引文格式：方喻弘,宋丽,肖潇,等. 基于文献计量的中国水利遥感研究热点分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 15-22. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.08.004

基于文献计量的中国水利遥感研究热点分析

方喻弘[1]，宋　丽[1]，肖　潇[1*]，郑学东[1]
（1. 长江水利委员会长江科学院，湖北 武汉　430000）

摘　要：近 20 a 来，遥感监测技术在水利领域的广泛应用为获取大范围、高频率以及高分辨率的数据提供了有效手段，同时其多光谱和多源数据融合的能力也愈发凸显。探究遥感技术在水利领域的应用前景，通过对中国知网数据库内近 20 a 水利遥感文献的可视化数据知识图谱分析，揭示了其中的研究热点和主要趋势。研究结果显示，遥感关键技术、水旱地灾防治、城市化进程分析、生态环境保护、智慧水利工程建设和助力乡村振兴战略成为水利遥感研究的焦点。与此同时，研究趋势逐渐集中于运用无人机、深度学习等高新技术，进一步提升遥感影像解译和应用能力，从而为智慧水利建设提供有力支持。

关键词：水利遥感；智慧水利；知识图谱；CiteSpace
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）08-0015-08

Research Hotspots Analysis of Chinese Water Conservancy Remote Sensing Based on Bibliometric Method

FANG Yuhong[1], SONG Li[1], XIAO Xiao[1], ZHENG Xuedong[1]
(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430000, China)

Abstract: Over the past two decades, the widespread application of remote sensing technology in the field of water conservancy has provided an effective means to acquire data over large areas with high frequency and resolution, while the capability of multi-spectral and multi-source data fusion has become increasingly prominent. Aiming to explore the prospects of remote sensing technology in the water conservancy domain, through a visual analysis of a knowledge graph constructed from water conservancy remote sensing literature within the Chinese national knowledge infrastructure database over the past two decades, we identified the focal areas and major trends. The findings reveal that key remote sensing techniques, water-related disaster prevention and mitigation, urbanization process analysis, ecological environment conservation, the construction of intelligent water conservancy projects, and contributions to rural revitalization strategies have emerged as focal points in water conservancy remote sensing research. Furthermore, there is a discernible trend towards the utilization of advanced technologies, such as unmanned aerial vehicles and deep learning algorithms, to augment the interpretative and application capabilities of remote sensing imagery. This advancement is anticipated to provide robust support for the development of intelligent water conservancy initiatives.

Key words: remote sensing technology, smart water conservancy, knowledge graph, CiteSpace

遥感技术具有覆盖范围广、快速更新、经济高效和客观性等特点，在水利领域具有广泛应用前景[1]。近年来随着航天技术发展与高分重大专项的实施，遥感数据类型和数据处理方法更加多样化，“遥感技术如何更好服务于水利行业应用场景”成为国内学者关注的热点课题。

水利遥感是利用遥感技术对水利问题进行研究和应用的领域，它将遥感影像与水利工程相结合，旨在通过获取、分析和解释遥感数据，提供水资源管理和水灾害监测等方面的信息支持。经过 40 余年的科学研究和业务化应用，水利遥感在涉及防灾减灾的洪涝灾害、旱情和涉水地质灾害监测评估，涉及水资源管理与保护的降水量、土壤含水量与蒸散发量遥感估算、地表水体监测、地下水监测、灌溉面积调查、水环境监测，涉及生态保护的流域生态状况监测调查、跨流域调水效果评价、水土流失动态监测、河湖岸线监管等方面发挥了重大作用。

国内外遥感技术发展迅速，水利行业发展需求日新月异，然而，在水利遥感研究领域尚缺乏可视化的文献综述分析。本研究运用文献计量法整理中国知网数据库中近 20 a 发表的水利遥感研究文献，并利用 CiteSpace 进行计量分析和可视化数据图谱生成，提炼

收稿日期：2023-06-30。
项目来源：国家自然科学基金长江水科学研究联合基金资助项目（U2240224）；湖南省重大水利科技项目（XSKJ2022068-12）；国家重点研发计划课题资助项目（2023YFC3209502、2023YFC3209503）；长江科学院中央级公益性科研院所基本科研基金资助项目（CKSF2021485+KJ）。
第一作者简介：方喻弘（1991—），硕士，工程师，主要从事遥感信息技术、湖库碳循环理论工作，E-mail：676392879@qq.com。
通信作者：肖潇（1986—），博士，高级工程师，主要从事水环境遥感、水利碳循环理论工作，E-mail：423592566@qq.com。

研究热点并梳理研究趋势，以期为水利遥感研究的发展提供参考。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源及筛选

鉴于数据库资源的科学性和权威性，本文选用中国知网（CNKI）中文数据库作为中文文献代表性数据检索源。于CNKI中文数据库中，检索篇关摘中同时出现“水利”和“遥感”词汇的文献，限定发表时间范围为2004年1月1日至2023年12月31日。经筛选后共获取文献1 653篇，其中期刊论文952篇，学位论文618篇，会议论文83篇。以Refworks的格式导出检索结果的全记录（包含全部作者、标题、来源出版物、关键词），经CiteSpace软件格式转换功能处理为可用数据格式。

1.2 研究方法

本文主要利用CiteSpace6.2.R3Advanced作为文献计量的可视化工具，该软件由国际著名的信息可视化专家陈超美博士开发，集成了引文分析理论与信息可视化技术，专为数据的精确量化、聚类分析和科学可视化设计。它不仅提升了数据处理的效率，更通过引文网络构建的知识图谱，将学科演进的丰富历程直观呈现，使用户能够洞悉领域内的知识发展脉络[2-3]。本文以CiteSpace关键词共现功能模块为主要研究工具，辅以Excel和CNKI的可视化分析功能，得到水利遥感研究有关文献的计量分析结果。

本文使用关键词共词分析法提炼水利遥感领域主要研究热点。关键词（keywords）是每篇论文中最主要的核心凝练，关键词频次的高低分布反映了该热点研究热度分布。关键词成对共现次数多的，在关系上就更加密切，根据关系密切程度，结合篇名、摘要内容对关键词进行聚类，可得主要研究热点。每个主要研究热点包含有若干主要关键词，反映着该热点不同的研究主题。

本文使用关键词时序分析法梳理水利遥感领域主要研究趋势，并通过关键词时序分布图、时序热度图和突现分析图予以展示。从时间维度对关键词进行时序分析，可展示知识演进过程，以梳理主要研究热点发展脉络。将关键词按出现时间排列在时间尺度横轴上，并将共现关键词以弧线相连，可绘制重于勾画聚类之间的关系和某个聚类中文献的历史跨度的关键词时序图（Timeline），以展现某一科学研究主题中随持续时间而变动的重点科学研究内容。将研究热点内各关键词各时段总词频排布于时间横轴上绘制时序热度图，以反映各研究热点的研究热度随时间发生的变化。突现词通常是某一时期内被引用频率突然提高的关键词，可用于反映在某一时期内学者关注度较高的研究主题。

2 结果与分析

2.1 研究热度分析

研究论文发表数量变化可以直观反映该领域研究热度变化（图1）。近20 a，水利遥感研究领域年度发文量和学术期刊论文发表量均呈稳步增长态势，在2020年度达到近20 a的最高值。学位论文发表量相对稳定，近10 a平均每年通过39.5篇水利遥感研究领域的学位论文，说明该研究领域受到新毕业研究者的关注。以5 a为时间尺度计算均发文量，2004—2008年间年均发文量为35.4篇，2009—2013年间年均发文量为72.6篇，2014—2018年间年均发文量为104.8篇，2019—2023年间年均发文量为117.8篇。可见近20 a来遥感技术在水利行业中的应用获得了国内学者们的普遍重视。

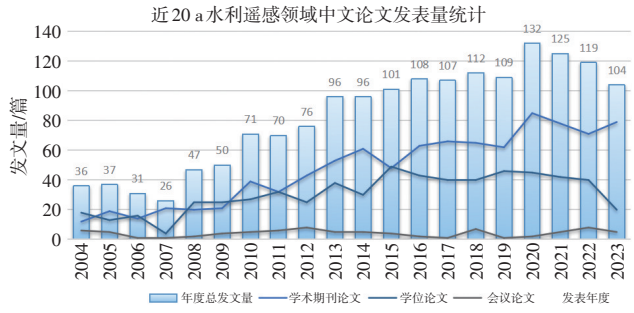


图1 近20 a水利遥感领域中文论文发表量统计

通过对各机构发文量的统计可分析我国水利遥感研究力量的分布（图2），可见我国水利遥感研究力量以高等院校和科研院所为主，高新技术企业参与其中。水利遥感的高产机构主要来源于中国科学院大学、中国地质大学、武汉大学、南京大学、吉林大学、兰州大学、北京师范大学、成都理工大学、华中师范大学、北京林业大学、东北农业大学、河南大学、华东师范大学等高等院校和中国水利水电科学研究院、中国科学院系科研院所、水利部属科研院所和长江、黄河、珠江水利委员会等科研机构。

2.2 研究热点分析

将文献资源进行篇关摘名词短语处理后，以1 a为时间切片尺度，以G指数评价筛选关键词节点，并对在综合网络整体进行寻径剪枝优化，生成关键词共现网络（图3）。图中节点代表关键词，节点大小代表关键词频次高低，节点间的链接代表关键词共现，节点间的距离代表它们的共现频次高低。图斑代表由共现频次高的

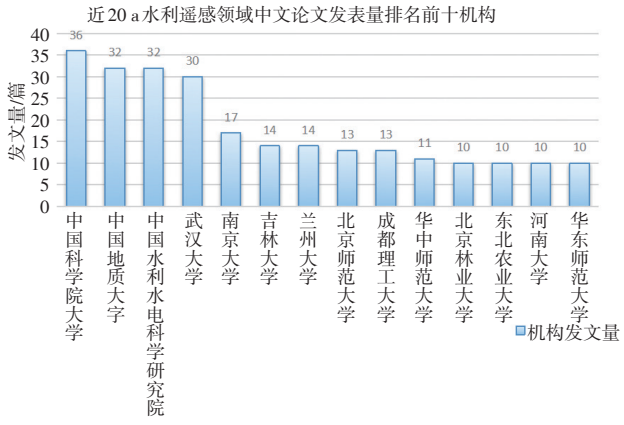


图 2　近 20 a 水利遥感领域中文论文发表量排名前十机构

节点组成的聚类，同一聚类内的节点联系性强。

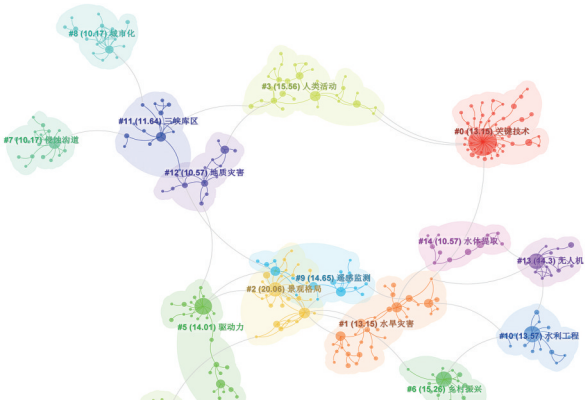


图 3　关键词共现网络

水利遥感研究热点主要有关键技术、水旱灾害、景观格局、人类活动、地籍测绘、驱动力、乡村振兴、侵蚀沟道、城市化、遥感监测、水利工程、三峡库区、地质灾害、无人机和水体提取。由聚类间距离和链接强度可推断，以三峡库区为研究区域开展地质灾害防控和人类活动影响研究的文献较多，以遥感关键技术手段开展的人类活动影响研究、水面提取技术研究和水旱灾害研究的文献较多，无人机技术较多应用于水利工程、水旱灾害防控、水面提取研究中。

基于聚类分析结果，本文将水利遥感领域主要研究热点总结为遥感关键技术研究、水旱地灾防治、城市化进程分析、水土保持监测监管、智慧水利工程建设和助力乡村振兴战略 6 项热点研究领域进行分析。

2.2.1　遥感关键技术研究

遥感技术通过航天或航空平台捕捉地球或其他天体的电磁波谱成像，获取目标的多维特征信息。随着航天技术发展与高分重大专项的实施，中国在卫星遥感领域发展迅猛[4]，在分辨率、重访能力、覆盖能力、载荷类型方面有了长足进步，数据类型涵盖多光谱、高光谱、红外、雷达、立体测绘等，构建了气象、海洋和陆地 3 大类别的民用业务卫星系统[5]，开展了温室气体遥感[6-7]、夜间灯光遥感[8-10]等科学实验卫星试验。航空遥感领域中，轻小型无人机成为大众化遥感应用最突出的标志，在众多应用场景发挥重要作用。

遥感影像的光谱信息解译能够监测灌区农作物信息[11-13]、监测水文水质水资源[14-16]、评估水土保持效果[17-18]、预防洪涝灾害[19-20]等。水体提取方法在水利遥感研究领域中具有重要意义，它为水资源管理、灾害监测、环境保护和农业水资源管理等提供了有效的技术手段和数据支持。近年来，基于影像的水体提取逐渐向机器学习和深度学习方向发展[21-23]。

随着我国对地观测的广度和深度快速发展，遥感数据呈现出的“大数据”特征推动了数据自动化处理和智能化挖掘研究[24]。遥感大数据宝贵价值在于对地表的多粒度、多时相、多方位和多层次的全面反映，基于数据表达、信息组织与知识发现等不同层次的数据挖掘方法，实现时空大数据挖掘，是遥感大数据的独特优势[25]。同时，云计算技术和遥感云平台降低了遥感数据使用门槛，提高了运算效率，加速了算法迭程，使全球尺度地球系统科学快速分析和应用成为可能[26]。机器学习方法在遥感图像分类和目标探测方面也展现出优越性能，推动了遥感知识库构建的智能化和自动化[27-28]。

2.2.2　水旱地灾防治

地质灾害如地震、滑坡和泥石流对人类社会构成了持续的严重威胁。在此背景下，水利遥感技术为灾害的监测、预警、灾后评估、生态修复和风险评估提供了强有力的技术支持和数据资源。

遥感技术的优势在于其宏观覆盖、快速响应、动态监测和成本效益，特别是在重大自然灾害的实时监测和评估中展现出独特的潜力[20,29]。在灾害预警和救援行动中，传统方法可能因灾区环境风险而受限，遥感技术则能够安全、有效地提供关键信息。它在洪涝灾害监测[30-33]、干旱研究以及地质灾害防控[34-35]中发挥着核心作用，是防洪抗旱减灾工作中不可或缺的技术手段[35-36]。通过精确的遥感数据分析，可以及时预测灾害发展，优化资源分配，提高救援效率，从而在水旱地灾防治中发挥关键作用。

水利遥感技术的应用不仅限于灾害响应，还包括长期的灾害风险管理。通过持续监测地质变化和水文条件，可以评估潜在风险，制定预防措施，减少灾害对人类社会的影响。随着遥感技术的进步，结合人工智能和大数据分析，我们能够更深入地理解灾害发生的机制，提高预测的准确性，为水利领域的灾害防治工作提供更加科学、系统的解决方案。

2.2.3 城市化进程分析

通过解译遥感影像能快捷获得地表覆盖时空分布和多尺度景观格局，用以分析重点流域[37-38]、典型湿地[39-41]、人口聚居地[42-43]、农业灌区[44-45]的土地利用驱动力、覆被时空变化、生态效应评价[46]等。

在人类活动不断重塑地表环境的背景下，土地利用方式的转变对生态系统服务价值产生了显著影响。王庭辉[47]通过分析丹江口库区遥感影像数据，发现该区域生态系统服务价值与人类活动强度存在显著的负相关关系，并呈现出先增强后减弱的变化趋势。王重玲[48]的研究指出，宁夏中部干旱带的生态环境在人类活动的扰动下出现了退化效应，但随后得益于退耕还林和水利工程等生态修复措施而得以改善。

城市化进程中的城市扩张和人口增长对水资源需求管理提出了巨大挑战，水利遥感技术可以通过高分辨率遥感影像监测城市区域的水资源状况，为水资源管理和水环境保护提供数据支持，还可以与地理信息系统（GIS）相结合，为城市可持续发展和智慧城市建设提供空间数据支持，有助于优化城市布局并提高资源利用效率。

2.2.4 水土保持监测监管

遥感技术的应用在水土保持监测监管领域正发挥着重要作用，它不仅增强了监测任务的效率和准确性，而且为水土流失的定量评估和科学管理提供了坚实的数据基础。

通过分析遥感卫星数据，为土壤侵蚀模型的精确计算提供了土地利用分布、植被覆盖情况和水土保持措施分布等关键信息。进一步地，地形条件作为侵蚀沟发展的关键外部因素，通过遥感影像、数字高程模型与地理国情监测数据的综合分析，研究者能够深入探讨其对土壤侵蚀和沟道侵蚀分布规律的影响[49-52]。

在生产建设项目的监督管理方面，通过解析亚米级高分辨率多光谱卫星影像数据，如北京二号、高分二号、资源三号等，能够精准识别建设项目扰动，并结合项目资料有效识别违法违规行为，为生产建设项目监管提供有力的技术支持[4]。

在三峡库区，这一长江经济带乃至全国重要的生态宝库，学者以水利工程安全运行与库区可持续开发利用为目标，围绕生态风险评估[37]等主题开展了大量研究。同时，青藏高原作为“亚洲水塔”，在全球气候变化的影响下，其水文水资源和生态环境面临挑战。在此背景下，我国学者积极开展研究，以应对青藏高原河湖系统面临的水文、水资源及水灾害监测预警问题[53-57]，并进行高原生态系统评估[58-60]。

2.2.5 智慧水利工程建设

水利遥感技术在智慧水利工程建设中的应用是多方面的，涵盖了水利工程从规划到设计的全生命周期管理[61]。在水利工程的规划设计阶段，遥感技术能够提供关键的地形和土地利用信息，为工程设计和选址提供科学依据，有助于优化工程设计使工程结构与自然环境和谐共存。施工阶段，遥感技术可以监测施工进度和质量，确保工程按计划进行。在水利工程的运行管理中，遥感技术的应用更是广泛，包括大坝安全监测[62]、库容曲线测量[63-64]、库区滑坡监测[65-66]、堤防溃决监测和强震影响评估[67]等。

在水利工程测绘领域，遥感技术同样展现独特优势。传统的水利工程测绘方法往往耗时耗力，且在某些情况下难以实施。卫星遥感、倾斜摄影和低空无人机等现代遥感技术的出现，为水利工程测绘带来了革命性的变化。这些技术能够在短时间内以大规模、高效率的方式完成目标区域的测绘任务，大大提高了测绘的精度和效率，为智慧水利工程建设提供了强有力的技术支撑[68-69]。

遥感技术在智慧水利工程建设中的应用，不仅提高了水利工程的规划、设计、施工和管理的效率和精度，而且为水利工程的可持续发展提供了强有力的技术保障。随着遥感技术的不断进步，其在智慧水利工程建设中的应用将更加广泛和深入，为实现水利工程的智能化、自动化和信息化管理提供坚实的技术基础。

2.2.6 助力乡村振兴战略

党的十九大乡村振兴战略的重大部署，旨在实现“产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕”的乡村发展愿景，并特别强调了数字农业和智慧农业水利工程的重要性。水利遥感技术在这一战略中扮演着重要角色，尤其是在新农村景观格局规划[70-72]、乡村智能节水[73-74]、灌区智慧灌溉[11-12]和农业墒情监测[13,75-76]等领域。

乡村振兴战略的实施，需要综合考虑区域自然条件、社会经济差异等因素，对乡村产业、文化等要素及其空间格局进行科学的重组和重构。我国学者通过分析遥感影像、数字高程模型、土地利用数据、兴趣点数据和统计年鉴等指标数据，揭示乡村发展的空间特征和动态变化，为农业农村现代化提供科学依据。

我国作为农业大国，水资源的有效管理对于保障农业生产至关重要。当前，我国农村灌溉用水存在诸多问题，如灌溉用水不足、田间与渠道配套不完善、

水资源损失严重等。利用高分遥感、物联网技术等信息技术，可以实现多源数据的采集、汇聚与融合分析。这为农村管网漏损监测、污水处理与净化、智能灌溉用水管理等提供了技术支撑，有助于实现水治理体系的协同化和水利管理的智能化，提高水资源利用效率，保障农业生产的稳定发展，为乡村振兴战略的实施提供坚实的水利保障。

2.3　研究趋势分析

在关键词共现分析方法基础上，从时间维度对关键词进行时序分析，按时限区段绘制关键字时序图（图4）和时序热度图（图5）。

时序图展示该研究热点主要关键词在时序上的分布，节点间的连线代表关键词的共现，红色节点代表研究热度突然增高的关键词（突现词）。针对每个研究热点生成关键词时序图，可进一步分析每个研究热点随时间发生的研究重点变化。关键词时序图横轴由左至右代表时间尺度由2003年起至2023年止，节点的位置代表该关键词第一次出现的年度，节点间的链接弧线代表两端关键词的共现，节点内环带颜色代表该关键词高频引用的年度，节点越大代表关键词高频出现的年度越多。灰色环带代表该关键词于2003年至2012年间被引用，彩色环带代表该关键词近10 a间出现频次较高。节点环带颜色由灰色、紫色、蓝色、绿色、黄色至红色的渐变变化对应2013—2023年的年度变化。热度图5展示研究热点内关键词总词频在时序上的分布，词频高低反映研究热度高低。

突现词通常是某一时期内被引用频率突然提高的关键词，可用于反映在某一时间阶段内的研究趋势。统计各关键词在各年份内的引用频次，筛选出8项突现词，如图6所示。图中深蓝色线条代表该突现词有一定引用频次，红色线条代表该突现词频次增幅大热度高。

其中“无人机”、“遥感影像”、“智慧水利”和“深度学习”四项关键词突发性时间较短且持续到当前，可以推测未来研究热点可能仍然围绕着计算机领域模型、算法与遥感影像的深度合作。

2.3.1　无人机遥感

无人机（UAV）是装备有动力装置和导航模块的机上无人驾驶航空器，在一定范围内靠无线电遥控设备或计算机预编程序自主控制飞行[77]。一个世纪的发展孕育了种类繁多的无人机大家族，例如以动力源划分的太阳能、燃油、燃料电池和混合动力无人机，以控制方式划分的无线电遥控、预编程自主控制、程控与遥控复合控制无人机，按结构划分的固定翼、旋翼、无人直升机和垂直起降无人机等[78]。结合先进的飞行控制、定位定姿盒遥感测控技术，无人机平台搭载成像与非成像传感器，能够高效收集国土资源、生态环境和突发事件的空间数据，弥补了卫星和传统航空遥感在精度、时效和频度上的不足。

成熟完备的民用无人机遥感系统（UAVRSS）是集成系统，由飞行平台、对地观测传感系统、遥感空基交互控制系统、数据处理和传输链路、保障设备和地勤人员组成[79]。无人机的广阔视角和即时信息传输能力，使它在农林作业、城市规划、智慧水利、抢险救灾、物流配送、行政巡查工作和地理国情监测等领域显示出强大的应用潜力。无人机的倾斜摄影测量技术，能够快速为水利工程和关键区域创建高精度三维模型，为数字孪生技术提供数据支持，促进了立体化管理的发展。

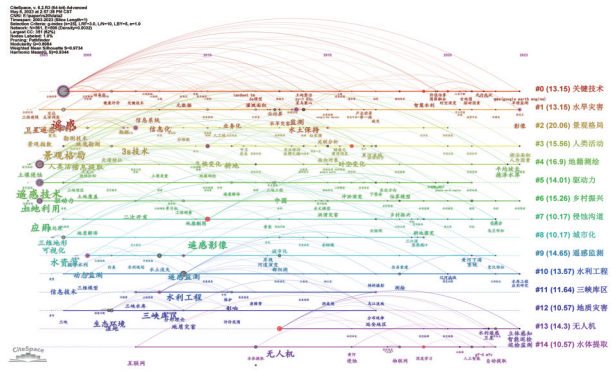


图4　关键词时序分布图

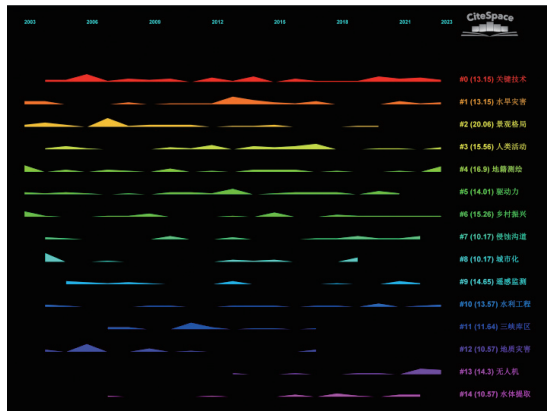


图5　研究热点时序热度图

Top 8 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2003 - 2023
无人机	2013	5.42	2016	2023	
遥感影像	2010	3.76	2018	2023	
时空变化	2016	4.85	2016	2020	
智慧水利	2019	4.09	2019	2023	
深度学习	2019	3.68	2019	2023	
遥感技术	2003	4.34	2016	2017	
3s技术	2007	4.08	2009	2010	
时空演变	2020	3.81	2020	2021	

图6　关键词突现分析图

2.3.2 遥感影像

水利遥感研究领域对遥感影像的研究主要关注水体提取与监测、水资源调查与评估、水文过程模拟与预测、水灾害监测与预警、水质监测与水环境保护，以及土地利用与水土保持等方面。利用多光谱遥感影像，可以通过图像分割、水体边界检测等算法提取水体的空间分布信息，监测水体的动态变化，以评估水资源的可持续利用和管理。在水质监测和水环境保护方面，可以通过遥感影像获取水体的光学特征、叶绿素浓度、悬浮物含量等指标，实现水质监测和水体污染的监测与评估。利用遥感影像可以实时监测监测土地利用变化、土壤侵蚀等指标，可以为水土保持规划和土地管理提供支持，并能通过数据分析和建模提供灾害预警和应急响应。

2.3.3 智慧水利

在“十四五”规划和2035年远景目标的指导下，我国致力于建设数字中国，以提升水利智慧化和信息化水平，增强国家治理能力。水利部部长李国英强调，实现智慧水利的关键在于构建“数字化场景、智慧化模拟、精准化决策”的途径。

智慧水利的实现涉及运用先进的信息技术、人工智能和大数据等智能化技术手段，以对水资源管理、水环境保护、水灾害预警和水利工程运行进行综合优化和智能化管理。通过集成遥感技术和其他智能化技术，智慧水利涵盖智能水资源管理、智能灌溉与节水、智能洪涝预警与调度、智能水质监测与治理、智慧水生态系统管理以及智慧农业与水资源管理等多领域研究。智慧水利系统有助于大幅提升水资源利用效率和管理水平，实现水资源的科学调度、精细管理和可持续利用，进而保障水资源的可持续发展，促进社会经济的长期繁荣。

2.3.4 深度学习

深度学习，作为机器学习的一种方法，已经在人工智能领域展现了其革命性的能力[28]。它模仿人脑神经网络，通过深层神经网络模型学习并提取数据的深层次特征，从而实现建模和预测复杂数据的能力。

快速提取水利专题信息与生态水文过程物质能量参数，是水利遥感需要解决的关键技术问题[4]。遥感应用人工智能技术解决影像解译、信息自动提取问题，互联网、物联网、传感网获取的海量时空数据作为人工智能的能量，为机器学习、智能抉择与服务提供支撑[28]。深度学习模型强大的学习与对复杂模式提取能力，使其在目标检测[80]、水体提取[81]、地物分类[82-83]等领域获得阶段性成果[28]、有效提高了遥感影像的分类精度与自动化水平。利用深度学习技术所训练的神经网络模型替代部分传统经验模型，服务于遥感影像分类识别、水体边界提取、水体变化监测、水质参数监测、水文气象预测等任务，显著提升了数据处理的效率，并为水利管理和决策提供了准确全面的水资源信息，推动了智能化和可持续发展。

3 结论与展望

遥感技术在水利行业中的应用已引起了国内学者们的普遍重视，近20 a，水利遥感研究领域年度发文量和学术期刊论文发表量均呈稳步增长态势。近5 a，该研究领域中文学术论文年均发表量为117.8篇，学位论文年均通过量38.6篇。中国科学院大学、中国地质大学、中国水利水电科学研究院和武汉大学等高等院校是该领域的中坚研究力量。

水利遥感技术作为一门多学科交叉的前沿领域，其研究热点涵盖了水旱灾害防治、景观格局、人类活动影响、地籍测绘、驱动力分析、乡村振兴、侵蚀沟道研究、城市化进程、遥感监测、水利工程管理以及三峡库区和地质灾害等多个方面。水利遥感领域的主要研究热点可以归纳为6个关键领域：遥感关键技术研究、水旱地灾防治、城市化进程分析、水土保持监测监管、智慧水利工程建设以及助力乡村振兴战略。特别是在三峡库区的地质灾害防控、人类活动影响研究，以及水旱灾害、水面提取技术研究中，遥感技术显示出其独特的应用价值。无人机技术在水利工程、水旱灾害防控和水面提取研究中的应用也日益增多，显示出强大的潜力。

无人机（UAV）、遥感影像、智慧水利和深度学习是当前水利遥感研究领域的热点，预计将持续引领未来研究。无人机搭载先进的传感器和飞行控制系统，提供了一种高效、灵活的空间数据收集方式，特别是在农林、城市规划、水利工程等领域的应用潜力巨大。遥感技术借助多平台捕捉地球电磁波谱，为水体监测、水质评估和土地利用变化提供了实时、准确的信息，是智慧水利实现中不可或缺的技术支撑，正在数据获取、环境监测和智能化分析方面实现技术飞跃。智慧水利结合了信息技术、人工智能和大数据，优化了水资源管理，提升了水环境保护和水灾害预警的能力。深度学习作为人工智能的关键技术，通过模拟人脑神经网络，显著提高了遥感影像的分类精度和自动化水平，为水利管理和决策提供了强大的数据支持。这些技术的融合预示着水利遥感领域将朝着更加

智能化和精准化的方向发展。

参考文献

[1] 张兵. 当代遥感科技发展的现状与未来展望[J]. 中国科学院院刊,2017,32(7):774-784

[2] 陈悦,陈超美,刘则渊,等. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究,2015,33(2):242-253

[3] 李杰,陈超美. CiteSpace:科技文本挖掘及可视化[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社,2022

[4] 宋文龙,杨昆,路京选,等. 水利遥感技术及应用学科研究进展与展望[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(1):34-40

[5] 廖小罕. 中国对地观测20年科技进步和发展[J]. 遥感学报,2021,25(1):267-275

[6] 刘毅,王婧,车轲,等. 温室气体的卫星遥感:进展与趋势[J]. 遥感学报,2021,25(1):53-64

[7] 刘良云,陈良富,刘毅,等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J]. 遥感学报,2022,26(2):243-267

[8] 李德仁,李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报,2015,44(6):591-601

[9] 陈颖彪,郑子豪,吴志峰,等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J]. 地理科学进展,2019,38(2):205-223

[10] 李德仁,余涵若,李熙. 基于夜光遥感影像的“一带一路”沿线国家城市发展时空格局分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(6):711-720

[11] 邵秋芳,麻泽龙,敖琴. 遥感技术在灌区信息化中的应用[J]. 水利技术监督,2018(4):52-53

[12] 韩文霆,郭聪聪,张立元,等. 基于无人机遥感的灌区土地利用与覆被分类方法[J]. 农业机械学报,2016,47(11):270-277

[13] 白亮亮. 基于多源遥感数据的灌区农田蒸散发和土壤墒情反演及应用[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2017

[14] 胡红,胡广鑫,李新辉. 水体水质遥感监测研究综述[J]. 环境与发展,2017,29(8):158-160

[15] 王铭铭,董凯颂. 水资源多元数据融合与治理技术探讨[J]. 长江技术经济,2021,5(5):83-86

[16] 张庆春,佟国峰,李勇,等. 基于多特征融合和软投票的遥感图像河流检测[J]. 光学学报,2018,38(6):320-326

[17] 史俊凤. 生产建设项目水土保持监测的RS与GIS的应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2016

[18] 姜德文. 水土保持强监管目标任务及方法探讨[J]. 中国水利,2019(1):3-16

[19] 黄诗峰. 遥感技术在我国洪涝灾害监测评估中的应用[J]. 中国减灾,2013(24):36-37

[20] 杨昆,黄诗峰,辛景峰,等. 水旱灾害遥感监测技术及应用研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5):451-456

[21] 李丹,吴保生,陈博伟,等. 基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,60(2):147-161

[22] 芮杰. 多源遥感数据测绘应用关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所),2017

[23] 周岩,董金玮. 陆表水体遥感监测研究进展[J]. 地球信息科学学报,2019,21(11):1 768-1 778

[24] 李德仁,张良培,夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘[J]. 测绘学报,2014,43(12):1 211-1 216

[25] 李德仁,马军,邵振峰. 论时空大数据及其应用[J]. 卫星应用,2015 (9):7-11

[26] 付东杰,肖寒,苏奋振,等. 遥感云计算平台发展及地球科学应用[J]. 遥感学报,2021,25(1): 220-230

[27] 张兵. 遥感大数据时代与智能信息提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1 861-1 871

[28] 龚健雅. 人工智能时代测绘遥感技术的发展机遇与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1 788-1 796

[29] 芦云峰,谭德宝,刘勇,等. 深水大型沉井内部地形探测方法与实践[J]. 长江科学院院报,2019,36(12):157-163

[30] 陈德清,崔倩,李磊,等. 基于多源信息融合的业务化洪水遥感监测分析[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(4):1-5

[31] 魏兆珍. 海河流域下垫面要素变化及其对洪水的影响研究[D]. 天津:天津大学,2013

[32] 董臻. 基于深度学习与哨兵一号影像的洪涝灾害遥感监测[D]. 南京: 南京信息工程大学,2022

[33] 张红萍. 基于遥感技术的城市洪涝灾害承载力评估模型研究[D]. 武汉:中国地质大学,2020

[34] 甘元楠. 基于温度植被干旱指数的干旱精准监测研究[D]. 南昌:南昌工程学院,2020

[35] 葛鲁亮. 基于遥感与空间统计分析的山东省干旱动态监测研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021

[36] 宋清泉. 水旱灾害遥感监测技术及应用研究进展[J]. 环境科学与管理,2020,45(9):143-146

[37] 李辉,周启刚,李斌,等. 近30年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(3):654-666

[38] 向大享,姜莹,程学军,等. 遥感技术在老挝南里河小流域综合治理中的应用[J]. 人民长江,2022,53(6):39-44

[39] 朱金峰,周艺,王世新,等. 1975—2018年白洋淀湿地变化分析[J]. 遥感学报,2019,23(5):971-986

[40] 崔桢,沈红,章光新. 3个时期莫莫格国家级自然保护区景观格局和湿地水文连通性变化及其驱动因素分析[J]. 湿地科学,2016,14(6):866-873

[41] 路春燕,王宗明,刘明月,等. 松嫩平原西部湿地自然保护区保护有效性遥感分析[J]. 中国环境科学,2015,35(2):599-609

[42] 刘琳. 天津市土地利用景观格局梯度分析及区域生态风险评价[D]. 天津:天津理工大学,2015

[43] 王岩. 杭州市江干区土地利用景观格局变化及驱动力分

析[D]. 成都:成都理工大学,2014
[44] 郭聪聪. 基于无人机遥感的灌区土地利用类型分类方法研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2016
[45] 刘虹霞. 都江堰灌区乡村景观格局演变与优化策略研究[D]. 成都: 西南交通大学,2019
[46] 刘斌,赵雅莉,白洁,等. 塔里木河下游流域输水工程生态效应评价研究[J]. 地理空间信息,2020,18(3):112-117
[47] 王庭辉,王喜,秦耀辰,等. 丹江口库区生态系统服务价值与人类活动时空关联分析[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(2):330-341
[48] 王重玲,朱志玲,白琳波,等. 景观格局动态变化对生态服务价值的影响:以宁夏中部干旱带为例[J]. 干旱区研究,2015,32(2): 329-335
[49] 宋文龙,张荣华,高云飞,等. 基于野外调查、遥感信息和CSLE模型的土壤侵蚀强度分级[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(5):170-174
[50] 左飞航,张少伟,权红花. 陕西省黄土高原沟道侵蚀分析研究[J]. 地理空间信息,2022,20(5):128-131
[51] 黄萌,范昊明. 辽宁省侵蚀沟发育特性及地形分异特征[J]. 水土保持学报,2017,31(5):93-98
[52] 王庆,李智广,高云飞,等. 基于DEM及高分辨率遥感影像的西北黄土高原区侵蚀沟道普查[J]. 中国水土保持,2013,33(10):61-64
[53] 叶松. 全球变暖下青藏高原河湖系统建模及演变分析方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2022
[54] 闫立娟,郑绵平,魏乐军. 近40年来青藏高原湖泊变迁及其对气候变化的响应[J]. 地学前缘,2016,23(4): 310-323
[55] 万玮,肖鹏峰,冯学智,等. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化[J]. 科学通报,2014,59(8):701-714
[56] 谭德宝,吴佳琪,文雄飞. 可可西里湖泊群立体监测技术方法及应用[J]. 人民长江,2020,51(1): 243-248
[57] 李芹,阳春花,梁雪松,等. 面向对象的遥感影像水域信息提取应用研究:以西藏(东)地区为例[J]. 测绘地理信息,2016,41(6):40-43
[58] 张宪洲,杨永平,朴世龙,等. 青藏高原生态变化[J]. 科学通报,2015,60(32):3 048-3 056
[59] 宋春桥,游松财,柯灵红,等. 藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究[J]. 植物生态学报,2011,35(8): 853-863
[60] 张镱锂,祁威,周才平,等. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J]. 地理学报,2013,68(9):1 197-1 211
[61] 李纪人. 遥感技术在防汛抗旱中的应用[J]. 中国防汛抗旱,2017,27(3):15-18
[62] 阳述辉,韩春峰,麻泽龙,等. 基于微波遥感的水库大坝外部形变立体监测方法[J]. 四川水利,2022,43(3):142-144
[63] 王金鑫,桑学锋,常家轩,等. 多源时相遥感影像数据耦合的水库库容曲线重构[J]. 测绘通报,2021(11):42-47
[64]熊龙海,翁忠华,何颖清,等. 基于亚像元级水体提取模型的水库库容遥感估算[C]//中国水利学会2021学术年会论文集第一分册: 黄河水利出版社,2021:202-208
[65] 宋英旭. 基于空天地一体化监测的滑坡风险动态评价研究[D]. 武汉:中国地质大学,2019
[66] 唐凤娇,祁生文,郭松峰,等. 金沙江溪洛渡库区水库诱发滑坡时空分布规律及易发性研究[J]. 工程地质学报,2022,30(3):609-620
[67] 江时强,徐烨. 三峡工程经受大震考验[J]. 中国三峡,2009(增刊):127-128
[68] 陈桥忠. LiDAR在水库工程测绘中的应用[J]. 河南水利与南水北调,2023,52(3):107-108,118
[69] 王光彦,姚坚,李登富,等. 低空无人机遥感在水利工程测绘中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(5):113-115,118
[70] 刘玉,任艳敏,潘瑜春,等. 面向乡村振兴战略的乡村发展格局及其分区研究[J]. 农业工程学报,2019,35(12):281-289
[71] 席建超,王首琨,张瑞英. 旅游乡村聚落“生产-生活-生态”空间重构与优化:河北野三坡旅游区苟各庄村的案例实证[J]. 自然资源学报,2016,31(3):425-435
[72] 黄隆杨,王静,李泽慧,等. 基于自然资源大数据的城市多功能景观识别与国土空间规划分区[J]. 地球信息科学学报,2021,23(9):1 617-1 631
[73] 陈蓓青,陈苏春,沈定涛,等. 新农村节水综合管理制度与智能节水新技术应用探讨[J]. 中国水利,2020(21):60-62
[74] 方子杰,唐燕飚,夏玉立. 对新时代推进水利高质量发展的思考[J]. 水利发展研究,2019,19(8):14-19
[75] 温庆志,孙鹏,张强,等. 基于多源遥感数据的农业干旱监测模型构建及应用[J]. 生态学报,2019,39(20):7 757-7 770
[76] 谭丞轩,张智韬,许崇豪,等. 无人机多光谱遥感反演各生育期玉米根域土壤含水率[J]. 农业工程学报,2020,36(10): 63-74
[77] Adam C, Watts V G, Ambrosia E A, et al. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use[J]. Mdpi Ag, 2012,4(6):1 671-1 692
[78] 吴汉平. 无人机系统导论(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社,2003
[79] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):505-513
[80] 许德刚,王露,李凡. 深度学习的典型目标检测算法研究综述[J]. 计算机工程与应用,2021,57(8):10-25
[81] 陈前,郑利娟,李小娟,等. 基于深度学习的高分遥感影像水体提取模型研究[J]. 地理与地理信息科学,2019,35(4): 43-49
[82] 金永涛,杨秀峰,高涛,等. 基于面向对象与深度学习的典型地物提取[J]. 国土资源遥感,2018,30(1):22-29
[83] 李道纪,郭海涛,卢俊,等. 遥感影像地物分类多注意力融和U型网络法[J]. 测绘学报,2020,49(8):1 051-1 064