

百种中国杰出学术期刊

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 24 卷 第 7 期 2020 年 7 月

目 次

综述

- 基于多源信息的水资源立体监测研究综述..... 岩腊, 龙笛, 白亮亮, 张才金, 韩忠颖, 李兴东, 王文, 申邵洪, 冶运涛 (787)
- 光学遥感影像道路提取的方法综述 戴激光, 王杨, 杜阳, 朱婷婷, 谢诗哲, 李程程, 方鑫鑫 (804)

研究进展

- 新冠病毒疫情期间复工复产卫星遥感监测 陶金花, 范萌, 顾坚斌, 陈良富 (824)
- 从遥感考古走向空间考古——文化遗产保护时代的新任务 王心源, 骆磊 (837)

中国遥感卫星

- 风云四号卫星东南沿海热带气旋强度深度学习估算 崔林丽, 陈昭, 于兴兴, 陈光琛, 王晓峰, 陆一闻, 郭巍 (842)
- 高分五号热红外传感器多通道 SST 反演 崔文杰, 李家国, 李忠, 朱利, 王殿忠, 张宁 (852)

博士论坛

- 三种国际主流的北极卫星遥感冰速产品评估和分析 施骞, 苏洁 (867)
- 青岛胶州湾跨海大桥 InSAR 形变数据分解和信息提取 朱茂, 沈体雁, 吕凤华, 葛春青, 白书建, 贾智慧, 王大伟 (883)

遥感应用

- 地基激光雷达灌丛化草原小叶锦鸡儿生物量估算 刘晓亮, 隋立春, 白永飞, 赵旦, 赵玉金, 刘艳书, 翟秋萍 (894)
- 青藏高原地区近地表冻融状态判别算法研究 张子谦, 赵天杰, 施建成, 李玉霖, 冉有华, 陈莹莹, 赵少杰, 王健, 宁志英, 杨红玲, 韩丹 (904)
- 陆地表层覆盖变化对地表反照率影响的四国对比 郑瑜晗, 黄麟, 翟俊 (917)

本期责任编辑:边钊

《遥感学报》网络版: www.jors.cn

《遥感学报》微信公众号及官网



订阅号



官网

JOURNAL OF REMOTE SENSING (Chinese)

(Vol. 24 No.7 July, 2020)

CONTENTS

Review

- A review on water resources stereoscopic monitoring systems based on multisource data YAN La, LONG Di, BAI Liangliang, ZHANG Caijin, HAN Zhongying, LI Xingdong, WANG Wen, SHEN Shaohong, YE Yuntao (803)
- Development and prospect of road extraction method for optical remote sensing image
... DAI Jiguang, WANG Yang, DU Yang, ZHU Tingting, XIE Shizhe, LI Chengcheng, FANG Xinxin (822)

Research Progress

- Satellite observations of the return-to-work over China during the period of COVID-19.....
..... TAO Jinhua, FAN Meng, GU Jianbin, CHEN Liangfu (836)
- From remote sensing archaeology to space archaeology: A new task in the era of cultural heritage protection.....
..... WANG Xinyuan, LUO Lei (841)

Chinese Satellites

- Deep learning estimation of tropical cyclone intensity along the southeast coast of China using FY-4A satellite.....
... CUI Linli, CHEN Zhao, YU Xingxing, CHEN Guangchen, WANG Xiaofeng, LU Yiwen, GUO Wei (851)
- Simulation of sea surface temperature retrieval based on GF-5 thermal infrared data
..... CUI Wenjie, LI Jiaguo, LI Zhong, ZHU Li, WANG Dianzhong, ZHANG Ning (866)

Doctor's Voice

- Assessment of Arctic remote sensing ice motion products based on ice drift buoys SHI Qian, SU Jie (882)
- InSAR deformation data decomposition and information analysis of Jiaozhou bay bridge, Qingdao.....
..... ZHU Mao, SHEN Tiyan, LYU Fenghua, GE Chunqing, BAI Shujian, JIA Zhihui, WANG Dawei (893)

Remote Sensing Applications

- Biomass estimation of *Caragana microphylla* in the shrub-encroached grassland based on terrestrial laser scanning
... LIU Xiaoliang, SUI Lichun, BAI Yongfei, ZHAO Dan, ZHAO Yujin, LIU Yanshu, ZHAI Qiuping (903)
- Near-surface freeze/thaw state mapping over Tibetan Plateau
..... ZHANG Ziqian, ZHAO Tianjie, SHI Jiancheng, LI Yulin, RAN Youhua, CHEN Yingying, ZHAO Shaojie, WANG Jian, NING Zhiying, YANG Hongling, HAN Dan (916)
- Impacts of land cover changes on surface albedo in China, the United States, India and Brazil
..... ZHENG Yuhan, HUANG Lin, ZHAI Jun (931)

基于多源信息的水资源立体监测研究综述

岩腊¹, 龙笛¹, 白亮亮¹, 张才金¹, 韩忠颖¹, 李兴东¹, 王文²,
申邵洪³, 冶运涛⁴

1. 清华大学 水利水电工程系 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

3. 长江科学院空间信息技术应用研究所, 武汉 430010;

4. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038

摘要: 水资源监测是水资源管理的基础和支撑。随着中国最严格水资源管理制度的实施, 从水量、水质、用水效率3方面的水资源管理开始向精细化和动态化管理转变。水资源要素具有时空变异大、通量变化快等特点, 单独依靠地面监测手段难以开展大范围动态高效监测。目前中国水资源监测体系的建设, 总体上以地面监测为主, 还不具备水资源精细化和动态化管理需求的监测能力。随着卫星遥感等数据资源的不断丰富和陆面同化系统的不断发展, 建立地面观测、卫星遥感和陆面同化系统三位一体的立体监测体系, 探讨不同监测方式、多要素的协同监测机理、水资源监测要素的组织机制, 对提升中国水资源监控能力具有参考价值。

关键词: 遥感, 多源信息, 立体监测, 协同机理, 水资源管理

引用格式: 岩腊, 龙笛, 白亮亮, 张才金, 韩忠颖, 李兴东, 王文, 申邵洪, 冶运涛. 2020. 基于多源信息的水资源立体监测研究综述. 遥感学报, 24(7): 787-803

Yan L, Long D, Bai L L, Zhang C J, Han Z Y, Li X D, Wang W, Shen S H and Ye Y T. 2020. A review on water resources stereoscopic monitoring systems based on multisource data. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(7): 787-803[DOI:10.11834/jrs.20200123]

1 引言

中国是世界上水资源问题最突出的国家之一, 国家明确提出从“三条红线”为核心内容的最严格水资源管理制度, 即用水单量控制制度、用水效率控制制度、水功能区限制纳污制度和水资源管理的责任与考核制度, 要求从水量、水质、用水效率3方面开展精细化、动态化管理, 从而对水资源监测提出了更高要求(Wang等, 2011)。提高国家水资源监控能力是实行最严格水资源管理制度的关键支撑, 是实现水资源管理科学化、定量化、精细化的必要手段(Cai, 2013)。

目前国内外水资源监测体系建设主要以地面监测为主。在很多地区, 水文气象站和农业监测站分布稀疏, 且存在数据延迟问题, 制约了水资

源管理。日益丰富的卫星遥感监测数据越来越多地被用作地面监测数据的补充, 其作用在缺乏地面观测的区域更为重要。目前, 卫星遥感能够对水循环要素进行直接或间接的测量, 包括降水、蒸散发、径流量、湖泊、水库和河流水位、土壤表面水分、积雪、冰川和总水储量等(Zhang等, 2010; Tang等, 2015; Shi等, 2016; Zhang等, 2016; McCabe等, 2017; 梁顺林等, 2020)。同时, 卫星遥感数据覆盖范围广, 有助于评估区域、国家乃至全球水安全和农业生产、自然灾害等方面的风险。尽管卫星遥感产品在水资源管理中仍存在局限, 但其较大的空间覆盖范围和较高的时间分辨率使其可以提供准实时的全球水循环信息。目前, 国内针对特定水循环要素的卫星相对较少, 而欧美等国水循环卫星相对较多,

收稿日期: 2020-04-24; 预印本: 2020-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2017YFC0405802, 2017YFC0405801)

第一作者简介: 岩腊, 1994年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为多源遥感数据融合及水文水资源应用。E-mail: yan-117@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者简介: 龙笛, 1982年生, 男, 研究员, 研究方向为遥感水文与水资源。E-mail: dlong@tsinghua.edu.cn

其反演算法多采用国外样本进行参数标定和检验等,在中国使用时可能存在精度偏低、适应性不足等问题。此外,全球尺度的卫星遥感产品多面向全球变化研究、大范围旱涝监测等,在时空分辨率、时空连续性及精度等方面往往难以满足中国水资源管理的实际需求。

国外发达国家在水循环要素监测方面已经建立相对完备的体系。如美国地质调查局 USGS (United States Geological Survey) 自 20 世纪 50 年代开始建立的全美水文监测站网,能够实现对地表水、地下水和水质的实时在线监测。除地面和卫星监测外,美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 建有较为成熟的全球陆面数据同化系统 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) (Rodell 等, 2004), 基于卫星遥感监测和数据同化,能够持续提供区域和全球水循环数据。其他可大范围使用的水循环数据集还包括北美陆面数据同化系统 NLDAS (North America Land Data Assimilation System) (Xia 等, 2014) 等。

中国目前的水资源监测体系基本能够支撑各类涉水业务对水文信息的需求,但地面站网密度和监测能力与实际需要仍存在较大差距。近年来随着遥感技术的不断发展,国内外卫星数据资源的不断丰富,涉及水循环各要素开展的反演算法研究和产品应用也不断增多,但大多数是针对单要素、单颗卫星的反演技术,鲜有从水资源管理的角度出发,协同多源卫星数据对地面站点信息进行补充,并针对各要素之间的协同监测机理的研究。除地面和遥感监测外,中国气象局 CMA (China Meteorological Administration) 建有精度较高的中国陆面数据同化系统 CLDAS (China Land Data Assimilation System) (Shi 等, 2011; Qin 等, 2017), 能持续提供覆盖亚洲区域 (0° — 65° N, 60° E— 160° E) 的水文要素包括降水、土壤水分等 7 km 左右分辨率的(准)实时数据集。此外,该同化系统可以输出逐小时不同土层深度的土壤温、湿度,以及气压、气温、湿度、风速、太阳辐射等网格气象驱动数据,可一定程度满足气象和农业干旱监测、山洪地质灾害气象服务、气候系统模式评估等业务需求 (Zhu and Shi, 2014)。

本文所述的水资源立体监测是指利用“天一空一陆一水”多监测平台、多类传感器对多

种水资源监测要素开展协同的、优势互补的监测,以满足水资源管理中对监测要素在时空分辨率、时空连续性和精度等方面的需求。随着中国卫星遥感技术的快速发展,以及卫星数量、时空谱分辨率的不断提高,数据源的丰富程度和价值将进一步提升,可进一步推动卫星遥感技术在水资源监测中的应用。利用多卫星、多传感器资源和地面监测网络,联合构建天地一体化的观测体系,对加强水资源要素的监测能力,提升中国水资源整体监控能力,支撑水资源精细化、动态化管理具有重要意义。本文将从水资源管理的需求和面临的问题出发,重点综述水资源立体监测体系和方法的研究进展,各种水循环要素的遥感反演进展不在此赘述。

2 水资源监测方法

地面站点监测的优势是测量直接、实时、精度高,但不少地区监测网络稀疏,且站点观测仅能代表局部信息,耗时耗力 (Xu 等, 2015)。卫星遥感监测具有大范围覆盖、较高时间分辨率、可提供近实时的全球信息等特点,使其在无站点地区是唯一信息来源。模型模拟(或再分析)数据可提供高时间分辨率且时空连续的水资源要素数据,但其空间分辨率往往较低,不确定性也可能较大。3种监测方式在机理和方法上存在较大差异,在水资源监测实践中需要根据它们独特的优势进行综合利用,以实现对水资源要素的立体监测。3种监测方式的优缺点对比详见表1。

表1 不同水资源监测方式及优缺点对比
Table 1 Advantages and disadvantages of different approaches for water resources monitoring

监测方式	优势	局限
地面观测	测量直接、实时、精度高; 可检验、校正卫星数据和模型模拟数据	代表点或局部信息; 仪器布设耗时耗力、维护成本高
遥感监测	数据覆盖范围大、可提供近实时全球水循环信息; 可补充无站点监测区域信息	监测精度依赖于传感器性能和反演算法;受限于卫星任务期限;可见光、近红外、热红外等波段易受云雨天气影响
模型模拟	可提供(准)实时、时空连续完整的信息; 补充站点和遥感缺测数据	空间分辨率较低; 地区依赖性和不确定性较大

2.1 地面观测

地面监测数据是公认的较为准确的数据源, 常常作为遥感反演和模型模拟结果的检验数据 (Wang 和 Lu, 2016; Peng 等, 2017)。目前较完善的地面监测网逐渐形成, 如国家气象科学数据中心可提供不同区域不同时间尺度的气温、气压、相对湿度、降水和土壤湿度等地面观测数据; 国家地下水监测网络可实时对不同区县地下水水位、水温监测数据进行自动采集、传输和接收; 中国陆地生态系统通量观测网可对不同下垫面 79 个观测站的水热通量的日、季节、年际变化进行长期观测等。虽然地面监测网不断加密, 但仍有一些自然环境复杂的地区 (如青藏高原等) 地面监测站点难以加密。同时, 地面监测数据仍存在一定的人为观测误差和仪器测量误差等。

2.2 遥感监测

遥感监测根据平台的不同, 可分为星载、机载和地面传感器监测。根据不同的任务和监测对象的特点, 遥感技术可以采用不同的电磁波段和传感器进行监测, 如采用可见光、近红外、热红外波段探测地物分类、地表蒸散 (Liu 等, 2015; Guo 等, 2017; Long 和 Singh, 2010, 2012a, 2012b; Yang 等, 2013), 利用穿透性较强的微波波段信息可获取表层土壤水分 (Hasan 等, 2014; Wang 等, 2016)。更重要的是, 遥感对地观测能够在短时间内获得大范围的监测信息, 揭示监测要素的空间分布特征。此外, 由于星载遥感具有周期性和机载遥感灵活机动的特点, 能够实现水循环要素时间变化信息的监测。与地面监测手段最大的不同在于: 遥感在实现大范围监测的同时, 还能保证数据较高的时空分辨率。自然条件恶劣的地区难以铺设高密度地面监测站网, 且建在高寒地区的监测仪器维护困难, 监测成本高。采用不受地面条件限制的遥感监测技术, 使信息的获取获得了极大便利。但遥感监测的精度往往依赖于传感器性能、反演算法、研究区和监测对象特征等因素。因此, 遥感监测往往需要通过其他监测手段 (如地面监测) 进行算法的参数确定和反演结果验证。

此外, 根据传感器性能, 采用精度相对较高的传感器反演的结果, 对精度相对较低的传感器反演的结果进行检验, 也往往是卫星遥感水循环要素检验的策略之一。例如, Tang 等 (2017,

2018) 采用 CloudSat 卫星上的降水观测雷达 CPR 检验和校准 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星降水雷达 PR (Precipitation Radar) 和 GPM (Global Precipitation Measurement) 卫星降水雷达 DPR (Dual-frequency Precipitation Radar) 的降雨和降雪效果, 并采用深度学习模型建立以 GPM 被动微波传感器 GMI (GPM Microwave Imager) 为信息源的更先进的降水反演算法; Huang 等 (2018) 和 Li 等 (2019) 利用无人机光学影像观测的高分辨率河流和湖岸几何特征, 检验 Landsat、中国高分等卫星观测的水体几何特征, 并对 Landsat 观测的河湖水体的几何特征进行了系统的不确定性分析; Cho 等 (2020) 利用美国国家大气和海洋管理局 (NOAA) 的机载土壤伽玛辐射观测, 检验多种基于被动微波成像仪 (如 SSM/I) 和台站观测的雪深和雪水当量产品。

2.3 模型模拟

随着现代水文学的不断深入发展, 人们对水循环过程和各要素之间的相互作用机理的认识不断提高, 很多陆面/水文模型模拟结果能够较好地反映各要素的时空变化规律。例如, 通过数据同化技术, 在模型模拟的动态运行过程中融合多种观测数据后, 可生成具有时空连续和物理一致性的数据集 (Wang 和 Lu, 2016), 极大地丰富了监测要素的可用数据源。全球对地观测系统计划 GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) 提倡共同建立和共享“观测技术—驱动模型—数据同化—监测预测”的研究框架 (Lautenbacher, 2006; Ma 和 Qin, 2012)。数据同化作为联系模型和观测数据的桥梁在其中发挥着重大作用, 一系列大型的数据同化系统不断被研发, 并获得广泛应用, 典型代表包括 GLDAS、NLDAS 和中国的 CLDAS。受限于同化算法的合理性和多种数据的准确性及其空间分辨率, 在某些条件下模型模拟数据空间分辨率和精度较低, 难以满足实际水资源监测的需求。通过融合更为丰富的多源信息以获取分辨率和精度更高的气象场和下垫面特征, 可一定程度改善模拟数据的空间分辨率和精度, 尤其在提高模拟数据的空间异质性和信息丰富度方面具有重要价值。

在水资源要素的监测中, 地面监测数据主要包括地表温度、土壤水分、蒸散发、降水、径流等; 遥感监测数据主要包括基于可见光、近红外

和热红外反演的植被指数、水体指数、作物类型和地表温度等信息，如 Landsat 系列、Terra/Aqua MODIS、风云二/四号卫星、高分卫星和环境卫星等 (Gao, 2010)，以及主被动微波所获取的降水和土壤表面水分信息，如 TRMM (Huffman 等, 2007; Kummerow 等, 1998; Kummerow 等, 2000)、GPM (Draper 等, 2015; Tang 等, 2016; Prakash 等, 2016)、ASCAT (Advanced Scatterometer) (Bartalis 等, 2007; Brocca 等, 2011; Wagner 等, 2013)、AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-

Earth Observing System) (Jackson 等, 2005; Choi 和 Hur, 2012; Feng 等, 2017)、AMSR2 (Advance Microwave Scanning Radiometer 2) (Cho 等, 2017)、SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) (Kerr 等, 2001; Merlin 等, 2013)、SMAP (Soil Moisture Active Passive) (Chan 等, 2018; Colliander 等, 2018; Kim 等, 2018) 等。模型模拟数据包括 CLDAS、GLDAS、NLDAS、ERA5 的降水等气象场、土壤温度、土壤湿度等输出数据。地面、遥感和模型等多源数据及其监测要素属性见表 2。

表 2 地面、遥感、模型等多源数据及其监测要素 (包括但不限于)

Table 2 Description of ground observations, remote sensing, and model-based data sets

数据类型	数据源			监测要素
	卫星	传感器	波段	
遥感	Landsat 7/8	ETM+/OLI/TIRS	可见光、近红外、热红外	植被指数、反照率、地表温度、土壤水分等
	Terra/Aqua	MODIS	可见光、近红外、热红外	植被指数、反照率、地表温度、土壤水分等
	FY-2/FY-4	VISSR/AGRE	热红外	地表温度、土壤水分等
	高分卫星	PMS/WFV/SAR/PMI/IRS/EMI/GMI/DPC	可见光、近红外、微波	植被指数、土壤水分、水体面积等
	HJ-1 A/B	CCD	可见光、近红外	植被指数、水色等
	AMSR2/AMSR-E/SMOS/SMAP/ TMI/ERS/MetOp-A/B	辐射计/散射仪	L/C 波段	亮度温度、土壤水分等
再分析	CLDAS、NLDAS、GLDAS、ERA5			地表温度、降水、土壤水分等
地面观测	热红外辐射计、时域反射仪、蒸发皿、涡度相关仪、大孔径闪烁仪、水位计等			地表温度、土壤水分、蒸散发、降水、径流等

3 水资源立体监测协同机理

为提高国家水资源监控能力，中国陆续开展了地面监测站网建设，在改善水资源管理基础设施薄弱状况，提高水资源管理信息化水平等方面发挥了重要作用。但在地形和环境复杂的区域，地面监测站点仍然稀疏，要构建完备的监测网络，将是一项耗时长、投资大的工程；在地面监测站点相对密集的区域，也有监测不能覆盖的区域和时段。遥感技术凭借周期短、成本低、覆盖面大等优势，在水资源监测中的作用越来越大。

由于在卫星和传感器特性等方面的差异，和特定要素反演算法的适用性（如基于热红外遥感信息反演地表温度的算法仅适用于晴空条件），仅利用单一卫星平台对水循环要素进行监测，难以满足水资源管理中对监测要素时空分辨率、时空

连续性和精度的要求。多源卫星遥感数据（多波段、多平台）的融合方法和技术不断发展，进一步提高了卫星遥感数据的时空分辨率、连续性，改善了影像质量，使卫星遥感数据的潜在价值得到充分利用和发挥（张立福 等, 2019）。

由于地面监测、遥感和模型 3 种方式在监测机理上存在较大差异，具有各自的优势和局限，在水资源监测实践中，通过协同不同监测方式，能够较大程度地提高水资源要素在时空分辨率、时空连续性和精度等方面的性能。在协同各种监测方式之前，应优先发挥遥感监测方式的潜在价值（数据融合技术等）。而遥感数据融合技术是水资源立体协同监测的有力支撑。此外，由于某些水资源监测要素如降水和土壤水分比较容易监测，且监测精度普遍较高，而某些水资源要素如灌溉水量等在监测范围和准确性上仍面临较大挑战。

因此, 多要素协同监测也是水资源协同监测的应有之义。

图1是水资源立体监测协同机理框架图方案以数据融合和协同监测为支撑, 涉及的核心算法包括降尺度、重建、融合和机器学习。其中, 遥感数据融合作为协同监测的支撑手段, 主要包括单一卫星平台数据融合和多卫星平台数据融合两种方式。协同监测方式主要包括: (1) 卫星遥感—地面站点协同监测; (2) 再分析—地面站点协同监测; (3) 卫星遥感—再分析协同监测; (4) 卫星遥感—再分析—地面站点协同监测; (5) 多要素协同监测5种方式。涉及的核心算法包括降尺度、时空重建、数据融合以及机器学习等方法。



图1 协同地面站点、卫星遥感、再分析数据的水资源立体监测协同机理框架图

Fig.1 A framework of water resources stereoscopic monitoring using satellite, reanalysis, and ground observation data

3.1 数据融合

本文的数据融合包括两个方面的内涵: (1) 对水资源要素反演所需的基础性变量 (如地表反射率、植被指数和地表温度等) 的融合, 从数据底层提高对水资源要素的监测能力; (2) 直接对基于不同卫星平台反演的最终水循环要素 (如蒸散等) 进行数据融合。

3.1.1 单一卫星遥感平台融合

卫星遥感平台均搭载具有特定监测目标的传感器, 通过收集目标物发射或反射的电磁波信号, 获取大气、陆地或海洋环境等信息。按照卫星遥感传感器探测波段的波长范围, 可将探测波段分为可见光、近红外、短波红外、热红外和微波等。不同探测波段能够监测不同的目标要素信息。如可见光遥感被广泛应用于地物特征识别, 热红外遥感主要应用于地表温度、土壤水分、林火、水

体热污染等方面的监测。相比可见光遥感, 热红外遥感一般空间分辨率较低 (如 Landsat 8 可见光波段为 30 m 空间分辨率, 而热红外波段空间分辨率为 100 m)。此外, 热红外遥感通常受云的影响, 造成云下信息缺失。对单一卫星遥感平台多波段信息进行数据融合, 能够有效提升遥感信息在空间分辨率及时空连续性等方面的性能。

例如, 在地表温度的监测中, 通过融合单一卫星遥感平台 (如 Landsat) 的多波段数据, 即建立地表温度与植被指数和地表反照率的多元非线性关系 (Kustas 等, 2003; Yang 等, 2010), 可提升热红外地表温度的空间分辨率 (达到与可见光波段相同的空间分辨率)。Zeng 等 (2018) 提出了一种基于多时相时空重建和地表能量平衡对云下地表温度进行恢复的算法, 该方法融合了单一卫星平台 (Terra MODIS) 可见光和近红外信息计算的植被指数, 和基于热红外信息反演的地表温度, 提升了热红外地表温度的时空连续性。

3.1.2 多卫星遥感平台融合

由于各卫星的服务领域、监测范围和搭载传感器的特性存在差异, 其在水资源监测中所能发挥的价值程度也有所差异, 且仅利用单一卫星平台对水循环要素进行监测, 难以满足水资源管理中对监测要素在时空分辨率和连续性等方面的要求。由于不同卫星搭载的传感器特性存在一定差异, 因此在考虑不同传感器间的系统误差的基础上, 融合多种卫星平台信息将极大地丰富监测体系的信息来源, 从而有效提升监测要素在时空分辨率和连续性等方面的性能。

数据融合技术一般应用于水资源监测要素反演所需的基础性变量。例如, Zhu 等 (2010) 提出增强自适应融合算法 (ESTARFM), 对 Landsat 和 MODIS 地表反射率 (红、绿、蓝和近红外波段) 进行数据融合, 从而获得具有较高精度的高分辨率地表反射率数据 (30 m), 时间分辨率也有所提高 (通过数据融合得到的地表反射率数据又被称为类 Landsat 数据), 实现了 Landsat 和 Terra (Aqua) 两种卫星平台间的衔接和优势互补。此外, Yang 等 (2016) 采用 ESTARFM 时空融合算法, 对基于 ASTER 热红外信息反演的地表温度 (90 m) 和 MODIS 地表温度数据进行融合, 获取了具有较高时空分辨率的地表温度数据。Bai 等

(2019) 融合单一卫星遥感平台 (Landsat) 多波段数据, 提升基于 Landsat 反演的热红外地表温度的空间分辨率 (由 60 m/100 m 提升至 30 m), 并进一步采用 ESTARFM 融合 Landsat 地表温度 (30 m) 和 MODIS 地表温度 (1 km), 获得高时空分辨率的地表温度, 应用于田间尺度土壤水分 (30 m) 的估算中。此外, 也有融合超过两个卫星平台且同时利用极轨和静止轨道卫星平台数据的研究。例如, Quan 等 (2019) 对基于静止轨道卫星 FY-2F、极轨卫星 Terra/Aqua MODIS 和 Landsat 反演的地表温度进行数据融合, 充分利用 3 种卫星平台在时空分辨率上的监测优势, 获取了高时空分辨率的地表温度数据 (每小时, 100 m)。

除了对基础变量进行数据融合外, 数据融合技术也可直接应用于水循环要素的反演或模拟结果。例如, Cammalleri 等 (2013) 采用时空自适应融合算法 (STARFM), 直接对由 MODIS 和 Landsat 数据分别反演的蒸散数据进行融合, 提高了蒸散数据的时空分辨率 (30 m)。He 等 (2018) 通过融合 SMAP 被动微波土壤水分 (36 km) 和 Sentinel-1 主动微波观测的后向散射系数 (5 m×20 m), 获取了具有较高精度的 9 km、3 km 和 1 km 共 3 种尺度下的土壤水分数据。

3.2 协同监测

3.2.1 不同监测方式协同

在水资源监测实践中, 需要协同不同监测方式各自的优势, 以满足水资源管理中对监测要素时空分辨率、时空连续性和精度的要求。以下以 Long 等 (2019) 为例阐述协同不同监测方式获取土壤水分。

(1) 卫星遥感一再分析数据协同监测。Long 等 (2019) 首先通过多时相重建方法 (Zeng 等, 2018), 对华北平原云覆盖量小于 15% 的 MODIS 地表温度数据进行恢复, 进而协同重建后的 MODIS 地表温度和再分析地表温度 (CLDAS, 约 7 km×7 km) 获取空间完整、时间连续的 1 km 分辨率地表温度数据, 将其作为关键变量应用于每日空间完整的 1 km 分辨率土壤水分估算中, 实现了基于单一卫星平台数据融合与卫星遥感一再分析数据相结合的地表温度和土壤水分协同监测。

(2) 卫星遥感一地面站点协同监测。协同地

面站点观测数据可以进行精度控制和提高监测要素的地区适用性。如协同较低空间分辨率微波土壤水分产品 (如主被动微波产品合成的 CCI 土壤水分, 约 28 km×28 km)、较高空间分辨率的卫星遥感变量 (MODIS 地表温度、植被指数和反照率, 1 km×1 km) 以及地面站点土壤水分, 采用机器学习模型 (如随机森林模型), 实现了对华北平原大面积土壤水分连续动态监测。该协同方式获取的土壤水分均方根误差 (偏差) 在 $0.041 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($-0.018 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)— $0.064 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($-0.041 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 之间。

(3) 再分析数据一地面站点协同监测。如协同较低空间分辨率再分析土壤水分产品 (CLDAS 土壤水分, 约 7 km×7 km)、较高空间分辨率卫星遥感数据 (MODIS 地表温度、植被指数和反照率) 以及地面站点土壤水分, 获取了每日连续且空间完整的 1 km 分辨率土壤水分。相比卫星遥感一地面站点协同监测方式, 再分析数据一地面站点协同监测获取的土壤水分在精度上得到进一步的提升。该协同方式获取的土壤水分均方根误差 (偏差) 在 $0.036 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($-0.012 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)— $0.056 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($0.008 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 之间。

(4) 卫星遥感一再分析数据一地面站点协同监测。为充分利用不同监测方式的优势, 协同卫星遥感、再分析和地面站点数据可进一步提升对土壤水分的监测能力 (如监测精度等)。如协同较低空间分辨率微波土壤水分产品 (CCI 土壤水分, 约 28 km×28 km) 和再分析土壤水分产品 (CLDAS 土壤水分, 约 7 km×7 km)、较高空间分辨率的卫星遥感数据 (MODIS 地表温度、植被指数和反照率) 以及地面观测土壤水分, 获取了每日连续且空间完整的 1 km 分辨率土壤水分。相比卫星遥感一地面站点、再分析数据一地面站点协同方式, 卫星遥感一再分析数据一地面站点协同监测获取的土壤水分在精度上得到进一步提升。该协同方法获取的土壤水分均方根误差 (偏差) 在 $0.035 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($-0.007 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)— $0.051 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ($0.011 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 之间。

综上所述, 卫星遥感一地面站点协同监测、再分析数据一地面站点协同监测和卫星遥感一再分析数据一地面站点协同监测均利用了地面站点观测数据。主要原因是: 在 Long 等 (2019) 采用机器学习方法对土壤水分进行降尺度的研究中,

充分利用了地面站点观测数据具有较高观测精度的优势，其作为模型训练的参考数据使模型的模拟精度得到很大提升。因此，地面站点观测数据在获取高精度土壤水分中至关重要。

3.2.2 多要素协同

现有大多数水循环和水资源要素的反演和监测大多针对单要素进行（如降水、蒸散、土壤水等），较少考虑各要素在水循环过程中的内在联系和相互作用机制，故反演和监测的要素在精度、时空分辨率和连续性、时间和技术成本开销等方面不一定达到最优。如何将水循环和水资源要素的反演和监测放在水文过程完整的链条中去设计算法和监测方法，以生成相关产品，对水资源管理至关重要。如土壤水分的地面监测相对于地表实际蒸散监测更容易、成本更低、监测精度更高。此外，某些水资源要素如灌溉水量，在监测范围和监测精度上仍面临较大挑战。因此，协同较容易获取的水资源要素监测较难获取或监测精度不高的水资源要素是一种经济可行的监测方式。本文以降水、土壤水、蒸散、地下水和灌溉水量为例对多要素协同监测进行阐述。

（1）土壤水—蒸散协同监测。蒸散受能量和土壤水分的限制，在不同的气候和下垫面条件下二者的贡献各不相同。在水分相对缺乏的半湿润、半干旱和干旱区，地表蒸散发主要受土壤水分限制。因此，在蒸散发估算模型中考虑土壤水分的约束，在某些条件下有望改善蒸散的模拟结果。例如，Anderson等（2007）使用一个简单的土壤水分应力函数，将土壤有效水分分数与实际蒸散与潜在蒸散的比值联系起来并应用于蒸散模拟中，结果表明：土壤水分数据的加入能够解决阴天条件下蒸散模拟的不足。Gokmen等（2012）的研究表明：利用微波土壤水分约束空气动力学阻抗的参数，能够改进蒸散遥感估算模型SEBS对感热通量的模拟，进而提高半干旱地区的蒸散发模拟精度。Sun等（2013）开发了利用土壤湿度控制蒸散估算的彭曼方法，运用基于地表温度—植被指数特征空间得到的土壤湿度指数，提高了日蒸散的模拟精度。Purdy等（2018）将SMAP土壤水分信息与遥感蒸散模型（PT-JPL）相结合，通过约束土壤蒸发和冠层腾发，减小蒸散的误差，提高模型模拟精度。

（2）土壤水—蒸散—降水协同监测。Brocca等（2013）根据水量平衡方程建立降水模型（SM2RAIN），利用卫星遥感土壤水和蒸散产品反推降水，结果表明：协同卫星遥感土壤水和蒸散估算的降水精度较高。此外，还有许多研究在意大利、澳大利亚等多地运用SM2RAIN模型，协同卫星遥感蒸散产品和地面监测土壤水或卫星遥感土壤水产品对降水进行模拟，结果均表明该方法能够有效获取降水信息（Brocca等，2015，2016；Koster等，2016；Ciabatta等，2017；Massari等，2017）。

（3）蒸散—土壤水—地下水协同监测。随着遥感数据的不断增多，极大丰富了水资源监测的信息，为缺资料区的水资源监测提供了长期、稳定的监测信息。数据同化是一种很好的多要素协同监测技术。将地面观测的径流量、土壤水分、雪盖等信息同化到径流量模拟模型中，可提高模拟精度（Trudel等，2014）。Gelsinari等（2020）将实际蒸散同化到非饱和带—地下水耦合模型中，改进了地下水模型对土壤水分和地下水位等变量的模拟。

（4）土壤水—蒸散—降水—灌溉水量协同监测。灌溉量的准确估算对水资源管理至关重要。目前，区域尺度的农业灌溉量主要通过计量设施逐级上报核算，或通过典型田块灌溉量和灌溉面积推算得到，空间上的灌溉信息难以准确获得。协同卫星遥感降水、蒸散、土壤水信息估算灌溉量，是一种估算区域灌溉量的有效途径。Jalilvand等（2019）运用SM2RAIN模型协同遥感土壤水产品（AMSR2）、遥感蒸散发产品（GLEAM V3.1）和地面观测降水数据，对伊朗的一个农业平原的灌溉水量进行了估算。其基本思路是利用非灌溉时段的降水数据，对SM2RAIN的模型参数进行率定，而在灌溉时段对灌溉量进行估算。结果表明：该方法能够实现对逐月灌溉水量的准确模拟。Filippucci等（2020）采用SM2RAIN模型协同地面观测降水和土壤水、卫星遥感蒸散产品对意大利的一个灌区进行灌溉量模拟，结果表明：土壤水分是获取灌溉量的关键信息，且所模拟的月灌溉量与实测月灌溉量具有较高的一致性。

4 水资源立体监测组织机制

水资源要素具有量、质、效等多重属性，且

在水循环过程中,各要素之间存在一定的转换关系。同时,水资源要素本身具有系统性,对各水资源要素的监测不应独立开展。此外,在水资源监测实践中,不同层面的水资源管理对水资源监测要素的需求不同。如国家层面的水资源管理更注重水资源监测要素的覆盖能力(如监测要素的类别和覆盖范围等);流域层面的水资源管理对水资源监测要素的时效性和质量提出更高要求;灌区层面的水资源管理则更注重水资源监测要素的精细化能力(如达到田间尺度的监测)。因此,应根据不同层面的水资源管理需求,建立水资源监测要素的组织机制,综合考虑数据融合技术、不同的协同监测方式、多要素协同监测等手段,以提高不同层面水资源管理对水资源要素的监测能力。水资源立体监测组织机制框架图见图2。

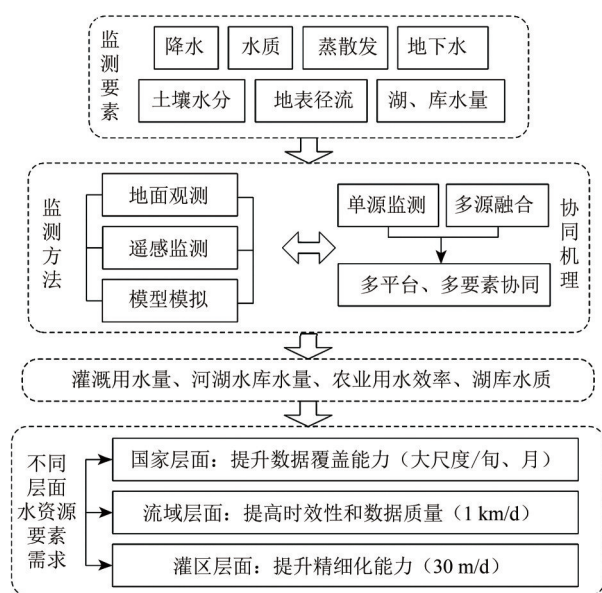


图2 水资源立体监测组织机制框架

Fig.2 A framework of coordination mechanisms of the water resources stereoscopic monitoring system

由于水量、水效和水质监测是水资源监测的3个核心内容,本文将围绕水资源管理中的水量、水效和水质3个方面对水资源立体监测进行综述。

4.1 水量监测

水量监测涉及供水量和用水量,其中供水量监测对象主要包括地表水储量(河川径流、湖库等)和地下水储量;用水量监测对象主要包括农业、工业、生活和生态用水。随着量测设施的不断完善和卫星遥感技术的不断发展,水量监测由

单一监测手段向多源协同监测转变。本文结合水资源管理中面临的具体实际,重点综述湖泊水库水量、地下水储量、以及用水大户农业用水量立体监测的研究进展。

湖泊水库是陆地水循环的重要节点,具有调蓄洪水、调节气候、养殖灌溉等自然生态效益和社会经济效益。对其水量的监测能反映区域水文过程对气候变化的响应,同时可服务于水资源管理、岸区淹没损失预估等。支撑湖泊水库水量变化遥感监测的主要技术包括水位遥感(Guo等, 2009)、水体面积遥感(Wan等, 2014)和河湖水量遥感(Huang等, 2018; Li等, 2019)。传统的水位变化监测通常采用定点、连续观测的方法,能够提供较为准确的水位观测数据,但耗费较大的人力和物力,成本较高。此外,大部分偏远河流上只有少量水文监测站点,甚至无法进行实地测量(Huang等, 2009)。而遥感技术具有准实时、高效和观测范围广等优点,尤其在缺资料区的河湖水量监测中发挥了重要的作用(Brakenridge等, 2005; McCabe等, 2008)。

如Bjerklie等(2003)提出了基于河流水面流速、河宽和水深3个参数的径流全遥感估算模型。Sichangi等(2016)基于多源卫星遥感数据(如Envisat、Jason-2和Terra/Aqua MODIS)获取了河流水位和河宽数据,利用改进的曼宁公式估算了亚马逊和尼罗河的径流量。Huang等(2018)在缺资料高山区联合高空间分辨率光学及合成孔径雷达遥感数据(如Landsat和Sentinel-1/2)提取的河宽和多源测高卫星(Jason-2/3和SARAL/AltiKa)反演的水位,基于遥感径流量估算模型(三角形河宽公式、三角形水位公式和多断面通用公式)反演了雅鲁藏布江多个断面的径流量,纳什效率系数可达0.9。Li等(2019)综合运用卫星测高技术、光学遥感岸线监测,研制了高时间分辨率的2000年—2017年青藏高原湖泊水位、水量变化数据集。该研究将缺资料的大中型湖泊的水位、水量变化数据时间分辨率由年、季尺度提升到月、旬尺度,为遥感监测湖泊溢流风险提供了解决方案。上述研究表明:多源卫星遥感技术的发展和应用,为地表水资源的精确监测提供了可靠的理论和技术支撑,其监测覆盖范围大、受地形因素影响小,具有较大的应用价值。湖库水量立体监测框架见图3。

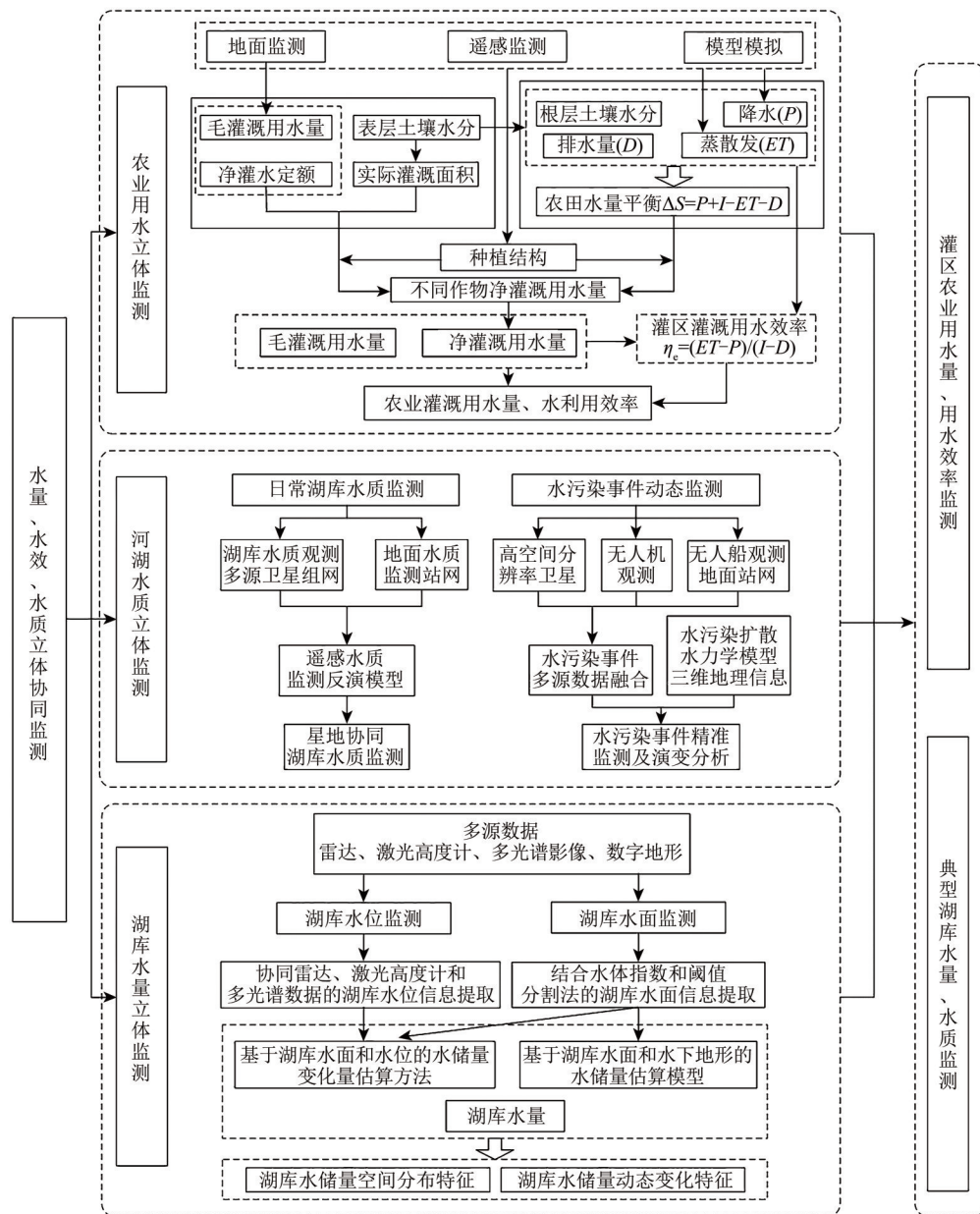


图3 农业用水、河湖水质和湖库水量的立体监测框架

Fig.3 Different scenarios of water resources stereoscopic monitoring

地下水动态监测是地下水有效管理的必然要求，地下水监测站能够提供宝贵的水位变化信息，但难以反映区域的地下水量动态变化。水文模型可用于分析区域水储量变化，但模型输入驱动数据（如降水、辐射等）存在误差，模型物理过程涵盖范围有限，以及缺乏全面的观测资料对模型参数进行有效率定等，使水文模型在估算水储量方面存在地区依赖性和诸多不确定性因素（Long 等，2013；Long 等，2015）。

2002年重力恢复与气候试验 GRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment）卫星的成功发射

和应用，使区域陆地水储量 TWS（Terrestrial Water Storage）变化空间探测成为可能（Rodell 等，2007）。陆地水储量包括地下水、土壤水、地表水（湖库水储量、冰、雪等）储量，其中地下水储量变化可以结合观测的地表水储量变化和模拟的土壤水储量变化从 GRACE 观测的总水储量变化中分离出来。Rodell 等（2007）利用 GLDAS 输出的土壤水分和雪水当量，从 GRACE 卫星数据中提取了密西西比河流域及其 4 个子流域的地下水储量。Strassberg 等（2007）利用 GRACE 卫星数据对美国半干旱区高平原地下水储量变化趋势

进行了评估。Rodell等(2009)利用GRACE卫星观测的水储量变化和GLDAS模拟的土壤水分,对印度西北部平原地下水亏损进行了量化。Ran等(2013)结合GLDAS和GRACE卫星数据反演了2004年—2009年连续72个月的海河流域地下水储量变化。也有研究通过GRACE卫星分析和评估由气候变化或人类活动导致的地下水储量长期变化趋势(Scanlon等, 2012; Feng等, 2013; Long等, 2016)。以上国内外研究实例表明:GRACE卫星在评估和分析区域地下水储量变化方面具有巨大潜力,但GRACE数据空间分辨率较低,如何协同其他高分辨率数据或地下水位观测数据改善其空间分辨率是重要的研究方向。如Long等(2016)将用水的空间分布信息引入到GRACE卫星水储量反演中,提出了应用于陆地水文的约束性前向模拟方法(Constrained Forward Modeling),将地下水储量变化的空间分辨率从约15万km²,提高到3000 km²。

农业用水量是中国经济社会用水中最重要的部分,占总用水量的60%以上(Zhang和Wang, 2015)。农业用水量的准确估算对用水总量统计、农业用水效率计算、粮食安全生产和水资源管理等至关重要。目前,农业灌溉用水量的监测主要通过计量设施逐级上报核算。但由于中国灌区数量多、面积广,加上一些灌区计量设施不完备、耗费人力巨大,给农业灌溉用水的直接量测和灌区水资源管理带来了很大的困难。遥感技术的应用突破了传统的农业灌溉用水监测瓶颈,实现了从点到面的转变,综合地面站点观测或卫星遥感反演的土壤水分、蒸散和降水数据,通过农田水量平衡模型,可以间接估算农业灌溉用水量(Jalilvand等, 2019),为灌区农业用水提供一条可行、便捷的监测途径和更为有效的水资源管理方式。农业用水量立体监框架见图3。具体案例见3.2.2节中的“土壤—蒸散—降水—灌溉水量”协同监测。

4.2 农业用水效率监测

农业用水效率是反映农业节水力度、用水管理和水资源可持续利用的直接指标(Cui等, 2007; Shang等, 2015)。传统的农业灌溉用水效率可表示为贮存在作物根系层的灌溉水量与水源引水量的比值。在当前的灌溉用水管理中,灌区渠首或主要渠道引水量数据可以直接量测获取,

而进入田间的净水量与贮存在作物根系层的灌溉水量难以准确监测。因此,传统的灌溉用水效率在区域水资源管理中进行准确的定量估算比较困难。遥感技术的发展为区域灌溉效率的评价提供了更为合理可行的方法,即首先利用遥感蒸散发模型估算灌区蒸散发,其次从蒸散发量中扣除有效降水量得到灌溉水的有效消耗量(Jiang等, 2013),最终估算出农业灌溉水利用效率,即

$$\eta = (ET - P)/(I - D)$$

式中, η 为灌溉水利用效率; ET 为时段内灌溉地的蒸散发量; P 为时段内灌溉地降水量; I 为时段内灌溉引水量; D 为时段内灌溉排水量。

近年来,遥感蒸散发逐渐被应用于农业灌溉用水效率监测和评价中。Wu等(2015)利用SEBS模型估算了黑河中游灌区的蒸散发量,并进一步评估了灌区灌溉水利用效率。Yang等(2012)利用SEBAL模型估算了内蒙古河套灌区节水改造以来(2000年—2010年)农田蒸散发量的时空变化,并分析了灌区节水改造对农田耗水的影响。Bai等(2017)利用田块尺度遥感蒸散发,估算了河套灌区解放闸灌域不同作物蒸散发量,评估了灌区不同作物灌溉水利用效率及年际变化。上述研究表明:对于农业灌溉水利用效率的监测和评价,需要综合遥感蒸散发、降水、作物种植结构、灌溉取用水量地面监测等信息,协同多种监测手段才能提高农业灌溉水利用效率的精确监测能力,从而进一步满足不同层面、不同区域对农业水资源管理的需求。

4.3 水质监测

水质监测是对河湖水体中的污染物进行监测,包括悬浮物、藻类、化学物质和有机质等。水质监测方法包括地面人工监测、在线自动监测和卫星遥感监测。其中,地面人工监测是常规的水质监测方法,主要通过在水域布置大量的人工监测点并现场采集水样,然后送到实验室测量各种水质参数。地面人工监测能够测量的水质参数种类较多且测量精度较高,但这些测量数据只能代表局部样本点的信息,且受到人力、物力和水文条件等多方面的限制,难以满足对水环境实时、快速、大范围的监测要求。在线自动监测是指通过计算机测控技术和通信技术,自动、实时获取采样点水质状况等。在线自动监测的优点是可以以较短的时间间隔测量水质参数数据,但硬件投入

较大, 需要经常维护, 而且点位分布有限, 同样不适宜开展大范围监测, 不易捕捉污染物的空间分布特征 (Zhang 等, 2019)。利用卫星遥感技术进行水质监测的基本原理是: 根据污染水体在特定波长范围对光吸收和反射特性不同, 通过遥感影像光谱特征识别污染物种类、范围和浓度等 (Hu 等, 2017)。遥感技术应用于水环境监测具有低成本、快速、大范围 and 周期性监测的特点, 可以弥补地面人工监测定时、定点监测的不足, 便于发现污染物的时空分布特征和迁移规律, 从而实现对水环境的长期动态监测, 是地表水质监测的重要补充。

遥感监测水质的常用方法包括经验分析法、半经验分析法和模型分析法 (Zhang 等, 2018)。其中经验分析法和半经验分析法是一种卫星遥感—地面站点协同的监测方式。经验分析法是根据遥感数据与地面实测数据建立统计回归模型, 进而反演水体水质参数。半经验方法是将最佳波段或波段组合的光谱特征与实测水质参数建立统计关系, 对水体水质进行监测。模型分析法基于水体的辐射传输模型, 根据水中叶绿素、悬浮物、有机质的光谱特性, 利用遥感影像与水中各组分的吸收系数和后向散射系数关系模型, 来反演各组分含量。

Li 等 (2006) 利用 Gordon 水质监测模型和水体的光学特性, 建立水体反射率分析模型, 利用 Landsat TM 数据反演了水体悬浮物浓度, 并绘制了太湖悬浮物浓度分布图。刘晓峰等 (2010) 对叶绿素 a、总悬浮物和溶解有机碳的空间异质性及其可能产生的尺度效应进行了研究, 选择 Landsat TM 影像, 使实际测量值与遥感影像最小单元相对应, 消除反演过程中尺度效应带来的误差。Allan 等 (2011) 指出红光波段与叶绿素的相关性最高, 并利用 Landsat 影像反演了新西兰北岛湖泊的叶绿素浓度。Cui 等 (2017) 通过组合 Landsat 8 遥感影像的绿光和红光波段, 与实测光谱数据建立了溶解氧遥感反演模型, 监测了珠江口近岸水域的溶解氧空间分布状况。Zhou 等 (2018) 利用 GF-1 多光谱数据与 82 个站点实测数据构建人工神经网络模型, 对武汉市及其周边地区主要湖泊综合营养状态和水质进行了动态监测。

在河湖水环境监测中, 根据管理工作需求可分为日常和应急两种不同状态下的水环境监测。在日常状态下, 引入卫星遥技术, 可以弥补地面

监测体系的不足, 形成天地一体化河湖水环境监测体系, 实现对河湖水质的全面、快速、自动监测。但受时间、空间和光谱分辨率、成像条件等多因素影响, 采用单一卫星开展湖库水质监测难以满足业务化需求。因此, 在当前卫星资源越来越丰富, 观测性能越来越好的条件下, 利用多星传感器进行水质协同观测, 可以有效弥补单一卫星观测性能的不足。例如在针对小型水域的蓝藻水华监测中, 各卫星数据源普遍存在时间或空间分辨率上的限制, 再加上云雨等气象因素影响, 使用单一传感器监测无法满足对蓝藻水华高频监测的要求。Fang 等 (2018) 联合 HJ-1 A/B、高分一号和 Landsat 8 卫星监测天津于桥水库蓝藻水华的时空分布特征, 相比单一卫星数据源, 采用多星协同监测的方法对于统计水华发生频次、累计发生时间及确定单次水华持续时间等更加客观有效。在应急状态下, 如突发河湖水污染事件, 根据应急条件下的水环境监测特殊要求, 可建设低空、水面一体化应急监测网, 如采用无人机、无人船、移动监测设备对突发河湖污染物边界和扩散情况进行精准、快速监测。Jiang 等 (2019) 联合“天—空—地”监测体系在海河流域于桥水库周边开展了水质监测试验, 利用 GF-1 16 m 空间分辨率数据, 结合航空多光谱数据 (无人机载多光谱成像系统) 和地面实测数据, 反演了库区及上游桑干河流域水域的多种水质参数, 并基于反演的叶绿素浓度、总氮含量和悬浮泥沙含量, 生成了于桥水库藻类爆发风险图、水质分类图和于桥水库浑浊度分布图。河湖水质立体监框架见图 3。

当前地表水环境立体监测仍然有很多需要不断完善和拓展的工作。在数据源方面, 除了卫星遥感数据, 还需充分利用航空遥感 (无人机遥感数据等) 和地面观测数据 (地面人工监测、在线自动监测数据等), 实现“天—空—地”一体化的地表水环境立体监测。此外, 为了进一步促进遥感技术在水环境监测中的业务化应用, 需要提升水质遥感定量化模型的反演精度和构建开放共享的地表水环境遥感监测产品集。

5 结 语

本文从水资源管理的需求和面临的实际问题出发, 结合国内外水资源监测现状, 从水资源立体监测方法、立体监测协同机理和组织机制 3 方面展开论述, 所涉及的水资源要素包括降水、蒸散、

土壤水、径流、湖库水位水量、地下水储量等,并重点阐述了水资源管理中水量、水效和水质3个方面立体监测的研究进展。本研究所综述的一系列相关研究和实践为国家、流域、灌区等不同层面水资源要素的监测提供了理论参考,同时,对提升中国水资源整体监控能力,支撑水资源精细化、动态化管理具有重要意义。

随着遥感科学技术的发展,新的应用领域不断被开拓,传统应用领域也在不断深化。如随着遥感监测数据在时、空、谱分辨率上的不断提高,传统的粗放农业管理正在向精准农业发展。从监测数据在时空分辨率、监测覆盖面、监测精度、监测时效性、监测设备投入产出效益比等方面来看,地面、遥感以及模型模拟产品各有优劣。在水资源监测中,可根据不同的需求开展不同方式、多要素间的协同监测,从而实现对水资源的立体动态监测。但是,在提高监测精度和降低监测成本的途径和方法上需进一步探索,同时,多种数据源的潜在价值有待挖掘,也是未来水资源立体协同监测的研究方向。

中国经济社会已进入内涵式发展阶段,传统的水资源管理模式已不能满足社会发展需要,因此必须加快水资源信息化建设,才能进一步提高水资源管理的质量和效率。如提高各类地面自动采集站点的覆盖度;加强国内涉水观测卫星的研发;利用物联网、大数据、云计算等新兴科学技术,完善水资源监测体系;构建水资源信息互联互通和共享机制,打破不同水资源管理部门信息闭塞的局面,降低信息获取成本;加强信息化人才培养,提升水利信息化管理水平等。这样才能从根本上提升国家水资源信息化建设能力,更好地服务于防汛抗旱、农业生产、河湖管理等,以实现中国水资源的高效利用和社会经济的可持续发展。

志 谢 本研究得到“十三五”国家重点研发计划项目“国家水资源立体监测体系与遥感技术应用”第一、二课题的支持,同时感谢项目其他课题和单位提供的建议。

参考文献 (References)

Allan M G, Hamilton D P, Hicks B J and Brabyn L. 2011. Landsat remote sensing of chlorophyll a concentrations in central North Is-

land lakes of New Zealand. *International Journal of Remote Sensing*, 32(7):2037-2055 [DOI: 10.1080/01431161003645840]

Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, Otkin J A and Kustas W P. 2007. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112: D10117 [DOI: 10.1029/2006JD007506]

Bai L L, Cai J B, Liu Y, Chen H, Zhang B Z and Huang L X. 2017. Responses of field evapotranspiration to the changes of cropping pattern and groundwater depth in large irrigation district of Yellow River basin. *Agricultural Water Management*, 188: 1-11 [DOI: 10.1016/j.agwat.2017.03.028]

Bai L L, Long D and Yan L. 2019. Estimation of surface soil moisture with downscaled land surface temperatures using a data fusion approach for heterogeneous agricultural land. *Water Resources Research*, 55(2): 1105-1128 [DOI: 10.1029/2018WR024162]

Bartalis Z, Wagner W, Naeimi V, Hasenauer S, Scipal K, Bonekamp H, Figa J and Anderson C. 2007. Initial soil moisture retrievals from the METOP - A Advanced Scatterometer (ASCAT). *Geophysical Research Letters*, 34: L20401 [DOI: 10.1029/2007GL031088]

Bjerklie D M, Dingman S L, Vorosmarty C J, Bolster C H and Congalton R G. 2003. Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *Journal of Hydrology*, 278(1-4): 17-38 [DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00129-X]

Brakenridge G R, Nghiem S V, Anderson E and Chien S. 2005. Space-based measurement of river runoff. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 86(19): 185-188 [DOI: 10.1029/2005EO190001]

Brocca L, Hasenauer S, Lacava T, Melone F, Moramarco T, Wagner W, Dorigo W, Matgen P, Martínez-Fernández J and Llorens P. 2011. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3390-3408 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.003]

Brocca L, Massari C, Ciabatta L, Moramarco T, Penna D, Zuecco G, Pianezzola L, Borga M, Matgen P and Martínez-Fernández J. 2015. Rainfall estimation from in situ soil moisture observations at several sites in Europe: an evaluation of the SM2RAIN algorithm. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(3): 201-209 [DOI: 10.1515/johh-2015-0016]

Brocca L, Moramarco T, Melone F and Wagner W. 2013. A new method for rainfall estimation through soil moisture observations. *Geophysical Research Letters*, 40(5): 853-858 [DOI: 10.1002/grl.50173]

Brocca L, Pellarin T, Crow W T, Ciabatta L, Massari C, Ryu D, Su C H, Rüdiger C and Kerr Y. 2016. Rainfall estimation by inverting SMOS soil moisture estimates: A comparison of different methods over Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(20): 12062-12079 [DOI: 10.1002/2016JD025382]

Cai Y. 2013. National Water Resources Monitoring Capacity Building Project and its Progress. *Water Resources Information*, (6): 5-10 (蔡阳. 2013. 国家水资源监控能力建设项目及其进展. 水利信息化, (6): 5-10) [DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2011.06.015]

- Cammalleri C, Anderson M, Gao F, Hain C and Kustas W. 2013. A data fusion approach for mapping daily evapotranspiration at field scale. *Water Resources Research*, 49(8): 4672-4686 [DOI: 10.1002/wrcr.20349]
- Chan S, Bindlish R, O'Neill P, Jackson T, Njoku E, Dunbar S, Chaubell J, Piepmeier J, Yueh S and Entekhabi D. 2018. Development and assessment of the SMAP enhanced passive soil moisture product. *Remote Sensing of Environment*, 204: 931-941 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.025]
- Cho E, Su C-H, Ryu D, Kim H and Choi M. 2017. Does AMSR2 produce better soil moisture retrievals than AMSR-E over Australia? *Remote Sensing of Environment*, 188: 95-105 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.050]
- Choi M and Hur Y. 2012. A microwave-optical/infrared disaggregation for improving spatial representation of soil moisture using AMSR-E and MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, 124: 259-269 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.009]
- Ciabatta L, Marra A C, Panegrossi G, Casella D, Sanò P, Dietrich S, Massari C and Brocca L. 2017. Daily precipitation estimation through different microwave sensors: Verification study over Italy. *Journal of Hydrology*, 545: 436-450 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.057]
- Cho E, Jacobs J M and Vuyovich C M. 2020. The Value of Long-Term (40 years) Airborne Gamma Radiation SWE Record for Evaluating Three Observation-Based Gridded SWE Data Sets by Seasonal Snow and Land Cover Classifications. *Water Resources Research*, 56: 1-23
- Colliander A, Jackson T J, Chan S, O'Neill P, Bindlish R, Cosh M, Caldwell T, Walker J, Berg A and McNairn H. 2018. An assessment of the differences between spatial resolution and grid size for the SMAP enhanced soil moisture product over homogeneous sites. *Remote Sensing of Environment*, 207: 65-70 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.006]
- Cui W J, Xia L H, Xie X T and Pan C H. 2017. A model of dissolved oxygen in the Pearl River estuary based on measured spectrum. *Journal of Guangzhou University*, 16(6): 84-92 (崔文君, 夏丽华, 解学通, 潘翠红. 2017. 基于实测光谱的珠江口溶解氧反演模型. *广州大学学报(自然科学版)*, 16(6): 84-92) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-4229.2017.06.013]
- Cui Y L, Dong B, Li Y H and Cai X L. 2007. Assessment indicators and scales of water saving in agricultural irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 23(7): 1-7 (崔远来, 董斌, 李远华, 蔡学良. 2007. 农业灌溉节水评价指标与尺度问题. *农业工程学报*, 23(7): 1-7) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2007.07.001]
- Draper D W, Newell D A, Wentz F J, Krimchansky S, Skofronick-Jackson G M. 2015. The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): Instrument Overview and Early On-Orbit Performance. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 8(7): 3452-3462 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2403303]
- Fang X, Duan H T, Cao Z G, Shen M and Ge X S. 2018. Remote monitoring of cyanobacterial blooms using multi-source satellite data: A case of Yuqiao Reservoir, Tianjin. *Journal of Lake Sciences*, 30(4): 967-978 (房旭, 段洪涛, 曹志刚, 沈明, 葛小三. 2018. 基于多源卫星数据的小型水体蓝藻水华联合监测—以天津于桥水库为例. *湖泊科学*, 30(4): 967-978) [DOI: 10.18307/2018.0410]
- Feng W, Zhong M, Lemoine J M, Biancale R, Hsu H T and Xia J. 2013. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resources Research*, 49(4): 2110-2118 [DOI: 10.1002/wrcr.20192]
- Feng X, Li J, Cheng W, Fu B, Wang Y and Lü Y. 2017. Evaluation of AMSR-E retrieval by detecting soil moisture decrease following massive dryland re-vegetation in the Loess Plateau, China. *Remote Sensing of Environment*, 196: 253-264 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.012]
- Filippucci P, Tarpanelli A, Massari C, Serafini A, Strati V, Alberi M, Raptis K G C, Mantovani F and Brocca L. 2020. Soil moisture as a potential variable for tracking and quantifying irrigation: A case study with proximal gamma-ray spectroscopy data. *Advances in Water Resources*, 136: 103502
- Gelsinari S, Doble R, Daly E and Pauwels V R N. 2020. Feasibility of improving groundwater modeling by assimilating evapotranspiration rates. *Water Resources Research*, 56, e2019WR025983 [DOI: 10.1029/2019WR025983]
- Gokmen M, Vekerdy Z, Verhoef A, Verhoef W, Batelaan O and Van der Tol C. 2012. Integration of soil moisture in SEBS for improving evapotranspiration estimation under water stress conditions. *Remote Sensing of Environment*, 121: 261-274 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.003]
- Guo J Y, Chang X T, Gao Y g, Sun J L and Hwang C. 2009. Lake level variations monitored with satellite altimetry waveform retracking. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2(2): 80-86 [DOI: 10.1109/jstars.2009.2021673]
- Guo P, Wu F D, Dai J G, Wang H H, Xu L P and Zhang G S. 2017. Comparison of farmland crop classification methods based on visible light images of unmanned aerial vehicles. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(13): 112-119 (郭鹏, 武法东, 戴建国, 王海红, 徐丽萍, 张顺国. 2017. 基于无人机可见光影像的农田作物分类方法比较. *农业工程学报*, 33(13): 112-119) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.015]
- Hasan S, Montzka C, Rüdiger C, Ali M, Bogen H R, Vereecken H. 2014. Soil moisture retrieval from airborne L-band passive microwave using high resolution multispectral data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 91: 59-71 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.005]
- He L, Hong Y, Wu X L, Ye N, Walker J P and Chen X N. 2018. Investigation of SMAP Active - Passive Downscaling Algorithms Using Combined Sentinel-1 SAR and SMAP Radiometer Data. *IEEE transactions on Geoscience and remote sensing*, 56(8): 4906-4918 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2842153]
- Hu H, Hu G X and Li X H. 2017. Summarization of remote sensing monitoring of water quality. *Inner Mongolia Environmental Sciences*, 29(8): 158-160 (胡红, 胡广鑫, 李新辉. 2017. 水体水质遥感监测研究综述. *环境与发展*, 29(8): 158-160) [DOI: 10.16647/j.

- cnki.cn15-1369/X.2017.08.090]
- Huang Q, Long D, Du M D, Zeng C, Qiao G, Li X D, Hou A Z and Hong Y. 2018. Discharge estimation in high-mountain regions with improved methods using multisource remote sensing: A case study of the Upper Brahmaputra River. *Remote Sensing of Environment*, 219: 115-134 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.008]
- Huang Y, Chen X, Bao A M, Liu T and Feng X W. 2009. Daily flow modeling in arid ungauged basin. *Advances in Water Science*, 20 (3): 332-336 (黄粤, 陈曦, 包安明, 刘铁, 冯先伟. 2009. 干旱区资料稀缺法流域日径流过程模拟. *水科学进展*, 20(3): 332-336) [DOI:10.3321/j.issn:1001-6791.2009.03.004]
- Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, Gu, G J, Nelkin E J, Bowman K P, Hong Y, Stocker E F, Wolff D B. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales, *Journal of Hydrometeorology*, 8(1): 38-55 [DOI: 10.1175/JHM560.1]
- Jackson T J, Bindlish R, Cosh M, Gasiewski A, Stankov B, Klein M, Weber B and Zavorotny V. 2005. Soil moisture experiments 2004 (SMEX04) polarimetric scanning radiometer, AMSR-E and heterogeneous landscapes, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2, 1114-1117 [DOI: 10.1109/IGARSS.2005.1525311]
- Jalilvand E, Tajrishy M, Hashemi S A G Z and Brocca L. 2019. Quantification of irrigation water using remote sensing of soil moisture in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111226 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111226]
- Jiang L, Yang Y T and Shang S H. 2013. Evaluation on irrigation efficiency of irrigation district in arid region based on evapotranspiration estimated from remote sensing data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(20): 95-101 (蒋磊, 杨雨亭, 尚松浩. 2013. 基于遥感蒸发模型的干旱区灌区灌溉效率评价. *农业工程学报*, 29(20): 95-101) [DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.20.014]
- Jiang C. 2018. Exploration and practice of application of Gaofen satellite data in remote sensing monitoring of water environment in River Basin. *Satellite Application*, (1): 39-42 (江澄. 2018. 高分数据应用于流域水环境遥感监测的探索与实践. *卫星应用*, (1): 39-42) [DOI:10.3969/j.issn.1674-9030.2018.01.013]
- Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J-P, Martinuzzi J, Font J and Berger M. 2001. Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *IEEE transactions on Geoscience and remote sensing*, 39(8): 1729-1735 [DOI: 10.1109/36.942551]
- Kim H, Parinussa R, Konings A G, Wagner W, Cosh M H, Lakshmi V, Zohaib M and Choi M. 2018. Global-scale assessment and combination of SMAP with ASCAT (active) and AMSR2 (passive) soil moisture products. *Remote Sensing of Environment*, 204: 260-275 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.026]
- Kim K, Park J, Baik J and Choi M. 2017. Evaluation of topographical and seasonal feature using GPM IMERG and TRMM 3B42 over Far-East Asia. *Atmospheric Research*, 187: 95-105 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.12.007]
- Koster R D, Brocca L, Crow W T, Burgin M S and De Lannoy G J. 2016. Precipitation estimation using L-band and C-band soil moisture retrievals. *Water Resources Research*, 52(9): 7213-7225 [DOI: 10.1002/2016WR019024]
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, Shiue J, Simpson J. 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 15(3): 809-817 [DOI: 10.1175/1520-0426(1998)015<0809:TTRMMT>2.0.CO;2]
- Kummerow C, Simpson J, Thiele O, Barnes W, Chang A T C, Stocker E, Adler R F, Hou A, Kakar R, Wentz F, Ashcroft P, Kozu T, Hong Y, Okamoto K, Iguchi T, Kuroiwa H, Im E, Haddad Z, Huffman G, Ferrier B, Olson W S, Zipser E, Smith E A, Wilheit T T, North G, Krishnamurti T, Nakamura K. 2000. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *Journal of applied meteorology*, 39(12): 1965-1982 [DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<1965:TSOTTR>2.0.CO;2]
- Kustas W P, Norman J M, Anderson M C and French A N. 2003. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index - radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*, 85(4): 429-440 [DOI: 10.1016/s0034-4257(03)00036-1]
- Lautenbacher C C. 2006. The global earth observation system of systems: Science serving society. *Space Policy*, 22(1): 8-11 [DOI: 10.1016/j.spacepol.2005.12.004]
- Li X D, Long D, Huang Q, Han P F, Zhao F Y and Wada Y. 2019. High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000 - 2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions. *Earth System Science Data Discussions*, 11(4): 1603-1627 [DOI: 10.5194/essd-11-1603-2019]
- Li Y M, Huang J Z, Lu W N and Shi J Z. 2006. Model-based remote sensing on the concentration of suspended sediments in Taihu Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 37(2): 171-177 (李云梅, 黄家柱, 陆皖宁, 石浚哲. 2006. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测. *海洋与湖沼*, 37(2): 171-177) [DOI:10.3321/j.issn:0029-814X.2006.02.011]
- Liang S L, Bai R, Chen X N, Cheng J, Fan W J, He T, Jia K, Jiang B, Jiang L M, Jiao Z T, Liu Y B, Ni W J, Qiu F, Song L L, Sun L, Tang B H, Wen J G, Wu G P, Xie D H, Yao Y J, Yuan W P, Zhang Y G, Zhang Y Z, Zhang Y T, Zhang X T, Zhao T J and Zhao X. 2020. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019. *Journal of Remote Sensing*, 24(6): 609-662 (梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子锦, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖, 孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥. 2020. 2019年中国陆表定量遥感发展综述. *遥感学报*, 24(6): 609-662) [DOI:10.11834/jrs.20209476]
- Liu J K, Zhong S Q and Liang W H. 2015. Extraction on crops planting structure based on multi-temporal Landsat8 OLI images. *Remote Sensing Technology and Application*, 30(4): 775-783 (刘吉凯, 钟仕全, 梁文海. 2015. 基于多时相Landsat8OLI影像的作物种植结构提取. *遥感技术与应用*, 30(4): 775-783) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.4.0775]
- Liu X F, Duan H T and Ma R H. 2010. The spatial heterogeneity of wa-

- ter quality variables in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2010 (3):63-70 (刘晓峰, 段洪涛, 马荣华. 太湖水体遥感反演参数的空间异质性. *湖泊科学*, 2010(3): 63-70) [DOI: CNKI: SUN: FLKX.0.2010-03-010]
- Long D, Bai L L, Yan L, Zhang C J, Yang W T, Lei H M, Quan J L, Meng X Y and Shi C X. 2019. Generation of spatially complete and daily continuous surface soil moisture of high spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111364 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111364]
- Long D, Chen X, Scanlon B R, Wada Y, Hong Y, Singh V P, Chen Y, Wang C, Han Z and Yang W. 2016. Have GRACE satellites overestimated groundwater depletion in the Northwest India Aquifer? *Scientific reports*, 6: 24398 [DOI: 10.1038/srep24398]
- Long D, Longuevergne L and Scanlon B R. 2015. Global analysis of approaches for deriving total water storage changes from GRACE satellites. *Water Resources Research*, 51(4): 2574-2594 [DOI: 10.1002/2014WR016853]
- Long D, Scanlon B R, Longuevergne L, Sun A Y, Fernando D N and Save H. 2013. GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. *Geophysical Research Letters*, 40(13): 3395-3401 [DOI: 10.1002/grl.50655]
- Long D and Singh V P. 2012a. A modified surface energy balance algorithm for land (M-SEBAL) based on a trapezoidal framework. *Water Resources Research*, 48, W02528 [DOI: 10.1029/2011WR010607]
- Long D and Singh V P. 2012b. A Two-source Trapezoid Model for Evapotranspiration (TTME) from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 121, 370-388 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.015]
- Long D and Singh V P. 2010. Integration of the GG model with SEBAL to produce time series of evapotranspiration of high spatial resolution at watershed scales. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 115: D21128 [DOI: 10.1029/2010jd014092]
- Ma J W and Qin S X. 2012. Recent advances and development of data assimilation algorithms. *Advances in Earth Sciences*, 27(7): 747-757 (马建文, 秦思娴. 2012. 数据同化算法研究现状综述. *地球科学进展*, 27(7): 747-757) [DOI: CNKI: SUN: DXJZ. 0.2012-07-007]
- Massari C, Crow W and Brocca L. 2017. An assessment of the performance of global rainfall estimates without ground-based observations. *Hydrology and earth system sciences*, 21(9): 4347 [DOI: 10.5194/hess-21-4347-2017]
- McCabe M, Wood E F, Wójcik R, Pan M, Sheffield J, Gao H and Su H. 2008. Hydrological consistency using multi-sensor remote sensing data for water and energy cycle studies. *Remote Sensing of Environment*, 112(2): 430-444 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.027]
- McCabe M F, Rodell M, Alsdorf D E, Miralles D G, Uijlenhoet R, Wagner W, Lucieer A, Houborg R, Verhoest N E and Franz T E. 2017. The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and earth system sciences*, 21(7): 3879 [DOI: 10.5194/hess-21-3879-2017]
- Merlin O, Escorihuela M J, Mayoral M A, Hagolle O, Al Bitar A and Kerr Y. 2013. Self-calibrated evaporation-based disaggregation of SMOS soil moisture: An evaluation study at 3 km and 100 m resolution in Catalunya, Spain. *Remote Sensing of Environment*, 130: 25-38 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.11.008]
- Peng J, Loew A, Merlin O and Verhoest N E. 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 55(2): 341-366 [DOI: 10.1002/2016RG000543]
- Prakash S, Mitra A K, Pai D S, AghaKouchak A. 2016. From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? *Advances in water resources*, 88: 1-7 [DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.11.008]
- Purdy A J, Fisher J B, Goulden M L, Colliander A, Halverson G, Tu K and Famiglietti J S. 2018. SMAP soil moisture improves global evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, 219: 1-14 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.023]
- Qin Y H, Wu T H, Wu X D, Li R, Xie C W, Qiao Y P, Hu G J, Zhu X F, Wang W H and Shang W. 2017. Assessment of reanalysis soil moisture products in the permafrost regions of the central of the Qinghai - Tibet Plateau. *Hydrological Processes*, 31(26): 4647-4659 [DOI: 10.1002/hyp.11383]
- Ran Q, Pan Y, Wang Y R, Chen L H and Xu H L. 2013. Estimation of annual groundwater exploitation in Haihe River Basin by use of GRACE satellite data. *Advances in Science Technology of Water Resources*, (2): 42-46 (冉全, 潘云, 王一如, 陈琳海, 许海丽. 2013. GRACE 卫星数据在海河流域地下水年开采量估算中的应用. *水利水电科技进展*, (2): 42-46) [DOI: 10.3880/j.issn.10067647.2013.02.009]
- Rodell M, Chen J, Kato H, Famiglietti J S, Nigro J and Wilson C R. 2007. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 15(1): 159-166 [DOI: 10.1007/s10040-006-0103-7]
- Rodell M, Houser P, Jambor U, Gottschalk J, Mitchell K, Meng C-J, Arsenault K, Cosgrove B, Radakovich J and Bosilovich M. 2004. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3): 381-394 [DOI: 10.1175/BAMS-85-3-381]
- Rodell M, Velicogna I and Famiglietti J S. 2009. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460(7258): 999-1002 [DOI: 10.1038/nature08238]
- Scanlon B R, Long uevergne L and Long D. 2012. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research*, 48(4): W04520 [DOI: 10.1029/2011WR011312]
- Shang S H, Jiang L and Yang Y T. 2015. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 46(10): 81-92 (尚松浩, 蒋磊, 杨雨亭. 2015. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展. *农业机械学报*, 46(10): 81-92) [DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.013]
- Shi C X, Xie Z H, Qian H, Liang M L and Yang X C. 2011. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data. *Science China Earth Sciences*, 54(9): 1430-1440 [DOI: CNKI:SUN:JDXG.0.2011-09-016]

- Shi J C, Xiong C and Jiang L M. 2016. Review of snow water equivalent microwave remote sensing. *Science China Earth Sciences*, 46(4): 529-543 (施建成, 熊川, 蒋玲梅. 2016. 雪水当量主被动微波遥感研究进展. *中国科学:地球科学*, 46(4):529-543) [DOI:10.1360/N072015-00031]
- Sichangi A W, Wang L, Yang K, Chen D, Wang Z, Li X, Zhou J, Liu W and Kuria D. 2016. Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing data sets. *Remote Sensing of Environment*, 179: 36-53 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.019]
- Strassberg G, Scanlon B R and Rodell M. 2007. Comparison of seasonal terrestrial water storage variations from GRACE with groundwater-level measurements from the High Plains Aquifer (USA). *Geophysical Research Letters*, 34(14): L14402 [DOI: 10.1029/2007gl030139]
- Tang G Q, Long D, Wan W, Zeng Z Y, Guo X L and Hong Y. 2015. An overview and outlook of global water remote sensing technology and applications. *Scientia Sinica Technologica*, 45(10): 1013-1023 (唐国强, 龙笛, 万玮, 曾子悦, 郭晓林, 洪阳. 2015. 全球水遥感技术及其应用研究的综述与展望. *中国科学:技术科学*, 45(10):1013-1023) [DOI:10.1360/N092015-00024]
- Tang G Q, Long D, Hong Y, Gao J Y and Wan W. 2018. Documentation of multifactorial relationships between precipitation and topography of the Tibetan Plateau using spaceborne precipitation radars. *Remote Sensing of Environment*, 208: 82-96 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.007]
- Tang G Q, Ma Y Z, Long D, Zhong L Z, Hong Y. 2016. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. *Journal of hydrology*, 533: 152-167 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.008]
- Tang G Q, Wen Y X, Gao J Y, Long D, Ma Y Z, Wan W and Hong Y. 2017. Similarities and differences between three coexisting spaceborne radars in global rainfall and snowfall estimation. *Water Resources Research*, 53: 3835-3853 [DOI: 10.1002/2016WR019961]
- Trudel M, Leconte R and Paniconi C. 2014. Analysis of the hydrological response of a distributed physically-based model using post-assimilation (EnKF) diagnostics of streamflow and in situ soil moisture observations. *Journal of Hydrology*, 514: 192-201 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.072]
- Wagner W, Hahn S, Kidd R, Melzer T, Bartalis Z, Hasenauer S, Figa-Saldaña J, de Rosnay P, Jann A and Schneider S. 2013. The ASCAT soil moisture product: A review of its specifications, validation results, and emerging applications. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(1): 5-33 [DOI: info: doi/10.1127/0941-2948/2013/0399]
- Wan W, Xiao P f, Feng X Z, Li H, Ma R H, Duan H T and Zhao L M. 2014. Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data. *Chinese Science Bulletin*, 59(8), 701-714 (万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 李晖, 马荣华, 段洪涛, 赵利民. 2014. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化. *科学通报*, 59(8): 701-714) [DOI:10.1007/s11434-014-0128-6]
- Wang D W, Huang C L and Gu J. 2016. Impact of Penetration Depth on L-band Microwave Brightness Temperature in Arid Region based on L-MEB Model. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(3): 580-589 (王定文, 黄春林, 顾娟. 2016. 干旱区地表L波段微波辐射特性分析:穿透深度的影响. *遥感技术与应用*, 31(3): 580-589) [DOI: 10.11873/j. issn. 1004-0323.2016.3.0580]
- Wang H, Wang J H and Hu P. 2011. Exploration and analysis of key technological support for the strictest managerial system of water resources. *China Water Resources*, (6): 28-29,32 (王浩, 王建华, 胡鹏. 2011. 实行最严格水资源管理制度关键技术支撑探析. *中国水利*, (6): 28-29, 32) [DOI: 10.3969/j. issn. 1000-1123.2011.06.015]
- Wang W and Lu H. 2016. Progress in application of remote sensing data in hydrological simulation. *Remote Sensing Technology Application*, 30(6): 1042-1050 (汪伟, 卢麾. 2015. 遥感数据在水文模拟中的应用研究进展. *遥感技术与应用*, 30(6): 1042-1050) [DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.6.1042]
- Wu X, Zhou J, Wang H, Li Y and Zhong B. 2015. Evaluation of irrigation water use efficiency using remote sensing in the middle reach of the Heihe river, in the semi-arid Northwestern China. *Hydrological Processes*, 29(9): 2243-2257 [DOI: 10.1002/hyp.10365]
- Xia Y L, Sheffield J, Ek M B, Dong J R, Chaney N, Wei H L, Meng J and Wood E F. 2014. Evaluation of multi-model simulated soil moisture in NLDAS-2. *Journal of Hydrology*, (20): 95-101 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.027]
- Xu B D, Li J, Xin X Z, Zeng Y L and Yin G F. 2015. Review of methods for evaluating representativeness of ground station observation. *Journal of Remote Sensing*, 19(5): 703-718 (徐保东, 李静, 柳钦火, 辛晓洲, 曾也鲁, 尹高飞. 2015. 地面站点观测数据代表性评价方法研究进展. *遥感学报*, 19(5): 703-718) [DOI: 10.11834/jrs.20154178]
- Yang G J, Weng Q H, Pu R L, Gao F, Sun C H, Li H and Zhao C J. 2016. Evaluation of ASTER-like daily land surface temperature by fusing ASTER and MODIS data during the HiWATER-MUSO-EXE. *Remote Sensing*, 8(1): 75 [DOI: 10.3390/rs8010075]
- Yang J X, SU H and Wang Y P. 2010. DisTrad Model for Thermal Sub-pixel Mapping in High Vegetation Area. *Remote Sensing Technology Application*, 25(3): 346-352 (杨静学, 苏华, 王云鹏. 2010. DisTrad热像元分解模型运用于高植被覆盖区的问题及改进. *遥感技术与应用*, 25(3): 346-352) [DOI: 10.3724/SP.J.1087.2010.02819]
- Yang Y T, Long D, Shang S H. 2013. Remote estimation of terrestrial evapotranspiration without using meteorological data. *Geophysical Research Letters*, 40: 3026-3030 [DOI: 10.1002/grl.50450]
- Yang Y T, Shang S H and Jiang L. 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164: 112-122 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.05.011]
- Zeng C, Long D, Shen H F, Wu P H, Cui Y K and Hong Y. 2018. A two-step framework for reconstructing remotely sensed land surface temperatures contaminated by cloud. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 141: 30-45 [DOI: 10.1016/j.is

- prsjprs.2018.04.005]
- Zhang B, Li J S, Shen Q, Wu Y H, Zhang F F and Wang S L. 2019. Key Technologies and Systems of Surface Water Environment Monitoring by Remote Sensing. *Environmental Monitoring in China*, 35(4): 1-9 (张兵, 李俊生, 申茜, 吴艳红, 张方方, 王胜蕾. 2019. 地表水环境遥感监测关键技术与系统. *中国环境监测*, 35(4): 1-9) [DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2019.04.01]
- Zhang C H and Wang G Q. 2015. Water security, and hydrosience and technology in China: Focuses and frontiers. *Scientia Sinica Technologica*, 45(10): 1007-1012 (张楚汉, 王光谦. 2015. 我国水安全和水利科技热点与前沿. *中国科学: 技术科学*, 45(10): 1007-1012) [DOI:10.1360/N092015-00131]
- Zhang J H, Xu Y, Yao F M, Wang P J, Guo W J, Li L and Yang L M. 2010. Advances in estimation methods of vegetation water content based on optical remote sensing techniques. *Science China Technological Sciences*, 40(10): 1121-1129 (张佳华, 许云, 姚凤梅, 王培娟, 郭文娟, 李莉, YANG LiMin. 2010. 植被含水量光学遥感估算方法研究进展. *中国科学: 技术科学*, 40(10): 1121-1129) [DOI:10.1007/s11431-010-0131-3]
- Zhang K, Zhang K, Niu P T and Gao L. 2018. Research Progress of Water Quality Monitoring Technique Based on Remote Sensing. *Modern Mining*, 34(11): 171-174, 202 (张克, 张凯, 牛鹏涛, 高磊. 2018. 遥感水质监测技术研究进展. *现代矿业*, 34(11): 171-174, 202) [DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2011.06.015]
- Zhang L F, Peng M Y, Sun X J, Cen Y and Tong Q X. 2019. Progress and bibliometric analysis of remote sensing data fusion methods (1992—2018). *Journal of Remote Sensing*, 23(4): 600-616 (张立福, 彭明媛, 孙雪剑, 岑奕, 童庆禧. 2019. 遥感数据融合研究进展与文献定量分析(1992-2018). *遥感学报*, 23(4): 600-616) [DOI:10.11834/jrs.20199073]
- Zhang Y, Pan M and Wood E F. 2016. On creating global gridded terrestrial water budget estimates from satellite remote sensing. *Surveys in Geophysics*, 37: 249-268 [DOI: 10.1007/s10712-015-9354-y]
- Zhu X L, Chen J, Gao F, Chen X H and Masek J G. 2010. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2610-2623 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.032]
- Zhu Z and Shi C X. 2014. Simulation and evaluation of CLDAS and GLDAS soil moisture data in China. *Science Technology and Engineering*, 14(32): 138-144 (朱智, 师春香. 2014. 中国气象局陆面同化系统和全球陆面同化系统对中国区域土壤湿度的模拟与评估. *科学技术与工程*, 14(32): 138-144) [DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2014.32.028]
- Zhou Y D, He B Y, Kou J F, Liang S W, Hu S X and Hu K. 2006. Inversion of Lake Trophic Level Index in Wuhan Area Based on GF-1 Images. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27(6): 1307-1314 (周亚东, 何报寅, 寇杰峰, 梁胜文, 胡世祥, 胡柯. 2018. 基于 GF-1 号遥感影像的武汉市及周边湖泊综合营养状态指数反演. *长江流域资源与环境*, 27(6): 1307-1314) [DOI:10.11870/cjlyzyyhj201806014]

A review on water resources stereoscopic monitoring systems based on multisource data

YAN La¹, LONG Di¹, BAI Liangliang¹, ZHANG Caijin¹, HAN Zhongying¹, LI Xingdong¹,
WANG Wen², SHEN Shaohong³, YE Yuntao⁴

1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Spatial Information Research Center, Changjiang Science Institute, Wuhan 430010, China;

4. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: Water resources monitoring is the foundation of water resources management. China is implementing the strictest water resources management system toward precise and dynamic management in terms of water quantity, water quality, and water use efficiency, with higher requirements for water resources monitoring. Water resources components are characterized by large spatial and temporal differences. Currently, the water resources monitoring system is based mainly on ground monitoring. However, it is difficult to carry out large-scale and long-term monitoring based solely on ground measurements. There are still knowledge gaps in the fine and dynamic water resources management. With continuous and rapid increases in satellite data, this paper examines the use of multi-mission satellite data, ground observation systems, and land data assimilation systems to jointly develop a stereoscopic monitoring system, which would be of value to address the monitoring gaps for water cycle components and to enhance the monitoring capability of water resources in China, with important implications for stereoscopic water resources monitoring for other countries and regions globally.

Key words: remote sensing, multisource data, stereoscopic monitoring, coordinated mechanisms, water resources management

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0405802, 2017YFC0405801)