

■ 灌溉技术与装备 ■

文章编号: 1672-3317(2023)01-0087-13

物联网在农业灌溉中的应用: 从灌溉自动化到智慧灌溉

陆红飞¹, 王涛^{1,2}, 乔冬梅³, 孙健^{1,2}, 吴刚山¹, 田崇峰¹, 严方¹, 甄博^{1,3*}

(1.江苏农林职业技术学院, 江苏句容 212400; 2.江苏大学, 江苏镇江 212013;

3.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南新乡 453002)

摘要:【目的】掌握物联网在农业灌溉中的应用概况, 梳理未来农业灌溉的重要发展方向, 进一步提高农业灌溉效率和水平。【方法】采用文献计量的方法, 分别在中国知网(CNKI)和Web of Science(WOS)数据库进行主题词和关键词搜索, 采用Endnote X9和VOSviewer对文献数据进行整理, 分析了发文量、机构、研究热点等, 剖析了该领域发展现状, 并对未来趋势进行展望。【结果】近年来, 物联网在农业灌溉中的应用这一领域在国内外均得到快速发展, 2011—2020年CNKI年均增加27.7篇, 2020年发文量为300篇, 2011—2021年WOS年均增加24.3篇, 2021年发文量为280篇。国内方面, 河北农业大学、北京农业智能装备技术研究中心等是主要的研究机构, 《节水灌溉》《农机化研究》等是主要发文期刊; 2010年之前, 国内研究主要集中在灌溉自动化方面, 智能灌溉研究逐渐兴起; 2011年至今, 主要关注智能灌溉、水肥一体化、智能农机、智慧灌溉以及节水减肥和绿色发展等。国际方面, 佛罗里达州立大学系统、佛罗里达大学等是该领域的主要研究机构, 《Agricultural Water Management》《Sensors》等是该领域的主要发文期刊, 印度、中国、美国是主要的论文产出国, 分别发表了292、220、184篇; 2010年之前国际上主要关注农业生产、水管理和水资源调控等, 2011年之后, 主要关注农业生产及其环境效应、水资源的调控、以物联网和计算机为核心的灌溉技术的应用、智慧灌溉等。【结论】物联网技术推动灌溉自动化迈向智慧灌溉, 未来农业灌溉物联网领域的研究方向主要包括优化智慧灌溉系统软件和硬件布局、低成本的灌溉设备、大数据分析和安全、智慧灌溉标准建立和人才培养、高效的无线传输网络、“水-肥-药”智能实施等。

关键词: 物联网; 自动化; 智慧灌溉; 文献计量学; VOSviewer

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022402

OSID:



陆红飞, 王涛, 乔冬梅, 等. 物联网在农业灌溉中的应用: 从灌溉自动化到智慧灌溉[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 87-99.

LU Hongfei, WANG Tao, QIAO Dongmei, et al. Application of Internet of Things in Irrigation: A Review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 87-99.

0 引言

物联网(Internet of things, 简称IOT)的概念兴起于20世纪90年代, 2005年国际电信联盟(ITU)发布了《ITU互联网报告2005: 物联网》, 正式提出了“物联网”的概念^[1]。物联网指通过各种装置和传感技术实时采集任何需要监控、互动、连接的物体或过程, 通过各类网络的接入, 实现物体与人和物体与物体之间的连接, 实现对物体和其过程的一种智能化感知和识别^[2]。物联网具有非常突出的优点, 如相对廉价的设备、低功耗的无线技术、云存储、大数据分

析、智慧决策等。

【研究意义】全球不断增长的人口对食物的高需求正在影响环境, 并对农业生产力造成许多压力, 农业4.0的发展成为迫切需求。农业4.0采用先进的信息系统和互联网技术^[3], 农业物联网是农业4.0的重要组成部分。农业物联网主要包括感知层、传输层(网络层)、处理和应用层^[4], 将农田、传感器网络、数据管理终端和移动终端等连接起来, 使农田能够成为网络中的一个可观测终端。目前水资源的短缺和不合理的使用一直是制约我国农业发展的主要问题之一。物联网成为进一步提升农业灌溉效率的重要抓手。系统分析物联网在农业灌溉中的应用情况, 梳理农业灌溉发展的重要方向, 有助于农业节水灌溉新技术的推广和应用。

【研究进展】提高农业水资源的利用效率是关系到农业可持续发展的重大问题。传统的灌溉方式是通

收稿日期: 2022-07-20

基金项目: 江苏农林职业技术学院科技计划项目(2022kj16); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(212400410790); 河南省自然科学基金项目(212300410139)

作者简介: 陆红飞(1989-), 男, 江苏淮安人。助理研究员, 博士, 主要从事节水灌溉技术和装备方面的研究。E-mail: gofeigo@sina.com

通信作者: 甄博(1988-), 女, 河南新乡人。助理研究员, 硕士, 主要从事农田排水理论与装备研究。E-mail: zhenbo@sina.com

过重力方式和毛细管原理来用水浸润土壤^[5], 主要分为淹灌、漫灌和沟灌等, 这些仍然是我国当前最主要的灌溉方式。但传统灌溉方式的缺点很明显, 需要大量的灌溉水资源, 并且水的利用率却非常低, 还容易造成土壤和肥料流失, 不利于农业的可持续发展^[6]。随着数字农业、农业物联网的发展, 农业灌溉与信息技术的结合, 进一步提升了节水空间。如采用物联网技术, 根据棉花灌溉决策与管理的实际需求, 设计并实现了棉花智能化微灌系统, 并将其应用于新疆库尔勒棉花智能化膜下滴灌示范区中; 该系统解决了示范区墒情监测布点缺乏依据的困难和关键硬件产品进口价格过高、难以推广等问题^[7]。

农田环境监测和智能灌溉施肥、果园生产中的信息采集和灌溉控制等方面都是物联网在农业灌溉中的应用实践。智能(智慧)灌溉是运用物联网技术、云计算技术、大数据技术与传感器技术相结合的方式, 对农业生产中的环境温度、光照强度、土壤墒情等一些参数进行实时监测, 系统地分析处理数据信息, 达到所设阈值, 或者结合水肥一体化技术实现智能化灌溉。其相比于传统灌溉方式不仅大大提高了水资源的利用率, 减少了时间成本和劳动成本, 还可以准确定时、定量、高效地给农作物自动补充水分, 改善土壤环境, 从而达到增产、增质、节能的目标。

【切入点】物联网是 2005 年以来发展最快的技术之一, 农业灌溉中应用物联网技术的研究逐渐成为重点, 粮食、蔬菜、水果等不断增长需求对农业灌溉提出了新的挑战; 随着数字农业的发展, 物联网在农业灌溉中将发挥关键作用。文献计量学主要是研究文献体系和文献的相关媒介, 采用数学、统计学、文献学等计量方法, 研究文献信息的分布式结构、数量之间的规律的一门学科, 主要通过引文、作者、机构、国家和词汇数量来定量分析文献特征, 帮助研究人员或技术人员快速了解某个领域的研究现状及发展脉络。【拟解决的关键问题】本文采用文献计量学的方法, 在中国知网和 Web of Science 检索物联网在农业灌溉中的应用方面的文献, 通过 Endnote X9 和 VOSviewer 对文献数据进行挖掘, 分析作者、关键词、研究机构、期刊的特点, 剖析该领域的发展动态, 并结合近年国家政策和市场走势对未来发展进行展望, 以期促进农业物联网和智慧灌溉的发展。

1 材料与方法

1.1 研究数据

研究数据来源于中国知网 (CNKI, <https://www.cnki.net/>) 数据库和 Web of science (WOS, <http://www.webofknowledge.com/>) 数据库。

在 CNKI 中选择所有期刊, 不限研究时段, 检索时间为 2022 年 6 月 10 日。在 CNKI 中的专业检索中检索, 检索式共有 4 个: ① TI=('智慧灌溉'+ '智能灌溉') OR SU=('智慧灌溉'+ '智能灌溉') OR KY=('智慧灌溉'+ '智能灌溉'); ② 先检索 TI=水肥一体化 OR SU=水肥一体化 OR KY=水肥一体化, 然后再结果中检索 FT=('物联网'+ '智慧'+ '智能'); ③ 先检索 TI=物联网 OR SU=物联网 OR KY=物联网, 然后再结果中检索 TI=('灌溉'+ '滴灌'+ '喷灌'+ '微喷灌'+ '微灌'+ '漫灌'+ '隔沟灌'+ '畦灌'+ '控制灌溉'+ '非充分灌溉'+ '波涌灌'+ '低压管灌'+ '水分') OR KY=('灌溉'+ '滴灌'+ '喷灌'+ '微喷灌'+ '微灌'+ '漫灌'+ '隔沟灌'+ '畦灌'+ '控制灌溉'+ '非充分灌溉'+ '波涌灌'+ '低压管灌'+ '水分') OR AB=('灌溉'+ '滴灌'+ '喷灌'+ '微喷灌'+ '微灌'+ '漫灌'+ '隔沟灌'+ '畦灌'+ '控制灌溉'+ '非充分灌溉'+ '波涌灌'+ '低压管灌'+ '水分'); ④ SU=灌溉 AND SU=自动化。将 4 种检索方式得到的文献导入 Endnote X9 中, 整理去重, 得到数据库中所有关于物联网在农业灌溉中的应用(以下简称为研究领域)方面的论文, 共计 2 126 篇文献。

在 WOS 中选择核心数据集中的 paper, 不限研究时间, 检索时间为 2022 年 6 月 10 日。采用专业检索, 检索式为 TS=(intelligent irrigation) OR TS=(IOT*irrigation) OR TS=(internet of things*irrigation) OR TS=(smart irrigation), 共得到 1 371 篇文献。

1.2 研究方法

在 EndNote X9 中将研究领域的文献按年份划分, 通过初步对研究趋势进行研判, 划分出 2 个研究时期: 2010 年以前和 2011—2022 年。

对于 CNKI 数据库的文献, 2010 年以前, 设定关键词频次 ≥ 2 , 共得到 121 个关键词, 其中 118 个存在关联; 设定作者频次 ≥ 1 , 共得到 476 位作者共现图, 仅 13 位作者存在明显的合作关系。2011—2022 年, 设定关键词频次 ≥ 5 , 共得到 202 个关键词, 均存在关联; 设定作者频次 ≥ 2 , 共得到 572 位作者共现图, 仅 38 位作者存在明显的合作关系。

对于 WOS 数据库的文献, 2010 年以前, 设定关键词频次 ≥ 2 , 共得到 54 个关键词, 其中 53 个存在关联; 设定作者频次 ≥ 1 , 共得到 289 位作者共现图, 仅 14 位作者存在明显的合作关系。2011—2022 年, 设定关键词频次 ≥ 6 , 共得到 252 个关键词, 均存在关联; 设定作者频次 ≥ 2 , 共得到 558 位作者共现图, 仅 137 位作者存在明显的合作关系。

采用 VOSviewer 制作关键词(合并含义相近的词)和作者图谱, 采用 EndNote X9 和 Excel 2016 进行数据整理、分析和作图。

2 结果与分析

2.1 物联网在农业灌溉中的应用研究文献统计

中国知网（CNKI）关于物联网在农业灌溉中的应用方面的论文数量如图 1 所示。从图 1 可以看出，2000 年之前，该领域发文数量较少，部分年份无相

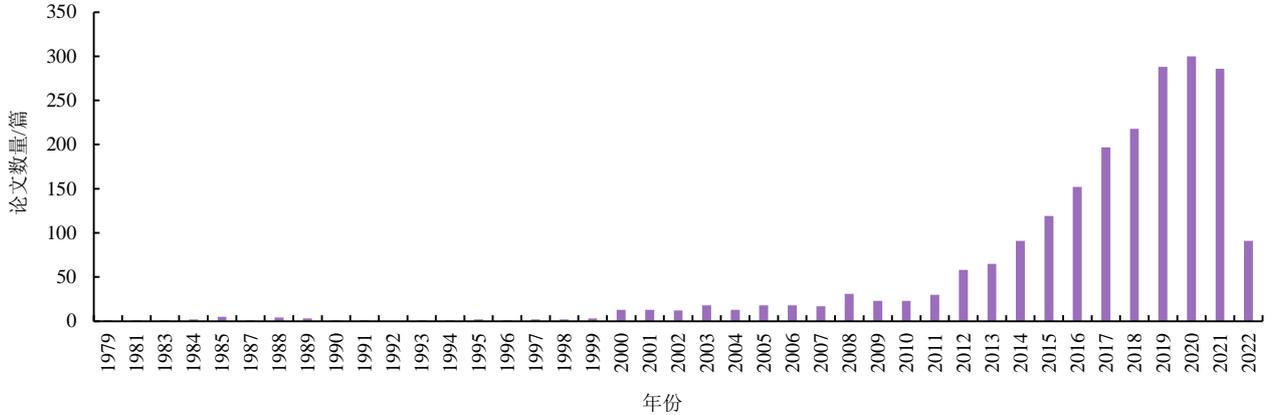


图 1 CNKI 数据库年度发文数量

Fig.1 Annual number of papers issued by CNKI database

WOS（Web of science）关于物联网在农业灌溉中的应用方面的论文数量如图 2 所示。从图 2 可以看出，2000 年之前，该领域发文数量较少；2000—2010 年，年均发文量均低于 20；2011—2021 年，该领域论文呈快速增长趋势，年均增加 24.3 篇论文；2016

关论文发表；2000—2010 年，该领域每年均有论文发表，发文数量介于 10~31 之间，无明显趋势；2011—2020 年，该领域论文呈快速增长趋势，年均增加 27.7 篇，至 2020 年达到发文高峰（300 篇），2021 年发文数量有所减少。

年有所回落，2017 年起再次快速增长，至 2021 年达到发文高峰（280 篇）。结合图 1 和图 2 可以看出，该领域国内外的研究具有相同的发展趋势，说明该领域具有重要的研究价值。

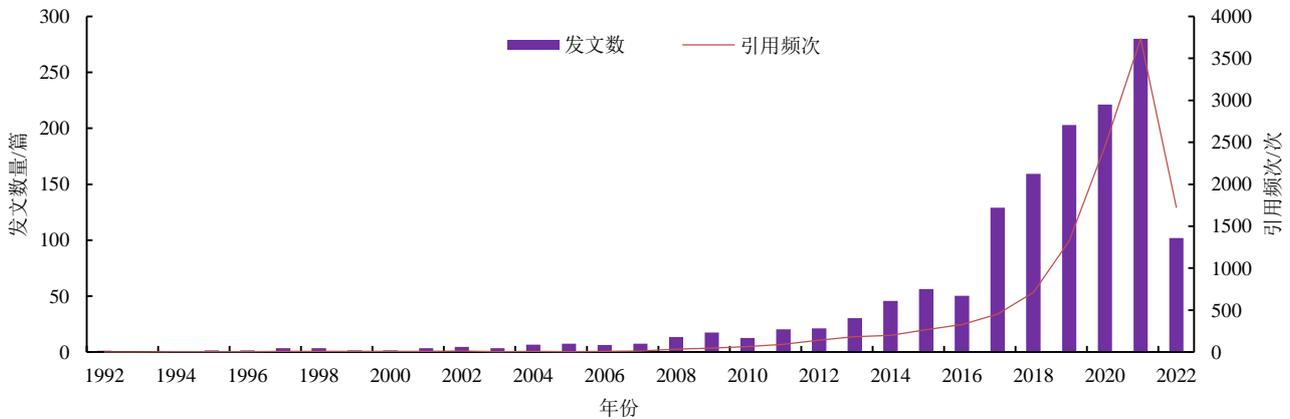


图 2 WOS 数据库年度发文数量和引用频次

Fig.2 Annual number of papers and their cited frequency issued WOS database

2.2 主要发文作者、机构、地区、期刊

CNKI 研究领域主要发文机构、作者、期刊如表 1 所示。由表 1 可知，河北农业大学机电工程学院、北京农业智能装备技术研究中心、吉林省农业机械研究院、广东省现代农业装备研究所、贵州大学机械工程学院、石河子大学信息科学与技术学院等单位是该领域的主要研究机构，总发文量均超过了 10 篇；周杰、郭文忠、马德新、李莉、李银坤、李家春、王卫星等是该领域的主要研究人员；《节水灌溉》《农机化研究》《农业工程技术》《南方农机》《现代农业科技》《云南农业》《中国农机化学报》等是该领域的主要发

期刊，总发文量均超过了 40 篇。

WOS 研究领域主要发文机构、作者、期刊如表 2 所示。由表 2 可知，佛罗里达州立大学系统、佛罗里达大学、中国科学院、中国农业大学、加利福尼亚大学、国际农业研究磋商组织等是该领域的主要研究机构；Dukes M D、Kamienski Carlos、Lloret Jaime、Dukes Michael D、Davis S L、Dadios Elmer P、Parra Lorena 等是该领域的主要研究人员；《Agricultural Water Management》《Sensors》《Computers and Electronics in Agriculture》《Water》《Ieee Access》《Sustainability》《Agronomy Basel》等是该领域的主要发文期刊，总

发文量超过 19 篇。

结合表 1 和表 2 可以看出,国内该领域的研究较为分散,不同于国际上的研究,主要集中在佛罗里达大学、加利福尼亚大学等机构;国内该领域的主要发

文期刊较为集中,如《节水灌溉》《农机化研究》《农业工程技术》《南方农机》等均超过 40 篇,总发文量是国际主要期刊发文量的 2 倍以上。

表 1 CNKI 主要发文机构、期刊

Table 1 Main issuing institutions and journals of CNKI

机构	数量	作者	数量	期刊	数量
河北农业大学机电工程学院	16	周杰	10	节水灌溉	92
北京农业智能装备技术研究中心	14	郭文忠	9	农机化研究	78
吉林省农业机械研究院	13	马德新	9	农业工程技术	76
广东省现代农业装备研究所	11	李莉	8	南方农机	64
贵州大学机械工程学院	11	李银坤	8	现代农业科技	48
石河子大学信息科学与技术学院	11	李家春	8	云南农业	47
贵州省水利科学研究院	10	王卫星	8	中国农机化学报	42
新疆水利水电科学研究院	10	尹义蕾	7	农业与技术	34
荆楚理工学院	9	刘宝	7	中国农村水利水电	31
西安工程大学电子信息学院	9	王永涛	7	农业技术与装备	30

表 2 WOS 数据库主要发文机构、作者、期刊

Table 2 Main issuing institutions, authors and journals of WOS

机构	数量	作者	数量	期刊	数量
State University System of Florida	47	Dukes M D	18	Agricultural Water Management	42
University of Florida	44	Kamienski Carlos	11	Sensors	36
Chinese Academy of Sciences	23	Lloret Jaime	10	Computers And Electronics in Agriculture	33
China Agricultural University	20	Dukes Michael D	10	Water	29
University of California	20	Davis S L	7	Ieee Access	20
Cgiar	19	Dadios Elmer P	6	Sustainability	20
National Institute of Technology Nit System	19	Parra Lorena	6	Agronomy Basel	19
Universitat Poltechnica De Valencia	19	Yaseen Zaher Mundher	5	Applied Sciences Basel	14
Egyptian Knowledge Bank Bkb	18	Maia Rodrigo Filev	5	Irrigation and Drainage	14
Indian Conuil of Agricultural Research Car	17	Muhammad Abubakr	5	Acta Horticulturae	13

WOS 不同国家发文趋势变化如图 3 所示。从图 3 可以看出,印度、中国、美国、西班牙、意大利是该领域的主要研究国家;印度的年发文数量在 2014 年之后呈快速增长趋势,2020 年达到高峰(49 篇),2021 年有所降低;中国的年发文数量从 2003 年开始呈波

动上升趋势,2021 年达到最高峰(38 篇);美国的年发文数量与中国表现相似,2021 年达到 26 篇;西班牙在 2014 年有少量发文,2015 年后年发文量呈增加趋势,2021 年有所降低。其他国家的年发文量基本从 2016 年开始呈明显增加趋势。

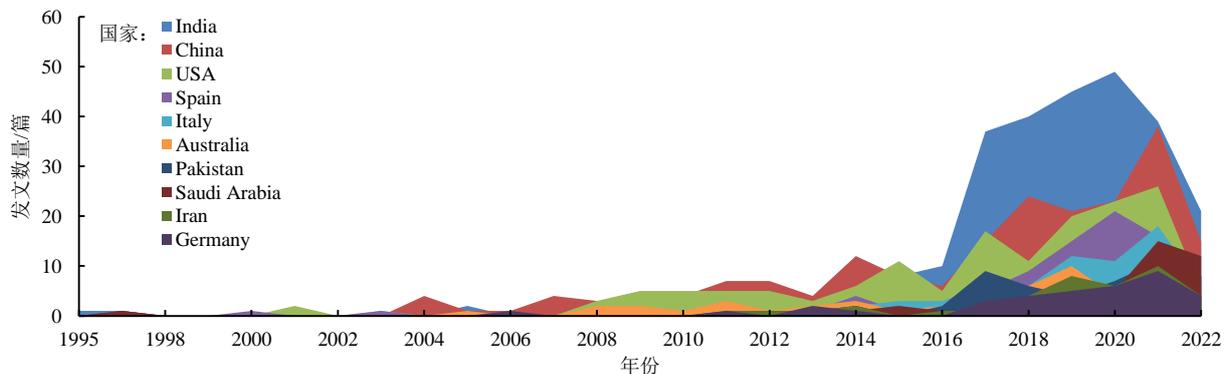


图 3 WOS 不同国家发文趋势变化

Fig.3 Trend of WOS papers in different countries

2.3 研究热点和作者合作网络

依据 2.1 中的 CNKI 和 WOS 年度发文量的变化情况，将该领域的研究分为 2 个阶段：2010 年之前和 2011—2022 年。

2.3.1 CNKI 研究热点

将 CNKI 中搜集的物联网在农业灌溉中的应用研究论文，导入 VOSviewer 进行分析，研究热点网络如图 4 所示。从图 4 (a) 可以看出，2010 年之前，该领域的研究主要集中在灌溉自动化方面，研究内容包

括灌溉控制系统(传感器、电磁阀、计算机、单片机、无线网络、远程控制等)、灌溉技术(滴灌、微喷灌、波涌灌、喷灌)、水肥效率(水资源、灌水均匀度、肥料利用率)，还包括灌溉工程设计、管理等方面的内容；研究对象主要为大田农作物，包括棉花、玉米，还涉及花卉等经济作物。此外，智能灌溉已经成为重要研究方向，主要研究大田农作物，依托无线传感器网络采用单片机进行远程水肥控制。

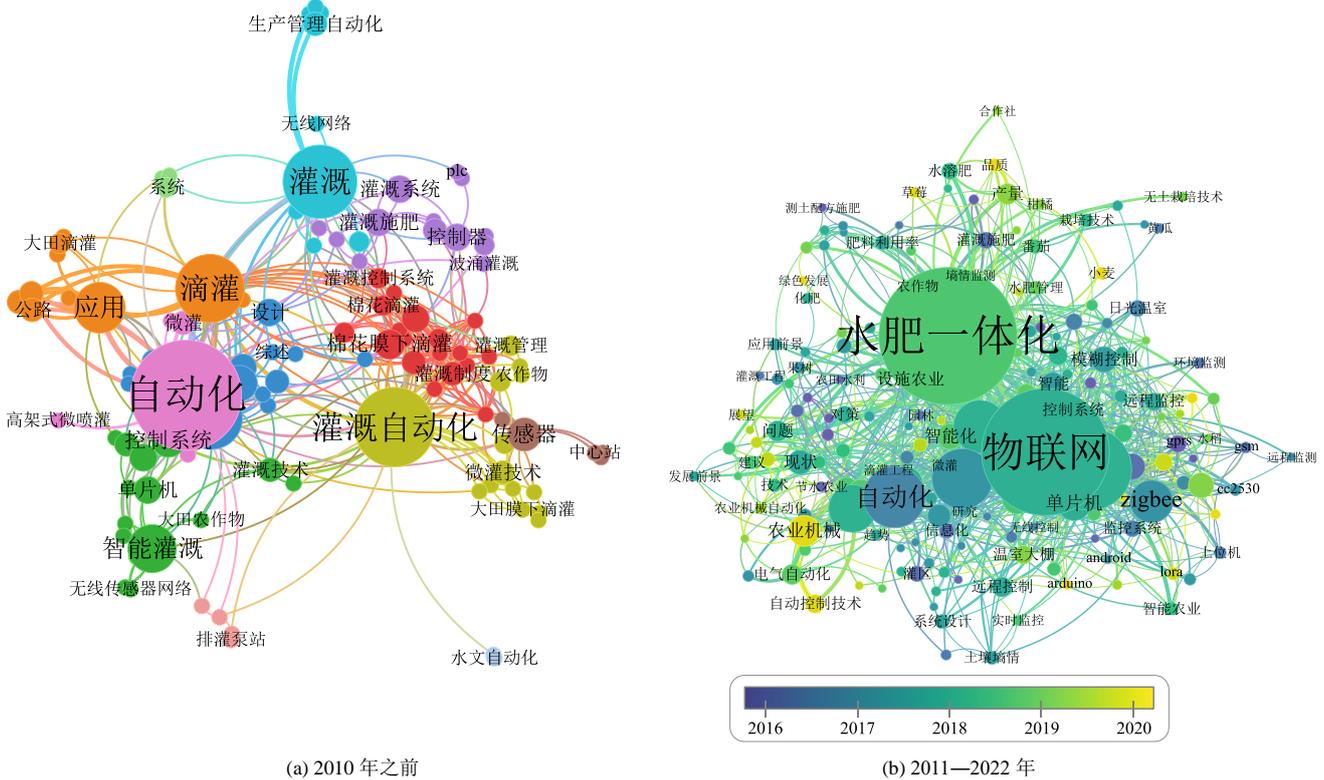


图 4 基于 CNKI 的研究热点

Fig.4 Research hotspots based on CNKI

从图 4 (b) 可以看出，2011 年以来，该领域的研究主要包括以下几个方面：①智能灌溉，主要采用 STM32、cc2530 等芯片，借助 Zigbee、GPRS、GSM 等网络对土壤水肥进行智能控制；智能温室、荔枝园等是主要应用场景，主要目的是实现精准灌溉，同时引入专家系统，对灌水方案进行指导，并采用 LawVIEW 对灌溉系统进行开发测量或控制系统。②水肥一体化，主要研究经济作物(水果、蔬菜)等的智能水肥控制技术，以实现高品质、高产量并取得较高经济效益；水溶肥和无土栽培技术是关键内容。③节水灌溉，主要研究农业水利工程的灌溉自动化，通过引入移动互联网的理念，采用云计算的方式实现系统的高效运转。④发展现状和对策，主要探讨该领域发展中的经验和教训，指出主要问题，并对未来的技术发展趋势进行展望，设施农业、果蔬、茶园等是主要的研究对象；⑤农机的应用，主要研究农机的应用

实现节水农业，促进现代农业的发展，主要技术为电气自动化技术；⑥智慧灌溉，主要研究内容与智能灌溉相似，但智慧灌溉更关注低功耗的控制系统以实现自动灌溉，通过建立数据库，依托云平台进行大数据分析，能够做到自主决策，以实现灌水方案的实时优化和调整。⑦其他方面，该领域还关注节水减肥和绿色发展、无人机和施肥机的应用等，这些将是未来的主要研究方向。近期的主要研究热点为智能农机、树莓派和 Arduino 微控制器、云平台的搭建和应用、农作物的品质等。

2.3.2 WOS 研究热点

将 WOS 中搜集的物联网在农业灌溉中的应用研究论文，导入 VOSviewer 进行分析，研究热点网络如图 5 所示。从图 5 (a) 可以看出，2010 年之前，国际上的研究主要关注农业生产(采用计算机实现智能控制，棉花是主要研究对象)、水管理(采用智能传

小高峰，随后减弱，2011 年开始热度持续增加，2021 年再次减弱。智能灌溉从 2005 年首次出现，之后研究热度成起伏变化，2012 年开始热度持续增加，2021 年有所降低。节水灌溉方面（节水、节水灌溉、灌溉）的研究热度基本从 2011 年开始持续升温，未来也将是研究热点之一。“应用”“农业”一直是该领域的重要标签，这一领域主要解决农业生产中的灌溉问题，因此新技术、新方法的应用是永恒的主题，2013 年开始智慧农业的概念逐渐兴起，进一步推动了该领域的快速发展。Zigbee、传感器、PLC、智能化、STM32 等均与物联网息息相关，这些研究热点共同组成了物

联网的重要基础。该领域对单片机的关注早于物联网相关热点，但其研究热度一直不高，因为该领域主要以应用为主，几乎不涉及芯片的研发。设施农业一直是该领域的主要应用方向，这是因为设施农业易于实现灌溉自动化、智能化，并且生产效率高。滴灌是该领域最重要的灌溉技术之一，从 2000 开始就有一定的研究，但该方面的研究热度并不稳定，一方面是因为水肥一体化主要依靠的灌水技术就是滴灌，其研究包含在了水肥一体化中；另一方面是因为本研究未将“膜下滴灌”“地下滴灌”等滴灌应用形式与“滴灌”合并，其热度完整性有所欠缺。

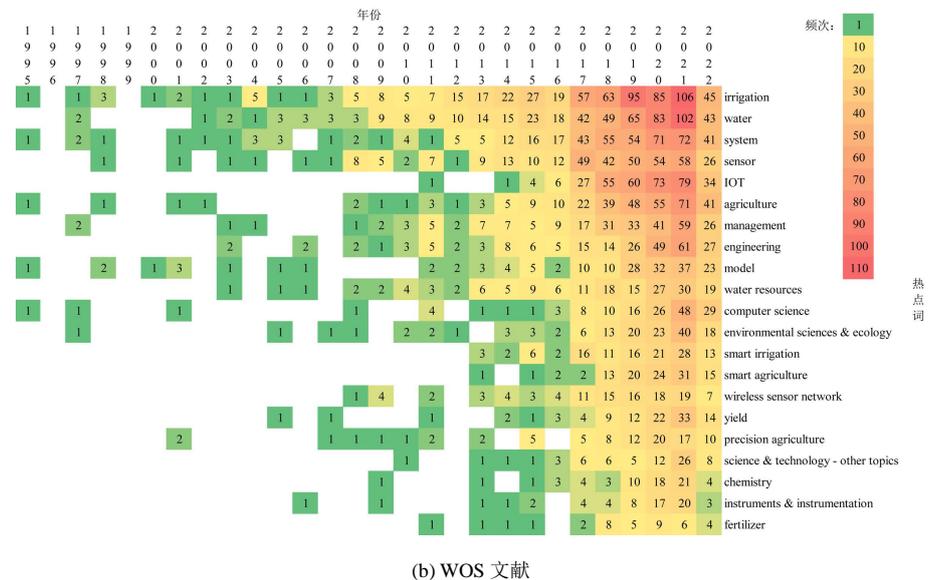
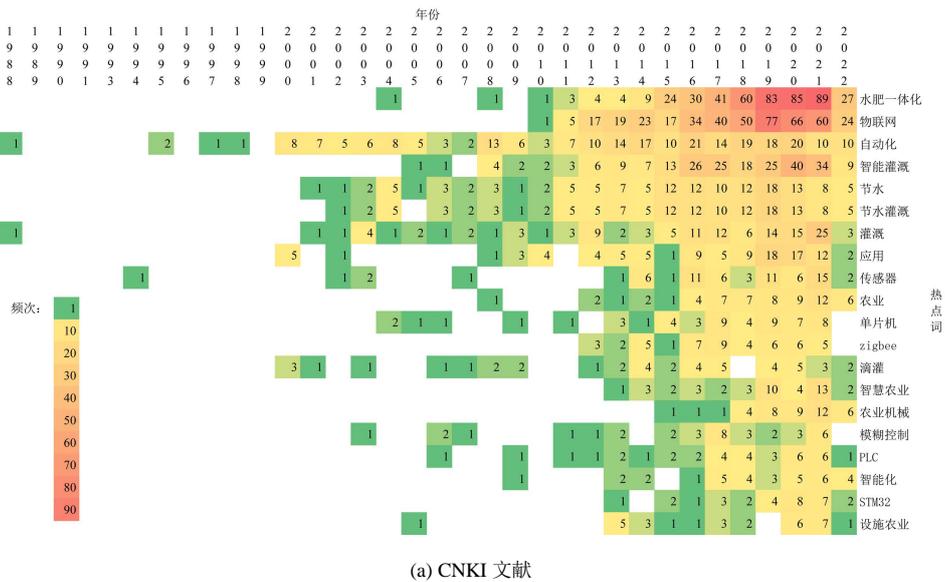


图 6 物联网在农业灌溉中的应用领域热点词演进热图

Fig.6 Evolution heat map of hot words in the application field of Internet of things in agricultural irrigation

由图 6 (b) 可知，灌溉、水资源、传感器、物联网、管理、工程、计算机等一直是该领域国际上的研究热点，2017 以来尤为明显。灌溉作为灌溉自动化、智能灌溉、智慧灌溉最为核心的内容，自 2008 年开始其研究热度持续升温，2017—2021 年是研究

较为集中的时期。水（水资源）作为农业的重要生产资料，也是灌溉的核心，其热度持续走高，为了提高农业产出和可持续性，提高水资源的利用效率是关键。物联网的概念从 2011 年开始与灌溉产生关联，2015 年开始研究热度持续高涨，这与灌溉技术的发展走势

密切相关, 当前不同的灌溉技术均发展的较为成熟, 如何经济高效地将灌溉技术应用到农业生产中越来越重要, 并且如何有效地进行节水灌溉的管理成为农业生产者亟需解决的难题; 土壤水肥的精准调控是高效灌溉技术的重要实施基础, 因此实时掌握土壤墒情和肥情成为关键。在物联网之前, 传感器、灌溉系统、无线传感器网络、仪器仪表等的研究受到广泛关注, 两者可以实现土壤水肥状况的监测, 这为精准农业的发展提供了基础, 同时两者也是物联网的重要组成部分。随着物联网的广泛应用, 智能灌溉、智能农业逐渐成为研究热点, 是近年来行业的发展方向。信息技术是数字农业的重要组成部分, 计算机科学、模型自 1995 年开始就是该领域的重要研究热点, 尤其随着大数据、云计算的逐步兴起, 计算机技术和模型的重要性更加凸显。工程和管理 2 个方面是物联网和灌溉

的重要软硬件基础, 2017 年以来研究热度越来越高。农业生产中作物产量是最为关键的要素之一, 而提高产量始终是该领域的主要研究目的之一。化学方面的研究内容也逐渐引起重视, 尤其是在液体肥料、土壤改良、病虫害防治等方面的应用较为突出。不同于国内研究, 国际上关于水肥一体化的研究在该领域的表现不突出, 一方面是因为国际上的研究多将 water 和 fertilizer (fertilization) 作为 2 个关键词, 而国内则以“水肥一体化”单一词组出现, 另一方面是因为 WOS 和 CNKI 在检索方式上存在差别, WOS 多以主题词进行检索, 而 CNKI 则可以细化到关键词。

2.3.4 作者合作网络

采用 VOSviewer 制作作者合作网络, CNKI 和 WOS 合作网络图分别如图 7 和图 8 所示。



图 7 CNKI 作者合作网络

Fig.7 Cooperation network of authors in based on CNKI

从图 7 (a) 可以看出, 2010 年以前, 国内该领域以郑文刚为核心, 形成较为明显的 3 个研究团队。从图 7 (b) 可以看出, 2011 年之后, 形成了以杜森-吴勇、李莉-王海华、蒋辉霞-陈爽、王涛-陈永快为核心的 4 个主要研究团队。

从图 8 (a) 可以看出, 国际上, 2010 年之前

形成了以 Sigrimis 为核心的 4 个研究团队; 2011 年之后, 形成了以 Kumar A 和 Yaseen Z M、Ghosh A 和 Zaslavsky A、Acm 和 Benahmed K、Jat M L 和 Abdallah A M、Zhang M 和 Zuo Q、Zhang X 和 Zhang Y Y、Zhang L 和 Zhang Y B、Liu Z J 和 Liu T、Setiawan B I 和 Iop 等为核心的多个研究团队。

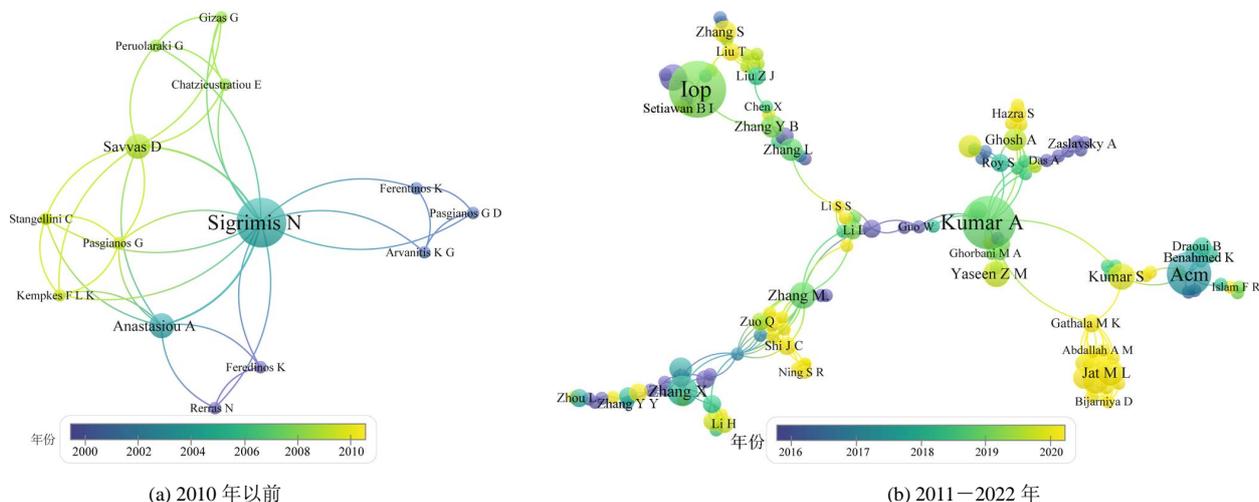


图 8 WOS 作者合作网络

Fig.8 Cooperation network of authors in based on WOS

3 讨论

3.1 节水、增产、增收是农业最迫切的需求

2022 年我国中央一号文件提出“稳定全年粮食播种面积和产量”、“合理保障农民种粮收益”，进一步明确了粮食稳产、增产和农民增收是农业发展的重中之重。节水、产量、效益等是研究的高频关键词（图 4 和图 5）。水资源是农业生产的重要生产资料，如何让有限的水灌溉更多的农田是提高产量的关键之一。灌溉调度不当和水资源利用效率低下是制约农业生产的 2 个普遍存在的因素^[8]。现代节水农业技术是传统的节水农业技术与生物技术、计算机模拟、电子信息、高分子材料等高新技术相结合的产物，具有多学科相互交叉、各种单项技术相互渗透的明显特征^[9]，并且用于农业精确灌溉的淡水智能管理对于提高作物产量和降低成本至关重要，同时有助于环境的可持续性^[10]。

3.2 物联网可以促进提升农业灌溉系统的效率

考虑到全球范围内的水危机，用水需求不断增加，实施精准配水成为重要途径之一^[11]。对于农业来说，在年可用水量相对稳定的情况下，如何用有限的水资源灌溉更多的农田，产出更多的农产品一直困扰着政府管理机构和广大农民。传统的灌溉方式难以满足上述要求，而新兴的物联网技术有望改变灌溉方式的现状。

应用无线传感网络、RFID 等相关技术，开发基于物联网关键技术的农业信息化系统，实现了农业的智能化和自动化运作^[12]。通过物联网监控农田环境，可以优化灌溉策略^[13]，即对土壤、大气、作物传感器数据的综合研判，给出最佳灌溉预报。土壤水分降低时土壤温度升高，作物收到水分胁迫时冠层温度升高，将热成像技术与其他图像处理和数据分析技术相结合，可以减少作物水分压力并提供灌溉调度，有助于提高灌水均匀度，这是智能灌溉中的主要策略之一。

与国外同类产品相比，自主研发的棉花智慧微灌系统成本降低了 44.8%，且与传统灌溉方式相比，作物水分利用效率提高了 22.6%^[7]；与人工常规管理相比，采用智能灌溉施肥机番茄产量增加了 18.5%，用水节约了 43.51%，节水增产效应非常突出^[14]。

3.3 智慧灌溉是灌溉自动化的升级版

传统节水灌溉技术与现代高新技术的有效结合是迅速提升我国节水灌溉水平的重要手段^[16]。20 世纪末和 21 世纪初国内一直研究开发自动化、现代化的节水灌溉系统，将计算机、3S 技术、太阳能等现代化高科技应用于灌溉领域^[16]，早期的灌溉自动化主要针对灌溉设备的控制^[17]，主要目的是代替人工、提高效率，后期逐步融入水肥阈值进行精准调控^[18]。将土壤湿度和盐度的传感器集成到计算机控制灌溉的无线网络中，通过设定土壤含水率阈值进行自动化灌溉，创新灌溉策略，如调亏或分质供水灌溉^[19]。灌溉自动化的研究早于物联网与灌溉的结合（图 6（a）），物联网可以实现灌溉自动化，但不局限于自动灌溉，其融入了人工智能算法，赋予了灌溉系统“自主意识”，能够根据环境、作物的变化智能调整、实施灌溉策略。

目前，智能灌溉是物联网技术在农业灌溉中的重要应用之一，是基于物联网技术和无线传感器技术的现代化灌溉方式，通过传感器采集土壤温湿度、酸碱度、土壤含水率以及电导率和养分等信息，并结合环境信息和作物生长状态^[20]，将采集到的数据输送到数据中心进行处理和分析，从而制定出最适合农作物生长的智能灌溉闭环方案。国外的智能灌溉起步较早，主要发展的途径是由自动化灌溉方式向智能（智慧）灌溉迈进，基本经历了人工灌溉-机械控制灌溉-电子控制和机械控制相结合的混合控制的发展过程，到如今的计算机控制和模糊控制，使得灌溉的方式越来越智能化，控制灌溉的精度越来越高，操作方式更加简单。

表 3 灌溉自动化与智慧灌溉技术对比

Table 3 Comparison of irrigation automation and intelligent irrigation technology

技术形式	主要技术特征	节水效果
灌溉自动化（早期）	1. 阀门、闸门、水泵等设备的自动控制； 2. 电子-机械控制为主	与传统灌溉相当
灌溉自动化（后期）	1. 依据土壤墒情进行灌水；2. 远程控制	较传统灌溉大幅提升
智慧灌溉	1. 采用物联网技术实时采集土壤、作物及环境信息； 2. 多终端远程控制；3. 灌溉智慧决策和预警； 4. 融合专家系统，及时纠正灌溉策略	较传统灌溉大幅提升； 较灌溉自动化（后期）小幅提升

3.4 人工智能和专家系统是灌溉智慧化发展的重要工具

节水灌溉是农业物联网的典型应用之一，人工智能的发展推动农业实现智能灌溉^[21]。基于农业物联网大数据的人工智能技术^[22]，对灌溉进行智慧决策，包

括采用人工智能算法对灌水质量和效率进行评价，有助于进一步降低人工成本、物资的消耗。土壤湿度传感器与精密灌溉技术的集成形成闭环灌溉系统，进而完成对灌溉时间和灌水量的精准控制^[23]。例如，Navarro-hellin 等^[24]提出了偏最小二乘回归（PLSR）

和自适应神经模糊系统 (ANFIS) 2 种机器学习技术作为空间智能决策支持系统 (SIDSS) 的推理引擎, 并根据部署在田间的几个自主节点收集的土壤测量和气候变量, 估计 1 个种植园每周的灌溉需求。Goap 等^[25]提出了 1 种基于机器学习方法和开源技术的智能灌溉系统, 利用互联网上的天气预报数据和土壤湿度、土壤温度、环境条件等地面参数的感知来预测农田灌溉需求。

在当前技术发展水平下, 完全依靠机器完成灌溉的全部过程还存在一定的风险, 需要引入专家系统定时对灌溉系统进行评价和修正。Srbinovska 等^[26]提出了针对蔬菜温室的无线传感器网络架构, 结合专家系统指导, 采取远程控制滴灌等适当的措施, 实现了科学栽培和降低管理成本。为实现荔枝园环境的实时远程监控和精准管理, 设计基于农业物联网的荔枝园信息获取与智能灌溉专家决策系统, 专家系统根据采集到的环境数据, 结合专家知识, 建立多个决策数学模型, 实现计算作物需水量、预报灌溉时间、灌溉最佳定量决策、根据灌溉制度决策等决策功能, 将决策结果反馈到控制终端模块进行智能监控, 系统预测能达到 75% 的准确率^[27]。

3.5 政府和社会力量的广泛参与是智慧灌溉健康发展的关键

当前农业生产投入较高, 种子、化肥、农药的价格呈逐年增长趋势, 而农产品的价格增幅有限, 农民的收入相对较低。虽然物联网技术在农业灌溉中的应用可以提高水资源利用效率、增加农产品质量, 加速农产品的流通, 但是物联网设备的前期投资较高, 操作难度大, 完全依靠农民自己完成农业灌溉的升级存在较大阻力。政府扶持是决定农户采用先进节水灌溉技术的关键因素^[28], 未来智慧灌溉的健康发展也离不开政府和社会的大力支持。种粮大户、农场主、专业合作社、高新技术企业等社会中坚力量对新技术的接受程度和推广力度在很大程度上决定着农业发展的效率和现代化水平。在实施精准扶贫的过程中, 社会力量的广泛参与, 让政府不再唱“独角戏”, 极大地拓宽了贫困人口的收入途径, 这是非常有效的举措。统筹推进社会力量广泛参与农业灌溉物联网的建设, 是实现农业健康发展的必经之路, 参与机制、合作形式、配套政策等亟待深入探究。

4 展望

随着信息技术的快速发展, 把物联网技术应用在农业灌溉领域是大势所趋。而智能灌溉系统将成为智慧农业、数字农业发展的重要组成部分。目前, 还有不少挑战和难题阻碍了物联网在精准灌溉领域的广

泛应用。如农业灌溉仅实现部分流程的自动化, 还没有完全自动化的水准^[29]; 缺乏先进的物联网软件平台, 迫切需要整合物联网、大数据分析、云计算、雾计算等不同技术, 进行智慧水管理技术的推广和应用; 多传感器的集成缺乏足够的标准和信息模型来维持系统高效运作; 长期应用水肥一体化技术, 可能会造成湿润区边缘的盐分积累, 并对作物造成一定程度的限根效应^[30]。在物联网和信息技术的加持下, 农业灌溉的未来研究主要包括以下几个方面:

1) 优化智能灌溉系统: 增强设备和传感器的兼容性和可扩展性, 降低传感器布设规模, 加快灌溉新设备的研发, 促进现有技术迭代升级。不仅要使其更加智能, 还要使这个系统更加高效、稳定、安全和可靠。能够针对不同地区, 不同气候, 不同作物品种给出一个最合适的灌溉方式。降低软硬件操作难度, 减少操作步骤, 提供产品维修手册, 将常见问题进行展示, 便于用户自行维修和检查。不断升级灌溉设备, 比如提高设备传感器的精度、增加设备中的 MCU 使其集成度更高、提高设备的耐久度、降低设备的能耗、提高新能源和环保材料在设备中的应用。这样不仅节省劳动成本, 也有利于环境的保护。

2) 加强与高新技术的结合。如人工智能 (AI) 和机器人流程自动化 (RPA) 结合而成的超自动化技术、嵌入新的系统 (如鸿蒙系统)、运用 5G 和边缘计算技术等, 使得灌溉控制平台在实时收集、分析、管理数据时不仅网络延迟更低而且数据的精度更高。物联网与无人机的结合^[31], 实现局部区域的精准补充灌溉。首先, 利用轻小型无人机协助监测大范围的土壤水分、养分、作物水分胁迫指数 (CWSI) 等; 其次, 采用中大型无人机连接水管或携带储水箱对缺水严重的局部区域进行精准补水, 提高土壤水分均匀度; 最后, 也可以携带水溶肥对部分养分匮乏的位置进行补肥。

3) 物联网大数据管理与分析和数据安全。在精确灌溉的物联网系统中, 没有一种万能的方法, 这就要求在基于云和雾 (cloud fog) 的部署中找到不同的配置和连接软件组件的方法^[10], 对历史数据进行分析^[3], 如优化作物蒸散发模型^[32], 提高作物耗水量的估算精度, 提高灌溉决策的质量。物联云的发展有利于数据记录和分析, 数据交换与共享是经常发生的事情, 这就增加了数据管理难度, 带来了更多安全风险; 同时, 由于大数据资源具有巨大价值, 窃取、攻击与滥用等行为也越来越严重, 因此必须加强数据安全管理和防范。

4) 水-肥-药智能实施^[33]。针对水肥一体化在作物栽培、土肥水管理、病虫害防治、农业机械等方面

的新要求，开展集成研究，形成以水肥一体化为核心的农业种植新模式^[34]。建立水肥预测模型，提高水肥一体化设备的运转效率，实现高附加值农产品的精准定量水肥管理。

5) 建立智慧灌溉标准，加快智慧灌溉人才培养。农业传感器、无线网络农业物联网标准制定方面取得了一些进展，但是智能较为分散，且缺乏统一的国家标准^[35]。智慧灌溉的实施需要对信息技术、传感器、互联网等有一定的知识积累，需要跨学科、复合型的人才，这就需要在高效的培养人才时调整授课内容，加强实践教学，提高学生对农业工程的热情，增强学生的动手能力。

此外，还需加强多种水源在智慧灌溉中的应用，如再生水、微咸水、磁化水^[36]等，积极探索典型农作物智慧灌溉发展模式、搭建智慧灌溉虚拟仿真系统等。

5 结论

1) 近年来，物联网在农业灌溉中的应用，得到快速发展，尤其从 2011 年开始，CNKI 和 WOS 数据库的论文数量连续 10 a 高速增长，2021 年开始进入平稳发展期。

2) 国内方面，河北农业大学、北京农业智能装备技术研究中心、吉林省农业机械研究院等是主要的研究机构，周杰、郭文忠、马德新等是主要研究人员，《节水灌溉》《农机化研究》《农业工程技术》等是主要发文期刊；2010 年之前，国内研究主要集中在灌溉自动化方面，包括灌溉控制系统、灌溉技术、水肥效率、灌溉工程设计和等方面的内容，智能灌溉方面的研究正逐步兴起；2011 年至今，智能灌溉、水肥一体化、节水灌溉、发展现状和对策、农机的应用、智慧灌溉以及节水减肥和绿色发展、无人机和施肥机的应用等。近期的主要研究热点为智能农机、树莓派和 Arduino 微控制器、云平台的搭建和应用、农作物的品质等。

3) 国际方面，佛罗里达州立大学系统、佛罗里达大学、中国科学院等是该领域的主要研究机构，Dukes M. D. Kamienski Carlos、Lloret Jaime 等是该领域的主要研究人员，《Agricultural Water Management》《Sensors》《Computers and Electronics in Agriculture》等是该领域的主要发文期刊，印度、中国、美国是主要的论文产出国。2010 年之前国际上的研究主要关注农业生产、水管理和水资源调控、环境保护、精准农业、灌溉制度等；2011 年之后，国际上的研究主要包括农业生产及其环境效应、水资源的调控、以物联网和计算机为核心的灌溉技术的应用、智慧灌溉、水分胁迫对作物的影响、再生水的利用以及未来的发展

趋势等，近期的热点包括数据安全、数字农业、作物产量品质、大数据、智慧传感器、人工智能、机器学习等。

4) 未来农业灌溉物联网的发展必须聚焦节水、节肥、优质、高产、环保等主题，重要研究方向主要包括优化智慧灌溉系统软件和硬件布局、低成本的灌溉设备、大数据分析和安全、智慧灌溉标准建立和人才培养、高效的无线传输网络、水-肥-药智能实施等。

参考文献：

- [1] UNION I T. The Internet of Things[R]. Geneva: International Telecommunication Union (ITU), 2005.
- [2] ZHOU Y Y, XIA Q, ZHANG Z C, et al. Artificial intelligence and machine learning for the green development of agriculture in the emerging manufacturing industry in the IoT platform[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 2022, 72(1): 284-299.
- [3] ZHAI Z Y, MARTÍNEZ J F, BELTRAN V, et al. Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 105-256.
- [4] 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, 36(4): 246-248, 252.
QIN Huaibin, LI Daoliang, GUO Li. Recent advances in development and key technologies of Internet of Things in agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(4): 246-248, 252.
- [5] SHARMA B, KUMAR N. IoT-based intelligent irrigation system for paddy crop using an Internet-controlled water pump[J]. International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems, 2021, 12(1): 21-36.
- [6] ONYENEKE R, AMADI M, NJOKU C L, et al. Climate change perception and uptake of climate-smart agriculture in rice production in ebonyi state, Nigeria[J]. Atmosphere, 2021, 12(11): 21.
- [7] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(1): 118-122.
- [8] WANG Y R, JIN J H, LIU Q C. Research on crop dynamic irrigation lower limit under limited water supply I—Method[C]. Tianjin, China. Piscataway: 2016 Fifth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics), 2016.
- [9] 许迪, 康绍忠. 现代节水农业技术研究进展与发展趋势[J]. 高技术通讯, 2002, 12(12): 103-108.
XU Di, KANG Shaozhong. Research progress and development trend on modernized agriculture water-saving technology[J]. High Technology Letters, 2002, 12(12): 103-108.
- [10] KAMIENSKI C, SOININEN J P, TAUMBERGER M, et al. Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(2): 276.
- [11] AYAZ M, AMMAD-UDDIN M, SHARIF Z, et al. Internet-of-things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk[J]. IEEE Access, 2019, 7: 129 551-129 583.
- [12] 孙彦景, 丁晓慧, 于满, 等. 基于物联网的农业信息化系统研究与设计[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(S2): 326-331.
SUN Yanjing, DING Xiaohui, YU Man, et al. Research and design of agriculture informatization system based on IOT[J]. Journal of

- Computer Research and Development, 2011, 48(S2): 326-331.
- [13] 徐刚, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 基于精准灌溉的农业物联网应用研究[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(S2): 333-337.
XU Gang, CHEN Liping, ZHANG Ruirui, et al. Application of Internet of Things for precision irrigation[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(S2): 333-337.
- [14] 岳焕芳, 周孝秋, 安顺伟, 等. 设施番茄轻简式智能灌溉施肥机的应用[J]. 节水灌溉, 2020(3): 85-87, 91.
YUE Huanfang, ZHOU Xiaoqi, AN Shunwei, et al. Application of minitype intelligent fertigation control machine for facilities tomato[J]. Water Saving Irrigation, 2020(3): 85-87, 91.
- [15] 逢焕成. 我国节水灌溉技术现状与发展趋势分析[J]. 中国土壤与肥料, 2006(5): 1-6.
PANG Huancheng. Analysis on the status of water-saving irrigation techniques and its development trends in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2006(5): 1-6.
- [16] 彭世彰, 丁加丽. 国内外节水灌溉技术比较与认识[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(4): 49-52, 60.
- [17] 刘晓初, 叶邦彦. 一种新型太阳能全自动节水灌溉设备研究[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(6): 638-640.
LIU Xiaochu, YE Bangyan. Expect of technology of water-saving irrigation device[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2003, 32(6): 638-640.
- [18] 徐忠辉, 潘卫国, 石红梅. 自动灌溉控制系统的应用[J]. 北京水务, 2010(5): 48-51.
XU Zhonghui, PAN Weiguo, SHI Hongmei. Application of automatic irrigation control system[J]. Beijing Water, 2010(5): 48-51.
- [19] PARDOSSI A, INCROCCI L, INCROCCI G, et al. Root zone sensors for irrigation management in intensive agriculture[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2009, 9(4): 2 809-2 835.
- [20] PUERTO P, DOMINGO R, TORRES R, et al. Remote management of deficit irrigation in almond trees based on maximum daily trunk shrinkage. Water relations and yield[J]. Agricultural Water Management, 2013, 126: 33-45.
- [21] XU J Y, GU B X, TIAN G Z. Review of agricultural IoT technology[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2022, 6: 10-22.
- [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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1-20.
- [23] VELLIDIS G, TUCKER M, PERRY C, et al. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(1): 44-50.
- [24] NAVARRO-HELLÍN H, MARTÍNEZ-DEL-RINCON J, DOMINGO-MIGUEL R, et al. A decision support system for managing irrigation in agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 121-131.
- [25] GOAP A, SHARMA D, SHUKLA A K, et al. An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 41-49.
- [26] 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.
- [27] 余国雄, 王卫星, 谢家兴, 等. 基于物联网的荔枝园信息获取与智能灌溉专家决策系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 144-152.
YU Guoxiong, WANG Weixing, XIE Jiaying, et al. Information acquisition and expert decision system in litchi orchard based on Internet of Things[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 144-152.
- [28] 韩青, 谭向勇. 农户灌溉技术选择的影响因素分析[J]. 中国农村经济, 2004(1): 63-69.
- [29] KAMIENSKI C, SOININEN J P, TAUMBERGER M, et al. SWAMP: an IoT-based smart water management platform for precision irrigation in agriculture[J]. 2018 Global Internet of Things Summit (GIoTS), 2018: 1-6.
- [30] 高鹏, 简红忠, 魏祥, 等. 水肥一体化技术的应用现状与发展前景[J]. 现代农业科技, 2012(8): 250, 257.
GAO Peng, JIAN Hongzhong, WEI Yang, et al. The application status and development prospect of integrative water and fertilizer[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(8): 250, 257.
- [31] BOURSANIS 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]. Internet of Things, 2022, 18: 100 187.
- [32] TAO H, DIOP L, BODIAN A, et al. Reference evapotranspiration prediction using hybridized fuzzy model with firefly algorithm: Regional case study in Burkina Faso[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 140-151.
- [33] 陈晓栋, 原向阳, 郭平毅, 等. 农业物联网研究进展与前景展望[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(2): 8-16.
CHEN Xiaodong, YUAN Xiangyang, GUO Pingyi, et al. Progress and prospect in agricultural Internet of Things[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(2): 8-16.
- [34] 高祥照, 杜森, 钟永红, 等. 水肥一体化发展现状与展望[J]. 中国农业信息, 2015(4): 14-19, 63.
- [35] 许世卫. 我国农业物联网发展现状与对策[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(6): 686-692.
XU Shiwei. Current status of agricultural IOT in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(6): 686-692.
- [36] ESMAILNEZHAD E, CHOI H J, SCHAFFIE M, et al. Characteristics and applications of magnetized water as a green technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 908-921.

Application of Internet of Things in Irrigation: A Review

LU Hongfei¹, WANG Tao^{1,2}, QIAO Dongmei³, SUN Jian^{1,2},
WU Gangshan¹, TIAN Chongfeng¹, YAN Fang¹, ZHEN Bo^{1,3*}

(1. Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212499, China; 2. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: 【Objective】The internet of things (IoT) has been increasingly used to improve agricultural management over the past decades, and the purpose of this paper is to analyze its development and shift in application based on recent publications. 【Method】We used topics and keywords to search relevant publications in CNKI and Web of

Science (WOS) databases. Endnote X9 and VOSviewer were used to sort out publication data, the number of annual publications, affiliated institutions and research hotspots, from which we analyzed its development and shift.

【Result】 Application of IoT in irrigation has developed rapidly. Since 2011, CNKI and WOS have both seen a rapid growth in publications in this area. We found 300 papers in CNKI in 2020, and 280 papers in WOS in 2021. In terms of contributors, Hebei Agricultural University and Beijing Agricultural Intelligent Equipment Technology Research Center topped the list in China, while in terms of journals, Water-saving Irrigation and Agricultural Mechanization Research published the most in China. Before 2010, research in IOT in China focused on irrigation automation and since 2011 this has shifted to intelligent irrigation, integration of water and fertilizer, intelligent agricultural machinery, intelligent irrigation, and water saving. Internationally, Florida State University System and the University of Florida led other institutions, and Agricultural Water Management and Sensors are the journals that published more in this field. India, China, and America lead other countries in contributing papers, publishing 292, 220 and 184 respectively. Before 2010, the focus of IOT was agricultural production, water management and water resources regulation, and since 2011, this has shifted to agricultural production and its environmental footprints, regulation of water resources, application of irrigation technology, and intelligent irrigation. **【Conclusion】** The application of IOT technology in irrigation has shifted from automation intelligence. The future research will be to optimize software and hardware of intelligent irrigation systems, reduce costs of irrigation equipment, big data analysis and security, establish intelligent irrigation standard and training, set up efficient wireless transmission networks, and implement intelligent irrigation and fertilization.

Key words: internet of things; automation; intelligent irrigation; bibliometrics; VOSviewer

责任编辑：白芳芳

(上接第 71 页)

The Effects of Saline Water Irrigation on Soil Salinity and Physiology of Greenhouse Tomato

MA Jiaying^{1,2}, WANG Xingpeng^{1,2}, WANG Hongbo^{1,2}, WANG Hairui^{1,2}, LI Zhaoyang^{1,2*}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: 【Objective】 Saline groundwater is a complementary water resource for irrigation in Xinjiang, but its application needs calculated management. The aim of this paper is to study the impact of saline water irrigation on soil salt content and physiology of greenhouse tomatoes. **【Method】** The experiment was conducted in southern Xinjiang, and the crop was drip-irrigated using water with salinity at 2 g/L (T1), 4 g/L (T2), 6 g/L (T3) and 8 g/L (T4), respectively. Fresh water irrigation was taken as the control (CK). The irrigation amount and irrigation frequency in all the treatments were the same. In each treatment, we measured soil salt content and physiological indexes of the crop.

【Result】 Vertically, soil salt content decreased along the depth, regardless of the treatments; horizontally, soil salt accumulated in soil 20~40 cm away from the emitter. At the end of the growth period, salt accumulated predominantly in 20~60 cm soil layer. Salt accumulation area increased with the increase in irrigation water salinity. Irrigating with water salinity in 2~4 g/L promoted tomato growth and thickened its stems, despite of its insignificant effects on dry biomass. Increasing water salinity to 6~8 g/L inhibited crop growth. When water salinity was 2 g/L, the total chlorophyll and carotenoid contents in the crop maximized. When water salinity was greater than 4 g/L, a large amount of active oxygen accumulated in organs exceeded the scavenging capacity of the protective enzymes. Irrigation when water salinity was in 2~4 g/L improved both fruit yield and quality. **【Conclusion】** Considering salt distribution and plant growth, groundwater with salinity in the range of 2 to 4 g/L can be used as a complementary water resource to irrigate greenhouse tomatoes in southern Xinjiang.

Key words: tomato; salt water; plant growth; leaf physiology; yield; quality

责任编辑：白芳芳