

·灌溉技术与装备·

文章编号: 1672-3317(2023)12-0082-10

## 基于 CiteSpace 的地下滴灌领域研究可视化分析

卫琦<sup>1,2</sup>, 贺敏<sup>1</sup>, 韦琦<sup>1</sup>, 徐俊增<sup>1,2,3\*</sup>, 李昕彤<sup>1</sup>, 董奕霄<sup>1</sup>, 李燕<sup>1</sup>

(1.河海大学 农业科学与工程学院, 南京 210098; 2.河海大学 江苏省农业水土资源高效利用与固碳减排工程研究中心, 南京 210098; 3.水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098)

**摘要:**【目的】地下滴灌技术的发展与应用对于解决农业用水危机、减缓农田生态环境问题具有重要意义。本文探究以地下滴灌为主题的研究进展,旨在推动地下滴灌技术研究领域的发展。【方法】以 Web of Science 核心合集数据库为基础,借助 Origin 等统计软件,结合 CiteSpace 知识图谱分析软件,从发文数量的分布特征、合作网络、关键词共现、突现词分析、共被引聚类 5 个角度对以地下滴灌为研究主题的知识图谱进行了分析。【结果】①地下滴灌研究发展大致分为萌芽阶段、波动发展阶段和快速发展阶段。该领域主流发文期刊是 Agricultural Water Management。Lamm、王京伟、李云开等核心作者的研究成果奠定了地下滴灌领域的学科基础。发文数量较多的国家包括美国、中国等。国家和机构间的合作较为紧密,作者间的合作呈现出“局部集中,整体分散”的格局。②地下滴灌主要研究领域包括土壤水分传输、植物生长与发育、灌溉水质与土壤盐渍化、灌溉水管理等;前沿领域主要包括水分传输机理的研究、水文学建模、灌溉水质的控制、滴灌技术的自动化控制等;未来研究方向主要集中在系统优化、节水灌溉新技术、土壤改良、智能化技术和新型材料应用等方面。③未来研究中,地下滴灌领域的研究应更加注重使用多重数据库对比分析,并通过跨学科的交叉研究探索新的影响因素和灌溉方法。为此,需要构建先进的合作平台,并注重对发展中国家和全球缺水地区案例的研究,以加强国家、机构以及作者之间的合作。随着该研究领域的发展和文献计量分析手段的进步,可以预见地下滴灌研究领域将呈集成化、智能化、可持续化和适应化发展趋势。【结论】利用 Citespace 软件对地下滴灌领域进行分析提供了良好的可视化效果,该分析涵盖了发文数量分布特征、合作网络、关键词共现、突现词分析以及共被引聚类。这些研究结果将为该领域的理论发展和实际应用提供重要的参考和指导。

**关键词:** 地下滴灌; 研究进程; 研究热点; CiteSpace; 可视化分析

中图分类号: S28

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023166

OSID: 

卫琦,贺敏,韦琦,等.基于 CiteSpace 的地下滴灌领域研究可视化分析[J].灌溉排水学报,2023,42(12):82-91.

WEI Qi, HE Min, WEI Qi, et al. Visualization Analysis of Subsurface Drip Irrigation Research Based on CiteSpace[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 82-91.

### 0 引言

【研究意义】灌溉在全球粮食生产中起着极为关键的作用,实现灌溉水资源的高效利用是保证粮食安全的中中之重<sup>[1]</sup>。利用微灌技术取代地面灌溉,有助于提高用水效率、减缓水资源短缺<sup>[2]</sup>。地下滴灌是在滴灌基础上形成的高效节水的新型灌溉技术,由于其具有减少深层渗漏和土壤蒸发、提高水分利用效率、节肥、增产等优势<sup>[3]</sup>,被认为是水资源匮乏地区重要的节水灌溉技术之一。因此,了解地下滴灌的研究历程对于推动高效灌溉技术研究领域的发展具有重要指导意义。

【研究进展】地下滴灌研究最早可追溯到 1913 年,美国学者 House 首次对地下滴灌技术进行了研究,而受当时技术条件的限制及其应用成本的过高而放弃<sup>[4]</sup>。20 世纪 90 年代之后,随着全球水资源紧缺问题的日益突出和对节水灌溉技术的需求增加,地下滴灌作为一种高效的灌溉方式受到了更多的关注和研究。此外,灌水器材料技术的进步和制备工艺的革新也为地下滴灌领域提供了更多的研究机会和资源。研究人员开始关注地下滴灌系统的设计与优化、灌溉效果评估、水文学特性等方面,并进行丰富的实证研究和理论探索。例如,冯俊杰等<sup>[5]</sup>选取土壤负压值作为控制灌水器出流状况的参数,通过优化灌水器的结构设计和关键部分的材质选配,实现了地下滴灌灌水器滴水的自适应功能;Mattar 等<sup>[6]</sup>研究了不同水位对地表和地下滴灌系统土壤水分状况的影响,评价了亏水灌溉条件下地表和地下

收稿日期: 2023-04-14

修回日期: 2023-09-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(B200201004)

作者简介: 卫琦(1986-),男,山西运城人。副研究员,博士,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究。E-mail: weiqi8855116@163.com

通信作者: 徐俊增(1980-),男,教授,博士,主要从事高效灌溉理论及其农田生态效应研究。E-mail: xjz481@hhu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

滴灌系统对马铃薯生长、产量和水分利用效率的影响；Arab 等<sup>[7]</sup>通过对比不同流量和施肥水平处理下地表和地下滴灌土壤硝酸盐分布特征，发现地下滴灌土壤硝态氮分布趋势较地表滴灌更为均匀，研究结果对有效估计淋溶需求和施肥速率提供了参考。

近年来，国内外相关学者开始探索采用文献计量分析方法，借助可视化分析工具（如 CiteSpace、UCINET、Pajek、VOSviewer、Gephi 等）对学科研究前沿和发展动态进行系统总结和归纳。其中 CiteSpace 软件由于具有数据兼容性强、分析效率高、操作便捷、结果直观等诸多优点，被学者广泛应用于多种研究主题。例如，罗军华等<sup>[8]</sup>以 CNKI 数据库和 Web of Science 核心合集库为数据源，借助 CiteSpace 可视化软件，从发文数量、作者、发文机构、关键词及研究前沿等角度对国内外饮用水源地的研究进展进行了知识图谱分析，为饮用水源地后续的研究提供了参考依据；焦彩菊等<sup>[9]</sup>以 CNKI 数据库 2004—2019 年刊载的期刊文献作为基础数据，运用 CiteSpace 对农业产业集群进行了知识图谱的绘制，分析确定了未来农业产业集群可能的研究方向。【切入点】然而，借助科学知识图谱方法对地下滴灌研究领域进行可视化分析的研究还鲜有报道。借助知识图谱有助于将以往研究进行量化分析，挖掘隐藏的关联关系，获得对该领域研究的全面了解，识别研究的热点和趋势，评估研究的质量和影响力，并为未来的研究方向提供指导。

【拟解决的关键问题】因此，本研究以 Web of Science 核心合集数据库为依据，借助 CiteSpace 可视化软件，对 1990—2022 年地下滴灌研究文献进行系统梳理，并对地下滴灌研究领域的基本发展脉络、研究前沿及热点、未来可能的发展趋势进行分析，研究结果对于促进地下滴灌研究领域的发展具有重要参考价值。

## 1 数据来源与分析方法

### 1.1 数据来源

以 Web of Science 核心合集数据库为基础，以“Subsurface drip irrigation”为检索式，排除商业经济、物理、数学、化学、地理、历史、传染病学、病毒学和通信等不相关领域的出版物，同时剔除书籍章节、信函、修订和新闻等无效记录后，最终获取有效检索结果 1 092 条，时间跨度为 1990 年（1 月）—2022 年（8 月）。

### 1.2 分析方法

通过 Origin、Excel 等软件对地下滴灌领域文献进行统计分析。利用计量分析软件 CiteSpace 对文献

进行可视化分析，通过设置 CiteSpace 软件中的节点类型为“Country”、“Institution”和“Author”，分别探索国家和机构、作者合作网络；同时，通过设置节点类型为“Keyword”进行关键词共现和突现词分析，识别与地下滴灌相关的关键研究领域。设置节点类型为“Reference”进行文献共被引聚类分析并以时间线视图显示，确定该领域不同发展阶段的前沿研究和热点。综合分析所有结果以探究地下滴灌研究的发展趋势、目前存在的问题以及未来可能的研究方向。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文数量、国家和期刊分布特征

由于文献检索以 Web of Science 核心合集库为基准，并未参考其他类型的数据库，因此检索结果存在部分缺失，地下滴灌的研究最早可追溯到 1913 年。1920 年美国加利福尼亚的 Charles 发明了能使周围土壤湿润的多孔瓦罐，被认为是地下滴灌技术的雏型<sup>[10]</sup>。本研究中，基于 Web of Science 核心合集的文献发表数量的变化趋势结果表明（图 1），地下滴灌研究领域的发文数量整体上呈现逐步增加发展趋势，且大体上可以归纳为 3 个阶段，第一个阶段是萌芽阶段（1990—1994 年），该阶段发表的论文数量整体较少，平均每年不超过 2 篇，主要集中在地下滴灌理论和应用方面的探讨。第二阶段是波动发展阶段（1994—2013 年），该阶段发文量一直处于曲折上升的状态，年平均发文量约为 24 篇，主要研究了地下滴灌系统的设计与应用、作物对地下滴灌土壤水氮动态的响应等；第三阶段是快速发展阶段（2013—2022 年），该阶段年发文量不低于 40 篇，此期间的论文数量占总发文量的 57.3%；并从 2017 年开始急剧增长，并于 2021 年到达峰值 97 篇，预示着该领域的蓬勃发展。

进一步分析地下滴灌相关研究学术成果出版物，得到本领域出版数量排名前 20 名的期刊。其中 Agricultural Water Management（荷兰）发表的文章数量最多（158 篇），2022 年影响因子达到 6.611，刊载方向是农艺学和水资源；其次是 Irrigation Science（德国，56 篇，3.519，农艺学和水资源）、Acta Horticulturae（中国，39 篇，0.5，园艺）、Irrigation and Drainage（英国，38 篇，1.424，农艺学和水资源）、Water（瑞士，30 篇，3.530，环境科学和水资源）、Transactions of the ASABE（美国，30 篇，1.238，农业工程）等。

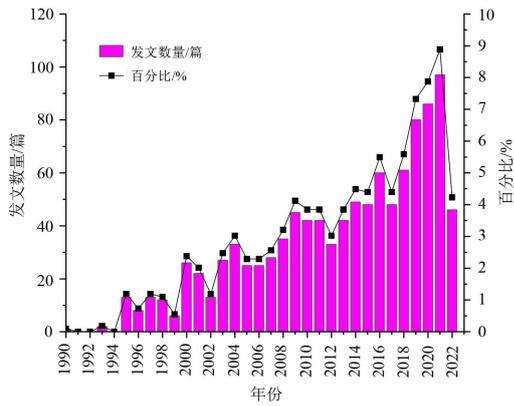


图1 1990年至2022年地下滴灌刊物数量及百分比变化 (2022年数据为1月1日—8月7日)

Fig.1 Number and percentage changes of subsurface drip irrigation publications from 1990 to 2022 (Data from January 1 to August 7 for 2022)

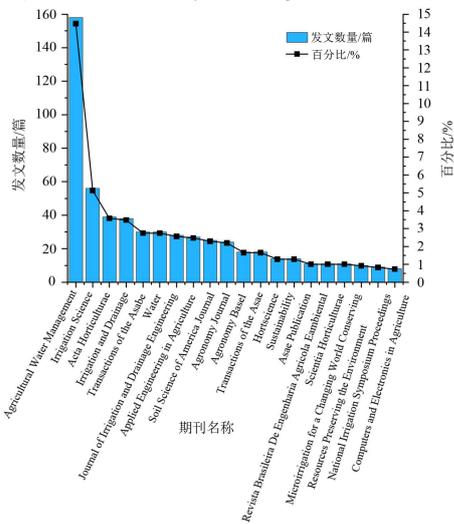


图2 地下滴灌领域发文量前20种期刊

Fig.2 Top 20 journals in the field of subsurface drip irrigation

总体上,前20名的期刊中大部分期刊均与农艺学、水土资源与环境、农业灌溉相关,表明地下滴灌相关研究与农业管理密切相关。从发文期刊可以看出地下滴灌的研究重点呈现多元化特点,同时得出上述6种期刊可以作为了解地下滴灌领域研究的重要期刊。

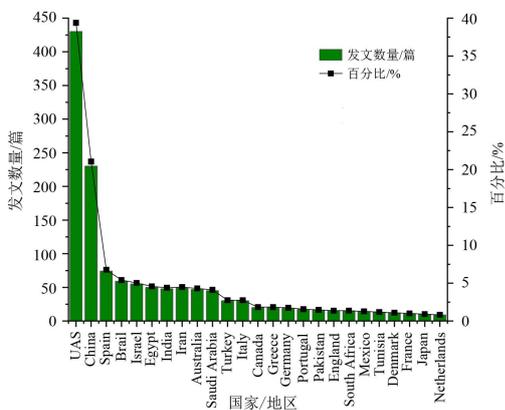


图3 发文数量排名前25的国家或地区  
Fig.3 The top 25 countries or regions in terms of number of publications

图3显示了发表地下滴灌相关文章数量排名前25的国家和地区,以及它们的发文数量和百分比。其中,美国是发文数量最多的国家,发表了430篇文章,占该领域总发文数量的39.34%,其次是中国(230篇,21.06%)、西班牙(74篇,6.78%)、巴西(59篇,5.4%)等。

### 2.2 国家和机构合作网络分析

经分析 CiteSpace 生成的国家和机构间的合作网络图谱(图4),可以发现共有来自74个国家或地区的199个机构参与了地下滴灌领域的研究。其中,美国和中国是占主导地位的国家。从机构分布情况来看,中美两国的机构分布差异较大。例如,美国关于地下滴灌研究成果的发文数量在20篇以上的机构包括美国农业部农业研究局、加州大学戴维斯分校、亚利桑那大学、加州大学河滨分校、堪萨斯州大学,其中,美国农业部农业研究局发文量最多,共发表67篇文章,其数量甚至高于文献发表总数排名第3的国家(西班牙)。而中国关于地下滴灌的研究主要集中在少数研究机构,如西北农林科技大学、中国农业大学、中国科学院,其发文总数分别为41篇、28篇和23篇,其余研究机构发文数量均在20篇以下。从节点中心性大小来看,节点中心性最高的国家是美国,为0.88;其次是中国,为0.33,这表明中美两国在地下滴灌领域研究中的影响力和重要程度最大,与各国之间的合作也最为密切。总体上,国家和机构合作网络图中连线紧密,表明不同国家和机构间的合作较为紧密。例如,中美两国与西班牙、巴西、埃及等国家都有密切的合作,这对该领域的可持续发展十分有利。但不同国家、机构之间仍存在一定的合作障碍,未来应该进一步加强国际交流合作,以促进该领域的技术创新和资源共享。

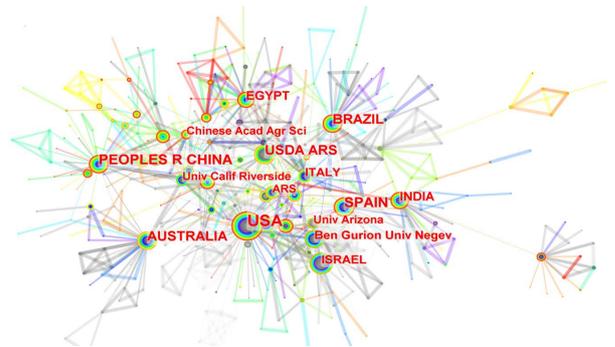


图4 国家和机构间合作网络图

Fig.4 National and inter-agency cooperation networks

对作者合作网络进行分析发现,共有778名研究人员研究地下滴灌,其中130人发表了3篇及以上数量的文章(图5)。从发文时间来看,在这些发文数量较多的学者中,英国的Oron Gadi于1995年首次发表了她的研究论文,是最早关注地下滴灌领

域的学者之一；来自新疆石河子大学的王振华于 2007 年发表了他的第一篇文章，是最早研究该领域的中国学者之一。从发文数量来看，节点最大的 3 位作者分别是李云开、王京伟、Lamm，发文量排名前 10 的作者中有 3 名来自中国，分别是来自中国农业大学的李云开（26 篇），西北农林科技大学的王京伟（25 篇）和西北农林科技大学的牛文全（11 篇）。从连线情况来看，最大的合作群是由王京伟等学者

组成的中美合作研究群。在此合作群中，中国农业大学的李云开、西北农林科技大学的王京伟、中国科学院大学的牛文全和美国的 Hunsaker 和 Dougherty 等学者建立了密切的合作关系。与国家机构和机构间合作网络图显示出的紧密联系不同，作者合作网络图中节点分布较为分散，表明作者群之间合作并不紧密，研究队伍较为分散，因此在后续研究中，各国学者之间的合作有待进一步加强。

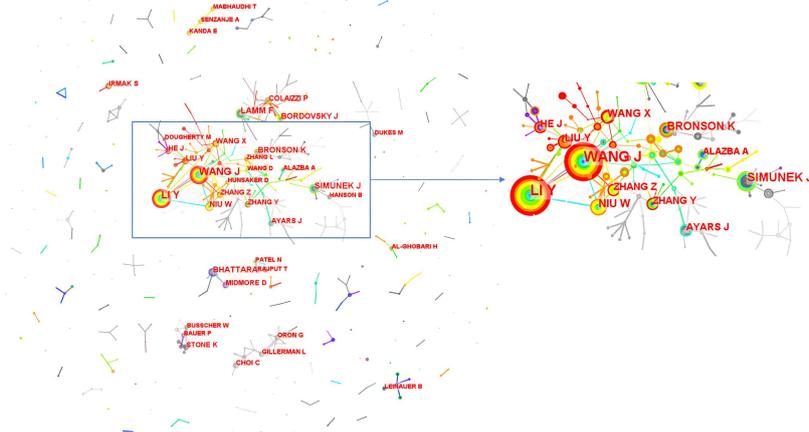


图 5 作者合作网络图

Fig.5 The authors collaboration networks

### 2.3 关键词共现和突现词分析

关键词凝结了文章的研究方向和核心内容，通过分析 CiteSpace 生成的关键词共现图谱（图 6）可以看出，该图谱共包含 2 813 个链接和 659 个节点。通过分析地下滴灌领域出现频率最高和中心性最强的前 10 个关键词（表 1）可以发现，本领域出现频率最高的前 5 位关键词依次为 use efficiency、yield、growth、soil 和 deficit irrigation；节点中心性较高的关键词有 management、soil、use efficiency、quality 和 growth。除此之外，model、cotton、nitrogen 等词也是具有较高共现频率和节点中心性的关键词，表现出研究人员对这些主题的浓厚兴趣，同时上述主题是地下滴灌领域的主要研究方向。此外，中国和国外的前 10 的高频关键词高度一致但略有差别，例如，nitrogen 出现在中国相关研究领域的高频关键词之列，表明氮肥管理、氮素循环转化过程是中国在地下滴灌研究领域的重要研究主题之一<sup>[11-13]</sup>；而 deficit irrigation 是国外相关研究领域的高频关键词之一，上述结果表明，相较于中国，国外更加关注非充分灌溉技术在地下滴灌系统中的运用<sup>[14-15]</sup>。

相结合等试验条件对作物生长（常见的作物有棉花、苜蓿、谷物）和水肥利用效率等的影响；以及建立物理或数值模型，研究地下滴灌条件下土壤水分运动、氮素迁移转化和产量等。

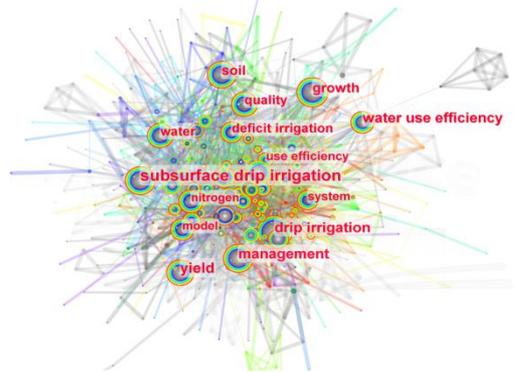


图 6 关键词共现网络图谱

Fig.6 Keywords co-occurrence networks

表 1 高频和高中心性关键词

Table 1 High frequency and high centrality keywords

序号	关键词	频数	年份	关键词	中心性	年份
1	Use efficiency	241	1997	Management	0.16	1998
2	Yield	215	1999	Soil	0.16	1999
3	Growth	142	1995	Use efficiency	0.12	1999
4	Soil	131	1999	Quality	0.11	1996
5	Deficit irrigation	103	2001	Growth	0.09	1995
6	Quality	102	1996	Cotton	0.08	1995
7	System	78	2005	Yield	0.07	1997
8	Model	62	2001	Deficit irrigation	0.06	2001
9	Nitrogen	59	1997	Model	0.06	2001
10	Simulation	49	2011	Nitrogen	0.06	1997

此外，根据高频率和高中心性关键词可以得到地下滴灌领域最常见的研究主题有：地下滴灌条件下不同田间管理方式、灌溉制度（包括灌溉定额、灌水定额、灌水次数等）、气候条件和土壤特性等；滴灌系统中不同技术参数（包括灌水器间距、灌水器流量、滴管埋深等）；地下滴灌与施肥（如氮肥）

表 2 列出了地下滴灌领域的突发性强度排名前 10 的突发性关键词及其突发性强度和持续时间。从突发性强度来看,突发性强度最高的关键词是 irrigation,突发性强度为 8.09,持续时间为 2010—2016 年,表明关键词 irrigation 被重复引用次数最高;从开始和结束年份来看,持续时间最长的突发性关键词是 root,突发性强度为 4.61,持续时间为从

1998 年到 2011 年的 13 年,说明植物根系(主要是根系生长分布)在地下滴灌研究的主要发展阶段一直是重要的研究主题。此外,还可以看出,在地下滴灌技术的发展历程中,植物根系、水分运动和滴灌施肥是其研究的核心领域;而土壤盐分、作物系数、水分生产率、粮食产量、加气灌溉等是目前该领域正在研究的热点方向。

表 2 引用突发性最强的 10 个关键词

Table 2 Top 10 keywords with the strongest citation bursts

序号	关键词	突发性强度	开始年份	结束年份	1990—2022
1	Root	4.61	1998	2011	
2	Fertigation	3.99	2009	2013	
3	Irrigation	8.09	2010	2016	
4	Infiltration	5.65	2010	2012	
5	Point source	4.13	2010	2016	
6	Soil salinity	4.37	2016	2019	
7	Crop coefficient	3.84	2018	2020	
8	Water productivity	6.34	2019	2022	
9	Grain yield	5.27	2019	2022	
10	Oxygation	3.79	2019	2020	

对关键词进行聚类分析也可以探索地下滴灌领域的主要研究主题,结果如表 3 所示。根据表 3,目前,地下滴灌湿润模式、氮素吸收和利用效率等仍是地下滴灌领域主要的研究主题,同时研究者们也开始更多地关注滴头的埋深和流速、FACE 试验与地下滴灌结合、灌溉调度方法等领域,从关注作物本身农艺性状到利用计算机进行数据处理、模型模拟、建立调度平台的变化趋势可以发现,智慧农业的研究和发展已经成为该领域的主流趋势。

表 3 研究主题分布 Top 6

Table 3 Top 6 distribution of research topics

序号	研究主题
1	wetting pattern
2	drip emitter
3	nitrogen uptake
4	free-air CO <sub>2</sub> enrichment
5	nitrogen use efficiency
6	irrigation scheduling method

## 2.4 文献共被引分析

文献共被引图谱中共有 4 个较大节点,说明这 4 篇文献被引次数最多,在地下滴灌研究领域影响较大,对地下滴灌研究进展有重要作用。例如,Ayars 等<sup>[16]</sup>通过分析加利福尼亚州运用地下滴灌技术进行 1 年生或多年生经济作物(番茄等)种植的几个例子,展示了地下滴灌系统是如何安装运行的,证实了地下滴灌能够增加产量、改善作物品质、减少灌水量和降低杂草控制并增加经济效益,该篇文章是一篇罗列广泛的综述,成为被引用次数最多的论文(27 次)。Lamm 等<sup>[17]</sup>对棉花、番茄、玉米、洋葱 4 种作物的地下滴灌技术运用情况进行了广泛总结,并重点关注了灌溉系统的区别、水分和养分管理以及灌

溉系统设计标准,结果表明,地下滴灌系统能够为作物提供精确的水和养分管理。Šimůnek 等<sup>[18]</sup>分析了 HYDRUS 软件的功能,包括标准计算模块和标准或非标准专业附加模块,回顾了 HYDRUS 模型的应用,例如评估植物吸水对地下水补给的影响,评估地下颗粒状物质的迁移等。Ben-Noah 等<sup>[19]</sup>在蒸渗仪和田间试验中测试了几种空气注入和水应用装置,检验了目前提出的曝气技术改善黏土中的曝气状况从而改善植物生长指标的能力。总之,前 3 篇论文均为涵盖范围广泛的综述性文章,而第 4 篇文章发表于加气灌溉研究兴起初期,因而成为了共被引强度较高的论文。

在文献共被引网络图谱的基础上,对文献进行聚类,采用对数似然比(LLR)算法并使用索引词汇作为聚类名来源。聚类结果如图 7 所示,得到 #0~#23 共 24 个聚类,其中 7 个聚类由于轮廓值太小并未显示出来,可忽略不计。将每个聚类与其对应的关键文献进行整理,得到表 4。将文献共被引网络图谱以时间线视图展示,结果如图 8。根据表 4 和图 8 可以看出,17 个聚类大致分布在 3 个时间段:

①地下滴灌研究初期,聚类标签包括 soil strength (#1)、parametric models (#14)、economic benefits (#16),该时期研究重点是在土壤强度如何影响作物生长以及作物根系吸收水分和肥料的测量与模拟领域;②地下滴灌研究发展期,聚类标签包括 stem yeild (#5)、evaporation (#6)、prunus dulcis (#7)、potato (#9)、gross margin (#10)、tuscan melon (#13)等,这一时期主要研究内容是地下滴灌对作物如土豆的农艺性状和经济效益的影响;③地下滴

灌研究近期，discharge (#0)、plastic film mulching (#2)、aerated irrigation (#4) 和 Hydrus-2D (#8)、redistribution (#21) 是地下滴灌研究的前沿。

总体上，从研究趋势角度来看，研究总体趋势为从地下滴灌的理论基础发展到实践应用，从单一学科发展到多学科；从研究重点演变角度来看，研究重点逐渐从地下滴灌概念和机理探讨与运用等转移至地下滴灌的影响（尤其是对作物和土壤环境的影响）和灌溉方法创新与灌溉系统的改进；从研究方法来看，研究发展的过程伴随着新的研究方法的提出，包括变量设置、模拟、比较研究等方法。

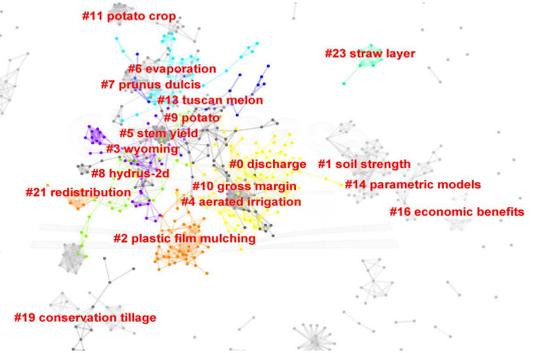


图 7 共被引聚类视图

Fig.7 Co-citation cluster view

表 4 各聚类主要研究内容

Table 4 Main research contents of each cluster

序号	名称	主要研究内容	代表性论文
#0	Discharge	滴头流速和流量对土壤湿润体的影响	文献[20]
#1	Soil strength	土壤强度影响作物生长	文献[21]
#2	Plastic film mulching	地下滴灌下覆盖和非覆盖作物生长的水和肥料利用及经济效益	文献[22]
#4	Aerated irrigation	土壤环境、作物生长、调节机理、水肥利用	文献[23]
#5	Stem yield	评估地下滴灌对甘蔗等作物期间原茎产量	文献[24]
#6	Evaporation	土壤表面水分蒸发、土壤水分分布	文献[25]
#7	Prunus dulcis	土壤-植物关系、气体交换反应、根系分布	文献[26]
#8	Hydrus 2D	水流、溶质运移，根系吸水 and 溶质吸收	文献[27]
#9	Potato	马铃薯作物生长	文献[26]
#10	Gross margin	运用地下滴灌的经济效益	文献[28]
#11	Potato crop	马铃薯作物生长	文献[26]
#13	Tuscan melon	甜瓜的农艺性状对地下滴灌的响应	文献[29]
#14	Parametric models	根系分布及吸水规律	文献[30]
#16	Economic benefits	系统经济性、作物经济效益	文献[31]
#19	Conservation tillage	保护性耕作对土壤、作物和环境的影响	文献[32]
#21	Redistribution	盐和水的再分布	文献[33]
#23	Straw layer	秸秆覆盖对作物农艺性状的影响	文献[34]

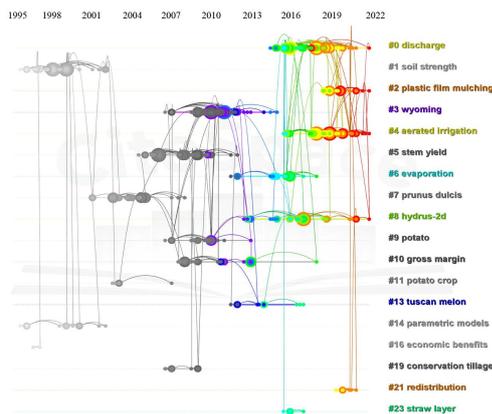


图 8 共被引时间线视图

Fig.8 Co-citation timeline view

## 2.5 研究热点和前沿分析

结合关键词共现、突现词分析、文献共被引分析及最新发表的研究文章，可以得出地下滴灌领域的研究热点和前沿主要集中在以下几个方面：

作物系数反映了作物本身的生物学特性、作物种类、产量水平、土壤水肥状况以及田间管理水平等对作物需水量的影响。梳理发现，已有的关于作

物系数的研究侧重于不同处理下的作物系数的对比和用双作物系数方法模拟作物蒸散发等。例如，Segovia-Cardozo 等<sup>[35]</sup>通过分析电容多传感器钻头和水滴探头在 3 a 的田间观测中探测到的干燥过程中土壤含水量剖面的时间动态，估算柑橘果园的根系吸水、实际蒸散发和作物系数；Patil 等<sup>[36]</sup>对比了使用和不使用塑料薄膜进行地下滴灌条件下黄秋葵作物不同生长阶段的所有水分平衡参数和作物系数的变化，有助于在与试验条件相同的情况下对黄秋葵作物进行精确的灌溉水管理。

许多研究表明，采用地下滴灌方式可以明显提高水分生产力和作物产量。例如，Muneeb 等<sup>[37]</sup>研究了不同灌溉方法（地下滴灌、地面滴灌和重力灌溉）对巴基斯坦玉米水分生产率和籽粒产量的影响，结果发现玉米种植区地下 0.15 m 深度安装地下滴灌支管可以获得最大的粮食产量和水分生产率；Çetin 等<sup>[38]</sup>研究了棉花在不同灌水量和不同滴灌方式（地表滴灌和地下滴灌）条件下的水分生产力（WP）、经济用水生产率（EWP）和土地经济生产率（LEP），综

合考虑 *WP*、*EWP*、*LEP* 来确定最佳灌溉模式。

地下滴灌结合注气，既能保证植物对水分的需要，又能有效防止植物根部缺氧。梳理发现，近年来许多关于加气灌溉的研究侧重于对土壤气体环境的影响，对作物产量和品质的影响，及氧气输送的均匀性。例如，Pendergast 等<sup>[23]</sup>研究了加气地下滴灌在亏缺灌溉和充分灌溉 2 种灌溉方式下对澳大利亚中部高地鹰嘴豆作物产量和水分利用效率的影响，结果表明氧合处理有助于提高鹰嘴豆产量和大面积灌溉规模上的水分利用效率；Baram 等<sup>[39]</sup>研究了在通风良好（沙质）和通风不好（黏土）土壤中生长的生菜对使用含有纳米气泡处理过的废水（ONB-TWW）进行地表和地下滴灌的响应。结果表明，使用 ONB-TWW 进行地表和地下滴灌显著提高了土壤氧气的有效性，从而提高了植物的物理（产量、叶长）和生理（质膜透性、渗透势）参数。

地表覆盖也是地下滴灌研究领域的研究热点。已有的关于地表覆盖的研究侧重于不同种类地表覆盖下的土壤水分状况，水肥利用效率和作物品质。例如，Al-Othman 等<sup>[25]</sup>分析不同土壤表层覆盖（如黑色塑料膜和棕榈树废弃物）与地下滴灌结合使用条件下土壤含水量，进而探讨表层覆盖对土壤蒸发的抑制作用；Farah 等<sup>[40]</sup>探讨了地下滴灌条件下，冬春季节透明地膜和黑色地膜覆盖和不同施肥水平对南瓜产量和水分利用效率的影响。

模型模拟（包括数值模型、解析模型和实验模型等）一直是地下滴灌研究领域的研究重点。Plauborg 等<sup>[41]</sup>利用 2 a 地下滴灌和氮肥施用条件下马铃薯试验的综合数据，以马铃薯作物参数为重点，对 Daisy 模型进行了校准和验证，校正后的模型较好地模拟了叶面积指数演化、作物生长、氮素吸收和块茎产量；Zamani 等<sup>[42]</sup>为地下滴灌系统开发了半经验模型，该模型可以基于其水力特性和土壤特性，模拟横向湿润模式，提供了 2 个过程的统一模拟。

### 3 讨论

地下滴灌作为一种高效节水的灌溉技术，在全球范围内引起了广泛的关注和研究。经过多年的发展，该领域已经积累了一定的实践经验和理论基础，但在研究内容、研究合作和研究地区等方面仍然存在不足之处，需要进一步完善和加强。在研究内容上，关于地下滴灌的研究主要聚焦于传统农业，更多关注的是作物的农艺性状，缺乏创新点，且多领域跨学科交叉研究有待加强；研究合作上，作者群之间的合作较为分散，可能与该领域研究方向较为分散、语言和文化差异大、研究资源有限等因素

密切相关。为进一步加强各国学者之间的合作，可以通过联合申报国际合作项目、组织国际学术会议等方式加强交流；研究地区上，发达国家的地区案例（如美国怀俄明州、德克萨斯州等）研究很多，但发展中国家的地区案例研究相对较少。应该加强发展中国家和全球缺水地区案例研究，关注地下滴灌技术在全球范围内的应用和推广，同时加强国际科研合作，促进地下滴灌技术的进一步发展。此外，本研究也存在不足之处。例如，本文文献的检索以 Web of science 核心合集库为基准，并未参考其他类型的数据库，因此检索结果存在部分缺失；一篇文献从发表到被引用或达到高被引用程度必须经过一定的时间周期，故利用共被引分析方法进行研究前沿探测时难以克服时滞性，可能无法及时发现新兴研究前沿。

在已有的研究成果和可视化结果的基础上，可以看出地下滴灌研究的主要领域涉及到土壤水分传输<sup>[43-44]</sup>、植物生长与发育<sup>[45-46]</sup>、灌溉水质与土壤盐渍化<sup>[47-48]</sup>、灌溉水管理<sup>[48-49]</sup>等多个方面。这些研究领域的深入探究，可以帮助更好地理解地下滴灌技术的原理和机制，进一步提高地下滴灌系统的灌溉效率和作物生产效益。在前沿领域方面，水分传输机理的研究是一个重要的方向，研究水分在土壤中的传输规律，探究不同条件下水分在土壤中的运动与分布情况，可以更好地指导地下滴灌系统的设计和改进行<sup>[50]</sup>。同时，水文学建模也是一个重要的研究方向，通过建立数学模型，预测和分析不同条件下水分和肥料运动的变化规律，为地下滴灌技术的应用提供理论支撑<sup>[51-52]</sup>。灌溉水质的控制也是一个重要的研究领域，通过探究灌溉水质与土壤盐渍化之间的关系，可以更好地预测和控制土壤盐渍化的发生<sup>[53]</sup>。此外，滴灌技术的自动化控制也是一个非常有前景的研究方向，通过结合新兴技术，如物联网、云计算等，实现地下滴灌系统的智能化管理和控制<sup>[54]</sup>。结合可视化结果与研究前沿，我们可以预测，在未来的研究中，系统优化是地下滴灌技术研究的一个重要方向。通过优化地下滴灌系统的水分平衡、肥料平衡、能量平衡等方面，可以提高系统的灌溉效率和作物生产效益<sup>[55-56]</sup>。此外，结合地下滴灌技术，探索新型的节水灌溉技术，如雾化灌溉、微喷灌溉等，也是一个重要方向，可以提高灌溉效率和水资源利用率<sup>[57]</sup>。另一个研究方向是土壤改良。通过研究地下滴灌技术对土壤结构和土壤养分的影响，探索新的土壤改良方法，可以提高土壤肥力和作物产量<sup>[58]</sup>。此外，还可以结合物联网、云计算等新兴技术，实现地下滴灌系统的智能化管理和控制，提高系统的灌溉效率和作物生产效

益<sup>[59-60]</sup>。最后，新型材料的应用也是未来地下滴灌技术研究的重要方向之一。通过研究新型材料的特性，如抗渗透性、抗老化性等，探索新型地下滴灌材料的应用，可以提高系统的耐用性和可靠性<sup>[61-63]</sup>。这些研究方向有望为地下滴灌技术的发展和應用带来更多的创新和进步。

## 4 结论

1) 地下滴灌研究发展大致分为萌芽阶段、波动发展阶段和快速发展阶段。该领域主流发期刊是 *Agricultural Water Management*。Lamm、王京伟、李云开等核心作者的研究成果奠定了地下滴灌领域的学科基础。发文数量较多的国家包括美国、中国等。国家和机构间的合作较为紧密，作者间的合作呈现出“局部集中，整体分散”的格局。

2) 地下滴灌主要研究领域包括土壤水分传输、植物生长与发育、灌溉水质与土壤盐渍化、灌溉水管理等；前沿领域主要包括水分传输机理的研究、水文学建模、灌溉水质的控制、滴灌技术的自动化控制等；未来研究方向主要集中在系统优化、节水灌溉新技术、土壤改良、智能化技术和新型材料应用等方面。

3) 未来研究中，地下滴灌领域的研究应更加注重使用多重数据库对比分析，并通过跨学科交叉研究探索新的影响因素和灌溉方法。为此，需要构建先进的合作平台，并注重对发展中国家和全球缺水地区案例的研究，以加强国家、机构以及作者之间的合作。随着该研究领域的发展和文献计量分析手段的进步，可以预见地下滴灌研究领域将呈现集成化、智能化、可持续化和适应化发展趋势。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献：

- [1] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880-885.  
KANG Shaozhong. Towards water and food security in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 880-885.
- [2] 刘昌明. 中国农业水问题: 若干研究重点与讨论[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875-879.  
LIU Changming. Agricultural water issues in China—Discussions on research highlights[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 875-879.
- [3] 程先军, 许迪, 张昊. 地下滴灌技术发展及应用现状综述[J]. 节水灌溉, 1999(4): 13-15, 42.  
CHENG Xianjun, XU Di, ZHANG Hao. A summary of development and application situations for subsurface drip irrigation technique[J]. Water Saving Irrigation, 1999(4): 13-15, 42.
- [4] HADAS A. Trickle irrigation for crop production—design operation and management[J]. Soil and Tillage Research, 1987, 10(2): 191-192.
- [5] 冯俊杰, 仵峰, 郭群善, 等. 自适应地下滴灌灌水器的设计开发[J]. 节水灌溉, 2008(10): 24-26, 30.  
FENG Junjie, WU Feng, GUO Qunshan, et al. Design of self-adaptive emitter of subsurface drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2008(10): 24-26, 30.
- [6] MATTAR M A, ZIN EL-ABEDIN T K, AL-GHOBARI H M, et al. Effects of different surface and subsurface drip irrigation levels on growth traits, tuber yield, and irrigation water use efficiency of potato crop[J]. Irrigation Science, 2021, 39(4): 517-533.
- [7] ARAB S, MOZAFFARI J, NAHVIVIA M J. Evaluation of nitrate redistribution in surface and subsurface drip irrigation systems[J]. Water SA, 2022, 48(3 July): 271-277.
- [8] 罗军华, 赵卫权, 李威, 等. 基于 CiteSpace 的国内外饮用水源地研究知识图谱分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 109-119.  
LUO Junhua, ZHAO Weiquan, LI Wei, et al. Using CiteSpace to compare the research effort of China on drinking water in comparison with the rest of the world[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 109-119.
- [9] 焦彩菊, 张丽娜. 基于 CiteSpace 的农业产业集群研究进展[J]. 现代农业科技, 2020(5): 236-237, 239.  
JIAO Caiju, ZHANG Lina. Research progress on agricultural industry cluster based on CiteSpace[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(5): 236-237, 239.
- [10] CAMP C R. Subsurface drip irrigation: A review[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1 353-1 367.
- [11] WANG J W, NIU W Q, LI Y, et al. Subsurface drip irrigation enhances soil nitrogen and phosphorus metabolism in tomato root zones and promotes tomato growth[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 124: 240-251.
- [12] ZHANG H X, CHI D C, WANG Q, et al. Yield and quality response of cucumber to irrigation and nitrogen fertilization under subsurface drip irrigation in solar greenhouse[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(6): 921-930.
- [13] WEN J E, LI J S, HU H C, et al. Impact of lateral depth and irrigation frequency on inorganic nitrogen distribution, yield, and quality of asparagus lettuce utilizing sewage effluent under drip irrigation[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(20): 2 550-2 561.
- [14] PATEL N, RAJPUT T. Effect of deficit irrigation on crop growth, yield and quality of onion in subsurface drip irrigation[J]. International Journal of Plant Production, 2013, 7(3): 417-436.
- [15] AL-GHOBARI H M, DEWIDAR A Z. Integrating deficit irrigation into surface and subsurface drip irrigation as a strategy to save water in arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2018, 209: 55-61.
- [16] AYARS J E, FULTON A, TAYLOR B. Subsurface drip irrigation in California—Here to stay?[J]. Agricultural Water Management, 2015, 157: 39-47.
- [17] LAMM F R. Cotton, tomato, corn, and onion production with subsurface drip irrigation: A review[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(1): 263-278.
- [18] ŠIMŮNEK J, GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(7): 1-25.
- [19] BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Aeration of clayey soils by injecting air through subsurface drippers: Lysimetric and field experiments[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 222-233.
- [20] DOUH B, DIDOUNI O, MGUIDICHE A, et al. Wetting patterns estimation under subsurface drip irrigation systems for different discharge rates and soil types[C]//KALLEL A, KSIBI M, BEN Dhia H, et al. Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration. Cham: Springer, 2018: 877-878.
- [21] CAMP C R, BAUER P J, BUSSCHER W J. Evaluation of no-tillage crop production with subsurface drip irrigation on soils with compacted layers[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(4): 911-918.

- [22] WANG D, LI G Y, MO Y, et al. Evaluation of subsurface, mulched and non-mulched surface drip irrigation for maize production and economic benefits in Northeast China[J]. *Irrigation Science*, 2021, 39(2): 159-171.
- [23] PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Evaluation of aerated subsurface drip irrigation on yield, dry weight partitioning and water use efficiency of a broad-acre chickpea (*Cicer arietinum*, L.) in a vertosol[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 38-46.
- [24] CÉLIA DE MATOS PIRES R, BARBOSA E A A, ARRUDA F B, et al. Effects of subsurface drip irrigation and different planting arrangements on the yields and technological quality of sugarcane[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2014, 140(9): A5 014 001.
- [25] AL-OTHMAN A A, MATTAR M A, ALSAMHAN M A. Effect of mulching and subsurface drip irrigation on soil water status under arid environment[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2020, 18(1): e1 201.
- [26] ROMERO P, BOTIA P, GARCIA F. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on water relations of mature almond trees[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1): 155-168.
- [27] LIU Y, AO C, ZENG W Z, et al. Simulating water and salt transport in subsurface pipe drainage systems with HYDRUS-2D[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125 823.
- [28] MYGDAKOS E, PAPANIKOLAOU C, SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI M. Sorghum economics under different irrigation methods and water doses[J]. *New Medit*, 2009, 8(4): 47-54.
- [29] SHARMA S P, LESKOVAR D I, VOLDER A, et al. Root distribution patterns of reticulatus and inodorus melon (*Cucumis melo* L.) under subsurface deficit irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2018, 36(6): 301-317.
- [30] EUGENIO COELHO F, OR D. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(4): 1 039-1 049.
- [31] HANSON B, MAY D. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 68(1): 1-17.
- [32] BAUER P J, CAMP C R, BUSSCHER W J. Conservation tillage methods for cotton grown with subsurface drip irrigation on compacted soil[J]. *Transactions of the ASABE*, 2002, 45(1): 119-125.
- [33] KARIMI B, KARIMI N, SHIRI J, et al. Modeling moisture redistribution of drip irrigation systems by soil and system parameters: Regression-based approaches[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2022, 36(1): 157-172.
- [34] QIU J, QIAN Y, ZHONG F L, et al. Impact of drip irrigation and buried straw layer on the soil cultivated environment: A case study under greenhouse[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, 26: 5 413-5 419.
- [35] SEGOVIA-CARDOZO D A, FRANCO L, PROVENZANO G. Detecting crop water requirement indicators in irrigated agroecosystems from soil water content profiles: An application for a citrus orchard[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150 492.
- [36] PATIL A, TIWARI K N. Evapotranspiration and crop coefficient of okra under subsurface drip with and without plastic mulch[J]. *Current Science*, 2018, 115(12): 2 249.
- [37] MUNEEB M A. Efficacy of subsurface and surface drip irrigation regarding water productivity and yield of maize[J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 59(1): 125-134.
- [38] ÇETIN O, KARA A. Assessment of water productivity using different drip irrigation systems for cotton[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 223: 105 693.
- [39] BARAM S, WEINSTEIN M, EVANS J F, et al. Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 291: 110 550.
- [40] FARAH A H, AL-GHOBARI H M, ZIN EL-ABEDIN T K, et al. Impact of partial root drying and soil mulching on squash yield and water use efficiency in arid[J]. *Agronomy*, 2021, 11(4): 706.
- [41] PLAUBORG F, MOTARJEMI S K, NAGY D, et al. Analysing potato response to subsurface drip irrigation and nitrogen fertigation regimes in a temperate environment using the Daisy model[J]. *Field Crops Research*, 2022, 276: 108 367.
- [42] ZAMANI S, FATAHI R, PROVENZANO G. Assessing a semi-empirical model performance to predict the wetting patterns in subsurface drip irrigation[J]. *SSRN Electronic Journal*, 2022: 4 029 370.
- [43] PATEL N, RAJPUT T B S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(12): 1 335-1 349.
- [44] SINGH D K, RAJPUT T B S, SINGH D K, et al. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(1/2): 130-134.
- [45] PATEL N, RAJPUT T. Effect of deficit irrigation on crop growth, yield and quality of onion in subsurface drip irrigation[J]. *International Journal of Plant Production*, 2013, 7: 417-436.
- [46] SHARMA S P, LESKOVAR D I, CROSBY K M, et al. Root growth, yield, and fruit quality responses of *reticulatus* and *inodorus* melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 136: 75-85.
- [47] ENCISO-MEDINA J, MULTER W L, LAMM F R. Management, maintenance, and water quality effects on the long-term performance of subsurface drip irrigation systems[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2011, 27(6): 969-978.
- [48] AL-OMRAN A M, AL-HARBI A R, WAHB-ALLAH M A, et al. Impact of irrigation water quality, irrigation systems, irrigation rates and soil amendments on tomato production in sandy calcareous soil[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2010, 34(1): 59-73.
- [49] RODRIGUEZ L, GIL M. A review of subsurface drip irrigation and its management[M]//LEE T S., Ed. *Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crops*. 171-194: InTech, 2012.
- [50] ABDOLI S, FARROKHIAN FIROUZI A, ABBASI F, et al. Heat, moisture, and salt transport in the soil profile under surface and subsurface drip irrigation methods in the presence of shallow saline groundwater[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(22): 1-18.
- [51] HONARI M, ASHRAFZADEH A, KHALEDIAN M, et al. Comparison of *HYDRUS-3D* soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the South of France[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2017, 143(7): 4 017 014.
- [52] MANSOUR H A. Assessment of surface and subsurface drip irrigation systems with different slopes by hydrocalc model[J]. *International Journal of GEOMATE*, 2020, 19(73): 91-99.
- [53] CHOUDHARY A, SINGH A K, KUMAR R, et al. Performance of different varieties of groundnut under surface and subsurface drip irrigation using saline and good quality waters[J]. *Journal of Soil Salinity and Water Quality*, 2020, 12(1): 65-69.
- [54] HASHEMY SHAHDANY S M, TAGHVAEIAN S, MAESTRE J M, et al. Developing a centralized automatic control system to increase flexibility of water delivery within predictable and unpredictable irrigation water demands[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 163: 104 862.
- [55] KISI O, KHOSRAVINIA P, HEDDAM S, et al. Modeling wetting front redistribution of drip irrigation systems using a new machine learning method: Adaptive neuro-fuzzy system improved by hybrid particle swarm optimization - Gravity search algorithm[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107 067.
- [56] MANIKANDAN M, THIYAGARAJAN G, THENMOZHI S, et al. Optimization of irrigation and fertigation scheduling for sustainable sugarcane initiative (SSI) through subsurface drip irrigation in Western zone of Tamil Nadu[J]. *Current Agriculture Research Journal*, 2019,

- 7(1): 117-121.
- [57] ZHANG M Z, LU Z G, BAI Q J, et al. Effect of microsprinkler irrigation under plastic film on photosynthesis and fruit yield of greenhouse tomato[J]. *Journal of Sensors*, 2020, 2020: 1-14.
- [58] HENG T, LIAO R K, WANG Z H, et al. Effects of combined drip irrigation and sub-surface pipe drainage on water and salt transport of saline-alkali soil in Xinjiang, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(6): 932-945.
- [59] GHOSH S, SAYYED S, WANI K C, et al. Smart irrigation: A smart drip irrigation system using cloud, android and data mining[C]//2016 IEEE International Conference on Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT). December 2-3, 2016, Pune, India. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 236-239.
- [60] SIDHU R K, KUMAR R, RANA P S, et al. Automation in drip irrigation for enhancing water use efficiency in cereal systems of South Asia: Status and prospects[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2021: 247-300.
- [61] CAI Y H, ZHAO X, WU P T, et al. Ceramic patch type subsurface drip irrigation line: Construction and hydraulic properties[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 182: 29-37.
- [62] AL-MEFLEH N K, AL-RAJA O F. Impact of irrigation water quality and envelope materials around drip line on emitter performance in subsurface drip irrigation[J]. *Water and Environment Journal*, 2020, 34(1): 14-24.
- [63] MANSOUR H, HU J D, PIBARS S K, et al. Effect of pipes installation by modified machine for subsurface drip irrigation system on maize crop yield costs[J]. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal*, 2019, 21: 98-107.

## Visualization Analysis of Subsurface Drip Irrigation Research Based on CiteSpace

WEI Qi<sup>1,2</sup>, HE Min<sup>1</sup>, WEI Qi<sup>1</sup>, XU Junzeng<sup>1,2,3\*</sup>, LI Xintong<sup>1</sup>, DONG Yixiao<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Province Engineering Research Center for Agricultural Soil-Water Efficient Utilization, Carbon Sequestration and Emission Reduction, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** **【Objective】** The development and application of subsurface drip irrigation is of great importance for helping mitigate the limitation of water resources faced by agriculture in arid and semiarid regions around the world. This paper reviews the research progresses made over the past decades in subsurface drip irrigation and discusses its potential development in the future. **【Method】** The analysis was based on publications collected in the database of Web of Science. We used the Origin and CiteSpace knowledge mapping software to analyze the knowledge map of subsurface drip irrigation research in five aspects: numbers of publications, cooperative network, keyword co-occurrence, emerging keywords analysis, and co-citation clustering. **【Result】** ① Research on subsurface drip irrigation has undergone three distinct stages: infancy, a period of fluctuation, and rapid advancement. The main publication journal is *Agriculture Water Management*, and the United States and China contributed most papers. There are close cooperations between countries and institutions, and the collaboration show a pattern of "local concentration and overall dispersion." ② The main research areas include soil water transport, plant growth and development, irrigation water quality and soil salinization, and irrigation water management. The research focus was water transport mechanisms, hydrological modeling, control of irrigation water quality, and automation control of drip irrigation technology. Other areas included system optimization, water-saving irrigation technologies, soil improvement, application of intelligent technologies and new materials. ③ Future research is likely to focus on comparative analysis using multiple databases and explore new influencing factors and irrigation methods through interdisciplinary research. To achieve this, advanced collaborative platforms need to be established, and research on case studies from developing countries and water-scarce regions should be addressed to strengthen cooperation among countries, institutions. **【Conclusion】** Utilizing Citespace software for the analysis of the subsurface drip irrigation field has provided excellent visual representation. This analysis encompasses the distribution of publication quantities, collaboration networks, keyword co-occurrence, burst keyword analysis, and co-citation clustering. These research findings will serve as significant references and guidance for the future theoretical development and practical applications within this field.

**Key words:** subsurface drip irrigation; research process; research hotspots; CiteSpace; visual analysis

责任编辑：赵宇龙