



关昊哲, 冶运涛, 顾晶晶, 周政, 曹引, 蒋云钟. 基于 CiteSpace 的径流量遥感反演研究现状与进展分析[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(02): 129-140.
GUAN Haozhe, YE Yuntao, GU Jingjing, ZHOU Zheng, CAO Yin, JIANG Yunzhong. Research status and progress analysis of runoff inversion retrieval based on CiteSpace[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(02): 129-140.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.11

基于 CiteSpace 的径流量遥感反演研究现状与进展分析

关昊哲 冶运涛* 顾晶晶 周政 曹引 蒋云钟

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘 要 为分析国内外径流量遥感反演领域发展趋势、合作关系和研究现状,本研究基于中国知网(CNKI)和 Web of Science(WOS)数据库,分别以“遥感径流”“径流量反演”“遥感数据”“径流量”和“runoff inversion”“remote sensing”“river discharge”为关键词检索并筛选,共得到 2000—2023 年 1 726 篇径流量遥感反演领域文献,利用 CiteSpace 软件从文献发表时间、机构、国家、作者、期刊和关键词 6 个方面进行分析。结果表明:1)2000 年以来, CNKI 与 WOS 数据库文献数量均呈先低速后高速增长态势,中文文献发文量突变点为 2015 年,英文文献发文量突变点为 2012 年。2)美国、中国和法国在该领域发文量位居前 3,其中中国科学院、加利福尼亚理工学院为主要发文机构;Bjerklie D M 和 Smith L C 为高共被引作者; *Remote Sensing of Environment* 和 *Journal of Hydrology* 为高共被引期刊。3)2 个数据库的关键词聚类均可归纳为 6 个方向,且 2000 年以来发文量均有增加,其中方向 5(基于长时间序列数据训练深度学习模型进行反演径流量)发文量增加最为明显,2019 年后发文量远高于其他方向,成为当下径流量遥感反演领域研究热点。4)CNKI 数据库文献研究热点发展分为 2 个阶段,第一阶段(2000—2015 年)为传统水文模型研究期,主要聚焦于传统物理机制的水文模型研究;第二阶段(2016—2023 年)为技术融合快速发展期,主要通过引入国际上较先进的数理模型进行研究。WOS 数据库研究热点发展也分为 2 个阶段,第一阶段(2000—2012 年)为多模型探索期,主要尝试通过多元模型反演径流量;第二阶段为(2013—2023 年)融合发展期,主要进行数理模型与多方法融合研究,且从研究内容第一次出现的时间上看,英文文献发表时间普遍早于中文文献。未来研究方向应聚焦于多源数据融合、模型改进优化、流域特性反演方法适配和影响机制探究等。

关键词 径流量反演; 径流量; CiteSpace; 卫星遥感; 知识图谱; 数字孪生流域

中图分类号 TV121

文章编号 1007-4333(2026)02-0129-12

文献标志码 A

Research status and progress analysis of runoff inversion retrieval based on CiteSpace

GUAN Haozhe, YE Yuntao*, GU Jingjing, ZHOU Zheng, CAO Yin, JIANG Yunzhong

(State Key Laboratory of Watershed Water Cycle Modeling and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract To analyze the development trends, cooperation relationships and research status of remote sensing inversion of runoff at home and abroad. this study is based on the databases of CNKI and WOS, the keywords “remote sensing runoff” “runoff retrieval” “remote sensing data”, “runoff” and “runoff inversion”, “remote sensing” and “river discharge” were searched and screend, respectively. A total of 1 726 literatures in the field of runoff remote sensing inversion from 2000 to 2023 were obtained. The CiteSpace software was used to analyze the literature in terms of six aspects: publication time, institution, country, author, periodicals and keywords. The

收稿日期: 2025-04-09;接受日期: 2025-08-25

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3209302-03);国家自然科学基金项目(52279031, 52309040);北京市自然科学基金项目(JQ21029)

第一作者: 关昊哲(ORCID:0009-0007-9036-6311), 硕士研究生, E-mail: guanhaozhe@edu.iwhr.com

通讯作者: 冶运涛(ORCID:0000-0002-8567-8931), 正高级工程师, 主要从事水利信息化研究, E-mail: yeyuntao@iwhr.com

results showed that: 1) Since 2000, the number of domestic and foreign literature has shown a trend of slow growth followed by high growth. The abrupt change in the number of Chinese literature publications occurred in 2015, and the abrupt change in the number of English literature publications occurred in 2012. 2) The United States, China and France ranked the top three in terms of the number of publications in this field, of which the Chinese Academy of Sciences and the California Institute of Technology as the main publishing institutions. The authors of the study, Bjerklie D M and Smith L C, are the most highly cited authors. *Remote Sensing of Environment* and *Journal of Hydrology* journals are highly cited journals. 3) Keywords clustering can be categorized into six directions, and the number of publications has increased since 2000, of which direction 5 (training deep learning models for inverting runoff volume based on long time series data) has seen the most significant increase in publications, and since 2019, the number of publications has far exceeded other directions, becoming a research hotspot in the field of runoff remote sensing inversion. 4) The development of research hotspots in CNKI database can be divided into two stages. The first phase (2000-2015) is the traditional hydrological modelling period, which focuses on the hydrological modelling of the traditional physical mechanism, and the second phase (2016-2023) is the period of rapid development of technological convergence, which introduces the more advanced mathematical and physical models in the international field for inversion. The development of research hotspots in the WOS is also divided into two phases, the first phase (2000-2012) is the multi-model exploration period, mainly trying to multivariate model inversion of runoff, and the second phase is the (2013-2023) fusion development period, mainly focusing on out the research on the fusion of mathematical and physical models and multi-methods, and from the point of view of the first appearance of the research content, the English literature tends to be earlier than the Chinese literature. Future research should focus on the fusion of multi-source data, model improvement and optimization, adaptation of basin characteristics inversion methods, and investigation of impact mechanisms.

Keywords runoff inversion; runoff; CiteSpace; satellite remote sensing; knowledge graph; digital twin watershed

我国在国家战略层面上提出建设数字孪生流域以推动水利高质量发展^[1-3],构建数字孪生流域需要对水循环要素(径流量)进行精准化映射^[4-5]。但受环境、成本和人员的制约,单纯依靠地面监测站已无法满足径流量数据的获取,因此如何精确反演径流量是当下建设数字孪生流域的重点与难点。

近年来,卫星遥感数据的空间、时间分辨率不断提高,成为地面监测的重要补充^[6-7]。利用遥感技术获取河流水文、水力要素(如河宽、水位、水面面积、流速等)^[8]并反演径流量,已成为当前研究的前沿方向。目前,虽有学者就径流量反演的方法做出了定性研究^[9-10],但仍然缺少基于知识图谱等可视化计量工具进行的定量研究。

某一研究领域的发展态势和现状可以通过文献计量法进行分析^[11]。文献计量法是通过数学和统计学方法对文献进行量化分析,以揭示研究趋势、合作关系、影响力和研究热点,常通过 CiteSpace 软件进行分析,该软件能够以知识图谱的形式展现某一科学领域中的研究现状和前沿方向^[12-14]。此软件已广泛应用于诸多研究领域,如张馨等^[15]通过 CiteSpace

对蓼芙木属植物在中医药领域的研究现状及前沿方向开展了可视化分析;郭亚丽等^[16]运用 CiteSpace 对温室气体与空气污染物协同减排领域的发展趋势与现状进行了可视化研究;焦红波等^[17]通过 CiteSpace 对水库移民后期扶持的研究脉络与现状进行了可视化分析。因此,基于文献计量学方法对径流量反演领域进行可视化分析具有重要意义^[18]。

基于此,本研究拟采用文献计量工具 CiteSpace 软件,对中国知网(CNKI)与 Web of Science(WOS)数据库中 2000—2023 年径流量反演相关文献的发文量、发文机构、发文国家、共被引作者、共被引期刊和关键词 6 个方面进行量化分析,旨在揭示该领域研究趋势及研究现状,为进一步的理论和实践研究提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究中的“径流量遥感反演”采用广义定义,泛指基于遥感技术与物理约束和统计推断进行估算流量的过程。中、英文文献分别基于 CNKI 和

WOS数据库进行检索,检索时间范围均设置为2000—2023年,收集相关文献。在CNKI数据库中,以“遥感径流”“径流量反演”为单独词,“遥感数据”和“径流量”为组合词进行关键词检索,共得到886篇相关文章,使用EndNote软件剔除重复、相关度较低的文章后,最终得到343篇文献。在WOS数据库中,以“discharge retrieval”为单独词,“remote sensing”和“river discharge”为组合词进行关键词检索,共得到1782篇文章,同样使用EndNote软件进行筛选、去重,最终得到1383篇文献。

1.2 研究方法

基于筛选去重后两大数据库的文献数据,在CiteSpace 6.3.1软件中设置时间切片为1年,分别对发文量、发文机构、发文国家、作者被引、期刊被引和关键词6个方面进行可视化分析。其中,对发文量进行时间趋势分析并结合Mann-Kendall(MK)突变检验法计算具体突变年;对发文机构和发文国家基于普莱斯定律分析核心发文机构与国家;对共被引作者和共被引期刊进行中心性分析;对关键词运用Log-likelihood ratio(LLR)算法进行聚类与共现分析。其中,普莱斯定律相关计算公式如下^[19-21]:

核心作者和核心机构的最低发文量(n)计算公式为:

$$n=0.749 \times \sqrt{\max} \quad (1)$$

式中: $\max$ 为最高产作者或机构的发文量。检验核心作者和核心机构是否形成核心群,计算公式为:

$$M=(N_{\max}/N) \times 100\% \quad (2)$$

式中: M 为普莱斯指数结果占比, $M \geq 50\%$ 即表示已形成核心群^[22]; $N_{\max}$ 为高于普莱斯定律数值频数; N 为总词频数。

2 研究现状分析

2.1 发文量趋势

发文量是体现研究领域关注度的重要指标,一定程度上能够反映该领域的发展动态^[23]。CNKI和WOS数据库的发文量结果见图1。由图1(a_1)和(b_1)可知,CNKI数据库中径流量遥感领域文献数量近年呈增加趋势,但整体较WOS数据库波动更大、增速更低。利用MK突变检验法得到UF和UB曲线相交于2015年,此时纵坐标统计量位于99%置信区间外,说明2015年为突变年。按照文献发表量可分为2个时期:1)2000—2015年为低速稳定

期,年发文量从2篇增至13篇,线性拟合斜率为0.97;2)2016—2023年为高速增长期,年发文量从23篇增至43篇,线性拟合斜率为3.37。2016年以来,CNKI数据库发文量出现激增,这与国产高分系列卫星(如高分一号、高分二号等)发射并投入使用以及《全国水文监测规划(2016—2020年)》的发布有关。高分卫星具有高空间分辨率、高时间分辨率和多光谱等特性,能够更精准地获取地表信息,为径流量监测提供了更丰富的数据支持;《全国水文监测规划(2016—2020年)》明确了“十三五”期间要通过技术手段创新提升监测能力,其中重要一项为利用遥感技术进行水文监测,进一步激发了国内学者对相关领域的探索热情,在政策因素与数据因素的共同影响下,使得2015年成为CNKI数据库遥感监测径流量领域发文量的突变年。以拟合线性趋势预测,未来国内径流量遥感反演研究文献数量将会持续升高。

由图1(a_2)和(b_2)可知,WOS数据库文献量较CNKI数据库呈现更加明显增加趋势。利用MK突变检验法得到UF和UB曲线相交于2012年,此时纵坐标统计量位于99%置信区间外,说明2012年为突变年。按照文献发文量可分为2个时期:1)2000—2012年为低速稳定期,年发文量从7篇增至48篇,线性拟合斜率为3.36;2)2013—2023年为高速增长期,年发文量从62篇增至171篇,线性拟合斜率为11.66。2013年以来,文献激增与2013年国际水文计划(IHP)政府间理事会第二十一届会议召开有关,21世纪以来随着遥感技术的发展,水文领域也逐渐对遥感技术重视起来,此次会议明确了国际水文计划第八阶段(2014—2021年)的战略计划,其中一项设定为遥感技术在水文信息收集、水安全和水灾害等领域的应用,自此国际英文相关领域的发文量逐年迅速升高。以拟合线性趋势预测,未来国际径流量遥感反演研究文献数量将会保持高增长速率。

2.2 发文机构及国家

研究机构与国家的发文情况在一定程度上反映了研究团体分布,有助于学者了解径流量遥感领域合作关系。由于CNKI数据库相关文献量较少,合作关系不明显,无法进行可视化分析,因此,仅针对WOS数据库进行分析。2000—2023年WOS数据库径流遥感领域发文机构与发文国家知识图谱见图2,发文量排名前10的机构与国家见表1。

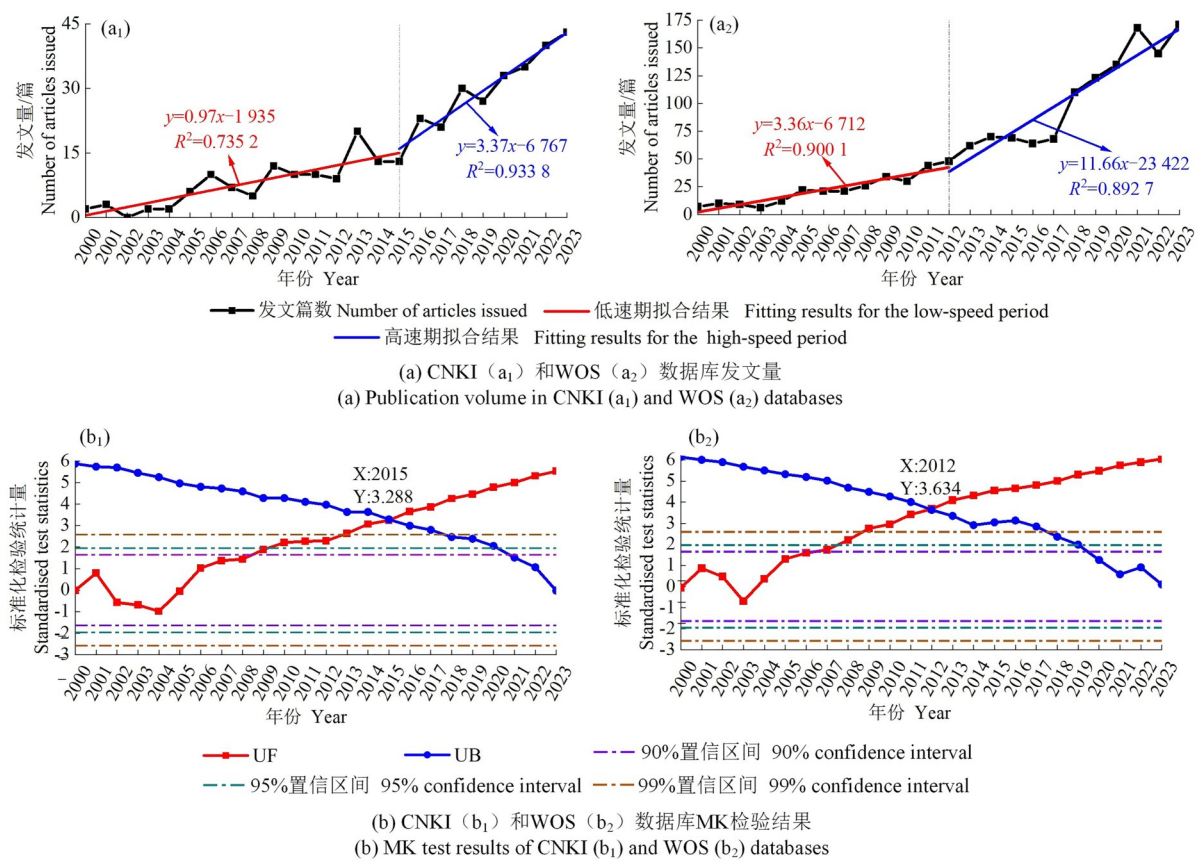
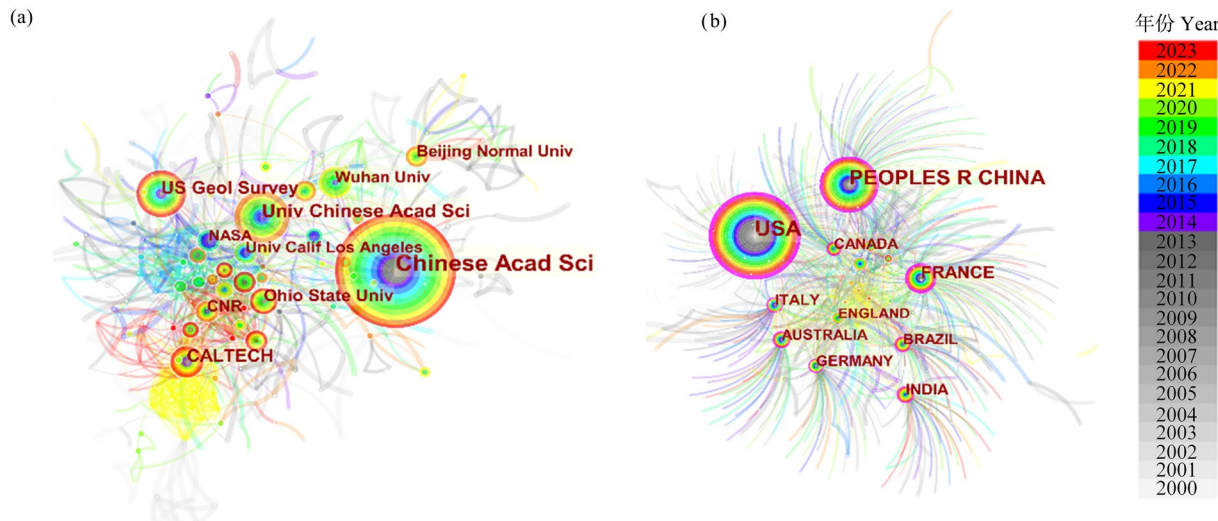


图1 文献发文章(a)和MK检验结果(b)
Fig. 1 Number of publications (a) and MK test results (b)



节点间共现关系用连线表示,连线越粗表示关系强度越强。节点颜色从中心到四周表示年份由远及近,连线颜色代表合作时间。节点中心性越高,表示影响力越大,中心性 >0.1 为重要节点,高中介中心性节点显示为紫色外环,环的粗细表示中介中心性值大小。下同。

Co-occurrence relationships between nodes are represented by connecting lines, with thicker lines indicating stronger ties. Node colours progress from the centre outwards to denote chronological order from oldest to most recent, while line color represent the cooperation period. Higher node centrality indicates greater influence, nodes with centrality >0.1 are deemed significant, nodes exhibiting high intermediary centrality are highlighted with a purple outer ring, where the ring's thickness reflects the magnitude of the intermediary centrality value. The same below.

图2 WOS数据库发文章(a)和发文章国家(b)的发文章知识图谱

Fig. 2 Knowledge map of publication volume by publishing institutions (a) and publishing countries (b) in the WOS database

表 1 WOS 数据库发文量排名前 10 的机构与国家
Table 1 Top 10 institutions and countries by publication volume in the WOS database

排名 Ranking	发文机构 Organization name	中心性 Centrality	发文数 量/篇 Number of papers	排名 Ranking	发文国家 Country	中心性 Centrality	发文数 量/篇 Number of papers
1	Chinese Academy of Sciences	0.21	121	1	USA	0.48	421
2	University of Chinese Academy of Sciences	0.01	46	2	China	0.37	311
3	California Institute of Technology	0.05	37	3	France	0.31	112
4	United States Geological Survey	0.08	35	4	India	0.14	63
5	The Ohio State University	0.05	30	5	Italy	0.15	61
6	Wuhan University	0.01	27	6	Brazil	0.14	56
7	Italian National Research Council	0.01	24	7	Canada	0.14	54
8	Beijing Normal University	0.08	23	8	Australia	0.15	53
9	University of California, Los Angeles	0.08	23	9	Germany	0.18	53
10	National Aeronautics and Space Administration	0.08	20	10	England	0.10	49

WOS 数据库共得到 593 个机构,1 185 次合作关系,网络密度为 0.006 8,根据普莱斯定律,核心机构共有 38 个($n=8$),共发表文献 712 篇,占文献总数的 51.48%(>50%),表明 WOS 数据库已形成核心机构群。发文量排名前 3 的机构依次为 Chinese Academy of Sciences(中国科学院,121 篇)、University of Chinese Academy of Sciences(中国科学院大学,46 篇)、California Institute of Technology(加利福尼亚理工学院,35 篇)。其中,中国科学院节点颜色从白色至红色均有分布,说明其在 2000—2023 年每年持续发文。由表 1 可知,中国科学院发文数量远超其他机构,仅其中心性>0.1,表明其在研究领域内具有重要中心性地位,与其他机构联系紧密。总体来看,其他机构的发文数量相近,发文时间均衡,但中心性均未超过 0.1,不足以构成中心重要节点。

发文量前 3 位的国家依次为 USA(美国,421 篇)、China(中国,311 篇)和 France(法国,112 篇)。前 2 位国家的发文量总和(732 篇)远超其他 8 位国家的总和(501 篇),占前 10 位国家发文总量(1 233 篇)的 59.37%,说明美国和中国的径流量反演研究发文量居于世界前列,为核心发文国家。根据中心性可知,前 10 位国家的中心性均>0.1,与其他国家联系最紧密的为美国(0.48),其次是中国(0.37),法国(0.31)位居第 3。由图 2 可知,前 10 位国家每个节点从内至外的颜色由白色渐

变为红色,说明在每个时间段均有研究成果发表,较明显的是,以 2014 年的紫色圆环为分界,美国紫色圆环半径与其总圆环半径的比值要高于中国和法国,且中国和法国在 2000—2023 年的发文总量与美国接近,说明在 2014 年以前国际上发文主要以美国为主,2014 年以来,中国和法国发文量占据更重要地位。

2.3 共被引作者及共被引期刊

通过分析 2000—2023 年径流量反演领域作者共被引和期刊共被引,可以识别研究领域高影响力作者和期刊,但由于 CNKI 数据库导出数据不包含参考文献等相关信息,因此,仅针对 WOS 数据库进行分析。

WOS 数据库共 951 个共被引作者,5 082 次合作关系,共被引量排名前 10 位的作者见表 2。中心性值显示,前 10 位作者中心性最高为 0.08<0.1,无重要中心节点。Bjerklie D M 和 Smith L C 共被引次数较高,2 位作者曾合作发表多篇高质量论文^[24-26]。

WOS 数据库共 794 个共被引期刊,6 540 次合作关系。*Remote Sensing of Environment* 共被引次数最多(856 次),比第 10 位多 470 次,表明该期刊在径流量遥感领域发表的文章与其他期刊相比更具影响力。中心性结果显示,前 10 位期刊中心性均<0.1,其中 *Science* 中心性最高为 0.06,具有较重要影响力。

表2 WOS数据库排名前10位的共被引作者和共被引期刊
Table 2 Top 10 co-cited authors and co-cited journals in the WOS database

排名 Ranking	共被引作者 Co-cited authors	共被引 次数 Number of co- cited	中心性 Centrality	排名 Ranking	期刊名称 Journal name	共被引 次数 Number of co- cited	中心性 Centrality
1	Bjerklie D M	165	0.05	1	<i>Remote Sensing of Environment</i>	856	0.02
2	Smith L C	163	0.05	2	<i>Journal of Hydrology</i>	763	0.05
3	Durand M	123	0.02	3	<i>Water Resource Research</i>	694	0.02
4	Alsdorf D E	118	0.08	4	<i>Hydrological Processes</i>	616	0.04
5	Gleason C J	117	0.03	5	<i>Geophysical Research Letters</i>	595	0.03
6	Pavelsky T M	117	0.08	6	<i>International Journal of Remote Sensing</i>	552	0.01
7	Biancamaria S	115	0.01	7	<i>Remote Sensing</i>	467	0.02
8	Nash J E	110	0.08	8	<i>Hydrology and Earth System Sciences</i>	459	0.01
9	Tarpanelli A	84	0.01	9	<i>Science</i>	398	0.06
10	Brakenridge G R	83	0.02	10	<i>Journal of Geophysical Research-Oceans</i>	386	0.03

3 研究前沿与热点

3.1 研究热点

分别对CNKI和WOS数据库文献进行关键词共现分析得到的重点关键词见表3,合并中、英文文献,通过关键词共现分析得到以下6个主要研究方向:

1)利用多源遥感、深度学习等方法获取更高精度的水文、水力要素数据。径流量反演需要长时间序列的水文、水力要素数据。结合多源遥感技术,可以获取更全面的地表信息,利用深度学习(如卷积神经网络、生成对抗网络等)对遥感数据进行处理和分析,也可以提高水力要素的提取精度^[27]。

2)数据源与水文模型对不同流域的适配性研究。流域特性因地制宜,而当下数据源与水文模型种类繁多,不同流域所适用的数据源与水文模型均有差异,因此当下有大量针对数据源和水文模型对流域适配性的研究^[28]。

3)以曼宁公式及其经验公式为理论基础,遥感数据为驱动的水动力学模型研究。曼宁公式广泛应用于水动力学模拟径流过程。利用遥感技术获取的数据(如水位、流速、河宽等)代入曼宁公式可以得到瞬时流量的相对真值。此外,还有学者结合实际观测数据,对曼宁公式和其他经验公式进行改进,提高结果精度^[26]。

4)通过水力几何法建立重要水文、水力要素与

径流量关系模型。水文、水力要素与径流量之间存在直接或间接的定量关系,水力几何法通过建立相关数学模型,可以用于径流量的反演和预测^[29]。

5)以基于深度学习为代表的数理模型反演径流量。深度学习模型(如LSTM、CNN、Transformer等)可以捕捉复杂的非线性关系,部分研究者通过调整模型结构、优化超参数、引入新的训练算法等方法,不断提高深度学习模型的性能,对径流量实现高精度反演^[30]。

6)基于大环境变化下,研究径流量的变化趋势。气候变化和人类活动均对径流量产生显著影响,气候变化包括温度、降水和蒸发等气象要素,人类活动如农业灌溉和水利工程建设。当前也有不少学者利用长时间序列分析和统计等方法,分析径流量的长期变化趋势与原因^[31]。

方向1是方向2~5的基础,获取高精度水力要素数据是对径流量进行反演的前提;方向2~5是当前活跃在径流量遥感反演领域内的主流方法;方向6是方向2~5进行径流量反演后的延伸。对6个主要研究方向统计其发文量,分析其发展趋势,结果见图3。6个方向发文量总体趋势均不断增加,且方向1~5均在2017年迅速增长,其中方向5增长最为明显,其在2017年之前发文量小于其他方向,但2017年后其发文量迅速增加,2019年发文量开始超过其他方向且持续高速增加,而方向1~4自2018年

表 3 主要关键词共现结果与研究内容汇总
Table 3 Summary of keywords co-occurrence results and research content

数据库 Database	方向 Direction	主要关键词 Main keyword	研究内容 Field of research
CNKI	1	遥感数据、洪涝灾害、径流模拟、gis、水环境	基于遥感数据结合gis等实现径流模拟
	2	降水数据融合、深度学习、多源遥感、不确定性分析	利用深度学习对遥感数据进行融合以提高数据精度
	3	地理信息系统、信息提取、面向对象法、深度学习、分类回归树、阈值分割	研究在遥感影像中如何提取出高精度的水体范围
	4	分布式水文模型、降雨径流、mike-she、多源遥感、径流量、栅格新安江模型、swat模型	基于遥感数据驱动水文模型进行径流量反演
	5	关系拟合法、河道流量、河道断面、河流宽度、水深、多源遥感	通过关系拟合研究河流水力要素与径流量的关系
	6	气候变化、人类活动、多源遥感、径流量、城市化进程	研究气候、人类活动等大环境变化对径流量的影响
	7	遥感、深度学习、径流量变化、长时间序列、水文模型	利用长时间序列遥感数据驱动深度学习模型,实现径流量预测
WOS	1	optical properties(光学特性)、satellite remote sensing(卫星遥感)、discharge(流量)、radar altimetry(雷达高度计)、hydrological model(水文模型)	利用遥感水位、光学特征等水力要素,结合水文模型反演径流量
	2	snake river(蛇形河流)、high-mountain regions(高山区域)、satellite imagery(遥感影像)、satellite altimetry(卫星测高)	基于遥感监测不同地形与形态下径流量变化
	3	Manning's formula(曼宁公式)、river discharge(河流流量)、satellite imagery(遥感影像)、water level(水位)	基于遥感数据,以曼宁公式为基础,反演河道径流量
	4	google earth engine(谷歌地球引擎)、deep learning(深度学习)、random forest regression(随机森林回归)、discharge(径流量)	利用深度学习、随机森林和Gee平台结合高精度遥感数据反演径流量
	5	climate change(气候变化)、precipitation(降雨量)、evapotranspiration(蒸发)、runoff(径流)、snowmelt(融雪)	基于遥感数据对降雨量、蒸发、融雪与径流量的关系进行量化研究

后发文量又趋于平稳。方向 1~4 于 2017 年发文量快速增加是因为该年前后遥感领域多个高质量卫星升空,如高分 3 号、吉林一号、ALOS-2 和 sentinel-2B 相继升空,这为水力要素的高精度获取提供了更丰富、长时序的数据源。方向 5 于 2017 年后发文量持续高速增加涉及多个方面,如 2016—2018 年,GANs 及其变种如条件 GAN、InfoGAN、DCGAN 等相继出现,解决了深度学习发展的一些难题,推动了无监督学习的发展;2015—2016 年,Google 和 Facebook 等相继推出 TensorFlow、PyTorch 和 Keras 等开源框架,降低了深度学习技术的使用门槛。虽然深度学习模型作为没有物理机制的“黑箱

子”模型一直遭受质疑,但其热度不减的原因是该方法通过大量数据训练能够得到比传统考虑物理机制的水文模型更为准确的径流量反演结果。

3.2 关键词时间发展

对 CNKI 与 WOS 数据库进行关键词时间线分析和突现分析,结果分别见表 4 和图 4。CNKI 数据库分析得到 Modularity $Q=0.746\ 1>0.3$ 、Silhouette $S=0.928\ 5>0.8$,聚类结构明显、效果显著。由图 4(a)可知,中文文献关键词最终得到 10 个大类,且不同关键词间存在着不同的时间演替,如“灾害综合风险评价”“洪涝灾害”最早出现在 2000 年,2008 年被迭代演替,而“分类回归树”“gee”

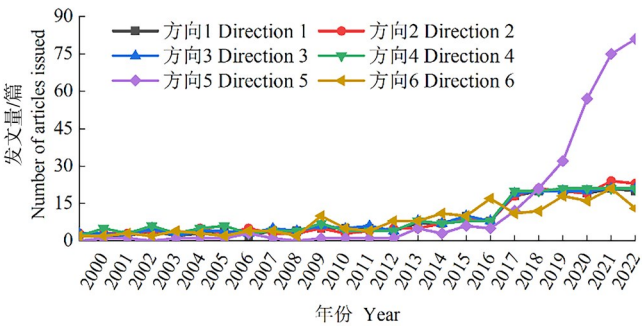


图3 主要研究方向年发文章量统计

Fig. 3 Annual publication statistics of main research directions

表4 突现强度前10名的关键词

Table 4 Top 10 keywords by sudden intensity

排名	中文关键词	突现强度	突现开始年份	突现结束年份	排名	英文关键词	突现强度	突现开始年份	突现结束年份
Ranking	Chinese keyword	Burst strength	Beginning year	Ending year	Ranking	English keyword	Burst strength	Beginning year	Ending year
1	灾害综合风险评价	3.96	2000	2008	1	Synthetic aperture radar	5.13	2007	2013
2	河流断面	3.71	2000	2008	2	Radar	4.21	2008	2013
3	洪涝灾害	3.45	2000	2008	3	Validation	8.45	2010	2015
4	遥感	4.33	2005	2007	4	Stream	4.29	2015	2020
5	径流	3.19	2012	2016	5	Optical property	5.10	2016	2019
6	遥感技术	7.51	2015	2019	6	Surface water	5.03	2019	2023
7	水文水资源	3.24	2015	2019	7	Rainfall	4.69	2019	2021
8	气候变化	4.47	2017	2023	8	Satellite altimetry	4.46	2019	2021
9	遥感数据	2.88	2017	2020	9	Water index ndwi	4.50	2020	2023
10	径流模拟	5.81	2018	2023	10	Machine learning	5.55	2021	2023

“偏差矫正”“机器学习”等关键词在2015年之后频繁出现。由表4可知,关键词突现强度除较高的“遥感技术”(7.51)、“径流模拟”(5.81)外,其余突现强度均在2.5~4.5。结合图4与表4可将CNKI数据库的研究热点分为2个阶段:第一阶段为传统水文模型研究期。截至2015年,国内研究主要集中于基于遥感数据获取水力要素,驱动或率定“SWAT模型”“SCS模型”和“降雨径流模型”等一系列水文模型,对不同流域径流量进行反演^[32-33]。第二阶段为技术融合快速发展期。2015年后,国内文章逐渐引进新的研究方法思路,如“gee”“机器学习”“偏差矫正”等,这促使2015年后中文径流遥感领域文献数量呈爆发式增长,尤其在深度学习方向的文章更为

突出^[34-35]。
WOS数据库分析得到Modularity $Q=0.378\ 3>0.3$ 、Silhouette $S=0.734\ 2>0.7$,聚类结构明显、效果显著。由图4(b)可知,英文文献关键词最终得到7组聚类结果,与CNKI数据库文献聚类效果相比,WOS数据库文献聚类结果之间联系更为紧密,研究方向更全面,重要关键词出现时间更早。如20世纪初,英文文献中除了包含“model”“hydrological model”等表示水文模型的关键词外,还包括“synthetic aperture radar”“sensitivity analysis”“atmosphere correction”等代表不同数据源获取与分析方法的关键词。“atmosphere correction”在WOS数据库中2000年就已出现,而在CNKI数据

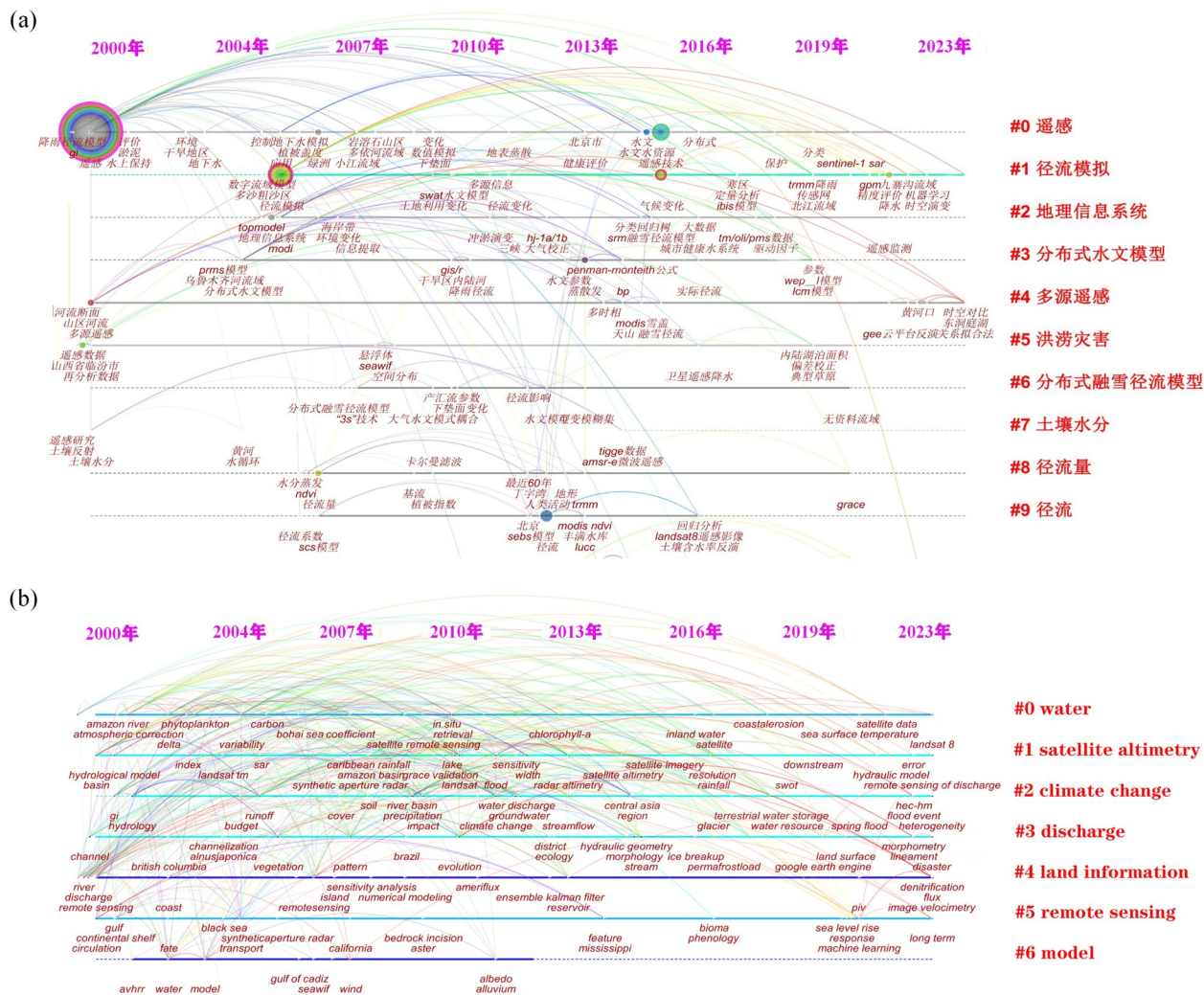


图4 CNKI (a)和WOS数据库(b)关键词聚类时间线分析

Fig. 4 Timeline analysis of keywords clustering in CNKI repository (a) and WOS repository (b)

库中“大气校正”直到2012年才出现;“google earth engine”在WOS数据库中2019年出现,但在CNKI数据库中“gee云平台”在2022年才出现。由表4可知,排名前10位关键词突现强度集中在4~5。结合图4与表4可将WOS数据库研究热点分为2个阶段:第一阶段为多模型探索期。2000—2012年,遥感技术监测径流量处于探索阶段,主要依靠MODIS、Landsat等传感器获取数据,数据分辨率有限,研究人员尝试将遥感数据与水文模型、水动力模型和水力几何模型结合,估算流域参数来间接推算径流量,为后续发展奠定基础。第二阶段为融合发展期。2013—2023年,Sentinel和SWOT等高分辨率卫星投入使用,同时机器学习、深度学习的引入加速了领域发展,相关研究开始多方法融合,推

动了径流量监测从单纯的数值计算向多元综合分析转变。

4 结论与展望

4.1 结论

本研究利用 CiteSpace 和 Endnote 软件对 CNKI 与 WOS 两大数据库中遥感反演径流量相关研究方向的共 1 726 篇文献进行数据处理与分析。主要得到如下结论:

1)2000—2023年,国内外径流量遥感反演相关文献在数量上呈现先低速增长再高速增长的趋势,其中英文发文量的突变点在2012年,中文发文量的突变点在2015年。

2)美国、中国和法国在该领域发文量稳居前

列,中国科学院和加利福尼亚理工学院为高发文量机构,Bjerklie D M和Smith L C为高共被引作者,*Remote Sensing of Environment*和*Journal of Hydrology*为高共被引期刊。

3)关键词聚类可归纳为6个方向,方向1为方向2~5的基础,方向2~5为反演径流量具体方法,方向6是方向2~5的延伸。21世纪以来,6个方向发文量均不断提升,其中方向5(基于深度学习为代表的数理模型反演径流量)发文量于2017年开始迅速增加并于2019年远超其他方向,成为当下遥感反演径流量领域最热门的方向。

4)CNKI数据库研究热点可分为2个阶段:2000—2015年为传统水文模型探索期,研究主要围绕传统水文模型展开;2016—2023年为技术融合加速发展期,新技术的加入推动了该领域研究的快速发展。WOS数据库研究热点同样可分为2个阶段:2000—2012年为多模型探索阶段;2013—2023年为融合创新阶段,重点研究多学科方法相互交融。此外,英文文献在研究内容第一次出现的时间上普遍早于中文文献,并且在研究范围和深度上表现出更广泛的覆盖性与全面性。

4.2 展望

尽管遥感监测径流量研究领域已取得显著进展,但在一些方面仍存在诸多问题,如复杂地形处径流量反演困难、遥感数据密度无法支持长时间序列径流量反演、深度学习等方法存在模型可解释性问题、水文模型参数率定准确性问题等。针对目前面临的问题,对未来研究重点提出如下展望:

1)多源数据融合,拓展数据时空尺度。整合不同来源、类型与分辨率的数据资源,从时间尺度延长观测序列,从空间尺度拓宽覆盖范围,打破单一数据局限,提升动态变化捕捉精度。

2)改进优化模型,多模型耦合集成。深入模型机理,增强模型对复杂水文过程的模拟能力;考虑模型特点,耦合模型实现优势互补,如将深度学习与传统水文模型耦合,既保留了机理模型的物理可解释性,又发挥了数据驱动模型的性能优势。

3)依流域特性分类整理径流反演方法。依据流域的具体特性,对现有的径流量反演方法进行全、系统地分类与整理,以实现方法与流域特性的精准匹配,筛选适合特定流域的径流反演方法,推动流域水文模拟、水资源管理与规划等相关工作。

4)气候变化与人类活动影响研究。在全球气候变化和人类活动影响日益显著的背景下,研究其对径流量的影响机制和趋势变化。利用遥感技术长期监测径流量的变化,并结合气候模型和人类活动数据,进行综合分析和预测。

参考文献 References

- [1] 蒋云钟, 冶运涛, 赵红莉, 张双虎, 曹引, 顾晶晶. 智慧水利解析[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1355-1368
Jiang Y Z, Ye Y T, Zhao H L, Zhang S H, Cao Y, Gu J J. Analysis of smart water conservancy[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(11): 1355-1368 (in Chinese)
- [2] 水利部信息中心. 数字孪生赋能新阶段水利高质量发展[EB/OL]. [2025-06-18]. http://xxzx.mwr.gov.cn/zxpd/gzdt/202302/t20230203_1630305.html
The Information Center of the Ministry of Water Resources. Digital Twin empowers High-Quality Development of water conservancy in the new stage [EB/OL]. [2025-06-18]. http://xxzx.mwr.gov.cn/zxpd/gzdt/202302/t20230203_1630305.html (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央 国务院印发《国家水网建设规划纲要》[EB/OL]. [2025-06-18]. https://www.gov.cn/zhengce/202305/content_6876214.htm
Central People's Government of the People's Republic of China. The State Council of the Central Committee of the Communist Party of China issued the "Outline for the construction of the national water network"[EB/OL]. [2025-06-18]. https://www.gov.cn/zhengce/202305/content_6876214.htm (in Chinese)
- [4] 蒋云钟, 冶运涛, 王浩. 智慧流域及其应用前景[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1174-1181
Jiang Y Z, Ye Y T, Wang H. Smart basin and its prospects for application [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2011, 31(6): 1174-1181 (in Chinese)
- [5] 冶运涛, 蒋云钟, 曹引, 黄建雄, 关昊哲, 顾晶晶, 董甲平. 以数字孪生水利为核心的智慧水利标准体系研究[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2023, 44(4): 1-16
Ye Y T, Jiang Y Z, Cao Y, Huang J X, Guan H Z, Gu J J, Dong J P. Research on standard system of smart water conservancy with digital twin water conservancy as the core[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2023, 44(4): 1-16 (in Chinese)
- [6] 杨胜天, 鱼京善, 姜和震, 孙文超, 赵长森, 王雪蕾, 宋文龙, 蔡明勇, 代韵萌. 遥感水文模型研究综述[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1691-1702
Yang S T, Yu J S, Lou H Z, Sun W C, Zhao C S, Wang X L, Song W L, Cai M Y, Dai Y M. Review of the remote sensing hydrological model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1691-1702 (in Chinese)
- [7] 赵菲, 江威, 丁小辉, 崔师爱, 孙继鑫. 卫星遥导技术在数字孪生流域建设应用潜力与初探[J]. 水利水电技术: 中英文, 2023, 54(S2): 369-377
Zhao F, Jiang W, Ding X H, Cui S A, Sun J X. Application potential and initial exploration of communication, navigation and remote sensing satellite technology in digital twin watershed construction[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(S2): 369-377 (in Chinese)
- [8] Gleason C J, Durand M T. Remote sensing of river discharge: A review and a framing for the discipline[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1107

- [9] 杨雪, 袁丹, 罗军刚, 张晓, 魏娜, 解建仓. 无资料流域径流模拟预测研究进展综述[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(3): 354-360
Yang X, Yuan D, Luo J G, Zhang X, Wei N, Xie J C. A review of runoff prediction in ungauged basins [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2021, 37(3): 354-360 (in Chinese)
- [10] 李和谋, 白娟, 甘甫平, 李贤庆, 王泽坤. 遥感估算河道流量研究进展[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 16-24
Li H M, Bai J, Gan F P, Li X Q, Wang Z K. River discharge estimation based on remote sensing[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2023, 35(2): 16-24 (in Chinese)
- [11] 郭洪飞, 冯亚磊, 丁娜, 屈挺, 朝宝. 基于CiteSpace的数字孪生技术研究进展与趋势分析[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(12): 3195-3204
Guo H F, Feng Y L, Ding N, Qu T, Chao B. Progress and trend analysis of digital twin based on CiteSpace[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(12): 3195-3204 (in Chinese)
- [12] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253
Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, Hu Z G, Wang X W. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253 (in Chinese)
- [13] Chen C M. Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(S1): 5303-5310
- [14] 毛文山, 赵红莉, 蒋云钟, 段浩, 郝震. 基于文献计量学的国内水生态环境研究知识图谱构建与应用[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1400-1416
Mao W S, Zhao H L, Jiang Y Z, Duan H, Hao Z. Construction and application of knowledge graph of domestic water eco-environment based on bibliometrics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(11): 1400-1416 (in Chinese)
- [15] 张馨, 李林锶, 秦新生. 基于CiteSpace的萝芙木属植物研究知识图谱可视化分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2023, 59(6): 1011-1024
Zhang X, Li L S, Qin X S. Visualized analysis of knowledge map for research on the plants of *Rauvolfia* based on CiteSpace [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2023, 59(6): 1011-1024 (in Chinese)
- [16] 郭亚丽, 贾俊松, 何珊. 温室气体与空气污染物协同减排健康效应研究热点及趋势分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 4101-4116
Guo Y L, Jia J S, He S. Research hotspots and trends of the health effects of synergistic emission reduction of greenhouse gases and air pollutants[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(7): 4101-4116 (in Chinese)
- [17] 焦红波, 程立名, 李孝林, 李慧敏. 水库移民后期扶持研究的演进脉络及展望[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2022, 43(6): 41-50
Jiao H B, Cheng L M, Li X L, Li H M. Evolution and prospect of research on reservoir resettlement support in the later stage[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2022, 43(6): 41-50 (in Chinese)
- [18] 管文玉, 凌卫青. 基于文献计量的数字孪生研究可视化知识图谱分析[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 18-27
Guan W Y, Ling W Q. Analysis of visual knowledge mapping of digital twin research based on bibliometrics [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(1): 18-27 (in Chinese)
- [19] 孙睿馨, 杨茜, 曾凌, 曹先伟. 近10年皮肤光老化相关问题研究趋势热点: 基于Citespace的可视化分析[J]. 中国皮肤性病学杂志, 2023, 37(3): 249-255
Sun R X, Yang X, Zeng L, Cao X W. Research trends and research hotspots of skin photoaging related problems in recent 10 years: Visual analysis based on Citespace[J]. *The Chinese Journal of Dermatovenereology*, 2023, 37(3): 249-255 (in Chinese)
- [20] Brandes U. A faster algorithm for betweenness centrality[J]. *The Journal of Mathematical Sociology*, 2001, 25(2): 163-177
- [21] 李嘉明, 赵阔, 屈挺, 刘晓翔. 基于知识图谱的区块链物联网领域研究分析[J]. 计算机科学, 2021, 48(S1): 563-567
Li J M, Zhao K, Qu T, Liu X X. Research and analysis of blockchain Internet of Things based on knowledge graph[J]. *Computer Science*, 2021, 48(S1): 563-567 (in Chinese)
- [22] 高风, 郭丽君, 张宏伟, 王亦非, 任高灿, 马晓昌. 基于VOSviewer和CiteSpace中医药领域细胞焦亡的知识图谱分析[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(4): 1098-1107
Gao F, Guo L J, Zhang H W, Wang Y F, Ren G C, Ma X C. Knowledge graph analysis of pyroptosis research in traditional Chinese medicine based on VOSviewer and CiteSpace[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2023, 48(4): 1098-1107 (in Chinese)
- [23] 闫凯, 陈慧敏, 付东杰, 曾也鲁, 董金玮, 李世卫, 吴秋生, 李翰良, 杜殊渊. 遥感云计算平台相关文献计量可视化分析[J]. 遥感学报, 2022, 26(2): 310-323
Yan K, Chen H M, Fu D J, Zeng Y L, Dong J W, Li S W, Wu Q S, Li H L, Du S Y. Bibliometric visualization analysis related to remote sensing cloud computing platforms[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2): 310-323 (in Chinese)
- [24] Bjerkle D M, Moller D, Smith L C, Dingman S L. Estimating discharge in rivers using remotely sensed hydraulic information [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 309(1/4): 191-209
- [25] Biancamaria S, Lettenmaier D P, Pavelsky T M. The SWOT mission and its capabilities for land hydrology[J]. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(2): 307-337
- [26] Bjerkle D M, Lawrence Dingman S, Vorosmarty C J, Bolster C H, Congalton R G. Evaluating the potential for measuring river discharge from space[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 278(1/4): 17-38
- [27] 尹家波, 郭生练, 王俊, 朱青, 曾青松, 刘汉武. 基于贝叶斯模式平均方法融合多源数据的水文模拟研究[J]. 水利学报, 2020, 51(11): 1335-1346
Yin J B, Guo S L, Wang J, Zhu Q, Zeng Q S, Liu H W. Blending multi-source data in hydrological simulations based on BMA method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(11): 1335-1346 (in Chinese)
- [28] Aloui S, Mazzoni A, Elomri A, Aouissi J, Boufekane A, Zghibi A. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 326: 116799
- [29] 白娟, 张亦弛, 甘甫平, 郭艺, 闫柏琨, 杨胜天, 李和谋, 邢乃琛, 马燕妮, 刘琪. 基于多站水力几何法的黄河源区河流流量估算研究[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(1): 15-22
Bai J, Zhang Y C, Gan F P, Guo Y, Yan B K, Yang S T, Li H M, Xing N C, Ma Y N, Liu Q. Estimation of river discharge in the source region of the Yellow River based on multi-station hydraulic geometry method [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2023, 39(1): 15-22 (in Chinese)
- [30] Nimai S, Ren Y F, Ao T Q, Zhou L, Liang H X, Cui Y M. Enhancing runoff simulation using BTOP-LSTM hybrid model in the shinano river basin[J]. *Water*, 2023, 15(21): 3758
- [31] 徐宗学, 周祖昊, 姜瑶, 桑燕芳, 季鹏, 侯居峙, 陈峰. 西南河河源区径流量变化规律及其未来演变趋势[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 360-374
Xu Z X, Zhou Z H, Jiang Y, Sang Y F, Ji P, Hou J Z, Chen F. Variation laws and future evolution trends of runoff in the headwaters region of Southwestern rivers[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 360-374 (in Chinese)
- [32] 吕爱锋, 贾绍凤. 遥感驱动的分布式实际径流模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 7-11

- Lyu A F, Jia S F. Simulation of actual runoff using remote sensing driven distributed hydrological model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(3): 7-11 (in Chinese)
- [33] 王福勇. 基于MODIS遥感影像的融雪径流模拟研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 26-29
- Wang F Y. MODIS remote sensing image-based study on simulation of snowmelt runoff[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, 46(4): 26-29 (in Chinese)
- [34] 覃晓东, 朱仟, 周东旸, 丁洁. 基于深度学习的多源降水数据融合方法及其应用[J]. 人民长江, 2023, 54(11): 68-75
- Qin X D, Zhu Q, Zhou D Y, Ding J. Merging multi-source precipitation data based on deep learning and its application[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(11): 68-75 (in Chinese)
- [35] 徐嘉远, 邹磊, 夏军, 陈鑫池, 李敏欣. TVGM-LSTM耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 104-110
- Xu J Y, Zou L, Xia J, Chen X C, Li M X. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 104-110 (in Chinese)

责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 关昊哲, 中国水利水电科学研究院水文学及水资源专业硕士研究生。2023年毕业于沈阳农业大学农业水土工程专业, 获得工学学士学位。参与黄河河龙区间河段高含沙水体光学机理及泥沙遥感模型研究、湖泊叶绿素a浓度多源卫星协同遥感监测像元尺度不确定性分析和校正方法研究、基于地形特征的金沙江上游典型缺资料河流径流过程重构模型方法研究等多个项目。发表水资源领域论文9篇, 其中第一作者发表论文2篇; 授权专利7项, 其中第一发明人发表授权专利1项。曾获辽宁省政府奖学金, 连续3年获校一等奖学金。



通讯作者简介: 冶运涛, 博士, 正高级工程师, 博士生导师。2010年1月获清华大学工学博士学位。主要从事智慧水利、数字孪生流域模型、水资源遥感和动态评价的研究。共发表学术论文110余篇, 出版专著9部; 授权国际发明专利1项、国家发明专利50余项、实用新型专利12项; 获计算机软件著作权20余项。参与编制水利行业标准1项、国家水资源监控能力建设标准1项、团体标准1项、水利行业技术指导文件4项。获全国生产力促进奖(服务精英)二等奖1项(2019年度), 中国科技产业化促进会科学技术奖科技创新奖一等奖2项(2020和2022年度), 电力科技创新奖一等奖1项(2022年度), 大禹水利科学技术奖二等奖2项(2016和2020年度)、三等奖1项(2017年度), 地理信息科技进步奖二等奖2项(2017和2023年度)、生产力促进(创新发展)奖二等奖2项(2021和2022年度)。