agriculture to intelligent agriculture. This article used the bibliometric analysis to analyze 40 812 relevant literatures in the field of global smart agriculture collected by the SCIE database. A knowledge map was drawn to conduct in-depth analysis on the core elements of knowledge, research topics, and cutting-edge hotspots of smart agriculture to provide reference and guidance for the development and study of smart agriculture in China. Results showed that the number of publications in the field of smart agriculture has increased significantly since 2016. China is the country with the fastest development in this field globally. Results of co-occurrence clustering analysis on keywords from 632 highly cited papers on smart agriculture in the past decade showed that the core elements of knowledge in smart agriculture included remote sensing, artificial intelligence, drones, the Internet of Things, and big data. smart agriculture can be divided into three major research topics including modern biotechnology represented by biological big data, information technology represented by the Internet of Things, artificial intelligence and remote sensing, intelligent agricultural machinery and equipment represented by drones and agricultural robots. The development of smart agriculture is a process of interdisciplinary integration to achieve highly precise, intelligent, and efficient agricultural production. Results of analyzing the evolution of keywords showed that information perception, processing, and management represented by the Internet of Things, as well as artificial intelligence algorithms represented by machine learning and deep learning, have been cutting-edge hotspots in smart agriculture research in recent years. The development of smart agriculture in the future was discussed from the perspectives of policy formulation, talent cultivation, and key technologies. It was proposed to achieve the agricultural transformation and upgrading in China by laying out key areas, cultivating new application-oriented talents, and developing original innovation.

Keywords smart agriculture; precision agriculture; bibliometric analysis; research status and trend; visualization analysis

(责任编辑:张志钰)