

基于多源卫星遥感反演的缺资料流域河流流量估算

——以长江源区为例*

赵睿^{1,2,3}, 卢满生⁴, 黄俊腾¹, 李声平⁵, 刘万新⁶, 张淑林⁷, 唐嘉芯¹, 郑佳重⁸, 雍斌^{1,3}, 王卫光^{1,2,3**}

- 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098)
- 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098)
- 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)
- 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)
- 长江水利委员会汉江流域治理保护中心, 武汉 430010)
- 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100048)
- 郑州大学水利与交通学院, 郑州 450001)
- 浙江水利水电学院, 杭州 310018)

摘要: 河流流量是流域水文过程关键变量之一, 在防洪防涝、水资源规划管理等方面具有重要指示作用。由于自然环境和气候条件恶劣, 位于青藏高原东缘的长江源区流量观测站点稀少, 属于典型的缺资料地区。因此, 开展该区域的流量估算, 对于保障长江流域水安全及区域生态环境保护具有重要意义。本研究以长江源区直门达水文站为参考点, 设置了站点上下游虚拟站 (ZMD_1 和 ZMD_2), 利用 Sentinel-2、Jason-3 与 Sentinel-3A 卫星遥感数据, 采用分位数匹配新方法, 将遥感反演的水位河宽数据进行融合, 并基于河道概化断面曼宁公式进行修正, 开展了长江源区流量定量估算研究。结果表明: 新方法在两虚拟站处的径流量估算精度较高, 其纳什效率系数 (NSE) 均在 0.74 以上; 径流估算的均方根误差 (RMSE) 分别为 302.13 m³/s、316.46 m³/s, 相对均方根误差 (RRMSE) 分别为 30.0%、32.8%, ZMD_1 虚拟站流量估算精度总体优于 ZMD_2 虚拟站。ZMD_2 虚拟站的计算结果存在较大波动, 主要原因可能是 ZMD_2 缓冲区存在河心滩, 影响了虚拟站的流量反演精度。本文基于多源卫星遥感的长江源区河流流量估算研究成果, 可为缺资料地区河流流量推算提供理论方法与技术参考。

关键词: 缺资料地区; Sentinel-2 卫星; Sentinel-3A 卫星; Jason-3 卫星; 虚拟站; 多源卫星遥感

Estimation of River Discharge in Data-Scarce Basins Based on Multi-Source Satellite Remote Sensing Inversion: A Case Study of the Yangtze River Source Region

Zhao Rui^{1,2,3}, Lu Mansheng⁴, Huang Junteng¹, Li Shengping⁵, Liu Wanxin⁶, Zhang Shulin⁷, Tang Jiabin¹, Zheng Jiazhong⁸, Yong Bin¹, Wang Weiguang^{1,2,3} 错误!未定义书签。 **

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

* 2029-09-11 收稿; 2026-02-02 收修改稿。

长江流域全覆盖水监控系统建设长江源水文监测未控地区流量测验技术研究(HJZX-QFG-2024-KY-5)、国家自然科学基金项目(52479010, 42501022)、浙江省自然科学基金项目(LGEY25E090017)和水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金面上项目(2023490811)联合资助。

** 通信作者; E-mail: wangweiguang@hhu.edu.cn。

- (2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China))
- (3. College of Hydrology and Water Resources , Hohai University, Nanjing 210098 P.R.China))
- (4. Hydrological Bureau, Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan 430010 P.R.China))
- (5. Hanjiang River Basin Governance and Protection Center, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010 P.R.China))
- (6. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048 P.R.China))
- (7. School of Water Resources and Transportation Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001 P.R.China))
- (8. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018 P.R.China))

Abstract: River discharge is a critical variable in basin hydrological processes, playing a vital role in flood control and water resource planning and management. Due to harsh natural environments and climatic conditions, discharge observation stations are scarce in the Yangtze River source region located on the eastern edge of the Qinghai–Tibet Plateau, making it a typical data-deficient area. Therefore, estimating discharge in this region is of significant importance for ensuring water security in the Yangtze River basin and protecting regional ecosystems. This study establishes virtual stations upstream and downstream of the Zhimenda hydrological station in the Yangtze headwaters (ZMD_1 and ZMD_2) as reference points, utilizing Sentinel-2, Jason-3, and Sentinel-3A satellite remote sensing data. A novel quantile matching approach was employed to fuse remotely sensed water level and river width data. The Manning’s equation was modified based on generalized cross-section profiles to conduct quantitative discharge estimation for the Yangtze headwaters. Results indicate that the new method achieves high estimation accuracy at both virtual stations, with Nash–Sutcliffe efficiency coefficients (NSE) exceeding 0.74. The root mean square error (RMSE) of estimated discharges was 302.13 m³/s and 316.46 m³/s, respectively, with relative root mean square errors (RRMSE) of 30.0% and 32.8%. Overall, discharge estimation accuracy at the ZMD_1 virtual station outperformed that at ZMD_2. The ZMD_2 virtual station results exhibited significant fluctuations, primarily due to the presence of mid-channel bars within the ZMD_2 buffer zone, which compromised the accuracy of flow inversion at the virtual station. This study, based on multi-source satellite remote sensing for estimating river flows in the Yangtze River source region, provides theoretical methods and technical references for flow estimation in data-scarce areas.

Keywords: Data-scarce areas; Sentinel-2; Sentinel-3A; Jason-3; Virtual station; Multi-source satellite remote sensing

河流流量作为水平衡和水循环的基本变量,是河流重要水力参数之一,可靠且连续的流量数据是防洪防涝、水资源规划管理的重要决策依据^[1,2]。然而,在高原山区,由于自然环境恶劣,水文站建设和维护运营成本高昂,现有水文监测站点极为稀疏,致使源区有效实测径流数据较少,属于典型的“缺资料地区”^[3]。长江源区地处青藏高原,是长江流域的水源地与径流关键形成区。该区域的产流过程与流量变化直接调控了本地生态环境与发展,更深刻影响整个长江流域的水资源供给与水安全^[4,5]。然而,该区域流量资料的匮乏,已成为精准揭示源区水文过程机制、科学评估水资源量的主要瓶颈之一^[6]。由此,在数据稀缺的长江源区开展流量估算研究,旨在通过弥补径流观测数据空白以揭示该地区径流形成过程,并推动无资料地区水文研究的探索和发展。

目前一些研究采用遥感获取单水力参数的思路反演河流流量^[7-9]。Xu等^[10]基于3 m Dove影像提取河宽,建立流量计算模型,用少量先验数据估算第三极13条河流2017–2021径流总量,并利用SRTM 30m DEM辅以水体频率数据校正河网。精度评价结果显示,KEG (Kling-Gupta Efficiency,克林系数)、NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency,纳什系数)均大于0.5。Yuta等^[11]在密苏里流域上万河段中,基于Landsat影像提取河宽并通过McFLI (Mass-conserved Flow Law Inversion,质量守恒流量反演法)计算瞬时流量,再结合分布式汇流模型,仅通过1.5%河段数量的卫星遥感河宽数据,便可实现高精度的流量估算。验证了“遥感McFLI+水文模型”可在缺资料地区生成日尺度、守恒且可靠的流量估计。Wang等^[12]以Planet和Landsat影像提取河流分汉口河宽并结合5740个USGS (United States Geological Survey,美国地质调查局)水文站点数据建立的宽度-流量经验公式估算27处河流分汉口流量,测流精度较高。但此类方法

仍需依赖一定的实测资料对经验常数或模型参数进行校正,仅适用于资料匮乏地区。近年来,低空遥感无人机以其灵活快速且无需先验资料等优势,结合卫星遥感技术,逐步应用于无资料地区河流测流领域中^[13-15]。Gu等^[16]针对雅鲁藏布江高寒缺资料区域,提出“无人机+多源卫星”遥感的零地面观测流量估算框架。赵长森等^[17]基于无人机高分辨率DSM图像,构建“水上地形提取-断面耦合-曼宁公式”的流量估算模型,仅用一次低空航拍即可完成非接触测流。Niroumand等提出了样本特定多波段比值技术(SMART-SDB),通过对光谱特征空间进行分区建模,显著提高了复杂光学水体中水深反演的精度,为无人机或高分卫星获取高精度断面数据提供了新的技术手段^[18]。Lou等^[19]提出了一种基于多源遥感和遥感水文站法(RSHS)的中小河流长期流量估算新方法,通过光学卫星(Landsat-8、Sentinel-2)、雷达卫星(Sentinel-1)与低空遥感无人机数据,结合统计回归降尺度技术,实现了云南高原兴江河流域2016—2020年的月流量估算。结果表明,无人机低空遥感与卫星遥感技术融合,无需实测资料即可在无资料区域获得可靠的流量估算结果。但此类低空无人机遥感测流方法,设备器材昂贵且需开展野外实地作业,限制了其在无资料高原寒区的应用。

针对上述方法在河流流量估算中存在的不足,吴剑平等^[20]基于幂指数型概化断面,利用Hydroweb水位数据与Sentinel-1 SAR卫星提取的河宽数据构建水位-河宽曲线,无需任何先验地形数据即可反演河床高程与断面形状,并运用曼宁公式估算流量。在长江上游两河段验证结果相对良好,尤其是在研究河段长度为10km时反演流量误差最小,流量估算NSE高达0.92,可为缺资料山区河流提供无地面数据的水深与流量监测新途径。Gehring等^[21]以Hydroweb虚拟站水位数据为驱动,联合SWOT River Database(SWORD)数据集提供的平均河宽与坡度,通过优化河床高程、糙率与断面形状构建流量曲线,在230个无资料站点以曼宁公式反演流量,结果显示87%的虚拟站点流量反演精度较高,流量中位数误差仅在12%以内,为大范围缺资料河流提供无需地面数据的流量监测提供参考。然而上述研究较多地依赖HydroWeb、SWORD等公开遥感水文数据集,受其覆盖范围和数据精度的限制,无法满足特定区域的流量估算需求。

长江源区作为我国重要的高原冰川与河流发源地,地面观测站点稀缺,且公开遥感水文数据集在该区域的覆盖不足,尤其缺乏精细的断面形态数据。因此,现有基于遥感水文数据的方法难以在该区域进行河流流量估算。本研究以长江源区直门达站附近河段为例,开展以下研究:(1)基于高分辨率遥感卫星数据,选定合理研究时段进行水力参数提取;(2)针对遥感提取的水力参数在时序上存在的非同步问题,应用分位数配法进行水位、河宽数据融合;(3)基于河流概化断面修正曼宁公式,开展无实测断面条件下的河流流量估算。研究结果可为长江源区缺资料地区河流流量估算提供参考。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

长江源(89° 50'~95° 18'E, 33° 9'~36° 47'N)主要包括直门达水文站以上长江干支流的广大集水区域,在青藏高原腹地昆仑山脉和唐古拉山脉之间。河段内无大坝截断河流且存在多处河心滩,属于高海拔山区天然河流。为了进行更加精确的河流流量估算,本文引入了虚拟站的概念。虚拟站是指雷达测高卫星轨道与河流的交点,于此可定期获取该位置的河流水文数据,从而实现对河流水文的动态监测^[22]。本文选取直门达水文站上下游2个虚拟站ZMD_1、ZMD_2,以虚拟站为中心,长为8km,宽为3km区域作为缓冲区进行河流流量估算研究。研究区概况如图1所示。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 河宽提取遥感数据源 Sentinel系列卫星作为哥白尼计划的一部分,为面向全球开放、兼具高空间分辨率与高重访周期的多光谱成像系统,其主要目标便是对地球进行观测从而获取数据以供科学研究。Sentinel-2卫星由A、B双星组成,Sentinel-2A卫星于2015年6月发射,Sentinel-2B于2017年3月发射,两卫星均为高分辨率光学卫星,波段分辨率10-60m,单卫星重访周期为10天,双卫星重访周期为5天。卫星搭载多光谱成像仪,在13个光谱波段上获取290km幅宽的影像数据,其中可见光-近红外(Band2/3/4/8)空间分辨率高达10m,短波红外(Band11/12)20m,其余波段60m,可为水体边界识

别提供亚像元级精度。Sentinel-2 数据自获取后约 3h 内即可通过谷歌地球引擎（Google Earth Engine, GEE）平台免费获取经辐射定标与大气校正产品^[23]。

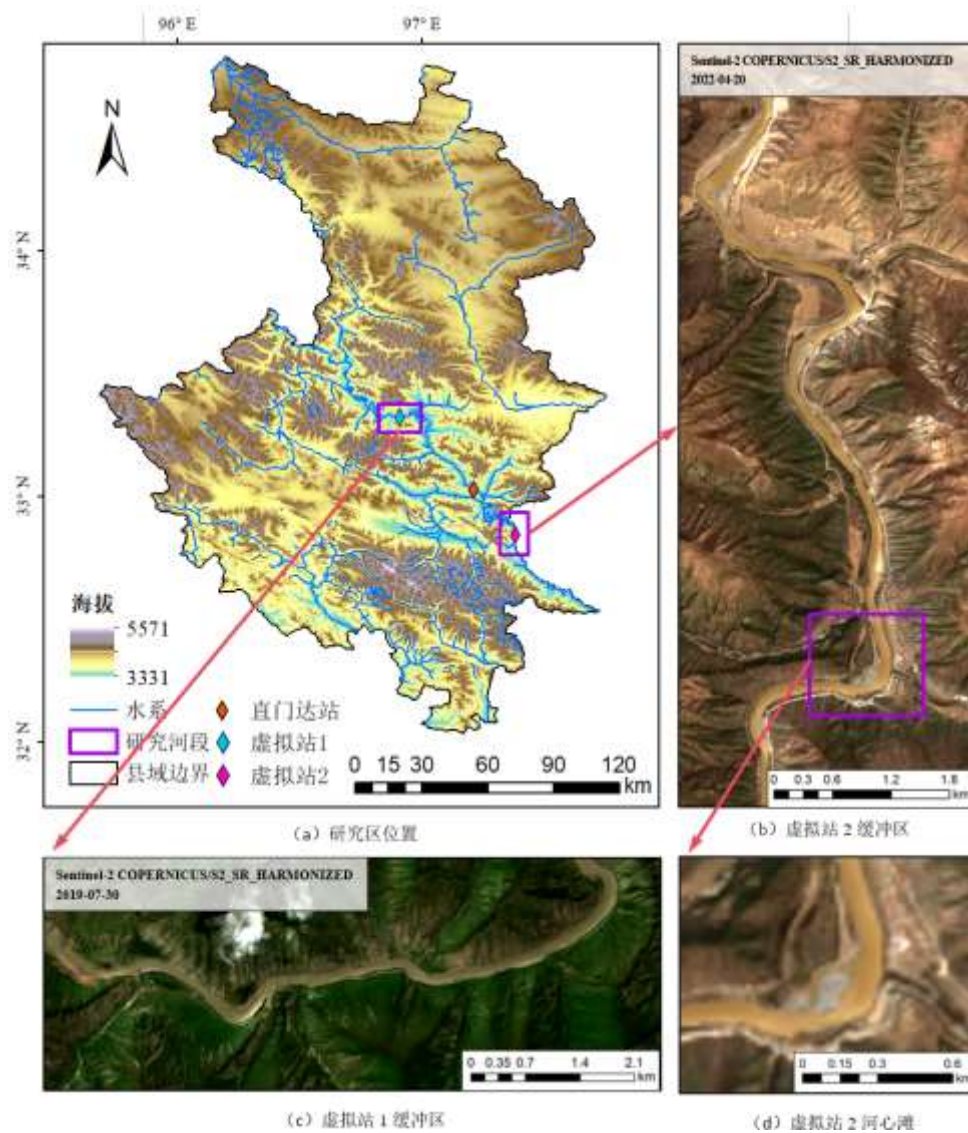


图1 研究区概况

Fig. 1 Map of the study reach

研究基于 GEE 云平台的 Sentinel-2 卫星遥感影像提取河宽。使用 Sentinel-2 卫星遥感提取河宽需要对数据进行预处理。由于本文使用的是 GEE 平台上的 COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED 产品，已在平台上预先经过辐射定标、大气校正和几何校正，因此无需重复处理。另外，本研究使用卫星中的高分辨率波段来提取河宽，但由于各波段空间分辨率不一，为了提高河道水面面积提取精度，将 20m 分辨率的波段 B11 重采样到与 B3 波段相同的 10m 分辨率。为了剔除卫星遥感图像提取水体过程中云量的影响，研究选择 Sentinel-2 卫星的 QA60 波段筛选云量小于 20% 的卫星影像，并运用云掩膜进行去云处理^[24]。

1.2.2 水位提取遥感数据源 Jason-3 卫星于 2016 年升空，是美欧合作的第四代海洋雷达高度计，可生成高精度长时序的水体表面变化数据。卫星在 1336km 的太阳同步轨道运行，10 天重复周期，通过

Poseidon-3B 双频雷达高度计、三频微波辐射计和多重精密定轨系统，把海面高度误差减小到 2–3cm^[25]。数据分近实时、中期和最终三级，免费向全球开放，用于气候海平面趋势、业务海洋预报及近岸灾害监测。Sentinel-3A 于 2016 年 2 月升空，是欧空局“哥白尼”系列第三颗卫星，重 1.25t，功率 2.3kW，运行在 814km 晨昏太阳同步轨道，28 天重复周期，单星即可实现全球 4 天重访^[26]。可同步获取海表温度、颜色、高度、植被指数、火情及内陆水体水位，海表温度精度 0.1K，海平面高度误差约 3cm。数据产品分为近实时、短期和归档三级，免费向全球开放，已广泛用于海洋预报、气候监测和极端事件响应。

研究利用 Jason-3 卫星和 Sentinel-3A 卫星上的卫星雷达高度计分别提取 ZMD_1 与 ZMD_2 虚拟站处的水位^[27]。为保证卫星雷达高度计测距精度，需在进行水位提取前对数据进行预处理，首先为削弱大气与地球形变对测距的影响针对大气层的一些修正项，采取如下方法：水汽与干空气造成的路径延迟分别由 ECMWF 再分析场给出的湿、干对流层改正量 Cor_dry 与 Cor_wet 直接替换；电离层延迟则放弃卫星双频反演方案转而使用 CODE 发布的全球电离层图计算得到的 Cor_iono 。此外，同时考虑了固体潮 Cor_set 与极潮 Cor_pt 引起的瞬时地壳升降。最后，把高度基准转换到 EGM96 上，得到大地基准面修正项 Cor_geoid ，确保所有高程结果以同一参考基准表达^[28-29]。

1.2.3 实测河宽和水位数据 由于河冰导致高度计回波波畸变，导致传统重跟踪算法失效，提取水位时产生误差^[30]，并且以往文献指出提取河宽时冬季结冰期需剔除或单独处理^[9]。为了去除冰雪对于卫星遥感图像精度的影响，仅通过卫星遥感提取 2019—2023 年 4—10 月的水位、河宽数据进行流量估算并以同时段直门达水文站的实测数据对河流流量估算结果进行评估。

2 研究方法

研究基于 GEE 云平台调用 Sentinel-2 产品计算改进的归一化差值水体指数 (MNDWI) 并采用大津算法 (OTSU) 利用自适应阈值精准分割水体，完成河宽提取；联合搭载雷达高度计的 Jason-3 号卫星与 Sentinel-3A 号卫星通过波形重跟踪算法提取水位，并以同时段的虚拟站水位差值计算水面比降，卫星图像目视解译方法厘定河段糙率；最终通过修正后的曼宁公式估算流量，并以直门达水文站实测数据进行测流精度评估。技术路线图如图 2 所示：



图 2 技术路线图

Fig.2 Technology road map

2.1 水位测量方法

水位提取首先要进行脚印点选择。脚印点是指卫星雷达或激光高度计观测瞬间，在地表形成的照射区域中心所对应的空间点位。传统的脚印点提取方法通常局限在水体内部，只选择落在水体表面上的脚

印点。但对于部分内陆河流，由于河宽比较狭窄，传统选取方法获得的波形数量过少，无法获取水面回波的足够信息。研究采取扩大脚印点检测区域的策略，得到更多包含水面反射信息的波形^[24]。其次是波形的选择，这里取各个反射波的平均波形来进行后续处理，如图 3 所示。第三步使用多波形持续峰（multiple waveform persistent peak, MWaPP）先对平均波形做小波分解，提取所有可能的峰值，随后自动锁定最可能代表水面的主波峰，并记录其他峰值以备后续处理，以便精准定位水面。以 ZMD_1 站为例，小波分解及主峰锁定结果如图 4 所示。第四步对主波峰进行重跟踪，得到该子波形对应的高度，从而定位河流水位，结果如图 5 所示。第五步是时序生成，把每个周期得到的初始水位全部写入数据库，保留多解信息并剔除冰凌、洪水淹没滩地造成的突变值以及异常值，得到每个时间点相应的一组水位数据，并基于河底高程选出更具有时间连续性的结果作为该时间点的水位。在此基础上，将提取的时间序列水位作为水面高程，以 DEM 数据作为河床底面高程，通过计算二者在空间上的差值，从而获取河道的实际水深信息。

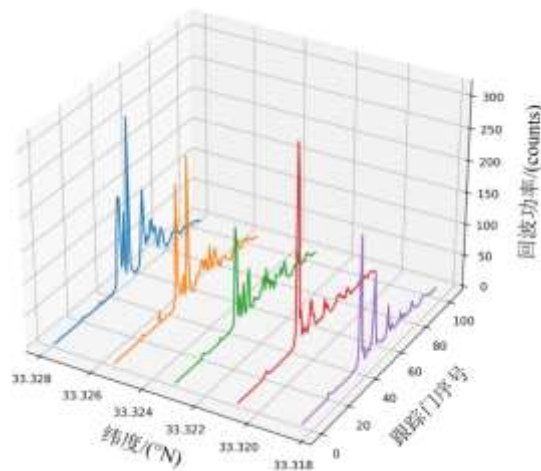


图 3 卫星雷达高度计回波波形示意图

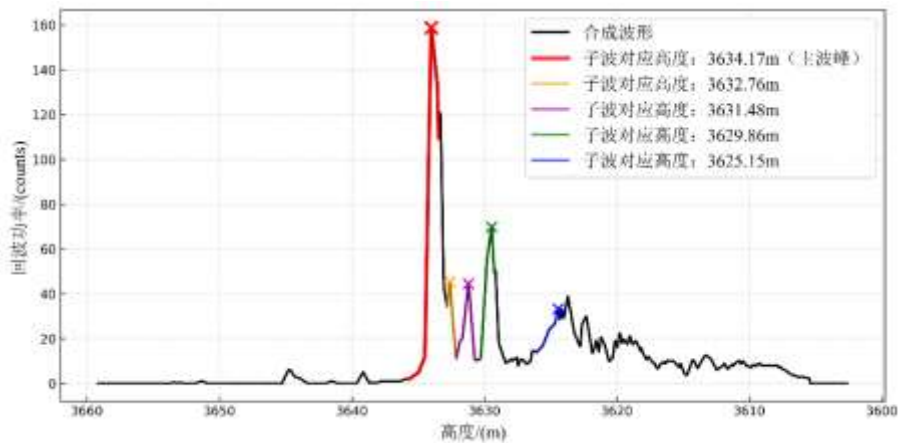


图 4 小波分解及主峰锁定示意图

Fig.4 Wavelet decomposition and main peak locking schematic

Fig.3 radar altimeter return waveform

2.2 河宽测量方法

研究基于 Gee 云平台的 Sentinel-2 卫星图像提取河宽数据，主要分为卫星图像提取水体面积、水体

面积与河流中心线长度之比估算平均河宽两部分。水体信息提取采用 Xu 提出的改进归一化差异水体指数 (MNDWI), MNDWI 以短波红外替代近红外, 显著增强水体与建筑、植被反差, 有效抑制植被噪声, 水体提取精度更高, 尤其适用于复杂山区环境^[31]。MNDWI 计算公式如下:

$$\text{MNDWI} = \frac{\rho_{\text{B3}} - \rho_{\text{B11}}}{\rho_{\text{B3}} + \rho_{\text{B11}}} \quad (1)$$

式中, ρ_{B3} , ρ_{B11} 分别为绿色波段和中红外波段的反射率, 分别与 GEE 平台中 Sentinel-2 卫星数据的 B3 波段和 B11 波段对应。

计算 MNDWI 之后, 采用大津算法调用函数自动计算最佳阈值: 将影像直方图分为水体与非水体两类, 无需人工设定阈值自动最大化类间方差, 并对结果执行二值化, 输出高精度水体, 进而计算水体面积。河宽提取受光学卫星分辨率影响较大, 卫星波段重采样空间分辨率为 10 m 的波段很难准确计算百米左右的河宽, 因此本文选取 Bjerkie 等人提出的河流宽度计算方法, 以遥感获取的水体面积与河流中心线长度的比值确定河流宽度^[32], 如下:

$$W = \frac{A}{L} \quad (2)$$

式中, W 为河宽 (m), A 为水体面积 (m^2), L 为两虚拟站河段中心线长度 (m)。

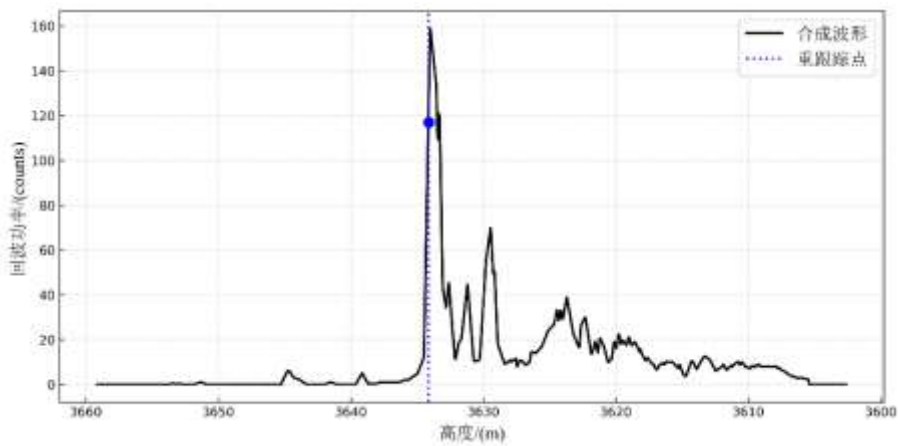


图 5 主波峰重跟踪示意图

Fig.5 Schematic Diagram of Main Peak Tracking

2.3 水面比降

水面比降 S 反映了水流的能量梯度, 是曼宁公式的主要输入参数之一。本研究中, S 由直门达站上下游两个虚拟站 ZMD_1、ZMD_2 水位差与河流中心线之比确定^[33]。

$$S = \frac{Z_1 - Z_2}{L} \quad (3)$$

式中, L 为两个虚拟站之间河流中心线的长度, Z_1 、 Z_2 分别为虚拟站 ZMD_1, ZMD_2 两个虚拟站的水位 (m)。

2.4 河道糙率

河道糙率 (n) 是曼宁公式中反映河床与岸壁对水流阻力的综合系数, 取值直接影响流速、流量及水面线计算精度。天然河道糙率随河床组成、断面形态、植被覆盖及水流条件变化, 变化范围较大^[34]。

河道糙率计算公式如下^[35]:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5) \quad (4)$$

式中, n_0 为表征床面材料特性的基准糙率; n_1 为反映表面不规则性的修正系数; n_2 为考虑横断面形状与尺度变化的调整因子; n_3 为人工或天然障碍物的阻力修正项; n_4 为表征植被类型及水流条件的综合修正系数; n_5 为反映河道弯曲度的河道弯曲校正因子。虚拟站 ZMD_1, ZMD_2 处河道河床均为石料材质, 参考糙率取值表, n_0 分别取 0.027, 0.025; 两处河道附近宽深比较大, 因岸坡侵蚀等引起的糙率变化忽略不计, n_1, n_2 取值均为 0; 该河段基本无人工或天然障碍物, n_3 均设为 0; 虚拟站 ZMD_1 处河段的植被覆盖率较高, 虚拟站 2 处河段的植被覆盖率中等, 设置 ZMD_1、ZMD_2 的 n_4 分别取值为 0.007 与 0.005; 最后 ZMD_1 处河段曲折程度中等, ZMD_2 处曲折程度严重, n_5 分别取值 1.15 和 1.3。基于以上经验取值, 同时参考其他研究中高原山区河流糙率取值范围^[36], 最终确定虚拟站附近河段糙率 n 为 0.039。

2.5 流量计算方法

受限于卫星遥感对水下地形的探测能力, 过水断面形态难以获取。研究参考 W. Sichangi 等人的方法^[3], 概化河流断面并修正曼宁公式, 实现流量估算, 如下:

$$v = \frac{k}{n} R^{2/3} S \quad (5)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (6)$$

$$Q = vA = \frac{k}{n} \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} S A \quad (7)$$

其中, v 为流速(m/s), k 为一个单位转换系数, R 为水力半径(m), A 为过水断面面积(m²), S 是水面比降(m/m), n 为曼宁公式粗糙系数, P 为湿周(m)。将上式(5)、(6)代入公式(7)得:

$$Q = \frac{k}{n} A \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} S \quad (8)$$

常见的河流断面有三种, 包括矩形断面, 梯形断面以及弧形断面, 如图 6。

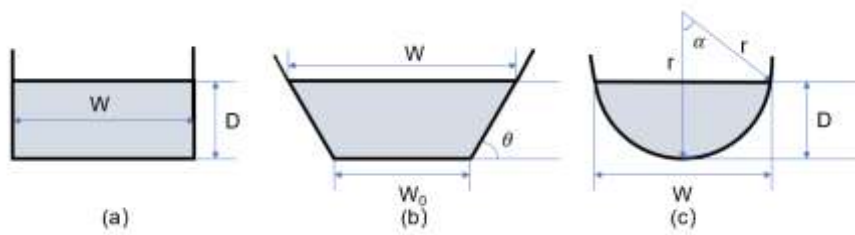


图6 河流断面示意图

Fig.6 River Cross-Section Diagram

当横截面为矩形时, 此时湿周及面积如式(9)、(10)所示。

$$P = W + 2D \quad (9)$$

$$A = (W + D) \cdot D \quad (10)$$

将上述两式代入公式(11)得

$$Q = \frac{S^2 (W + D)^2}{n (W + 2D)^2} \quad (11)$$

当横截面为梯形时，此时湿周及面积如公式所示：

$$P = (W + 2D) \frac{1 + \cos \theta}{\sin \theta} \quad (12)$$

$$A = (W + D) (\tan \theta^{-1}) \cdot D \quad (13)$$

将公式(12)、(13)代入公式得：

$$Q = \frac{S^2 (W + D - D^2 (\tan \theta^{-1})^2)}{n (W + 2D)^2 \frac{\cos \theta}{\sin \theta}} \quad (14)$$

当横截面为弧形时，湿周和面积计算公式(15)。

$$P = 2r \frac{\alpha}{90^\circ} \quad (15)$$

$$A = r^2 \left(\pi - \frac{\alpha}{180^\circ} \sin \alpha \cos \alpha \right) \quad (16)$$

将上式代入得弧形断面流量计算公式如下：

$$Q = \frac{S^2 W + D^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{180^\circ} \sin \alpha \cos \alpha \right)^2}{n \sin \alpha - \left(\pi - \frac{\alpha}{180^\circ} \right)^2 (1 - \cos \alpha)^2} \quad (17)$$

综上所述，如果河流河宽 $W(m)$ 远大于水深 $D(m)$ 时，无论河流横断面为何种形状，河流流量计算式均可以化简为式(18)。

$$Q = \frac{S^2}{n} (W + D) \quad (18)$$

受限于光学卫星 Sentinel-2 与雷达测高卫星 Jason-3、Sentinel-3A 重访周期差异，河宽与水位观测在时间上存在错位，难以直接进行流量估算。基于河宽水位之间的单调非递减关系。研究采用 Tourian 等提出的分位数匹配方法，将水位与河宽按照概率来匹配^[37]。首先将不同时间尺度下的水位与河宽观测序列进行线性插值并转换为各自的分位数函数，以刻画其统计分布特征并表示其在概率水平处对应的水位和河宽分位数值。通过此变换，将水位与河宽数据统一至概率 $p \in [0,1]$ 的区间。随后，在一致的离散概率集上采样，选取同一概率水平所对应的水位与河宽分位数值，从而实现二者概率上的同步匹配，构建具有概率一致性的水位-河宽曲线，最后将插值后的水位数据代入已建立的水位-河宽关系曲线中，以此得到相应时刻的河宽，最终得到长时间序列的水位-河宽数据集。

2.6 流量估算精度评估

为了评价本研究在流量估算中的合理性和可靠性，选取 RMSE、NSE、RRMSE 作为流量估算精度

的综合评估指标。公式如下：

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)(Q_e - \bar{Q}_e))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_e - \bar{Q}_e)^2} \quad (19)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_m - Q_e)^2} \quad (20)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_m - Q_e| \quad (21)$$

$$N^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_e)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2 + \sum_{i=1}^n (Q_e - \bar{Q}_e)^2} \quad (22)$$

式中， Q_m 是实测径流量， Q_e 是河流估算流量， \bar{Q}_m 是平均实测流量， n 为数据量。

3 结果与讨论

3.1 水面面积、河宽提取

河宽提取以 GEE 云平台为支撑，选用 2019-2024 年 4-10 月的 Sentinel-2 卫星遥感影像，在 ZMD_1 与 ZMD_2 两个虚拟水文测站应用 MNDWI 指数结合大津算法自动选取阈值提取水体，结果如图 7 所示。相较于传统目视解译，该方法能较精确地区分水体与非水体。汛期水体面积普遍较大，早期水体面积较小，符合实际情况，且与以往 Zirui W 等人的研究结果基本吻合^[38]。基于提取的水体面积除以对应河段中心线长度，推求出两虚拟站点附近的平均河宽，如图 8。提取的河宽序列与直门达站实测河宽呈现出良好的时序相关性。理想情况下，用于提取河宽的遥感影像应具备高时空分辨率以准确获取河宽逐日变化趋势。然而由于遥感技术以及地理环境的限制，Sentinel-2 卫星重访周期较长且波段经重采样后空间分辨率仅 10m，难以完整捕捉时段内的河宽时空变化，可能会造成一定的误差。

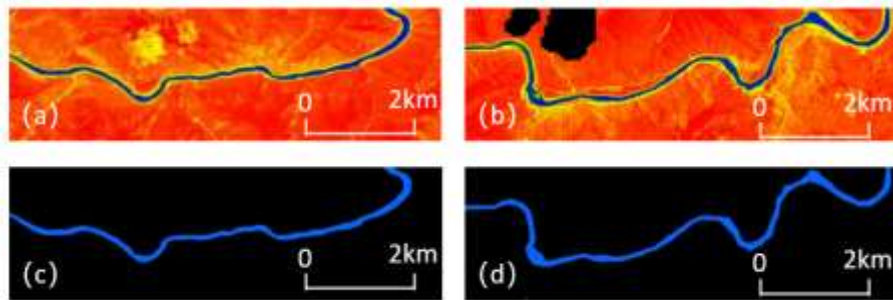


图 7 ZMD_1 与 ZMD_2 虚拟站 2019 年 7 月 30 日 MNDWI 计算(a, b)及水体分割结果(c, d)

Fig.7 ZMD_1 and ZMD_2 Virtual Stations July 30, 2019 MNDWI Calculations (a, b) and Water Body Segmentation Results (c, d)

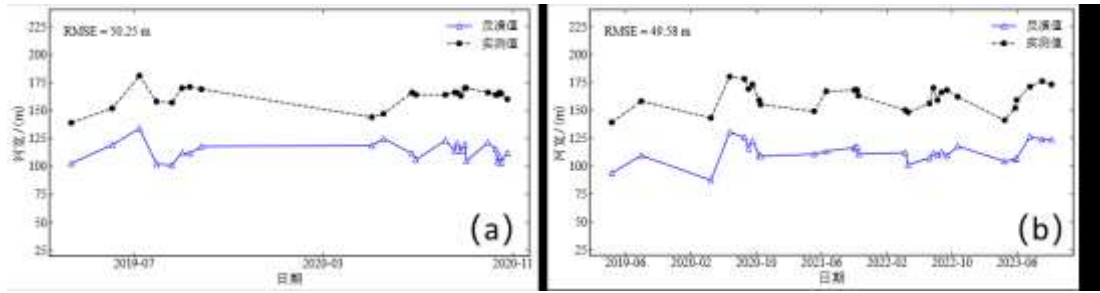


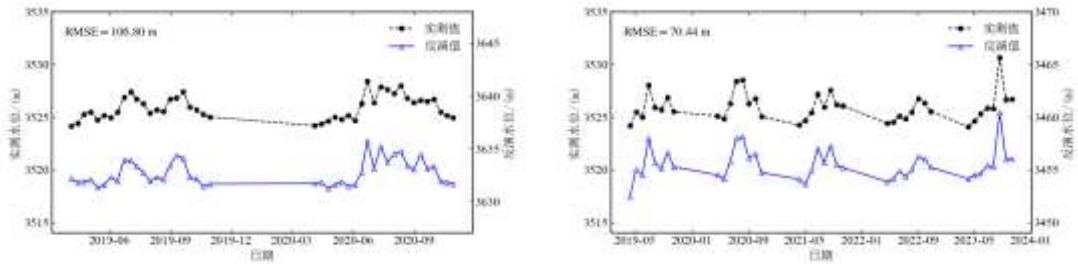
图 8 ZMD_1 与 ZMD_2 虚拟站河宽时序变化

Fig.8 Time series of river width at virtual stations ZMD_1 and ZMD_2

3.2 水位提取及水面比降

研究选取 2019-2020 年 4-10 月的 Jason-3 卫星与 2019-2023 年 4-10 月的 Sentinel-3A 卫星雷达高度计产品，分别在 ZMD_1 与 ZMD_2 虚拟水文站进行河流水位的提取。相较于传统实地水尺观测，该方法能

够大范围、全天候地获取高精度水位信息。ZMD_1、ZMD_2 提取的水位随时间变化如图 9(a)、(b)。可以发现，研究时段内 ZMD_1、ZMD_2 虚拟站的遥感反演水位变化趋势与实测水位基本一致，表明雷达测高卫星联合波形重跟踪算法反演水位能够较好地捕捉目标河段水位的动态变化。卫星反演水深精度评估结果如图 10(a)、(b)，虚拟站 1、2 水深 R^2 分别为 0.854 与 0.959，表明该方法反演水深精度较好，且具有较好的线性一致性。另外长江源区属无资料区，水文数据较少，难以获取两虚拟站间河段的精确比降数据，因此，我们选用 2019-2020 年间两虚拟站同步平均水位差值与河段长度之比（1.374%）作为流量估算的参数之一。

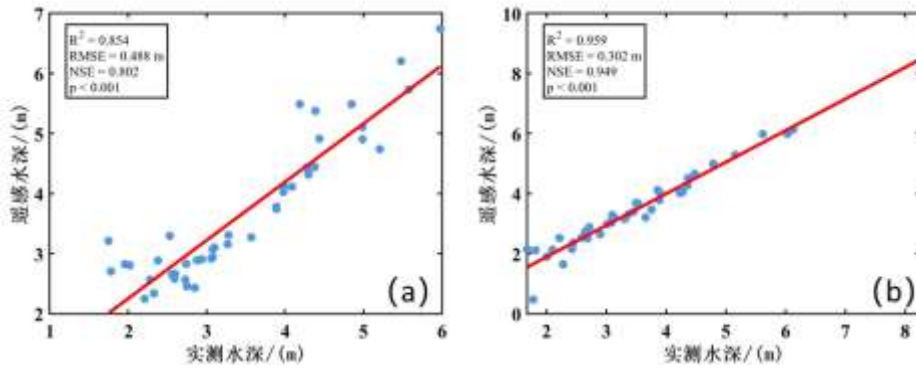


(a) ZMD_1 虚拟站反演水位与直门达站实测水位

(b) ZMD_2 虚拟站反演水位与直门达站实测水位

图 9 卫星遥感提取水位精度评估

Fig.9 Accuracy Assessment of Water Level Extraction Using Satellite Remote Sensing



(a)

(b)

图 10 ZMD_1 虚拟站 (a) 与 ZMD_2 虚拟站 (b) 水深提取精度评估

Fig.10 Evaluation of Water Depth Extraction Accuracy for Virtual Station ZMD_1 (a) and Virtual Station

3.3 流量估算精度评估

研究采用分位数匹配法融合遥感水位河宽数据，匹配结果如图 11。反演流量结果与实测值的对比如图 12 所示。结果表明，ZMD_1、ZMD_2 虚拟站流量估算值与实测值接近，NSE 分别为 0.773 与 0.745， R^2 分别为 0.8 与 0.765。反演流量序列的变化趋势与实测过程基本一致，但在高流量条件下（如 7 月底至 9 月初），流量估算存在明显低估，两个虚拟站 RRMSE 均大于 30%，处于较高水平，这可能是高流量条件下水力参数与流量之间的强非线性关系造成的。

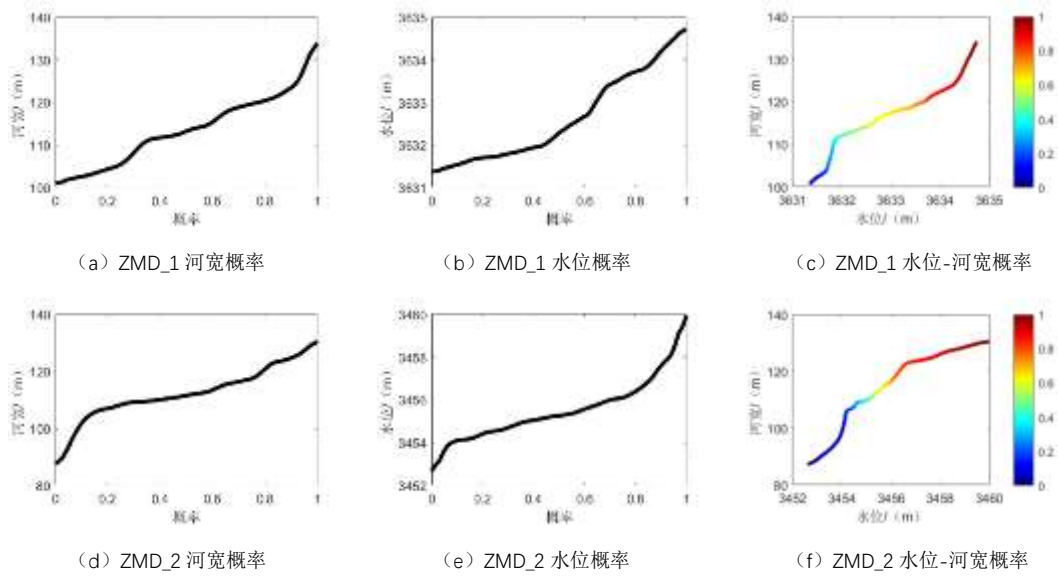


图 11 分位数匹配结果

Fig.11 Schematic diagram of the quantile matching result

4 结论

研究利用 Sentinel-2 光学卫星与 Jason3、Sentinel-3A 雷达测高卫星联合反演河流水力参数，采用分位数匹配法完成数据融合，概化河流断面并修正曼宁公式，实现了长江源区径流过程的遥感估算。精度验证结果显示：ZMD_1 和 ZMD_2 虚拟站的流量 NSE 值分别为 0.773、0.745，RMSE 分别为 $302.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $316.46 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

在长江源区，基于 Jason3、Sentinel-3A 卫星的提取的水深反演精度较好，ZMD_1 和 ZMD_2 虚拟站的 RMSE 分别为 0.488 m 和 0.302 m，验证了该方法在无资料地区获取水深数据的可靠性。

本研究基于多源卫星遥感反演，构建了长江源区这一典型缺资料流域的径流估算框架。然而受卫星运行轨道固定、可用卫星影像数量有限、卫星分辨率较低等因素限制，流量估算仍存在一定误差。未来可引入米级或亚米级的高分辨率卫星图像，结合水文模型与深度学习算法，进一步提高测流精度。

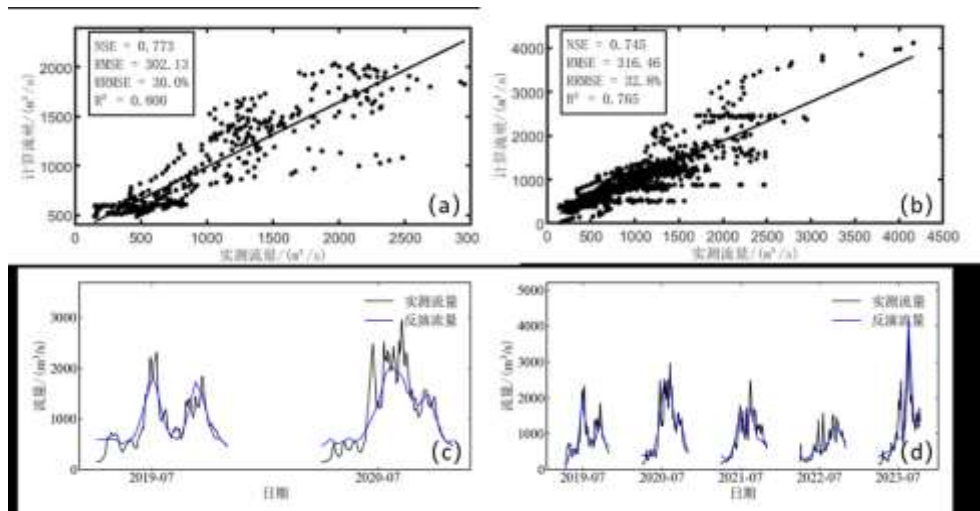


图 12 ZMD_1 与 ZMD_2 虚拟站测流精度评估(a)、(b)及流量时间序列对比图(c)、(d)

Fig.12 Accuracy Assessment of Virtual Stations ZMD_1 and ZMD_2 (a), (b) and Flow Time Series Comparison (c), (d)

5 参考文献

- [1] Lin H, Cheng X, Liu J, *et al.* Estimating river discharge across scales with a novel regional gauging method driven by Sentinel satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 311114266-114266. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114266.
- [2] Xu Y, Lin K, Hu C, *et al.* Interpretable machine learning on large samples for supporting runoff estimation in ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 2024, 639131598-131598. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131598.
- [3] Sichangi AW, Wang L, Hu Z. Estimation of river discharge solely from remote-sensing derived data: An initial study over the Yangtze river. *Remote Sensing*, 2018, **10**(9): 1385.
- [4] Zhang M, Nan Y, Wu Y *et al.* Streamflow and sediment change of major rivers in the Eastern Tibetan Plateau from 1960 to 2020. *Advances in Water Science*, 2024, **35**(2): 298-312. [张梦娇, 南熠, 吴永祥等. 1960—2020 年青藏高原东部主要河流的径流和泥沙变化特征. 水科学进展, 2024, **35**(02): 298-312.]
- [5] Vijaykumar B, Ashutosh S. Impact of climatic changes and anthropogenic activities on ecosystem net primary productivity in India during 2001–2019. *Ecological Informatics*, 2022, 70. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101732.
- [6] Cao J, Qin D, Luo Y *et al.* Discharge changes of the Yangtze River in source area during 1956–2000. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(1): 29-33. [曹建廷, 秦大河, 罗勇等. 长江源区 1956-2000 年径流量变化分析. 水科学进展, 2007, (01): 29-33.]
- [7] Gleason JC, Durand TM. Remote Sensing of River Discharge: A Review and a Framing for the Discipline. *Remote Sensing*, 2020, **12**(7): 1107-1107. DOI: 10.3390/rs12071107.
- [8] Sun WC, Wang XC, Xu ZX. Estimating streamflow using remote sensing: Progress and prospects. *Acta Geographica Sinica*, 2024, **79**(3): 565-583. DOI: 10.11821/dlxb202403002. [孙文超, 王星灿, 徐宗学. 河道流量遥感估算研究进展与展望. 地理学报, 2024, **79**(03): 565-583.]
- [9] Peirong L, Dongmei F, J. C G *et al.* Inversion of river discharge from remotely sensed river widths: A critical assessment at three-thousand global river gauges. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 287. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113489.
- [10] Xu J, Wang L, Yao T *et al.* Totaling river discharge of the third pole from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 308114181-. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114181.
- [11] Ishitsuka Y, Gleason C J, Hagemann M W *et al.* Combining Optical Remote Sensing, McFLI Discharge Estimation, Global Hydrologic Modeling, and Data Assimilation to Improve Daily Discharge Estimates Across an Entire Large Watershed. *Water Resources Research*, 2021, **57**(3):
- [12] Wang B, Smith LC. Remote sensing of discharge ratios at river channel bifurcations. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(8): e2024GL114045.
- [13] Yang S, Li C, Lou H *et al.* Performance of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in Calculating the Flood Peak Discharge of Ephemeral Rivers Combined with the Incipient Motion of Moving Stones in Arid Ungauged Regions. *Remote Sensing*, 2020, **12**(10): 1610. DOI: 10.3390/rs12101610.
- [14] Li M, Zhao C, Huang Q *et al.* Combining Landsat 5 TM and UAV images to estimate river discharge with limited ground-based flow velocity and water level observations. *Remote Sensing of Environment*, 2025, 318114610-114610. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114610.
- [15] Durand M, Dai C, Moortgat J *et al.* Using river hypsometry to improve remote sensing of river discharge. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 315114455-114455. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114455.
- [16] Gu P, Liao A, Wu Y *et al.* Integrating UAV and Multisource Satellite Remote Sensing to Estimate Long-Term River Discharge in High-Mountain Basins. *Hydrological Processes*, 2025, **39**(1): e70062-e70062.
- [17] Zhao CS, Pan X, Yang S *et al.* Measuring streamflow with low-altitude UAV imagery. *Acta Geographica Sinica*. Sin, 2019, **74**(07): 1392-1408. [赵森森, 潘旭, 杨胜天等. 低空遥感无人机影像反演河道流量. 地理学报, 2019, **74**(07): 1392-1408.]
- [18] Niroumand-Jadidi M, Bovolo F, Bruzzone L. SMART-SDB: Sample-specific multiple band ratio technique for satellite-derived bathymetry. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 251112091-. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112091.

- [19] Lou H, Zhang Y, Yang S *et al.* A new method for long-term river discharge estimation of small and medium-scale rivers by using multisource remote sensing and RSHS: Application and validation. *Remote Sensing*, 2022, **14**(8): 1798.
- [20] Wu JP, Du HB, Li WJ *et al.* Mountain river bathymetry inversion method based on remote sensing data and its application. *Advances in Water Science*, 2023, **34**(5): 766-775. [吴剑平, 杜洪波, 李文杰等. 基于遥感数据的山区河流测深反演方法与应用. 水科学进展, 2023, **34**(05): 766-775.]
- [21] Jaelyn G, Bhavya D, Edward B. Deriving River Discharge Using Remotely Sensed Water Surface Characteristics and Satellite Altimetry in the Mississippi River Basin. *Remote Sensing*, 2022, **14**(15): 3541-3541. DOI: 10.3390/rs14153541.
- [22] Lei X, Ke LH, Yong B *et al.* Evaluation of river water level monitoring accuracy using satellite radar altimetry products over China. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, **37**(01): 61-72. [雷逍, 柯灵红, 雍斌等. 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**(01): 61-72.]
- [23] Xiong S, Zhang X, Wang H *et al.* Mapping the first dataset of global urban land uses with Sentinel-2 imagery and POI prompt. *Remote Sensing of Environment*, 2025, 327114824-114824.
- [24] Huang Q, Long D, Du M *et al.* 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*, 2018, 219: 115-134.
- [25] Lui ZL, Yang JG, Zhang J *et al.* Jason-3 global statistical assessment based on Jason-2. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, **42**(03): 129-139. [刘治中, 杨俊钢, 张杰等. 基于与 Jason-2 数据比对的 Jason-3 卫星高度计全球数据质量评估. 海洋学报, 2020, **42**(03): 129-139.]
- [26] Shu S, Liu H, Beck RA *et al.* Analysis of Sentinel-3 SAR altimetry waveform retracking algorithms for deriving temporally consistent water levels over ice-covered lakes. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111643.
- [27] Jiang L, Nielsen K, Dinardo S *et al.* Evaluation of Sentinel-3 SRAL SAR altimetry over Chinese rivers. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237111546-111546.
- [28] 袁翠. 基于雷达高度计的内陆水体应用研究[学位论文]. 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [29] Mo DL, Zhao YJ, Chen GQ *et al.* Research on adaptive waveform retracking algorithm based on main peak. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, **41**(10): 1051-1056. DOI: 10.14075/j.jgg.2021.10.012. [莫德丽, 赵银军, 陈国清等. 基于主波峰的自适应波形重跟踪算法研究. 大地测量与地球动力学, 2021, **41**(10): 1051-1056. DOI: 10.14075/j.jgg.2021.10.012]
- [30] Elena Z, Svetlana A, Claude D *et al.* River ice phenology and thickness from satellite altimetry: potential for ice bridge road operation and climate studies. *The Cryosphere*, 2021, **15**(12): 5387-5407.
- [31] Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(14): 3025-3033.
- [32] Bjerklie MD, Dingman LS, Vorosmarty JC *et al.* Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *Journal of Hydrology*, 2003, **278**(1-4): 17-38.
- [33] Scherer D, Schwatke C, Dettmering D *et al.* Long-term discharge estimation for the lower Mississippi River using satellite altimetry and remote sensing images. *Remote Sensing*, 2020, **12**(17): 2693.
- [34] Chen Z, Zhou J, Chen Q. Research and Application of the Calculation Method of River Roughness Coefficient with Vegetation. *Water*, 2023, **15**(14):
- [35] 徐慧敏. 关于水利工程中河道糙率的研究. 水利科技与经济, 2010, **16**(11): 1253-1256.
- [36] Xu F, Liu Y, Zhang G *et al.* Recent large-inland-lake outbursts on the Tibetan Plateau: processes, causes, and mechanisms. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2025, **25**(3): 1187-1206.
- [37] Tourian J M, Sneeuw N, Bárdossy A. A quantile function approach to discharge estimation from satellite altimetry (ENVISAT). *Water Resources Research*, 2013, **49**(7): 4174-4186.
- [38] Zirui W, Fei X, Feng L *et al.* Monitoring Surface Water Inundation of Poyang Lake and Dongting Lake in China Using Sentinel-1 SAR Images. *Remote Sensing*, 2022, **14**(14): 3473-3473.