

# 河流水文遥感及其在青藏高原应用研究进展

刘沐妍<sup>1,2</sup>, 刘凯<sup>2</sup>, 曾繁轩<sup>2</sup>, 宋春桥<sup>2</sup>

1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 流域地理学重点实验室, 南京 210008

**摘要:** 河流作为水循环系统的关键组成部分, 对人类社会经济发展、流域的生态环境可持续性及其区域气候的稳定都有着重要意义。因全球变暖、冰川冻土融化、洪旱灾害等对水文系统造成的干扰增强, 河流的水文情势发生了深刻改变。随着传感器技术发展和卫星观测平台增加, (卫星) 遥感技术手段逐渐成为当今监测河流水文的主流方法之一。各类遥感监测方式已广泛运用在河流面积/宽度提取和水位变化监测、径流量估算等方面研究, 形成了全球或区域尺度的水文要素遥感产品。本文综述了基于光学影像、雷达影像、卫星测高等数据的河流水文要素遥感监测技术, 分析和总结了利用遥感手段监测河流宽度与水域面积、水位、径流量等诸多要素及其变化的最新研究进展, 并探讨前人研究的空间范围尺度和推广可行性。此外, 青藏高原作为亚洲主要大江大河的发源地, 同时也是水文站点监测资料极其缺乏的区域之一。利用遥感技术开展青藏高原河流水文监测的研究面临实测数据共享难、水文变化过程时空异质性极强、对暖湿化气候的响应特征复杂多变等难题。本文对各类水文遥感技术在青藏高原河流监测应用研究所取得的进展与存在的问题进行了回顾和展望, 以期加深对该地区河流水文变化过程的理解。

**关键词:** 河流, 水文, 遥感, 青藏高原, 水域面积, 水位, 径流量

**中图分类号:** P23/P2

**引用格式:** 刘沐妍, 刘凯, 曾繁轩, 宋春桥. 2024. 河流水文遥感及其在青藏高原应用研究进展. 遥感学报, 28(10): 2427-2447

Liu S Q, Liu K, Zeng F X and Song C Q. 2024. Study progress in the river hydrologic remote sensing technique and its application on the Tibetan Plateau. National Remote Sensing Bulletin, 28(10): 2427-2447 [DOI: 10.11834/jrs.20243464]

## 1 引言

河流是指在地表沿着狭长河道流动的水体, 通常由降雨、融雪或地下水供给, 是陆地向海洋输送物质的主要通道 (Palmer 和 Ruhi, 2018)。河流作为地球水循环的重要组成部分, 其河流宽度、水位、径流量等水文要素是水文模型和洪水预报的重要输入参数, 对于水资源管理、洪水预测、地球水循环研究以及生态环境保护等方面具有重要意义 (吴炳方等, 2020; 史卓琳和黄昌, 2020)。

传统上, 水文要素信息获取主要依赖实地测量和水文监测站 (李丹等, 2020)。尽管这种方式得到的数据可以提供高精度的河流流速和流量等信息, 但这种方式不仅周期长、费时费力, 而且

不适用于气候恶劣的偏远地区。尤其是在地形复杂的高山地区和无人区, 水文站点分布稀疏甚至缺失, 提供的有效水文信息非常有限。与之相比, 遥感技术可以提供全方位、大尺度、高分辨率的监测资料, 具有周期短、(近) 实时的特点, 可以快速、准确、及时地获取水体信息, 填补水文监测站点无法覆盖的空白区域。

青藏高原位于亚洲大陆中部, 是世界上海拔最高的高原, 素有“第三极”和“世界屋脊”之称 (杨逸畴等, 1982)。受西风和季风等大气环流系统影响, 青藏高原是气候变化的敏感区域, 被认为是全球气候变化的驱动力与放大器 (潘保田和李吉均, 1996)。冰川融水是补给河流源区的重要途径之一。然而, 受气候变暖影响, 近年来青

收稿日期: 2023-11-15; 预印本: 2024-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42371399); 第二次青藏高原综合科学考察研究(编号: 2019QZKK0202)

第一作者简介: 刘沐妍, 研究方向为河流水文遥感。E-mail: shuqian0628@163.com

通信作者简介: 宋春桥, 研究方向为湖泊一流域水文遥感、资源环境遥感与全球变化。E-mail: cqsong@niglas.ac.cn



从而提出了一种可以进行自动化河流分析的绘图引擎 RivaMap；欧洲联合研究中心（JRC）基于多年 Landsat 影像计算得到了反映全球地表水动态变化的数据集 GSW（Global Surface Water）（Pekel 等，2016）。Landsat 9 主要目标是延续并加强 Landsat 8 的任务，以确保数据的连续性（Wu 等，2019）。Sentinel-2 作为欧洲航天局 Copernicus 计划的一部分，其搭载的 MSI（Multi-Spectral

Instrument）成像仪，可以覆盖从可见光到短波红外的 13 个光谱波段，卫星重访周期为 5 d，在高纬地区仅需 3 d（Feyisa 等，2014）。总体上，MODIS、Landsat 系列和 Sentinel-2 系列、WorldView 系列是目前用于河流水文监测的代表性低、中、高分辨率光学遥感数据。表 1 列举了常用于监测河流的光学卫星的基本参数。

表 1 用于河流水文要素监测的常用光学卫星参数

Table 1 Optical satellite parameters for river hydrological element monitoring

卫星名称	国家/机构	发射时间/年	传感器名称	空间分辨率/m	时间分辨率/d
NOAA		1979	AVHRR	1100	0.5
Landsat 1—Landsat 7	美国	1972—1999	MSS/TM/ETM+	15—60	16
Landsat 8/9		2013、2021	OLI、TIRS/OLI2、TIRS2	15—100	16
Sentinel-2 A/B	欧盟	2015—2017	MSI	10—60	5
Terra/Aqua	美国	1999—2002	MODIS	250—1000	1—2
SPOT 1—7	法国	1986—2014	HRG、HRS	1.50—20	1—3
WorldView-2/3/4	美国	2009—2016	WV2、WV3、WV4	0.31—0.46	1—5
GF-1-2/4-7	中国	2013—2019	PMS	1—16	2—5

## 2.2 雷达传感器

与光学成像相比，雷达成像不受气候和太阳光照等条件影响，具有全天时、全天候、高分辨率等独特优势，可以实时捕捉水体流动、河流方向和速度变化，达到实时监测河流动态变化的效

果。目前，应用于提取河流水体信息的主动式微波传感器，主要以合成孔径雷达 SAR（Synthetic Aperture Radar）为代表。表 2 列出了广泛用于河流监测的雷达卫星/传感器发展历程和关键参数。

表 2 部分常用雷达卫星参数介绍

Table 2 Overview of common radar satellite parameters

卫星/传感器	国家/机构	工作时间/年	极化方式	空间分辨率/m	时间分辨率/d
ERS/SAR		1991—2010	VV	30	35
Envisat/ASAR	欧洲航天局	2002—2012	VV、HH、HV	28	35
Sentinel-1/SAR		2014 至今	HH、VV、HH-HV、VH-VV	5×20	6
RADARSAT-1/SAR	加拿大空间局	1995—2013	HH	8—100	1—3
RADARSAT-2/ASAR		2007 至今	HH、VV、HV、VH	1—100	1—3
TerraSAR-X/SAR	德国	2007 至今	HH、VV、HH-VV、HH-HV、VV-VH、	1—3	11
COSMO-SkyMed-1/2/3/4/SAR	意大利	2007 至今	HH、VV、HH-VV	1—100	16
ALOS/PALSAR		2006—2011	HH、VV、HH-HV、VV-VH、HH-HV-VH-VV	1—100	16—46
ALOS-2/PALSAR-2	日本	2014 至今	HH、HV、VH、VV、HH-HV、VV-VH、HH-HV-VH-VV	1—100	14
GF-3/SAR	中国	2016 至今	HH、HV、VH、VV、HH-HV、HH-HV-VH-VV	1—500	1—3

1978 年，美国国家航空航天局 NASA（National Aeronautics and Space Administration）发射了全球第一颗合成孔径雷达卫星 SEASAT，但运行 105 天后由于电源故障而停止工作。尽管 SEASAT 的任务

时间短暂，但它成功地证明了合成孔径雷达和其他传感器从太空观测海洋的巨大潜力，标志着 SAR 已成功地进入了空间领域（Davis 和 Sun，2004）。之后，加拿大、日本等国家的 ERS、

RADARSAT等合成孔径雷达卫星相继进入太空，SAR卫星也逐渐从低分辨率、单极化、单一工作模式发展为高分辨率、多极化、多工作模式。加拿大于2007年发射的RADARSAT-2卫星在RADARSAT-1的基础上，增加了立体数据的获取能力，采用双侧式成像缩短了卫星的重访周期，分辨率由RADARSAT-1的9 m提升到3 m。同年，携带有X波段合成孔径雷达传感器的TerraSAR-X和COSMO-SkyMed-1卫星也成功升空，其空间分辨率最高为1 m，提供的高分辨率雷达影像可以捕捉到河流特征和周边地貌的细部特征。在TerraSAR-X卫星基础上改进的TanDEM-X卫星，双星联合可提供全球高精度数字高程模型的观测数据，其不同分辨率的数字高程模型DEM (Digital Elevation Model) 数据已被广泛用于计算河流水位、流域地貌分析和水文模拟等领域。欧空局于2014年发射的Sentinel-1卫星具有双极化模式，其独特的双星模式使得该卫星时间分辨率可接近6天 (Torres等, 2012)。目前可以免费获取的最高分辨率12.5 m的DEM数据来自日本的ALOS卫星。ALOS-2卫星于2014年发射，是目前唯一一颗在轨运行的L波段相控阵合成孔径雷达卫星，支持多种极化模式，提供长时序的观测数据，可用于分析河流的时空演变趋势 (Arnesen等, 2013)。中国在2016年发射了首颗分辨率达到1 m的C波段多极化合成孔径雷达卫星——高分三号 (GF-3)，能够获取不同应用模式下稳定可靠的微波遥感数据。L、X、C波段所生成的SAR图像各有所长，高程信息的精度主要取决于雷达波长和相干系数。对于同一区域的SAR图像干涉处理，X、C波段对高程信息的敏感度，优于L波段 (Alijani等, 2021; Chang等, 2021)。在利用雷达卫星研究河流水文变化时仍面临重访周期的限制、对水体周边地物的敏感性高、不同类型数据集集成难等问题，波段的不同影响卫星在地物穿透性和反射特性上的表现，极化提供丰富的水体信息，而分辨率则影响卫星对细节的捕捉程度。需根据具体监测任务的需求选择合适的雷达卫星。21世纪是合成孔径雷达卫星的快速发展时期，监测技术的创新和一系列新卫星的发射将提高河流水文监测的准确性和全面性，因此高分辨率SAR数据将在河流水文监测方面具有非常广阔的应用前景。

### 2.3 卫星测高

1969年，美国大地测量学家Kaula.W.M.教授在固体地球和海洋物理大会上首次提出卫星测高的概念。卫星测高技术最初是指利用卫星为载体携带高度计，采集海面高程数据。随着测高卫星数据精度的逐步提升，其应用领域也逐渐从海洋向湖泊、河流等内陆水体扩展 (Desai, 2002; Guerreiro等, 2016; Liu等, 2018; Kouraev等, 2007)，衍生出的数据集常用于估算河流的水位数据。

卫星雷达高度计是一种星载微波雷达。1973年美国成功发射首颗携带试验性高度计卫星——Skylab，其测高精度设计为1 m左右 (Quartly等, 2021)，为后续的发射计划打下了坚实基础。各国也逐步跟进，相继发射了多颗测高卫星 (已发射的主要测高卫星及其基本参数见表3)。1978年，美国NASA发射搭载了雷达高度计的全球第一颗合成孔径雷达卫星SEASAT，其测高数据精度很高，小于10 cm (Leben等, 2011)，而后美国海军发射的Geosat则标志着雷达高度计进入了成熟阶段 (Davis和Sun, 2004)。与之相比，欧洲卫星测高技术则起步稍晚，欧洲航天局于1991年、1995年和2002年先后发射了ERS-1、ERS-2和Envisat共3颗卫星，对比上一代卫星ERS-1和ERS-2，Envisat搭载了新一代雷达高度计RA-2 (Radar Altimeter-2)，测高精度随之提高到了厘米级，其主要实现对地观测以及地球大气和海洋观测。同一时间，美国与法国陆续合作研发了TOPEX/Poseidon和Jason系列卫星 (Papa等, 2012)，继续进行对全球海洋表面监测的任务。除了ERS系列测高卫星，欧空局在发射CryoSat-1失败后，发射了搭载先进的Ku波段合成孔径干涉雷达测高仪 (SIRAL) 的CryoSat-2卫星，其地面足迹 (footprint) 较小，是目前覆盖极地范围最大的测高卫星。上述这几颗卫星的分辨率都相对较低，适用于监测大范围、大尺度的流域。分别于2016年和2018年发射的Sentinel-3双星的探测目标是河流、湖泊以及沿海地区 (Zheng等, 2016)，其搭载的SRAL合成孔径雷达高度计具有双工作模式，在Ku频段上以SAR模式运行，SAR模式可以提高高度计对水体反射信号的感知能力，这对小河流来说具有重要意义。印度与法国合作研制的SARAL卫星于2013年发射升空，其延续了Envisat的轨道。不同于一般雷达高度计采用Ku波段，

SARAL采用了Ka波段，因此其脉冲重复频率更高，地面足迹更小，采样距离更短，测量精度也相对更高。但是Ka波段穿透性较弱，受对流层中的水汽延时影响较大，所以受降雨的干扰非常严重。

表3 已发射的主要测高卫星及其重要参数

Table 3 Key parameters of launched major altimetry satellites and their important parameters

卫星(高度计)	时间范围/年	重访周期/d	足迹大小/km	测高精度/cm	波段
Skylab(S193)	1973—1974	—	8	85—100	Ku
SEASAT(Radar ALT)	1978	17	1.7	20—30	Ku
Geosat(Radar Alt)	1986—90	17	1.7	10—20	Ku
ERS-1(RA)	1991—2000	35	1.7	10	Ku
TOPEX/Poseidon(Poseidon-1)	1992—2005	10	2.2	6	Ku, C
ERS-2(RA-1)	1995—2011	35	1.7	10	Ku
GFO(GFO-RA)	1998—2008	17	2	2.5—3.5	Ku
Jason-1(Poseidon-2)	2001—2013	10	2.2	4.2	Ku, C
Envisat(RA-2)	2002—2012	35	1.7	2.5	Ku, S
Jason-2(Poseidon-3)	2008—2019	10	2.2	2.5—3.4	Ku, C
CryoSat-2(SIRAL)	2010至今	369	1.6(0.3)	1—3	Ku
HY-2(ALT)	2011至今	168, 14	1.9	4	Ku, C
SARAL(AltiKa)	2013至今	35	1.7	10	Ka
Jason-3(Poseidon-3 B)	2016至今	10	2.2	2.5—3.4	Ku, C
Sentinel-3(SRAL)	2016至今	27	2(0.25)	3.5	Ku, C
Sentinel-6/Jason-CS	2020至今	10	1	—	Ku, C
SWOT(KaRIn)	2022至今	11	—	—	Ka
ICESat(GLAS)	2003—2009	183	0.07	10	GREEN, NIR
ICESat-2(ATLAS)	2018至今	91	0.017	10	GREEN

与上述雷达高度计工作方式不同的是，美国在2003年发射的全球第一颗激光测高卫星ICESat。ICESat上搭载的GLAS测高计属于光学传感器，其工作频率比雷达高度计高很多倍，具有更高的测高精度和更丰富的观测模式。但由于工作寿命、重访周期和时间跨度等限制，ICESat/GLAS目前难以适应水体监测的新形势。于2018年9月发射的ICESat-2搭载了高级地形激光测高仪ATLAS，每秒发射的脉冲次数显著增加，地面采样间隔也极大减小。2022年12月16日地表水和海洋地形卫星SWOT(Surface Water Ocean Topography)成功发射，SWOT的陆地水文目标是描述全球地表水的时空变化(徐永生等, 2017)，包括河川径流及湖泊、洪泛区等蓄水量、流速、流向等的变化，高空间分辨率使得SWOT对河宽小于100 m的河流也有很好的观测能力。传统的雷达高度计仅能够在卫星地面轨迹上测量海面高度和陆地水体高度，产生一维的高程剖面，其有限的空间分辨率很大程度上限制了对河流水文细节的捕捉。而SWOT卫

星可以在二维层面上观测地表水体高程变化，相较于实测数据和传统测高数据是质的突破。唯一搭载激光高度计的ICESat-2和应用干涉技术的测高卫星CryoSat-2也以其更好的测高精度和高空间分辨率在河流水文遥感中展现出更大的潜力，为深入理解河流水文过程提供了更强有力的工具。但在应用时仍需综合考虑传感器特性、数据处理复杂度和监测需求等多方面因素，确定最适合的卫星数据源。

### 3 河流面积/河宽遥感

#### 3.1 河流面积/河宽遥感提取方法

作为建立水文模型的重要参数，河流水域范围/宽度的变化对洪泛区居民、河边建筑和河岸生态系统有深刻影响。传统的实地测量方法无法满足动态监测水域变化的需求，基于遥感技术获取河流宽度数据逐渐演变为主流手段。

利用光学遥感影像提取河流水域范围或宽度

参数及其变化监测的方法中,以水体指数法的应用最广泛,常见的遥感水体指数计算方法和适用特点见表4。水体指数法的原理是利用水体在部分波段中反射率高,而在另外某些波段反射率较低的特点,通过波段之间的组合计算凸显水体与周边陆地的反差信息,最终通过设定阈值区分水体信息与非水体信息。由于各种水体指数方法提取水体信息时,都需要设定合适的阈值。所以在面对不同背景、不同研究主体,如何设定最优的阈值是一个十分重要的问题,这也是当前研究的热点(王大钊等,2019;王小标等,2018)。此外,

SAR数据当前也广泛用于河流水域范围提取及变化监测。利用SAR影像数据提取河流水体的方法主要有目视解译、灰度阈值分割法、滤波法等,其中人工目视解译虽然可以得到高精度提取结果(Brivio等,2002),但是适用局限性过强。当前研究中,应用较多的灰度阈值分割法主要包括最大类间方差算法(李景刚等,2010)、熵阈值法及双峰直方图法等。滤波法则主要用于抑制SAR相干斑噪声在高精度水体提取中的影响,以小波变换和形态学滤波(Klemenjak等,2012)为主。

表4 常用水体指数对比

Table 4 Comparison of common water indices

水体指数	公式	特点
比值型		
NDWI	$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$	能够最大程度抑制植被信息,突出水体特征;建筑物和土壤易与水体信息混淆,受冰雪、薄云和山体阴影影响较大
MNDWI	$MNDWI = (GREEN - SWIR) / (GREEN + SWIR)$	能够较好去除居民地和土壤等影响,突出水体特征;受阴影影响较大,不适用于无中红外波段的影像
FNDWI	$FNDWI = (FGREEN - NIR) / (FGREEN + NIR)$	能够较好区分水体与建筑物;受冰雪、薄云和山体阴影影响,不适用于山区等地形起伏较大区域
RNDWI	$RNDWI = (SIR - RED) / (SIR + RED)$	能削弱混合像元和山体阴影的影响,最大程度地提取水陆边界;不适用于无短波红外波段的影像
差值型		
SWI	$SWI = BLUE + GREEN - NIR$	较好区分水体和阴影,能减少积雪和山体裸地的影响,适用于山区的水体提取
AWEI	$AWEI_{nh} = 4(GREEN - NIR) - (0.25 NIR + 2.75 SWIR2)$ $AWEI_{sh} = BLUE + 2.5 GREEN - 1.5(NIR + SWIR) - 0.25 SWIR2$	分别应用于阴影覆盖和无阴影区域,结合使用可提高精度;容易混入阴影和少量暗色建筑物,不适合提取细小河流
WI <sub>2015</sub>	$WI_{2015} = 1.7204 + 171 GREEN + 3 RED - 70 NIR - 45 SWIR1 - 71 SWIR2$	对比其他水体指数,对于半干旱地区和季节性变化较大的水体有较高提取精度;但计算过程更加繁琐

目前,已经有许多学者尝试基于遥感影像开发自动提取河流宽度算法(Durand等,2010),并取得了良好的效果。如Yamazaki等(2014)提出通过卫星水体掩模和流向图自动计算河流宽度,并利用数字高程模型SRTM DEM获取的水系数据集和HydroSHEDS流向图计算得到南北纬60°之间的全球大河宽度数据库(GWD-LR)。Pavelsky和Smith(2008)基于MODIS遥感影像开发了自动提取河流宽度软件——RivWidth;而后,Allen和Pavelsky(2015)利用该工具对北美多年无云的Landsat系列影像提取水体,计算平均流量下的河流宽度数据,得到了北美河流宽度数据库(NARWidth),这是第一个高分辨率大尺度河流中心线和宽度数据库。2018年,该研究团队在此基

础上开发了全球河流宽度数据库GRWL(Global River Widths from Landsat)(Allen和Pavelsky,2018),提供河宽大于90 m的河流宽度数据,该数据集被广泛应用于河流生态系统研究、河流水资源管理、河流地貌研究和河流宽度算法改进等方面,但在山区河网(如青藏高原内流区)遗漏情况相对严重。Mao等(2022)使用该数据集中的河流中心线生成大量验证点,对多个30 m分辨率的全球水体数据集如G1WBM(Yamazaki等,2015)、GIW(Feng等,2016)、GSW(Pekel等,2016)、GSWD(Pickens等,2020)、GlobeLand30(Chen等,2015)、FROM-GLC(Gong等,2013)等进行验证,发现小河流(宽度小于300 m)的制图精度(0.51—0.94)与各数据集的生产者精度(0.86—

0.99) 存在显著差异, 因此在评估地表水数据集的准确性时必须引入足够比例的小河流验证点。Isikdogan 等 (2015) 利用 Landsat 系列影像和自动化制图工具 RivaMap 得到了北美河流的中心线和宽度数据集, 与 NARWidth 数据库和实测数据相比, RivaMap 能够更为高效、准确地从遥感图像中大规模提取河流。Yang 等 (2020) 提出的优化 RivWidth 工具自动计算图中所有河道的宽度, 并生成数据集 (MCRW), 这是 1990 年—2015 年期间中国第一个 30 m 河流宽度数据集, 与全球河流宽度数据集 (GRWL) 比较, 其精度评价结果表明: MCRW 在刻画中国流域水系时更为精细。此外, Wang 等 (2022) 提出了一种名为 GrabRiver 的新方法, 该方法结合河流平面形态和河流网络, 实现了从预处理遥感影像到计算河宽的全流程自动化。Wu 等 (2023) 则利用长时序卫星遥感、全球湖库数据集以及多源气象资料揭示了 21 世纪初期 (2000 年—2018 年) 全球河流流域范围的变化主要受气候变化和人类活动 (水库修建) 的影响, 在六级流域尺度, 新修水库导致全球河流流域范围相较前一个时期 (1984 年—1999 年) 整体增加了 30.50%。

### 3.2 青藏高原河流流域/河宽遥感提取应用

青藏高原地势险峻、河流分布广泛且支流众多, 是全球和区域尺度上建立水文数据集不可或缺的重要部分。现有的遥感河流数据多集中于大中型河流上, 较少研究关注山区中小河流的宽度监测。青藏高原河源区有大量宽度小于 200 m 的小河和宽度小于 40 m 的细小河流, 迫切需要这类河流水文信息, 以了解该山区河流的动态变化和水利几何关系。

基于此, 部分学者尝试使用更高分辨率的影像数据源或开发新的制图算法两种主要方法, 致力于精细化表达高原细小河流的分布状况和属性信息。使用更高分辨率影像的研究有: Li 等 (2020) 使用 10 m 空间分辨率的 Sentinel-2 影像提取黄河源区河流水体, 根据不同下垫面条件的子区域选用最佳的水体指数和阈值确定水域范围和河宽两要素, 提取的河道宽度与实测数据的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.95, 而且除辫状河外的河流宽度一般在 300 m 以下。根据前人用 30 m 影像对宽度为 90 m 以上河流的提取结果更准确和自身用 10 m 影

像提取宽度超过 30 m 的河流有更高的精度和连通性, 可以推断: 基于遥感图像可以准确提取的有效河流宽度约是图像空间分辨率的 3 倍左右。章斯腾等 (2021) 则使用更高空间分辨率 (3 m) 的 CubeSat 影像, 增强河流横纵剖面特征提取通天河流域 (长江上游) 河网信息, 与 30 m 的 Landsat 8 影像和 10 m 的 Sentinel-2 影像提取的河网结果相比, CubeSat 空间分辨率的提升使得提取的河网结果包含了大量宽度小于 30 m 的细小支流, 河流细节增多的同时河网的连通性和完整性也有所增加。

另一类是开发新的制图算法研究, 其中包括: Liang 等 (2022) 开发了一种适用于青藏高原细小河流的自动化制图方法 ASRM (Automated Small River Mapping), 该方法仅采用总体精度指标, 在长江支流杂谷脑流域应用的总体精度为 87.50% (图 2), 相较于其他河流提取方法的优点主要体现在两个方面: (1) 使用 Gabor 滤波增强细小河流的线性特征, 适用于地形陡峭、河道狭窄的研究区; (2) 加入 HAND (Height Above the Nearest Drainage Network) 指数作为辅助数据用于减小研究区内山区和冰雪阴影的误差。这两种方法应用于长江不同支流提取的河网在季节性变化中表现出空前的一致性: 5 月处于枯水向丰水的过渡期, 水系密度较低; 7—8 月河流网络进入丰水期, 水系密度达到峰值; 9 月进入平水期, 水系密度趋于平稳, 随后水系密度迅速降低, 并于 10 月河面开始结冰。而且两种方式都使得提取结果优于现有的大尺度河流数据产品, 弥补了 Landsat 系列影像只能提取大于 30 m 河流宽度的缺陷。此外, 他们为了减少山体阴影和冰雪的影响, 均使用不同的 DEM 数据。Li 等 (2020) 为了最大限度地降低背景噪声, 对不同级别的河网设置不同的缓冲宽度。吴保生团队提出一种可以自动校正河流中心线的河宽自动提取方法 ARWE (Automated River Width Extraction) (薛源等, 2023; Li 等, 2022)。Li 等 (2022) 使用该方法, 基于 Sentinel-2 MSI 影像和 Landsat TM/ETM+/OLI 影像, 建立了青藏高原 6 条主要河流的宽度和面积数据集, 宽度估值仅采用均方根误差精度指标, 其 RMSE 为 9.31 m, 是对全球水文数据集的重要补充。

近期, 有研究尝试使用机器学习 ML (Machine Learning) 提取河流水体。如 Li 等 (2021) 使用机

器学习随机森林算法从 10 m 的 Sentinel-2 影像中提取黄河源区河流水域, 总体精度均在 0.87 以上, 总体精度均值为 0.8998, 河道宽度的估值与实测数据的 RMSE 为 7.45 m (图 2)。此外, 薛源等 (2023) 通过组合不同的算法, 将 ARWE 与人工神经网络、随机森林算法相结合 (ARWE and RF-ANN) 提取水体, 从中国的 GF-1 和 ZY-3 高分辨率卫星影像中提取黄河主要支流皇甫川水体的河面和河宽, 河面提取的整体精度为 92.10%, RMSE 为 1.49 m (图 2), 较前者有较大提升, 最小河道宽度达到 6.10 m, 河道宽度预测值与水文站实测数据的  $R^2$  为 0.99。考虑到云污染现象在青藏高原尤为严重 (Zhang 等, 2020), 而 SAR 图像对水体像元特别敏感, Fei 等 (2022) 提出一种基于 Sentinel-1 时间序列影像和 DEM 绘制青藏高原季节性细小河流的深度学习方法 MISD (Mapping alpine IRES from Sentinel-1 time series and Digital elevation models), 该方法可以捕捉到被其他水文产品忽略的更狭窄 (河流宽度大于 1.70 m) 和更小流量 (流量大于 2 L/s) 河流, 其在拉萨河流域的多数集水区都表现优异: F2 (衡量模型的精确度和召回率的指标) 均大于 0.70; 欧几里德距离误差中值均小于 100 m。未来, 可以从后向散射系数的极化分解、最优周期选择、质量更高的 DEM 数据以及加入递归神经网络等方面进一步改进 MISD 方法。

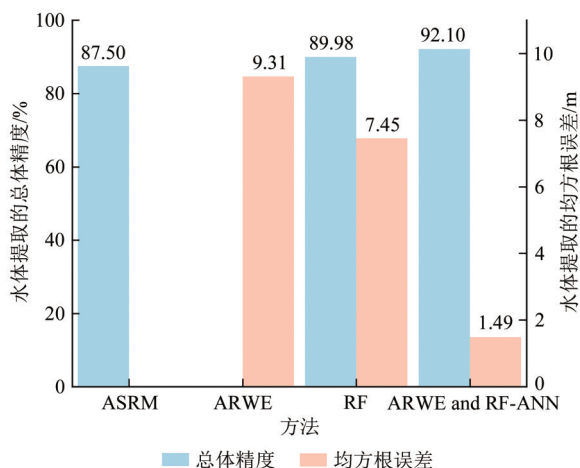


图2 基于本文文献调研结果的提取青藏高原河流水域与河宽方法精度对比 (薛源等, 2023; Li 等, 2021, 2022; Liang 等, 2022)

Fig. 2 Accuracy comparison of remote sensing methods for extracting river surface and width over the Tibetan Plateau based on the results of the literatures in this paper (Xue et al., 2023; Li et al., 2021, 2022; Liang et al., 2022)

目前, 大家主要利用 Sentinel-2 影像在长江和黄河源区的子流域展开研究, 提出的研究方法和结果弥补了现有全球或大区域尺度水体数据集的不足, 也证实了 Sentinel-2 影像在青藏高原细小河流遥感信息提取中的巨大潜力, 为无站点监测的山区河网补充重要的河道水文信息, 对模拟水文过程中径流的准确度具有重要意义。然而, 河道周边复杂地形、河流消落带下垫面和水体悬浮泥沙浓度 (如黄河) 仍是影响遥感提取精度的重要因素。另外, 有限的实测水文数据对模型的精度也有很大影响。未来可以将雷达数据与更高分辨率的光学图像相结合, 探索青藏高原复杂地形下山地河流的自动提取, 同时结合水文模型, 考虑水体的性质和水体中物质的影响, 提高复杂环境下水体提取的精度。

## 4 河流水位遥感

### 4.1 河流水位遥感测量方法

河流水位通常被称为“河水位”或“水文站水位”, 是指河流水面的高度相对于高程基准面的垂直距离。河流水位数据是水文研究和相关应用 (如洪水预报、供水确定和大坝设计) 中的关键变量。测定河流水位目前较为成熟的遥感方法主要是通过搭载在卫星上的雷达或激光高度计测量。使用激光高度计的代表卫星为 ICESat 和 ICESat-2 卫星, ICESat/-2 卫星和其搭载的激光测距系统为测算水位提供了一种全新的技术手段 (范春波等, 2005)。已有多项研究对 ICESat-2 卫星在水位遥感测量方面的准确性进行了深入评估, 如 Lao 等 (2022) 采用 ICESat-2 的 ATL13 产品对湄公河的水位数据进行了系统分析, 并与实地观测数据进行定量对比, 结果显示均方根误差 RMSE (Root Mean Squared Error) 为 0.19 m, 偏差为 -0.05 m。值得关注的是, 该研究进一步揭示: 夜间的测高精度较日间有所提高, 其中 RMSE 降低了 0.03 m。这与 Xiang 等 (2021) 在美国密西西比河下游开展的研究结果非常接近, 后者的偏差和 RMSE 分别为 -0.08 m 和 0.12 m。两者之间的微小精度差异可能源于数据预处理方法或研究地区的地形特点不同。具体来讲, 密西西比河主要为平坦地形, 而湄公河流域则是典型的山丘地形。再者, 由不同国家



提供的实测水位数据的精确性存在一定差异。也有很多学者应用其监测湖泊、水库的水位变化 (Song 等, 2013, 2014; Luo 等, 2021; Chen 等, 2022)。除此以外, 诸多研究将携带雷达高度计的测高卫星如 Geosat 系列 (Koblinsky 等, 1993)、TOPEX/Poseidon (Birkett, 1998; Maheu 等, 2003)、Jason 系列、Envisat (Medina 等, 2010; Ding 和 Li, 2011)、CryoSat-2 (Villadsen 等, 2015; Schneider 等, 2017; Nielsen 等, 2022)、Sentinel-3/6 (Kittel 等, 2021) 等用于水位的测量。

在相关研究中有学者发现, 与使用单一的雷达水位数据相比, 集成或融合后的多源雷达水位数据有更好的观测效果。Feng 等 (2023) 用校正过的 CryoSat-2 数据填补 ICESat 与 ICESat-2 数据之间的空白, 集成后的数据可以监测近 20 年水位变化。Nielsen 等 (2022) 集成 CryoSat-2、SARAL 和 Sentinel-3 水位数据, 开发了一种联合重建水位时间序列的统计方法, 建立空间模型并进行了模拟实验, 实验结果证明该方法可应用于联合其他测高任务从而进一步提高时间分辨率, 有机会获得狭窄河流的水位时间序列。当前, 有 4 种基于卫星测高技术研究的全球河流水位数据库: Hydroweb 数据集 (Santos da Silva 等, 2010)、DAHITI 数据集 (Schwatke 等, 2015)、CGLS (Copernicus Global Land Service) River Water Level 数据集、GRRATS 数据集 (Coss 等, 2020)。将数据集数据作实验数据或验证数据 (Dubey 等, 2015b), 人们开展了大量河流水位、水储量和河流径流量反演等方面的研究。如 Ke 等 (2022) 基于 Hydroweb 数据平台上的 2018 年—2020 年中 24 个虚拟站点的水位数据, 重建出雅鲁藏布江近 20 年的水位观测值, 研究河段水位的年内和年际变化。雷道等 (2022) 结合实测数据对 Hydroweb、DAHITI、GRRATS 数据集在中国区河流的数据产品开展了精度验证及分析, 研究表明: Hydroweb 的精度表现更为出色, 其 RMSE 的平均值为 0.70 m, 明显低于 DAHITI 数据集的 1.29 m 和 GRRATS 数据集的 3.21 m; 3 个数据集在不同站点的精度表现存在显著差异, 这种差异主要受到所采用的水位提取算法 (如波形重跟踪和去噪处理) 以及所选择的测高卫星的影响。

## 4.2 青藏高原河流水位遥感监测应用

青藏高原地势起伏、峡谷幽深, 河流水位年

际与年内变化较大, 凭借现有的水文观测数据很难对河源区河流的水文情势变化有全面了解。所以有很多研究利用遥感卫星测高数据重建或估算各河流断面的水位信息。Dubey 等 (2014) 将雅鲁藏布江下游辫状河段的 Hydroweb 水位数据与实测水位进行相关性分析, 发现处于横向沉积/退化阶段的河道, 测高数据在水位及其相关测量方面表现不佳。之后 Dubey 等 (2015a) 于同一流域中基于 SARAL/AltiKa 卫星数据利用多种算法 (beta、Ice-1、Ice-2 和阈值法) 反演水位, 研究结果表明 beta 参数算法更适用于辫状河段的水位反演, 大部分反演水位的 RMSE 小于 0.40 m, 最小值为 0.16 m; 另外, 通过对比季风与非季风季节高度计水位数据的精度, 得出高度计在季风时期能够提供更精确的水位数据; 而从不同位置的站点水位差值来看, 遥感监测水位的精度呈从上游至下游增加特点, 上游的虚拟站点水位差最小为 3.75 m, 下游的最大差值为 6.90 m。Dhote 等 (2021) 在此基础上建立水文动力模型 (HDmodel), 基于 SARAL/AltiKa 卫星数据估算河流水位, 与前者相比, 其在相同站点的 RMSE 减少了 0.01 m, 均方根误差的平均值则减少了 0.43 m (其数据均来自原文), 表明卫星测高在验证水文模型和水位—流量关系曲线的潜力。传统的足迹选择方法只关注落在水体内的足迹, 特别是位于水体中心的足迹, 这限制了水位反演精度的进一步提高, Huang 等 (2018a) 在前人研究的基础上提出改进 TIC 算法, 尤其适用于河道宽度相对较窄且足迹有限的少测量或无测量地区。该方法是对 50% 阈值法和 Ice-1 算法的融合, 其主要步骤是: 考虑河道内和附近的所有测高足迹, 增加采样数据量; 改进波形重跟踪算法, 减少异常值的影响。评价该方法反演水位的精度指标为标准差 (STD), 其 STD 范围为 0.30—0.80 m, 最小值为 0.29 m, 优于雅鲁藏布江上游现有的算法和产品精度 (其误差对比可见表 5), 可以更好地监测高山地区相对狭窄的河流水位。

除了常用的 Jason-2、Envisat 和 SARAL/AltiKa 测高数据, Fok 等 (Fok 和 He, 2018; He 等, 2018) 利用 MODIS 数据产品、GRACE、TRMM 卫星数据先后构建 TWS 和加权 TRMM-SPI 指数重建长江和湄公河入海口处的水位, 加权 TRMM-SPI 指数相较 TWS 误差减少了约 0.30 m, 可以用于受 ENSO 等极端气候影响的大型流域的水位重建。目前有关

青藏高原河流水位的研究仍聚焦于某些流域主干河段水位的提取算法优化及遥感数据的精度评估,仍缺少适应不同河段或水文情势的水位反演普适性算法。未来相关研究的重点,除了提高水位监测算法的精度之外,流域尺度或整个河源区甚至内流区河流的多年水位变化规律的遥感监测也应该受到重视。

表5 基于本文文献调研结果的不同卫星测高波形重跟踪算法提取雅鲁藏布江水位精度对比

Table 5 Accuracy comparison of various waveform retracking algorithms of satellite altimetry for water level monitoring in the Yarlung Tsangpo River based on the results of the literatures in this paper

参考文献	方法	经度/(°E)	纬度/(°N)	RMSE/m	STD/m
Dubey等 (2015a)	beta	90.2500	26.1100	0.58	
		91.6500	26.2200	0.78	
		91.0900	26.2000	0.29	
		91.7100	26.1800	0.28	
		92.4400	26.5500	0.6	
		92.5300	26.6100	0.99	
		93.1300	26.6400	0.98	
		93.8000	26.8200	0.96	
Dhote等 (2021)	HDmodel	94.0400	26.8700	0.95	
		94.4700	27.0400	0.89	
		92.5900	26.6100	0.15	
		92.4600	26.5400	0.42	
Huang等 (2018a)	改进TIC	91.8000	26.2100	0.36	
		91.6700	26.1700	0.27	
		89.4900	29.3300		0.87
		91.8900	29.2700		0.72
		94.8500	29.5200		0.29
		94.8800	29.5500		0.39

## 5 河流流量遥感

### 5.1 河流流量遥感估算方法

河流流量是水循环中最重要的变量之一,在地表水的时空动态变化中扮演至关重要的角色。流量是指单位时间通过某一河道断面的水体积,单位为 $\text{m}^3/\text{s}$ ,是河流径流过程的瞬时特征,是推算河段入出水量以及水情变化趋势的主要依据。河道径流量是指某一时段内通过某一河道断面的水体积,单位为 $\text{m}^3$ 。河道径流量可以通过河道流

量和时间估算,也可以通过河道断面的面积和流速测算。获取这些数据的方式通常有两种,一种是获取水文站观测数据。由于直接测量河道流量的操作较为复杂,连续监测流量变化更加困难,更便捷且高效的做法是利用校准曲线建立观测水位与观测流量的经验关系,通过连续观测水位推算流量。随着科技日新月异的发展,专用于测量河道的流量计产品也层出不穷,目前使用最多的流量计是超声波流量计。

另一种方法则是基于遥感观测估算河道流量RSQ (Remote Sensing of River Discharge)。近年来,有诸多文献讨论河道流量遥感估算方法的分类方式,如Sichangi等(2016)提供了一种高效的分类方法,将RSQ归纳为4种基本方法:利用卫星测高数据建立水位—流量经验曲线、基于淹没面积建立面积—流量经验关系、遥感直接测量水力方程的变量估算流量以及Gleason和Smith(2014)提出的多站水力几何(AMHG)法,但其排除了诸多水文建模的相关文献。Huang等(2020)在此基础上又将RSQ方法细化为6个分支:宽度—流量经验关系、水位—流量经验关系、C/M信号法、曼宁方程、基于SWOT算法和水文建模。而Gleason和Durand(2020)认为RSQ方法最重要的决定因素是对实测数据的需求,因此依据对流域资料的了解程度依次分为无实测资料流域、政治未公开资料流域、有局部实测资料流域、半实测流域和实测流域,并为未来研究RSQ问题的学者们提供了决策分析过程(图3)。李和谋等(2023)优化了Sichangi等(2016)的4种分类方式,将其简单归为基于水文模型和基于经验回归方程两种:建立水文模型主要用于估算流域尺度长时序的日径流量或月径流量,构建关于流量变量的经验回归方程主要用于估算河道断面的瞬时流量(具体分类见图4)。以上关于RSQ方法的分类方式在侧重点和应用层面存在异同,即关于曼宁方程和水文建模的方法归属不同,但都为未来研究提供了不同视角的本底信息,需要结合具体研究流域的特征、数据可用性和研究目的选择适当的遥感估算方法。

基于经验回归方程估算河道流量的主要思路是基于遥感观测获得与流量有关的变量,如水位、河宽、河道坡度等,建立某个变量或多个变量与流量之间的经验关系,进而推算河流流量值。

Smith 等 (1995) 通过多时相 ERS-1 合成孔径雷达卫星图像和同步进行的地面流量测量发现加拿大境内一条辫状冰川河流的水面面积和流量之间存在很强的相关性 ( $R^2=0.89$ ), 得到结论: 由卫星图像得到的河流有效宽度随着流量而变化。Bjerklie 等 (2003) 提出准确反演水面流速、河宽和水深三参数是从卫星有效估算流量的关键, 后 Bjerklie 等 (2018) 基于 Landsat 河流范围产品 DSWE (Dynamic Surface Water Extent) 确定的河流宽度和 Jason-2 雷达卫星数据得到的水位、坡度, 通过曼宁公式和

普朗特卡门公式两种物理流阻方程估算流量。Riggs 等 (2023) 利用 Landsat 和 Sentinel-2 系列卫星得到的河流宽度观测数据, 构建河宽—流量变化曲线填补全球水文站的缺失流量记录, 该关系曲线可用于在获取卫星图像时生成近乎实时的流量估算。但一般情况下, 构建经验曲线法只适用于特定流域, 能否推广到其他河流存在很大的不确定性, 且受重访周期、空间分辨率等的限制, 通常作为有资料流域补充数据的手段。

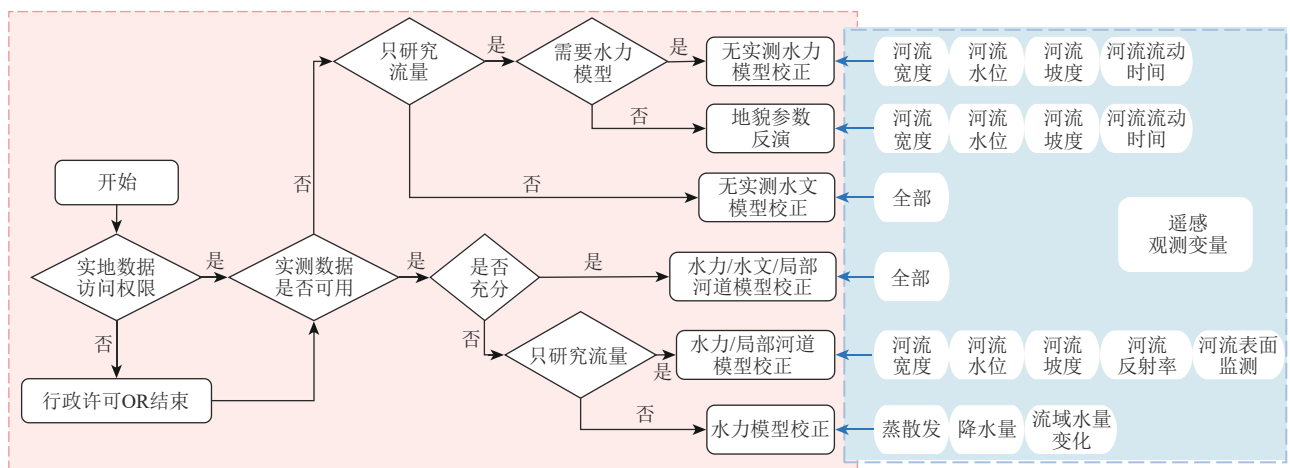


图3 遥感估算河道流量方法指南图(注: 据文献(Gleason 和 Durand, 2020)修改)

Fig. 3 RSQ methods selection guide: A decision chart for practitioners (Note: Modified from literature (Gleason and Durand, 2020))

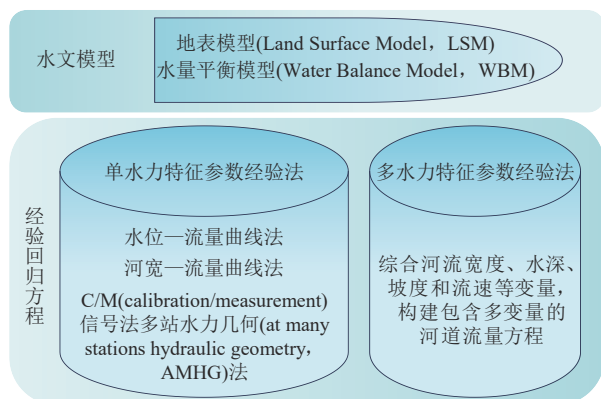


图4 河道流量遥感方法分类图(注: 据文献(李和谋 等, 2023)修改)

Fig. 4 Classification chart of RSQ methods (Note: Modified from literature (Li et al., 2023))

基于遥感建立的河流水文水动力模型主要分为地表模型 LSM (Land Surface Model) 和水量平衡模型 WBM (Water Balance Model)。遥感信息一方面可以作为水文模型的驱动数据, 一方面可以用

于校准水文模型参数。如 Getirana (2010) 将星载雷达测高数据用于南美洲亚马逊河的水文模型参数率定, 结果表明在水文模型参数率定时采用雷达测高数据能得到合理参数。Liu 等 (2015) 则同时使用河流水位和宽度进行水文模型参数率定, 结果表明此方法可用于估算无资料地区大型河流的流量。Brakenridge 等 (2012) 提出利用河流面积代替水位作为流量估算值, 建立用于校准全球水文模型所需的传感器数据, 并在 6 个试验站点验证了结果的准确性。水文模型反演河道流量时的不足主要体现在输入不确定性、模型不确定性和参数不确定性, 由于遥感数据空间分辨率较低和多源数据同化等问题, 反演结果的误差是各驱动数据源的累积。此外, 各水文模型在对流域形态刻画、水文过程描述以及参数物理定义等方面不尽相同, 所以模拟结果存在显著差异, 难以定量分析各模型适用的区域范围。而且进行水文模型

参数率定时对实测数据质量的需求较高,在流域周边环境、气候或下垫面发生显著变化时,也难以确保流量估值的准确性。

另外,为测试SWOT卫星在估算河流流量方面的应用效果,NASA研发了一种实验性机载Ka波段雷达干涉仪(AirSWOT),其数据可作为SWOT数据的替代品用于算法测试。目前,已有研究开发出利用SWOT数据估算流量的算法,如Durand等(2014)提出一种算法,该算法使用贝叶斯马尔可夫链蒙特卡罗方案中的Metropolis算法,输入河流水面高程和坡度的测量值计算河流水深和流量的最佳估值。Hagemann等(2017)综合曼宁方程和多站水力几何(AMHG)提出了一种名为BAM(Bayesian AMHG-Manning)的新算法,该算法仅根据多个河段位置的河流宽度、坡度和高度进行流量估算,其精度与AMHG法相比有所提高,结合SWOT卫星数据可用于估算无资料地区的河流流量。Tuozzolo等(2019)收集AirSWOT在美国威拉米特河的测量数据,分别测试了Durand、Hagemann和Brisset等(2018)提出的3种算法(MetroMan、BAM和DassFlow)的误差和不确定性。与实测数据相比,3种算法估算流量的归一化均方根误差nRMSE(normalized Root Mean Squared Error)为10%—31%,展示出了相当高的准确性。另外,Pitcher等(2019)以及Altenau等(2019)在美国阿拉斯加的育空河(Yukon)和塔那那河(Tanana)进行了系列实验,对利用AirSWOT获得的水面高程(WSE)和水面坡度(WSS)进行了实地验证评估,在确保了这些数据的准确性后进一步估计流量,水面高程和水面坡度估算值的RMSE分别为8 cm和1.50 cm/km,与实际的观测数据高度吻合,证明了AirSWOT能够准确且高分辨地捕捉河流水面高程和坡度的时空变化。

## 5.2 青藏高原河流流量遥感估算应用

长期以来,对地面实测数据的依赖一直是无资料地区获取流量信息的难题,尤其是受冰川融水和融雪影响较大的青藏高原。现有研究大多基于各水文站点近几十年的实测径流数据对外流区主要河流的水文变化展开研究(曹建廷等,2005;丁永建等,2007;张建云等,2019;汤秋鸿等,2019;Wang等,2021),尽管针对的河流和采用的方法有所不同,其研究结果在某种程度上都显

示出相似的趋势。研究表明:20世纪50年代至21世纪初,青藏高原大部分河流源区径流统计尽管没有呈现显著的变化趋势,但整体上黄河源区年径流有减少趋势,长江源区有微弱增加趋势,降水变化和冰雪加速消融是径流变化的主因;黄河上游、澜沧江上游、沱沱河、拉萨河等河流源区的春秋季节径流随时间推移增加。然而水文站点主要分布在青藏高原东部和南部,还有许多河流及其支流没有地面观测数据,这对了解无测量地区的源头河流流量的时空动态变化是极大的挑战。

青藏高原地势复杂,流域下垫面频繁变化、辫状河流宽度不一,因此使用河宽单一变量估算河道流量难度较大,研究多利用水文/水动力模型和多水力特征参数经验法估算高山区河道流量(表6对河道流量遥感在青藏高原的应用进行了总结)。Huang等(2020)分别用测高水位和“类SWOT”数据即Landsat图像衍生的河流宽度和同时期的测量水位,校准分布式水文模型CREST-RS估计河流宽度约100 m的狭窄河流的日流量,该模型可以模拟包括雪和冰川积累、融化在内的冰冻圈过程,日流量估值的NSE和LogNSE均可达到0.80,证明了使用卫星测高和类SWOT数据进行模型校准的可靠性。而后Huang等(2022)又提出用河流宽度代替水位,完全由遥感数据校准水文模型估算每日连续河流流量的方法,并选择测量不良或无测量的河流源头来测试该方法,流量估值的NSE达到0.80(总体高于0.50),适用于宽度更窄(约50 m)的小河,展示了没有河流流量先验信息的情况下通过遥感观测获得每日连续流量的潜力。该研究发现:河流宽度的大小和可变性会对模型校正产生影响,高流量时期得出的宽度更加可靠,因为与低流量季节相比,其可变性更高。此外,Fok等(Chen等,2019;Fok等,2020)发现蒸散发数据的选择在遥感径流估计中至关重要,在确定TRMM降水数据、MODIS-ET等气象数据精度可靠后,建立水量平衡模型估算河口处流量,相较于Ferreira等(2013)的方法在统计学上表现出更好的结果:皮尔逊相关系数增加0.15,均方根误差减小了2.61 mm/月。使用降雨径流模型的一系列研究表明:蒸散发数据的不确定性和月尺度数据的低时间分辨率是纯遥感数据估算径流时不能准确捕捉干湿季最大和最小径流量的主要原因。

表6 遥感估算河流流量在青藏高原应用研究进展  
Table 6 A review of related researches for RSQ on the Tibetan Plateau

研究方法	参考文献	研究数据源	研究流域	主要结论
基于水文模型	Sun等(2018)	光学	雅鲁江上游	高精度河宽校准水文模型,NSE可达0.56
	Huang等(2020)	光学+测高	雅鲁藏布江、拉萨河	NSE可达0.85
	Huang等(2022)	光学	长江、湄公河、萨尔温江、拉萨河	遥感河宽校准水文模型,NSE最高可达0.80
经验曲线法	Papa等(2012)	测高	恒河、雅鲁藏布江	水位—流量曲线估值,平均误差低至6.50%
	Birkinshaw(2010)	测高	湄公河	水位—流量曲线估值,NSE可达0.94
AMHG法	Mengen等(2020)	SAR成像	湄公河	等分國值法,枯水期的相对均方根误差为15.8%
多水力特征参数经验法	Birkinshaw(2014)	光学+测高	湄公河、鄂毕河	水位、河宽和河道坡度,NSE可达0.90
	Sichangi等(2016)	光学+测高	包括长江在内的全球8条河流	水位、河宽,NSE可达0.97
	Sichangi等(2018)	光学+测高+DEM	长江	峰值流速估值为0.96 m/s,NSE可达0.76
	Huang等(2018b)	光学+测高	雅鲁藏布江	水位、河宽,NSE可达0.90以上

使用多变量的反演流量算法考虑到河道多样性和变异性,其结果较单一变量法精度更高。曼宁方程考虑河流断面的几何特性、粗糙系数以及河道坡度等参数,构建包含多变量的河道流量方程用于计算河道流速及流量。Sichangi等(2018)利用遥感数据估算水力参数(即河流流速、粗糙度系数和河流深度),用水力参数修正曼宁方程后估算的河流流量误差较小,两个站点的NSE分别为0.50和0.76,其能够在不使用任何先验数据的情况下估计河流流量,也可以广泛应用于其他没有地面测量站的大型河道。

全球变暖背景下,该区域的水资源安全面临新的问题和挑战(叶柏生等,2012)。已有学者(Lutz等,2014;Khanal等,2021;Su等,2022;Luo等,2018)尝试使用不同的水文模型和GCM组合方式,预估青藏高原河源区未来几十年的径流变化趋势,其预估结果均表明在长江、黄河、澜沧江和怒江上游等季风主导的源区流域,未来降雨增多是径流增加的主要原因(Li等,2013),主要集中在降水较多的暖湿季节(5—10月);在西风主导的印度河上游,未来径流增加主要原因是冰川融水;对于同时受到西风和季风影响的雅鲁藏布江流域,约14.0%—35.0%的未来径流增加来自冰川融水。由此可见,未来青藏高原河源区径流将整体呈上升趋势,但不同气候系统和自然条件(如冰雪分布规模)将导致各流域的径流增加节律及主导机制差异:长江、黄河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等河流源区的径流季节分配在未来变化不明显;印度河、塔里木河等流域则受积雪消融提前的影响,未来早春季节径流将显著

增长。此外,青藏高原河流源区未来洪水等极端事件发生频率和强度都将增加(Barnett等,2005;Lutz等,2016)。因此,面临气候变化愈加显著的水文影响和地面资料缺少条件下的观测需求增加,卫星遥感技术的发展为河流水文研究领域带来了变革,如何提升多源遥感监测青藏高原地区河流水文要素的能力(包括时空覆盖度和参数反演精度)是接下来需要重点关注的研究问题。

## 6 结 语

卫星遥感技术的发展为河流水文研究领域带来了变革,尤其是在“高空间、高时间、高光谱”分辨率遥感技术的推进下,准确、实时、大范围监测河流水文动态已然成为可能。如何充分利用高分辨率遥感图像的多波段、高空间和高时间分辨率特性,进一步提高河流水文要素的提取精度,加深对地面资料缺失区(如青藏高原地区)河流水文情势和复杂运动过程的理解,还需要更多深入研究。

伴随着卫星遥感技术的发展,遥感数据源逐渐由单一、不连续数据演变为多源、多传感器、长时序数据。提取河流水文要素的遥感方法也不断进步,各类河流关键水文要素的监测方法和数据集层出不穷,为洞察和监测河道水文变化奠定了基础,但是河流水文遥感的发展仍面临如下问题,有待进一步探索:

(1) 在河流水体与陆地交界或河网内部结构复杂的地区,受到混合像元、地形阴影和光谱特征相似地物的影响,导致河流水体信息(如河流面积/河宽)提取方法的精度严重下降。目前的遥

感方法主要应用于提取河流干流和宽阔支流等较大水体,其在提取山区和细小河流的信息上仍显不足。为此,已有学者尝试将遥感影像与DEM辅助数据融合用于精确识别细小河流,旨在减少或修正混合像元的干扰,大部分方法在支流流域内进行实验和精度验证,并得到了广泛认可,但其在流域尺度/区域尺度上的应用效果还待进一步挖掘。

(2) 验证水文遥感数据准确性和可靠性最常用的办法是与实地观测数据进行对比分析,常以决定系数、均方根误差、纳什系数等作为精度验证指标,但在水文站点稀疏或无可靠资料地区,评估遥感数据的质量和潜力存在挑战。探索并发展适用于缺乏实地观测数据的替代验证方法,如利用水文/数值模型的输出数据与遥感数据进行对比分析,但模型的精度、可信度以及模型输出的不确定性估计是确保验证效果的关键因素。此外,也可以考虑地理和气象条件的相似性,选择合适邻近地区的观测数据辅助精度验证,但必须明确其在特定环境下的适用性和局限性。未来的可行性研究方向之一可以聚焦于探索替代验证方法的有效性和适用性,以进一步提高遥感数据的质量评估和应用潜力分析的可信度。

(3) 当前缺乏对青藏高原内流区河流水文变化的全面监测和时空规律研究。现有研究大多基于分布在高原东部及南部的少量实测水文站,聚焦外流河源区水文对气候变化、冰雪融水补给响应特征。对于气候变化影响时空异质性极强的青藏高原,内流区河流水文情势是否有别于外流江河源区的变化特征还未可知。另外,青藏高原内流湖盆区基本没有地面观测资料,进一步限制了对该地区水循环的深入理解。鉴于高原内流区河流流域较窄、动态变化频繁、且受云雨天气影响大的特点,强化遥感技术的集成监测能力显得尤为重要。利用低成本、功能互补的遥感虚拟星座方法,集成多种不同性质和类型的卫星传感平台的优势,实现多尺度河流流域面积与水位的高时空分辨率信息获取,是满足高原内流河水情变化探测需求的有效途径。

在当前河流水文遥感研究的基础上,要推动河流水文遥感更进一步,未来的研究及发展重点可以归纳为以下两点:

(1) 整合多源遥感数据、加强遥感监测技术

及其应用。充分利用雷达和光学图像的光谱、空间、时间等多维大数据信息,加强对不同时空分辨率遥感影像的拼接和融合处理,综合阈值法、面向对象和深度学习、人工智能等新方法,全面提升对河流水文变化的了解,实现更高精度的全方位河流水情要素监测。为了进一步提升“亚洲水塔”水源地保护性观测与研究能力,青藏高原河流水文观测应该集成卫星遥感、探空与地面等多源多类型观测手段,从站点观测拓展到河流系统观测及流域水文要素观测,完善从上游冰川到下游河谷的高寒山区水循环综合观测网络,满足高原河流水情变化的探测需求。

(2) 优化和创新更为普适性的河流水文遥感算法。现有的河流水文遥感研究大多倾向于在特定的研究区域采用不同的算法提取河流水文要素,但这些算法往往在复杂地形和无人区域(如青藏高原)的应用上存在局限性。如何高效地集成多源遥感数据,结合多类型辅助数据,根据不同的地形等信息采用机器学习、深度学习等方法构建普适性方法,并推广到高山区大范围的河流水文要素提取中,更好地服务于全球各地区的河流水文遥感研究,是未来要思考的重要科学问题。

本研究从监测不同河流水文要素的主要卫星遥感数据源和方法角度出发,归纳了当前基于遥感技术进行河流水情要素监测的相关研究进展和未来的发展空间,为相关研究领域提供了系统性的参考框架;也进一步总结了青藏高原河源区河流水文要素的遥感研究现状,期待促进该地区河流水文科学的研究深化,为实际的水资源管理和政策制定提供更为准确和科学的技术支撑。

## 参考文献(References)

- Alijani Z, Lindsay J, Chabot M, Rowlandson T and Berg A. 2021. Sensitivity of C-band SAR polarimetric variables to the directionality of surface roughness parameters. *Remote Sensing*, 13(11): 2210 [DOI: 10.3390/rs13112210]
- Allen G H and Pavelsky T M. 2015. Patterns of river width and surface area revealed by the satellite-derived North American River Width data set. *Geophysical Research Letters*, 42(2): 395-402 [DOI: 10.1002/2014GL062764]
- Allen G H and Pavelsky T M. 2018. Global extent of rivers and streams. *Science*, 361(6402): 585-588 [DOI: 10.1126/science.aat0636]
- Als Dorf D E, Rodríguez E and Lettenmaier D P. 2007. Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2002

- [DOI: 10.1029/2006RG000197]
- Altenau E H, Pavelsky T M, Moller D, Pitcher L H, Bates P D, Durand M T and Smith L C. 2019. Temporal variations in river water surface elevation and slope captured by AirSWOT. *Remote Sensing of Environment*, 224: 304-316 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.002]
- Arnesen A S, Silva T S F, Hess L L, Novo E M L M, Rudorff C M, Chapman B D and McDonald K C. 2013. Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images. *Remote Sensing of Environment*, 130: 51-61 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.035]
- Barnett T P, Adam J C and Lettenmaier D P. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066): 303-309 [DOI: 10.1038/nature04141]
- Barton I J and Bathols J M. 1989. Monitoring floods with AVHRR. *Remote Sensing of Environment*, 30(1): 89-94 [DOI: 10.1016/0034-4257(89)90050-3]
- Birkett C M. 1998. Contribution of the TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands. *Water Resources Research*, 34(5): 1223-1239 [DOI: 10.1029/98wr00124]
- Birkinshaw S. J., G. M. O'Donnell, P. Moore, C. G. Kilsby, H. J. Fowler, and P. A. M. Berry. 2010. Using satellite altimetry data to augment flow estimation techniques on the Mekong River. *Hydrological Processes* 24 (26):3811-25. [DOI: 10.1002/hyp.7811]
- Birkinshaw S. J., P. Moore, C. G. Kilsby, G. M. O'Donnell, A. J. Hardy, and P. A. M. Berry. 2014. Daily discharge estimation at ungauged river sites using remote sensing. *Hydrological Processes* 28 (3):1043-54. [DOI: 10.1002/hyp.9647]
- Bjerklie D M, Birkett C M, Jones J W, Carabajal C, Rover J A, Fulton J W and Garambois P A. 2018. Satellite remote sensing estimation of river discharge: application to the Yukon River Alaska. *Journal of Hydrology*, 561: 1000-1018 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.04.005]
- 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, Cohen S, Kettner A J, De Groeve T, Nghiem S V, Syvitski J P M and Fekete B M. 2012. Calibration of satellite measurements of river discharge using a global hydrology model. *Journal of Hydrology*, 475: 123-136 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.09.035]
- Brisset P, Monnier J, Garambois P A and Roux H. 2018. On the assimilation of altimetric data in 1D Saint-Venant river flow models. *Advances in Water Resources*, 119: 41-59 [DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.06.004]
- Brivio P A, Colombo R, Maggi M and Tomasoni R. 2002. Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas. *International Journal of Remote Sensing*, 23(3): 429-441 [DOI: 10.1080/01431160010014729]
- Cao J T, Qin D H, Kang E S and Li Y Y. 2005. *Chinese Science Bulletin*, 50(21): 2403-2408 (曹建廷, 秦大河, 康尔泗, 李原园. 2005. 青藏高原外流区主要河流的径流变化. *科学通报*, 50(21): 2403-2408 [DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2005.21.010])
- Chang F G, Li D X, Dong Z, Huang Y, He Z H and Chen X. 2021. Elevation spatial variation analysis and compensation in GEO SAR imaging. *Remote Sensing*, 13(10): 1888 [DOI: 10.3390/rs13101888]
- 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 T, Song C Q, Zhan P F and Ma J S. 2022. How many Pan-Arctic lakes are observed by ICESat-2 in space and time?. *Remote Sensing*, 14(23): 5971 [DOI: 10.3390/rs14235971]
- Chen Y T, Fok H S, Ma Z T and Tenzer R. 2019. Improved remotely sensed total basin discharge and its seasonal error characterization in the Yangtze River Basin. *Sensors*, 19(15): 3386 [DOI: 10.3390/s19153386]
- Coss S, Durand M, Yi Y C, Jia Y Y, Guo Q, Tuozzolo S, Shum C K, Allen G H, Calmant S and Pavelsky T. 2020. Global River Radar Altimetry Time Series (GRRATS): new river elevation earth science data records for the hydrologic community. *Earth System Science Data*, 12(1): 137-150 [DOI: 10.5194/essd-12-137-2020]
- Cuo L, Zhang Y X, Zhu F X and Liang L Q. 2014. Characteristics and changes of streamflow on the Tibetan Plateau: a review. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2: 49-68 [DOI: 10.1016/j.ejrh.2014.08.004]
- Davis C H and Sun S. 2004. Long-Term thinning of the southeast greenland ice sheet from seasat, geosat, and GFO satellite radar altimetry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(2): 47-50 [DOI: 10.1109/LGRS.2004.824742]
- Desai S D. 2002. Observing the pole tide with satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C11): 3186 [DOI: 10.1029/2001JC001224]
- Dhote P R, Thakur P K, Domeneghetti A, Chouksey A, Garg V, Aggarwal S P and Chauhan P. 2021. The use of SARAL/AltiKa altimeter measurements for multi-site hydrodynamic model validation and rating curves estimation: an application to Brahmaputra River. *Advances in Space Research*, 68(2): 691-702 [DOI: 10.1016/j.asr.2020.05.012]
- Ding X W and Li X F. 2011. Monitoring of the water-area variations of Lake Dongting in China with ENVISAT ASAR images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(6): 894-901 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.06.009]
- Ding Y J, Ye B S, Han T D, Liu S Y, Shen Y P and Xie C W. 2007. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 37(2): 206-214 (丁永建, 叶柏生, 韩添丁, 刘时银, 沈永平, 谢昌卫. 2007. 过去50年中国西部气候和径流变化的区域差异. *中国科学D辑: 地球科学*, 37(2): 206-214) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2007.02.008]
- Dubey A K, Gupta P, Dutta S and Kumar B. 2014. Evaluation of satel-

- lite-altimetry-derived river stage variation for the braided Brahmaputra River. *International Journal of Remote Sensing*, 35(23): 7815-7827 [DOI: 10.1080/01431161.2014.978033]
- Dubey A K, Gupta P, Dutta S and Singh R P. 2015a. Water level retrieval using SARAL/AltiKa observations in the braided Brahmaputra river, eastern India. *Marine Geodesy*, 38(S1): 549-567 [DOI: 10.1080/01490419.2015.1008156]
- Dubey A K, Gupta P K, Dutta S and Singh R P. 2015a. An improved methodology to estimate river stage and discharge using Jason-2 satellite data. *Journal of Hydrology*, 529: 1776-1787 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.009]
- Durand M, Neal J, Rodríguez E, Andreadis K M, Smith L C and Yoon Y. 2014. Estimating reach-averaged discharge for the River Severn from measurements of river water surface elevation and slope. *Journal of Hydrology*, 511: 92-104 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.12.050]
- Durand M, Rodriguez E, Alsdorf D E and Trigg M. 2010. Estimating river depth from remote sensing swath interferometry measurements of river height, slope, and width. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(1): 20-31 [DOI: 10.1109/JSTARS.2009.2033453]
- Fan C B, Li J C, Wang D, Chu Y H, Xu X Y and Zou X C. 2005. Applications of ICESAT to geoscience research. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25(2): 94-97 (范春波, 李建成, 王丹, 褚永海, 徐新禹, 邹贤才. 2005. 激光高度计卫星 ICESAT 在地学研究中的应用. *大地测量与地球动力学*, 25(2): 94-97) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2005.02.016]
- Fei J Y, Liu J T, Ke L H, Wang W, Wu P F and Zhou Y Y. 2022. A deep learning-based method for mapping alpine intermittent rivers and ephemeral streams of the Tibetan Plateau from Sentinel-1 time series and DEMs. *Remote Sensing of Environment*, 282: 113271 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113271]
- Feng M, Sexton J O, Channan S and Townshend J R. 2016. A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first results of a topographic - spectral classification algorithm. *International Journal of Digital Earth*, 9(2): 113-133 [DOI: 10.1080/17538947.2015.1026420]
- Feng Y, Yang L K, Zhan P F, Luo S X, Chen T, Liu K and Song C Q. 2023. Synthesis of the ICESat/ICESat-2 and CryoSat-2 observations to reconstruct time series of lake level. *International Journal of Digital Earth*, 16(1): 183-209 [DOI: 10.1080/17538947.2023.2166134]
- Ferreira V, Gong Z, He X F, Zhang Y L and Andam-Akorful S. 2013. Estimating total discharge in the Yangtze River Basin using Satellite-Based observations. *Remote Sensing*, 5(7): 3415-3430 [DOI: 10.3390/rs5073415]
- Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R and Proud S R. 2014. Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140: 23-35 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029]
- Fok H S and He Q. 2018. Water level reconstruction based on satellite gravimetry in the Yangtze River Basin. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7): 286 [DOI: 10.3390/ijgi7070286]
- Fok H S, Zhou L H and Ji H. 2020. Mekong delta runoff prediction using standardized Remotely-Sensed water balance variables. *Water*, 12(7): 2025 [DOI: 10.3390/w12072025]
- Getirana A C V. 2010. Integrating spatial altimetry data into the automatic calibration of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 387(3/4): 244-255 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.013]
- Gleason C J and Durand M T. 2020. Remote sensing of river discharge: a review and a framing for the discipline. *Remote Sensing*, 12(7): 1107 [DOI: 10.3390/rs12071107]
- Gleason C J and Smith L C. 2014. Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(13): 4788-4791 [DOI: 10.1073/pnas.1317606111]
- Gong P, Wang J, Yu L, Zhao Y C, Zhao Y Y, Liang L, Niu Z G, Huang X M, Fu H H, Liu S, Li C C, Li X Y, Fu W, Liu C X, Xu Y, Wang X Y, Cheng Q, Hu L Y, Yao W B, Zhang H, Zhu P, Zhao Z Y, Zhang H Y, Zheng Y M, Ji L Y, Zhang Y W, Chen H, Yan A, Guo J H, Yu L, Wang L, Liu X J, Shi T T, Zhu M H, Chen Y L, Yang G W, Tang P, Xu B, Giri C, Clinton N, Zhu Z L, Chen J and Chen J. 2013. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7): 2607-2654 [DOI: 10.1080/01431161.2012.748992]
- Guerreiro K, Fleury S, Zakharova E, Rémy F and Kouraev A. 2016. Potential for estimation of snow depth on Arctic sea ice from CryoSat-2 and SARAL/AltiKa missions. *Remote Sensing of Environment*, 186: 339-349 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.013]
- Hagemann M W, Gleason C J and Durand M T. 2017. BAM: Bayesian AMHG-manning inference of discharge using remotely sensed stream width, slope, and height. *Water Resources Research*, 53(11): 9692-9707 [DOI: 10.1002/2017WR021626]
- He Q, Fok H S, Chen Q and Chun K P. 2018. Water level reconstruction and prediction based on Space-Borne sensors: a case study in the Mekong and Yangtze River Basins. *Sensors*, 18(9): 3076 [DOI: 10.3390/s18093076]
- Hong C, Wang M M and Zhu F Y. 2022. Water body extraction considering terrain and its application in Qinghai-Tibet Plateau. *Geospatial Information*, 20(7): 43-47 (洪宸, 王猛猛, 朱芙瑶. 2022. 顾及地形的水体提取及其在青藏高原的应用. *地理空间信息*, 20(7): 43-47) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2022.07.009]
- Huang C, Chen Y, Zhang S Q and Wu J P. 2018c. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: a review. *Reviews of Geophysics*, 56(2): 333-360 [DOI: 10.1029/2018RG000598]
- Huang Q, Long D, Du M D, Han Z Y and Han P F. 2020. Daily continuous river discharge estimation for ungauged basins using a hydrologic model calibrated by satellite altimetry: Implications for the SWOT mission. *Water Resources Research*, 56(7): e2020WR02730



- 9 [DOI: 10.1029/2020WR027309]
- Huang Q, Long D, Du M D, Zeng C, Li X D, Hou A Z and Hong Y. 2018a. An improved approach to monitoring Brahmaputra River water levels using retracked altimetry data. *Remote Sensing of Environment*, 211: 112-128 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.018]
- Huang Q, Long D, Du M D, Zeng C, Qiao G, Li X D, Hou A Z and Hong Y. 2018b. 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 Q, Long D, Han Z Y and Han P F. 2022. High-resolution satellite images combined with hydrological modeling derive river discharge for headwaters: a step toward discharge estimation in ungauged basins. *Remote Sensing of Environment*, 277: 113030 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113030]
- Isikdogan F, Bovik A and Passalacqua P. 2015. Automatic channel network extraction from remotely sensed images by singularity analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(11): 2218-2221 [DOI: 10.1109/lgrs.2015.2458898]
- Isikdogan F, Bovik A and Passalacqua P. 2017b. RivaMap: an automated river analysis and mapping engine. *Remote Sensing of Environment*, 202: 88-97 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.044]
- Ke L H, Xu J H, Fan C Y, Liu K, Chen T, Wang S D, Chen X B, Song L J and Song C Q. 2022. Remote sensing reconstruction of long-term water level and storage variations of a poorly-gauged river in the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40: 101020 [DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101020]
- Khanal S, Lutz A F, Kraaijenbrink P D A, van den Hurk B, Yao T and Immerzeel W W. 2021. Variable 21st century climate change response for rivers in high mountain asia at seasonal to decadal time scales. *Water Resources Research*, 57(5): e2020WR029266 [DOI: 10.1029/2020wr029266]
- Kittel C M M, Jiang L G, Tøttrup C and Bauer-Gottwein P. 2021. Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring - a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1): 333-357 [DOI: 10.5194/hess-25-333-2021]
- Klemenjak S, Waske B, Valero S and Chanussot J. 2012. Automatic detection of rivers in high-resolution SAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(5): 1364-1372 [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2189099]
- Koblinsky C J, Clarke R T, Brenner A C and Frey H. 1993. Measurement of river level variations with satellite altimetry. *Water Resources Research*, 29(6): 1839-1848 [DOI: 10.1029/93WR00542]
- Kouraev A, Semovski S, Shimaraev M, Mognard N, Legresy B and Reymy F. 2007. Observations of Lake Baikal ice from satellite altimetry and radiometry. *Remote Sensing of Environment*, 108(3): 240-253 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.010]
- Lao J Y, Wang C, Nie S, Xi X H and Wang J L. 2022. Monitoring and analysis of water level changes in Mekong River from ICESat-2 spaceborne laser altimetry. *Water*, 14(10): 1613 [DOI: 10.3390/w14101613]
- Leben R R, Hamlington B D and Haines B J. 2011. Seasat and geosat revisited: using sea level measurements to improve satellite altimeter orbits. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 58(3): 479-493 [DOI: 10.1007/BF03321181]
- Lei X, Ke L H, Yong B, Zhang J S, Cao Q Y. Evaluation of River Water Level Monitoring from Satellite Radar Altimetry Datasets over Chinese Rivers[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(1): 61-72. (雷逍, 柯灵红, 雍斌, 张金山, 曹倩怡. 卫星雷达测高水位数据产品在中国区河流的监测精度评价. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 61-72) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0061]
- Li D, Wang G, Qin C and Wu B S. 2021. River extraction under bankfull discharge conditions based on Sentinel-2 imagery and DEM data. *Remote Sensing*, 13(14): 2650 [DOI: 10.3390/rs13142650]
- Li D, Wu B S, Chen B W, Qin C, Wang Y J, Zhang Y and Xue Y. 2020. Open-Surface river extraction based on sentinel-2 MSI imagery and DEM data: case study of the upper Yellow River. *Remote Sensing*, 12(17): 2737 [DOI: 10.3390/rs12172737]
- Li D, Wu B S, Chen B W, Xue Y and Zhang Y. 2020. Review of water body information extraction based on satellite remote sensing. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 60(02): 147-161. (李丹, 吴保生, 陈博伟, 薛源, 张翼. 2020. 基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望. 清华大学学报(自然科学版), 60(02): 147-161) [DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.22.038]
- Li D, Xue Y, Qin C, Wu B S, Chen B W and Wang G. 2022. A bankfull geometry dataset for major exorheic rivers on the Qinghai-Tibet Plateau. *Scientific Data*, 9(1): 498 [DOI: 10.1038/s41597-022-01614-w]
- Li F P, Zhang Y Q, Xu Z X, Teng J, Liu C M, Liu W F and Mpelasoka F. 2013. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 505: 188-201 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.052]
- Li H M, Bai J, Gan F P, Li X Q and Wang Z K. 2023. River discharge estimation based on remote sensing. *Remote Sensing for Natural Resources*, 35(2): 16-24 (李和谋, 白娟, 甘甫平, 李贤庆, 王泽坤. 2023. 遥感估算河道流量研究进展. 自然资源遥感, 35(2): 16-24) [DOI: 10.6046/zrzyy.2022143]
- Li J G, Huang S F and Li J R. 2010. Research on extraction of water body from ENVISAT ASAR images: a modified Otsu threshold method. *Journal of Natural Disasters*, 19(3): 139-145 (李景刚, 黄诗峰, 李纪人. 2010. ENVISAT 卫星先进合成孔径雷达数据水体提取研究——改进的最大类间方差阈值法. 自然灾害学报, 19(3): 139-145) [DOI: 10.13577/j.jnd.2010.0323]
- Liang X G, Mao W, Yang K and Ji L Y. 2022. Automated small river mapping (ASRM) for the Qinghai-Tibet plateau based on sentinel-2 satellite imagery and MERIT DEM. *Remote Sensing*, 14(19): 4693 [DOI: 10.3390/rs14194693]
- Liu G M, Schwartz F, Tseng K H, Shum C K and Lee S. 2018. Satellite altimetry for measuring river stages in remote regions. *Environ-*

- mental Earth Sciences, 77(18): 639 [DOI: 10.1007/s12665-018-7823-6]
- Liu G M, Schwartz F W, Tseng K H and Shum C K. 2015. Discharge and water-depth estimates for ungauged rivers: combining hydrologic, hydraulic, and inverse modeling with stage and water-area measurements from satellites. *Water Resources Research*, 51(8): 6017-6035 [DOI: 10.1002/2015wr016971]
- Luo S X, Song C Q, Zhan P F, Liu K, Chen T, Li W K and Ke L H. 2021. Refined estimation of lake water level and storage changes on the Tibetan Plateau from ICESat/ICESat-2. *CATENA*, 200: 105177 [DOI: 10.1016/j.catena.2021.105177]
- Luo Y, Wang X L, Piao S L, Sun L, Ciais P, Zhang Y Q, Ma C K, Gan R and He C S. 2018. Contrasting streamflow regimes induced by melting glaciers across the Tien Shan–Pamir–North Karakoram. *Scientific Reports*, 8(1): 16470 [DOI: 10.1038/s41598-018-34829-2]
- Lutz A F, Immerzeel W W, Kraaijenbrink P D A, Shrestha A B and Bierkens M F P. 2016. Climate change impacts on the upper indus hydrology: sources, shifts and extremes. *PLoS ONE*, 11(11): e0165630 [DOI: 10.1371/journal.pone.0165630]
- Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B and Bierkens M F P. 2014. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change*, 4(7): 587-592 [DOI: 10.1038/nclimate2237]
- Maheu C, Cazenave A and Mechocho C R. 2003. Water level fluctuations in the Plata basin (South America) from Topex/Poseidon Satellite Altimetry. *Geophysical Research Letters*, 30(3): 1143 [DOI: 10.1029/2002gl016033]
- Mao W, Yang K, Zhang W S, Wang Y H and Li M C. 2022. High-resolution global water body datasets underestimate the extent of small rivers. *International Journal of Remote Sensing*, 43(11): 4315-4330 [DOI: 10.1080/01431161.2022.2111531]
- Medina C, Gomez-Enri J, Alonso J J and Villares P. 2010. Water volume variations in Lake Izabal (Guatemala) from in situ measurements and ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) data products. *Journal of Hydrology*, 382(1/4): 34-48 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.12.016]
- Mengen D., M. Ottinger, P. Leinenkugel, and L. Ribbe. 2020. Modeling River Discharge Using Automated River Width Measurements Derived from Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing* 12 (19). [DOI: 10.3390/rs12193236]
- Nielsen K, Zakharova E, Tarpanelli A, Andersen O B and Benveniste J. 2022. River levels from multi mission altimetry, a statistical approach. *Remote Sensing of Environment*, 270: 112876 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112876]
- Palmer M and Ruhí A. 2018. Measuring Earth's rivers. *Science*, 361 (6402): 546-547 [DOI: 10.1126/science.aau3842]
- Pan B T and Li J J. 1996. Qinghai-Tibetan Plateau: a driver and amplifier of the global climatic change—III. the effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on Climatic Changes. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 32(1): 108-115 (潘保田, 李吉均. 1996. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器——III. 青藏高原隆起对气候变化的影响. 兰州大学学报(自然科学版), 32(1): 108-115) [DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.1996.01.024]
- Papa F, Bala S K, Pandey R K, Durand F, Gopalakrishna V V, Rahman A and Rossow W B. 2012. Ganga-Brahmaputra river discharge from Jason-2 radar altimetry: an update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117 (C11): C11021 [DOI: 10.1029/2012JC008158]
- Pavelsky T M and Smith L C. 2008. RivWidth: a software tool for the calculation of river widths from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(1): 70-73 [DOI: 10.1109/LGRS.2007.908305]
- 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]
- 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]
- Pitcher L H, Pavelsky T M, Smith L C, Moller D K, Altenau E H, Allen G H, Lion C, Butman D, Cooley S W, Fayne J V and Bertram M. 2019. AirSWOT InSAR mapping of surface water elevations and hydraulic gradients across the Yukon Flats Basin, Alaska. *Water Resources Research*, 55(2): 937-953 [DOI: 10.1029/2018wr023274]
- Qin C, Wu B S, Wang G, Fu X D, Zhao L and Li D. 2022. Generalized hydraulic geometry and multi-frequency downstream hydraulic geometry of mountain rivers originated from the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 53(2): 176-187 (覃超, 吴保生, 汪舸, 傅旭东, 赵璐, 李丹. 2022. 青藏高原山区河流广义河相关系与多频率沿程河相关系. 水利学报, 53(2): 176-187) [DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210511]
- Quarty G D, Chen G, Nencioli F, Morrow R and Picot N. 2021. An overview of requirements, procedures and current advances in the Calibration/Validation of radar altimeters. *Remote Sensing*, 13(1): 125 [DOI: 10.3390/rs13010125]
- Riggs R M, Allen G H, Wang J D, Pavelsky T M, Gleason C J, David C H and Durand M. 2023. Extending global river gauge records using satellite observations. *Environmental Research Letters*, 18 (6): 064027 [DOI: 10.1088/1748-9326/acd407]
- Santos Da Silva J, Calmant S, Seyler F, Rotunno Filho O C, Cochonneau G and Mansur W J. 2010. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, 114(10): 2160-2181 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.020]
- Schneider R, Godiksen P N, Villadsen H, Madsen H and Bauer-Gottwein P. 2017. Application of CryoSat-2 altimetry data for river analysis and modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (2): 751-764 [DOI: 10.5194/hess-21-751-2017]
- 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]
- Shi Z L and Huang C. 2020. Recent advances in remote sensing of river characteristics. *Progress in Geography*, 39(4): 670-684 (史卓琳, 黄昌. 2020. 河流水情要素遥感研究进展. *地理科学进展*, 39(4): 670-684) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.04.014]
- Sichangi A, Wang L and Hu Z D. 2018. Estimation of river discharge solely from remote-sensing derived data: an initial study over the Yangtze River. *Remote Sensing*, 10(9): 1385 [DOI: 10.3390/rs10091385]
- Sichangi A W, Wang L, Yang K, Chen D L, Wang Z J, Li X P, Zhou J, Liu W B 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]
- Smith L C, Isacks B L, Forster R R, Bloom A L and Preuss I. 1995. Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS 1 synthetic aperture radar: first results. *Water Resources Research*, 31(5): 1325-1329 [DOI: 10.1029/95WR00145]
- Song C Q, Huang B and Ke L H. 2013. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 135: 25-35 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.013]
- Song C Q, Huang B, Ke L H and Richards K S. 2014. Seasonal and abrupt changes in the water level of closed lakes on the Tibetan Plateau and implications for climate impacts. *Journal of Hydrology*, 514: 131-144 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.018]
- Su F G, Pritchard H D, Yao T D, Huang J H, Ou T H, Meng F C, Sun H, Li Y, Xu B Q, Zhu M L and Chen D L. 2022. Contrasting fate of western third pole's water resources under 21st century climate change. *Earth's Future*, 10(9): e2022EF002776 [DOI: 10.1029/2022ef002776]
- Su L F, Li Z X, Gao F and Yu M. 2021. A review of remote sensing image water extraction. *Remote Sensing for Land and Resources*, 33(1): 9-19 (苏龙飞, 李振轩, 高飞, 余敏. 2021. 遥感影像水体提取研究综述. *国土资源遥感*, 33(1): 9-19) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2020170]
- Sun W C, Fan J, Wang G Q, Ishidaira H, Bastola S, Yu J S, Fu Y H, Kiem A S, Zuo D P and Xu Z X. 2018. Calibrating a hydrological model in a regional river of the Qinghai - Tibet plateau using river water width determined from high spatial resolution satellite images. *Remote Sensing of Environment*, 214: 100-114 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.020]
- Tang Q H, Lan C, Su F G, Liu X C, Sun H, Ding J, Wang L, Leng G Y, Zhang Y Q, Sang Y F, Fang H Y, Zhang S F, Han D M, Liu X M, He L, Xu X M, Tang Y and Chen D L. 2019. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts. *Chinese Science Bulletin*, 64(27): 2807-2821 (汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 刘星才, 孙赫, 丁劲, 王磊, 冷国勇, 张永强, 桑燕芳, 方海燕, 张士锋, 韩冬梅, 刘小莽, 贺莉, 徐锡蒙, 唐寅, Chen D L. 2019. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展. *科学通报*, 64(27): 2807-2821) [DOI: 10.1360/TB-2019-0141]
- Torres R, Snoeij P, Geudtner D, Bibby D, Davidson M, Attema E, Potin P, Rommen B, Floury N, Brown M, Traver I N, Deghaye P, Duesmann B, Rosich B, Miranda N, Bruno C, L'Abbate M, Croci R, Pietropaolo A, Huchler M and Rostan F. 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120: 9-24 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.028]
- Tuozzolo S, Lind G, Overstreet B, Mangano J, Fonstad M, Hagemann M, Frasson R P M, Larnier K, Garambois P A, Monnier J and Durand M. 2019. Estimating river discharge with swath altimetry: a proof of concept using AirSWOT observations. *Geophysical Research Letters*, 46(3): 1459-1466 [DOI: 10.1029/2018GL080771]
- Villadsen H, Andersen O B, Stenseng L, Nielsen K and Knudsen P. 2015. CryoSat-2 altimetry for river level monitoring — Evaluation in the Ganges - Brahmaputra River basin. *Remote Sensing of Environment*, 168: 80-89 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.05.025]
- Wang D Z, Wang S M and Huang C. 2019. Comparison of Sentinel-2 imagery with Landsat8 imagery for surface water extraction using four common water indexes. *Remote Sensing for Land and Resources*, 31(3): 157-165 (王大钊, 王思梦, 黄昌. 2019. Sentinel-2 和 Landsat8 影像的四种常用水体指数地表水体提取对比. *国土资源遥感*, 31(3): 157-165) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2019.03.20]
- Wang L, Yao T D, Chai C H, Cuo L, Su F G, Zhang F, Yao Z J, Zhang Y S, Li X P, Qi J, Hu Z D, Liu J S and Wang Y W. 2021. TP-River: monitoring and quantifying total river runoff from the third pole. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(5): E948-E965 [DOI: 10.1175/bams-d-20-0207.1]
- Wang X B, Xie S P and Du J K. 2018. Water index formulation and its effectiveness research on the complicated surface water surroundings. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(2): 360-372 (王小标, 谢顺平, 都金康. 2018. 水体指数构建及其在复杂环境下有效性研究. *遥感学报*, 22(2): 360-372) [DOI: 10.11834/jrs.20186463]
- Wang Z F, Li J B, Lin Y, Meng Y and Liu J G. 2022. GrabRiver: graph-theory-based river width extraction from remote sensing imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 1500505 [DOI: 10.1109/LGRS.2020.3023043]
- Wu B F, Zhu W W, Zeng H N, Yan N N, Chang S and Zhao X F. 2020. Watershed remote sensing: definition and prospective. *Advances in Water Science*, 31(5): 654-673 (吴炳方, 朱伟伟, 曾红伟, 闫娜娜, 常胜, 赵新峰. 2020. 流域遥感: 内涵与挑战. *水科学进展*, 31(5): 654-673) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.003]
- Wu Q H, Ke L H, Wang J D, Pavelsky T M, Allen G H, Sheng Y W, Duan X J, Zhu Y Q, Wu J, Wang L, Liu K, Chen T, Zhang W S, Fan C Y, Yong B and Song C Q. 2023. Satellites reveal hotspots of global river extent change. *Nature Communications*, 14(1): 1587 [DOI: 10.1038/s41467-023-37061-3]
- Wu Z T, Snyder G, Vadnais C, Arora R, Babcock M, Stensaas G, Doucette P and Newman T. 2019. User needs for future Landsat mis-

- sions. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111214 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111214]
- Xiang J, Li H, Zhao J Y, Cai X B and Li P. 2021. Inland water level measurement from spaceborne laser altimetry: validation and comparison of three missions over the Great Lakes and lower Mississippi River. *Journal of Hydrology*, 597: 126312 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126312]
- Xu Y S, Gao L and Zhang Y H. 2017. New generation altimetry satellite SWOT and its reference to China's swath altimetrysatellit. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(1): 84-94 (徐永生, 高乐, 张云华. 2017. 美国新一代测高卫星SWOT——评述中国宽幅干涉卫星的发展借鉴. *遥感技术与应用*, 32(1): 84-94) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-03232017.1.0084]
- Xue Y, Qin C, Wu B S, Li D and Fu X D. 2023. Automatic extraction of mountain river information from multiple Chinese high-resolution remote sensing satellite images. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 63(1): 134-145 (薛源, 覃超, 吴保生, 李丹, 傅旭东. 2022. 基于多源国产高分辨率遥感影像的山区河流信息自动提取. *清华大学学报(自然科学版)*, 63(1): 134-145) [DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.22.043]
- Yamazaki D, O'Loughlin F, Trigg M A, Miller Z F, Pavelsky T M and Bates P D. 2014. Development of the global width database for large rivers. *Water Resources Research*, 50(4): 3467-3480 [DOI: 10.1002/2013WR014664]
- Yamazaki D, Trigg M A and Ikeshima D. 2015. Development of a global ~90 m water body map using multi-temporal Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 171: 337-351 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.014]
- Yang J, Huang X and Tang Q H. 2020. Satellite-derived river width and its spatiotemporal patterns in China during 1990年—2015. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111918 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111918]
- Yang Y C, Li B Y, Yin Z S and Zhang Q S. 1982. The formation and evolution of landforms in the Xizang Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 37(1): 76-87 (杨逸畴, 李炳元, 尹泽生, 张青松. 1982. 青藏高原地貌的形成和演化. *地理学报*, 37(1): 76-87) [DOI: 10.11821/xb198201009]
- Ye B S, Ding Y J, Jiao K Q, Shen Y P and Zhang J. 2012. The response of river discharge to climate warming in cold region over China. *Quaternary Sciences*, 32(1): 103-110 (叶柏生, 丁永建, 焦克勤, 沈永平, 张健. 2012. 中国寒区径流对气候变暖的响应. *第四纪研究*, 32(1): 103-110) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7410.2012.01.11]
- Zhang F, Zhu X L and Liu D S. 2014. Blending MODIS and Landsat images for urban flood mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 35(9): 3237-3253 [DOI: 10.1080/01431161.2014.903351]
- Zhang J Y, Liu J F, Jin J L, Ma T, Wang G Q, Liu H W, Min X, Wang F, Lin J, Bao Z X and Liu C S. 2019. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1264-1273 (张建云, 刘九夫, 金君良, 马涛, 王国庆, 刘宏伟, 闵星, 王欢, 林锦, 鲍振鑫, 刘翠善. 2019. 青藏高原水资源演变与趋势分析. *中国科学院院刊*, 34(11): 1264-1273) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.009]
- Zhang S T, Lu X, Lu Y, Cheng L, Li M C and Yang K. 2021. Tracking dynamic river networks in the Tibetan Plateau with high-resolution CubeSat imagery. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(10): 2142-2152 (章斯腾, 陆欣, 陆瑶, 程亮, 李满春, 杨康. 2021. 青藏高原河流网络高分CubeSat遥感监测. *遥感学报*, 25(10): 2142-2152) [DOI: 10.11834/jrs.20219268]
- Zhang Y, Zhang G Q and Zhu T T. 2020. Seasonal cycles of lakes on the Tibetan Plateau detected by Sentinel-1 SAR data. *Science of the Total Environment*, 703: 135563 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135563]
- Zheng J J, Ke C Q, Shao Z D and Li F. 2016. Monitoring changes in the water volume of Hulun Lake by integrating satellite altimetry data and Landsat images between 1992 and 2010. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(1): 016029 [DOI: 10.1117/1.Jrs.10.016029]

## Study progress in the river hydrologic remote sensing technique and its application on the Tibetan Plateau

LIU Shuqian<sup>1,2</sup>, LIU Kai<sup>2</sup>, ZENG Fanxuan<sup>2</sup>, SONG Chunqiao<sup>2</sup>

1. College of Surveying and Geotechnical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

**Abstract:** Rivers are integral to the water cycle, underpinning human development, ecological health, and regional climate stability. Recently, global warming, glacial melt, and recurring hydrological disasters have intensified disturbances in river systems, necessitating broad-scale monitoring of complex hydrological changes. While traditional field measurements are valuable, limitations in their spatial and temporal coverage call for alternative approaches. With the advancement of sensor technology and the proliferation of satellite platforms, (satellite) remote sensing has emerged as a pivotal method for contemporary river hydrology monitoring. Compared with hydrological field

measurements, it offers remarkable advantages in terms of real-time data acquisition, vast spatial coverage, and reduced economic costs. Various remote sensing monitoring techniques have been extensively applied to monitor river characteristics, such as area/width, water level fluctuations, runoff estimation, and forming diverse-scale remote sensing products of hydrological elements. This study reviews various monitoring techniques for river hydrological variables using optical or radar imaging and satellite altimetry. It analyzes the latest research progress in the hydrologic variables, encompassing river width, water area, water level, runoff, and their changes. Additionally, the spatial scale and feasibility of previous literature are thoroughly discussed. The Tibetan Plateau, known as the “Roof of the World,” is one of the regions with a serious shortage of in situ hydrological monitoring data, despite being the source of major rivers in Asia. The application of remote sensing technology for river hydrological monitoring on the Tibetan Plateau encounters challenges in data sharing, pronounced spatial and temporal heterogeneity of hydrological processes, and intricate response characteristics to a warming and humidification climate.

This study begins by examining the main satellite remote sensing data sources and methods used to monitor various hydrological elements of rivers. It summarizes the current research progress in river hydrology monitoring using remote sensing technologies and explores future development opportunities. The review also addresses the advancements and challenges of hydrological remote sensing techniques specifically applied to river monitoring on the Tibetan Plateau. Several persistent issues in river hydrological remote sensing development have been identified: (1) The accuracy of extracting river area and width in regions with complex topography is severely affected by mixed pixels and spectral similarities. (2) In areas with sparse or no hydrological stations, assessing remote sensing data’s quality and potential applications remains challenging. (3) Comprehensive monitoring and studies on the spatial and temporal patterns of hydrological changes in the inland flow areas of the Tibetan Plateau are lacking. Future research directions for remote sensing of river hydrology are outlined as follows: (1) Multisource remote sensing data must be integrated, and the technologies and their applications must be enhanced for hydrological monitoring. (2) Universally applicable remote sensing algorithms for river hydrology must be optimized for innovation. These priorities aim to address the critical challenges in hydrological remote sensing and enhance the capability and accuracy of monitoring systems, particularly in complex and underserved regions, such as the Tibetan Plateau. This study aims to promote the deepening of river hydrology research on the Tibetan Plateau region, providing more accurate and scientific–technical support for practical water resource management and policy-making.

**Key words:** river, hydrology, remote sensing, Tibetan Plateau, water extent, water level, runoff

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 42371399); Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (No. 2019QZKK0202)