



引文格式:苗顺霞,孙开敏,胡秀清,等.基于风云三号D星MERSI-II影像的青藏高原湖泊范围监测能力分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(12):2526-2536.DOI:10.13203/j.whugis20220653

Citation: MIAO Shunxia, SUN Kaimin, HU Xiuqing, et al. Capability Analysis of Lake Extent Monitoring in the Tibetan Plateau from MERSI-II Images of FY-3D Satellite[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(12):2526-2536. DOI:10.13203/j.whugis20220653

基于风云三号D星MERSI-II影像的青藏高原湖泊范围监测能力分析

苗顺霞¹ 孙开敏¹ 胡秀清² 瞿建华³ 刘俊怡¹

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

² 中国气象局国家卫星气象中心,北京,100081

³ 中国气象局北京华云星地通科技有限公司,北京,100081

摘要:青藏高原湖泊是全球气候变化的敏感指示器,持续监测对探索湖泊自然演化规律及其与气候的相互作用有重要意义。高原降雨、蒸发、冰川消融等都会引起湖泊范围的骤变,对湖泊动态监测影像的时间分辨率提出了较高要求。国产风云三号D星(FY-3D)搭载的中分辨率成像仪(moderate resolution imager, MERSI-II)具备逐日宽幅覆盖的高频次监测能力,但其250 m分辨率影像在高原湖泊监测应用中的能力还有待验证。以青藏高原湖泊为研究对象,以同期的第三方数据集和Landsat-8陆地成像仪监测结果为对比真值,分析了FY-3D MERSI-II影像在高原湖泊监测中的应用能力。研究发现,原始250 m的MERSI-II影像对湖泊面积反演平均精度达95.12%,对湖泊水体边界提取的平均拟合度达91.21%。凭借其时间分辨率优势,MERSI-II影像可以服务于长时序高动态的水体监测应用。为进一步验证MERSI-II数据的应用潜力,对比分析了其在空间分辨率超分后湖泊范围监测能力的改善情况。结果表明,MERSI-II影像由250 m超分至150 m,湖泊面积反演平均精度提升了2.62%,达到97.74%,湖泊边界平均拟合度提升了4.44%,达到95.65%。研究表明,空间超分辨率潜力和高时间分辨率特性会使FY-3D MERSI-II影像在长时序高动态湖泊监测中有很好的应用价值。

关键词:风云三号卫星;MERSI-II传感器;湖泊监测;水体反演;Landsat-8

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2024-06-27

DOI:10.13203/j.whugis20220653

文章编号:1671-8860(2025)12-2526-11

Capability Analysis of Lake Extent Monitoring in the Tibetan Plateau from MERSI-II Images of FY-3D Satellite

MIAO Shunxia¹ SUN Kaimin¹ HU Xiuqing² QU Jianhua³ LIU Junyi¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

³ Beijing Huayun Shinetek Company, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: Objectives: Lakes on the Tibetan Plateau are sensitive indicators of global climate change. Monitoring the rapid extent changes of those lakes, driven by factors like precipitation and glacier melt, requires satellite imagery with high temporal resolution. The moderate resolution imager (MERSI-II) aboard FengYun-3D (FY-3D) satellite provides extensive coverage every day, but its capability for monitoring plateau lakes at its native 250 m resolution has not been systematically evaluated. This paper aims to assess the performance of MERSI-II imagery for dynamic lake monitoring on the Tibetan Plateau and explore its potential for enhancement through super-resolution techniques. **Methods:** Lake area and water boundaries

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3902900);国家自然科学基金重大项目(42192580)。

第一作者:苗顺霞,博士,主要从事生态遥感和地表灾害异常监测方面的研究。shunxiamiao@whu.edu.cn

通信作者:孙开敏,博士,教授。sunkm@whu.edu.cn

extracted from MERSI-II images are compared against reference data derived from contemporaneous third-party datasets and Landsat-8 operational land imager imagery. Furthermore, a spatial super-resolution technique is applied to enhance the MERSI-II imagery from 250 m to 150 m, and its monitoring performance is re-evaluated to quantify the improvement. **Results:** At the native spatial resolution of 250 m, MERSI-II imagery achieves an average accuracy of 95.12% in lake area inversion and an average boundary fitness of 91.21% in water extraction. Owing to its high temporal resolution, MERSI-II imagery proves highly valuable for long-term and dynamic water monitoring applications. After super-resolving the imagery from 250 m to 150 m, the performances are further improved. The average accuracy for lake area inversion is increased by 2.62% to 97.74%, and the average boundary fitness is increased by 4.44% to 95.65%. **Conclusions:** The findings demonstrate that FY-3D MERSI-II imagery, with its high temporal resolution and potential for spatial enhancement, holds great value for long-term, highly dynamic lake monitoring applications.

Key words: FengYun-3D satellite; moderate resolution imager (MERSI-II); lake monitoring; water extraction; Landsat-8

青藏高原湖泊是全球气候变化的敏感指示器^[1]。青藏高原地区分布的内陆湖泊是全国湖泊的重要组成部分,其数量和面积分别约占全国湖泊总数量和总面积的 41% 和 57%^[2]。青藏高原海拔高,受到人类活动的干扰较少^[3],对青藏高原的研究与探索是理解高原生态环境天然变化机理的钥匙^[4]。青藏高原面积辽阔,气候差异大,呈现出暖湿化发展趋势,降水变化复杂^[5],加上日益剧烈的冰川消融^[6],导致高原湖泊与平原湖泊变化特点不同,高原湖泊多呈现出突发性短周期的变化^[7],对高原湖泊长时序的动态遥感监测不仅要考虑影像的空间分辨率,更要兼顾观测频次。

现有的湖泊变化监测研究多使用中高分辨率数据,如高分一号/二号、资源三号、Landsat 系列等^[8-12],以期从更加精细的空间分辨率影像中得到高精度监测结果。以最为常用的 Landsat-8 陆地成像仪数据 (operational land imager, OLI) 为例,其数据易于获取,且空间分辨率为 30 m (全色融合后为 15 m),可以呈现精细化地物边界,被广泛应用在高精度的水体监测中。但仪器扫描条带狭窄 (170 km × 180 km),无法满足大区域监测需求,同时其时间分辨率为 16 d/景,加上云量、成像条件等限制因素,可用数据甚至无法达到逐月频次^[13],不利于捕捉湖泊范围的突变,多用来监测湖泊季度间甚至年际间变化^[14]。

2000 年以来,中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)、可见光红外成像辐射仪、海洋和陆地颜色仪等中分辨率卫星传感器陆续发射,为湖泊遥感提供了空间分辨率 250~500 m 的多波段数据^[15]。MODIS 数据凭借高时间分辨率和丰富的影像波段,

在水体研究中备受关注,可提供高频充足数据用于持续观测,但 500 m 的空间分辨率在应用精度上差强人意^[16]。

风云三号 (FengYun-3, FY-3) 系列是中国第二代极轨太阳同步气象卫星,其中 FY-3D 卫星是该系列第 4 颗卫星,于 2017 年 11 月 15 日成功发射,载荷配置和性能指标均达到了国际先进水平。中分辨率成像仪 (moderate resolution imager, MERSI-II) 是搭载在 FY-3D 上的核心传感器之一,与前几代传感器相比,在光谱通道、辐射定标精度、探测能力和空间分辨率方面都有了显著的改进^[17]。MERSI-II 传感器的设计思路以及各项指标都与 MODIS 类似,可以获得 6 个空间分辨率为 250 m 的波段 (包括与水体强相关的近红外波段) 以及 19 个 1 km 分辨率的波段。同时 MERSI-II 增强了精细地物的观测表征能力,相较 MODIS 额外增加了 3 个波段数据,比 MODIS 数据有更加优越广泛的应用空间和价值^[17],但目前尚未有成果量化地分析评价该数据在高原湖泊范围变化监测应用中的能力。

在上述背景下,本文以青藏高原湖泊为研究对象,以更高分辨率的 OLI 影像监测结果以及第三方公开数据集为真值,从湖泊面积反演精度和边界提取拟合度两个方面,对 MERSI-II 在高原湖泊范围监测中的应用能力进行评价。为进一步验证 MERSI-II 影像的应用潜力,采用顾及传感器成像原理的超分辨率质量提升方法提高影像空间分辨率,对比分析了湖泊监测应用能力的改善情况,并对 MERSI-II 影像在高原湖泊范围监测应用中的能力进行了归纳总结,对数据的未来应用进行了展望。

1 研究区域

青藏高原占地面积约250万 km^2 ,平均海拔超过4 000 m,分布了约32 843个湖泊^[18-20]。本文选择青藏高原西部、西北部、中部、南部以及东南部23个湖泊以及东北角的青海湖作为实验区,如图1所示。

青海湖是世界著名的湿地自然保护区^[21],也

是中国内陆最大咸水湖,边界环境复杂具有代表性,有利于算法的验证。由图1中青海湖的放大图可见,湖东是倒淌河谷底,湖体西北角是那杂滩涂沼泽地(区域*a*);西北岸的布哈河(区域*b*)和湖东北岸的沙柳河(区域*c*)在青海湖的两角形成了湖-陆过渡地带;东侧为吹蚀堆积物沙岛湖(区域*d*),复杂的周边地物给青海湖的提取带来了困难^[22]。

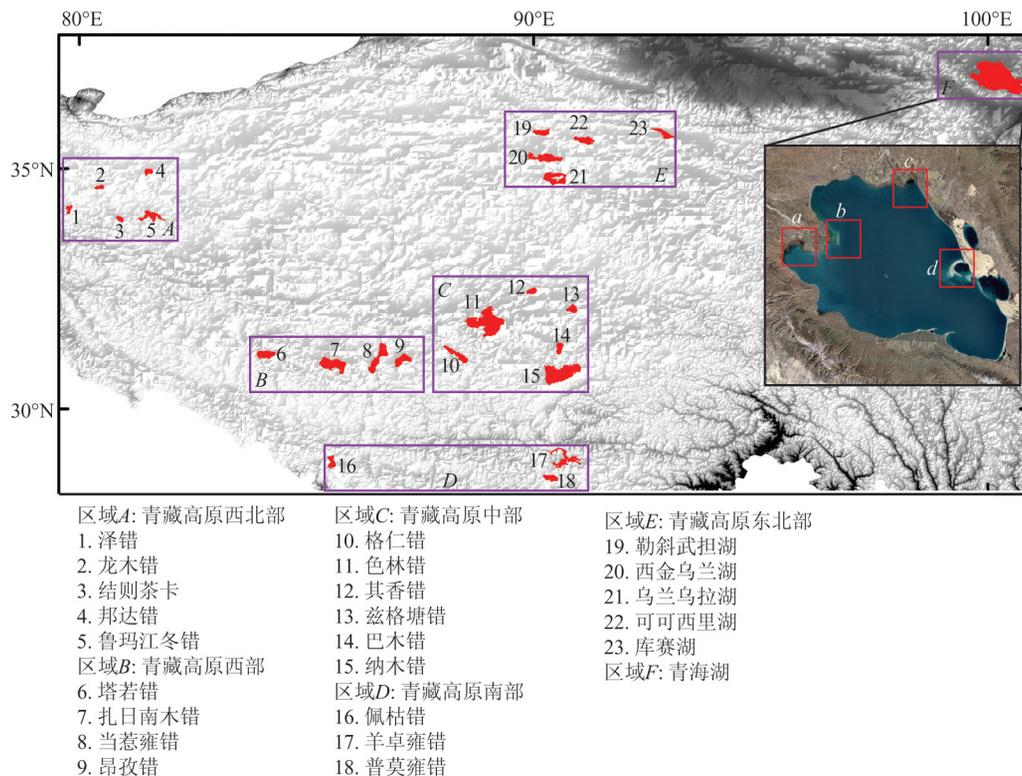


图1 青藏高原23个研究湖区和青海湖的空间分布

Fig. 1 Spatial Distribution of 23 Study Lakes and the Qinghai Lake on the Tibetan Plateau

2 数据准备

2.1 数据概况

FY-3D卫星MERSI-II数据包括蓝、绿、红、近红、热红外等共计25个波段,波段1~4、24、25的空间分辨率为250 m,波段5~23的空间分辨率为1 000 m,可以实现对全球表面的每日覆盖。2018—2021年标准的MERSI-II L1数据来源于风云卫星遥感数据服务网(<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>)。

为了进行实验对比分析和精度验证,本文使用了更高空间分辨率的Landsat-8 OLI数据以及第三方公开数据作为参考真值。OLI数据包括蓝、绿、红、近红等共计11个波段,波段1~7、9~11的空间分辨率为30 m,波段8为15 m全色影

像,卫星重访周期为16 d。本实验中,2018—2021年的Landsat-8 OLI 1级数据来源于数据官方网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。本文使用的两类传感器参数及涉及到的波段设置如表1所示。

表1 两个传感器参数及部分波段设置

传感器	波段编号	中心波长/ μm	带宽/nm	空间分辨率/m
MERSI-II	1	0.420~0.470	50	250
	2	0.500~0.600	50	250
	3	0.600~0.700	50	250
	4	0.815~0.915	50	250
OLI	2	0.450~0.515	50	30
	3	0.525~0.600	50	30
	4	0.630~0.680	50	30
	5	0.845~0.885	50	30

论文中使用的湖泊面积公开数据集《青藏高原大于 1 平方公里湖泊数据集 (V3.0) (1970s—2021)》^[20,23-24] 来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans>)。

本文 §4.2 和 §4.3 使用的实验数据以公开数据集时间标志和 OLI 影像成像时间为基准,同时顾及云量要求,选择近同期成像且云量覆盖度低于 10% 的 FY-3D MERSI-II 遥感数据,以提高用于水体提取的原始影像的质量,统一误差标准。

2.2 数据处理

为保证湖泊提取所需参数的有效性,统一多源数据误差标准,对所用遥感数据都进行了去噪、大气校正和几何精校正等操作。MERISI-II 数据整个预处理阶段的流程图如图 2 所示。

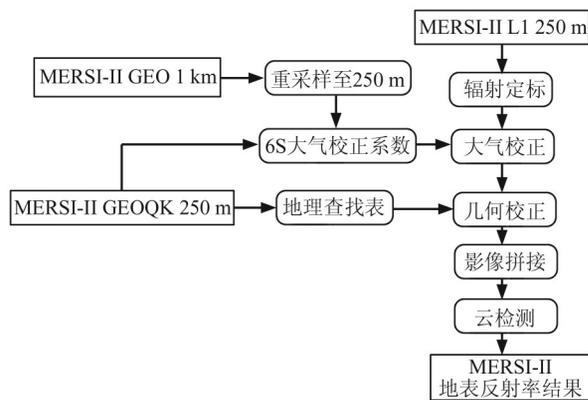


图 2 MERSI-II 数据预处理流程图

Fig. 2 Pre-processing Flowchart of MERSI-II Data

为获取真实的地表反射率,本文采用 6S 辐射传输模型^[25-26]对 MERSI-II 数据进行大气校正。首先对原始影像进行辐射定标,将其数值转换为大气层顶反射率;然后将大气层顶反射率与影像中提取的观测几何参数及来自 MODIS 产品的同期气溶胶光学厚度数据共同输入 6S 模型,通过模型计算,逐像元反演获得消除大气影响后的地表反射率。

采用地理查找表 (geographic lookup table, GLT) 方法对 MERSI-II 进行几何校正。将包含经度和纬度的几何定位文件生成一个 GLT 文件,通过查找表获取每个初始像元点实际的地理位置。GLT 采用 WGS84 经纬度坐标系,几何重投影后的影像统一为 WGS84 坐标系,分辨率为 0.002 5°。

为消除多张 MERSI-II 影像间的相对定位偏差,方便对后期的湖泊范围反演结果进行叠置分析,在预处理阶段,以 OLI 卫星影像为基准,对同时期、同区域的 MERSI-II 影像进行相对几何校正。湖泊表面平坦,周围地形起伏大,因此校正

时避免使用湖泊内部点,而选取宏观平坦的地面点,几何校正控制点不少于 50 个,保证多期 MERSI-II 影像间的相对空间定位一致性。

3 研究方法

3.1 湖泊范围反演

经过前期大量的实验统计分析,对比了典型且较为常用的传统波段阈值法、机器学习方法以及深度神经网络三大类算法,综合比较算法时间复杂度、可操作性和精度,最终选择使用自适应天津阈值辅助下的归一化差异水体指数法 (normalized difference water index, NDWI) 提取 MERSI-II 影像中的湖泊水体范围。

天津阈值法也称最大类间方差法,用来确定图像二值化分割的阈值^[27]。算法假设图像像素可根据全局阈值划分为背景和目标,基于错分率最小的思想,利用方差作为灰度值分布是否均匀的度量标准,得到使类间方差最大的分割阈值。

NDWI 的计算式为:

$$NDWI = (\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{NIR}}) / (\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{NIR}}) \quad (1)$$

式中, ρ_{green} 为绿波段的反射率,对应 MERSI-II 波段 2; ρ_{NIR} 为近红外 (near infrared, NIR) 波段的反射率,对应 MERSI-II 波段 4。进行波段运算后,利用天津阈值法自动调整最适阈值,减小由于单一的 NDWI 法对阈值依赖而导致的水体范围反演误差。

本文采用改进的 NDWI (modified NDWI, MNDWI)^[28] 提取 OLI 影像中的湖泊水体范围,用人工目视解译的方式对提取结果进行修正,消除算法选择、阈值选取对结果造成的影响,并将最终的结果作为 MERSI-II 数据能力评价的验证真值。人工目视解译修正这一操作仅存在于基准参考数据 OLI 提取结果的修正阶段,同时对算法提取的水体范围修正时,为了减弱人为主观造成的误差,本文采用多专家修正的策略,修正组 5 人中 3 人以上认可则完成修正。

3.2 超分辨率提升

MERSI-II 是 FY-3D 最主要的光学成像仪器,其采用 45° 旋转多元跨轨并扫方式,以固定的瞬时视场执行穿梭飞行轨迹的扫描,接收与轨道垂直平面内的目标辐射,通过卫星的绕地运行获取地球二维图像^[29]。MERSI-II 成像原理及 250 m 分辨率下的重叠扫描示意图如图 3 所示,其中包括可见光到长波红外等多个焦平面阵列 (focal plane arrays, FPAs)。

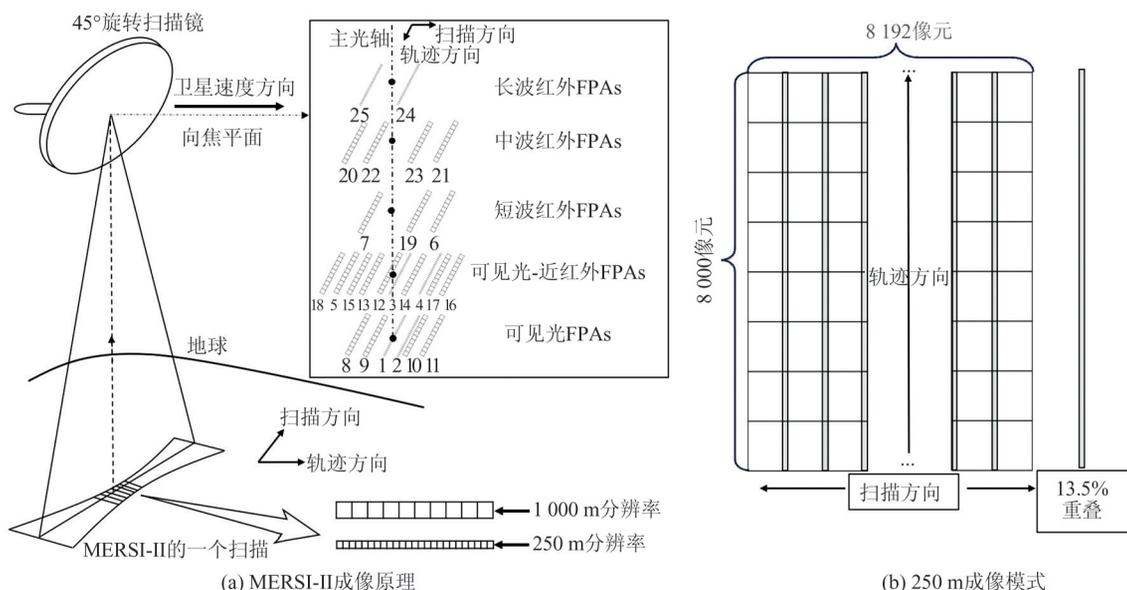


图3 MERSI-II成像原理及250 m分辨率下的重叠扫描示意图

Fig. 3 Imaging Principle of MERSI-II and Overlap Scans in 250 m Imaging Mode

图3(b)展示了MERSI-II传感器的重叠扫描模式,其中首尾像元重叠率为13.5%,其余每个像元均为27%。模式设计初衷是提高影像的信噪比,但是降低了影像的空间质量和锐度。摆扫方式导致的地理定位误差最大可达3~5个像素,传感器自身可以提供足够的信噪比和辐射校准精度^[30]。因此,本文提出顾及MERSI-II成像原理的影像超分辨率质量提升算法,在不破坏影像定量特性的前提下,实现影像空间分辨率由250 m到150 m的提升。空间分辨率提升原理如图4所示,详细算法包含以下3个步骤:

1)采用影像配准和GLT参数精化的方式,输出星下点距离掩膜,优先选取星下点或者近星下点像元,减弱多探元摆扫成像导致的地理定位偏差,提升每个扫描点的地理定位精度,使之能够落到更小的采样格网中。

2)孤立的单个扫描点定位误差具有随机性,但纵向扫描带上64个像元位置关系是固定的,传感器摆扫方向也是固定的。每一条扫描带上的扫描点存在纵向与横向的相互约束,在进行重采样时兼顾像元间的邻域关系,缩小扫描点之间相对位置关系的偏差。

3)经过上述定位精化算法处理后,由于像元变的更精细,采样后存在空格子现象,利用同一扫描条上的重叠区域冗余数据进行填充,采用经验筛选法加入更多的信息,从而丰富影像细节。扫描带间两侧的影像重叠以及同天异轨数据的重叠扫描模式带来了充足的冗余数据,现有的预

处理方式普遍舍弃掉了这些数据,本文在定位精化基础上充分保留冗余信息,丰富了落在每个采样格网中的扫描点数量。

综上,本文方法充分挖掘和利用了数据本身的冗余信息,精化了扫描点的定位精度,且没有破坏影像本身的定量特性。

3.3 精度评价指标

使用准确率 A 、边界拟合精度 S_a 、均方根误差(root mean square error, RMSE)和差均值(difference absolute mean, DAM)评价实验结果。

A 描述水域面积定量反演的准确率,计算式为:

$$A = (1 - \frac{\sqrt{(X_i - \hat{X}_i)^2}}{X_i}) \times 100\% \quad (2)$$

式中, X_i 为观测真值; \hat{X}_i 为MERSI-II反演值。

S_a 指标($0 < S_a < 1$)用来反映湖泊真实边界与MERSI-II反演边界之间的拟合度,边界重叠度越高, S_a 值就越大,计算式为:

$$S_a = \frac{I(i, g)}{C(D(i, g)D(g, i), I(i, g))} \quad (3)$$

式中, $I(i, g)$ 是MERSI-II提取结果 i 与湖泊范围OLI真值 g 的交集; $D(i, g)$ 表示 i 与 g 的差集; $D(g, i)$ 表示 g 与 i 的差集; C 表示并集操作。

RMSE用于衡量面积序列真值与MERSI-II反演值之间的偏差,DAM表示两序列差值绝对值的均值。两个指标值越小,说明真值与统计值之间差异越小。设样本数量为 n ,二者计算式分别为:

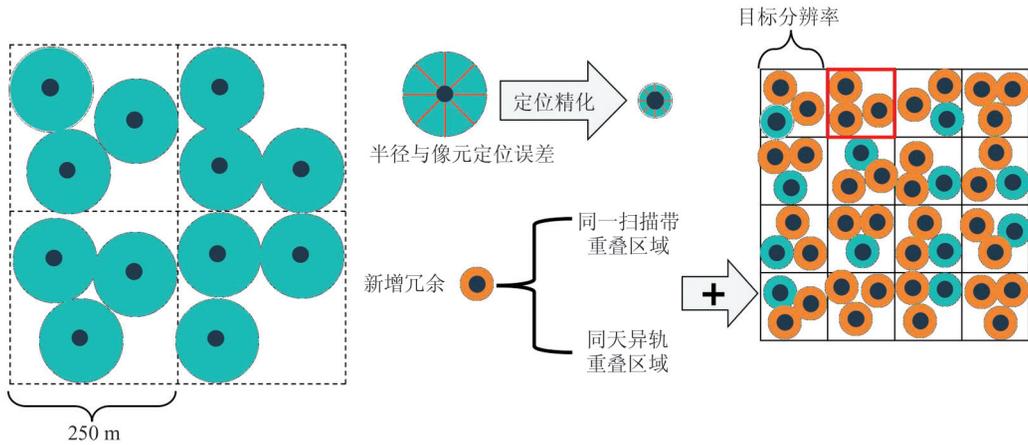


图 4 空间分辨率提升原理

Fig. 4 Principle of Spatial Resolution Enhancement

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2} \quad (4)$$

$$E_{DAM} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \hat{X}_i|}{n} \quad (5)$$

4 研究结果与分析

4.1 总体概述

以纳木错(编号15)、羊卓雍错(编号7)和

色林错(编号11)为例,图5展示了湖泊在影像上的表征,影像均采用3、4、2波段的假彩色组合形式,其中MERSI_{before}和MERSI_{after}分别表示原始MERSI-II影像和空间质量提升至150m的MERSI-II影像。由图5可以看出,MERSI_{before}相较于OLI影像在湖泊细节表达上除了呈像色调差异外,不存在湖泊的畸变,整体表征比较完整全面;MERSI_{after}表达的湖泊边界混合像元可分离度更高,边缘更加清晰,细节明显且丰富。

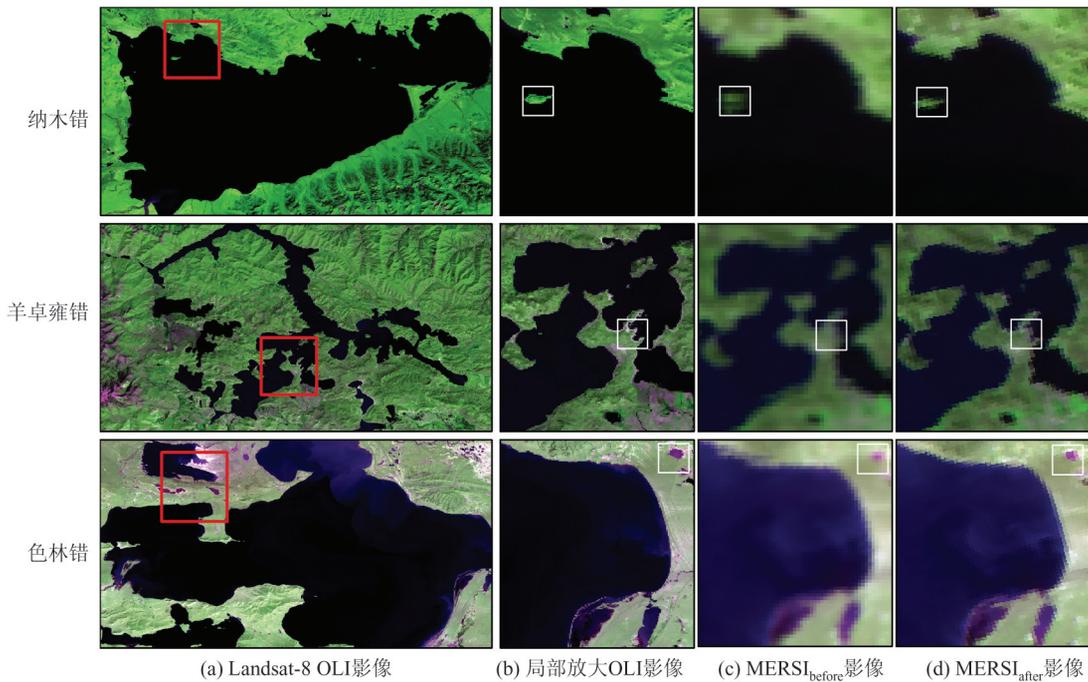


图 5 湖泊在遥感影像上的表征形式

Fig. 5 Representation of Lakes on Remote Sensing Images

针对本文涉及的MERSI-II绿波段和近红外波段,从地表反射率偏差的角度分析上述研究结果产生的原因。反射率偏差由两影像对应波段

作差得到,像元反射率经过了1000倍放大。图6显示了MERSI_{after}和MERSI_{before}在绿波段(波段2)和近红外波段(波段4)的地表反射率偏差结果。

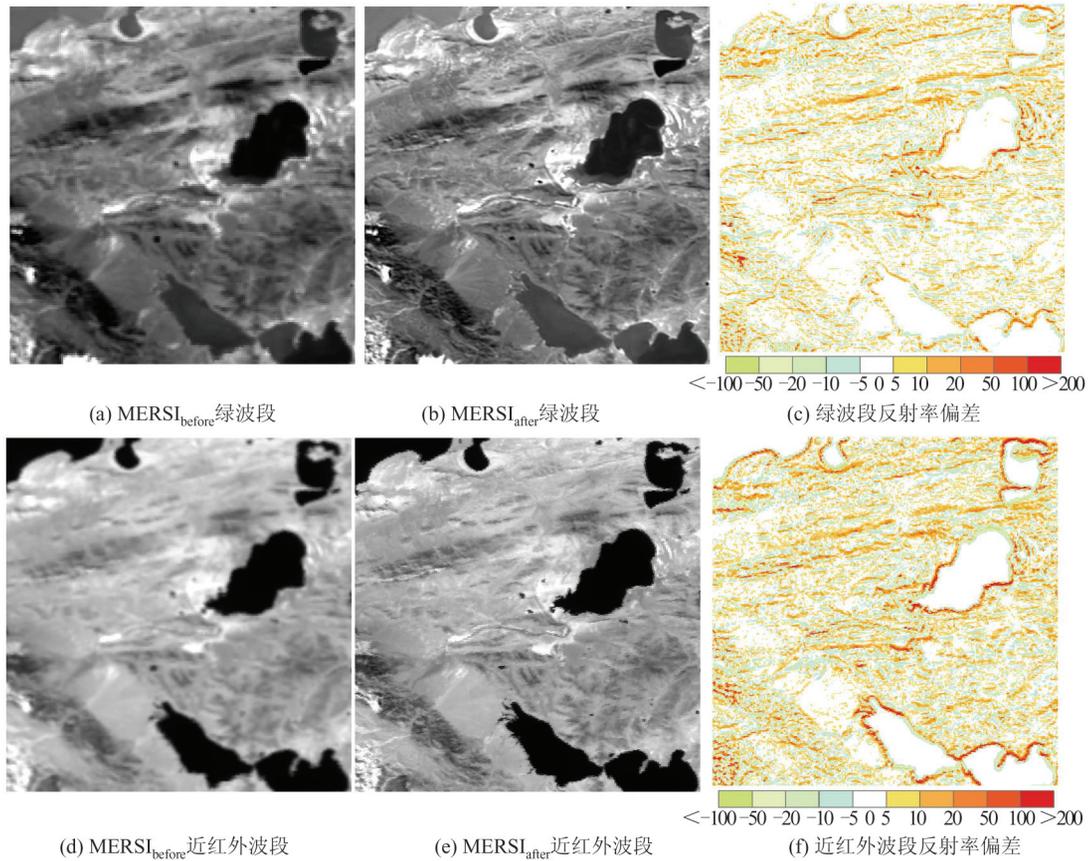


图6 MERSI_{before}和MERSI_{after}在绿波段和近红外波段的地表反射率偏差

Fig. 6 Surface Reflectance Deviation in Green Band and Near Infrared Band of MERSI_{before} and MERSI_{after}

在绿波段,反射率的增强主要在地表色调有明显过渡变化的区域,如湖岸及植被覆盖的山体边缘;上述效果在与水体强相关的近红外波段更加明显,湖泊边界反射率得到增强,水陆分界更加明显。

4.2 23个湖区定量应用分析

23个测试湖泊面积最终统计结果见表2。MERSI_{before}在23个测试湖泊上面积定量精度的平均值为95.12%,MERSI_{after}较MERSI_{before}提高了2.62%,平均精度达到97.74%。两者在羊卓雍错上的精度都达到最低,分别为82.98%和90.53%,在结则茶卡上的精度最高,达到98.97%和99.60%。

从湖泊形态角度分析,反演精度与湖泊的边界弯曲度有关。结则茶卡湖泊边缘呈椭圆形且较为规则,羊卓雍错湖泊边界不规则且极富细节,无法在低分辨率影像上呈现出完整的边缘,导致该湖泊面积反演精度未达平均线。

图7为湖泊面积定量统计结果误差棒图。误差图反映了MERSI-II与OLI在湖泊面积上的定量差异,直观地表明以OLI数据的湖泊范围结果为真值,经过MERSI-II数据反演得到的湖泊面积有较为可观的可靠性,误差在边界较为复杂

的湖泊上相对显著。通过数据高频次的特点,有望利用MERSI-II时序数据消除或降低湖泊范围提取的误差。由图7可以看出,红色误差棒明显短于黑色误差棒,表明空间质量提升算法对MERSI-II湖泊反演应用效果的改善较为显著。

图8展示了质量提升前后的MERSI-II边界拟合度统计结果。MERSI_{before}最高和最低 S_a 分别为95.85%(15号纳木错)和78.88%(17号羊卓雍错),平均 S_a 达到91.21%,MERSI_{after}较MERSI_{before}提升了4.44%,平均 S_a 达到95.65%,最高和最低 S_a 分别为98.92%(11号色林错)和88.63%(17号羊卓雍错)。凭借高频次的的数据优势,MERSI-II影像可以服务于长时序高动态的水体监测应用,且监测的效果仍有提升的空间。

根据表2中湖泊面积数据,计算MERSI_{before}湖泊反演面积RMSE和DAM分别为36.58和26.64,MERSI_{after}湖泊反演面积RMSE和DAM分别为16.24和11.19。MERSI_{after}得到的23个湖泊面积序列有着更低的RMSE和DAM,空间质量提升算法缩小了MERSI-II数据湖泊统计值与高分辨率影像监测结果之间的差距,MERSI-II数据有着很好的湖泊范围监测应用潜力。

表 2 湖泊面积计算统计表
Table 2 Statistics of Lake Area

湖名	采集日期	湖泊面积/km ²			面积定量精度/%	
		公开数据集	MERSI _{before}	MERSI _{after}	MERSI _{before}	MERSI _{after}
昂孜错	2020-10-13	486.68	468.04	477.30	96.17	98.07
巴木错	2020-10-15	247.23	238.33	243.07	96.40	98.32
邦达错	2020-09-30	160.48	164.72	163.94	97.36	97.84
当惹雍错	2020-10-04	849.80	808.73	825.77	95.17	97.17
格仁错	2020-10-13	476.76	443.55	457.96	93.03	96.06
结则茶卡	2020-09-30	118.08	116.87	118.56	98.97	99.60
可可西里湖	2020-10-06	394.09	378.58	386.23	96.07	98.01
库赛湖	2020-10-08	329.94	338.11	328.20	97.52	99.47
勒斜武担湖	2020-10-06	293.35	297.29	295.55	98.66	99.25
龙木错	2020-09-30	109.91	104.17	108.45	94.78	98.67
鲁玛江冬错	2020-09-23	411.21	429.70	423.91	95.50	96.91
纳木错	2020-10-15	2 025.64	1 955.88	1 994.24	96.56	98.45
佩枯错	2020-10-20	271.18	255.29	260.62	94.14	96.10
普莫雍措	2020-10-15	293.94	276.60	286.41	94.10	97.44
其香错	2020-10-06	188.72	178.00	186.78	94.32	98.97
色林错	2020-10-06	2 426.59	2 492.00	2 438.49	97.30	99.51
塔若错	2020-09-09	493.44	453.92	473.77	91.99	96.01
乌兰乌拉湖	2020-10-06	687.97	647.67	678.44	94.14	98.61
西金乌兰湖	2020-10-06	630.95	651.76	627.10	96.70	99.39
羊卓雍错	2020-10-15	552.36	458.37	500.07	82.98	90.53
泽错	2020-09-21	123.78	117.73	118.75	95.11	95.94
扎日南木措	2020-10-04	1 045.52	1 112.57	1 060.76	93.59	98.54
兹格塘错	2020-10-15	242.47	249.12	244.55	97.26	99.14

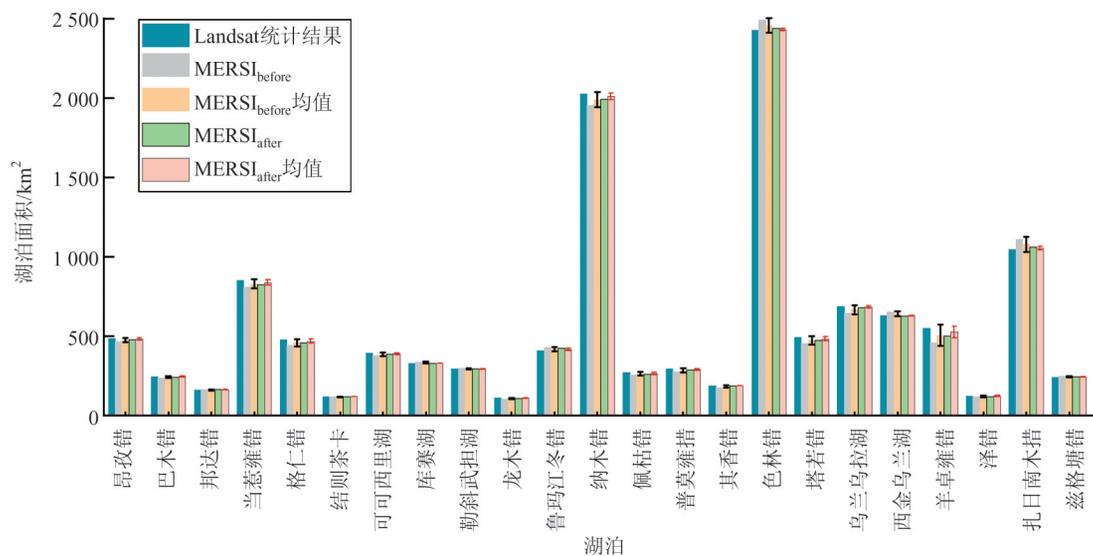


图 7 湖泊面积定量结果误差棒图
Fig. 7 Error Bar Graph of Lake Areas

4.3 青海湖定量应用分析

图 9(a)、图 9(b)分别展示了同期的 OLI 和原始 MERSI-II 数据反演的矢量化青海湖边界。在 2018—2021 年间,青海湖面积呈扩张趋势,变化集中在湖的北部和西部。北部的沙柳河河岸线

持续向北推进,与青海湖整体面积变化趋势保持同步,是湖岸线显著变化的重要区域。MERSI-II 数据监测下的青海湖在边界细节上无法达到亚像元级别精度,但整体监测结果与 OLI 保持一致。

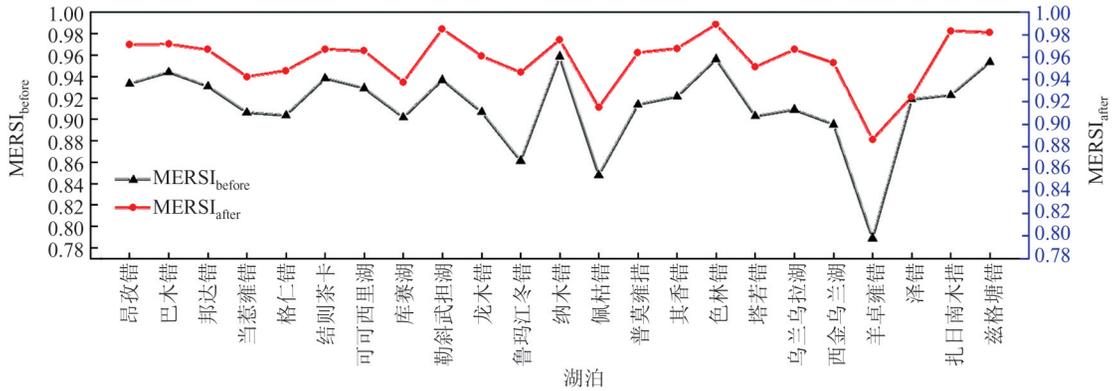


图8 23组实验湖区边界拟合度统计折线图
Fig. 8 Statistics of Boundary Fitness for 23 Lake Areas

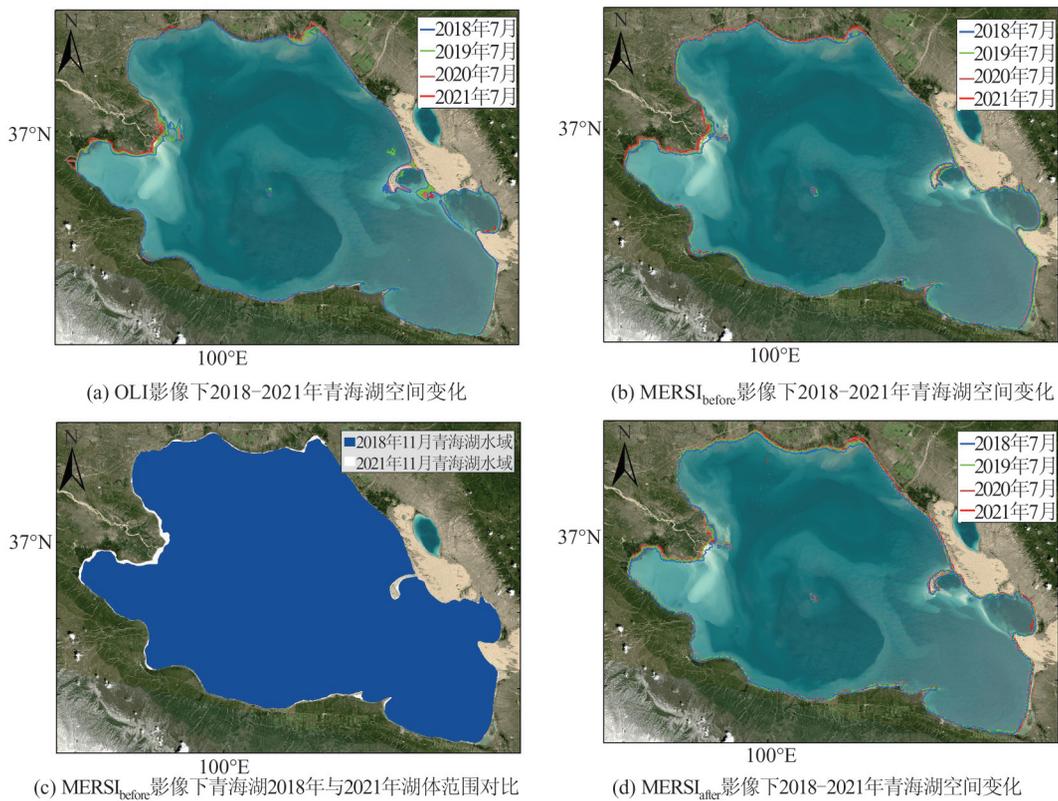


图9 青海湖应用验证结果
Fig. 9 Application Validation Results in the Qinghai Lake

图9(c)显示了青海湖2018年和2021年同期湖体范围的变化情况,3年间青海湖的范围变化主要集中在湖周边聚集区、沙岛湖以及水体堆积物区域,与图9(a)中OLI影像目视结论一致。MERSI-II结果与OLI真值误差主要集中在湖体东部区域。关于青海湖整体变化趋势的结论,与前人的研究结果^[31-32]一致。图9(d)为超分后的150 m分辨率的MERSI-II青海湖时序监测结果,优化了原始MERSI-II影像中丢失沙岛湖小块裸地细节的问题,但由于影像本身的空间质量的限制,依旧无法提取出完整的沙岛湖堆积物。

5 结 语

本文选取了23个青藏高原典型湖区,同时以青海湖时空变化为切入点,以Landsat-8 OLI结果为对比真值,评价了FY-3D卫星MERSI-II数据在高原湖泊监测中水域面积定量统计与湖泊边界定位的能力。为进一步验证MERSI-II数据的应用潜力,采用顾及传感器成像原理的超分辨率算法优化了MERSI-II数据空间质量,分析了湖泊监测应用能力的改善情况,得出以下结论:

1) 在23个实验区上,原始MERSI-II影像对

湖泊面积定量平均精度达 95.12%, 边界平均拟合度达 91.21%。MERSI-II 影像具备高原水体监测的能力, 凭借其高频次的数据库优势, 可以服务于长时序高动态的高原水体范围监测应用。

2) 顾及传感器成像原理的超分质量提升算法显著提高了 MERSI-II 应用性能, 相较于原始 250 m 分辨率的影像, 超分得到的 150 m 分辨率影像在湖泊面积定量平均精度上提升了 2.62%, 达到 97.74%, 在湖泊边界平均拟合度上提升了 4.44%, 达到 95.65%。

3) 国产风云数据有着广阔的应用空间, MERSI-II 传感器成像特性和波段设置决定了其具有空间分辨率超分潜力以及湖泊定量监测能力。未来的发展可以更多地 MERSI-II 数据长时序高频次的优势利用起来, 提升影像质量, 提高应用精度, 以期丰富卫星应用场景, 更好地服务于人类发展。

参 考 文 献

- [1] 郎芹, 牛振国, 洪孝琪, 等. 青藏高原湿地遥感监测与变化分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(2): 230-237.
LANG Qin, NIU Zhenguo, HONG Xiaohui, et al. Remote Sensing Monitoring and Change Analysis of Wetlands in the Tibetan Plateau[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(2): 230-237.
- [2] ZHANG G Q, YAO T D, CHEN W F, et al. Regional Differences of Lake Evolution Across China During 1960s—2015 and Its Natural and Anthropogenic Causes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 386-404.
- [3] 王鑫蕊, 晋锐, 林剑, 等. 有云 Landsat TM/OLI 影像结合 DEM 提取青藏高原湖泊边界的自动算法研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 882-892.
WANG Xinrui, JIN Rui, LIN Jian, et al. Automatic Algorithm for Extracting Lake Boundaries in Qinghai-Tibet Plateau Based on Cloudy Landsat TM/OLI Image and DEM[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(4): 882-892.
- [4] 张国庆, 王蒙蒙, 周陶, 等. 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 115-125.
ZHANG Guoqing, WANG Mengmeng, ZHOU Tao, et al. Progress in Remote Sensing Monitoring of Lake Area, Water Level, and Volume Changes on the Tibetan Plateau[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(1): 115-125.
- [5] ZHANG B, ZHOU W. Spatial - Temporal Characteristics of Precipitation and Its Relationship with Land Use/Cover Change on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Land*, 2021, 10(3): 269-279.
- [6] JOUBERTON A, SHAW T E, MILES E, et al. Warming-Induced Monsoon Precipitation Phase Change Intensifies Glacier Mass Loss in the South-eastern Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(37): 41-52.
- [7] CAO G Z, HOU P, ZHENG Z J, et al. New Method and Error Analysis of Lake Retrieval with MetOp-a AVHRR Images on the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(16): 3547-3567.
- [8] 黄坪坪, 金涛勇, 刘贵兵. 联合多源遥感影像监测东洞庭湖 2024 年洪涝期间面积变化[J]. 测绘地理信息, 2025, 50(6): 120-125.
HUANG Pingping, JIN Taoyong, LIU Guibing. The Area Change Monitoring of East Dongting Lake During Flood in 2024 with Multi-Source Remote Sensing Images[J]. *Journal of Geomatics*, 2025, 50(6): 120-125.
- [9] YANG N, LI J H, MO W B, et al. Water Depth Retrieval Models of East Dongting Lake, China, Using GF-1 Multi-spectral Remote Sensing Images [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01004.
- [10] ZHANG C H, LV A F, ZHU W B, et al. Using Multisource Satellite Data to Investigate Lake Area, Water Level, and Water Storage Changes of Terminal Lakes in Ungauged Regions[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3221.
- [11] ZHANG Z X, CHANG J, XU C Y, et al. The Response of Lake Area and Vegetation Cover Variations to Climate Change over the Qinghai-Tibetan Plateau During the Past 30 Years[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 443-451.
- [12] ZHANG G Q, CHEN W F, LI G, et al. Lake Water and Glacier Mass Gains in the Northwestern Tibetan Plateau Observed from Multi-Sensor Remote Sensing Data: Implication of an Enhanced Hydrological Cycle[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111554.
- [13] YAO F F, WANG J D, WANG C, et al. Constructing Long-Term High-Frequency Time Series of Global Lake and Reservoir Areas Using Landsat Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111210.
- [14] ZHANG J, HU Q W, LI Y K, et al. Area, Lake-

- Level and Volume Variations of Typical Lakes on the Tibetan Plateau and Their Response to Climate Change, 1972—2019[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2021, 24(3): 458-473.
- [15] 段洪涛, 曹志刚, 沈明, 等. 湖泊遥感研究进展与展望[J]. *遥感学报*, 2022, 26(1): 3-18.
DUAN Hongtao, CAO Zhigang, SHEN Ming, et al. Review of Lake Remote Sensing Research[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(1): 3-18.
- [16] TAO S L, FANG J Y, ZHAO X, et al. Rapid Loss of Lakes on the Mongolian Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(7): 2281-2286.
- [17] JIN S K, ZHANG M, MA Y Y, et al. Adapting the Dark Target Algorithm to Advanced MERSI Sensor on the FengYun-3D Satellite: Retrieval and Validation of Aerosol Optical Depth over Land[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(10): 8781-8797.
- [18] ZHANG G Q, YAO T D, XIE H J, et al. Response of Tibetan Plateau Lakes to Climate Change: Trends, Patterns, and Mechanisms [J]. *Earth Science Reviews*, 2020, 208: 103269.
- [19] ZHANG G Q, XIE H J, KANG S C, et al. Monitoring Lake Level Changes on the Tibetan Plateau Using ICESat Altimetry Data (2003—2009) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(7): 1733-1742.
- [20] ZHANG G Q, LUO W, CHEN W F, et al. A Robust but Variable Lake Expansion on the Tibetan Plateau[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(18): 1306-1309.
- [21] TANG L Y, DUAN X F, KONG F J, et al. Influences of Climate Change on Area Variation of Qinghai Lake on Qinghai-Tibetan Plateau Since 1980s[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 7331.
- [22] LIAN X H, QI Y, WANG H W, et al. Assessing Changes of Water Yield in Qinghai Lake Watershed of China[J]. *Water*, 2020, 12(1): 11.
- [23] 张国庆. 青藏高原大于1平方公里湖泊数据集(v3.1)(1970s—2022). 国家青藏高原科学数据中心 [EB/OL]. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.07.018>, 2019.
- [24] ZHANG G Q, YAO T D, XIE H J, et al. Lakes' State and Abundance Across the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(24): 3010-3021.
- [25] KOTCHENOVA S Y, VERMOTE E F, MATARRESE R, et al. Validation of a Vector Version of the 6S Radiative Transfer Code for Atmospheric Correction of Satellite Data Part I: Path Radiance[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(26): 6762.
- [26] KOTCHENOVA S Y, VERMOTE E F. Validation of a Vector Version of the 6S Radiative Transfer Code for Atmospheric Correction of Satellite Data Part II Homogeneous Lambertian and Anisotropic Surfaces[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(20): 4455.
- [27] 王艳丽, 董志鹏, 王密. 基于双路卷积神经网络的高分辨率遥感影像苔藓检测方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(12): 2261-2270.
WANG Yanli, DONG Zhipeng, WANG Mi. Ulva Polifera Detection from High Resolution Remote Sensing Images Based on Dual-Path Convolutional Neural Networks [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(12): 2261-2270.
- [28] 虞欣, 王鑫, 郑肇葆, 等. 融合尺度注意力机制的高分辨率遥感影像水体提取网络[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2025, 50(7): 1328-1338.
YU Xin, WANG Xin, ZHENG Zhaobao, et al. Water Extraction of High Spatial Resolution Remote Sensing Image Fusing Scale Attention Mechanism [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(7): 1328-1338.
- [29] 黄旭星, 杨勇, 余宇琛, 等. FY-3D中分辨率成像仪图像地理定位误差来源分析[J]. *中国空间科学技术*, 2022, 42(4): 8-18.
HUANG Xuxing, YANG Yong, SHE Yuchen, et al. Analysis on Geolocation Error of FY-3D MERSI Imaging[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(4): 8-18.
- [30] 闵敏, 白玉, 胡秀清, 等. FY-3B/C中分辨率光谱成像仪在轨初期传递函数的评价和比较[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1838-1844.
MIN Min, BAI Yu, HU Xiuqing, et al. Evaluation and Comparison of Modulation Transfer Function for FY-3B/C MERSI on Early Orbit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1838-1844.
- [31] 郭丰杰, 李婷, 季民. 2000—2019年青海湖面积时序特征分析及预测[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(2): 740-748.
GUO Fengjie, LI Ting, JI Min. Time Series Analysis and Prediction of Qinghai Lake Area from 2000 to 2019 [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(2): 740-748.
- [32] 祁苗苗, 姚晓军, 刘时银, 等. 1973—2018年青海湖岸线动态变化[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(2): 573-586.
QI Miaomiao, YAO Xiaojun, LIU Shiyin, et al. Dynamic Change of Lake Qinghai Shoreline from 1973 to 2018 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(2): 573-586.