

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2022.0024
刘玉玉,冯雨晴,姜欣. 基于 CiteSpace 的地表水-地下水相互作用研究文献分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):218-229. LIU Y Y, FENG Y Q, JIANG X. Literature analysis of surface water and groundwater interaction based on CiteSpace[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(2):218-229. (in Chinese)

基于 CiteSpace 的地表水-地下水相互作用研究文献分析

刘玉玉¹,冯雨晴¹,姜欣^{2,3}

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022; 2. 山东省水利科学研究院, 济南 250014;
3. 山东省农村供排水安全工程技术研究中心, 济南 250014)

摘要:为分析地表水-地下水相互作用研究的现状和趋势,挖掘知识基础与研究热点,基于 1985—2020 年 Web of Science(WoS)数据源,利用 CiteSpace 软件对检索的文献进行分析,梳理地表水-地下水相互作用领域的研究成果。结果表明:该领域发文数量分为缓慢增长、波动增长、稳定增长 3 个阶段,引文量逐年上升,反映该领域越来越受到研究学者的关注;地表水-地下水相互作用研究涉及多门学科,为研究提供了广泛的思路 and 手段。*Journal of Hydrology、Environmental Earth Science、Hydrological Processes* 在该领域载文数量排名前 3;研究力量主要分布在美国、中国和澳大利亚等;发文作者多且分散,在研究时段内发文数量最多的作者是 Chunmiao Zheng(郑春苗)教授;中国科学院、美国地质调查局和澳大利亚弗林德斯大学等机构影响力较大。该领域研究的发展趋势为:较单一的地下水研究→地表水-地下水相互作用研究→陆地-水域生态系统的水体交互作用对各因素的响应研究。研究热点为:热追踪定量探究地表水-地下水交互的作用与强度;研发或改进数值模型对作用界面及不同研究对象水体交互作用进行模拟;探究水循环驱动下地表水-地下水交互作用对人类活动及气候系统等的生物学、物理学和化学过程的响应。未来将注重地表水-地下水交互作用的多尺度多学科交叉研究,增强团队间合作交流。

关键词:CiteSpace;地表水-地下水相互作用;知识图谱;文献计量;可视化

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地表水和地下水是相互关联的水文连续体,广泛存在于山区岩层、河流系统、海岸和喀斯特等地形环境中,其多变而复杂的相互转化和相互作用影响着流域水文循环和水量收支计算^[1-3]。水质方面,地表水-地下水相互作用过程影响着水化学成分分布和演变规律,水岩作用、吸附效应等在作用过程中产生影响,干扰着流域水质^[4];水量方面,地下水是一些流域水文循环和水资源转化的主导因素,尤其对一些干旱区的生态植被状况影响显著^[6-7]。近年来,许多河流水利工程的修建和运行在解决流域水资源时空分布不均、水资源供需矛盾和水资源合理

配置等方面发挥着巨大作用,同时使水循环过程发生变化^[8]。灌溉引水和地下水开采改变了地表水和地下水的循环^[9-10],但过度引水导致河道径流减少^[11-12],造成生态退化,地下水的过量开采引发了许多生态环境问题^[13-14]。

单独的地表水与地下水研究不能满足研究需求,也难以解释水体交互作用形成的各种现象。为了进一步探明水体相互作用的形成机理,为水资源管理提供思路方法,需要对地表水-地下水相互作用开展进一步的研究。地表水与地下水之间存在着密切的联系,两者的相互作用深刻影响着流域内的水

收稿日期:2021-03-10 修回日期:2021-11-01 网络出版时间:2021-11-11
网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211110.1307.002.html>
基金项目:国家自然科学基金项目(51909105);山东省自然科学基金项目(ZR2019QEE006)
作者简介:刘玉玉(1984—),女,山东临沂人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:stu_liuyy@ujn.edu.cn

循环,最终影响生态系统的可持续性,其原理、机制及影响等是水文学中需要进一步探讨的内容,对于科学地进行水资源评价、开发利用和综合管理具有重要意义。

文献计量学是一门基于数学和统计学的交叉学科,以文献、作者和词汇数量为主要度量对象,对知识载体进行定量分析。CiteSpace 统计和可视化软件是美国德雷塞尔大学陈超美博士基于 Java 平台研发而成的文献计量工具^[15],利用文献计量原理,在使用知识图谱达成数据可视化方面展开了广泛的应用^[16-22]。本文利用 CiteSpace 文献计量工具对地表水-地下水相互作用相关文献进行量化分析,通过绘制知识图谱展示该领域的研究现状,通过分析文献共被引和关键词探究地表水-地下水相互作用领域研究前沿与研究热点,以期对相关研究提供参考。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

本文以 Web of Science(WoS)核心数据库为检索平台,主题词设置为:[groundwater and (river* or surface* or lake*)] and interact*,时间跨度为 1985—2020 年,语言选择 English,文献类型选择 Article 进行检索,得到文献信息共 5 958 条。文献数据最后更新时间为 2021 年 1 月 25 日。

1.2 分析方法

将 WoS 核心合集集中的 5 958 篇文献导出。为保证文献非重复性和关联性,利用 CiteSpace 对导出文献进行除重,人工筛选与该领域相关性弱的文献,得到有效文献信息 2 941 条。对导出文献的发文量、引文量、研究领域、发文作者、研究机构、载文期刊和关键词等进行分析,文章数据处理采用的 CiteSpace 软件为 5.5 R2. SE 的版本。

2 结果与分析

2.1 发文量分析

发文数量及增长率随时间的变化反映了该领域的发展态势。1985—2020 年,该研究领域的文献发表总数为 2 941 篇,总被引频次达到 54 645 次(图 1),去除自引后的引用频次为 47 954 次,每篇平均被引次数为 18.58, h 指数为 89。1985—2020 年,地表水-地下水相互作用研究领域发文数量分为缓慢增长、波动增长、稳定增长 3 个阶段。1993 年前,该领域年均发文数量在 10 篇以下,有关研究较少,增长缓慢;1994—2010 年,该领域年发文数量为 10~113 篇,发文数量呈波动增长;2011—2020 年,出现大量研究性文献,研究进入稳定增长阶段,年增长率为 12.44%。该领域近 3 年的年均发文量超过 250 篇,受到研究学者的广泛关注。

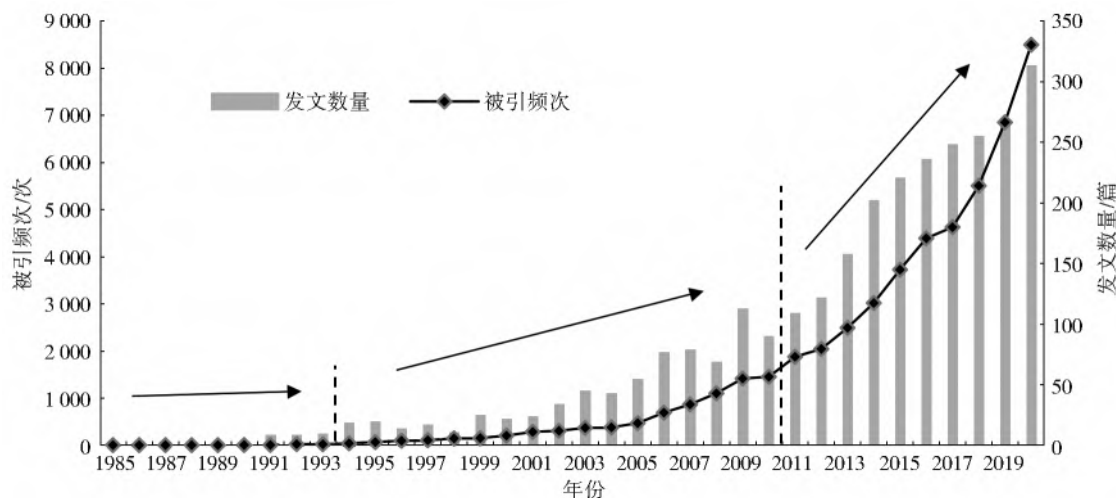


图 1 1985—2020 年地表水-地下水相互作用的年发表文献量

Fig. 1 Annual publication volume of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

2.2 学科分析

地表水-地下水的相互作用是水循环过程中水资源、地质结构和人为作用等多要素共同影响的结果,涉及多门学科。设置时间切片为 1 a,分析节点为 Category,数据选取标准为 Top 50,对文献进行学科方向分析。高占比学科(图 2)展示了地表水-地下水相互作用的研究主要涉及学科,包括水资源

学、地质学、工程学、地球科学、环境科学与生态学等(文献所属学科类别的划分具有一定的重复率)。研究过程中,灵活应用各领域不同技术手段将是研究取得突破的关键之一。此外,地表水-地下水相互作用与生物学、湖沼学、地球化学与地球物理学等也有一定联系,这也是该领域受到广泛关注的重要原因之一。

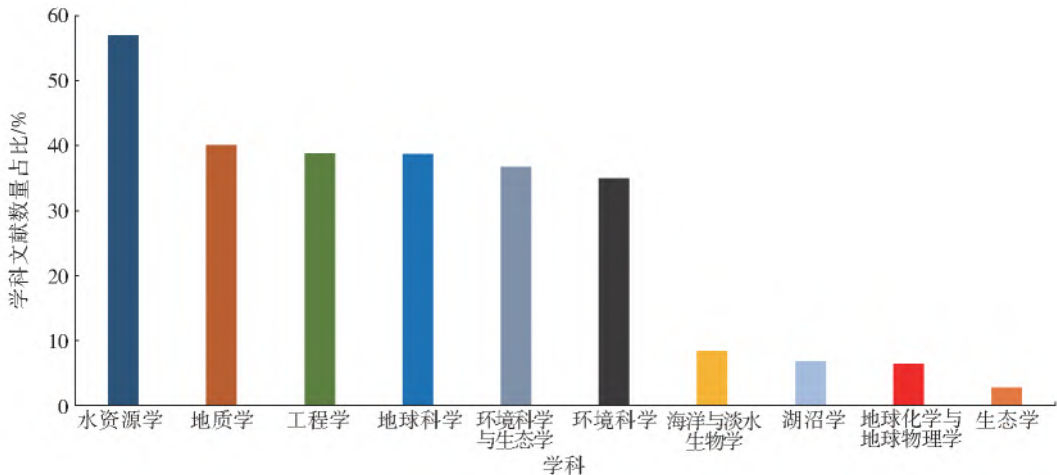


图 2 1985—2020 年地表水-地下水相互作用相关学科文章占比

Fig. 2 The proportion of articles in correlative disciplines of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

2.3 载文期刊分析

表 1 列出了 1985—2020 年该领域载文数量排名前 10 的期刊,发文量占总发文量的 41.49%。其中,由荷兰 Netherlands 主办,Elsevier Science BV 出版的 *Journal of Hydrology* 发文数量最多。此外 *Environmental Earth Science*、*Hydrological Processes*、*Hydrogeology Journal*、*Water Resources Research* 等期刊发文量位居前 5。可以看出,地表水-地下水相互作用研究的发期刊所属学科以水文水资源学、环境科学及地球科学为主。

表 1 1985—2020 年地表水与地下水相互作用文献载文期刊
Tab. 1 The published journals of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

序号	期刊	载文量/ 篇	文献比例/ %	影响 因子
1	Journal of Hydrology	303	10.30	5.722
2	Environmental Earth Science	160	5.44	2.784
3	Hydrological Processes	151	5.13	3.565
4	Hydrogeology Journal	136	4.62	3.178
5	Water Resources Research	126	4.28	5.240
6	Water	94	3.20	3.103
7	Science of the Total Environment	86	2.92	7.963
8	Applied Geochemistry	63	2.14	3.524
9	Hydrology and Earth System Science	61	2.07	5.748
10	Arabian Journal of Geosciences	41	1.39	1.827

2.4 研究力量分析

不同国家(地区)和机构的发文量在一定程度上反映其对该领域的重视程度及影响力;发文作者共现图谱可以展示不同阶段该领域的前沿团队和合作密切的学者群。

2.4.1 国家和地区分析

时间跨度选择时间切片为 1 a,分析节点为 Country,数据选取标准为 Top 50。研究期内,有

110 个国家(地区)研究了地表水-地下水相互作用,有 9 个国家发文量超过 100 篇。由表 2 可知:美国发文量最多,处于该领域研究的主导地位;第二位是中国,反映出我国在该领域科研水平的提高。发文数量在 100 次以上的国家中,中国、美国、英国和意大利等国家具有雄厚的科研实力,基于水资源的经济与社会需求广大,在一定程度上展现了科研能力和研究领域需求对科学研究的推动作用。根据被引频次,英国、意大利和西班牙等国家的论文篇均被引频次较高,中国为 14.28,文献年均被引次数较低,论文综合影响力有待提高。这与中国在该领域研究起步较晚有关,因此,我国要提高论文的质量和研究深度,扩大文献影响力。

2.4.2 发文机构分析

分析节点选择 Institution,数据选取标准为 Top 50,其他设置不变。统计发现:中国科学院(Chinese Acad Sci)在该领域发文量第一(147 篇);美国地质调查局(US Geol Survey)发文数量第二(96 篇);中国地质大学(China Univ Geosci)和澳大利亚弗林德斯大学(Flinders Univ S Australia)第三(70 篇)。在 CiteSpace 中,Centrality 指的是一个节点担任其他两个节点之间最短路的桥梁的次数,节点充当“中介”的次数越高,值越大,节点也就越重要。中介中心性标准化计算通常使用一个节点承担最短路桥梁的次数除以所有的路径数量,中介中心性超过 0.1 的节点称为关键节点。中心性较高的机构包括澳大利亚弗林德斯大学(0.31)、中国科学院(0.30)、加拿大滑铁卢大学(Univ Waterloo,0.17)、美国地质调查局(0.14)和德国亥姆霍兹联合会(UFZ Helmholtz Ctr Environm Res,0.12)。中国科学院、美国地质调查局及澳大利亚弗林德斯大学的中心度和发文量均较高,科研实力雄厚,影响深远,见图 3。

表 2 1985—2020 年地表水与地下水相互作用发文数量排名前 10 位的国家

Tab. 2 Top 10 countries with the number of publications of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

序号	国家	载文量/篇	发文量占比/%	中心性	篇均被引次数/次	被引次数总计/次
1	美国	776	26.39	0.30	24.07	18 679
2	中国	434	14.76	0.15	14.28	6 199
4	澳大利亚	275	9.35	0.12	21.58	5 934
3	德国	257	8.74	0.20	25.45	5 425
5	加拿大	216	7.34	0.13	21.11	5 498
7	印度	172	5.85	0.04	25.48	3 185
6	法国	144	4.90	0.12	30.08	3 669
8	英国	118	4.01	0.02	29.80	3 549
9	意大利	113	3.84	0.14	18.52	3 367
10	西班牙	85	2.89	0.02	28.36	2 411

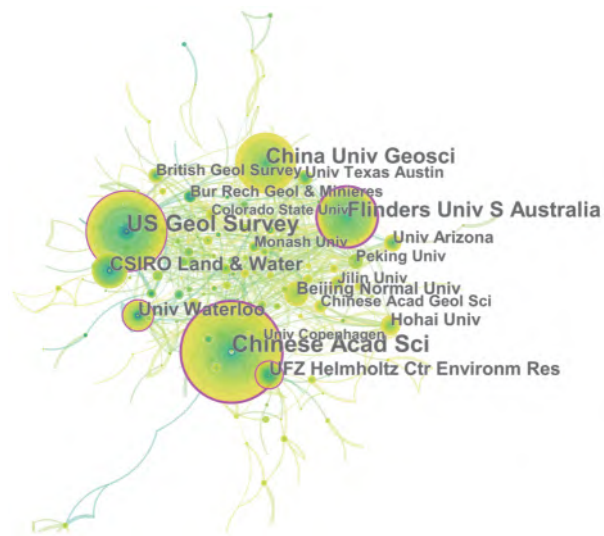


图 3 1985—2020 年地表水与地下水相互作用机构合作共现图谱

Fig. 3 The network of institutional cooperation of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

2.4.3 文献作者群体分析

分析节点选择 Author,数据选取标准为 Top 50,其他设置不变。由表 3 可知,Chunmiao Zheng (郑春苗)是 1985 年以来该领域发文量最多的学者(23 篇)。超过 10 篇的作者还有:Yanxin Wang(王焰新)、Laura K Lautz、Reed M Maxwell、Martin A Briggs、Craig T Simmons 和 Xianfang Song(宋献方)。图 4 显示该领域具有多个学术合作团体,如郑春苗、田勇和郑一学术团队,王焰新和马腾学术团队,Laura K Lautz 团队,Reed M Maxwell 团队,Martin A Briggs 团队,Craig T Simmons 和 Peter G Cook 学术团队,宋献方和唐常源学术团队。从作者合作共现图谱可以看出,各国地区研究机构和团队目前已基本成熟稳定,团队内部学者的联系较紧密,但团队与团队之间合作交流较弱,部分团队研究活动较为独立。

表 3 1985—2020 年地表水-地下水相互作用文献发文作者

Tab. 3 The authors of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

序号	作者	载文量/篇	序号	作者	载文量/篇
1	Chunmiao Zheng	23	13	M Bayanl Cardenas	8
2	Yanxin Wang	14	14	Okke Batelaan	8
3	Laura K Lautz	12	15	Xingyuan Chen	7
4	Reed M Maxwell	12	16	Changyuan Tang	6
5	Martin A Briggs	12	17	Jie Liu	6
6	Craig T Simmons	11	18	Jinsheng Wang	6
7	Xianfang Song	10	19	Yamin Deng	5
8	Yong Tian	9	20	Jeffrey M Mckenize	4
9	Peter G Cook	9	21	Stefan Krause	4
10	Teng Ma	9	22	Adam S Ward	4
11	Yi Zheng	9	23	Richard G Niswongem	4
12	Yanguo Teng	9			

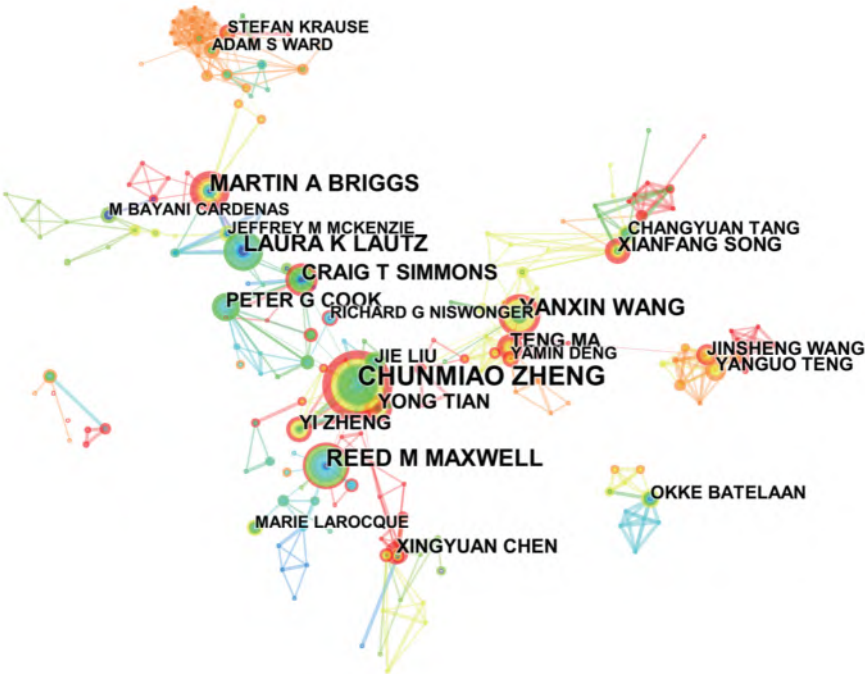


图 4 1985—2020 年地表水-地下水相互作用作者合作共现图谱

Fig. 4 The network of author cooperation of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

2.5 知识基础识别

高频被引文献展示了领域所涉及的类似或相通研究思路和聚焦点,是后期研究者强有力的参考范

本。保持 CiteSpace 的其它设置不变,分析节点选择 Reference,数据选取标准设置为 Top 50,得到引文共现图谱,并对图谱中排名前 10 的文献进行分析,见表 4。

表 4 1985—2020 年地表水-地下水相互作用文献排名前 10 的被引文献

Tab. 4 Top 10 cited references of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

第一作者	通信作者	发表年份	文献名	期刊	频次
Sophocleous M	Sophocleous M	2002	Interactions between groundwater and surface water: The state of the science	Hydrogeol J	65
Boano F	Boano F	2014	Hyporheic flow and transport processes; Mechanisms, models, and biogeochemical implications	Rev Geophys	48
Kalbus E	Kalbus E	2006	Measuring methods for groundwater-surface water interactions; A review	Hydrol Earth Syst Sc	41
Keery J	Binley A	2007	Temporal and spatial variability of groundwater-surface water fluxes; Development and application of an analytical method using temperature time series	J Hydrol	38
Fleckenstein J H	Fleckenstein J H	2010	Groundwater-surface water interactions; New methods and models to improve understanding of processes and dynamics	Adv Water Resour	34
Brunner P	Brunner P	2012	HydroGeoSphere; A fully integrated, physically based hydrological model	Ground Water	32
Kollet S J	Kollet S J	2006	Integrated surface-groundwater flow modeling; A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model	Adv Water Resour	32
Hatch C E	Hatch C E	2006	Quantifying surface water-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records; Method development	Water Resour Res	30
Schmidt C	Schmidt C	2007	Evaluation and field-scale application of an analytical method to quantify groundwater discharge using mapped streambed temperatures	J Hydrol	30
Anibas C	Anibas C	2011	A simple thermal mapping method for seasonal spatial patterns of groundwater-surface water interaction	J Hydrol	28

Sophocleous^[2]建立了一个完善的水文地质生态学框架,阐述了气候、地形、地质和生物因素间的相互作用,概述了地表水和地下水相互作用对补给-排泄过程的影响机理,并强调了这种相互作用的生态意义。Boano 等^[23]总结了潜流带中流体流动和输送过程的模拟研究,并概述了水文和流体动力学中提出的理论。Kalbus 等^[24]概述了目前用于估算地表水-地下水界面通量的方法。Keery 等^[25]探索了一种利用温度时间序列来计算跨河床沉积物的垂直水通量的方法。Fleckenstein 等^[26]探讨了表征、量化和建模地表水-地下水相互作用的新方法和模型,如自然示踪剂和集成的地表-地下数值模型等,以提高对地表水-地下水作用过程的理解。Brunner 等^[27]介绍了一种数值型水文模型 HydroGeo-Sphere,用以定量分析水文循环。Kollet 等^[28]提出了一种用于解决大型、高度异构、可变饱和的流动问题的通用耦合模型,以更好拟合地表水-地下水界面条件。Hatch 等^[29]提出了一种使用时间序列热记录法确定河床渗流率,定量分析地表水与地下水相互作用的方法。Schmidt 等^[30]通过测量河床温度计算经由河床排放的地下水量。Anibas 等^[31]设计了一种以热量为示踪剂,通过热分布图确定地表水-地

下水相互作用的季节性和空间格局的方法,并在比利时 Aa River 进行实测。

从高频被引文献分析来看,该领域关注地表水-地下水交互的定量分析,热追踪作为一种常见且有效的追踪方法,常用以探究地表水-地下水交互的水通量、渗透率、排放量等量化分析结果。此外,通过分析热分布与温度序列,可探究地表水-地下水相互作用的空间格局与时间变化。水文模型作为分析地表水-地下水交互的有效模拟手段,也是该领域重点研究方向,近年来,对数值模型进行改进或研发,用于提高模型对作用界面及不同研究区域模拟精度是较为常见的研究思路。此外,随着该领域研究的逐步深入,相应的综述性文献日益增多,逐渐建立起该领域的研究框架与知识体系。

2.6 变化趋势与研究热点

关键词是对论文研究重点和方向的提炼,是对文章核心的概括。从高频关键词分析中能够进一步了解该领域的主要研究方向、技术方法和研究热点。时间跨度及切片保持不变,选择 Key word 为分析节点,数据选择标准为 Top 5%,合并含义相同的关键词,删除联系性较弱的关键词,生成关键词图谱见图 5。

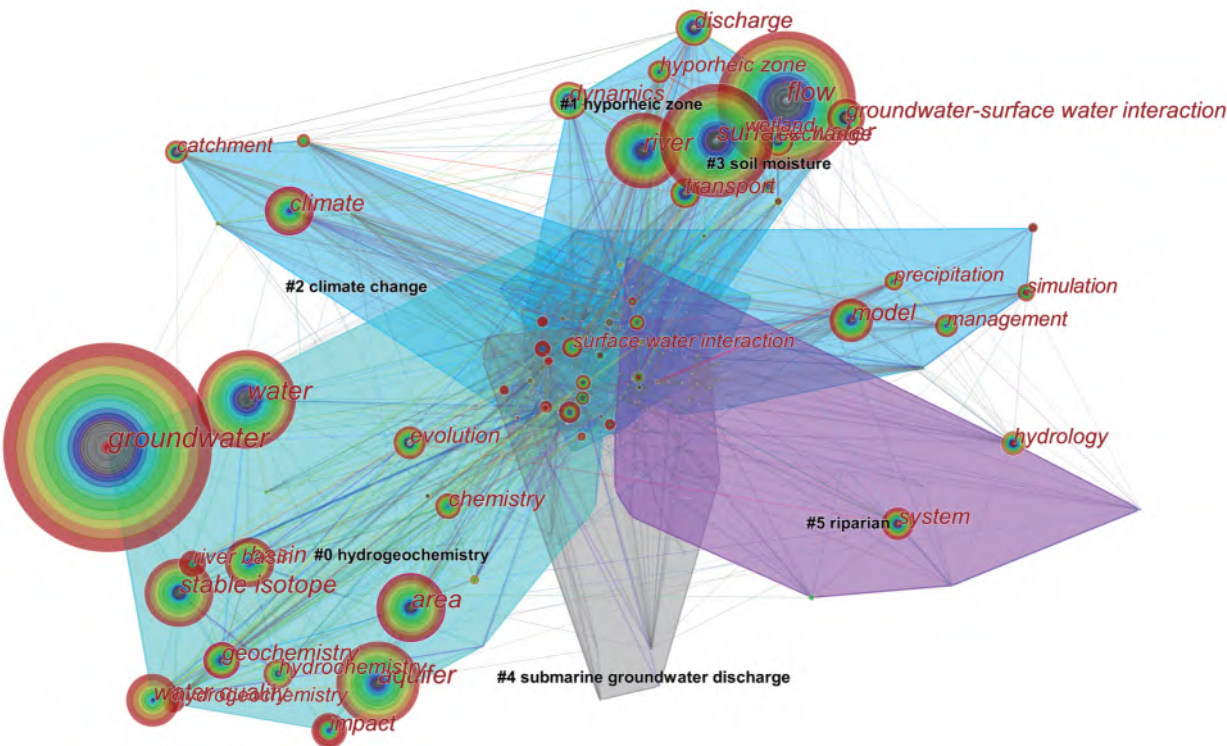


图 5 1985—2020 年地表水-地下水相互作用关键词图谱

Fig. 5 The network of key words of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

节点 groundwater、flow、surface water、water 和 aquifer 代表了地表水-地下水相互作用领域的研究基础,在对 5 个节点的研究分析基础之上,探究地

表水-地下水相互作用(表 5)。高频关键词展示了该领域主要研究涉及以下几个方面:研究对象^[32-35]包括河流-地下水、湖泊-地下水、湿地-地下水、滨海-

地下水、交互带、含水层、浅层地下水等区域的水体交互作用;研究内容^[36-37]包含地下水流量、水质和水力传导率等;作用过程^[38-42]指运输、补给、排放、交换和集水等;影响因素^[43-44],宏观上体现在气候变化和人类活动等,微观上体现在水岩相互作用、浸润和蒸发作用等;涉及学科为地球科学、水资源学、水化学、水文地球化学及生态学等;研究方法^[45-48]包括数理统计、模型以及示踪剂等。目前该领域的研究方向朝多元化发展,技术也呈

多元化。利用同位素探究地表水-地下水转化情况和通过数值模拟法建立地表水-地下水作用耦合模型的研究比重较大。除了同位素外,热追踪^[49-50]也是一种较为常用的追踪方法。另外,砷、磷、氮、有机碳以及铀等高频关键词的出现,说明该领域重视水中化学元素含量的分析,借助化学元素含量量化分析交互作用或探究交互过程。高频节点展示了该领域的基础研究,相关学者可以从中探索研究思路。

表 5 1985—2020 年地表水-地下水相互作用高频关键词

Tab. 5 The high frequency key words of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

序号	被引频次	关键词	序号	被引频次	关键词
1	845	groundwater	38	85	tracer
2	559	flow	39	83	lake
3	464	surface water	40	79	nitrate
4	430	water	41	74	groundwater flow
5	359	aquifer	42	73	hydraulic conductivity
6	331	river	43	70	irrigation
7	297	area	44	63	groundwater recharge
8	295	stable isotope	45	57	groundwater quality
9	249	water quality	46	55	shallow groundwater
10	241	groundwater-surface water interaction	47	50	drinking water
11	239	recharge	48	49	pattern
12	232	basin	49	48	runoff
13	220	climate	50	48	pollution
14	215	model	51	47	temperature
15	182	geochemistry	52	46	salinity
16	174	discharge	53	43	India
17	172	dynamics	54	42	mudflow
18	166	system	55	39	plain
19	155	chemistry	56	37	water balance
20	154	evolution	57	35	sediment
21	153	transport	58	31	land use
22	152	impact	59	30	radon
23	148	hydrochemistry	60	30	Australia
24	147	exchange	61	29	coastal aquifer
25	133	hyporheic zone	62	29	evaporation
26	130	hydrology	63	29	nitrogen
27	130	river basin	64	29	infiltration
28	120	management	65	29	seepage
29	117	catchment	66	28	denitrification
30	113	simulation	67	27	heterogeneity
31	104	surface water interaction	68	26	evapotranspiration
32	103	hydrogeochemistry	69	26	water-rock interaction
33	102	precipitation	70	24	soil moisture
34	97	wetland	71	23	China
35	96	soil	72	23	alluvial aquifer
36	94	contamination	73	22	vegetation
37	89	variability	74	20	resource

突现性较高的关键词是特定时段内频次变化率高的词,反映不同时段研究趋势。为了识别元素在某时段内的突出贡献,进行 Burstness 排名识别,Minimum Duration 参数设置为 3,获取连续 3 年及以上突出的元素。分析发现:该领域研究内容呈现“较单一的地下水研究→地表水-地下水相互作用研究→陆地-水域生态系统的水体交互对各因素的响应研究”的变化趋势,是由单一研究对象→多目标水体相互作用→整个生态系统水文循环变化的探究过程。早期,groundwater 是研究的基础,关于地表水-地下水相互作用的研究较少,有关理论尚处于起步阶段。中期,科研人员开始探究地表水-地下水相互作用的作用机理与有关作用过程,量化分析交互水量和水质问题,示踪剂与数值模型等研究方法逐渐应用于该领域的研究。现阶段,随着生物地球化学循环等理念的发展,蒸散发(evapotranspiration)、植被(vegetation)、温度(temperature)、盐渍化(salinization)和灌溉(irrigation)等关键词较为频繁出现,研究关注陆地-水域生态系统的水体交互作用对人类活动、气候变化等影响因素的生物和化学响应。此外,随着社会经济发展,工农业活动对水资源产生

的影响大大增加,研究人员开始关注人类活动对地下水和地表水造成的影响。重金属(heavy metal)、污染(pollution)、饮用水(drinking water)及地下水水质(groundwater quality)等关键词突现性较高,有机物、重金属和硝酸盐等物质在水中的分布与含量及在地表水-地下水相互作用过程中的转移受到关注。

关键词聚类展示了该领域的前沿研究热点。图 6 关键词共现时间线图谱共生 6 个聚类标签。其中:交互带(hyporheic zone)是地表水-地下水相互作用研究的焦点;水文地球化学(hydrogeochemistry)的研究最为持久;气候变化(climate change)对地表水-地下水相互作用的影响是研究的重要内容;土壤湿度(soil moisture)和河岸(riparian)是地表水-地下水相互作用的重要研究对象;海底地下水排泄(submarine groundwater discharge)与滨海区水体交换研究息息相关。分析还发现:随着科学技术的发展与生态理念的完善,生物地球化学循环等理念逐渐受到关注,探究水循环驱动下水体交互作用对人类活动及气候系统等的生物学、物理学和化学过程的响应是该领域近年来研究热点问题^[51-54]。

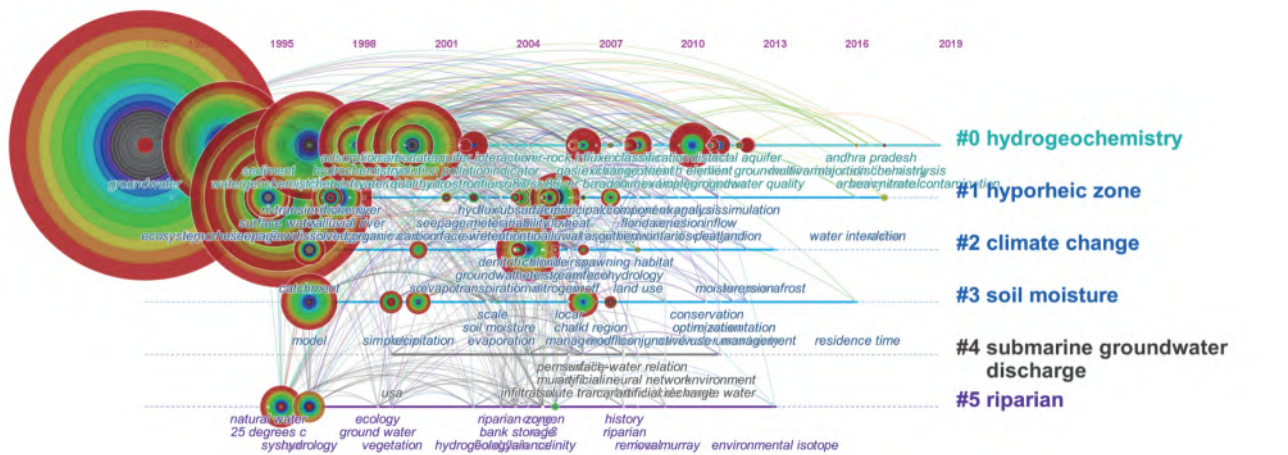


图 6 1985—2020 年地表水-地下水相互作用关键词共现时间线图谱
Fig. 6 The time-line view of key words and noun-phases of groundwater and surface water interaction from 1985 to 2020

3 结 论

通过 CiteSpace 对 WoS 筛选除重后的地表水-地下水相互作用领域的文献进行分析,得到以下结论:该领域发文数量与被引频次呈上升趋势,相关研究受到广泛关注;发文数量最多的期刊为 *Journal of Hydrology*、*Environmental Earth Science*、*Hydrological Processes*, 研究力量主要分布在美国、中国、澳大利亚等国家,中国科学院、美国地质调查局和澳大利亚弗林德斯大学等机构贡献突出,影响力深远;郑春苗教授是该领域发文量最多的学者。

研究发现:“较单一的地下水研究→地表水-地下水相互作用研究→陆地-水域生态系统的水体交互对各因素的响应研究”是该领域研究的变化趋势;探究水循环驱动下水体交互作用对人类活动及气候系统等的生物学、物理学和化学过程的响应是该领域近年来研究热点问题。

高新技术、精密测定仪器和各种计算机建模软件的快速发展为科学进行水资源评价、开发利用和综合管理提供强有力的支撑。通过梳理该领域的研究方向变化及前沿问题,发现目前尚有以下问题亟待解决:研究内容上,诸如南水北调、地下水开采等

一系列人类活动对水文循环产生影响,而气候变化增加了影响的复杂度,地表水与地下水的交互作用需进行更长时空尺度的综合研究;技术方法上,地表水与地下水交互界面的确定、不同时空尺度下地表水-地下水耦合模型及模型精确度的提高是目前需要解决的技术问题;同时,未来要注重地表水-地下水交互作用的多尺度多学科交叉研究,增强团队间的合作交流。

对地表水-地下水相互作用领域的文献计量分析展示了该领域的发展状况、主要研究力量、研究方向与热点,帮助研究人员初步认识该领域的发展进程,确定研究方向,把握前沿脉络。与综述型文献比较,利用 CiteSpace 软件分析多重文献节点,结果更为细化、清晰和直观。

参考文献(References):

- [1] WINTER T C. Recent advances in understanding the interaction of groundwater and surface water[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(S2): 985-994. DOI: 10.1029/95RG00115.
- [2] SOPHOCLEOUS M. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science[J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10(1): 52-67. DOI: 10.1007/s10040-002-0204-x.
- [3] DE GRAAF I E M, GLEESON T, VAN BEEK L P H, et al. Environmental flow limits to global groundwater pumping[J]. Nature, 2019, 574(7776): 90-94. DOI: 10.1038/s41586-019-1594-4.
- [4] 张亚丽, 张依章, 张远, 等. 浑河流域地表水和地下水氮污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 170-177. (ZHANG Y L, ZHANG Y Z, ZHANG Y, et al. Characteristics of nitrate in surface water and groundwater in the Hun River basin[J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 170-177. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j. issn. 1000-6923. 2014. 01. 035.
- [5] 赵玉. 渭河干流浅层地下水与地表水中重金属 Cd 污染特征及风险评价[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 287-277. (ZHAO Y. Characteristics and risk assessment of heavy metal Cd pollution of shallow groundwater and surface water in main stream of Weihe River, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(2): 287-277. (in Chinese)) DOI: 10.19814/j. jese. 2019. 10046.
- [6] HUSSEIN M, SCHWARTZ F W. Modeling of flow and contaminant transport in coupled stream-aquifer systems[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 65(1): 41-64. DOI: 10.1016/S0169-7722(02)00229-2.
- [7] 武强, 徐军祥, 张自忠, 等. 地表河网-地下水流系统耦合模拟 II: 应用实例[J]. 水利学报, 2005 (6): 754-758. (WU Q, XU J X, ZHANG Z Z, et al. Coupled modeling of surface water-groundwater system II: Application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005 (6): 754-758. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j. issn: 0559-9350. 2005. 06. 020.
- [8] LEE H, KOO M H, CHO B W, et al. Effects of Baekje weir operation on the stream-aquifer interaction in the Geum River basin, Republic of Korea[J]. Water, 2020, 12(11): 11. DOI: 10.3390/w12112984.
- [9] LEE H, KOO M H, KIM Y. Impacts of seasonal pumping on stream-aquifer interactions in Miryang, Korea[J]. Groundwater, 2017, 55(6): 906-916. DOI: 10.1111/gwat. 12543.
- [10] ESSAID H I, CALDWELL R R. Evaluating the impact of irrigation on surface water-groundwater interaction and stream temperature in an agricultural watershed[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599: 581-596. DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2017. 04. 205.
- [11] WOESSNER W W. Stream and fluvial plain groundwater interactions: Rescaling hydrogeologic thought[J]. Ground Water, 2000, 38(3): 423-429. DOI: 10.1111/j. 1745-6584. 2000. tb00228. x.
- [12] 陈永金, 李卫红, 陈亚宁, 等. 塔里木河流域综合治理的生态效应[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 24-28. (CHEN Y J, LI W H, CHEN Y N, et al. Ecological effect of synthesized governing in Tarim River valley[J]. China Environmental Science, 2007, 27(1): 24-28. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6923. 2007. 01. 007.
- [13] RODELL M, VELICOGNA I, FAMIGLIETTI J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India[J]. Nature, 2009, 460(7258): 999-1002. DOI: 10.1038/nature08238.
- [14] AESCHBACH-HERTIG W, GLEESON T. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(12): 853-861. DOI: 10.1038/ngeo1617.
- [15] CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253. DOI: 10.16192/j. cnki. 1003-2053. 2015. 02. 009.
- [16] 韦飞黎, 李双成, 余武生, 等. 降水稳定同位素研究的历史与现状: 基于文献计量学及网络分析方法[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2634-2643. (WEI F L, LI S C, YU W S, et al. The history and current status of the research on stable isotope of precipitation: Based on bibliometrics and network analysis methods[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2634-2643. (in Chi-

- nese)) DOI:10.5846/stxb201803130490.
- [17] 王家琛,朱鸿鹄,倪钰菲,等. 渗流监测文献的现状与趋势[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):201-209. (WANG J C,ZHU H H,NI Y F,et al. Research on status and trends of the seepage monitoring literature[J]. South to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(3):201-209. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbqk.2020.0065.
- [18] 刘中庆,李梦莎,杨立宾,等. 基于 Web of Science 的土壤真菌发展研究[J]. 环境科学与技术,2019,42(增刊1):57-64. (LIU Z Q,LI M S,YANG L B,et al. Development and tendency of soil fungi based on Web of Science[J]. Environmental Science & Technology,2019,42(1):57-64. (in Chinese)) DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.s1.010.
- [19] 张灿灿,孙才志. 基于 CiteSpace 的水足迹文献计量分析[J]. 生态学报,2018,38(11):4064-4076. (ZHANG C C,SUN C Z. Bibliometric analysis of water footprint based on CiteSpace[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):4064-4076. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201711172052.
- [20] 张增可,王齐,吴雅华,等. 基于 CiteSpace 植物功能性状的研究进展[J]. 生态学报,2020,40(3):1101-1112. (ZHANG Z K,WANG Q,WU Y H,et al. Research progress on plant functional traits based on CiteSpace[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(3):1101-1112. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201809172031.
- [21] 谢浩,李军,邹胜章,等. 基于文献计量学的地下水污染研究现状[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):168-178. (XIE H,LI J,ZOU S Z,et al. Research status of groundwater pollution based on bibliometrics [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(1):168-178. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbqk.2021.0017.
- [22] 曹天正,韩冬梅,宋献方,等. 滨海地区地表水-地下水相互作用研究进展的文献计量分析[J]. 地球科学进展,2020,35(2):154-166. (CAO T Z,HAN D M,SONG X F,et al. Bibliometric analysis of research progress on coastal surface water and groundwater interaction[J]. Advances in Earth Science,2020,35(2):154-166. (in Chinese)) DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2020.018.
- [23] BOANO F,HARVEY J W,MARION A,et al. Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications[J]. Reviews of Geophysics,2014,52(4):603-79. DOI:10.1002/2012RG000417.
- [24] KALBUS E,REINSTORF F,SCHIRMER M. Measuring methods for groundwater, surface water and their interactions: A review[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2006,3(4):1809-1850. DOI:10.5194/hessd-3-1809-2006.
- [25] KEERY J,BINLEYA A,CROOK N,et al. Temporal and spatial variability of groundwater-surface water fluxes; Development and application of an analytical method using temperature time series[J]. Journal of Hydrology,2007,336:1-16. DOI:10.1016/j.jhydrol.2006.12.003.
- [26] FLECKENSTEIN J H,KRAUSE S,HANNAH D M,et al. Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics[J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences,2010,33:1291-1295. DOI:10.1016/j.advwatres.2010.09.011.
- [27] BRUNNER P,SIMMONS C T. HydroGeoSphere: A fully integrated, physically based hydrological model [J]. Ground Water,2012,50(2):170-176. DOI:10.1111/j.1745-6584.2011.00882.x.
- [28] KOLLET S J,MAXWELL R M. Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model[J]. Advances in Water Resources,2006,29(7):945-958. DOI:10.1016/j.advwatres.2005.08.006.
- [29] HATCH C E,FISHER A T,REVENAUGH J S,et al. Quantifying surface water-groundwater interactions using time series analysis of streambed thermal records; Method development[J]. Water Resources Research,2006,42. DOI:10.1029/2005WR004787.
- [30] SCHMIDT C,CONANT B,BAYER-RAICH M,et al. Evaluation and field-scale application of an analytical method to quantify groundwater discharge using mapped streambed temperatures[J]. Journal of Hydrology,2007,347(3-4):292-307. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.08.022.
- [31] ANIBAS C,BUIS K,VERHOEVEN R,et al. A simple thermal mapping method for seasonal spatial patterns of groundwater-surface water interaction[J]. Journal of Hydrology,2011,397(1-2):93-104. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.11.036.
- [32] CAI Y,HUANG W R,TENG F,et al. Spatial variations of river-groundwater interactions from upstream mountain to midstream oasis and downstream desert in Heihe River basin, China[J]. Hydrology Research,2016,47(2):501-520. DOI:10.2166/nh.2015.072.
- [33] CHEN J,QIAN H,GAO Y Y,et al. Insights into

- hydrological and hydrochemical processes in response to water replenishment for lakes in arid regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 13. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2019. 124386.
- [34] SPELDRICH B, GERLA P, TSCHANN E. Characterizing groundwater interaction with lakes and wetlands using GIS modeling and natural water quality measurements[J]. *Water*, 2021, 13(7): 983. DOI: 10. 3390/w13070983.
- [35] SHULER C K, DULAI H, LETA O T, et al. Understanding surface water-groundwater interaction, submarine groundwater discharge, and associated nutrient loading in a small tropical island watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124342. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2019. 124342.
- [36] BANKS E W, SIMMONS C T, LOVE A J, et al. Assessing spatial and temporal connectivity between surface water and groundwater in a regional catchment; Implications for regional scale water quantity and quality[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 404(1-2): 30-49. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2011. 04. 017.
- [37] LI PY, TIAN R, LIU R. Solute geochemistry and multivariate analysis of water quality in the Guohua Phosphorite Mine, Guizhou Province, China[J]. *Exposure and Health*, 2019, 11(2): 81-94. DOI: 10. 1007/s12403-018-0277-y.
- [38] WADA Y, WISSER D, BIERKENS MFP. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources[J]. *Earth System Dynamics*, 2014, 5(1): 15-40. DOI: 10. 5194/esd-5-15-2014.
- [39] HARVEY J, GOOSEFF M. River corridor science: Hydrologic exchange and ecological consequences from bedforms to basins[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 6893-6922. DOI: 10. 1002/2015wr017617.
- [40] HARVEY J W, BOHLKE J K, VOYTEK M A, et al. Hyporheic zone denitrification: Controls on effective reaction depth and contribution to whole-stream mass balance[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(10): 6298-6316. DOI: 10. 1002/wrcr. 20492.
- [41] LAMONTAGNE S, TAYLOR A R, COOK P G, et al. Field assessment of surface water-groundwater connectivity in a semi-arid river basin (Murray-Darling, Australia)[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 1561-1572. DOI: 10. 1002/hyp. 9691.
- [42] SADAT-NOORI M, SANTOS I R, SANDERS C J, et al. Groundwater discharge into an estuary using spatially distributed radon time series and radium isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 703-719. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2015. 06. 056.
- [43] BARON J S, HALL E K, NOLAN B T, et al. The interactive effects of excess reactive nitrogen and climate change on aquatic ecosystems and water resources of the United States[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 114(1-3): 71-92. DOI: 10. 1007/s10533-012-9788-y.
- [44] HAN D M, SONG X F, CURRELL M J, et al. A survey of groundwater levels and hydrogeochemistry in irrigated fields in the Karamay Agricultural Development Area, northwest China; Implications for soil and groundwater salinity resulting from surface water transfer for irrigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(3-4): 217-234. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2011. 03. 052.
- [45] AJAMI H, MCCABE M F, EVANS J P, et al. Assessing the impact of model spin-up on surface water-groundwater interactions using an integrated hydrologic model[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(3): 2636-2656. DOI: 10. 1002/2013wr014258.
- [46] ALA-AHO P, ROSSI P M, ISOKANGAS E, et al. Fully integrated surface-subsurface flow modelling of groundwater-lake interaction in an esker aquifer: Model verification with stable isotopes and airborne thermal imaging[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 391-406. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 12. 054.
- [47] BAILEY R T, WIBLE T C, ARABI M, et al. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(23): 4420-4433. DOI: 10. 1002/hyp. 10933.
- [48] GAO X B, WANG Y X, WU P L, et al. Trace elements and environmental isotopes as tracers of surface water-groundwater interaction: A case study at Xin'an karst water system, Shanxi Province, Northern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 59(6): 1223-1234. DOI: 10. 1007/s12665-009-0111-8.
- [49] IRVINE D J, LAUTZ L K, BRIGGS M A, et al. Experimental evaluation of the applicability of phase, amplitude, and combined methods to determine water flux and thermal diffusivity from temperature time series using VFLUX 2[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 728-737. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2015. 10. 054.
- [50] MCCALLUM A M, ANDERSEN M S, RAU G C, et al. A 1-D analytical method for estimating surface water-groundwater interactions and effective thermal diffu-

- sivity using temperature time series[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48. DOI:10.1029/2012wr012007.
- [51] LU Y, GAO Y, YANG T T. A review of mass flux monitoring and estimation methods for biogeochemical interface processes in watersheds[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30 (6): 881-907. DOI: 10.1007/s11442-020-1760-5.
- [52] DU E H, TIAN Y, CAI X M, et al. Exploring spatial heterogeneity and temporal dynamics of human-hydrological interactions in large river basins with intensive agriculture: A tightly coupled, fully integrated modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*. 2020, 591:14. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125313.
- [53] DAWLEY S, ZHANG Y, LIU X T, et al. Statistical analysis of extreme events in precipitation, stream discharge, and groundwater head fluctuation: Distribution, memory, and correlation[J]. *Water*. 2019, 11 (4):18. DOI:10.3390/w11040707.
- [54] CAO G L, ZHENG C M, SIMMONS C T. Groundwater recharge and mixing in arid and semiarid regions: Heihe River basin, northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*. 2016, 90 (3): 971-987. DOI:10.1111/1755-6724.12738.

Literature analysis of surface water and groundwater interaction based on CiteSpace

LIU Yuyu¹, FENG Yuqing¹, JIANG Xin^{2,3}

(1. *School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China;*

2. *Water Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China;*

3. *Shandong Engineering Research Center for Rural Water Supply and Drainage Safety, Jinan 250014, China)*

Abstract: The complex interaction between surface water and groundwater interferes with the hydrological cycle affect the ecological status of the basin. Engineering measures for artificial collection of surface water and groundwater not only play a key role in solving the uneven distribution of water resources and the contradiction between water supply and demand, but also cause a series of ecological problems. Therefore, it is particularly important to explore the relevant mechanism of the interaction between surface water and groundwater. Through bibliometric analysis, it helps researchers grasp the current research status and hotspots in this field, which provides references for related research.

Based on the Web of Science (WoS) data sources from 1985 to 2020, CiteSpace bibliometric software is used to quantitatively analyze the literature on the interaction of surface water and groundwater. By analyzing the cited documents, authors, research organizations, key words, and other elements, combined with the knowledge map, it displays the current research status, frontiers, and hotspots of this field.

From 1985 to 2020, the total amount of scientific research papers in this field can be divided into three stages: slow growth-fluctuating, growth-steady growth and the increase in the number of published articles. The number of articles published in *Journal of Hydrology*, *Environmental Earth Science*, *Hydrological Processes* ranks top three. Research forces in this field are mainly concentrated in the United States, China, Australia. The author who published the most in the research period is Chunmiao Zheng. Chinese Academy of Sciences, U. S. Geological Survey, and Flinders Univ S Australia are the most influential institutions in the world. The knowledge graphs show the top ten cited documents in this field and the top 5% key words of the literature frequency. The keywords generate six cluster tags: hyporheic zone, hydrogeochemistry, climate change, soil moisture, riparian, and submarine groundwater discharge.

More scholars are paying attention to this field, which contains several interdisciplinary subjects, providing a wide range of ideas and methods for research. The changing trend of research in this field is single groundwater research→groundwater-surface water interaction research→terrestrial-aquatic ecosystem water interaction research on the response to influencing factors. The research hotspots in this field in recent years are exploring the water flux, permeability and discharge of groundwater-surface water interaction through heat tracing, developing and improving numerical models to improve the fit of the model to the interaction interface and the interaction of water bodies in different research areas, analyzing the response of water interactions to the biological, physical and chemical processes of human activities and the climate system under the concept of biogeochemical cycles. In the future, the multi-scale interdisciplinary research of surface water-groundwater interaction and enhance cooperation among teams should be focused on.

Key words: CiteSpace; surface water and groundwater interaction; knowledge graph; bibliometric; visualization