

中国卫星遥感地表水资源监测能力分析与展望

李欢¹, 万玮¹, 冀锐¹, 李国元², 陈晓娜³, 朱思宇¹, 刘宝剑¹,
徐玥¹, 罗增良⁴, 王胜蕾⁵, 崔要奎¹

1. 北京大学 地球与空间科学学院 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

2. 自然资源部 国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

4. 中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院, 武汉 430074;

5. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094

摘要: 在中国自然资源部水资源调查与确权登记的职能需求之下, 面向中国“十四五”及二零三五年远景卫星发展规划, 亟需厘清水资源属性卫星遥感监测国内外发展现状, 并进一步剖析中国卫星地表水资源监测能力。本文在对国内外多种类型卫星(包括光学、激光、雷达、重力、GNSS-R等)水资源监测能力及属性反演前沿技术(以地表固液态水的范围、水位、体积变化等为主)进行总结分析的基础上, 针对中国地表水资源卫星遥感监测的现状和不足, 从观测体系、技术体系、产品体系和服务体系4个方面提出未来卫星遥感地表水资源监测规划设计建议。

关键词: 地表水资源, 卫星遥感水资源监测, 遥感大数据, 卫星规划建议

中图分类号: P2/TP701

引用格式: 李欢, 万玮, 冀锐, 李国元, 陈晓娜, 朱思宇, 刘宝剑, 徐玥, 罗增良, 王胜蕾, 崔要奎. 2023. 中国卫星遥感地表水资源监测能力分析与展望. 遥感学报, 27(7): 1554-1573

Li H, Wan W, Ji R, Li G Y, Chen X N, Zhu S Y, Liu B J, Xu Y, Luo Z L, Wang S L and Cui Y K. 2023. Inspects and prospects of satellite remote sensing monitoring ability for land surface water in China. National Remote Sensing Bulletin, 27(7): 1554-1573 [DOI: 10.11834/jrs.20220576]

1 引言

统一行使全民所有自然资源资产所有者职责和统一行使所有国土空间用途管制和生态保护修复职责, 查清中国各类自然资源家底和变化情况, 自然资源部发布编制《自然资源调查监测体系构建总体方案》(自然资源部, 2020), 提出“调查中国自然资源状况, 包括种类、数量、质量、空间分布等, 监测自然资源动态变化情况”。其中, “水资源调查和确权登记”是自然资源部的新职责, 需要查清“地表水资源量的现状及变化情况”, 即水域资源的分布、范围、面积及动态变化。

近二十年来对地观测技术的飞速发展, 推动了遥感大数据支撑下的新一代全球水循环研究深度

和广度, 也促进了“遥感水文学”学科的发展。国内的高分系列、资源系列等自然资源卫星能够大范围、快速准确地获取水资源的动态变化数据, 从而为水资源调查监测提供丰富的数据源(金建文等, 2020)。《Hydrologic Remote Sensing》遥感水文学专著(Hong等, 2016)提出全球水循环研究包括对通量(Movement)和储量(Storage)的观测(Observation), 认知(Understanding)和预测(Prediction)。其中, “通量”可形象的称为“水槽”, 包括降水、蒸散发、径流等要素, “储量”可形象的称为“水桶”, 包括湖库水体及冰冻圈(冰川、积雪、冻土)要素。上文提到的地表水资源, 主要是指与“储量”相关的要素集合。

本文的主要工作包括如下3个方面: (1) 全面

收稿日期: 2020-12-31; 预印本: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41901346, 41971377); 中国博士后基金(编号:2019M650348)

第一作者简介: 李欢, 研究方向为遥感水循环、海洋遥感、冰冻圈遥感、遥感大数据挖掘。E-mail: huan.li@pku.edu.cn

通信作者简介: 万玮, 研究方向为GNSS遥感和湖泊遥感研究。E-mail: w.wan@pku.edu.cn

分析当前地表卫星遥感水资源监测国内外研究现状；(2) 提出对自然资源部水资源调查和确权登记职责的解析，认为其重点在于定量评估地表液态水（湖泊和水库等）和固态水（冰川等）的相关属性及其时空变化规律，包括液态水的范围、水位、水量、水温、水质等，固态冰川水的范围、高度和储量变化，积雪面积与雪水当量，冻土范围；(3) 面向中国“十四五”及长远规划，从观测体系、技术体系、产品体系和服务体系四个方面提出新一代卫星水资源监测的发展建议。

2 卫星遥感地表水资源监测国内外研究现状

2.1 液态地表水

2.1.1 水体范围

地表水范围监测的遥感手段主要包括光学卫星和雷达卫星。光学卫星主要是指搭载可见光或热红外波段传感器的卫星，该手段可针对地表液态和固态水资源进行持续观测，主要包括国产资源系列卫星、高分系列卫星，欧洲航天局 Sentinel 系列卫星、法国 SPOT 卫星，和美国 Terra/Aqua 星、Landsat 系列卫星、WorldView 高分辨率卫星等。中国卫星遥感高分、资源、环境系列卫星水体观测

在区域地表水提取上得到广泛应用且具有较好的精度（陈前等，2019；胡卫国等，2014；王国华等，2020；邓睿等，2011），如光学 GF-1 应用到山区细小水体提取精度达到 90% 以上（李艳华等，2015），雷达 GF-3 能实现全天候水体信息提取精度达到 85% 以上（谷鑫志等，2019）。

全球长时间序列地表水范围数据集如表 1 所示，包括基于 Landsat 的 30 m 分辨率 GSW（Global Surface Water）数据集（Pekel 等，2016），结合 Landsat 和 HJ-1 卫星的 GlobeLand30 数据集（廖安平 等，2014）和基于 MODIS 的 500 m 分辨率日尺度数据集（Ji 等，2018）等。由表 1 可以看出，目前的全球地表水范围提取精度总体可达到 90% 以上，时间分辨率也由年向月、日尺度发展，时间跨度也越来越长。存在的主要问题是光学卫星本身受到云、阴影等干扰，尚无法实现更高精度的全自动化水体识别，因此未来该领域总体将向智能化、高时空分辨率、高精度、更长时间跨度的方向发展，技术层面也将由基于单一光学传感器到多源数据融合（如合成孔径雷达 SAR、DEM）提取等方向发展，以满足地表水资源管理、时空变化分析、气候变化关联分析、水文灾害监测预警等的应用需求。

表 1 全球多年地表水范围公开数据集

Table 1 Area datasets for long-term global surface water bodies

数据集名称	数据源	时空分辨率	精度/%
Global Surface Water(Pekel 等, 2016)	Landsat	全球 30 m 1984 年—2018 年 月/年尺度	用户精度 98.0±0.5 生产者精度 95.1±1.3
GlobeLand30(Chen 等, 2015; 廖安平 等, 2014)	Landsat HJ-1	全球 30 m 2000 年/2010 年/2020 年 年尺度	用户精度 99 生产者精度 79.6
Tsinghua Surface Water(Ji 等, 2018)	MODIS MOD09GA	全球 500 m 2001 年—2016 年 天尺度	用户精度 94 生产者精度 95
Global inland water dynamics(Pickens 等, 2020)	Landsat	全球 30 m 1999 年—2018 年 月/年尺度	用户精度 97.5±0.7 生产者精度 97.7±0.7
Global Surface Water Extent Dataset(Han and Niu, 2020)	MODIS MOD09Q1	全球 Water bodies >0.0625 km ² 2000 年—2016 年 8 d 尺度	用户精度 91 生产者精度 89

2.1.2 水位

通过卫星上搭载微波雷达高度计、辐射计、合成孔径雷达、激光测高仪等设备,可测量卫星到水面的距离、后向散射系数、有效波高等参数,经过处理和分析后实现对水位的近实时监测(翟国君等,2002;唐国强等,2015),包括雷达测高卫星和激光测高卫星。雷达测高卫星主要包括Skylab, Geos-3, ERS-1/2, TOPEX/Poseidon, Envisat, Jason-1/2/3, CryoSat-2 和 Sentinel-3A。其中, CryoSat-2 与其他相同类型卫星相比有一个显著的特点,即在地面的轨道分布更密,对于提取面积有限的陆地水体更有优势, Jiang等(2017)使用CryoSat-2的数据对青藏高原大于400个湖泊进行水位测高,几乎包括了所有大于5 km²的湖泊,且均方根误差RMSE (Root Mean Square Error) 达到厘米级; Song等(2015)同时使用了ICESat和CryoSat-2的数据研究了青藏高原131个大于1 km²的湖泊水位, RMSE可达到0.28 m。计划于2021年发射的SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 卫星,将提供宽度大于100 m的高精度全球地表水拓扑数据(Biancamaria等,2016)。

激光测高卫星在监测湖泊、水库水位方面的精度更高,主要有ICESat/ICESat-2、GEDI,以及国内GF-7和陆地碳星上的激光测高数据等。特别是在2018年第二代ICESat卫星发射之后,相比于ICESat对青藏高原132个湖泊的观测,ICESat-2能够观测的湖泊增加到了236个,同时和青海湖的实测数据高度吻合(相关系数 $R^2=0.95$, RMSE=0.1 m)(Zhang等,2019a);除了青藏高原的湖泊,ICESat-2可观测到中国范围内大于10 km²的636个大型湖泊和水库,相对测高误差为0.06 m(Yuan等,2020)。

全球主要的测高卫星水位数据集包括法国HydroWeb全球260多个湖泊的水位及1万多个河流水位监测数据(Crétaux等,2011)、德国DAHITI全球2900多个卫星虚拟水位监测站(Schwatke等,2015)、美国农业部的全球350多个湖泊与水库水位数据集G-REALM(Birkett等,2017)。虽然中国水位测量和欧美还存在差距,但HY-2可以用于大型水面水位测量;以ZY-3 02星为起点的国产激光测高仪也在快速发展(李国元等,2019),精度更高的GF-7星载激光测高仪也进入了数据

分析与验证阶段(左志强等,2020;张新伟等,2020)。中国同时正在开展空间单频激光器、单光子探测器等技术的研制,以实现更高密度的数据获取和更好的反射率测量精度(舒嵘等,2020)。

2.1.3 水量

针对卫星遥感手段获取全球和区域陆表水体水量,已有研究积累了大量技术方法并基于此公开发布了多套数据集(表2)。例如:GLWD (Global Lakes and Wetlands Database) 全球湖泊和湿地面积数据集(Lehner and Döll, 2004)、HydroLAKES全球陆表水体面积和水量数据集(Messenger等,2016)、HydroWeb全球260多个湖泊的水位及部分湖泊水量变化数据集(Crétaux等,2011)、中国和青藏高原湖泊面积数据集(Zhang等,2019b; Wan等,2016)和水量变化数据集(Fang等,2019)等。综合来看,现有研究主要提供了全球尺度陆表水量的单一时段静态数据集,以及区域水量相对变化值的动态数据集,在全球尺度上仍缺少针对全球绝对水量的长时间序列动态数据集。

全球水体水量估算的技术难点主要在于估算模型的构建。一方面,对于面积较大水体的水量变化值估算相对容易,如已有研究针对全球34个大型水库,利用测高和光学卫星数据获取的水位和面积推算水量变化(Gao等,2012),利用GSW和测高卫星监测近30年中国大型湖库水量变化(Fang等,2019; Zhu等,2019)。但测高卫星观测范围有限,难以有效覆盖面积较小的水体。另一方面,水量绝对值的估算难度较大,上述HydroLAKES数据集采用对数坐标系下的线性估计方程生成水量静态估计值,但该方法无法得到时序动态水量信息,为克服该局限,利用数学物理模型模拟水下地形(Zhu等,2019)或通过DEM构建“高程—面积—体积”关系(马小奇等,2019)是新的突破口。因此,从长时间序列水量数据集研制的角度,如何构建稳健的动态水量绝对值估算模型,仍是需要攻关的技术难题。

2.1.4 水温

内陆水体温度产品来自于资源卫星的热红外传感器观测(朱利等,2015)。中分辨率下,内陆水体温度的精度一般可以达到0.5 K。MODIS陆地

温度数据集提供从2000年开始，在1 km分辨率下的全球每日/8 d地表温度；搭载于欧洲航天局系列卫星的ATSR/SLSTR系列传感器，有专门用于测量水体温度的多角度观测算法，提供了1 km分辨率的高精度水体温度观测；ASTER可提供窄幅宽高

空间分辨率（90 m）的内陆与近岸水表温度；搭载于NOAA和MetOp系列卫星的AVHRR传感器提供了宽幅的历史热红外数据，应用于水温反演的算法质量可靠，缺点是空间分辨率较低（4 km），在内陆地区一般应用于大型湖泊的温度反演。

表2 主要的全球水体水量数据集

Table 2 Main volume datasets for global water bodies

数据集名称	数据源	数据范围与数量	数据精度
	相对水量		
Global Lakes and Wetlands Database (Lehner 和 Döll, 2004)	多源数据库整合	全球3067个大湖泊以及654个水库及250000个小湖泊等,包含部分水量	面积 $\geq 1 \text{ km}^2$
Global Reservoir and Dam database (GRand) (Lehner等, 2011)	不同机构提供	全球6862个水库	面积 $\geq 0.01 \text{ ha}$
HydroLakes (Messenger等, 2016)	SRTM	全球142万湖泊、水库	面积 $\geq 10 \text{ ha}$
Global Reservoir Bathymetry (Li等, 2020)	SWO & HydroLakes & ICESat	全球347个水库	—
	相对水量		
TP Lakes (Li等, 2019b)	LandSat, EnviSat, CryoSat, ICESat, Jason	青藏高原52个湖泊, 2000年—2017年	RMSE为0.11 m
Global monitoring of large reservoir (Gao等, 2012)	USDA, CNES, and UW, MODIS	全球34个大水库, 1992年—2010年	NRMSE为3%—15%
HydroWeb (Crétaux等, 2011)	Spot, Landsat, Envisat, Jason-1, ERS-1&2, GFO	水位与面积较全, 包含部分水量变化	RMSE约为10 km ² 根据湖泊数据质量变化

长时间序列的地表和水表温度是监测湖泊变化的重要数据源。例如，利用ATSR/SLSTR系列传感器，ARC Lake、GloboLakes、CGLOPS等项目能够提供世界上约1000个主要湖泊的温度产品 (MacCallum 和 Merchant, 2012)。利用MODIS和AVHRR数据，通过反演青藏地区近400个湖泊的历史温度，把部分湖泊温度数据回溯到1981年 (Liu等, 2019; Wan等, 2018)。研究发现湖泊温度是气候变化的敏感指示器，由降水、冻土和冰川融化补给的湖泊温度，对高原不同区域的气候变化有不同的响应 (Wan等, 2018)。

相比于时空连续性不强的中低分辨率资源卫星，国产卫星搭载的多个热红外传感器可提供高空间分辨率的温度信息 (表4)，特别适合于详查局部地区的水温变化。GF-5 (40 m分辨率, 51 d重访周期) (崔文杰等, 2020)、HJ-1 (300 m, 4 d) (龚绍琦等, 2016) 和CBERS-04 (40/80 m, 26 d) (石海岗等, 2019) 的热红外传感器，可以更精细的反映电站周围等水体的热污染和热异常空间细节。但中国目前尚没有基于国产卫星的业务化水温数据产品，已列入“十四五”规划的5 m红外卫

星在水温测量方面的应用值得期待。

2.1.5 水质

遥感可监测的水质参数主要包括叶绿素浓度 (Chlorophyll Concentration)、悬浮物浓度 (Suspended Solid Concentration)、有色可溶性溶解物 CDOM (Colored Dissolved Organic Matter)、浊度 (Turbidity)、透明度 (Secchi disk depth) 等 (李瑶, 2017)。同时，内陆水体富营养化、水华爆发、黑臭水体等水污染也是水质遥感监测的主要内容之一 (Hu等, 2010; Shen等, 2019)。国内外主要用于内陆水质监测的可见光遥感卫星包括MODIS, MERIS, Landsat, SPOT, Sentinel-2/3, HJ-1, GF-1, HY-1C等 (李瑶, 2017; 段洪涛等, 2019; 王歆晖等, 2020; 朱利等, 2015); 卫星遥感水质监测常用方法主要包括经验法和半分析方法 (段洪涛等, 2019); 基于遥感的水质数据主要有 Diversity II, 包括月尺度叶绿素浓度、总悬浮颗粒物、CDOM、浊度信息，覆盖全球340个内陆水体 (Odermatt等, 2018)。

对于面积较大的湖泊，基于空间分辨率较低的MODIS卫星 (500 m) 即可以满足业务化需要 (Wang

等, 2018)。由于小型水体或水面较窄, 优于百米的
空间分辨率是内陆水体水色遥感反演较为合适的
空间分辨率。中国环境减灾卫星 (HJ-1A, HJ-1B)
可时间 30 m 分辨率下每 2 d 对全国覆盖观测 (朱玉霞
等, 2014), GF-1/2 号均可实现对单个大型河流湖
泊和城市区域的水质参数进行监测 (彭保发等,
2018; 汪雨豪等, 2020), 较高空间分辨率 (50 m)
和时间分辨率 (重访周期 3 d) 的 HY-1C 也较好地
应用到了内陆水体的浊度监测 (周屈等, 2020)。
但在卫星遥感水质监测应用过程中, 因为关键参
数, 如大气条件难以获得, 仍然无法完全取代传
统的测量手段 (Schaeffer等, 2013)。

总体而言, 中国卫星遥感水质监测的时空分
辨率能够满足要求, 但是还需要提高光谱分辨率,
同时发展遥感水质反演模型, 结合更多的实地测
量数据提高卫星遥感水质监测的精度。

2.2 固态地表水

2.2.1 冰川

2.2.1.1 冰川范围

冰川范围提取的卫星遥感数据包括光学卫星
和雷达卫星 (黄磊等, 2014)。光学卫星主要采用
适合大区域长周期冰川变化 Landsat 和 MODIS, 较
高分辨率的 ASTER 适合面积更小的冰川, 且能获
取冰川表面高程 (张国梁等, 2010), 其他更高分
辨率卫星数据如 QuickBird, IKONOS 仅适用于小范
围局部区域 (叶庆华等, 2016)。雷达数据主要采
用 Envisat ASAR, ALOS PALASAR 等 (李澜宇,
2017)。中国 GF-1 光学遥感卫星能有效获取冰川类
型和长度 (杨佰义等, 2016; 徐瑾昊等, 2020),
GF-3 SAR 卫星可作为冰川表面运动的常规数据源
(王群等, 2020)。纯净冰川可以比较容易的提取,
但表碛覆盖冰川、积雪覆盖冰川和山体阴影等问
题, 使得冰川范围自动测图还存在较大的挑战, 目
视解译也容易出现较大偏差, 需要更多实地测量
数据提升精度 (叶庆华等, 2016; Guo等, 2015)。
此外, 主要冰川范围数据产品也较少 (表 3)。

2.2.1.2 冰川高度及储量变化

除应用于液态地表水水位监测外, 雷达测高卫
星和激光测高卫星也被用于测量冰川高度, 主要
的卫星数据有 TOPEX/Poseidon, Cryosat-2, ICESat/
ICESat-2 (寇程, 2014; 李澜宇, 2017; 叶庆华等,
2016)。公里级的雷达测高卫星更适用 7 km 以上宽

的冰川 (Lee等, 2013); 激光测高卫星 ICESat 已
在南北极和格陵兰岛得到大范围应用 (Moholdt等,
2010; Bolch等, 2013), ICESat-2 更是可以将在南
极冰盖上的精度提高到厘米级 (Brunt等, 2019)。
即将发射的测高卫星 SWOT 也可用于冰川高度监
测, 精度约为 10cm (Biancamaria等, 2016)。目前
主要的数据集有冰川高程和质量变化数据 (1985
至今) (WGMS, 2020), SRTM 常作为多期冰川高
度和体积变化的参考数据 (Berthier等, 2006)。中
国光学立体测绘卫星和激光测高卫星有待在冰川
高度监测的业务化应用中发挥重要作用 (权学烽
等, 2019)。由美德联合研制 2002 年发射的重力卫
星 GRACE 为冰川储量变化提供了重要的监测手段
(Wouters等, 2019), 但中国目前尚缺乏重力监测
卫星。

表 3 主要冰川数据产品

Table 3 Main glacier datasets

数据集名称	数据源	时空分辨率	精度
Global Land Ice Measurements from Space (Raup 等, 2007)	ASTER Landsat ETM+ 历史地图和 航空影像	全球 690,000 个 冰川范围 2017 年	—
中国第二次冰川编目 (刘时银等, 2015; Guo 等, 2015)	Landsat TM/ ETM+	中国西北 2006 年—2010 年 一期	人工校正 纯净冰川 ±10 m 表碛区 ±30 m

2.2.2 积雪

2.2.2.1 积雪

面积积雪面积提取主要有光学和微波两种
数据源 (Dong, 2018; Tsai等, 2019)。因积雪高
时空动态变化的特性, 一般通过时间分辨率较高
的中低空间分辨率光学卫星 (如 MODIS、AVHRR、
Sentinel-2A/B) 和微波卫星 (如 SMMR、ERS-1、
FY-3) 进行动态观测生产数据产品 (Dong, 2018),
然后采用高空间分辨率的卫星 (GF-2、Landsat 8)
对数据产品进行验证 (梁顺林等, 2020)。目前全
球积雪数据产品非常丰富, 主要产品如表 4 所示。
中国风云三号 (FY-3) 气象卫星能同时反映积雪面
积及雪水当量等积雪参数信息 (武胜利等, 2018),
同时, 环境减灾小卫星在流域积雪面积信息提取
中也多有应用 (蒋友严等, 2013) 未来中国积雪
面积在数据的精度和时空分辨率方面还有待进一
步改善。

表4 主要积雪面积数据产品
Table 4 Main snow cover extent datasets

数据集名称	数据源	时空分辨率	精度
Interactive multisensor snow and ice mapping system(IMS)(NSIDC,2008)	MODIS、AVHRR、SSM/I、AMSR-E等多卫星数据融合	北半球 1997年至今 日尺度 1 km, 4 km, 24 km	依据可用影像的数量和质量而变化
Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent(Brodzik and Armstrong,2013)	SMMR,SSM/I,SSMIS,VAS	北半球 25 km,1978年至今	春季>90%
JASMES SCE(Hori等,2017)	MODIS、AVHRR	北半球 5公里 1978年至今	>82%
VHRS/NPP Snow Cover (Riggs等,2017)	VIIRS	全球 2012年至今 日尺度375 m	中国区 Kappa系数 0.72
MULSS日积雪产品(武胜利等,2018)	FY-3	中国 2009年至今 日尺度1 km	积雪覆盖90% 积雪深度10 cm 雪水当量10 mm
GlobSnow (Metsämäki等,2015;Luojus等,2020)	Envisat、ERS-2、SMMR、SMM/I	全球日尺度 积雪面积 雪水当量1980年—2018年	精度与验证数据的质量相关

2.2.2.2 雪水当量

雪水当量(积雪深度与密度之积)是重要的积雪观测量之一,主要利用具有一定穿透力的主被动微波遥感卫星进行观测(Dong,2018),同时结合电磁散射/辐射建模和相应算法的开发,实现积雪密度、温度、深度、粒径等积雪信息的遥感反演(施建成等,2016;梁顺林等,2020),相关数据集见表4。其中,积雪深度反演作为重要参数,可进一步反演雪水当量(Tedesco等,2014)。星载被动微波传感器,如SMMR、SSM/I、AMSR-E/AMSR2、FY-3MWRI等,常采用半经验算法反演雪水当量,但受到低空间分辨率(几十公里)的影响,仅适用于大尺度均匀地表应用,目前像元尺度的精度尚无法满足业务化应用(施建成等,2016),需要结合多源遥感数据,提供精细的地表覆盖信息,通过空间降尺度提高产品的分辨率和精度(梁顺林等,2020);主动微波传感器能够实现更高的空间分辨率,如TerraSAR等,由于现有卫星SAR观测频率的限制,难以应用到雪深参数的反演,尚未得到广泛应用(施建成等,2016),GNSS测量雪深主要通过地基测站接收反射信号的信噪比建立雪深反演模型,具有较高的精度,作为遥感雪深反演的有效补充手段(梁顺林等,2020),如通过北斗/GPS信号进行极地雪

深反演(王泽民等,2018;Yang等,2019)。Che等(2008)通过对SMMR、SMM/I、SSM/I/S数据之间的对比校正,生产了覆盖中国的长时间序列积雪深度数据产品,该产品在中国积雪深度研究中得到了广泛应用。未来,基于国产数据的积雪深度数据研发依然是雪水当量研发的主要方向,具体需要结合多源遥感数据,获取地形和地表分类信息,克服被动微波分辨率过低的弊端,同时改进SAR卫星的频段设置,提高雪水当量反演的精度和空间分辨率。

2.2.3 冻土

冻土是气候寒冷地区一种温度等于或低于0℃的含有冰的岩土层,依据热稳定性(年平均地温)及土壤水分冻融状态可以确定冻土的类型及分布范围(Westermann等,2015;李晓民等,2017;冉有华和李新,2019;冉有华等,2021)。冻土通常发育于地表之下,冻结后因低导水率使地表径流增加,同时限制地下水补给和迁移,影响着地表及地下水资源的管理与应用。冻土监测主要通过光学和微波遥感手段(张廷军等,2009a,2009b;Duguay等,2005)。通过光学遥感观测的地表起伏、植被、积雪、土壤类型等局部环境因子,结合物理模型或人工解译提取冻土范围,包括Landsat、

AVHRR、MODIS、ASTER及国产资源和高分系列卫星等(张廷军等; 2009a), 如通过ZY-1和GF-1目视解译获取小区域的冻土分布范围(李晓民等, 2017)。主被动微波具有一定的穿透力, 对土壤冻融状态敏感, 主要包括SMMR、SSM/I、ERS-1、AMSR-E等(张廷军等, 2009a, 2009b; Kim等, 2017)。未来通过发展热红外遥感在内的多种卫星数据, 并融合再分析资料和地面实测数据, 是冻土分布制图的主要方向(冉有华等, 2021)。

2.3 大气水汽

虽然并不直接划分为地表水资源, 但大气水汽是影响遥感影像校正和地表水温度反演的关键参数, 同时由于地—气交互作用(如降水、蒸散等)直接影响地表水资源时空变化, 因此大气水汽的监测对地表水资源监测具有重要的意义。

卫星遥感主要依据大气水汽的波段响应特点, 采用近红外、热红外和微波数据源, 结合经验分析、大气辐射传输原理和物理统计等方法实现大气水汽反演(王伟民等, 2005; 王永前等, 2016)。国际上比较典型的有基于近红外波段的MERIS水汽反演方法(Bennartz和Fischer, 2001)和MODIS业务化水汽产品(Gao和Kaufman, 2003), 仅适用于白天且易受云层的影响; MODIS热红外水汽产品(Seemann等, 2003), 易受地物热辐射的影响; 利用被动微波AMSR-E、SSM/I等卫星数据的大气水汽能克服云层的影响, 但尚处于探索阶段, 且

仍然易受地表辐射的影响(王永前等, 2015)。国际上还包括结合多源数据的水汽数据集, 包括GVaP(Randel等, 1996)、CM-SAF(Schulz等, 2009)、WACMOS(Su等, 2014)等。由于大气水汽反演受到不同区域下垫面的影响, 国内较多研究结合高精度地基观测对MODIS近红外反演的进行区域性反演方法选择和评估(刘备等, 2019; 张金业等, 2014; 魏浩林等, 2021)。中国风云系列卫星(湛华等, 2007; 何杰颖和张升伟, 2012; 宋慈和尹球, 2021)以及HJ星(赵晓磊, 2015)均包含丰富的水汽通道可用于大气水汽反演。综上, 未来应联合多源遥感卫星的优势, 结合地表辐射模型与地基观测, 开发综合反演大气水汽的方法, 以提高大气水汽的反演精度(Wulfmeyer等, 2015; 王永前等, 2016)。

3 中国卫星遥感水资源监测能力分析

3.1 中国自然资源卫星现状

中国目前在轨的自然资源陆地遥感卫星及关键参数如表5所示(来源于自然资源卫星遥感云服务平台, <http://sasclouds.com> [2020-12-31]), 主要包括资源系列和高分系列卫星发射时间、主要载荷及性能指标, 涵盖光学、高光谱、激光、雷达等多种类型, 同时还包括可持续发展卫星1号(又称广目卫星)。其中2 m分辨率的国产卫星影像目前正在自然资源部实现全国陆地水体范围每季度一张图。

表5 目前在轨的自然资源陆地遥感卫星基本参数

Table 5 Basic parameters for Chinese on-orbit land natural resource satellites

卫星及发射时间	主要载荷	性能指标
资源一号02C卫星 2011-01	1台P/MS相机, 2台HR高分辨率相机	<ul style="list-style-type: none"> 轨道: 太阳同步轨道, 约780 km 谱段: 全色HR相机0.5—0.8 μm; P/MS相机全色0.51—0.85 μm, 多光谱0.52—0.59 μm, 0.63—0.69 μm, 0.77—0.89 μm 空间分辨率: 全色HR相机≤ 2.36 m, P/MS相机全色≤ 10 m 幅宽: ≥ 54 km 卫星设计寿命: 3 a
资源三号01卫星 2012-01	3台全色相机, 1台多光谱相机	<ul style="list-style-type: none"> 轨道: 太阳同步轨道, 约500 km 谱段: 全色0.45—0.8 μm, 多光谱0.45—0.52 μm, 0.52—0.59 μm, 0.63—0.69 μm, 0.77—0.89 μm 空间分辨率: 正视全色≤ 2.1 m, 前、后视全色≤ 3.5 m, 多光谱≤ 5.8 m 幅宽: ≥ 50 km 卫星设计寿命: 5 a
高分一号卫星 2013-04	2台2 m分辨率全色/8 m分辨率 多光谱相机, 4台16 m分辨率 多光谱相机	<ul style="list-style-type: none"> 轨道: 太阳同步轨道, 约645 km 谱段: 2 m分辨率全色0.45—0.90, 8/16 m分辨率多光谱相机, 多光谱0.45—0.52 μm, 0.52—0.59 μm, 0.63—0.69 μm, 0.77—0.89 μm 空间分辨率: 全色≤ 2 m, 多光谱≤ 8 m 幅宽: 2台相机组合≥ 60 km; 4台相机组合≥ 800 km 卫星设计寿命: 5—8 a

续表

卫星及发射时间	主要载荷	性能指标
高分二号卫星 2014-08	2台0.8 m多分辨率全色/ 3.2 m分辨率多光谱相机	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约631 km • 谱段:全色0.45—0.9 μm,多光谱0.45—0.52 μm、0.52—0.59 μm、0.63—0.69 μm、0.77—0.89 μm • 空间分辨率:全色\leq0.8m,多光谱\leq3.2 m • 幅宽:2台相机组合\geq45 km • 卫星设计寿命:5—8 a
资源三号02卫星 2016-05	3台全色相机,1台多光谱相机, 1套试验性激光测高仪	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约500 km • 谱段:全色0.45—0.8 μm,多光谱0.45—0.52 μm、0.52—0.59 μm、0.63—0.69 μm、0.77—0.89 μm • 空间分辨率:正视全色\leq2.1 m,前、后视全色\leq2.7 m,多光谱\leq5.8 m • 幅宽:\geq50 km • 卫星设计寿命:5 a
高分三号 2016-08	C波段SAR载荷	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约755 km • 空间分辨率:1 m—500 m • 幅宽:10 km—650 km • 具备条带、聚束、扫描等12种成像模式 • 卫星设计寿命:8 a
高分一号B/C/D卫星(3颗) 2018-03	全色、多光谱相机	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约644 km • 谱段:全色0.45—0.90 μm,多光谱0.45—0.52 μm、0.52—0.59 μm、0.63—0.69 μm、0.77—0.89 μm • 空间分辨率:全色\leq2 m,多光谱\leq8 m • 幅宽:\geq60 km • 卫星设计寿命:6 a
高分五号 2018-05	包括可见短波红外高光谱相机、 全谱段光谱成像仪等6种载荷	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约708 km • 空间分辨率:可见短波红外高光谱相机30m(330个谱段);全谱段光谱成像仪20—40 m(12个谱段,含4个热红外通道) • 幅宽:60 km • 回归周期:\leq60 d • 卫星设计寿命:8 a
高分六号 2018-06	全色多光谱相机和 多光谱中分辨率宽幅相机	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约645 km • 空间分辨率:全色多光谱相机2 m/8 m,多光谱中分辨率宽幅相机16 m • 幅宽:全色多光谱相机\geq90 km,多光谱中分辨率宽幅相机\geq800 km • 重访周期:单星4 d,与高分一号组网2 d • 卫星设计寿命:8 a
资源一号02D卫星 2019-09	可见近红外相机和高光谱相机	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约778 km • 波段:可见光/近红外0.452—1.047 μm(1个全色,8个多光谱);高光谱0.40—2.50 μm(共166个谱段) • 空间分辨率:全色2.5 m,多光谱10 m;高光谱30 m • 幅宽:可见光/近红外相机115 km,高光谱相机60 km • 卫星设计寿命:5 a
高分七号 2019-11	全色多光谱相机和激光测高仪	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约500 km • 谱段:全色0.45—0.8 μm,多光谱0.45—0.52 μm、0.52—0.59 μm、0.63—0.69 μm、0.77—0.89 μm • 空间分辨率:前、后视全色\leq0.8 m,多光谱\leq3.2 m • 幅宽:\geq20 km • 激光测高仪:2波束,1064 nm波长,3 Hz,测距精度优于0.3 m • 卫星设计寿命:8 a
资源三号03星 2020-07	全色多光谱相机和激光测高仪	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道:太阳同步轨道,约500 km • 谱段:全色0.45—0.8 μm,多光谱0.45—0.52 μm、0.52—0.59 μm、0.63—0.69 μm、0.77—0.89 μm • 空间分辨率:正视全色\leq2.1 m,前、后视全色\leq2.7 m,多光谱\leq5.8 m • 幅宽:\geq50 km • 激光测高仪:1波束,1064 nm波长,2 Hz,测距精度优于1.0 m • 卫星设计寿命:8 a

续表

卫星及发射时间	主要载荷	性能指标
高分多模卫星 2020-07	—	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道: 太阳同步轨道, 约 643.8 km • 谱段: 全色 0.45—0.9 μm, 多光谱 0.40—0.45 μm, 0.45—0.52 μm, 0.52—0.59 μm, 0.59—0.625 μm, 0.63—0.69 μm, 0.705—0.745 μm, 0.77—0.89 μm, 0.86—1.04 μm, 0.52—0.59 μm, 0.63—0.69 μm, 0.77—0.89 μm • 空间分辨率: 全色 ≤ 0.5 m, 多光谱 ≤ 2 m • 幅宽: ≥ 15 km • 卫星设计寿命: 8 a
可持续发展科学卫星一号 SDGSAT-1 2021-11	热红外成像仪、微光成像仪、 多光谱相机	<ul style="list-style-type: none"> • 轨道: 太阳同步轨道, 约 505 km • 谱段: 热红外 8—10.5 μm, 10.3—11.3 μm, 11.5—12.5 μm; 微光全色 0.45—0.9 μm, 微光彩色 0.43—0.52 μm, 0.52—0.615 μm, 0.615—0.9 μm; 多光谱 0.38—0.42 μm, 0.42—0.46 μm, 0.46—0.52 μm, 0.52—0.6 μm, 0.63—0.69 μm, 0.765—0.805 μm, 0.805—0.9 μm • 空间分辨率: 多光谱 10 m, 微光全色 10 m, 微光彩色 40 m, 热红外 30 m • 幅宽: 300 km

3.2 中国卫星遥感地表水资源监测能力剖析

本节以关键水资源要素为主线, 将中国卫星遥感地表水资源监测能力与国外情况进行详细对比分析, 并总结现存问题和提出面向新一代卫星观测体系的建议, 如表 6 所示。其中部分数据主要依据卫星硬件参数指标并结合相关参考文献, 综合分析总结出的理论上观测能力, 实际水资源监测能力指标还需根据具体的卫星数据及其实际应用情况确定。

表 6 主要从地表水体、冰川、积雪和冻土角度进行剖析。其中用于地表水范围监测的卫星遥感数据的时空分辨率已经完全和国际接轨甚至有所超越, 但要提高数据的业务化应用能力, 还需要加强光谱波段的设置, 并结合 SAR 卫星实现全天时全天候观测能力。相应地, 冰川范围监测的指标水平也和国际相当, 但受限于卫星影像波段数量、数据质量、空间覆盖度和冰川本身复杂的类型特征如表碛区和易覆盖积雪等的影响, 目前还没有聚焦冰川范围提取的国产卫星数据业务化应用。针对地表水水位和冰川高度监测的测高卫星, 目前的瓶颈在于空间覆盖能力和测量精度都还有待提高, 需要大力发展测高卫星, 以获取更密集和精度更高的监测数据。国内水温和水质监测的时空连续性不高, 还需要针对性地提高卫星数据的统筹规划, 相应地发展观测能力更强、精度更高的热红外卫星和高光谱卫星。积雪面积和雪

水当量国内外已经有丰富的数据集, 中国的时空分辨率和精度还有提高空间。冻土监测目前仍然以地面转孔测量为主, 大面积的观测需要多卫星协同并结合地面观测数据和再分析数据等, 同时发展时空连续性更强的热红外卫星。最后, 导航卫星反射信号遥感技术 (GNSS-R) 具有全天候高频监测能力, 发展 GNSS-R 星座/群, 可作为测高、地表水范围提取、雪水当量等的重要补充手段。中国目前缺乏用于水量和冰川储量变化监测的重力卫星。

除了硬件指标需要满足基本水资源监测需求外, 水资源遥感数据产品生产过程中实际的输入数据 (特征) 和所采用的数据处理方法或者模型, 同样对最终是否能够产生高精度的业务化数据产品有着重要的影响, 并且数据 (特征) 本身比所采用的模型方法更重要 (Wilkinson, 2005; 宫鹏等, 2016)。在针对土地覆盖制图的应用中, 多种分类算法综合比较, 精度的差异基本在 5% 以内, 但通过增加遥感影像波段信息可以将精度提高近 5%, 增加纹理等特征信息能够再提高近 5% (宫鹏等, 2016)。类似的发现也体现在机器学习领域, 更多高质量的训练数据和特征选择, 远比开发一个新算法能得到更好精度提升 (Domingos, 2012)。这里也进一步说明了遥感大数据框架下的海量多源数据协同是一个重要的发展方向。因此在开发新算法的同时, 数据的质量和丰富度需要给予更多关注。

表6 国内外水资源卫星遥感观测能力对比与发展建议

Table 6 Comparison between Chinese and international observation capability for water resources

类型	要素	欧美			中国			现存问题	中国卫星观测体系建议
		卫星/传感器	时空分辨率	精度	卫星	时空分辨率*	精度*		
地表水	范围	Landsat 系列	~16 d 30 m	±1 pixel	CBERS	26 d 20 m	±1 pixel	指标水平相当	光学+SAR 实现全天候、全天候观测
		MODIS	0.5 d 500 m		GF-1/6	4 d 2—16 m			
		Sentinel-2	5 d 10 m		ZY-3 GF-3	5 d 2—6 m 百米级			
	水位	ICESat 系列	点尺度(水体大小相关)	<1 m	ZY-3 03 GF-7	—	<1 m	国内测高卫星缺乏	更密集的测高范围覆盖 发展GNSS-R 星座/群(测高、水体提取、土壤湿度)
		TOPEX/Poseidon	同上						
		JASON 系列	同上						
		Sentinel-3	同上						
		Cryosat-2	同上						
	SWOT#	同上							
	(GNSS-R 测高#)	(小时级)							
水量	GRACE 系列 SWOT#	月尺度 50 km —	—	—	—	—	国内外均为难点	发展重力卫星	
水温	MODIS ASTR/Sentinel-3 ASTER	1 d 500 m >3000 个湖泊/ 0.05° —	0.5 K	GF-5 HJ-1B CBERS	51 d 40 m 4 d 300 m	0.5 K	国内时空连续性不高	发展时空分辨率联系性更强的热红外卫星	
水质	MODIS VIIRS MERIS Sentinel-2 Sentinel-3	1 d 500 m 1 d 500 m 5 d 300 m 5 d 10 m 5 d 300 m	—	HJ-1A/1B, HY-1C/1D, GF-5 ZY-1 02D	4 d 30 m 1 d 50 m 55 d 30 m 3—50 d 30m	—	国内时空连续性不高	发展时空分辨率联系性更强的高光谱高分辨率光学卫星	
冰川	范围	ASTER Landsat 系列	16 d 15m 16 d 30m	±1 pixel	GF-1	4 d 16 m 41 d 2/8 m	±1 pixel	指标水平相当	光学+SAR 识别不同类型冰川
	高度	ICESat 系列 Cryosat-2 ERS/Envisat SWOT# (GNSS-R 测高#)	点尺度 (小时级)	<1 m (小时级)	GF-7	59 d	≤0.3 m 坡度小于 15°	国内测高卫星缺乏	更密集的测高范围覆盖 发展GNSS-R 星座/群(测高、水体提取、土壤湿度)
	质量	GRACE	1 d 50 km	等效水高误差~2 cm	—	—	—	国内重力卫星缺乏	发展重力卫星
积雪	范围	MODIS AVHRR VIIRS Landsat Sentinel-2A/B	1 d 500 m 1 d 4 km 1 d 375 m 16 d 30 m 5 d 15 m	晴空状态下 >93%	FY-3 GF-3 HJ-1A/1B	1 d 1 km 依据成像模式变化	>90% 精度 0.79	国内时空连续性不高	发展时空分辨率联系性更强的可见光—红外卫星
	雪水当量	SMMR, SSM/I AMSR-E/AMSR2 ERS-2 ATSR-2 ENVISAT AATSR	1 d 25 km	>66.7%	FY-3 BDS	1 d 1 km —	10 mm —	指标水平相当	光学+SAR 实现高时空分辨率和精度
冻土	范围	SPOT MODIS Landsat AVHRR SMMR, SSM/I AMSR-E/AMSR2	微波 1 d 25 km	微波年均识别精度 夜间 90.3% 日间 84.3%	ZY 系列 GF 系列	—	—	国内时空连续性不高	多种类型卫星数据协同 发展时空分辨率联系性更强的热红外卫星

注:#为尚未发射卫星;*为理论上的值;—表示不适用/未知;()表示新兴应用卫星。

中国自然资源卫星具备基本的水资源调查能力,但目前仍缺乏完全基于国产卫星的全国范围长时间序列水资源相关数据集。中国水资源卫星总体发展历经“从无到有”(施建成等,2021)并正“从有到精”。对于在轨卫星,下一步应该在提升卫星数据质量的基础上,结合多源卫星数据开发业务化算法模块,生产水资源要素监测数据产品,在以应用为导向的前提下实现水资源数据的业务化生产;对于在研和规划中的卫星,需要通过国家各相关部门紧密合作,以科学和应用问题为导向,建立不同优先级的任务目标,在充分考虑投入成本的前提下,逐步健全卫星体系。

3.3 多卫星统筹的自然资源协同监测

水资源监测是中国自然资源监测任务的一部分,针对自然资源部山水林田湖草等自然资源的系统性监测需求,如何充分利用国内外多种卫星数据资源,制定高效的协同监测框架及任务规划,具有十分重要的意义。

其中典型的案例是由谷歌公司开发并提供免费开放使用的 Google Earth Engine (GEE) 遥感云计算平台 (Gorelick 等, 2017)。GEE 从真正意义上实现了多卫星高效协同监测,集成并实时更新全球主流卫星数据,使用户无需跨越任何遥感数据的高效获取、存储、管理、预处理及高性能计算等技术门槛,即可调用平台提供的矢量、栅格、数值计算、机器学习等函数功能,通过便捷的可视化窗口,实现遥感数据快速处理和信息智能化提取,极大地促进了遥感数据在全球范围自然资源监测中的应用 (Li 等, 2019a),产生许多自然资源监测研究成果,包括地表水 (Pekel 等, 2016)、森林 (Hansen 等, 2013)、农田 (Fisher 等, 2016; Xiong 等, 2017)、牧场 (Xie 等, 2019) 和裸土 (Ying 等, 2017) 等。

中国拥有丰富的自然资源卫星遥感数据资源 (表 5), 要将这些数据高效处理和实时业务化应用, 需要以“遥感大数据+人工智能”的科学理念为指导, 通过开发及时获取、处理、分发及服务的自然资源业务应用模型, 保证卫星遥感数据的持续稳定性的同时, 实现自然资源全天时、全天候、全要素卫星遥感云应用与服务 (石婷婷等, 2020)。

4 中国水资源新一代遥感监测体系规划建设

4.1 观测体系

基于第 3 节中国卫星遥感地表水资源观测能力的分析, 同时结合遥感水文学科发展及透彻认知水循环各要素时空分布及变化规律的迫切需求, 对中国“十四五”卫星遥感水资源监测的观测体系提出如下发展建议:

(1) 统筹考虑自然资源、气象、水利、农业等的业务需求关联性, 建议发展红外、主被动微波结合的新一代云水资源卫星, 实现高精度、高时空分辨率的降水、土壤湿度以及洪水监测等;

(2) 聚焦光学卫星能力的不足, 提高可见光—红外卫星时空分辨率联系性的基础上, 与光学卫星结合实现地表水全天时、全天候观测与冰川、冻土类型识别、雪水当量反演等, 建议积极发展雷达卫星;

(3) 面向中国水资源总量及其变化监测的需求, 需要更密集的测高点覆盖、先进的雷达干涉测量技术、高精度重力梯度测量技术。建议通过大力发展测高卫星和重力卫星, 实现精确的地表水体/冰川高程、地下储水量监测, 进而实现水资源总量评估;

(4) 发展通导遥一体水资源要素监测小卫星星座/星群。依托中国自主北斗导航卫星迅速发展的契机, 设计实施水资源要素监测小卫星星座, 既是国家水资源监测应用的急需, 也是“通导遥一体”航天技术创新发展的历史性机遇。小卫星星座可实现水资源多要素 (土壤湿度、土壤冻融、水体识别分类、河湖库水位、洪水淹没范围和湿地识别分类等) 高时空分辨率、高精度、低成本综合同步监测。

(5) 发展时空分辨率联系性更强的热红外、高光谱卫星, 实现更完备的水温、水质、冻土监测。

4.2 技术体系

首先, 发展数据处理共性技术。主要是面向水资源业务应用的国产卫星数据质量提升, 包括数据校正/拼接技术、多传感器数据融合技术等。以多传感器数据融合为例, 地表水监测根据不同的观测手段有多种数据集, 分别采用不同的方法观

测水体的物理特征，例如可以使用可见光和微波遥感来分辨云、水汽和水体。每一种遥感组合都提供了不同的空间尺度、误差和重访频率。通过将多种内在不同的遥感技术结合起来，可以更好地量化地表水储量和通量长时间变化，包括地表水、地下水、蒸发和径流量。

其次，发展水资源要素提取/反演模型技术。针对目前尚未形成完备的国产卫星水资源要素模型体系，发展水资源要素提取和反演模型与技术，具体可包括如下几个方面：陆表水体面积提取与时空插补、陆表水体动态绝对水量估算、高质量高时空分辨率降水/降雪定量反演、高质量高时空分辨率陆表蒸散发全要素估算、通量储量耦合模型、水量平衡、水温、水质模型等。

最后，发展水资源要素高质量高时空分辨率长时序产品研制技术。针对国产卫星水资源要素业务化产品缺乏，研制水资源要素相关属性的高质量高时空分辨率长时序产品，创建并丰富中国水资源属性的反演技术和数据储备。

4.3 产品体系

面向中国水资源数据产品缺乏的现状，目前国际已有相关数据集由于未充分利用历史卫星数据（如 Landsat MSS）、或仅关注粗时间尺度（如年尺度）、或未能及时更新等因素，导致时间跨度不完整或时间精细度不够，需要针对全球水循环通量和储量要素，发展更高时空粒度、长时间序列、服务全球的数据产品体系。参考国内外已有卫星数据及相关数据产品，中国水资源产品体系发展规划如表7所示，其中时间范围、时空分辨率及可行性主要依据观测卫星的硬件指标（表6）及现有反演数据产品（见第2部分）确定。

具体地，地表水及冰川范围的主要卫星遥感数据源包括 MODIS（日尺度）、Landsat、资源和高分光学系列卫星（月/年尺度）；地表水水位及冰川高度主要通过测高卫星 TOPEX/Poseidon、Jason 系列卫星、CryoSat-2、ICESat/ICESat-2、ZY-3、GF-7 等获取；水表温度依据 MODIS、ASTR/Sentinel-3、ASTER、环境及高分卫星等；水质则综合国际相关卫星及中国海洋、高分、资源、环境等卫星实现；冰川质量变化依据重力卫星 GRACE 相关数据；通量中降水和蒸散发产品则融合多源卫星数据集和站点观测资料实现；水文极端/突变事件主要在水

资源通量和储量相关属性数据的基础上进行分析得到。综上，表7中产品体系是可预见且可以实现的。

表7 产品体系发展规划

Table 7 Development planning for the product system

类型	属性	时间分辨率	时间范围	空间分辨率
地表水	范围	日 月/年	2000年至今 1970s至今	>1 km ² 水体
	水位	日/月	1992年至今	>10 km ² 水体
	水量	月/年	1970s至今	>10 km ² 水体
	水温	日/月	2000年至今	>1 km ² 水体
	水质	日/月	2000年至今	>10 km ² 水体
冰川	范围	月	1970s至今	30 m
	高度	季	2003年至今	激光点尺度 70 m/17 m
	质量变化	月	2002年至今	50 km
通量	降水	半小时	2000年至今	4 km
	蒸散发	日	2000年至今	1 km
极端/突变事件	水文极端事件	—	2000年至今	—
	水体面积、水量突变事件	—	1970s年至今	—

4.4 服务体系

基于丰富的卫星影像、最新遥感反演技术业务化生产的水资源数据集以及全面持久的水资源应用目标架构设计，服务政府、行业与大众。以中国《卫星测绘“十三五”发展规划》的重点任务为基础，面向未来“十四五”的卫星遥感地表水资源监测服务体系规划从如下几个方面展开。

首先，建立“遥感大数据+人工智能”应用服务平台，打造新型卫星保障服务模式。充分发挥国内外卫星遥感对水资源监测的高时空分辨率覆盖的优势，以支撑自然资源部“两统一”职责为目标，提供水资源常态化遥感监测，实现对全国范围每季度监测、重点区域每月监测及重点目标实时监测的水资源数据服务。

其次，推进水资源遥感监测卫星为重大战略和重大工程服务。综合利用多类型水资源遥感卫星的数据资源，实现多源遥感信息的持续获取和综合应用，为中国自然资源部的水资源调查和确权登记等国家重大战略实施提供卫星影像以及综合水资源信息服务，推进卫星遥感水资源监测数据的应用。

最后，推动国产水资源遥感监测卫星公益性

应用和商业化服务。面向政府、行业和公众服务,加强高时空分辨率水资源遥感卫星影像获取,建立健全的卫星遥感地表水资源数据共建共享与服务机制。研究主动服务、智能服务和一站式服务等多种服务模式,搭建卫星遥感水资源数据服务平台,推进面向政府和产业的公益性和商业化的卫星遥感水资源监测服务。同时通过各种新兴媒体的传播形式,向公众科普水资源确权及水环境保护相关的基本知识。

5 结 语

本文通过对国内外水资源属性卫星观测与遥感反演现状综合分析,发现目前虽然已经有一些数据集产品,但在时空分辨率及覆盖范围方面仍然存在许多问题。主要原因是,对液态地表水(即水体范围、水位、水量、水温、水质)关键参数观测,当前的影响因素主要包括卫星本身的光谱特性、卫星数量、传感器精度、大气关键参数的获取等;对固态地表水(即冰川、积雪、冻土)的关键参数监测,主要瓶颈在于观测对象所处环境复杂,地面传感器布设和数据搜集困难,且极易被环境因素影响,导致数据产品精度低,验证难;对大气水汽监测,易受天气或下垫面条件影响,单一的观测手段难以得到较好的精度。因此,提高传感器观测能力、发展多种卫星共同观测、加强遥感机理研究、构建稳健的反演模型、结合不同类型数据的优势进行多源数据融合等方式,将是突破水资源属性遥感反演局限性的关键。

中国的水资源属性卫星观测与遥感反演能力在不断加强,自然资源卫星具备基本的水资源调查能力,总体发展历经“从无到有”并正“从有到精”。综合来看,基于时空大数据云平台的高时空分辨率、大范围、长时序关键水资源参数数据集的自动化与智能化生产是未来发展的趋势。综上,本文从4个方面提出针对中国未来水资源遥感监测卫星规划设计建议:针对观测体系,综合发展多类型遥感卫星,包括发展新一代云水资源卫星、雷达卫星、测高卫星和重力卫星,以及发展小卫星星座实现水资源多要素高时空分辨率综合同步监测;针对技术体系,以提高国产卫星数据产品业务化应用的质量和效果为目标,发展遥感数据处理共性技术并开发高质量反演模型;针对产品体系,需要针对全球水循环通量和储量要素,发展更高时空

粒度、长时间序列、服务全球的数据产品;针对服务体系,建立包括建立遥感大数据+人工智能应用服务平台、推进水资源遥感监测卫星服务于重大战略和工程、推动国产水资源遥感监测卫星的公益性应用和商业化服务等。

志 谢 本工作得到了自然资源部国土卫星遥感应用中心诸多同事的指导和支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Bennartz R and Fischer J. 2001. Retrieval of columnar water vapour over land from backscattered solar radiation using the medium resolution imaging spectrometer. *Remote Sensing of Environment*, 78(3): 274-283 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00218-8]
- Berthier E, Arnaud Y, Vincent C and Rémy F. 2006. Biases of SRTM in high-mountain areas: implications for the monitoring of glacier volume changes. *Geophysical Research Letters*, 33(8): L08502 [DOI: 10.1029/2006GL025862]
- Biancamaria S, Lettenmaier D P and Pavelsky T M. 2016. The SWOT mission and its capabilities for land hydrology. *Surveys in Geophysics*, 37(2): 307-337 [DOI: 10.1007/s10712-015-9346-y]
- Birkett C M, Ricko M, Beckley B D, Yang X and Tetrault R L. 2017. G-REALM: a lake/reservoir monitoring tool for drought monitoring and water resources management. [EB/OL]. [2021-12-13]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.H23P..02B/abstract>
- Bolch T, Sørensen L S, Simonsen S B, Mölg N, Machguth H, Rastner P and Paul F. 2013. Mass loss of Greenland's glaciers and ice caps 2003-2008 revealed from ICESat laser altimetry data. *Geophysical Research Letters*, 40(5): 875-881 [DOI: 10.1002/grl.50270]
- Brodzik M J and Armstrong R. 2013. Northern hemisphere EASE-Grid 2.0 weekly snow cover and sea ice extent, version in 4. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Boulder, Colorado USA [DOI: 10.5067/P7O0HGJLYUQU]
- Brunt K M, Neumann T A and Smith B E. 2019. Assessment of ICESat-2 ice sheet surface heights, based on comparisons over the interior of the Antarctic ice sheet. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 13072-13078 [DOI: 10.1029/2019GL084886]
- Che T, Li X, Jin R, Armstrong R and Zhang T J. 2008. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. *Annals of Glaciology*, 49: 145-154 [DOI: 10.3189/172756408787814690]
- Chen H, Shan X J, Zhang Y H, Li J H and Qu C Y. 2007. Correction of atmospheric water vapour effects on the repeat-pass spaceborne D-INSAR by using NOAA-16/FY-1C and ASAR data. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(3): 707-713 (谌华, 单新建, 张云华, 李建华, 屈春燕. 2007. 利用 NOAA-16/FY-1C 和 ASAR 数据纠正大气水汽对重轨星载 D-INSAR 的影响. *地球物理学报*, 50(3): 707-713)
- Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G,

- Peng S, Lu M, Zhang W W, Tong X H and Mills J. 2015. Global land cover mapping at 30m resolution: a POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7-27 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002]
- Chen Q, Zheng L J, Li X J, Xu C B, Wu Y, Xie D H and Liu L. 2019. Water body extraction from high-resolution satellite remote sensing images based on deep learning. *Geography and Geo-Information Science*, 35(4): 43-49 (陈前, 郑利娟, 李小娟, 徐崇斌, 吴侯, 谢东海, 刘亮. 2019. 基于深度学习的高分遥感影像水体提取模型研究. *地理与地理信息科学*, 35(4): 43-49) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2019.04.007]
- Crétaux J F, Arsen A, Calmant S, Kouraev A, Vuglinski V, Bergé-Nguyen M, Gennero M C, Nino F, Del Rio R A, Cazenave A and Maison-grande P. 2011. SOLS: a lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in Space Research*, 47(9): 1497-1507 [DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.004]
- Cui W J, Li J G, Li Z, Zhu L, Wang D Z and Zhang N. 2020. Simulation of sea surface temperature retrieval based on GF-5 thermal infrared data. *Journal of Remote Sensing*, 24(7): 852-866 (崔文杰, 李家国, 李忠, 朱利, 王殿忠, 张宁. 2020. 高分五号热红外传感器多通道 SST 反演. *遥感学报*, 24(7): 852-866) [DOI: 10.11834/jrs.20209062]
- Deng R, Huang J F and Wang F M. 2011. Research on extraction method of water body with DS spectral enhancement based on HJ-1 images. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 31(11): 3064-3068 (邓睿, 黄敬峰, 王福民. 2011. 基于去相关拉伸光谱增强的 HJ-1 影像水体信息提取方法研究. *光谱学与光谱分析*, 31(11): 3064-3068) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)11-3064-05]
- Domingos P. 2012. A few useful things to know about machine learning. *Communications of the ACM*, 55(10): 78-87 [DOI: 10.1145/2347736.2347755]
- Dong C Y. 2018. Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: a review. *Journal of Hydrology*, 561: 573-583 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.027]
- Duan H T, Luo J H, Cao Z G, Xue K, Xiao Q T and Liu D. 2019. Progress in remote sensing of aquatic environments at the watershed scale. *Progress in Geography*, 38(8): 1182-1195 (段洪涛, 罗菊花, 曹志刚, 薛坤, 肖启涛, 刘东. 2019. 流域水环境遥感研究进展与思考. *地理科学进展*, 38(8): 1182-1195) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.08.007]
- Duguay C R, Zhang T J, Leverington D W and Romanovsky V E. 2005. Satellite remote sensing of permafrost and seasonally frozen ground// Duguay C R and Pietroniro A, eds. *Remote Sensing in Northern Hydrology: Measuring Environmental Change*. American Geophysical Union [DOI: 10.1029/163gm06]
- Fang Y, Li H, Wan W, Zhu S Y, Wang Z J, Hong Y and Wang H. 2019. Assessment of water storage change in China's lakes and reservoirs over the last three decades. *Remote Sensing*, 11(12): 1467 [DOI: 10.3390/rs11121467]
- Fisher A, Flood N and Danaher T. 2016. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175: 167-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.055]
- Gao B C and Kaufman Y J. 2003. Water vapor retrievals using moderate resolution Imaging spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13): 4389 [DOI: 10.1029/2002jd003023]
- Gao H L, Birkett C and Lettenmaier D P. 2012. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resources Research*, 48(9): W09504 [DOI: 10.1029/2012wr012063]
- Gong P, Zhang W, Yu L, Li C C, Wang J, Liang L, Li X C, Ji L Y and Bai Y Q. 2016. New research paradigm for global land cover mapping. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1002-1016 (宫鹏, 张伟, 俞乐, 李丛丛, 王杰, 梁璐, 李雪草, 计璐艳, 白玉琪. 2016. 全球地表覆盖制图研究新范式. *遥感学报*, 20(5): 1002-1016) [DOI: 10.11834/jrs.20166138]
- Gong S Q, Lu P T, Sun D Y, Li Y M and Wu P F. 2016. Comparison of water surface temperature retrieval algorithms from HJ-1B/IRS thermal infrared data over Lake Taihu, China. *Journal of Lake Sciences*, 28(3): 645-653 (龚绍琦, 陆品廷, 孙德勇, 李云梅, 吴鹏飞. 2016. HJ-1B/IRS 热红外数据反演太湖水温的方法比较. *湖泊科学*, 28(3): 645-653) [DOI: 10.18307/2016.0321]
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D and Moore R. 2017. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18-27 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031]
- Gu X Z, Zeng Q W, Chen H, Chen E X, Zhao L, Yu F and Tu K. 2019. Study on water information extraction using domestic GF-3 image. *Journal of Remote Sensing*, 23(3): 555-565 (谷鑫志, 曾庆伟, 谌华, 陈尔学, 赵磊, 于飞, 涂宽. 2019. 高分三号影像水体信息提取. *遥感学报*, 23(3): 555-565) [DOI: 10.11834/jrs.20198171]
- Guo W Q, Liu S Y, Xu J L, Wu L Z, Shanguan D H, Yao X J, Wei J F, Bao W J, Yu P C, Liu Q and Jiang Z L. 2015. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 61(226): 357-372 [DOI: 10.3189/2015JoG14J209]
- Han Q Q and Niu Z G. 2020. Construction of the long-term global surface water extent dataset based on water-NDVI spatio-temporal parameter set. *Remote Sensing*, 12(17): 2675 [DOI: 10.3390/rs12172675]
- Hansen M C, Potapov P V, Moore R, Hancher M, Turubanova S A, Tyukavina A, Thau D, Stehman S V, Goetz S J, Loveland T R, Kommaredy A, Egorov A, Chini L, Justice C O and Townshend J R G. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160): 850-853 [DOI: 10.1126/science.1244693]
- He J Y and Zhang S W. 2012. Humidity retrieval in mid-latitude and tropical regions using FY-3 MWS. *Journal of Remote Sensing*, 16(3): 562-578 (何杰颖, 张升伟. 2012. FY-3A 星 MWS 反演中纬度和热带大气水汽. *遥感学报*, 16(3): 562-578)
- Hong Y, Zhang Y and Khan S L. 2016. *Hydrologic Remote Sensing: Capacity Building for Sustainability and Resilience*. Boca: CRC Press [DOI: 10.1201/9781315370392]
- Hori M, Sugiura K, Kobayashi K, Aoki T, Tanikawa T, Kuchiki K, Niwano M and Enomoto H. 2017. A 38-year (1978—2015) Northern Hemisphere daily snow cover extent product derived using

- consistent objective criteria from satellite-borne optical sensors. *Remote Sensing of Environment*, 191: 402-418 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.023]
- Hu C M, Lee Z, Ma R H, Yu K, Li D Q and Shang S L. 2010. Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C4): C04002 [DOI: 10.1029/2009jc005511]
- Hu W G, Meng L K, Zhang D Y, Fan Z W, Cheng J G and Li X H. 2014. Methods of water extraction from ZY-1 02C satellite imagery. *Remote Sensing for Natural Resources*, 26(2): 43-47 (胡卫国, 孟令奎, 张东映, 樊志伟, 成建国, 李晓晖. 2014. 资源一号 02C 星图像水体信息提取方法. *国土资源遥感*, 26(2): 43-47) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2014.02.08]
- Huang L, Li Z, Zhou J M and Tian B S. 2014. Glacier change monitoring using SAR: an overview. *Advances in Earth Science*, 29(9): 985-994 (黄磊, 李震, 周建民, 田帮森. 2014. SAR 监测冰川变化研究进展. *地球科学进展*, 29(9): 985-994) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.09.0985]
- Ji L Y, Gong P, Wang J, Shi J C and Zhu Z L. 2018. Construction of the 500-m resolution daily global surface water change database (2001—2016). *Water Resources Research*, 54(12): 10270-10292 [DOI: 10.1029/2018wr023060]
- Jiang L G, Schneider R, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017. CryoSat-2 altimetry applications over rivers and lakes. *Water*, 9(3): 211 [DOI: 10.3390/w9030211]
- Jiang Y Y, Du W T, Han T, Huang J, Hao X H, Liu W G. 2013. Analysis on NDSI threshold in mapping snow cover based on HJ-1B data—a case study of snow in the Qilian mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(3): 648-655 (蒋友严, 杜文涛, 韩涛, 黄进, 郝晓华, 刘伟刚. 2013. 基于 HJ-1B 数据的积雪制图 NDSI 阈值分析——以祁连山积雪为例. *冰川冻土*, 35(3): 648-655) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0074]
- Jin J W, Li G Y, Sun W, Yang X D, Chang X T, Liu K and Liu Y. 2020. Application status and Prospect on water resources investigation and monitoring by satellite remote sensing. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5): 7-10 (金建文, 李国元, 孙伟, 杨雄丹, 常晓涛, 刘克, 刘瑶. 2020. 卫星遥感水资源调查监测应用现状及展望. *测绘通报*, (5): 7-10) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246]
- Kim Y, Kimball J S, Glassy J and Du J Y. 2017. An extended global Earth system data record on daily landscape freeze-thaw status determined from satellite passive microwave remote sensing. *Earth System Science Data*, 9(1): 133-147 [DOI: 10.5194/essd-9-133-2017]
- Kou C. 2014. Mass balance estimation of glaciers based on satellite radar altimeter data. Nanjing: Nanjing University (寇程. 2014. 基于卫星雷达测高数据的冰川物质平衡研究. 南京: 南京大学)
- Lee H, Shum C K, Tseng K H, Huang Z W and Sohn H G. 2013. Elevation changes of Bering Glacier System, Alaska, from 1992 to 2010, observed by satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 132: 40-48 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.007]
- Lehner B and Döll P. 2004. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 296(1/4): 1-22 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028]
- Lehner B, Liermann C R, Revenga C, Vörösmarty C, Fekete B, Crouzet P, Döll P, Endejan M, Frenken K, Magome J, Nilsson C, Robertson J C, Rödel R, Sindorf N and Wisser D. 2011. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9): 494-502 [DOI: 10.1890/100125]
- Li G Y, Gao X M, Chen J Y, Zhao Y M, Mo F and Zhang Y. 2019. Data quality analysis of ZY-3 02 satellite laser altimeter. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1159-1166 (李国元, 高小明, 陈继溢, 赵严铭, 莫凡, 张悦. 2019. 资源三号 02 星激光测高数据质量分析. *遥感学报*, 23(6): 1159-1166) [DOI: 10.11834/jrs.20197548]
- Li H, Wan W, Fang Y, Zhu S Y, Chen X, Liu B J and Hong Y. 2019a. A Google Earth Engine-enabled software for efficiently generating high-quality user-ready Landsat mosaic images. *Environmental Modelling and Software*, 112: 16-22 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.11.004]
- Li L Y. 2017. Study on variation and mass balance estimations of glacier in Yigong Zangbu basin, Tibet using multi-source remote sensing data. Nanjing: Nanjing University (李澜宇. 2017. 基于多源遥感数据的易贡藏布流域冰川变化与物质平衡研究. 南京: 南京大学)
- Li X D, Long D, Huang Q, Han P F, Zhao F Y and Wada Y. 2019b. 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*, 11(4): 1603-1627 [DOI: 10.5194/essd-11-1603-2019]
- Li X M, Zhang K, Li D L, Li D L, Li Z R and Zhang X. 2017. Remote sensing technology delineation method and its application to permafrost of Zhada area in the Tibetan Plateau. *Remote Sensing for Land and Resources*, 29(1): 57-64 (李晓民, 张焜, 李冬玲, 李得林, 李宗仁, 张兴. 2017. 青藏高原札达地区多年冻土遥感技术圈定方法与应用. *国土资源遥感*, 29(1): 57-64) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2017.01.09]
- Li Y. 2017. Inland water color parameters retrieval and algal bloom monitoring using multi-source remote sensing. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences) (李瑶. 2017. 内陆水体水色参数遥感反演及水华监测研究. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所))
- Li Y, Gao H L, Zhao G and Tseng K H. 2020. A high-resolution bathymetry dataset for global reservoirs using multi-source satellite imagery and altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 244: 111831 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111831]
- Li Y H, Ding J L and Yan R H. 2015. Extraction of small river information based on China-made GF-1 remote sense images. *Resources Science*, 37(3): 408-416 (李艳华, 丁建丽, 闫人华. 2015. 基于国产 GF-1 遥感影像的山区细小水体提取方法研究. *资源科学*, 37(3): 408-416)
- 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): 618-671 (梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子铎, 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): 618-671) [DOI: 10.11834/jrs.20209476]
- Liao A P, Chen L J, Chen J, He C Y, Cao X, Chen J, Peng S, Sun F D and Gong P. 2014. High-resolution remote sensing mapping of global land water. *Science China Earth Sciences*, 57(10): 2305-2316 (廖安平, 陈利军, 陈军, 何超英, 曹鑫, 陈晋, 彭舒, 孙芳蒂, 宫鹏. 2014. 全球陆表水体高分辨率遥感制图. *中国科学: 地球科学*, 44(8): 1634-1645) [DOI: 10.1007/s11430-014-4918-0]
- Liu B, Wang Y, Lou Z S and Zhan W. 2019. The MODIS PWV correction based on CMONOC in Chinese mainland. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(10): 1207-1215 (刘备, 王勇, 娄泽生, 占伟. 2019. CMONOC观测约束下的中国大陆地区MODIS PWV校正. *测绘学报*, 48(10): 1207-1215) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20180386]
- Liu B J, Wan W, Xie H J, Li H, Zhu S Y, Zhang G Q, Wen L J and Hong Y. 2019. A long-term dataset of lake surface water temperature over the Tibetan Plateau derived from AVHRR 1981-2015. *Scientific Data*, 6(1): 48 [DOI: 10.1038/s41597-019-0040-7]
- Liu S Y, Yao X J, Guo W Q, Xu J L, Shanguan D H, Wei J F, Bao W J and Wu L Z. 2015. The contemporary glaciers in China based on the second chinese glacier inventory. *Acta Geographica Sinica*, 70(1): 3-16 (刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 许君利, 上官冬辉, 魏俊锋, 鲍伟佳, 吴立宗. 2015. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 70(1): 3-16) [DOI: 10.11821/dlxb201501001]
- Luojus K, Pulliainen J, Takala M, Lemmetyinen J and Moisaner M. 2020. GlobSnow v3.0 snow water equivalent (SWE). PANGAEA [DOI: 10.1594/PANGAEA.911944]
- Ma X Q, Lu S L, Ma J and Zhu L P. 2019. Lake water storage estimation method based on topographic parameters: a case study of Nam Co Lake. *Remote Sensing for Land and Resources*, 31(4): 167-173 (马小奇, 卢善龙, 马津, 朱立平. 2019. 基于地形参数的湖泊水储量估算方法——以纳木错为例. *国土资源遥感*, 31(4): 167-173) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2019.04.22]
- MacCallum S N and Merchant C J. 2012. Surface water temperature observations of large lakes by optimal estimation. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 38(1): 25-45 [DOI: 10.5589/m12-010]
- Messenger M L, Lehner B, Grill G, Nedeva I and Schmitt O. 2016. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, 7: 13603 [DOI: 10.1038/ncomms13603]
- Metsämäki S, Pulliainen J, Salminen M, Luojus K, Wiesmann A, Solberg R, Böttcher K, Hiltunen M and Ripper E. 2015. Introduction to GlobSnow Snow Extent products with considerations for accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 156: 96-108 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.018]
- Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. 2020. Overall plan for the construction of natural resources investigation and monitoring system [EB/OL]. [2021-12-13]. <http://dkj.ah.gov.cn/public/7031/40401561.html> (自然资源部. 2020. 自然资源调查监测体系构建总体方案 [EB/OL]. [2021-12-13]. <http://dkj.ah.gov.cn/public/7031/40401561.html>)
- Moholdt G, Nuth C, Hagen J O and Kohler J. 2010. Recent elevation changes of Svalbard glaciers derived from ICESat laser altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2756-2767 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.06.008]
- NSIDC. 2008. IMS daily northern hemisphere snow and ice analysis at 1 km, 4 km, and 24 km Resolutions, Version 1. Boulder: NSIDC [DOI: 10.7265/N52R3PMC]
- Odermatt D, Danne O, Philipson P and Brockmann C. 2018. Diversity II water quality parameters from ENVISAT (2002—2012): a new global information source for lakes. *Earth System Science Data*, 10(3): 1527-1549 [DOI: 10.5194/essd-10-1527-2018]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]
- Peng B F, Chen Z F, Li J H, Luo W J, Gan J and Zeng R L. 2018. Monitoring water quality of Dongting Lake region based on GF-1 image. *Geographical Research*, 37(9): 1683-1691 (彭保发, 陈哲夫, 李建辉, 罗望军, 甘洁, 曾荣亮. 2018. 基于GF-1影像的洞庭湖区水体水质遥感监测. *地理研究*, 37(9): 1683-1691) [DOI: 10.11821/dlyj201809002]
- Pickens A H, Hansen M C, Hancher M, Stehman S V, Tyukavina A, Potapov P, Marroquin B and Sherani Z. 2020. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 243: 111792 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111792]
- Quan X F, Tang X M, Gao X M, Li G Y and Fu A M. 2019. Application and Prospect of satellite laser altimetry data in polar region. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 42(10): 19-24 (权学烽, 唐新明, 高小明, 李国元, 付安民. 2019. 卫星激光测高数据在极地区域的应用及展望. *测绘与空间地理信息*, 42(10): 19-24)
- Ran Y H and Li X. 2019. Progress, challenges and opportunities of permafrost mapping in China. *Advances in Earth Science*, 34(10): 1015-1027 (冉有华, 李新. 2019. 中国多年冻土制图: 进展、挑战与机遇. *地球科学进展*, 34(10): 1015-1027) [DOI: 10.11867/j. issn.1001-8166.2019.10.1015]
- Ran Y H, Li X, Cheng G D, Nan Z T, Che J X, Sheng Y, Wu Q B, Jin H J, Luo D L, Tang Z G and Wu X B. 2021. Mapping the permafrost stability on the Tibetan Plateau for 2005—2015. *Science China Earth Sciences*, 64(1): 62-79 (冉有华, 李新, 程国栋, 南卓铜, 车金星, 盛煜, 吴青柏, 金会军, 罗栋梁, 唐志光, 吴小波. 2021. 2005~2015年青藏高原多年冻土稳定性制图. *中国科学: 地球科学*, 51(2): 183-200)
- Randel D L, Haar T H V, Ringerud M A, Stephens G L, Greenwald T J and Combs C L. 1996. A new global water vapor dataset. *Bulletin*

- of the American Meteorological Society, 77(6): 1233-1246 [DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<1233:ANGWVD>2.0.CO;2]
- Raup B H, Racoviteanu A, Khalsa S J S, Helm C, Armstrong R and Arnaud Y. 2007. The GLIMS geospatial glacier database: a new tool for studying glacier change. *Global and Planetary Change*, 56(1/2): 101-110 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.018]
- Riggs G A, Hall D K and Roman M O. 2017. Overview of NASA's MODIS and visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) snow-cover earth system data records. *Earth System Science Data*, 9(2): 765-777 [DOI: 10.5194/essd-9-765-2017]
- Schaeffer B A, Schaeffer K G, Keith D, Lunetta R S, Conmy R and Gould R W. 2013. Barriers to adopting satellite remote sensing for water quality management. *International Journal of Remote Sensing*, 34(21): 7534-7544 [DOI: 10.1080/01431161.2013.823524]
- Schulz J, Albert P, Behr H D, Caprion D, Deneke H, Dewitte S, Dürr B, Fuchs P, Gratzki A, Hechler P, Hollmann R, Johnston S, Karlsson K G, Manninen T, Müller R, Reuter M, Riihelä A, Roebeling R, Selbach N, Tetzlaff A, Thomas W, Werscheck M, Wolters E and Zelenka A. 2009. Operational climate monitoring from space: the EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(5): 1687-1709 [DOI: 10.5194/acp-9-1687-2009]
- Schwatke C, Dettmering D, Bosch W and Seitz F. 2015. DAHITI-an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10): 4345-4364 [DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015]
- Seemann S W, Li J, Menzel W P and Gumley L E. 2003. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. *Journal of Applied Meteorology*, 42(8): 1072-1091 [DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<1072:OROATM>2.0.CO;2]
- Shen Q, Yao Y, Li J S, Zhang F F, Wang S L, Wu Y H, Ye H P and Zhang B. 2019. A CIE color purity algorithm to detect black and odorous water in urban rivers using high-resolution multispectral remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9): 6577-6590 [DOI: 10.1109/Tgrs.2019.2907283]
- Shi H G, Liang C L, Zhang J Y, Wang B, Zhang C L, Cheng X and Song Z T. 2019. Remote sensing monitoring of thermal water discharge in Tianwan nuclear power plant based on CBERS-04. *Geospatial Information*, 17(12): 75-79 (石海岗, 梁春利, 张建永, 汪冰, 张春雷, 程旭, 宋振涛. 2019. 基于CBERS-04星田湾核电温排水遥感监测研究. *地理空间信息*, 17(12): 75-79) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2019.12.021]
- Shi J C, Guo H D, Dong X L, Liang S L, Chen J M, Gong P, Yang X F, Cheng J, Lin M S, Zhang P, Zhang W, Ju W M, Liu Y, Li Z Y and Zhao T J. 2021. Developments and future strategies of Earth science from space in China. *Chinese Journal of Space Science*, 41(1): 95-117 (施建成, 郭华东, 董晓龙, 梁顺林, 陈镜明, 宫鹏, 杨晓峰, 程洁, 林明森, 张鹏, 张伟, 居为民, 刘毅, 李增元, 赵天杰. 2021. 中国空间地球科学发展现状及未来策略. *空间科学学报*, 41(1): 95-117) [DOI: 10.11728/cjss2021.01.095]
- Shi J C, Xiong C and Jiang L M. 2016. Review of snow water equivalent microwave remote sensing. *Science China Earth Sciences*, 59(4): 731-745 (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]
- Shi T T, Li F T and Zhang L. 2020. Preliminary study on the application of communication, navigation and remote sensing technology in natural resource management. *Geospatial Information*, 18(8): 22-24 (石婷婷, 厉芳婷, 张亮. 2020. 通导遥一体化在自然资源管理中的应用初探. *地理空间信息*, 18(8): 22-24) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2020.08.006]
- Shu R, Huang G H and Kong W. 2020. Development and review of space-based laser altimetry technology. *Infrared and Laser Engineering*, 49(11): 20201047 (舒嵘, 黄庚华, 孔伟. 2020. 空间激光测高技术发展及展望. *红外与激光工程*, 49(11): 20201047) [DOI: 10.3788/IRLA20201047]
- Song C and Yin Q. 2021. Evaluation on vertical space characteristics of atmospheric water vapor and ozone for FY-4A GIIRS data sounding. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 40(4): 539-546 (宋慈, 尹球. 2021. FY-4A GIIRS数据探测大气水汽和臭氧的垂直空间特性评估. *红外与毫米波学报*, 40(4): 539-546) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2021.04.013]
- Song C Q, Ye Q H, Sheng Y W and Gong T L. 2015. Combined ICESat and CryoSat-2 altimetry for accessing water level dynamics of Tibetan lakes over 2003—2014. *Water*, 7(9): 4685-4700 [DOI: 10.3390/w7094685]
- Su Z, Fernández-Prieto D, Timmermans J, Chen X, Hungershoefer K, Roebeling R, Schröder M, Schulz J, Stammes P, Wang P and Wolters E. 2014. First results of the earth observation Water Cycle Multi-mission Observation Strategy (WACMOS). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 270-285 [DOI: 10.1016/j.jag.2013.08.002]
- 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]
- Tedesco M, Derksen C, Deems J S and Foster J L. 2014. Remote sensing of snow depth and snow water equivalent//Tedesco M, ed. *Remote Sensing of the Cryosphere*. [s.l.]: John Wiley and Sons, Ltd [DOI: 10.1002/9781118368909.ch5]
- Tsai Y L S, Dietz A, Oppelt N and Kuenzer C. 2019. Remote sensing of snow cover using spaceborne SAR: a review. *Remote Sensing*, 11(2): 1456 [DOI: 10.3390/rs11121456]
- Wan W, Long D, Hong Y, Ma Y Z, Yuan Y, Xiao P F, Duan H T, Han Z Y and Gu X F. 2016. A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014. *Scientific Data*, 3: 160039 [DOI: 10.1038/sdata.2016.39]
- Wan W, Zhao L, Xie H, Liu B, Li H, Cui Y, Ma Y and Hong Y. 2018. Lake

- surface water temperature change over the Tibetan Plateau from 2001 to 2015: a sensitive indicator of the warming climate. *Geophysical Research Letters*, 45(10): 11177-11186 [DOI: 10.1029/2018GL078601]
- Wang G H, Pei L, Du Q Y and Li X. 2020. Spectral relation method for water body extraction from ZY-3 imagery. *Remote Sensing Information*, 35(3): 117-121 (王国华, 裴亮, 杜全叶, 李旋. 2020. 针对资源三号卫星影像水体提取的谱间关系法. *遥感信息*, 35(3): 117-121)
- Wang Q, Zhang Y L, Fan J H and Fu Y H. 2020. Monitoring the motion of the Yiga glacier using GF-3 images. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(3): 460-466 (王群, 张蕴灵, 范景辉, 傅宇浩. 2020. 利用高分三号影像监测依嘎冰川表面运动. *武汉大学学报(信息科学版)*, 45(3): 460-466 [DOI: 10.13203/j.whugis20190036])
- Wang S L, Li J S, Zhang B, Spyarakos E, Tyler A N, Shen Q, Zhang F F, Kuster T, Lehmann M K, Wu Y H and Peng D L. 2018. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index. *Remote Sensing of Environment*, 217: 444-460 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.026]
- Wang W M, Sun X M, Zhang R H, Tang X Z and Zhu Z L. 2005. The simulation analyze of the effect of surface reflective spectrum on the retrieval of water vapor with MODIS NIR data. *Journal of Remote Sensing*, 9(1): 8-15 (王伟民, 孙晓敏, 张仁华, 唐新斋, 朱治林. 2005. 地物反射光谱对MODIS近红外波段水汽反演影响的模拟分析. *遥感学报*, 9(1): 8-15)
- Wang X H, Tian H, Ji T M, Gong C L, Hu Y, Li L and He Z J. 2020. Remote sensing monitoring method for comprehensive water quality index in rivers based on Sentinel-2 satellite. *Aerospace Shanghai (Chinese and English)*, 37(5): 92-97, 104 (王歆晖, 田华, 季铁梅, 巩彩兰, 胡勇, 李澜, 何志杰. 2020. 哨兵2卫星综合水质指标的河流水质遥感监测方法. *上海航天(中英文)*, 37(5): 92-97, 104 [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.014])
- Wang Y H, Li J G, Wang J, Zhu L, Tian S F and Tao Z. 2020. Remote sensing monitoring of water quality in Suzhou urban area based on GF-2 image. *Science Technology and Engineering*, 20(14): 5875-5885 (汪雨豪, 李家国, 汪洁, 朱利, 田淑芳, 陶醉. 2020. 基于GF-2影像的苏州市区水质遥感监测. *科学技术与工程*, 20(14): 5875-5885 [DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.14.062])
- Wang Y Q, Shi J C, Liu Z H and Feng W L. 2015. Passive microwave remote sensing of precipitable water Vapor over Beijing-Tianjin-Hebei region based on AMSR-E. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 40(4): 479-486 (王永前, 施建成, 刘志红, 冯文兰. 2015. 利用微波辐射计AMSR-E的京津冀地区大气水汽反演. *武汉大学学报(信息科学版)*, 40(4): 479-486 [DOI: 10.13203/j.whugis20130530])
- Wang Y Q, Shi J C, Wang H, Feng W L and Wang Y J. 2015. Physical statistical algorithm for precipitable water vapor inversion on land surface based on multi-source remotely sensed data. *Science China Earth Sciences*, 58(12): 2340-2352 (王永前, 施建成, 王皓, 冯文兰, 王雁君. 2016. 基于多源遥感数据陆面大气水汽反演的物理统计算法研究. *中国科学: 地球科学*, 46(1): 43-56 [DOI: 10.1007/s11430-015-5211-6])
- Wang Z M, Liu Z K, An J C and Lin G B. 2018. Snow depth detection and error analysis derived from SNR of GPS and BDS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(1): 8-16 (王泽民, 刘智康, 安家春, 林国标. 2018. 基于GPS和北斗信噪比观测值的雪深反演及其误差分析. *测绘学报*, 47(1): 8-16 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20160644])
- Wei H L, Wei G J, Dai S and Huang Y Y. 2021. Inversion of atmospheric water vapor content in Lanzhou based on MODIS data. *Remote Sensing Information*, 36(4): 68-75 (魏浩林, 魏冠军, 戴嵩, 黄逸宇. 2021. 兰州市大气水汽含量及其时空特征分析. *遥感信息*, 36(4): 68-75 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2021.04.010])
- Westermann S, Duguay C R, Grosse G and Käab A. 2015. Remote sensing of permafrost and frozen ground//Tedesco M, ed. *Remote Sensing of the Cryosphere*. Chichester: Wiley Blackwell [DOI: 10.1002/9781118368909.ch13]
- WGMS. 2020. Fluctuations of Glaciers Database. Zurich: World Glacier Monitoring Service [DOI: 10.5904/wgms-fog-2020-08]
- Wilkinson G G. 2005. Results and implications of a study of fifteen years of satellite image classification experiments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3): 433-440 [DOI: 10.1109/Tgrs.2004.837325]
- Wouters B, Gardner A S and Moholdt G. 2019. Global glacier mass loss during the GRACE satellite mission (2002-2016). *Frontiers in Earth Science*, 7: 96 [DOI: 10.3389/feart.2019.00096]
- Wu S L, Liu C and Chen J. 2018. Overview of FY-3 snow monitoring products and applications in remote sensing service. *Aerospace Shanghai*, 35(2): 60-65 (武胜利, 刘畅, 陈洁. 2018. FY-3卫星积雪监测产品概述及在遥感服务中的应用. *上海航天*, 35(2): 60-65 [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.007])
- Wulfmeyer V, Hardesty R M, Turner D D, Behrendt A, Cadeddu M P, Di Girolamo P, Schlüssel P, Van Baelen J and Zus F. 2015. A review of the remote sensing of lower tropospheric thermodynamic profiles and its indispensable role for the understanding and the simulation of water and energy cycles. *Reviews of Geophysics*, 53(3): 819-895 [DOI: 10.1002/2014rg000476]
- Xie Z Y, Phinn S R, Game E T, Pannell D J, Hobbs R J, Briggs P R and McDonald-Madden E. 2019. Using Landsat observations (1988—2017) and Google Earth Engine to detect vegetation cover changes in rangelands—a first step towards identifying degraded lands for conservation. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111317 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111317]
- Xiong J, Thenkabail P S, Gumma M K, Teluguntla P, Poehnelt J, Congalton R G, Yadav K and Thau D. 2017. Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126: 225-244 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.01.019]
- Xu J H, Feng M, Wang J B, Ran Y H, Qi Y, Yang L A and Li X. 2020. Automatically identifying rock glacier based on Gaofen satellite image and deep learning—preliminary application in west Nyain-

- qentanglha mountains. *Remote Sensing Technology and Application*,35(6): 1329-1336 (徐瑾昊,冯敏,王建邦,冉有华,祁元,杨联安,李新. 2020. 基于高分遥感数据和深度学习的石冰川自动提取研究——以念青唐古拉山西段为例. *遥感技术与应用*,35(6): 1329-1336) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1329]
- Yang B Y,Zhang L X,Gao Y,Xiang Y,Mou N X and Suolang D. 2016. An integrated method of glacier length extraction based on Gaofen satellite data. *Journal of Glaciology and Geocryology*,38(6): 1615-1623 (杨佰义,张灵先,高杨,向洋,牟乃夏,索朗旦巴. 2016. 基于高分卫星数据的冰川长度综合提取方法. *冰川冻土*,38(6): 1615-1623) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0189]
- Yang T,Wan W,Chen X W,Chu T X,Qiao Z,Liang H,Wei J H,Wang G Q and Hong Y. 2019. Land surface characterization using BeiDou signal-to-noise ratio observations. *GPS Solutions*,23(2): 32 [DOI: 10.1007/s10291-019-0824-4]
- Ye Q H,Cheng W M,Zhao Y L,Zong J B and Zhao R. 2016. A review on the research of glacier changes on the Tibetan Plateau by remote sensing technologies. *Journal of Geo-information Science*, 18(7): 920-930 (叶庆华,程维明,赵永利,宗继彪,赵瑞. 2016. 青藏高原冰川变化遥感监测研究综述. *地球信息科学学报*,18(7): 920-930)
- Ying Q,Hansen M C,Potapov P V,Tyukavina A,Wang L,Stehman S V, Moore R and Hancher M. 2017. Global bare ground gain from 2000 to 2012 using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*,194: 161-176 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.022]
- Yuan C,Gong P and Bai Y Q. 2020. Performance assessment of ICESat-2 laser altimeter data for water-level measurement over lakes and reservoirs in China. *Remote Sensing*, 12(5): 770 [DOI: 10.3390/rs12050770]
- Zhai G J,Huang M T,Ouyang Y Z and Lu X P. 2002. The principle of satellite altimetry and its applications. *Hydrographic Surveying and Charting*,22(1): 57-62 (翟国君,黄漠涛,欧阳永忠,陆秀平. 2002. 卫星测高原理及其应用. *海洋测绘*,22(1): 57-62)
- Zhang G L,Wang J,Pan B T,Zhang C and Cao B. 2010. Progress in research on glacier changes using remote sensing. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*,46(6): 1-10 (张国梁,王杰,潘保田,张忱,曹泊. 2010. 冰川变化遥感监测的研究进展. *兰州大学学报(自然科学版)*,46(6): 1-10) [DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2010.06.010]
- Zhang G Q,Chen W F and Xie H J. 2019a. Tibetan plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and landsat missions. *Geophysical Research Letters*,46(22): 13107-13118 [DOI: 10.1029/2019gl085032]
- Zhang G Q,Yao T D,Chen W F,Zheng G X,Shum C K,Yang K,Piao S L,Sheng Y W,Yi S,Li J L,O'Reilly C M,Qi S H,Shen S S P,Zhang H B and Jia Y Y. 2019b. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*,221: 386-404 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.038]
- Zhang J Y,Yu X L,Lv H and Zhu J R. 2014. Analysis of atmospheric precipitable water vapor over Wuhan based on MODIS data in recent ten years. *Acta Photonica Sinica*,43(10): 1001003 (张金业,于秀丽,吕辉,朱进容. 2014. 基于成像光谱仪MODIS的近十年武汉水汽含量变化分析. *光子学报*,43(10): 1001003) [DOI: 10.3788/gzxb20144310.1001003]
- Zhang T J,Jin R and Gao F. 2009a. Overview of the satellite remote sensing of frozen ground: visible-thermal infrared and radar sensor. *Advances in Earth Science*,24(9): 963-972 (张廷军,晋锐,高峰. 2009a. 冻土遥感研究进展——可见光、红外及主动微波卫星遥感方法. *地球科学进展*,24(9): 963-972)
- Zhang T J,Jin R and Gao F. 2009b. Overview of the satellite remote sensing of frozen ground: passive microwave sensors. *Advances in Earth Science*,24(10): 1073-1083 (张廷军,晋锐,高峰. 2009b. 冻土遥感研究进展: 被动微波遥感. *地球科学进展*,24(10): 1073-1083)
- Zhang X W,He T,Zhao C G,Mo F,Guo A Y,Luo W B and Yang J K. 2020. Demonstration of surveying and mapping system and performance evaluation of GF-7 satellite. *Spacecraft Engineering*, 29(3): 1-11 (张新伟,贺涛,赵晨光,莫凡,国爱燕,罗文波,杨居奎. 2020. 高分七号卫星测绘体制与性能评估. *航天器工程*,29(3): 1-11) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2020.03.001]
- Zhao X L. 2015. Experimental research on retrieval model for precipitable water vapor based on multi-source data. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (赵晓磊. 2015. 基于多源数据的大气可降水量反演模型试验研究. 北京: 中国地质大学(北京))
- Zhou Q,Liu J Q,Wang J R,Deng S Q and Tian L Q. 2020. Water turbidity monitoring of Zhiyin and Huangjia lakes in Wuhan for COVID-19 Epidemic using HY-1C CZI data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,45(5): 676-681 (周屈,刘建强,王剑茹,邓实权,田礼乔. 2020. 利用HY-1C卫星CZI数据在COVID-19疫情期间武汉知音湖和黄家湖的浊度监测研究. *武汉大学学报(信息科学版)*,45(5): 676-681) [DOI: 10.13203/j.whugis20200101]
- Zhu L,Li Y M,Zhao S H and Guo Y L. 2015. Remote sensing monitoring of Taihu Lake water quality by using GF-1 satellite WFV data. *Remote Sensing of Land and Resources*,27(1): 113-120 (朱利,李云梅,赵少华,郭宇龙. 2015. 基于GF-1号卫星WFV数据的太湖水质遥感监测. *国土资源遥感*,27(1): 113-120) [DOI: 10.6046/gtzyy.2015.01.18]
- Zhu S Y,Liu B J,Wan W,Xie H J,Fang Y,Chen X,Li H,Fang W Z,Zhang G Q,Tao M W and Hong Y. 2019. A new digital lake bathymetry model using the step-wise water recession method to generate 3D lake bathymetric maps based on DEMs. *Water*,11(6): 1151 [DOI: 10.3390/w11061151]
- Zhu Y X,Zhang J,Liu R and Wang Y C. 2014. Study on remote sensing monitoring of water quality for Danjiangkou Reservoir by HJ-1 satellite data. *Environmental Science and Technology*,27(5): 52-58 (朱玉霞,张杰,刘锐,王英才. 2014. 基于HJ-1卫星的丹江口库区水质遥感监测研究. *环境科技*,27(5): 52-58) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-4829.2014.05.012]
- Zuo Z Q,Tang X M,Li G Y and Li S. 2020. Adaptive Gaussian filtering of the full waveform of GF-7 satellite laser altimeter. *Infrared and Laser Engineering*,49(11): 20200251 (左志强,唐新明,李国元,李松. 2020. GF-7星载激光测高仪全波形自适应高斯滤波. *红外与激光工程*,49(11): 20200251) [DOI: 10.3788/IRLA2020025]

Inspects and prospects of satellite remote sensing monitoring ability for land surface water in China

LI Huan¹, WAN Wei¹, JI Rui¹, LI Guoyuan², CHEN Xiaona³, ZHU Siyu¹, LIU Baojian¹,
XU Yue¹, LUO Zengliang⁴, WANG Shenglei⁵, CUI Yaokui¹

1. Institute of Remote Sensing and GIS, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;

3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

5. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: We investigate the worldwide monitoring of land surface water by satellite remote sensing and the corresponding ability of Chinese satellites for the 14th five-year plan under the general goals of the Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China to plan for the new generation of satellites for water resource monitoring. First, this work reviews the current status of the water resource monitoring by the Chinese and international satellites from several perspectives, including liquid surface water (water extent, water level, water volume, water temperature, and water quality), solid surface water (glacier, snow, and frozen ground), and water vapor in the atmosphere. Then, the capability of land natural resources satellites for land surface water monitoring is inspected. Afterward, the ability of water resources monitoring with various types of remote sensing satellites, including optical, laser, RADAR, and gravity satellites, is summarized and analyzed. Advice and suggestions for Chinese satellite planning of water resources monitoring are proposed by concentrating on the current status and the shortage of water resource monitoring with satellite remote sensing in China. The advice and suggestions include planning the observation, technique, product, and service systems. First, a new generation of cloud water resources monitoring satellites combining infrared and active/passive microwaves is recommended to be developed for the observation system. Moreover, the evolution of radar satellites should be accelerated to make up for the deficiency of optical satellites. Altimetry satellites and gravity satellites must be vigorously cultivated. Furthermore, small satellite constellations for water resources monitoring integrating satellite "communication-navigation-remote sensing" should be promoted. Advanced thermal infrared and hyperspectral satellites with strong temporal and spatial resolution are also recommended to be developed. Second, for the technique system, exploring general remote sensing data processing technologies, including data correction/splicing technology and multisensor data fusion technology, are recommended to improve the quality of domestic satellite data for operational water resources monitoring. Moreover, water resource element extraction/retrieval models must be promoted. The techniques for high-quality long-term water resource products should be also developed. Finally, for the service system, providing a dataset-sharing service of the long-term global water cycle flux and storage elements with high spatiotemporal granularity is recommended. Moreover, the overall development of Chinese satellites for water resources monitoring has started from scratch toward boosting, and these natural resource satellites have basic capabilities for water resources survey. Natural resources satellite datasets are abundant. However, nationwide long-term series of water resources data mainly based on domestically made satellites remain lacking. This gap can be improved from two perspectives.

Developing operational natural resources retrieval models from the data perspective following the scientific concept of "remote sensing big data + artificial intelligence" is necessary for timely acquisition, processing, distribution, and providing service while ensuring the stability of satellite remote sensing data. It can realize all-time, all-weather, and all-element satellite remote sensing monitoring for natural resources based on cloud services. From the satellite perspective, the next step for on-orbit satellites is to produce application-oriented operational water resource element products, combining multisource satellite data on the premise of improving satellite data quality. For satellites under planning, relevant departments should work closely to establish goals with different priorities under the guidance of scientific and application issues and full consideration of costs.

Key words: land surface water resources, water resource monitoring by satellite remote sensing, remote sensing big data, satellite plan suggestions

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41901346, 41971377); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M650348)