干雨，曹引，赵红莉，等. 多源数据协同的金沙江上游河段水面积遥感监测方法研究[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(8)：216-231. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 08. 016
GAN Yu，CAO Yin，ZHAO Hongli，et al. Research on remote sensing monitoring method of water surface area in upper reaches of Jinsha River using multi-source data synergy[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(8)：216-231. DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 08. 016

多源数据协同的金沙江上游河段水面积遥感监测方法研究

干 雨[1,2]，曹 引[1,2]，赵红莉[1,2]，张怀文[1,2]，赵慧子[1,2]，华雯静[1,2,3]

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所，北京 100038；2. 水利部数字孪生流域重点实验室，北京 100038；3. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070)

摘 要：【目的】多源数据协同遥感监测是提升河流水体监测频次的重要途径，但不同空间分辨率卫星监测河流水体的精度不同，多源卫星协同监测河流水体时序变化存在不确定性。定量评价不同空间分辨率卫星监测河段水面积精度差异，构建多源卫星监测河段水面积修正模型，对实现高精度、长时序、高频次河流水体多源卫星协同监测具有重要意义。【方法】以金沙江上游汉道数指数分别为 1(顺直)、1~2(分汊)、2~6(辫状)的奔子栏、石鼓、正科乡 3 个不同形态河段为研究区，利用无人机 MS600 航拍影像、Landsat 系列卫星、Sentinel-1/2 卫星、GF-1/2/6 卫星、HJ-2A/2B 卫星等作为主要数据源，通过建立 3 个河段时空匹配的高空间分辨率-中高空间分辨率卫星遥感监测河段水面积样本对，验证不同河段多源中高空间分辨率卫星水面积监测精度并构建修正模型，定量评价不同卫星监测精度与模型修正效果，探讨多源卫星监测河段水体精度影响因素、修正模型适用性以及多源卫星协同监测优势。【结果】结果显示，正科乡、石鼓、奔子栏河段多源卫星监测水面积 *RMSE* 分别介于 0. 180 9~0. 706 8 km^2、0. 040 8~0. 096 3 km^2、0. 015 8~0. 041 4 km^2，经过模型修正，Landsat-8/9 OLI、Sentinel-2 MSI、Sentinel-1 SAR 和 16 m 国产卫星在 3 个河段平均 *MAPE* 分别从 14. 16%、7. 26%、20. 06%、9. 37%降低至 10. 30%、5. 33%、7. 59%、7. 32%，多源卫星协同监测水面积与相对真值差值的标准差(Standard Deviation)由 0. 221 8 km^2、0. 037 4 km^2、0. 019 1 km^2 降低至 0. 159 1 km^2、0. 023 4 km^2、0. 012 8 km^2；有效监测频次由平均 12 次/年提升至 260 次/年；同时分析了河流水体遥感监测精度与卫星空间分辨率、卫星传感器类型与河道形态等因素的关系。【结论】结果表明，不同空间分辨率卫星监测不同形态河段水体精度存在明显差异，卫星空间分辨率、卫星传感器类型和河段形态复杂程度是影响河段水面积监测精度的重要因素；多源卫星遥感监测水面积修正模型可以提升不同空间分辨率卫星监测河段水面积的精度和一致性；多源卫星协同监测可以显著提升河段水体监测频次。研究成果在长时序河流水体面积重建、水位流量监测与水文模型校准等方面具有推广应用潜力。

关键词：多源数据协同；河流水体遥感监测；金沙江上游；精度验证；修正模型；适用性；协同优势；影响因素

DOI：10. 13928/j. cnki. wrahe. 2026. 08. 016　　开放科学(资源服务)标志码(OSID)：

中图分类号：TV213. 4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0860(2026)08-0216-16

收稿日期：2025-07-31；**修回日期**：2025-10-24；**录用日期**：2025-10-28；**网络出版日期**：2025-11-12

基金项目：国家自然科学基金项目(52309040，52279031)；国家重点研发计划项目(2023YFF1304202)；中国长江电力股份有限公司资助(Z432402001)

作者简介：干 雨(2000—)，男，硕士研究生，主要从事水体遥感研究。E-mail：3543818726@qq. com

通信作者：曹 引(1991—)，男，高级工程师，博士，主要从事水资源遥感研究。E-mail：caoyin@iwhr. com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Research on remote sensing monitoring method of water surface area in upper reaches of Jinsha River using multi-source data synergy

GAN Yu[1,2], CAO Yin[1,2], ZHAO Hongli[1,2], ZHANG Huaiwen[1,2], ZHAO Huizi[1,2], HUA Wenjing[1,2,3]

(1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;
3. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] Multi-source data synergistic remote sensing is a crucial pathway for enhancing the monitoring frequency of river water bodies. However, the accuracy of river water body monitoring varies among satellites with different spatial resolutions, leading to uncertainties in the time-series analysis of river water bodies derived from multi-source satellite synergy. A quantitative evaluation of the accuracy differences in water surface area monitoring for river sections by satellites with different spatial resolutions, and the development of a correction model for multi-source satellite-based water surface area monitoring, hold significant importance for achieving high-precision, long-term, and high-frequency satellite synergistic monitoring of river water bodies. [Methods] Three river sections of the upper reaches of the Jinsha River with different channel patterns—Benzilan (straight, channel count index = 1), Shigu (anabranched, channel count index = 1~2), and Zhengkexiang (braided, channel count index = 2~6)—were selected as the study areas. Data acquired from the MS600 unmanned aerial vehicle (UAV), Landsat series satellites, Sentinel-1/2 satellites, GF-1/2/6 satellites, and HJ-2A/2B satellites were utilized as the main data sources. Spatiotemporally matched sample pairs of river water surface area were established by pairing high-spatial-resolution data with medium-to-high-spatial-resolution satellite data for the three river sections. The accuracy of water surface area monitoring using multi-source medium-to-high-resolution satellites for different river sections was validated, and correction models were constructed. Additionally, the monitoring accuracy of different satellites along with the model's correction effectiveness were quantitatively evaluated. The factors influencing the accuracy of multi-source satellite monitoring for river sections, the applicability of correction models, and the advantages of multi-source collaborative monitoring were explored. [Results] The result showed that the *RMSE* of multi-source satellite-monitored water surface area for the Zhengkexiang, Shigu, and Benzilan river sections ranged from 0.180 9 km^2 to 0.706 8 km^2, 0.040 8 km^2 to 0.096 3 km^2, and 0.015 8 km^2 to 0.041 4 km^2, respectively. After model correction, the average *MAPE* of Landsat-8/9 OLI, Sentinel-2 MSI, Sentinel-1 SAR, and the 16-meter domestic satellites across the three river sections reduced from 14.16%, 7.26%, 20.06%, and 9.37% to 10.30%, 5.33%, 7.59%, and 7.32%, respectively. The standard deviation of the differences between the water surface area monitored by multi-source satellite synergy and the reference values decreased from 0.221 8 km^2, 0.037 4 km^2, and 0.019 1 km^2 to 0.159 1 km^2, 0.023 4 km^2, and 0.012 8 km^2. The effective monitoring frequency increased from an average of 12 times per year to 260 times per year. Furthermore, the relationships between river water body monitoring accuracy and factors such as satellite spatial resolution, satellite sensor type, and channel morphology were analyzed. [Conclusion] The result demonstrate significant differences in the accuracy of water body monitoring for different morphologies of river sections using satellites of different spatial resolutions. Satellite spatial resolution, satellite sensor type, and the complexity of river section morphology are identified as important factors influencing the accuracy of river water surface area monitoring. The correction model for multi-source satellite remote sensing of water surface area can improve both the accuracy and consistency of water surface area monitoring for river sections from satellites with different spatial resolutions. Multi-source satellite synergistic monitoring can significantly enhance the monitoring frequency of river section water bodies. The research findings have potential for broader application in aspects such as the long-term reconstruction of river water surface area, water level and discharge monitoring, and hydrological model calibration.

Keywords: multi-source data synergy; remote sensing monitoring of river water bodies; upper reaches of Jinsha River; accuracy verification; correction model; applicability; synergistic advantage; influencing factors

0 引　言

水是人类生产和生活、农业灌溉、渔业活动、水产养殖和工业生产中不可或缺的资源，水就是生命，而河流作为水的重要来源，是人类的生命线[1]。河流作为一个开放系统，对人类经济和居住有着直接或间接的影响[2]。水文要素信息传统获取方式主要依赖水文站监测。尽管这种方式可以提供高精度河流水位、流速和流量等信息，但建站成本高，不适用于难以到达的偏远地区河流，目前地形复杂的西南山区河流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[3]。

遥感技术作为一种新兴的河流水体监测手段[4]，具有大范围的数据获取和连续观测能力，能够获取河流水体时空变化信息，已经成为河流水体监测的重要手段。目前河流水体卫星遥感监测以单颗卫星为主，提取算法主要包括水体指数法[5]、机器学习模型[6]和深度学习模型[7]，单颗卫星传感器时空分辨率相互掣肘，单一卫星监测频次有限。随着卫星技术的不断发展，可用卫星资源越来越丰富，利用多源卫星协同开展水体遥感监测是提升水体遥感监测能力的重要方向[8]。

近年来，多源协同遥感已成为提升水体监测频次的重要途径，部分学者通过联合光学、雷达等不同卫星数据，并结合多种算法模型，提高了水体监测频次。例如，TULBURE 等[9]利用 HLS（Harmonized Landsat Sentinel-2）产品，通过 Landsat-8 和 Sentinel-2 卫星协同，将光学遥感的时间分辨率从 16 d 提升至 3~4 d，提高了澳大利亚 Murray-Darling 盆地水体监测频次；DECLARO 等[10]基于 Otsu 自动阈值分割算法，利用 Landsat-8/9、Sentinel-2 光学影像与 Sentinel-1 雷达数据协同，将重访间隔缩短至 3.48~4.62 d；CHANG 等[11]发展了一种多源遥感水库干旱指数（RS-HRDI），通过联合 Landsat-7/8/9、Sentinel-2 和 Sentinel-1 数据将水库监测频率提升至平均 4.3 d，有效支持了干旱传播过程的精细刻画；LI 等[12]发展的 STSWM 方法融合 MODIS、Landsat-5、地表水出现频率（SWO）和数字高程模型（DEM）数据，在全球典型洪泛区实现 30 m 分辨率、8 天间隔的水面动态制图；LIANG 等[13]采用高斯过程回归（GPR）建立 MODIS 与 Landsat-5 之间的非线性关系，实现每日水面比例自动估算；KONAPALA 等[14]利用 U-Net 模型和 Sentinel-1、Sentinel-2 卫星协同，将全球 11 个洪水事件监测时间分辨率从原来的 5~6 d 提升至 2~3 d。现有研究通过多源数据协同有效提升了流域、湖泊、水库、洪水淹没区等水体监测频次。

多源卫星协同虽然可以提升监测频次，但现有多源数据协同方法普遍集中于湖泊、水库及洪水淹没区等较大范围水体，对于不同空间分辨率卫星、不同传感器类型数据直接联合或重采样后使用，且更关注协同后对监测频次的提升。这是由于对于水面积较大的水体，不同卫星的监测差异仅存在与水陆边界的混合像元，其在总水面积中的占比很小，对于精度的影响较小。研究证明多源数据协同监测在大范围开阔水体监测中已达到较高精度，OGILVIE 等[15]评估了 Landsat-7/8 与 Sentinel-2 协同监测突尼斯中部小型水库水面积变化的能力，在 2016—2017 年对 Gouazine 湖的监测中，Sentinel-2 弥补了 Landsat 因云层覆盖造成的观测缺口，使 *RMSE* 从仅用 Landsat 的 0.024 km^2 降至 0.005 2 km^2；TANG 等[16-17]和通过 GEE 平台集成 Landsat-7/8 与 Sentinel 系列数据，并采用重采样至统一空间分辨率（10 m），实现了区域水体的自动提取，在无云、数据质量良好的月份，总体分类精度普遍超过 90%，Kappa 系数高于 0.84；LI 等[18]则利用 Sentinel-1 与 Sentinel-2 协同监测全球洪泛区，有效弥补了光学影像在云覆盖区的数据缺失，在全球六个测试区中用户精度（UA）、生产者精度（PA）、总体精度（OA）均值分别达到 95.8%、89.2%、93.4%；YIN 等[19]提出基于特征协作卷积神经网络的 DeepOSWSRM 模型，融合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像生成 2.5 m 分辨率水体分布图；VANDERHOOF 等[20]融合 Sentinel-1 与 Sentinel-2 数据，结合梯度提升回归模型（GBRM）和年尺度 3 波段指数（BU3），在美国 12 个站点实现 20 m 分辨率的开阔与植被覆盖水体的高频监测，总体误判率低于 4%。然而，在河流水体遥感监测中，混合像元在总水面积中的占比较大，需要考虑监测时因河段形态复杂度、卫星空间分辨率与传感器类型等因素产生的系统偏差，姜浩等[21]证明遥感影像提取河流水体需要满足河流宽度至少需要 2~3 个像元才可以进行有效提取，例如，30 m 空间分辨率的 Landsat 数据理论上可提取约 60~90 m 的河宽，10 m 空间分辨率的 Sentinel-2 数据则可应对 20~30 m 的河宽。对于不同汊道复杂度河段的提取效果，LI 等[18]的研究显示在辫状河道为主的 Jamuna 河与河道网络极其复杂的 Congo 河，生产者精度（PA）分别为 86.1%和 86.7%，显著低于其他四个河道河道复杂度较低的研究区（PA 均在 90%以上），指出了河道复杂度是导致精度下降的核心因素。现有研究未考虑不同空间分辨率卫星、不同类型传感器监测不同形态河段水面积精度差异，直接利用多源卫星开展河段水体长时序变化监测存在较大不确定性。

针对上述研究及问题，本文以金沙江上游正科乡辫状河段（汊道数指数 2~6）、石鼓分汊河段（汊道数指数 1~2）、奔子栏顺直无分汊河道（汊道数指数 1）等 3 个典型河段为研究区，利用 GF-1/2/6 PMS（1~2 m）、Sentinel-2 MSI（10 m）、GF-1/6 WFV/HJ-2A/2B CCD（16 m）、Landsat-8/9 OLI（30 m）及 Sentinel-1 SAR（10 m）等多源遥感数据开展河段水面积监测，

提出基于修正模型的多源卫星河段水面积监测协同框架，过构建时空匹配的高-中高空间分辨率河流水面积样本对，定量评价不同空间分辨率与传感器类型卫星的监测精度；建立水面积修正模型，降低因空间分辨率与传感器类型差异引起的水体面积提取偏差，提高了不同空间分辨率卫星、不同类型传感器监测水面积的一致性，显著提升了研究区有效监测频次；同时分析了多源卫星监测河流水体的影响因素；基于修正模型的多源卫星河段水面积监测协同框架可以实现河流或其他水体的高频次监测，在水位流量、洪涝灾害监测等领域具有重要应用价值。

1　研究区和数据

1.1　研究区概况

金沙江上游位于 97°40′E—99°97′E、26°87′N—32°64′N 之间，包括青海玉树市巴塘河口至云南玉龙纳西族自治县石鼓河段，全长约 965 km。金沙江上游流经青、藏、川、滇 4 省，位于横断山脉地区，河段落差达 1 700 m 以上，平均坡降 1.78%，出口控制站为石鼓水文站，控制流域面积约 21.42 万 km^2，石鼓站年均流量约占金沙江干流屏山站径流量的 38%，同时该区域也是重要的少数民族聚集区。由于气候条件恶劣、工程难度较高且易发生泥石流、滑坡等自然灾害，水文站建站困难。

选择金沙江上游正科乡、奔子栏和石鼓 3 个不同形态河段作为研究区(见图 1)。汉道数指数是表征河段形态的重要指标[22]，正科乡河段汉道数指数介于 2~6 之间，为辫状河道[见图 1(a)]；奔子栏河段汉道数指数始终为 1，为顺直河道[见图 1(b)]；石鼓汉道数指数介于 1~2 之间，为有江心洲的分汊河道[见图 1(c)]。

1.2　数据源

研究数据包括覆盖金沙江上游正科乡、石鼓、奔子栏 3 个河段云量覆盖小于 30%且影像完整无破损、畸变的 Landsat-5/8/9 TM/OLI、Sentinel-2 MSI、HJ-2A/2B CCD、GF-1/2/6 PMS/WFV 等光学影像、Sentinel-1 SAR 雷达影像与大疆 M300 无人机光学影像。其中，Landsat 系列与 Sentinel 系列卫星直接使用 L2 级产品；针对 GF 1/2/6 PMS/WFV 和 HJ 2A/2B CCD 卫星影像，进行几何校正、辐射定标和大气校正等预处理，几何偏差控制 2 个像元以内；针对 MS600 无人机多光谱影像进行辐射定标、波段配准、影像拼接和几何校正等预处理，获取遥感反射率影像。不同数据源基本信息如表 1 所列。

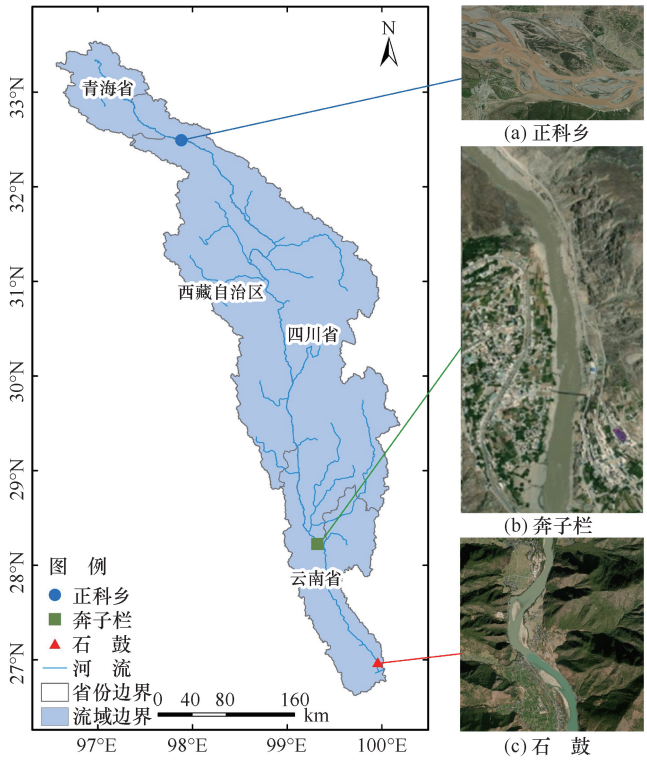


图 1　研究区位置

Fig. 1　Location of study area

表 1　数据源基本信息

Table 1　Basic information of data sources

卫星/无人机名称	传感器	研究区影像数			时间分辨率/d	空间分辨率/m	时间范围	国家/机构
		正科乡	石　鼓	奔子栏				
大疆 M300	MS600	1	1	1	单次	0.3	2023 年 8 月	中　国
GF 1/2/6	PMS/WFV	88/398	131/385	116/470	2~5	1~16	2013—2024 年	中　国
HJ-2A/2B	CCD	352	258	339	2	16	2020—2024 年	中　国
Landsat-5/8/9	TM/OLI	497	518	307	16	30	1986—2024 年	美　国
Sentinel-1	SAR	498	745	194	12	10	2014—2024 年	欧　盟
Sentinel-2	MSI	189	158	196	10	10	2018—2024 年	欧　盟

2　研究方法

2.1　总体技术路线

基于多源数据协同的河段水体遥感监测总体框架如图 2 所示，主要步骤包括多源卫星预处理、多源卫星河段水面积监测、多源卫星监测水面积修正模型构建、多源卫星监测水面积精度验证及修正效果评价。基于金沙江上游正科乡、石鼓、奔子栏 3 个河段 MS600、GF-1/2/6 PMS、Sentinel-2 MSI、Sentinel-1 SAR、GF-1/6 WFV/HJ-2A/2B CCD、Landsat-8/9 OLI 的卫星数据，利用面向对象分类与双峰阈值法[23]自动提取河段水体范围，计算水面积；使用 0.3 m MS600 水面积监测结果验证 1～2 m GF-1/2/6 PMS 水面积监测精度，GF-1/2/6 PMS 水面积监测结果作为相对真值。接着，构建修正模型，并验证 Sentinel-2 MSI、Sentinel-1 SAR、GF-1/6 WFV、HJ-2A/2B CCD、Landsat-8/9 OLI 水面积监测精度。最终，消除不同空间分辨率监测结果导致的系统性偏差，实现多源数据的协同。

2.2　多源影像河段水面积监测

使用基于面向对象和双峰阈值的水体提取方法开展河段水体动态监测，包括影像裁剪、面向对象分割和双峰阈值水体自动提取等步骤。

2.2.1　影像裁剪

根据河段河道中心线矢量生成河段缓冲区，利用河段缓冲区矢量对预处理后的对应卫星影像进行裁剪，仅保留缓冲区范围影像，可以减少数据量，同时可以提高双峰自动阈值确定精度。

2.2.2　面向对象分割

面向对象分类[24-25]不再将图像简单地视为像素的集合，而是通过像元间的光谱(卫星影像波段信息)和纹理特性(角二阶矩、对比度、熵、均匀、相关性等)对像元进行分类与合并生成一系列具有相似光谱和纹理特征的图像分割算法将图像划分成一个个

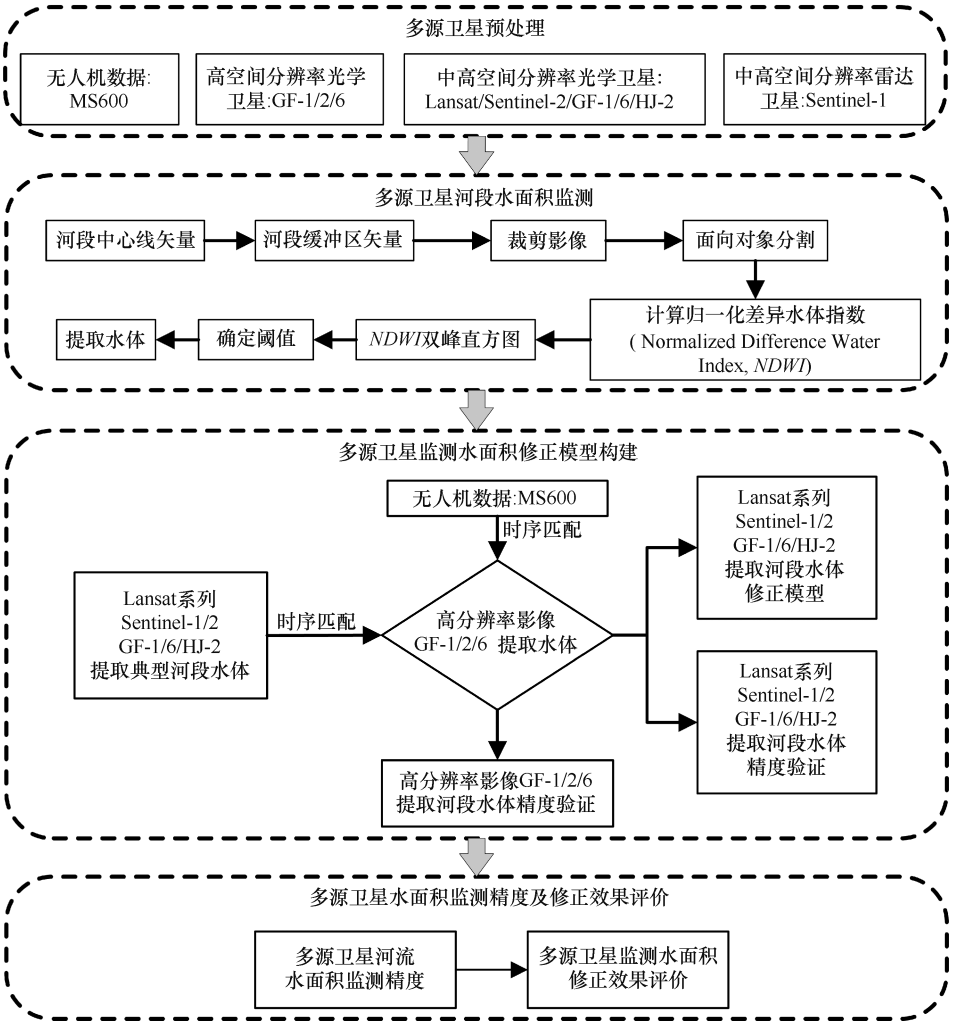


图 2　总体框架

Fig. 2　Overall framework

同质区域，即对象。这些对象内部的像素在光谱、纹理等方面具有相似性，而不同对象之间存在差异，从而实现图像分割。利用基于面向对象的方法对裁剪后影像进行对象分割。

2.2.3　双峰阈值水体自动提取

针对光学影像，计算不同对象归一化差异水体指数[26]（Normalized Difference Water Index，*NDWI*），统计获取不同河段、不同时相影像 *NDWI* 直方图分布；针对雷达影像，统计获取不同河段、不同时相影像后向散射系数[17]直方图分布，具体为

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \tag{1}$$

式中，*Green* 和 *NIR* 分别为绿波段和近红外波段遥感反射率。

双峰法全称为灰度直方图双峰法[27]，该方法先将图像进行灰度值分割，若灰度直方图呈明显双峰状，则选取两峰之间的谷底所对应的灰度值作为阈值。灰度直方图 x 轴为[0，255]的灰度值，y 轴为对应灰度值的像素点数。若直方图形成双峰，则自动识别两峰之间 y 值最小时对应的 X_i 作该分割该图像的自适应阈值。由于水体和陆地的光谱反射率和后向散射系数明显不同，故而计算得出的 *NDWI* 或后向散射系数存在显著差异，其 *NDWI* 或后向散射系数直方图存在明显的“双峰”特征（见图 3），取两峰之间最小 *NDWI* 或后向散射系数作为水体提取阈值，最终利用阈值分割法实现水体的自动提取。

2.3　多源卫星水体转换修正模型

虽然 MS600 无人机数据具有 0.3 m 的亚米级空间分辨率，但考虑到无人机电池续航能力有限，无法进行长时序、大范围河流监测，只能单次采集数据且飞行受天气影响显著、数据采集及后处理时间成本高等实际问题。以像元分辨率为 1～2 m GF-1/2/6 PMS 高分辨率遥感影像监测河段水面积作为相对真值，通过时间匹配建立不同河段 30 m Landsat-8/9 OLI、16 m GF-1/6 WFV/HJ2A/2B CCD、10 m Sentinel-2 MSI、10 m Sentinel-1 SAR 监测水面积和 1～2 m GF-1/2/6 PMS 监测水面积样本对，时间差异控制在前后 2 d 以内，利用高空间分辨率卫星和中高空间分辨率监测水面积样本对构建中高空间分辨率监测水面积修正模型，以消除 30 m Landsat-8/9 OLI、16 m GF-1/6 WFV/HJ2A/2B CCD、10 m Sentinel-2 MSI 和 10 m Sentinel-1 SAR 监测水面积之间存在的系统误差，修正模型公式为

$$y = a_0 + a_1 x \tag{2}$$

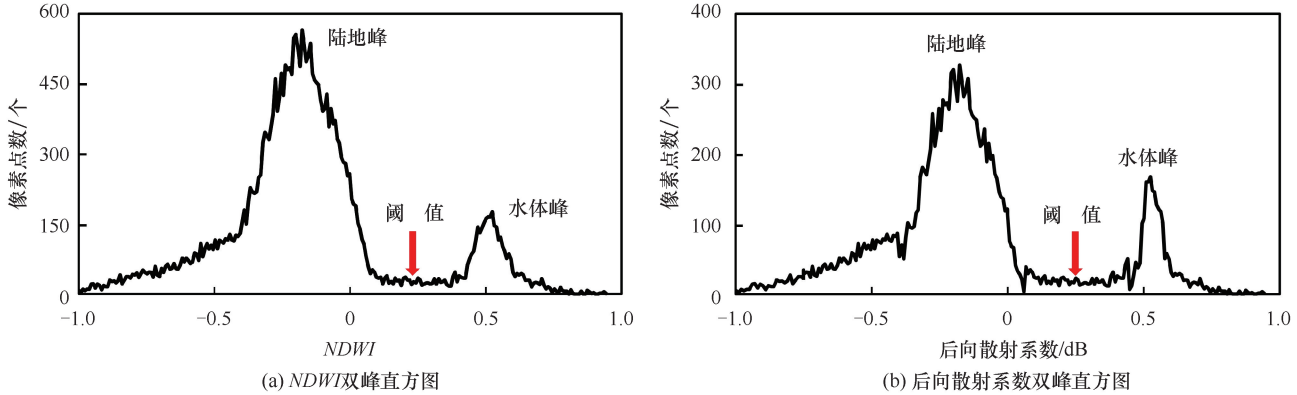
式中，y 为高空间分辨率卫星监测水面积；x 为中高空间分辨率卫星监测水面积；a_0、a_1 为拟合参数，分别代表截距和斜率。

2.4　多源卫星监测水面积精度验证及修正效果评价

以无人机 MS600 监测水面积验证 GF-1/2/6 PMS 监测水面积精度，再以 GF-1/2/6 PMS 监测水面积作为相对真值验证 Landsat-8/9 OLI、GF-1/6 WFV/HJ-2A/2B CCD、Sentinel-1 SAR、Sentinel-2 MSI 等中高分辨率卫星水面积监测精度。验证指标包括决定系数 R^2、均方根误差 *RMSE*、平均绝对百分比误差 *MAPE* 和总体标准差 σ[28]，不同指标计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \tag{3}$$

式中，y_i 为真值；$\hat{y}_i$ 为观测值；$\bar{y}_i$ 为真值的平均值；$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$ 为残差平方和，表示模型未解释的变异；$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2$ 为总平方和，表示数据本身的



(a) *NDWI*双峰直方图　　(b) 后向散射系数双峰直方图

图 3　*NDWI* 和后向散射系数直方图中的“双峰”特征

Fig. 3　“Bimodal” characteristic in *NDWI* and backscattering coefficient histograms

总变异。

RMSE 计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{4}$$

式中，y_i、$\hat{y}_i$、$\bar{y}_i$ 等意义同式(3)；$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$ 为残差平方的平均值，称为均方误差。

MAPE 计算公式为

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}\right) \times 100\% \tag{5}$$

式中，y_i、$\hat{y}_i$、$\bar{y}_i$ 等意义同式(3)。

$|y_i - \hat{y}_i|$为观测值与真值的绝对误差；$\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}$ 将绝对误差除以真值，得到相对误差。

σ 计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2} \tag{6}$$

式中，σ 为总体标准差；N 为数据点的个数；x_i 为数据集中的第 i 个数据点，μ 为总体均值。

3　结　果

3.1　不同空间分辨率卫星河流水体监测精度

由于 GF-2、GF-6 卫星的重访周期较长，在试验期间并没有与无人机 MS600 影像时间匹配的数据，GF-1/B/C/D 卫星组网后能达到 2 d 的重访周期[29]，具备与无人机 MS600 影像时间匹配的能力，GF-2、GF-6 卫星的空间分辨率分别为 1 m 和 2 m 大于等于 GF-1 系列卫星。GF-2、GF-6 的监测精度不低于 GF-1 系列卫星[30-31]，因此只验证 MS600 和 GF-1/B/C/D PMS。GF-1/B/C/D PMS 不同河段水面积监测精度如表 2 所列。可以看出，2 m GF-1/B/C/D PMS 监测金沙江上游正科乡、奔子栏、石鼓河段水面积绝对误差为 0.002～0.01 km^2，正科乡辫状河段相对误差小于 3%，奔子栏和石鼓河段相对误差小于等于 0.6%，监测精度整体较高。

利用 1～2 m GF-1/2/6 PMS 验证 16 m GF-1 WFV、GF-6 WFV、HJ-2A/2B CCD 精度如表 3 所列。可以看出，相同河段 GF-1/6 WFV 和 HJ-2A/2B CCD 监测水面积 *MAPE* 差异在 2%以内，证明对同一区域，空间分辨率相同的卫星监测能力基本一致，因此本研究将 16 m GF-1/6 WFV/HJ-2A/2B CCD 合并分析，下文统称为“16 m 国产卫星”。

表 2　正科乡、石鼓、奔子栏河段 2 m GF-1/B/C/D PMS 监测水体面积精度评价表

Table 2　Accuracy evaluation of water surface area monitoring for GF-1/B/C/D PMS at 2 m resolution in Zhengkexiang, Shigu, and Benzilan river sections

河　段	真值/km^2	监测值/km^2	绝对误差/km^2	相对误差/%
正科乡	0.371	0.381	0.01	2.70
石　鼓	1.000	1.006	0.006	0.60
奔子栏	1.529	1.531	0.002	0.13

表 3　正科乡、石鼓、奔子栏河段 GF-1/6 WFV/HJ-2A/2B CCD 水面积监测 *MAPE*

Table 3　*MAPE* of water surface area monitoring using GF-1/6 WFV and HJ-2A/2B CCD in Zhengkexiang, Shigu, and Benzilan river sections

河　段	GF-1 WFV/%	GF-6 WFV/%	HJ-2A/2B CCD/%
正科乡	14.54	13.10	13.94
石　鼓	5.87	4.02	4.06
奔子栏	9.13	9.76	8.77

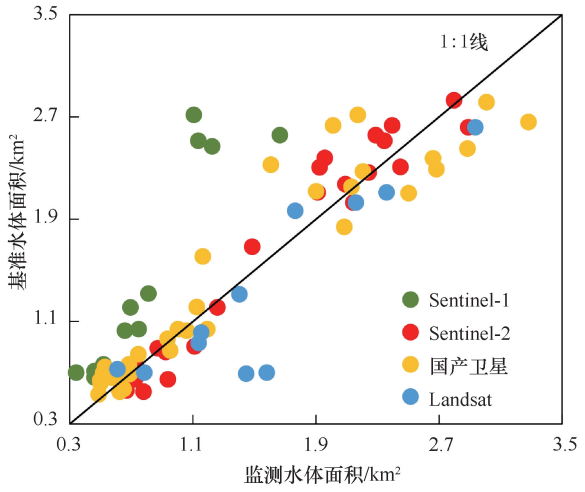
正科乡、石鼓、奔子栏河段 Landsat-8/9 OLI、GF-1/6 WFV/HJ-2A/2B CCD、Sentinel-1 SAR、Sentinel-2 MSI 监测水体面积精度评价如表 4 所列。可以看出，在相同数据源监测的条件下三个河段的监测精度从高到低依次为奔子栏、石鼓、正科乡；在监测河段相同的条件下数据源的监测精度从高到低依次为 Sentinel-2、16 m 国产卫星、Landsat-8/9、Sentinel-1。

正科乡、石鼓、奔子栏河段 Landsat-8/9 OLI、GF-1/6 WFV/HJ-2A/2B CCD、Sentinel-1 SAR、Sentinel-2 MSI 监测水面积散点图如图 4 所示。可以看出，随着卫星数据源空间分辨率的提高，散点分布更加向 1∶1线收敛，均方根误差与平均绝对百分比误差都明显降低。

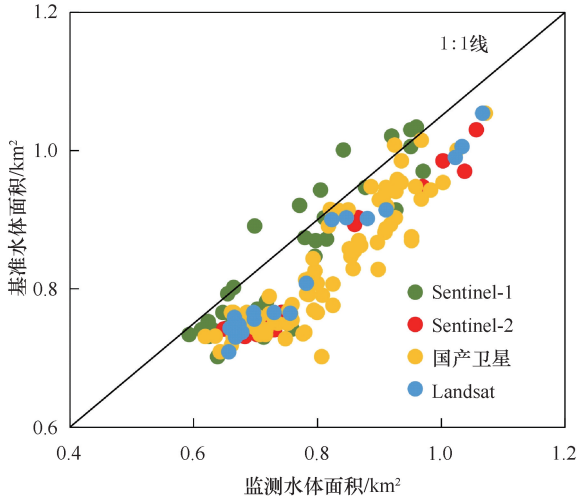
表 4　正科乡、石鼓、奔子栏河段不同数据源遥感监测精度验证表

Table 4　Accuracy verification of remote sensing monitoring of different data sources in Zhengkexiang, Shigu, and Benzilan river sections

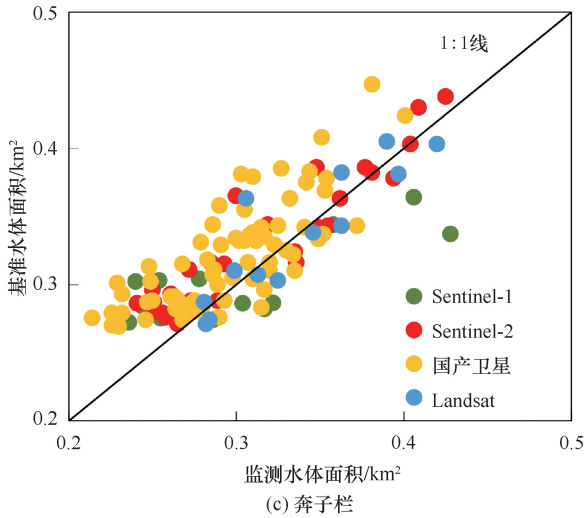
河　段	Landsat		16 m 国产卫星		Sentinel-2		Sentinel-1	
	RMSE/km^2	*MAPE*/%	*RMSE*/km^2	*MAPE*/%	*RMSE*/km^2	*MAPE*/%	*RMSE*/km^2	*MAPE*/%
正科乡	0.388 8	31.59	0.279 9	13.96	0.180 9	10.79	0.706 8	37.78
石　鼓	0.054 3	6.00	0.049 3	4.98	0.040 8	4.28	0.096 3	10.50
奔子栏	0.021 0	4.89	0.035 8	9.27	0.026 5	6.71	0.041 4	11.90



(a) 正科乡



(b) 石　鼓



(c) 奔子栏

图 4　正科乡、石鼓、奔子栏河段不同数据源监测水面积散点图

Fig. 4　Scatter plots of water surface area monitored by different data sources in Zhengkexiang, Shigu, and Benzilan river sections

3.2　修正模型构建与修正效果评估

表 5 至表 7 展示了正科乡、石鼓、奔子栏三个河段不同卫星数据源监测水面积修正模型，3 个河段决定系数 R^2 平均值分别达到了 0.88、0.89、0.72，说明模型对数据的拟合优度高，自变量对因变量的解释能力强。

表 5　正科乡河段不同卫星数据源监测水面积修正模型

Table 5　Correction models of water surface area monitored by different satellite data sources in Zhengkexiang river section

卫　星	样本数	修正模型
Landsat	11	$y=0.91x-0.08$，$R^2=0.79$
16m 国产卫星	35	$y=0.87x+0.21$，$R^2=0.90$
Sentinel-2	27	$y=1.08x-0.10$，$R^2=0.96$
Sentinel-1	16	$y=2.02x-0.22$，$R^2=0.87$

表 6　石鼓河段不同卫星数据源监测水面积修正模型

Table 6　Correction models of water surface area monitored by different satellite data sources in Shigu river section

卫　星	样本数	修正模型
Landsat	18	$y=0.764x+0.226$，$R^2=0.97$
16m 国产卫星	84	$y=0.76x+0.22$，$R^2=0.81$
Sentinel-2	17	$y=0.77x+0.21$，$R^2=0.96$
Sentinel-1	38	$y=0.85x+0.20$，$R^2=0.83$

表 7　奔子栏河段不同卫星数据源监测水面积修正模型

Table 7　Correction models of water surface area monitored by different satellite data sources in Benzilan river section

卫　星	样本数	修正模型
Landsat	13	$y=0.90x+0.03$，$R^2=0.80$
16m 国产卫星	73	$y=0.75x+0.10$，$R^2=0.61$
Sentinel-2	28	$y=0.80x+0.08$，$R^2=0.87$
Sentinel-1	14	$y=0.37x+0.19$，$R^2=0.61$

图 5 至图 7 展示了 3 个河段多源中高分辨率卫星数据的修正效果，在经过 1~2 m 的 GF-1/2/6 PMS 建模修正后，*MAPE* 与 *RMSE* 都显著降低，其中，正科乡、石鼓、奔子栏河段 Landsat 水面积的平均绝对百分比误差经过修正分别由 31.59%、6.00%、4.89% 降低至 24.22%、1.93%、4.75%，均方根误差均值经过修正由 0.388 8 km^2、0.054 3 km^2、0.021 0 km^2 降低至 0.305 6 km^2、0.019 7 km^2、0.020 5 km^2；Sentinel-2 水面积的平均绝对百分比误差经过修正由 10.79%、4.28%、6.71% 降低至 9.78%、1.98%、4.24%，均方根误差均值经过修正由 0.180 9 km^2、0.040 8 km^2、0.015 8 km^2 降低至 0.171 6 km^2、0.019 6 km^2、0.014 4 km^2；Sentinel-1 水面积的平均绝对百分比误差均值经过修正由 37.78%、10.50%、

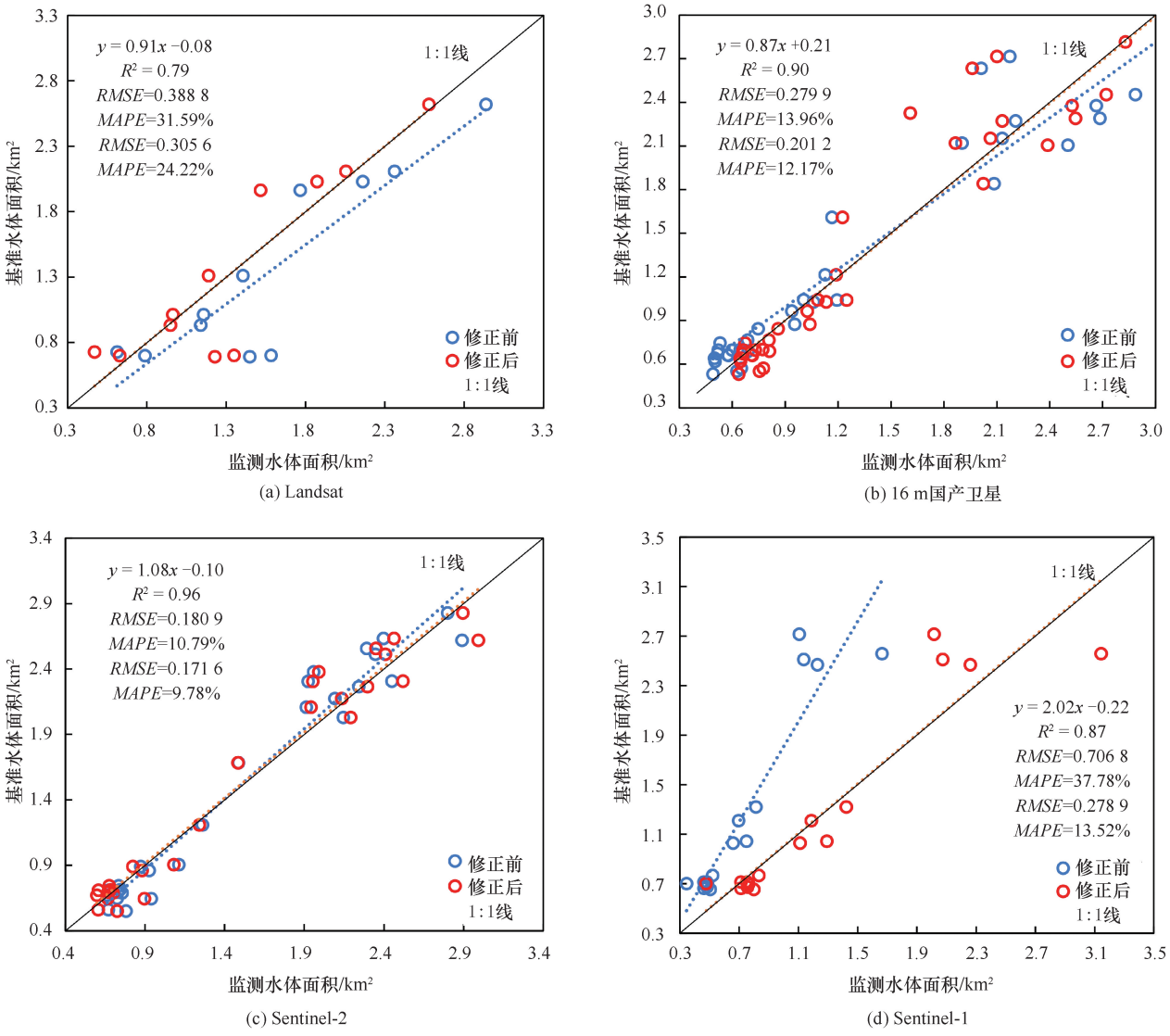


图 5　正科乡不同数据源修正效果散点图

Fig. 5　Scatter plots of correction effects of different data sources in Zhengkexiang

11.90%降低至 13.52%、4.10%、5.14%，均方根误差均值经过修正由 0.706 8 km^2、0.096 3 km^2、0.041 4 km^2 降低至 0.278 9 km^2、0.042 7 km^2、0.017 4 km^2；16 m 国产卫星水面积的平均绝对百分比误差均值经过修正由 13.96%、4.98%、9.27% 降低至 12.17%、3.72%、6.06%，均方根误差均值经过修正由 0.279 9 km^2、0.049 3 km^2、0.035 8 km^2 降低至 0.201 2 km^2、0.039 0 km^2、0.024 2 km^2，修正后的散点基本均位于 1∶1 线两侧。

4　讨　论

4.1　河流水体监测精度影响因素

4.1.1　卫星传感器类型和空间分辨率

多源卫星河段水体监测精度同时受卫星类型和卫星空间分辨率影响。相同河段临近日期不同空间分辨率卫星影像和提取结果如图 8 所示，可以看出，受河段水陆边界混合像元影响，光学卫星空间分辨率越粗，混合像元在总水面积占比越大，提取水体矢量范围锯齿状越明显[32]，监测精度越低（见表 4）；Sentinel-2 光学卫星和 Sentinel-1 雷达卫星虽然空间分辨率均为 10 m，但 Sentinel-2 光学卫星具有多光谱信息，可以更准确识别水陆边界，水面积监测精度显著优于 Sentinel-1 雷达卫星（见表 4）。

4.1.2　河流汉道数

多源卫星河段水体监测的绝对误差与河段汉道数指数成正比。不同卫星在不同河段的水面积监测绝对误差与汉道数指数的散点图及拟合关系如图 9 所示。可以看出，随着汉道数指数的升高，30 m 的 Landsat、

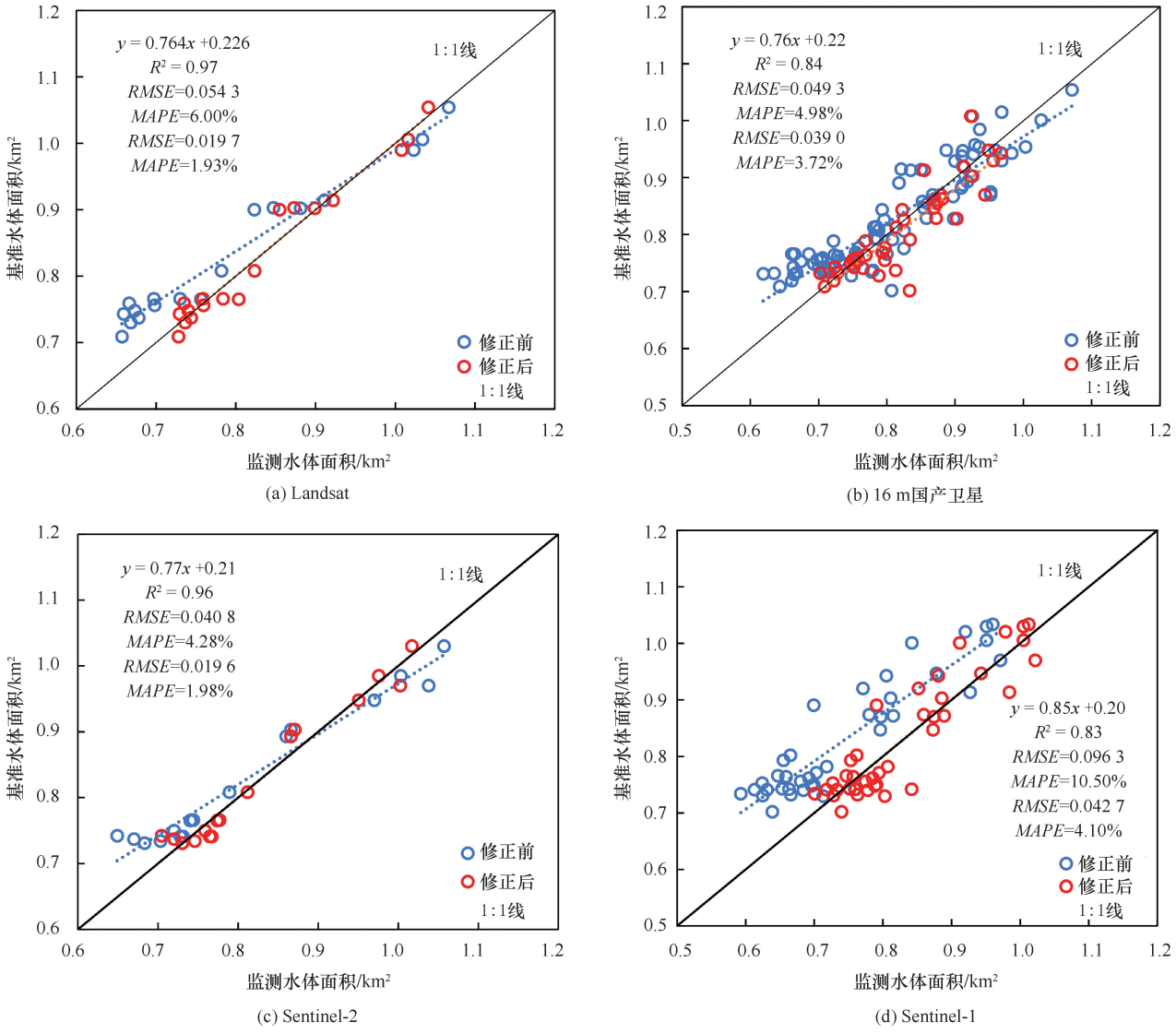


图 6　石鼓不同数据源修正效果散点图

Fig. 6　Scatter plots of correction effects of different data sources in Shigu

16 m 的国产卫星和 10 m 的 Sentinel-1/2 的水面积绝对误差均表现出增大的趋势，水体监测精度降低。不同数据源的汉道数指数与水面积绝对误差的趋势线呈现不同的斜率，这主要是由于传感器空间分辨率不同所致。空间分辨率越低，水面积绝对误差越大，趋势线的斜率越大，监测精度越低。相反，空间分辨率越高，水面积绝对误差越小，趋势线的斜率越小，监测精度越高。尽管 Sentinel-1 具有 10 m 的空间分辨率，但由于其合成孔径雷达的成像过程[33]，目标散射面中的散射单元信号相互叠加，产生相干斑噪声，且地形起伏导致图像畸变（如叠掩、阴影等），因此 Sentinel-1 的监测精度较低。

4.1.3　其他误差来源

除卫星空间分辨率、传感器类型和河道形态等因素导致的系统性偏差外，多源卫星监测河段水面积精度还受到其他影响因素的影响，主要包括：(1)光学影像中的建筑物和山体阴影。由于这些阴影的光谱特征与水体相似，建筑物和山体阴影区域与水体之间存在较大混淆现象[33-34]。在阈值分割过程中，这些阴影区域容易被误分为水体，从而降低水体监测精度。这是光学卫星遥感的一种固有挑战，在横断山脉地区，由于地形复杂，影响尤为显著；(2)雷达影像固有的相干斑噪声、地形几何畸变以及风力引起的后向散射变异[33]。这些因素影响雷达卫星的成像质量，是 Sentinel-1 精度普遍低于光学卫星的主要原因(见表 4)；(3)水体提取算法的阈值选择问题。当影像中存在山体阴影、建筑物阴影等与水体光谱特征相似的暗色地物时，它们可能融入“水体”的波峰，导致

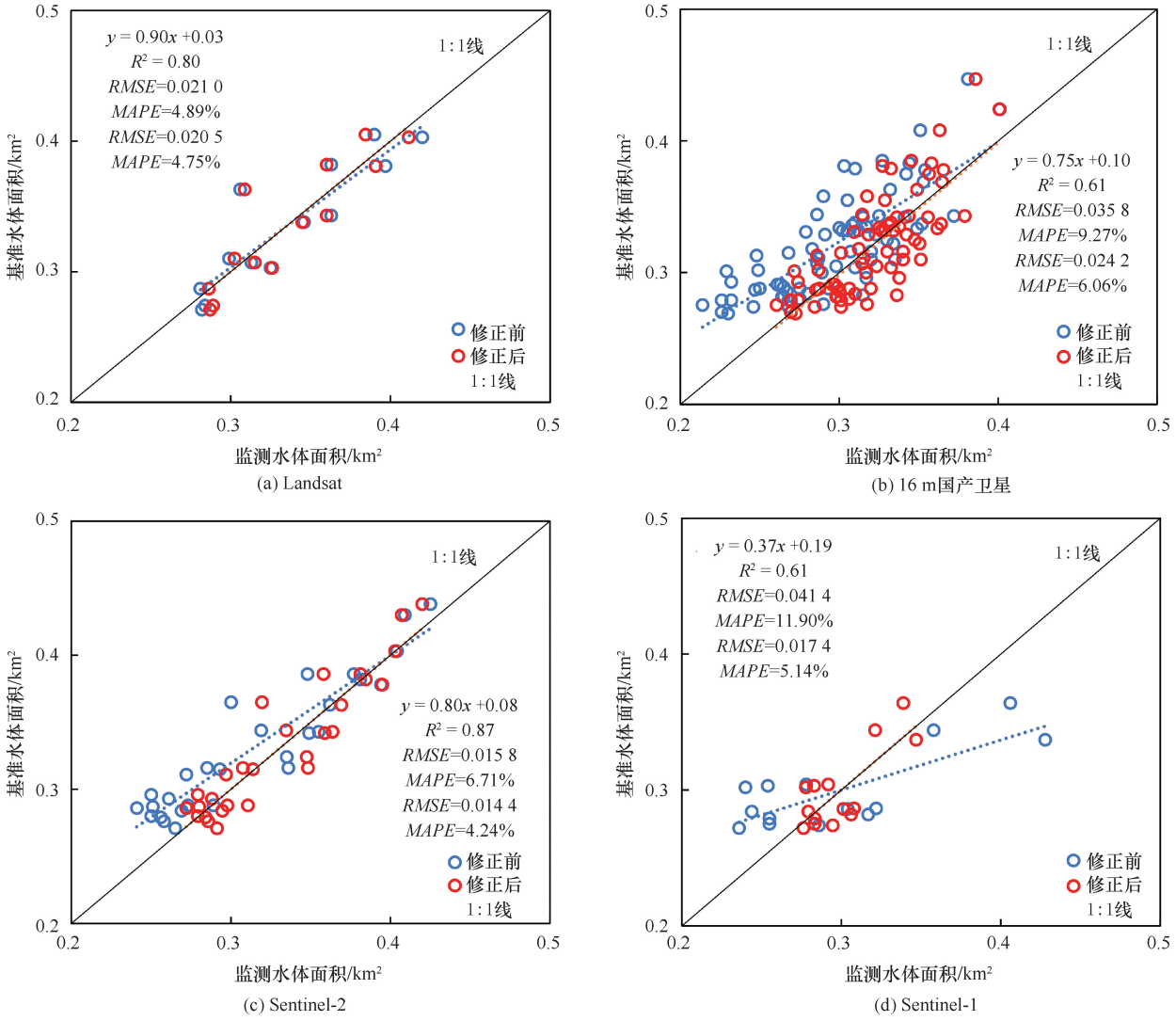


图 7　奔子栏不同数据源修正效果散点图

Fig. 7　Scatter plots of correction effects of different data sources in Benzilan

直方图双峰特性不明显或波谷位置偏移[35]。此时，算法难以自动判断正确的阈值，需要人工选择阈值，这一过程存在一定的主观性，可能引入不确定性；(4)多源影像的配准误差。山区复杂的地形起伏以及不同卫星之间的影像几何畸变、辐射特性差异和传感器参数变化等因素[36]，会导致微小的配准误差。这些误差在河道边界处可能引入像素级的误差，具有随机性，是修正后残差的主要来源。

4.2　修正模型适用性

研究区 3 条形态不同的河段中高分辨率卫星模型修正效果评估如表 8 所列。可以看出，经修正后 3 个不同空间位置、不同形态的河段水体面积的平均绝对百分比误差均得到了显著降低，其中正科乡河段 *MAPE* 由修正前的 23.53%降低至 14.97%；石鼓河段 *MAPE* 由修正前的 6.44%降低至 2.93%；奔子栏河段 *MAPE* 由修正前的 8.19%降低至 5.05%。构建修正模型仅需要高分辨率与中高分辨率卫星数据进行时序匹配即可，无论是模型的构建还是数据的获取都具有良好的适用性。

4.3　多源数据协同优势

4.3.1　一致性提升

1984—2024 年正科乡、石鼓、奔子栏河段 30 m Landsat-8/9 OLI、16 m GF1/6 WFV/HJ2A/2B、10 m Sentinel-2 MSI 和 10 m Sentinel-1 SAR 监测的水面积时间序列如图 10 所示，构建时序图遇到同一日期存在多源数据的情况时，仅保留空间分辨率最高的数据作为监测结果。可以看出，以 GF-1/2/6 PMS 监测的水面积作为相对真值，Landsat-8/9 OLI、GF-1/6 WFV、HJ-2A/2B CCD、Sentinel-2 MSI 和 Sentinel-1 SAR 在经过 1～2 m 的 GF-1/2/6 PMS 建模修正后，相较于修

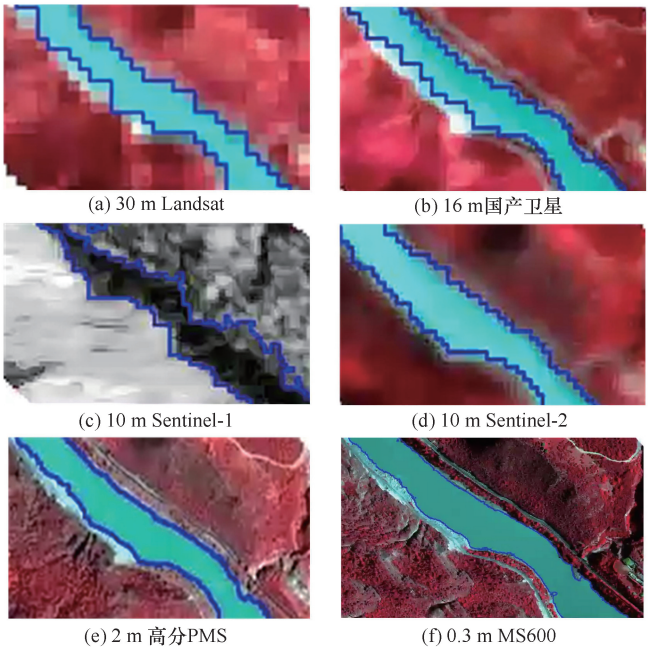


图 8　相同河段不同空间分辨率影像对比

Fig. 8　Comparison of images with different spatial resolutions of same river section

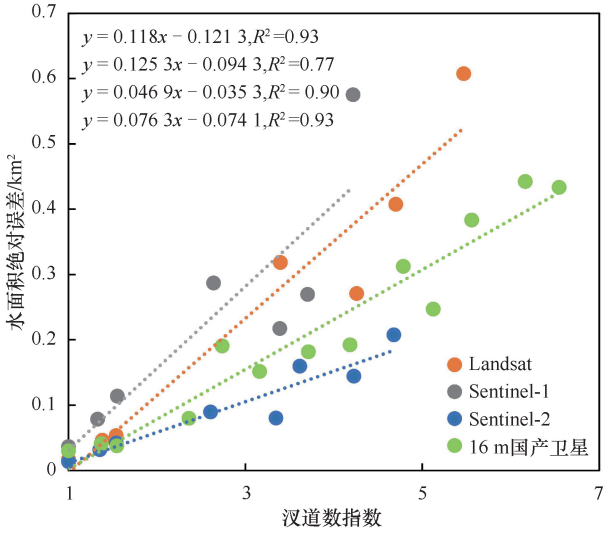


图 9　不同数据源汊道数指数与绝对误差

Fig. 9　Channel count index and absolute error of different data sources

正前水面积时间序列，修正后得到的水面积时间序列更加接近相对真值(GF-1/2/6 PMS)的监测结果。其中正科乡、石鼓、奔子栏多源卫星协同水面积监测结果与相对真值监测水面积差的标准差(Standard Deviation)经过模型修正由 0.221 8 km²、0.037 4 km²、0.019 1 km² 降低至 0.159 1 km²、0.023 4 km²、0.012 8 km²，提高了 Landsat-8/9 OLI、GF-1/6 WFV/HJ-2A/2B CCD、Sentinel-2 MSI 和 Sentinel-1 SAR 的监测一致性。

4.3.2　有效监测频次提升

金沙江上游河段 1984—2024 年的监测频次变化统计如图 11 所示。可以看出，通过多源卫星协同，可以显著提高水体监测频次。金沙江上游河段 1984—2024 年年均有效水体监测频次在 2013 年以前主要卫星数据为 Landsat-5 TM，年均有效监测频次约为 12 次/a；2013—2024 年随着 Landsat/Sentinel/GF/HJ 系列卫星不断加入，有效监测频次迅速提升，2021 年以后可实现每年 260 次左右有效监测，即全年 70%时间的水体信息可有效监测。

4.4　局限性

本研究提出的修正方法其本质是在统计层面上对“总水面积”标量进行数值修正，而并未改变原始像元的分类结果，也并未优化水陆边界的具体空间位置。因此，对于河道管理、洪涝灾情评估等需要精确空间分布信息的应用，本方法并不适用，这一局限性在小型河流上尤为显著，其有效性依赖河宽与空间分辨率的比例关系。对于宽度仅相当于中高空间分辨率卫星 1～2 个像元(如 Landsat 影像中河宽小于 60 m)的河流，混合像元效应占绝对主导，使得提取结果不确定性极大，建立修正模型的意义有限，本方法更适用于河宽大于 3 倍像元分辨率河段。此外，因其“逐卫星-逐河段”的特性意味着模型参数会随卫星传感器、分辨率及河道形态变化，模型的推广需依赖目标区域的本地化率定。

4.5　应用潜力

本研究提出的基于修正模型的多源数据河流水体

表 8　修正效果评估　%

Table 8　Correction effect evaluation　%

河　段	Landsat-8/9 *MAPE*		16 m 国产卫星 *MAPE*		Sentinel-2 *MAPE*		Sentinel-1 *MAPE*	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
正科乡	31.59	24.22	13.96	12.17	10.79	9.78	37.78	13.70
石　鼓	6.00	1.93	4.98	3.72	4.28	1.98	10.50	4.10
奔子栏	4.89	4.75	9.27	6.06	6.71	4.24	11.90	5.14

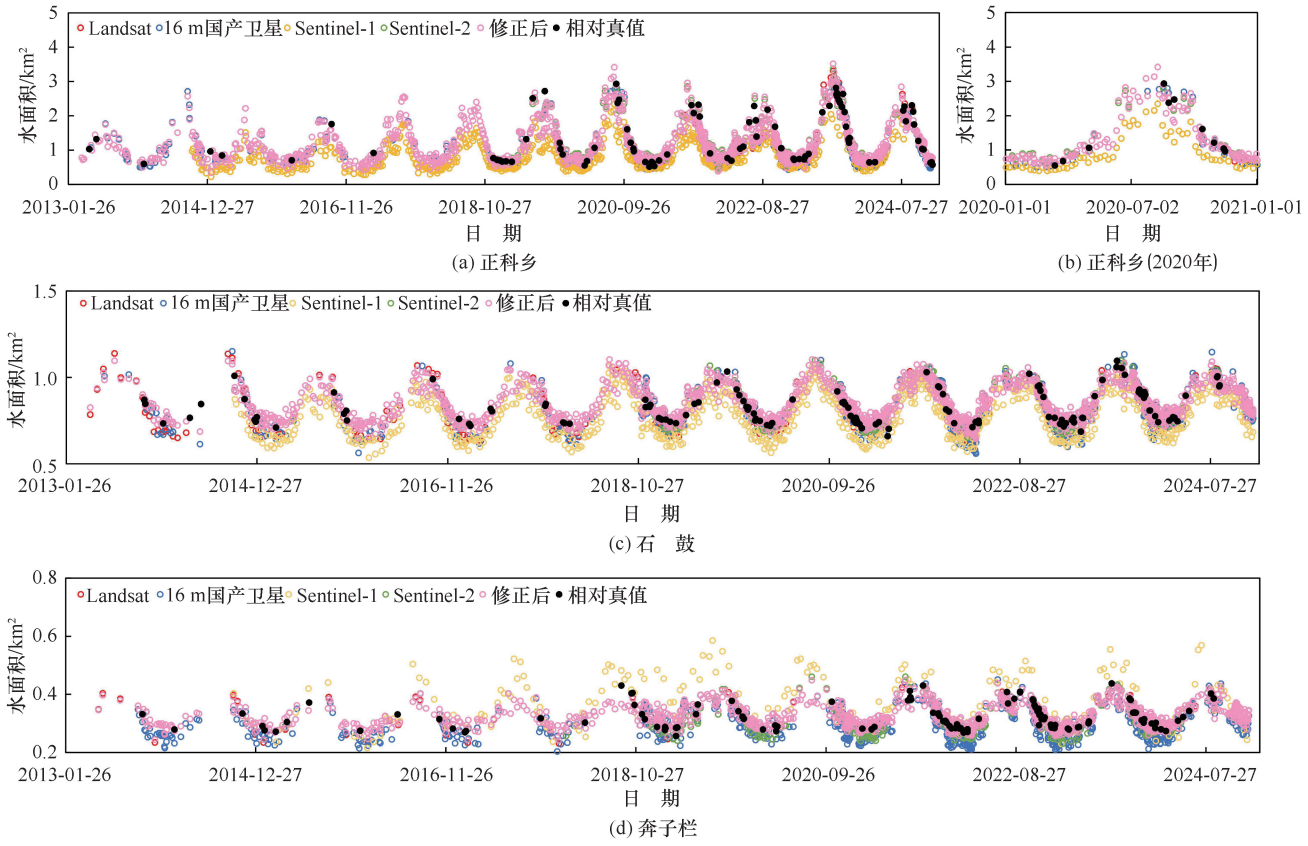


图 10　正科乡、石鼓、奔子栏河段面积多源卫星协同监测时间序列

Fig. 10　Time series of multi-source satellite synergistic monitoring of water surface area in Zhengkexiang, Shigu, and Benzilan river sections

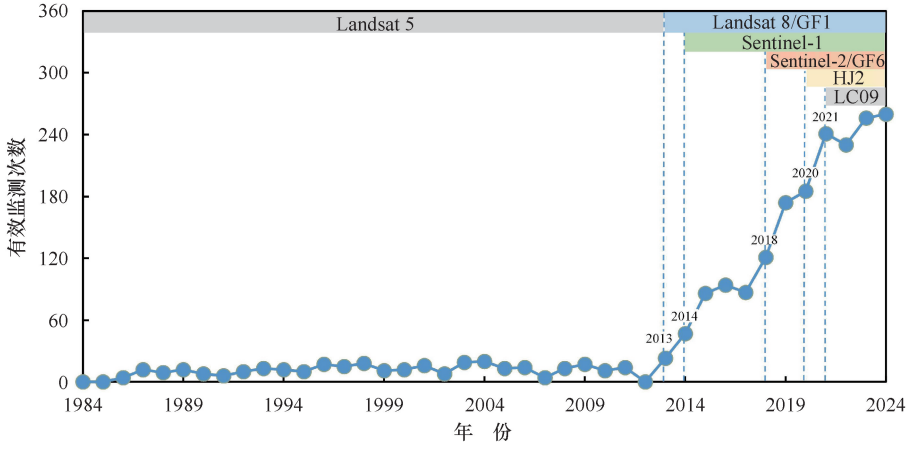


图 11　金沙江上游河段 1984—2024 年年均有效水体监测频次

Fig. 11　Annual average monitoring frequency of effective water bodies in river sections of upper reaches of Jinsha River (1984—2024)

协同监测框架具有较强的推广应用前景。因其良好的可迁移性，只需基于研究区域高分辨率遥感数据作为相对真值，与公开中高分辨率影像进行时空匹配，构建本地化样本对，进而实现模型参数的重新率定。可进一步拓展至湖泊、水库等内陆水体的监测，生成的长时序、高一致性、高时间分辨率的水面积数据集可以显著提升水体的长时序动态监测能力，在水位流量监测、水文模型参数率定、洪涝过程动态模拟与气候响应机理分析等领域具有推广应用价值。

5 结　论

本研究针对多源遥感数据协同监测河流水体时存在的精度不一致问题，提出了一种基于修正模型的多源数据河流水体协同监测框架，以金沙江上游正科乡(辫状)、石鼓(分汊)、奔子栏(顺直)3 个典型河段为案例，系统开展了 1 m 到 30 m 不同类型卫星对不同形态河道水面积监测精度差异的分析与基于修正模型的多源数据河流水体协同监测框架的构建，主要结论如下。

(1)不同空间分辨率卫星监测不同形态河段水体精度存在明显差异，卫星空间分辨率、传感器类型和河段形态为主要影响因素。正科乡(辫状)、石鼓(分汊)、奔子栏(顺直)河段多源卫星监测结果的 *RMSE* 分别介于 0.180 9~0.706 8 km^2、0.040 8~0.096 3 km^2、0.015 8~0.041 4 km^2；多源卫星监测河段水面积精度受卫星空间分辨率、卫星类型和河段形态等因素共同影响，卫星空间分辨率越粗，监测河段形态越复杂，水面积监测精度越低，同一河段相同空间分辨率光学卫星监测精度明显优于雷达卫星。

(2)修正模型可有效提升多源卫星不同河段水面积监测精度和一致性。修正后，Landsat-8/9 OLI、Sentinel-2 MSI、Sentinel-1 SAR 和 16 m 国产卫星在三个河段平均 *MAPE* 分别从 14.16%、7.26%、20.06%、9.37% 降低至 10.30%、5.33%、7.59%、7.32%；多源卫星协同水面积监测结果与相对真值监测水面积差的标准差(Standard Deviation)经过模型修正由 0.221 8 km^2、0.037 4 km^2、0.019 1 km^2 降低至 0.159 1 km^2、0.023 4 km^2、0.012 8 km^2，提升了多源卫星协同监测的一致性。

(3)多源卫星协同可显著提升监测频次。通过 Landsat、Sentinel、高分(GF)、环境(HJ)系列卫星协同，将年均有效监测频次从单一 Landsat 卫星约 12 次大幅提升至 260 次，可有效监测年内 70%时间的水体信息。

(4)基于修正模型的多源数据河流水体协同监测框架的推广应用潜力。通过多源卫星数据协同监测所产出的高频词、长时序、高一致性的水面积监测数据集，可为水体高频次动态监测、水文模型校准、洪涝灾害过程动态追踪提供关键的数据支撑；在推广应用时，可基于研究区域具体卫星数据构建本地化样本对，进而实现模型参数的重新率定与应用，以将本方法论推广至更广泛的全球河流与其他水体监测中。

参考文献(References)：

[1] PIMENTEL D, BERGER B, FILIBERTO D, et al. Water resources: Agricultural and environmental issues[J]. BioScience, 2004, 54(10): 909.

[2] AHMED I, DEBNATH J, DAS N. Impact of river on human life: A case study on the Gumti River, Tripura[J]. Radix International Journal of Research in Social Science, 2015, 4: 1-13.

[3] 刘沭岍, 刘凯, 曾繁轩, 等. 河流水文遥感及其在青藏高原应用研究进展[J]. 遥感学报, 2024, 28(10): 2427-2447.
LIU S Q, LIU K, ZENG F X, et al. Research progress on river hydrology remote sensing and its application on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Remote Sensing, 2024, 28(10): 2427-2447.

[4] MARCUS W A, FONSTAD M A. Remote sensing of rivers: The emergence of a subdiscipline in the river sciences[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(15): 1867-1872.

[5] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
XU H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2005, 9(5): 589-595.

[6] 李升海, 张俊, 唐海林, 等. 基于改进 SVM 算法的 Sentinel-2A MSI 遥感影像水体提取[J]. 测绘通报, 2025(2): 53-57.
LI S H, ZHANG J, TANG H L, et al. Water body extraction from sentinel-2a msi remote sensing images based on an improved SVM algorithm[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2025, (2): 53-57.

[7] SUN D C, GAO G, HUANG L J, et al. Extraction of water bodies from high-resolution remote sensing imagery based on a deep semantic segmentation network[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 14604.

[8] 童莹萍, 冯伟, 全英汇, 等. 基于 GF-3 与 Sentinel-2A 图像融合的高精度水体提取算法[J]. 无线电工程, 2021, 51(8): 750-753.
TONG Y P, FENG W, QUAN Y H, et al. High-precision water body extraction algorithm based on image fusion of GF-3 and Sentinel-2A[J]. Radio Engineering, 2021, 51(8): 750-753.

[9] TULBURE M G, BROICH M, PERIN V, et al. Can we detect more ephemeral floods with higher density harmonized Landsat Sentinel 2 data compared to Landsat 8 alone [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 185: 232-246.

[10] DECLARO A, KANAE S. Enhancing surface water monitoring through multi-satellite data-fusion of landsat-8/9, sentinel-2, and sentinel-1 SAR[J]. Remote Sensing, 2024, 16(17): 3329.

[11] CHANG L W, CHENG L, ZHANG L, et al. Remote sensing-based high-resolution reservoir drought index for identifying the occurrence and propagation of hydrological droughts in a large river basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 328: 114859.

[12] LI X D, LING F, FOODY G M, et al. Monitoring high spatiotemporal water dynamics by fusing MODIS, Landsat, water

occurrence data and DEM[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 265: 112680.

[13] LIANG J Y, LIU D S. Automated estimation of daily surface water fraction from MODIS and Landsat images using Gaussian process regression[J]. International Journal of Remote Sensing, 2021, 42(11): 4261-4283.

[14] KONAPALA G, KUMAR S V, KHALIQUE AHMAD S. Exploring Sentinel-1 and Sentinel-2 diversity for flood inundation mapping using deep learning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 180: 163-173.

[15] OGILVIE A, BELAUD G, MASSUEL S, et al. Surface water monitoring in small water bodies: Potential and limits of multi-sensor Landsat time series[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(8): 4349-4380.

[16] TANG H L, LU S L, ALI BAIG M H, et al. Large-scale surface water mapping based on landsat and sentinel-1 images[J]. Water, 2022, 14(9): 1454.

[17] 姚杰鹏，杨磊库，陈探，等. 基于 Sentinel-1，2 和 Landsat8 时序影像的鄱阳湖湿地连续变化监测研究[J]. 遥感技术与应用，2021，36(4)：760-776.
YAO J P, YANG L K, CHEN T, et al. A study on the continuous monitoring of poyang lake wetland changes based on time-series Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 Images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(04): 760-776.

[18] LI J J, LI L Y, SONG Y J, et al. A robust large-scale surface water mapping framework with high spatiotemporal resolution based on the fusion of multi-source remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 118: 103288.

[19] YIN Z X, WU P H, LI X Y, et al. Super-resolution water body mapping with a feature collaborative CNN model by fusing Sentinel-1 and Sentinel-2 images[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 134: 104176.

[20] VANDERHOOF M K, ALEXANDER L, CHRISTENSEN J, et al. High-frequency time series comparison of Sentinel-1 and Sentinel-2 satellites for mapping open and vegetated water across the United States (2017—2021)[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 288: 113498.

[21] 姜浩，冯敏，肖桐，等. 基于线状特征增强的 TM 遥感影像细小河流提取方法[J]. 测绘学报，2014，43(7)：705-710.
JIANG H, FENG M, XIAO T, et al. A narrow river extraction method based on linear feature enhancement in TM image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(7): 705-710.

[22] 何育聪，李志威，夏军强，等. 沱沱河辫状河道多尺度形态特征及非活跃汊道的影响[J]. 泥沙研究，2024，49(1)：38-44.
HE Y C, LI Z W, XIA J P, et al. Multi-scale morphological characteristics of the braided Tuotuo River and the influence of inactive anabranches. *Journal of Sediment Research*, 2024, 49(1): 38-44.

[23] 王占玲. 基于 GF-1/6 卫星影像的全国湖泊水体面积变化及成因分析[D]. 兰州：兰州交通大学，2021.
WANG Z L. National-Scale Changes in Lake Surface Area and Their Causes Based on GF-1/6 Satellite Imagery[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.

[24] 殷亚秋，李家国，余涛，等. 基于高分辨率遥感影像的面向对象水体提取方法研究[J]. 测绘通报，2015(1)：81-85.
YIN Y Q, LI J G, YU T, et al. A study on object-oriented water body extraction from high-resolution remote sensing images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(1): 81-85.

[25] 曹凯，江南，吕恒，等. 面向对象的 SPOT 5 影像城区水体信息提取研究[J]. 国土资源遥感，2007，19(2)：27-30.
CAO K, JIANG N, LYU H, et al. A study on object-oriented urban water body information extraction from SPOT5 images[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, 19(2): 27-30.

[26] GAO B C. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257-266.

[27] 王茹月，周航宇. 直方图双峰法在遥感影像水体提取中的研究与改进[J]. 测绘通报，2023(9)：77-81.
WANG R Y, ZHOU H Y. Research and improvement of histogram bimodal method in water body extraction from remote sensing images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(9): 77-81.

[28] CHICCO D, WARRENS M J, JURMAN G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation[J]. PeerJ Computer Science, 2021, 7: e623.

[29] 段秋亚，孟令奎，樊志伟，等. GF-1 卫星影像水体信息提取方法的适用性研究[J]. 国土资源遥感，2015，27(4)：79-84.
DUAN Q Y, MENG L K, FAN Z W, et al. Applicability study of water information extraction methods for GF-1 satellite imagery[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(4): 79-84.

[30] 唐英杰，曹辰. 基于 GF-6 卫星的观音阁水库淹没范围探析[J]. 水利技术监督，2025，33(5)：48-52.
TANG Y J, CAO C. Analysis of the submerged range of Guanyinge Reservoir based on GF-6 satellite[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2025, 33(5): 48-52.

[31] 李燕燕. 面向地理国情监测的高分影像河流提取及精度分析[J]. 科技资讯，2022，20(14)：82-84.
LI Y Y. River extraction from high-resolution imagery and accuracy analysis for national geographical conditions monitoring[J]. Science and Technology Information, 2022, 20(14): 82-84.

[32] 张毅，陈成忠，吴桂平，等. 遥感影像空间分辨率变化对湖泊水体提取精度的影响[J]. 湖泊科学，2015，27(2)：335-342.
ZHANG Y, CHEN C Z, WU G P, et al. The impact of changes in remote sensing image spatial resolution on lake water body extraction accuracy[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 335-342.

[33] CHEN S N, JIANG M. Application research of Sentinel-1 SAR in

flood range extraction and polarization analysis[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(6): 1063-1070.

[34] 张雍, 江洪, 郭家, 等. 顾及水域的 Sentinel-2 数据地形阴影检测方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(2): 492-501.
ZHANG Y, JIANG H, GUO J. Research on topographic shadow detection method for Sentinel-2 data considering water bodies[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(02): 492-501.

[35] 刘双童. 国产高分系列遥感影像水体提取方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
LIU S T. Research on Water Body Extraction Methods from Domestic GF Series Remote Sensing Images [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.

[36] ZHANG H, LEI L, NI W, et al. Registration of large optical and sar images with Non-Flat Terrain by investigating reliable sparse correspondences[J]. Remote Sensing, 2023, 15(18): 4458.

（责任编辑　王海锋）