

编者按：发展新质生产力是推动高质量发展的内在要求和重要着力点。近年来，现代遥感监测手段在水利领域的应用逐步向深层次、规模化发展，为涉水领域的算据获取和算力提升提供了强大驱动力，为面向新质生产力的水科技创新提供了新的技术引擎。遥感监测技术应用、遥感大数据规模化处理等已成为当前各级水利部门、各涉水领域关注的焦点。为从理论、技术、应用场景等多维度探讨遥感赋能水利新质生产力的新思路、新模式、新路径，本期策划推出遥感赋能水利新质生产力专辑，邀请行业内外专家、学者为遥感科学与技术在水利领域的应用和发展提供前瞻性、引领性、科学性的指导，推进跨学科、跨领域协同创新、融合发展。本专辑策划实施过程中得到中国水利水电科学研究院正高级工程师黄诗峰等专家的大力支持。

遥感技术赋能智慧水利：问题、挑战与建议

吴一戎

(中国科学院空天信息创新研究院, 100094, 北京)

摘要：如何延长遥感技术链条，支撑智慧水利建设，是目前亟待解决的问题。梳理和总结了涉水卫星数据源、涉水要素遥感产品、水利遥感模型和水利遥感应用场景服务等现状，分析了遥感技术面向水利工作的新形势、新任务、新机遇，以及其在涉水领域中面临的数据、模型、应用方面的挑战。结合遥感前沿理论和技术前景，提出了遥感技术赋能智慧水利的发展建议。

关键词：遥感技术；智慧水利；数字孪生水利；新质生产力；水利大模型

Empowering smart water with remote sensing technology: issues, challenges and suggestions//Wu Yirong

Abstract: How to extend the technology chain of remote sensing to support smart water construction is an urgent issue that needs to be addressed. This paper reviews and summarizes the current status of water-related satellite data sources, water-related remote sensing products, remote sensing models for water resources, and application scenario services. It analyzes the new situation, tasks, and opportunities that remote sensing technology faces in water resources management, as well as the challenges related to data, models, and applications. Based on the prospects of cutting-edge remote sensing theories and technologies, suggestions are proposed for empowering smart water with remote sensing technology.

Keywords: remote sensing technology; smart water; digital twin water conservancy; new quality productive forces; large-scale water resources model

中图分类号: TV+TP7 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2024)11-0001-08

水是影响自然生态系统健康和人类社会经济系统发展的重要资源。近几十年来，受气候变化和人类活动双重影响，水资源分布不均衡、开发利用效率低下和水环境退化等引发的水安全问题，已然成为国家安全

收稿日期: 2024-05-30

作者简介: 吴一戎, 中国科学院院士, 空天信息创新研究院院长。

的核心内容和大国博弈的重要切入点。美国近期将水资源短缺上升为国家安全问题,并制定全球水安全行动计划,在解决自身水安全的同时,通过国际合作加强在全球事务中的主导地位。

在这一过程中,伴随着新一轮科技革命和产业变革,数据受到越来越多的重视。2017年美国提出“湄公河水数据倡议”(Mekong Water Data Initiative),通过流域数据“透明和共享”,并借助数据驱动的先进开源建模、机器学习和混合模拟方法,提升湄公河跨境水资源管理决策“科学性”。在我国,水利部提出大力推动数字孪生水利建设,也是通过数据驱动的先进技术实现预报、预警、预演、预案“四预”功能,为水利决策管理提供前瞻性、科学性、精准性、安全性支持。

遥感数据尤其是卫星遥感数据,因其全球覆盖、时空连续、多模态以及宏观、客观的特征,为我国数字新基建和数字化框架提供了重要的时空基础,在水利数字化转型中也发挥了重要作用。2024年全国水利工作会议明确提出:“实施‘天空地’一体化监测感知夯基提能行动,全面提升水利对象全要素和治理管理全过程智能感知能力。”遥感技术在水利业务的深层次应用,也必将带动新设备、新技术、新应用的发展,为涉水领域的算据获取、算法创新和算力提升提供强大驱动力,赋能水利新质生产力的跃迁和发展。

一、遥感技术在水利领域的应用现状

近年来,遥感技术的快速发展为对地观测提供了海量的高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率

“三高”数据,开拓了更多应用新领域,在水利行业得到广泛应用。丰富的遥感数据、要素产品以及模型应用,有效地促进了水旱灾害防御、国家水网建设、河湖生态复苏、水资源节约集约利用等水利重点业务的发展,为推进智慧水利建设提供了监测感知能力支撑(图1)。

1.主要遥感数据资源

多源、多平台、多类型的对地观测卫星为水旱灾害防御、水利工程建设与管理、农业集约用水、气象预报等业务提供了丰富的遥感数据源,与水利数据、水电站网观测数据共同构筑了“天空地”一体化感知网,提升了数字孪生水利等智慧化建设和水利重点业务监测感知的精准性、同步性、及时性。

目前,已经应用在水利业务的遥感卫星(表1)主要包括:提供降水等气象数据的风云系列气象卫星、日本的“葵花”卫星等系列卫星;用于陆表蒸散发、冰雪厚度、土壤水分等关键涉水要素反演光学、热红外和微波等系列卫星(如MODIS、高分系列、Landsat、哨兵等);用于河湖水文参量精准监测的SWOT卫星等;分析陆表水储量变化的重力卫星(GRACE);用于估算地表湖库水位变化的Topex/Poseidon、Envisat RA-2、Jason-1/2等测高卫星。

这些卫星研制的最初目的和服务对象各有不同,如服务于气象观测、陆表植被状况、生态环境监测、水资源管理等,遥感数据的空间分辨率从亚米级到百公里级不等,观测频率从每15分钟到每月不等,涉及的波段选择、波段宽度、中心波长、信噪比等观测指标差别也很大。我国的风云(FY)、高分(GF)等系列卫星



图1 遥感技术赋能水利监测感知体系

表1 涉水遥感卫星信息(在轨运行)

卫星类别	卫星名称	国家和组织	发射时间	重访周期
气象卫星	NOAA 15	美国	1998年5月	101.2 min
	NOAA 18		2005年5月	102 min
	NOAA 19		2009年2月	102 min
	DMSP-17	美国	2006年11月	101 min
	DMSP-18		2009年10月	101 min
	JASON 3	美国/欧盟	2016年1月	112 min
	Suomi NPP	美国	2011年10月	102 min
	Metop A	欧盟	2006年10月	101.36 min
	Metop B		2012年9月	
	Metop C		2018年11月	
	Himawari 8	日本	2015年7月	10 min
	Himawari 9		2016年11月	
	GEO-KOMPASS 2A	韩国	2018年12月	10 min
	FY-2G	中国	2014年12月	(静止卫星)
	FY-2H		2018年6月	(静止卫星)
	FY-3C		2013年9月	101.5 min
	FY-3D		2017年11月	101.5 min
	FY-3E		2021年7月	101.5 min
	FY-3F		2023年8月	101.5 min
FY-3G	2023年4月		93 min	
FY-4A	2016年12月		(静止卫星)	
FY-4B	2021年6月		(静止卫星)	
重力卫星	CHAMP		德国	2000年7月
	GRACE	美国/德国	2002年3月	30 d
	GOCE	欧盟	2009年3月	10~30 d
	GRACE-FO	美国/德国	2018年5月	10~30 d
测高卫星	ERS系列	欧盟	1991年7月	35 d
	TOPEX/Poseidon	美国/法国	1992年8月	10 d
	Jason系列	美国/法国	2001年12月	10 d
	Envisat	欧盟	2002年3月	35 d
	ICESat系列	美国	2003年1月	91 d
	Cryosat-2	欧盟	2010年4月	369 d
	SARAL/AltiKa	印度/法国	2013年2月	35 d
	Sentinel-3	欧盟	2016年2月	27 d
	ZY3-02星	中国	2016年5月	3 d
	GF-7	中国	2019年11月	60 d
	ZY3-03星	中国	2020年7月	3 d
	Sentinel-6A	欧盟/美国	2020年11月	10 d
	CM-1陆地生态系统碳监测卫星	中国	2022年8月	59 d
SWOT卫星	美国/法国	2022年12月	21 d	

经历了从无到有、从少到多、从弱到强的发展历程,持续推动了水利遥感发展。但是,在水文参量监测、水存量监测方面的卫星发展尚有不足。

2. 模型方法发展

遥感技术的发展推动了陆表蒸散发、土壤水分、地表湖库水储量、陆地水储量等涉水要素遥感产品模型算法的迭代创新,遥感模型从最初的经验模型发展到具有复杂机理的物理模型或半经验半物理模型。具有物理机制的模型有效突破了经验模型的局限,增强了不同地表特征参量反演的适用性,拓展了数据产品的应用范围。欧美已构建了流域、区域、全球尺度涉水监测感知产品体系,我国近年也逐步形成了降水、土壤水、蒸散发等系列遥感算法和数据产品(表2)。

不可否认,由于观测对象的复杂性和影响因子的多样性,目前基于物理机制、半经验半物理的模型仍然具有较大不确定性。随着人工智能技术的发展,以数据驱动的智能模型已在一定程度上克服了物理机制的高度复杂性带来的不确定性,但对于海量样本和模型支持的需求以及对算据、算法、算力的要求也逐渐提升。

3. 重要应用场景

遥感技术在数字孪生水利建设中得到深入应用,已有效支撑了流域防洪、水资源管理与调配等“2+N”业务应用。如在水资源管理与调配方面,高分辨率遥感技术可以准确获取地表水资源现状,分析变化趋势;在水环境监测方面,利用高光谱遥感技术可以精准监测水质状况,探查水体污染源的类型、位置分布以及水体污染的分布范围;在水利工程监测方面,通过遥感技术可以提取工程区域的地貌、岩性、土壤、植被等信息,为工程的选址和规划提供第一手资料,并进行工程进程监测以及建成后的效益评估;在防汛方面,通过遥感技术可以提供洪水淹没范围、水位等洪灾应急监测信息;在水土保持方面,综合运用遥感技术可以监测土壤侵蚀情况,为水土流失治理与监督提供决策依据。

在一些水利核心业务模型方面,如洪旱灾害遥感监测预警、智能灌溉决策、水土保持监测、河湖监管、水利工程安全巡查、水资源利用等遥感估算模型,虽然遥感大数据的加入明显提升了模型的模拟精度和业务支撑能力,但是由于水利重点业务和涉及观测对象与可提供的遥感数据存在时空差异,在应急场景的时效性要求和目标区域的分辨率要求方面,遥感技术支撑水利应用

能力尚显不足,在水资源利用、河湖治理、水旱灾害防御等水利业务中仍有大量关键技术亟待突破。

二、新时期水利遥感发展面临的挑战

习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路和关于治水重要论述精神为新时代新征程水利高质量发展提供了根本遵循和行动指南。面对新形势、新任务、新机遇,为着力提升水旱灾害防御能力、水资源节约集约利用能力、水资源优化配置能力、江河湖泊生态保护治理能力等,遥感大数据、大模型在水利“大业务”体系中的应用也面临更高的要求。拓宽和丰富多源遥感数据的获取通道,优化涉水要素和水利模型,高效生成高质量的水利遥感产品,并提供充足的算力支持,已成为遥感技术在水利应用中面临的重要挑战。

1. 丰富遥感数据,支撑水利大数据建设

(1) 突破遥感时空分辨率、波段设置对水利应用的制约

针对特定水利业务的遥感数据需求,如何根据业务类型对数据进行筛选和优化处理,是必须面对的问题。通常,不同的水利业务对观测频率的要求不同。例如,监测作物灌溉用水量对观测频率的需求为每天、每小时,而估算灌溉用水量则需要高观测频率(如每30 min)的降水数据来精确捕捉降水事件,同时需要每日或者更高观测频率的土壤水分数据用于分析灌溉事件的发生、水分变化情况以及作物的蒸散发量。对于洪涝等涉水灾害,则需要更高频率的观测数据,用以获得洪水水位和水面变化、地面房屋建筑倒塌情况、农田淹没范围等信息。干旱监测则需要根据旱情发展过程中作物生长状态、缺水量等监测需求相应调整观测频率。水生态监测、河湖岸线监测评估也应根据需求确定观测频率。现实情况下,为应对上述需求需要调动多颗卫星,但各卫星观测频率存在差异,获取数据可能难以满足要求。

除了因观测频率不高导致的数据适用性问题外,光学遥感、微波遥感数据的波段空间分辨率、波段设置等,也制约了数据的使用效能。例如,GRACE数据是目前最广泛应用于地下水波动监测的重力卫星数据,但由于其空间分辨率低于300 km,所以在小型区域或流域并不适用;对于包括农作物用水在内的地表水、生态系统水资源利用监测,需要选择适宜空间分辨率的热红外、可见光、近红外、短波红外、微波数据,以获得

表2 涉水遥感产品信息

产品类别	产品名称	产品内容	覆盖范围	覆盖时长	数据源	空间分辨率	时间分辨率
降水	TRMM系列	降水	全球50° N—50° S	1998年至今	TRMM	0.25°	1~3 h
	CMORPH	降水	全球90° S—90° N	1996年至今	DMSP、NOAA、Aqua、TRMM	0.1°	1 d
	IMERG	降水	全球90° S—90° N	2000年至今	GPM	0.1°	30 min
地表水	全球地表水数据集(JRC)	水体范围	全球	1984—2022年	Landsat	30 m	1 m、1 a
	全球内陆水域数据集(Forel-Ule)	水色	全球	2000—2018年	MODIS	—	8 d
	全球内陆水体高度数据集(ATL13)	水深和水位	全球	2018年至今	ICESat-2	—	—
	HydroWeb	水位	全球(260多个湖泊、1万多条河流)	2016年至今	Envisat, Jason, Sentinel-3等	—	27 d
	SWOT	水体范围	全球	2022年至今	SWOT	Shapefile矢量	11 d
		水面高程	全球	2022年至今	SWOT	128 km×128 km	11 d
	ERA5-Land Reanalysis	水体范围和水量	全球	1950年至今	ECMWF ERA5 Climate Reanalysis	0.1°	1 m/1 d/1 h
	MERRA-2	水体范围和水量	全球	1980年至今	NASA使用戈达德地球观测系统模型(GEOS)	0.5°	1 h
GLCF: Landsat Global Inland Water	水体范围	全球	2000年1月—12月	MODIS和Landsat	30 m	—	
地下水	GRACE Monthly Mass Grids Release 06 Version 04-Land	水体范围和水量	全球	2002—2017年	GRACE卫星观测数据	1°	1 m
	GLDAS-2.2: Global Land Data Assimilation System	水体范围和水量	全球	2003年至今	基于观测降水和向下辐射产物以及大气数据同化系统进行最佳模型分析	0.25°	1 d
土壤水	AMSR-E	土壤水分	全球陆地	2002—2011年	Aqua	6~75 km	1 d
	AMSR-2	土壤水分	全球陆地	2012年至今	Aqua	5~60 km	1 d
	SMOS	土壤水分	全球陆地	2010年至今	SMOS	36 km	1~3 d
	SMAP	土壤水分	全球陆地	2015年至今	SMAP	36 km	1~3 d
蒸散发	MODIS-MOD16	蒸散发	全球陆地	2000年至今	MODIS	500 m、1 km	8 d、1 m、1 a
	ET_PT-JPL	蒸散发	全球陆地	2018年至今	ECOsysteM空间站星载热辐射计与MODIS	70 m	—
	GLEAM	蒸散发	全球陆地	1980年至今/2003年至今	GEWEX、CMORPH、LPRM等	0.25°	1 d
	BESS	蒸散发	全球陆地	2000—2015年	MODIS、ICESat/GLAS、STRM、ERA等	1 km、0.5°	8 d、1 m

地表水储量、土壤水分、地表温度、植被覆盖等信息，进而反演得到蒸散发、径流等模拟数据。

因此，需要梳理不同区域、不同尺度、不同业务对遥感数据的需求体系，通过新增、提升、优化、综合遥感数据源的时空分辨率与波段设置组合，来满足具体

应用需求。

(2) 加强多源遥感数据协同，提升水利业务服务能力

面向智慧水利中遥感大数据的获取、挖掘、应用服务等需求，需要实现从水利业务监测感知到决策支

持的全过程服务能力。目前,随着水利信息化快速发展,各种类型的遥感大数据和相关水利数据呈现快速增长态势。由于业务类型不一、区域下垫面特征各异、已有遥感系统设计差异等,数据获取、数据处理、数据融合、信息提取等缺乏统一规范,造成数据壁垒、协同困难等问题。

此外,受遥感数据的时空分辨率、波段设置等限制,在面向具体水利业务时,往往采用多种遥感数据,或者进行协同处理,以提升数据的可用性和使用效率。如进行灌溉用水监测时,可以利用时空分辨率较高的热红外、可见光等数据,通过经验、物理或人工智能的方法,对土壤水分数据进行降尺度处理,得到更高空间分辨率的土壤水分数据。

这些方法可在一定程度上支持水利业务工作的开展,但新发展阶段河道治理、水生植物监测、河湖岸线监测评估、泄洪区影响、大坝形变监测感知等对时间空间分辨率和波段设置提出了更高的要求,受气象条件、波段可用性和适用性等影响,常规的数据协同应用和处理方法面对这些需求时仍存在局限性。

2. 遥感大模型支撑水利模型智能化建设

(1) 通过大模型提升遥感模型泛化能力,支撑大面积推广应用

受数据源或者机理表达的限制,遥感模型有一定的适用条件,泛化能力不强。比如,蒸散发遥感反演模型大都是在能量平衡、水平衡等方法基础上建立的,受地表温度、土壤水分、植被信息(植被类型、植被覆盖等)及气象信息等输入数据和模型机理表达能力限制,其在区域(干旱半干旱区、湿润半湿润区等)适用性上受限,有限的泛化能力限制了大面积应用,因此有很大的不确定性。引入人工智能技术,进行样本训练和机器学习,可在一定程度上克服模型机理表达方面的不确定性,但由于人工智能模型的适用性与机器学习框架、样本代表性、样本分布有关,所以机器学习结果的泛化能力也有局限。

机理模型和机器学习方法各自存在局限,而可解释的人工智能方法综合了遥感机理模型和机器学习的优势,使大区域应用成为可能。但与此同时,如何采集大量的样本、建立大量的人工智能模型成为新的挑战,建立智能模型仍然具有较大难度。

(2) 通过大模型深化水利机理研究,支撑水利大模型建设

服务水利重点业务,涉及多源遥感数据的时空分

辨率、波段及数据质量,以及涉水要素遥感反演和水利算法等方面。目前趋势倾向于采用机理引导、数据驱动的可解释的人工智能方法。但是,从数据到模型,再到水利业务化应用,涉及的环节较多,如何提升模型方法的泛化能力和水利模型的应用效能至关重要。比如由于输入数据和算法存在差异,需要建立关联多源数据的机器学习框架,通过样本采集和机器学习等方法,实现从数据质量提升、尺度升降、涉水要素反演、水利算法优化、大样本采集,到构建机理引导、数据驱动的全过程水利大模型,以增强多源数据的协同使用,提升水利大模型的可靠性。

模型或机理引导的数据驱动方法可以有效克服传统物理方法的瓶颈问题,但在应对时空差异问题及不同水利业务需求时,水利大模型无疑是最佳选择。建立水利大模型需要时空上分布广泛的大量样本和多种类型的模型支撑,这需要多个行业部门合作,且需要大量地面观测数据及巨大的算力支持,因此具有很大的难度。

由上可知,水利遥感模型、规则、知识等是实现智慧水利的核心,可直接提升水旱灾害防御、水资源高效利用、水网构建等业务的能力和质量。然而,当前在支撑水利业务“四预”方面,遥感技术与遥感大数据融合和智能服务能力尚显不足,亟须将传统的物理模型和智能化模型深度融合,协同实现遥感模型模拟精度高、泛化能力强、计算效率高和服务能力强的应用目标。

3. 交叉融合加强水利应用的深度和广度

目前,涉水要素遥感产品以及相关算法、模型等都得到一定的发展,但水利应用的深度和广度仍存在不足。

已有的水利遥感相关研究或工作较为零散,不系统、不深入,难以促进业务链条进一步衔接和延伸。目前,相关的工作在生态环境、自然资源等领域得到相对快速发展,并且趋于成熟。而在水旱灾害防御、水资源节约集约利用、水网建设、水利工程建管等水利业务应用方面,还更多停留在关键参量(水面信息、冰雪覆盖、土壤湿度、水量、旱情等)的获取上。具体的业务需求需要将多个节点关联起来,形成业务化的链条,发挥遥感的作用。

面向水网、流域、水利工程业务需求,现有的遥感技术或者服务方法针对性不够强。水利遥感需要将遥感技术和水利业务深度融合,现有的方法更多是传统方法的延伸,或者是对发达国家技术进展的跟踪。早

期的学习和跟踪是为了实现从无到有,现在要立足自我实现,从有到强。建议结合我国水利业务对遥感技术的需求开展整体设计与分析,结合具体的水利问题实际进行深挖。

水利场景深挖不足。场景深挖需要深入理解业务需求,梳理问题,优化提升遥感模型。比如灌溉方面,需要根据我国的实际情况,深入研究降雨事件的捕捉、根系水分模拟、水分下渗或者毛细上升等,从每种场景的区域特征、影响事件或因子发生发展过程的角度,深入分析遥感在其中的角色,明确需要攻克的技术内容。

遥感技术和水利模型深入耦合不足。遥感数据和水利模型深度耦合,不仅需要遥感大数据的支持,还要考虑地面物联网数据、水利知识等,从水利模型性能提升的角度,进行数据验证、模型输入以及水利先验知识到模型与模型之间的衔接耦合等。例如,开展区域水资源利用观测,耦合遥感数据和水利模型,模拟地表水、地下水和植被水之间的转化,更深入和详细地模拟降水时长、降水量与冠层截留、土壤湿度、土壤缺水分析模型关联,评估水库蓄水情况,分析泄洪区覆盖区域、影响面积和严重程度等,并进一步对历史数据进行机器学习,挖掘水利风险因子和问题等。

三、遥感技术赋能智慧水利的发展建议

1. 发展水利卫星, 扩展水利观测体系

随着新一代对地观测技术的发展与突破,遥感数据将实现从区域性观测向全球战略性观测的观测广度扩展,从对地物形貌属性识别到地球圈层内部结构及过程变化定量化分析的观测维度扩张,从地球资源静态信息到人与自然平衡的观测深度扩展,这也为立体观测水圈结构与演化提供了新的机遇。

针对云雨三维结构精细透视、地表水资源精准核算、地下水空间展布、蒸散发精准估算、区域水储量重构等重要应用场景,通过发展水利专用卫星,研制基于电磁、重力等原理的新型传感器,与已有对地观测卫星体系相互融合,实现专用化、智能化的水利业务空间观测体系,构建一个以遥感观测为核心的新型“空间水文站”,从而弥补地面水文监测站受限于地域和气候条件而导致的覆盖不全、数据采集困难等问题,进而为构建全面、精准的智慧水利体系提供高效、高质量、高可靠性的数据支撑,促进我国的水资源可持续管理。

2. 强化AI算力, 推进水利行业大模型建设

以遥感观测为核心的新一代对地观测技术,为水利业务的科学决策提供了丰富的数据支撑,与地面水文监测数据共同组成了海量、多模态的水利数据底座。如何更加高效、科学地挖掘更深层信息,赋予其更多应用模式,建立数据水利和物理水利之间更加精准的映射关系,成为智慧水利建设的难题之一。

以规模庞大、结构复杂为特点的大模型技术,可有效地解决现有技术中存在的异构性强、模型泛化能力弱、决策支持精度不高的问题。面向水利智能调度、灾害预警、水资源优化配置等业务需求,可以从以下几个方面发展水利行业大模型:

①多模态数据协同。水利业务中需要应用遥感监测数据、水文观测数据、视频数据等多模态、海量、异构的数据。这些数据在带来丰富信息的同时,也面临着关联挖掘的困境。在大模型构建中,解决多模态数据协同,实现机器理解和大规模异构信息语义集成与互操作已成为数据关联挖掘的重要领域。

②数据与知识双驱动的智能模型。以数据为驱动的智能模型,存在着迁移复用难、样本依赖性强、可解释性弱等局限。知识的加入会有效提升模型的可解释性,进一步提升模型的泛化能力。

③水循环机理的探索。现有的水文模型往往建立在经验统计基础之上,对水循环机理探究和利用相对较少,这在一定程度上限制了水文模型的提升。因此,大模型的构建需要加强对水循环过程的理解与模拟,将机理融入智能计算过程,提升模型时空处理与分析的能力。

3. 深化水利应用, 打造生产力提升新链条

面向水利重点业务纵深和全链条的支撑服务,遥感技术需要深度耦合遥感技术能力和水利需求,针对其中的“硬骨头”开展有协同和组织的技术攻关,突破一批关键核心技术,形成一批高质量的水利遥感技术服务体系,打造形成“水利需求-科研攻关-关键技术-服务提升-新质生产力”的链条,进而延长遥感技术服务水利重点业务的链条,增强水利服务效能,更有效地服务于智慧水利,提升水利智慧化水平,促进水利新质生产力发展。

以水资源收支核算这一热点问题为例。虽然水资源收支核算已有初步的业务分析方法,但是为更加精准核算水资源收支时空格局,科学配置全流域水资源,需要攻克水循环时空分布机制的科学问题以及感知、

估算、评价、配置等一系列关键技术问题。涉及新体制的观测技术,提升对地下水等要素的监测能力;涉及遥感、生态、水文、农业等多学科交叉,提升核算模型精准性;涉及经济、水利、管理等多门类综合,最终实现水资源的优化配置,构建水利新质生产力。这一过程,需要跨部门、跨学科、多层次的耦合联动,保障人才、技术、资金、项目的无缝衔接,形成逐级链式增效反应,最大程度发挥遥感技术在水利行业中的提质增效潜能。

参考文献:

- [1] 侯松,瞿嗣澄.基于遥感图像三区光谱特征的水网城市区域规划协调控制方法[J].计算机测量与控制,2023,31(11):167-172+180.
- [2] 林振通.遥感在小流域水资源监测管理中的应用[J].陕西水利,2023(8):161-163.
- [3] 任娜.美国全球水资源安全战略分析[J].亚太安全与海洋研究,2024(2):72-88+4.
- [4] 孙显,孟瑜,刁文辉,等.智能遥感:AI赋能遥感技术[J].中国图象图形学报,2022,27(6):1799-1822.
- [5] 王伟,余芳滨,曹良中,等.基于GPM数据的华东地区降水时空分布特征研究[J].绿色科技,2023,25(24):8-15.
- [6] 向鹏.周成虎院士:遥感大数据的水利应用[J].高科技与产业化,2023,29(11):12-15.
- [7] 邢伟.拜登政府的全球水资源安全战略[J].现代国际关系,2024(2):121-137+140.
- [8] ZHANG K, LI X, ZHENG D H, et al.Estimation of Global Irrigation Water Use by the Integration of Multiple Satellite Observations[J].Water resources research, 2022, 58(3).
- [9] 赵朝贺,周娟,赵立科,等.水资源遥感动态监测探索与应用[J].陕西水利,2023(4):19-20+24.
- [10] 赵琳.基于多光谱遥感技术的白洋淀水质演变监测方法研究[J].现代信息技术,2023,7(3):106-109.
- [11] 郑慧钦.基于遥感影像的湿地资源的变化监测与结果分析——以罗源湾为例[J].地矿测绘,2023,39(4):1-7.
- [12] 周翔,潘洁,吴一戎.透视地球——新一代对地观测技术[J].遥感学报,2024,28(3):529-540.
- [13] 张素.中国资源卫星应用中心:目前管理15颗在轨卫星[EB/OL].(2017-05-12)[2024-05-25].<https://www.chinanews.com.cn/gn/2017/05-12/8222434.shtml>.
- [14] 宋文龙,马建威,孙亚勇,等.海河“23·7”流域性特大洪水启用蓄滞洪区洪水淹没全过程卫星遥感监测分析[J].中国防汛抗旱,2023,33(10):31-36.
- [15] 孙亚勇,黄诗峰,马建威,等.无人机组网遥感观测技术在洪涝灾害应急监测中的应用研究[J].中国防汛抗旱,2022,32(1):90-95.
- [16] 张吟.机载激光雷达浅水小目标探测技术综述[J].数字海洋与水下攻防,2023,6(4):450-457.

责任编辑 王 慧

(上接第20页)

- [9] 么嘉棋,常奂宇,王梦然,等.新一代水文水资源监测卫星SWOT数据特征、应用与展望[J].地球科学进展,2024,39(4):374-390.
- [10] 周晓青,彭明媛,胡芬.我国陆地遥感卫星发展现状与展望[J].卫星应用,2022(9):14-19.
- [11] 涂梦昭,刘志锋,何春阳,等.基于GRACE卫星数据的中国地下水储量监测进展[J].地球科学进展,2020,35(6):643-656.
- [12] 李德仁,沈欣,李迪龙,等.论军民融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统[J].武汉大

学学报(信息科学版),2017,42(11):1501-1505.

- [13] 宋文龙,马建威,孙亚勇,等.海河“23·7”流域性特大洪水启用蓄滞洪区洪水淹没全过程卫星遥感监测分析[J].中国防汛抗旱,2023,33(10):31-36.
- [14] 孙亚勇,黄诗峰,马建威,等.无人机组网遥感观测技术在洪涝灾害应急监测中的应用研究[J].中国防汛抗旱,2022,32(1):90-95.
- [15] 张吟.机载激光雷达浅水小目标探测技术综述[J].数字海洋与水下攻防,2023,6(4):450-457.

责任编辑 王 慧