

文章编号: 1007-4929(2021)05-0063-08

基于文献计量的农业节水领域研究现状及热点分析

顾丹丹¹,董勤各^{2,3},李雅⁴,雷会珠⁴,冯浩^{2,3}

(1.西北农林科技大学农学院,陕西杨凌712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌712100;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100;4.西北农林科技大学图书馆,陕西杨凌712100)

摘要:农业节水是农业可持续发展的研究热点。为了能够在总体上把握国际有关农业节水技术领域的研究现状、热点和发展趋势,以Web of Science核心合集数据库为数据源,对1992-2019年发表的农业节水技术相关的文献进行计量分析,结果表明:①农业节水技术研究发展迅速,国际尤其是中国在该领域发文量均呈现快速增加趋势。②农业节水技术研究是一个多学科交叉领域,但其载文期刊分布相对集中。③西班牙在农业节水技术研究领域居世界领先地位,论文数量和质量均较高。中国和美国发文量分居第一和第二位,但论文篇均被引频次较低。西班牙高等科研理事会(CSIC)在该领域表现突出,论文数量和质量均最高。中国4所机构发文量进入世界前10位,分别是中国农业大学、中国科学院、西北农林科技大学和河海大学,但4所机构发文质量均有待进一步提升。④灌溉方式是近年来的研究热点,主要包括滴灌、喷灌、分根交替灌溉和加肥灌溉等。关于农业节水技术增产、增效机制方面的研究也是研究的热点,包括对碳氮代谢、水氮互作、植物激素等方面的研究。环境温度、温室气体排放等也是研究的热点。由此可以看出,有关农业节水的研究在国内外都属于研究热点方向,中国在该领域的整体表现突出,但是需进一步加强国际合作,提高在该领域的影响力。

关键词:节水灌溉;农业;文献计量;研究热点

中图分类号: S275 **文献标识码:** A

顾丹丹,董勤各,李雅,等.基于文献计量的农业节水领域研究现状及热点分析[J].节水灌溉,2021(5):63-70.

GU D D, DONG Q G, LI Y, et al. Research status and hot spot analysis of agricultural water saving field based on bibliometrics[J]. Water Saving Irrigation, 2021(5): 63-70.

Research Status and Hot Spot Analysis of Agricultural Water Saving Field Based on Bibliometrics

GU Dan-dan¹, DONG Qin-ge^{2,3}, LI Ya⁴, LEI Hui-zhu⁴, FENG Hao^{2,3}

(1.College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, Shaanxi

Province, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water

Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 4.Library, Northwest Agriculture and Forest University,

Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Agricultural water saving is an important guarantee for agricultural sustainable development. In order to understand the current status, hot spot and development tendency of world-wide agricultural water saving research, using the Web of Science core collection database as the data source, this paper conducted a quantitative analysis of the literatures on agricultural water-saving technology published from 1992 to 2019. The results show that: ①The research on agricultural water-saving technology is developing rapidly, and the number of papers published in this field is increasing rapidly in the world, especially in China. ②Agricultural water-saving technology research is a multidisciplinary field, but the journal distribution is relatively concentrated. ③Spain takes the leading position in the field of

收稿日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879224, 41630860, 41961124006)。

作者简介: 顾丹丹(1984-), 女, 馆员, 研究方向为文献计量与情报分析。E-mail: dandangu0726@126.com。

通讯作者: 冯浩(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为水土资源高效利用、作物生境过程与模拟及早区农业宏观研究。E-mail: nercwsi@vip.sina.com。

agricultural water-saving technology research, and the quantity and quality of the papers are high. China and the United States rank first and second respectively in the number of published papers, but the citation frequency of both papers are low. The Council for Higher Research in Spain (CSIC) is prominent in this field, with the highest number and quality of papers. Four Chinese institutions, namely China Agricultural University, Chinese Academy of Sciences, Northwest Agriculture and Forestry University and Hohai University, are among the world's top 10 in terms of publication volume, but the quality of their publications needs to be further improved. ④Irrigation methods are the research focus in recent years, mainly including drip irrigation, sprinkler irrigation, alternate root separation irrigation and fertilizing irrigation. The research on agricultural water-saving technology to increase production and increase efficiency mechanism is also a hot spot, including the research on carbon and nitrogen metabolism, water and nitrogen interaction, plant hormones and so on. Environmental temperature and greenhouse gas emission are also hot topics. It can be seen that the research on agricultural water saving is a hot research direction both at home and abroad, and China's overall performance in this field is outstanding. However, it needs to further strengthen international cooperation to improve its influence in this field.

Key words: water saving irrigation; agriculture; bibliometrics; hot spot

水是人类生产和生活过程中必不可少的基本自然资源,是社会经济可持续发展得以实现的物质基础之一^[1]。在世界范围内农业用水占水资源的80%左右,这一数据因不同经济发展水平和气候有一定差异^[2]。在发达国家,灌溉用水约占可利用水资源的60%,而在发展中国家这一比例可达90%^[3]。我国水资源分布呈现出明显的不平衡性,局部水资源缺乏严重,加之较为严重的水污染问题,极大地制约了农业和工业的发展^[4,5]。作为农业大国,近年来我国农业用水占到总用水量的62.4%^[6]。为了维持作物较高的产出,我国绝大部分农作物都需要灌溉,目前灌溉的耕地面积占国家耕地面积的42%,农田灌溉水量占到了农业用水量的90%~95%^[7]。但是,由于灌溉方式粗放等原因,我国灌溉水有效利用系数平均仅0.55,粮食水分生产率不足1.5 kg/m³,大量灌溉水被无效浪费,这加剧了水资源的浪费和农业用水的进一步缺乏,也造成农作物生产成本增高、比较效益降低^[8]。因此,采取有效的节水灌溉措施,使单位水量发挥可能最大的经济效益,是我国农业发展的必然趋势^[9]。农业节水的重要途径包括滴灌、喷灌、沟畦灌等多种方式。关于这些措施对农业生产的影响,前人已有很多研究。综合分析这些研究结果,深入探讨如何更加合理的利用节水措施,对于更好的发展节水灌溉农业具有重要的理论和现实意义。

文献计量学是借助于文献的各种特征数量,采用数学与统计学方法来描述、评价和预测科学技术的现状与发展趋势的图书情报学分支学科^[10]。美国科技信息研究所(ISI)的科学引文索引数据库扩展版(SCIE)收录了世界各学科研究领域内最优秀的科技期刊,其收录的文献能在一定程度上反映科学前沿的发展动态。文献计量学方法作为一个成熟的工具已经广泛应用于多个学科,如王耕等^[11]运用文献计量的方法分析了海洋生态系统服务的研究热点和趋势,张俊等^[12]采用文献计量的方法对凋落物研究现状和热点进行了分析,串丽敏等^[13]将文献计量学运用到土壤污染修复领域发展态势研究中。为了能够在总体上把握国际上有关农业节水技术领域的研究现状、热点和发展趋势,本文以Web of Science(WoS)核心合集数据库为数据源,对1992-2019年发表的农业节水技术相关的文献进行计量分析,以期了解农业节水技术领域的最新动态,并为农业节水相关领域的进一步研究提供参考。

1 数据来源与分析方法

1.1 检索词的选择与检索方式

本研究以Web of Science(WoS)中SCIE核心合集为数据来源,重点关注以节水技术为主的农业节水灌溉方面的研究。这些技术主要包括以灌溉方式进行区分的喷灌、微灌、滴灌、畦灌和沟灌,以及以灌水量进行区分的亏缺灌溉和充分灌溉等。以这些技术措施关键词为基础,分别从主题(TS)和标题(TI)检索,两种方式的检索结果进行初步分析,并结合科研人员建议,最终确定以下主题检索方式:TS=(“water saving irrigation” or “saving irrigation” or “saving water irrigation” or “water-saved irrigation” or “precision irrigation” or “precise irrigation” or “sprinkl* irrigation” or “spray* irrigation” or “micro irrigation” or “drip irrigation” or “trickl* irrigate*” or “border irrigation” or “strip irrigation” or “ridge irrigation” or “border strip irrigation” or “furrow irrigation” or “ditch irrigation” or “surface irrigation” or “deficit irrigation”),文献类型为Article或Review,分别限定发表时间为1992-2019年和2010-2019年。检索时间为2020年2月。

1.2 分析方法

检索结果1992-2019年发表文献9 953篇,其中2010-2019年间发表6 675篇。首先利用科睿唯安开发的分析工具Derwent Data Analyzer(DDA)进行文献数据的清理及挖掘,其次将研究论文的发表年度、研究国家、研究机构、来源出版物、学科领域分布、关键词等信息输入Excel、GraphPad Prism 8软件进行统计分析,并绘制战略坐标图、热图、折线图及雷达图等;利用Ucinet和Netdraw对关键词合作度进行可视化分析。

2 结果与分析

2.1 1992-2019年间农业节水领域研究概况

2.1.1 研究论文数量变化趋势

1992-2019年间,农业节水灌溉方面的研究论文呈稳态增长趋势(图1)。这表明,农业节水灌溉一直是研究的热点方向之一。1992-2009年,中国学者发表文献数量占总发表文献

的比例平均为4.07%，2010-2019年其比例从13.28%快速增长至34.86%。这表明，从1992年以来，尤其是近十年来，中国在农业节水领域的科研取得了巨大的进步，在世界上所处的

地位也日益提高。同时，在检索的总文献中，2010-2019年间发表的论文总量为6 675篇，占1992-2019年发文总量（9 953篇）的67.1%。

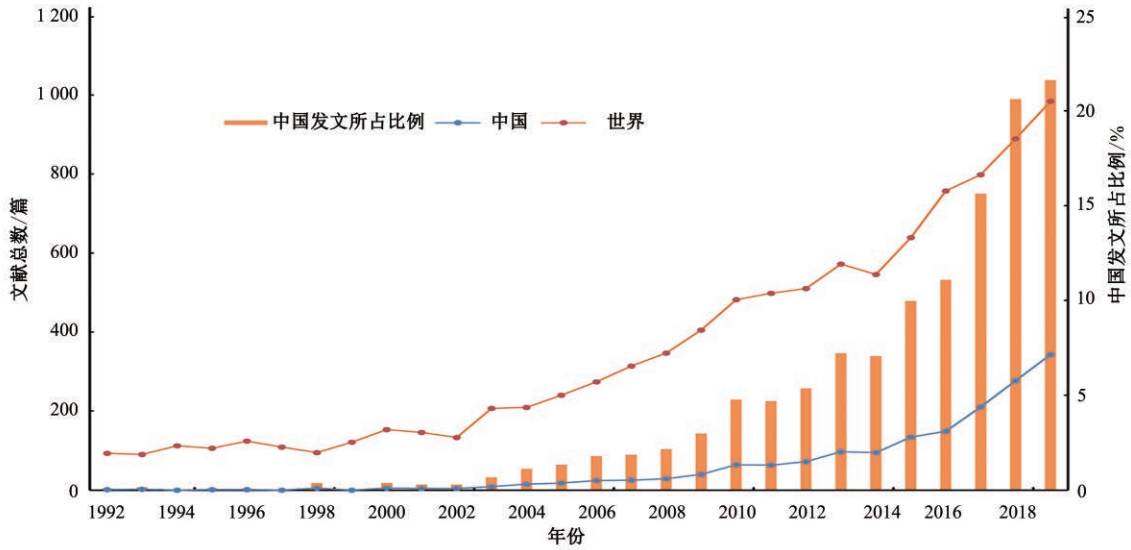


图1 1992-2019年农业节水技术文献年度分布

Fig.1 Quantity of publications on agricultural water saving from 1992 to 2019

2.1.2 学科领域分布

根据SCIE数据库对期刊进行的学科分类，分析了1992-2019年农业节水领域的研究论文，共涉及115个学科类别。农业节水技术研究主要涉及农艺学（Agronomy）、水资源（Water Resources）、农业-多学科（Agriculture, Multidisciplinary）、环境科学（Environmental Sciences）、园艺学（Horticulture）、农业工程（Agricultural Engineering）、植物科学（Plant Sciences）、土壤科学（Soil Science）、食品科学与技术（Food Science & Technology）等主题领域。其中以农艺学（Agronomy）、水资源（Water Resources）领域研究较为集中。

Water Management，其载文量达1 428篇，占论文总量的14.35%。排名第二和第三位的分别是Irrigation Science和Journal of Irrigation and Drainage Engineering，其载文量分别为396和333篇。

2.2 近10年来主要研究力量分布

2010-2019年SCI论文发文量前10（Top10）的国家累计发文量为4 572篇，占该时段总发文量的68.49%。发文量最高的三个国家为中国、美国和西班牙。从国家层面分析（图3），处于第一象限的为西班牙，说明其不但论文数量多，而且论文的质量和在国际影响力也高；第二象限的有意大利、澳大利亚和葡萄牙，表明这三个国家的发文量虽然低于平均水平，但文献的被引情况良好，在全球的影响力较广，尤其是葡萄牙，其篇均被引频次居于首位，达24.15；处于第三象限的伊朗、土耳其、印度和巴西在节水研究领域也要进行了较为广泛的研究，但其研究成果数量和影响力相对于其他Top10国家有所不足；中国和美国处于第四象限，论文数量较多，但篇均被引频次相对较低，因此其较高的H指数较高与其发表论文数量大有关。

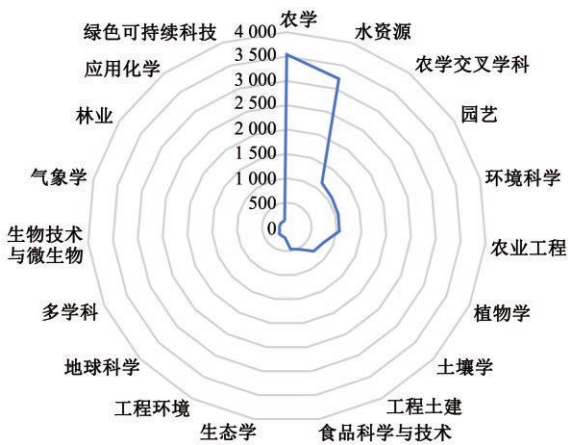


图2 1992-2019年农业节水技术领域涉及的学科领域

Fig.2 The major research area of agricultural water saving from 1992 to 2019

2.1.3 论文发表期刊分析

从表1可以看出，农业节水技术相关论文期刊分布相对比较集中，载文量前10位期刊共计载文量为3 561篇，累计百分比占全部论文数的35.78%。排名第一位的期刊为Agricultural

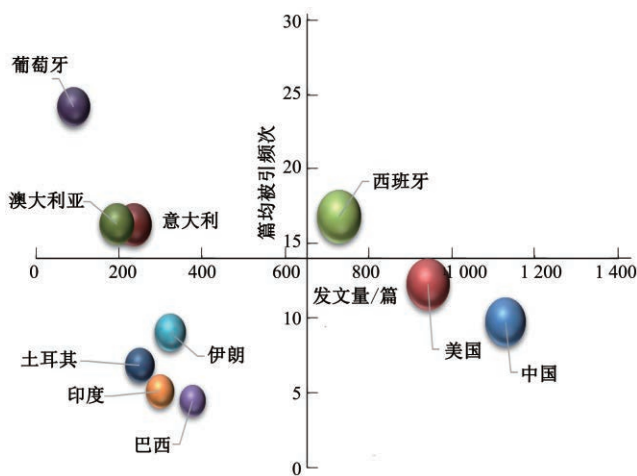
从机构层面分析（图4），西班牙高等科学研究理事会（CSIC）位于第一象限，其发文量为206篇，为所有机构最高，且其发表的文章篇均被引频次和H指数分别为23和35，均高于其他研究机构。这表明，CSIC在农业节水技术方面的研究处于世界领先地位。处于第二象限的包括美国加州大学系统（UC）、中国科学院（CAS）和中国农业大学（CAU）。这三个机构发文量和篇被引频次也相对较高，这表明其在农业节水领域科研水平较高，也有较强的国际影响力。西北农林科技大学（NWFU）、印度农业研究理事会（ICAR）、中国河海大学（Hohai Univ）、美国佛罗里达大学（UF）、伊朗设拉子大学（Shiraz Unvi）处于第三象限，在Top10研究机构中处于较为边

表1 1992–2019年农业节水技术领发文量前10种期刊来源分析

Tab.1 Top 10 journals of publications on agricultural water saving from 1992 to 2019

排序	期刊名称	期刊载文量/篇	占总数百分比/%	影响因子	出版国家	JCR分区
1	Agricultural Water Management	1 428	14.35	3.542	荷兰	Q1
2	Irrigation Science	396	3.98	2.440	美国	Q1
3	Journal of Irrigation and Drainage Engineering	333	3.35	1.340	美国	Q3
4	Scientia Horticulturae	277	2.78	1.961	荷兰	Q1
5	Irrigation and Drainage	250	2.51	1.027	美国	Q3
6	Transactions of the Asabe	231	2.32	1.153	美国	Q3
7	Hortscience	214	2.15	0.906	美国	Q2
8	Agronomy Journal	159	1.60	1.805	美国	Q2
9	Water	157	1.58	2.524	瑞士	Q2
10	Field Crops Research	116	1.17	3.868	荷兰	Q1

注:影响因子(IF)为2018年JCR数据。



注:点大小代表H指数大小。

图3 2010年至2019年内发文量前十位国家研究力量比较

Fig.3 Comparison in research strength of top 10 countries on agricultural water saving from 1992 to 2019

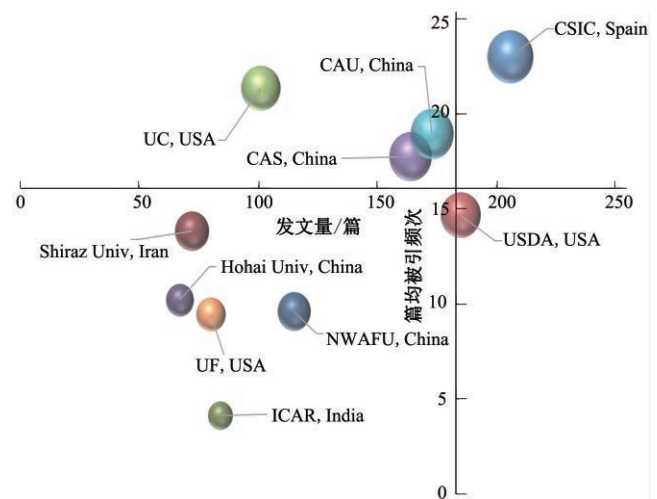
缘的地位, 发文数量和质量均有待进一步提升。美国农业部(USDA)处于一、四象限的坐标轴, 其发文量居第二位, 但篇均被引频次较低。

2.3 近10年来研究主题和热点

图5和图6分别反映了2010–2019年10年间发表的论文中词频超过100和50的关键词分布情况。从图5和图6可以看出, 近10年来, 滴灌、亏缺灌溉、产量、作物水分利用效率、水分胁迫、蒸散、气候变化、精确农业、温室气体、碳、抗氧化系统、肥料等关键词出现频率呈现出明显的上升趋势。

整体来看, 词频 ≥ 100 的关键词, 不仅节点较大, 节点间的连线较多, 且较粗的连线也多, 交织成密集的网络。由图7可以看出, 滴灌不仅节点大, 且被引频次多, 说明滴灌仍是各种灌溉形式中研究最多的。亏缺灌溉也是研究的重点, 有关沟灌、微灌和喷灌也有较多的研究; 另外一种水肥耦合的灌溉方式加肥灌溉也是一种研究较多的灌溉方式。产量、蒸散、水分利用效率、水分生产力、氮、土壤水分、盐分、根等也是研究的核心热点。

50 $<$ 频次 $<$ 100的关键词(图8), 硝酸盐是研究的核心之一, 与加肥灌溉、排水、HYDRUS间的连线较粗。表明, 有



注:点大小代表H指数大小。

图4 2010–2019年发文量前十位研究机构研究力量比较

Fig.4 Comparison of publications of top 10 institutes on agricultural water saving from 1992 to 2019

关硝酸盐与加肥灌溉、硝酸盐与排水、硝酸盐与HYDRUS的研究出现在同一篇文章中的几率较大。气孔导度不仅节点大, 而且其被引也较多, 其中与作物系数及冠层间连线较粗。光合色素是另一个研究热点, 有70篇文献涉及光合色素, 其中研究最多的是叶绿素(54篇)、其次是类胡萝卜素(18篇)。植物激素/生长调节剂的研究也受到关注, 这其中包括脱落酸、水杨酸、细胞分裂素、乙烯、茉莉酸、生长素、赤霉素、多胺等多种激素。碳和生物量也是研究的重点。抗氧化系统和花青素的研究同样受到较多关注, 且二者间连线较粗, 表明二者同时出现的几率较大。

3 讨论

论文的年代分布在一定程度上反映了该领域研究状况、水平和发展速度, 以及某时间段内该领域的研究热点^[4]。近10年来, 农业节水灌溉方面的研究论文呈稳态增长趋势。这反映了随着社会经济日益快速发展, 水资源日益稀缺, 国内外学者对于节水农业相关研究的关注更为密切。从1992年到2019年, 中国作者所发表的文献数量也呈现出明显的增加趋

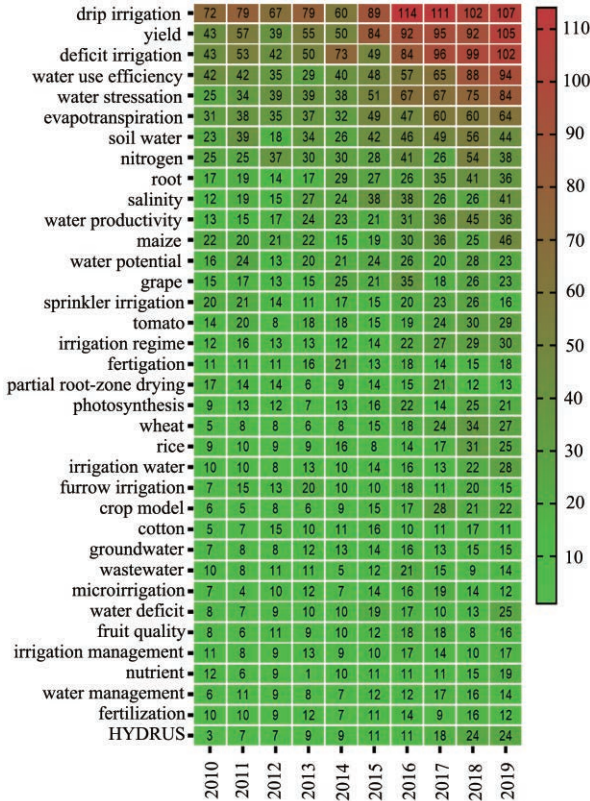


图5 2010-2019年词频>100的作者关键词分布

Fig.5 Authors' keyword distribution with word frequency greater than 100 from 2010 to 2019

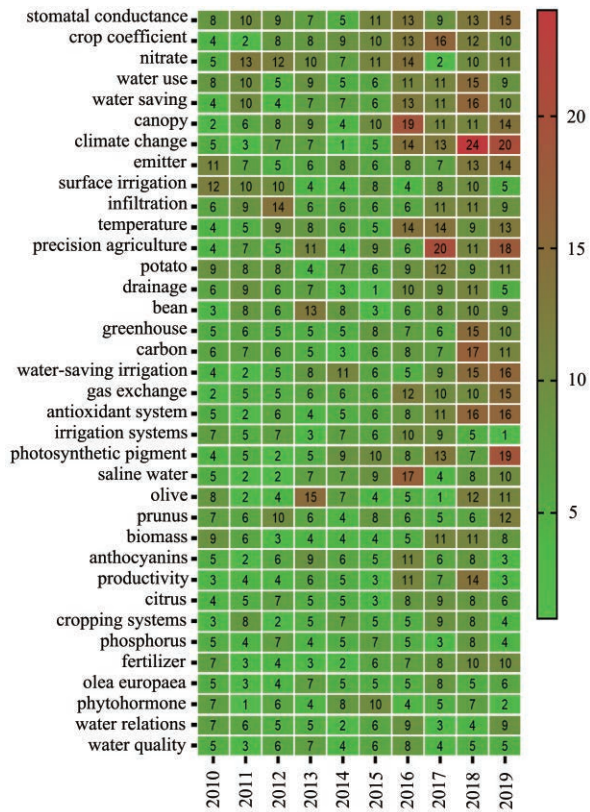
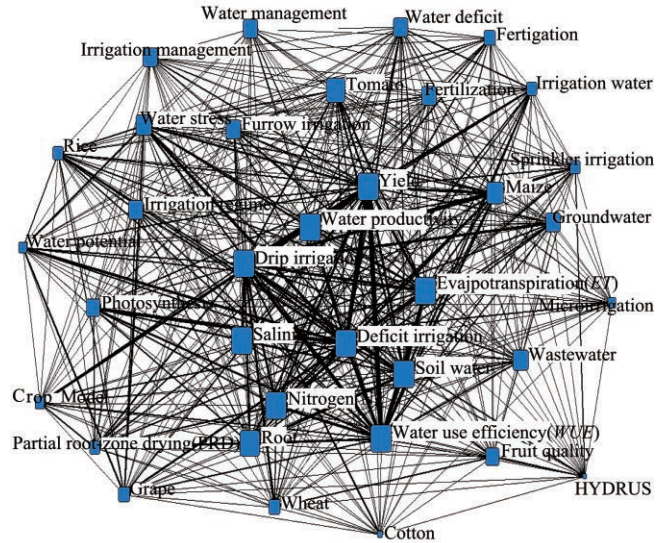


图6 2010-2019年50<词频<100的作者关键词分布

Fig.6 Authors' keyword distribution with 50<word frequency <100 from 2010 to 2019



注:关键词的节点越大,其中心度越高;关键词间连线越粗,两者间共现几率越大。

图7 词频>100的作者关键词网络度分析

Fig.7 Keywords network degree analysis of authors with word frequency greater than 100

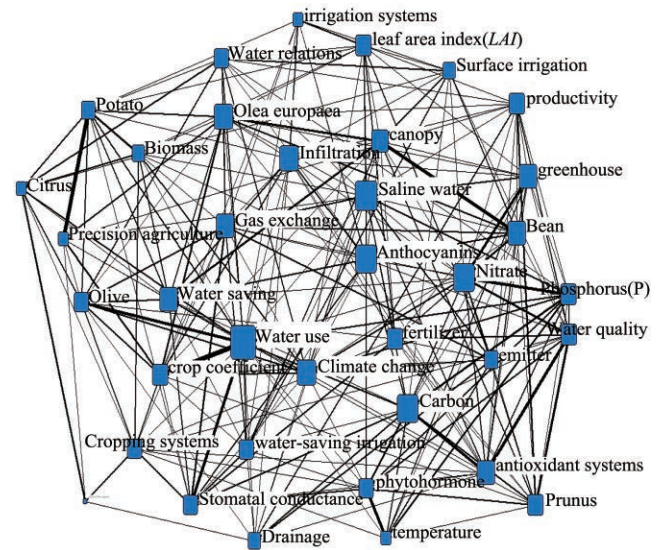


图8 50<词频<100的作者关键词网络度分析

Fig.8 Keywords network degree analysis of authors with 50<word frequency <100

势,尤其2010年后,中国作者所发表的文献数量快速增加,其占总发表文献的比例呈现出快速的增长趋势。这也说明,节水灌溉在我国也日益受到关注,也是研究的热点工作。且我国在农业节水灌溉方面的研究主要集中于农艺学和水资源领域,研究方向较为集中,但同时该方面的研究涉及多学科的交叉领域,研究也具有综合性、跨学科性的特点。

在1992年到2019年的检索的总文献中,2010-2019年间发表的论文总量为6675篇,占1992-2019年发文总量(9953篇)的67.1%,因此本报告重点分析了近10年(2010-2019年)该领域的研究力量分布和研究主题热点。论文数量、被引频次和H指数是分析评价研究成果质量的重要指标,能从论文数量角度反映国家或机构对某领域的关注度,从质的角

度反映论文水平和影响力强弱^[15]。从国家层面的分析可以看出,中国在农业节水领域的研究在近年取得了很大的进步,发文量位居世界首位。但是,我国文章篇均被引频次相对不高,低于西班牙、美国、意大利、澳大利亚和葡萄牙等国。在节水灌溉领域,中国科学院(CAS)和中国农业大学(CAU)取得了相对较好的成绩,发文量仅次于西班牙高等科学研究理事会和美国加州大学系统,但CAS和CAU文章篇均被引频次也低于二者。这表明,在农业节水领域,我国科学工作者做了大量的研究,取得了一系列的成果。但是,我国在该领域研究影响力不足。这需要我国科研工作者进一步凝练成果,提高论文的质量,从而增强我国在该领域的科研影响力。

关键词是对文献研究内容的高度浓缩,出现频次较高的关键词可以在一定程度上反应某时间段内比较常用的研究方法、研究中的瓶颈问题或者研究人员关注的热点话题^[16]。本研究表明,灌溉方式的研究一直是近年来的研究热点。研究最多的是滴灌(Drip irrigation)。其次,喷灌(Sprinkler irrigation)、分根交替灌溉(Partial root-zone drying irrigation (PRDI))、加肥灌溉(Fertigation)、沟灌(furrow irrigation)和微灌(Microirrigation)也均有较多的相关研究。同时,图5表明,滴灌研究相关的文献数量呈现出快速增加的趋势。这说明随着节水观念的深入,以及水资源利用的日趋紧张,农业节水技术的研究日益受到重视。前人研究表明,滴灌、喷灌能够显著提高作物产量(yield)及水分利用效率(water use efficiency)^[17,18]。也有研究认为,喷灌、滴灌等措施对技术要求较高,且相关维护成本高,同时可能会造成土壤盐分(salinity)积累以及盐分物质堵塞灌溉孔等问题,在小麦等大田作物的应用受到一定的限制^[19]。图7也表明,盐分和滴灌两个关键词结合紧密,这说明该问题受到了多个研究者的重视。但是,随着技术的进步,微喷灌、滴灌等材料成本及价格下降,这使得滴灌和喷灌等在大田作物的应用变得日益广泛。Wang等^[20]研究表明,配合地膜等技术,滴灌技术在小麦生产上也取得较好的效果。Valentin等^[21]研究表明,喷灌和滴灌在玉米生产中能够起到节水、增产、增效的效果。同时,滴灌、喷灌结合加肥灌溉,可以显著促进作物对营养元素的吸收,提高肥料的利用效率,起到节水、减肥的效果。除滴灌、喷灌外,分根交替灌溉,沟灌等节水灌溉方式也有较多的研究。一系列研究表明,分根交替灌溉和沟灌等灌溉方式同样能显著提高作物产量,并提高灌溉水利用效率^[22]。由于其相对较低的成本,在大田作物生产中应用的可行性相对较大。同时,有研究表明,沟灌等灌溉措施结合沟垄覆膜种植等栽培措施,能够在冬小麦生产上节水效率达到50%以上,能够促进作物的高产、高效生产^[23]。另外,从研究对象来看,热点作物除葡萄(grape)、李属植物(prunus)外,主要包括玉米(maize)、马铃薯(tomato)、小麦(wheat)、水稻(rice)、棉花(cotton)、土豆(potato)和豆类(bean)等大田作物,且这些关于作物研究相关的文献量也呈现明显的增加趋势(图5和图6)。同时,除水分利用效率、水分生产力(water productivity)外,关于作物产量(yield)、果实品质(fruit quality)等也日

益成为研究热点。这些研究表明,随着技术的进步以及研究的不断深入,多种节水灌溉技术在作物生产上得到越来越广泛的应用,对于农作物生产的贡献也越来越大。除提高水分利用外,高产、优质、高效相协调也成为农业节水技术研究和应用的一个重要目标。在提高水分利用效率的同时,如何综合提高农作物产量、品质、资源利用效率,是将来节水灌溉的一个主要研究方向。

作物模型(Crop model)是借助信息技术进行农业生产精准管理的基础,是农业生产和研究进步的标志之一。HYDRUS模型的应用较为广泛(图5),除此之外,本研究文献中涉及的作物模型主要包括AquaCrop、SIMDualKc、APSIM、CERES model (Maize/ Rice/ Wheat)系列、CROPWAT、DSSAT以及SWAP-WOFOST等。这些模型侧重点不同,关注的方向及其适应性也存在一定差异,这可能是不同研究采用不同模型的主要原因。除此之外,有关精准农业(Precision agriculture)、灌溉管理(irrigation management)和灌溉制度(irrigation regime)的研究也是研究的热点(图5和图6)。这些结果表明,国家对农业节水技术的研究与模型的结合日益紧密,同时越来越注重从管理和制定政策制度方面入手,农业节水技术宏观方面的研究日益受到重视。

除宏观研究外,关于农业节水技术增产、增效机制方面的研究也是研究的热点。这其中,碳(Carbon)和氮(Nitrogen)代谢是研究的热点之一(图5~图8)。碳水化合物合成及其积累是作物产量形成的决定因素。前人研究表明,合理的节水灌溉措施能够显著调控作物植株的叶面积指数(Leaf area index),进而改善作物的叶片光合作用(Photosynthesis),从而促进作物生长发育并提高其生物量(Biomass)和产量^[24]。也有研究发现,适度的亏缺灌溉能够促进碳水化合物向籽粒等结实器官转运,提高作物的收获指数进而提高产量^[25]。除此之外,前人研究发现节水灌溉更能够显著影响叶片气孔导度(Stomatal conductance),在不影响作物光合作用的前提下显著降低水分蒸腾,从而提高水分利用效率^[26]。这些研究表明,植株碳水化合物代谢受到灌溉措施的显著影响,并影响作物产量形成。除产量外,不同灌溉措施下,碳水化合物代谢和作物品质也存在密切关系。Xu等^[27]研究表明,节水灌溉措施显著影响水稻直链淀粉含量和稻米淀粉直支比,进而显著影响稻米蒸煮食味品质。除碳外,氮也是作物的重要组成部分,显著影响作物产量和品质。作物氮吸收代谢与灌溉存在密切联系,水氮之间存在显著的互作效应,适度的灌溉能够促进作物对土壤氮素的吸收、利用,进而提高作物氮素利用效率^[28]。除此之外,适度的节水灌溉一方面减少水分向深层土壤渗透,促进作物对深层水分的利用,同时能够减少硝态氮(Nitrate)的淋溶损失,起到节水节肥、减水增肥的功效,促进作物的高产、高效^[29]。除碳氮代谢外,植物激素(phytohormone)的研究也受到关注(图6和图8)。分析植物激素出现的文献,其中脱落酸出现频次最高,其次水杨酸、细胞分裂素、乙烯、茉莉酸、生长素、赤霉素、多胺等也均有涉及。前人研究表明,适度的节水灌溉措施能够通过调控激素信号途径调控作物生长对水分的响应,这其中脱落

酸起着关键作用^[29]。脱落酸信号能够调控作物气孔开闭,影响作物的光合作用和水分利用,进而调节水分利用效率^[30]。除ABA外,其他激素也在作物响应不同灌溉中起着重要作用。Liu等^[31]研究发现,沟垄集雨补灌措施通过影响籽粒多胺和乙烯等激素含量调控了小麦籽粒灌浆。也有研究发现,覆膜节水灌溉对玉米粒重的影响与细胞分裂素和生长素等激素有关^[32]。这些研究表明,作为植物信号,激素在节水灌溉调控作物生长过程中起着重要作用。除此之外,抗氧化系统(antioxidant systems)的研究同样受到较多关注,其在节水灌溉调控作物生长过程中同样起着重要作用。研究作物生长发育响应节水灌溉的生理生化机制,对于构建合理的灌溉系统,促进作物生长及其产量、品质形成具有重要影响。这可能是今后节水灌溉研究的一个重要方向。

随着气候变化(Climate change),关于环境以及温室气体(greenhouse gas)排放的研究也日益成为热点。其中,在农业节水技术方面,氧化亚氮的研究最多,其次为甲烷和二氧化碳。Deng等^[33]研究表明,节水灌溉能够显著降低农田氧化亚氮排放强度,对节能减排具有显著影响。Guo等^[34]研究发现,滴灌能够显著降低二氧化碳的排放,提高土壤碳汇。研究认为,在水稻上干湿交替灌溉方式能够有效降低甲烷排放,达到增产增效的作用^[35]。关于节水灌溉措施影响温室气体排放的机理,前人也从土壤微生物、土壤水分、温度等方面进行了研究^[36]。目前,随着对环境的日益重视,农艺措施的环境效应研究也逐渐受到重视。节水灌溉措施对于农田碳氮排放具有显著影响,如何从水分-土壤-微生物-碳氮排放的角度综合研究节水灌溉措施对于农田碳氮减排的影响机制,有利于深化节水灌溉的研究内涵,加深其与其他研究的联系,促进学科的深入发展。

这些研究表明,关于农业节水灌溉措施,前人从产量、品质、植物生长、碳氮代谢、激素、温室气体排放、生理机制等方面进行了较为全面的研究。在今后的研究中,应该注重多因素的协同作用,以及节水措施的综合效应研究,使得农业节水灌溉措施能够在农业发展中起到更加重要的作用。

4 结论

通过对WoS中1992-2019年(重点2010-2019年)节水技术文献的年度发文量、主要研究国家/机构、来源期刊分布、学科分布、研究热点分析,得出如下结论:

(1) 1992-2019年间,国内外有关农业节水技术相关研究文献日益增多,表明研究人员对该领域的关注度越来越高。农业节水技术研究是一个多学科交叉领域,文献学科分布非常广泛,主要涉及农学、水资源、环境科学、园艺学、农业工程等学科。该领域的期刊分布较为集中,其中农田水管理(Agricultural Water Management)载文量占14.35%。

(2) 中国在农业节水技术研究领域发文量最多,但文献篇均被引频次较低,文献质量有待提升。美国和西班牙发文量分居第二和第三位。众多研究机构中,西班牙高等科研理事会(CSIC)表现最为突出,发文量和篇均被引频次均居世界首位。中国有4所机构发文量进入世界前10位,分别

为中国农业大学、中国科学院、西北农林科技大学和河海大学。其中,中国农业大学和中国科学院篇均被引频次超过平均水平,有较强的影响力;西北农林科技大学和河海大学文献被引情况较弱,更应注重高质量论文的发表,以提高在该领域的影响力。

(3) 灌溉方式的研究是近年来的研究热点,其中对滴灌的研究最多,喷灌、分根交替灌溉、加肥灌溉、沟灌和微灌也均有较多的研究。关于农业节水技术增产、增效机制方面的研究也是研究的热点,这其中研究较为集中的包括对碳氮代谢、植物激素和抗氧化系统等方面的研究。关于环境以及温室气体(greenhouse gas)排放的研究也日益成为热点,研究较多的温室气体包括氧化亚氮、甲烷和二氧化碳等。综上,关于农业节水灌溉措施的作用和效应,研究人员分别从产量、品质、植物生长、碳氮代谢、激素、温室气体排放、生理机制等方面进行了较为全面的研究。

参考文献:

- [1] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等.关于中国北方水资源问题的再认识[J].水科学进展,2013,24(3):303-310.
- [2] HEDLEY C B, KNOX J W, RAINE S R, et al. Water: advanced irrigation technologies [J]. Encyclopedia of Agriculture and Food System, 2014, 5: 378 - 406.
- [3] ADEYEMI O, GROVE I, PEETS S, et al. Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation [J]. Sustainability, 2017, 9: 353.
- [4] 王浩.我国水资源合理配置的现状和未来[J].水利水电技术, 2006, 37(2): 7-14.
- [5] 吴琼,常浩娟,刘昭.基于聚类的我国各地区水资源利用效率分析[J].人民长江, 2018, 49(14): 55-60.
- [6] 邹雪园.滴灌和喷灌施肥技术在大白菜和西兰花上的应用效果[D].武汉:华中农业大学, 2018: 13-15.
- [7] 杨贵羽,汪林,王浩.基于水土资源状况的中国粮食安全思考[J].农业工程学报, 2010, 26(12): 1-5.
- [8] 中华人民共和国水利部. 2019年中国水资源公报[R]. 2020.
- [9] 赵文杰,丁凡琳.我国节水灌溉技术推广现状与对策研究综述[J].节水灌溉, 2015(4): 95-98.
- [10] 郑文晖.文献计量法与内容分析法的比较研究[J].情报杂志, 2006, 25(5): 31-33.
- [11] 贺郝钰,侯春梅,迟秀丽,等.国际生物土壤结皮研究发展态势文献计量分析[J].生态学报, 2014, 34(4): 1 035-1 041.
- [12] 唐霞,张志强.基于文献计量的绿洲研究发展态势分析[J].生态学报, 2016, 36(10): 3 115-3 122.
- [13] 串丽敏,郑怀国,赵同科,等.基于W of Science数据库的土壤污染修复领域发展态势分析[J].农业环境科学学报, 2016, 35(1): 12-20.
- [14] 杨立英.基因组学领域演进的科学计量研究[J].科学观察, 2007, 2(1): 11-19.
- [15] 王立伟,郑军卫,赵纪东,等.基于文献计量的铝矿科技发展态势分析[J].资源科学, 2014, 36(3): 653-659.
- [16] 马梧桐,李宏.碳纳米管纤维研究发展态势分析[J].科学观察, 2016, 3(11): 23-31.
- [17] ZHANG H M, XIONG Y W, HUANG G H, et al. Effects of water

- stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 205–214.
- [18] CAVARO J, MEDINA ET, Montoya. Sprinkler irrigation frequency affects mize yield depending on irrigation time [J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(5): 1 862–1 873.
- [19] MALIK RPS, GIORDANO M, RATHORE MS. The negative impact of subsidies on the adoption of drip irrigation in India: evidence from Madhya Pradesh [J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2018, 34(1): 66–77.
- [20] WANG J D, ZHANG Y Q, GONG S H, et al. Evapotranspiration, crop coefficient and yield for drip-irrigated winter wheat with straw mulching in North China Plain [J]. *Field Crops Research*, 2018, 217: 218–228.
- [21] VALENTIN F, NORTES P, DOMINGUEZ A, et al. Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler, superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment [J]. *Irrigation Science*, 2020, 38: 105–115.
- [22] ALRAJHI A, BEECHAM S, HASSANLI A. Effects of partial root-zone drying irrigation and water quality on soil physical and chemical properties [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 182: 117–125.
- [23] LIU Y, ZHANG X L, XI L Y, et al. Ridge-furrow planting promotes wheat grain yield and water productivity in the irrigated sub-humid region of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 105935.
- [24] FOREY O, METAY A, WERY J. Differential effect of regulated deficit irrigation on growth and photosynthesis in young peach trees intercropped with grass [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 81: 106–116.
- [25] MA L, AHUJA LR, ISLAM A, et al. Modeling yield and biomass responses of maize cultivars to climate change under full and deficit irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 180: 88–98.
- [26] EI-SABAGH A, BARUTCULA C, ISLAM MS. Relationships between stomatal conductance and yield under deficit irrigation in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 2017, 5(1): 14–21.
- [27] XU Y J, GU D J, LI K, et al. Response of grain quality to alternate wetting and moderate soil drying irrigation in rice [J]. *Crop Science*, 2019, 59(3): 261–272.
- [28] MERCHAN D, SANZ L, PEREZ I, et al. Irrigation implementation promotes increases in salinity and nitrate concentration in the lower reaches of the Cidacos River (Navarre, Spain) [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 706: 135701.
- [29] LIN X, WANG D, GU S B, et al. Effect of supplemental irrigation on the relationships between leaf ABA concentrations, tiller development and photosynthate accumulation and remobilization in winter wheat [J]. *Plant Growth Regulation*, 2016, 79: 331–343.
- [30] BOYLE RKA, MCAINSH M, DODD IC. Daily irrigation attenuates xylem abscisic acid concentration and increases leaf water potential of *Pelargonium × hortorum* compared with infrequent irrigation [J]. *Physiologia Plantarum*, 2016, 158(1): 23–33.
- [31] LIU Y, HAN J, WEN X X, et al. The Effect of plastic-covered ridge and furrow planting on the grain filling and hormonal changes of winter wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(10): 1 771–1 782.
- [32] LIU Y, HAN J, LIU D D, et al. Effect of plastic film mulching on the grain filling and hormonal changes of maize under different irrigation conditions [J]. *PloS One*, 2015, 10(4): e0122791.
- [33] DENG J, GUO L, SALAS W, et al. Changes in irrigation practices likely mitigate nitrous oxide emissions from california cropland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(10): 1 514–1 527.
- [34] GUO S F, QI Y C, PENG Q, et al. Influences of drip and flood irrigation on soil carbon dioxide emission and soil carbon sequestration of maize cropland in the North China Plain [J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9: 222–233.
- [35] SETYANTO P, PRAMONO A, ADRIANY TA, et al. Alternate wetting and drying reduces methane emission from a rice paddy in Central Java, Indonesia without yield loss [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 64(1) : 23–30.
- [36] YE X H, HAN B, LI W, et al. Effects of different irrigation methods on nitrous oxide emissions and ammonia oxidizers microorganisms in greenhouse tomato fields [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 115–123.