



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 基于风云三号 D 星 MERSI-II 影像的高原湖泊范围监测能力分析  
作者: 苗顺霞, 孙开敏, 胡秀清, 瞿建华, 刘俊怡  
DOI: 10.13203/j.whugis20220653  
收稿日期: 2023-06-04  
网络首发日期: 2023-06-29  
引用格式: 苗顺霞, 孙开敏, 胡秀清, 瞿建华, 刘俊怡. 基于风云三号 D 星 MERSI-II 影像的高原湖泊范围监测能力分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220653>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220653

## 引用格式：

苗顺霞, 孙开敏, 胡秀清, 等. 基于风云三号D星MERSI-II影像的高原湖泊范围监测能力分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220653 (MIAO Shunxia, SUN Kaimin, HU Xiuqing, et al. Capability Analysis of Lake Extent Monitoring in Highland Region from MERSI-II onboard FY-3D[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220653)

# 基于风云三号 D 星 MERSI-II 影像的高原湖泊范围 监测能力分析

苗顺霞<sup>1</sup> 孙开敏<sup>1</sup> 胡秀清<sup>2</sup> 瞿建华<sup>3</sup> 刘俊怡<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430079

<sup>2</sup> 中国气象局国家卫星气象中心, 北京, 100081

<sup>3</sup> 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, 持续湖泊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, 因此用于高原湖泊动态监测的数据对时间分辨率有很高要求。国产风云三号 D 星 (FY-3D) 中分辨率成像仪 (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。本文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 (OLI) 监测结果为对比真值, 分析了 FY-3D MERSI-II 数据在高原湖泊监测中的应用能力。研究发现, 原始 250 m 的 MERSI-II 数据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%, 再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, 本文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 数据由 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%。本文研究表明, 空间超分辨率潜力和高时间分辨率特性会使 FY-3D MERSI-II 数据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

## Capability Analysis of Lake Extent Monitoring in Highland Region from MERSI-II onboard FY-3D

MIAO Shunxia<sup>1</sup>, SUN Kaimin<sup>1</sup>, HU Xiuqing<sup>2</sup>, QU Jianhua<sup>3</sup>, LIU Junyi<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup> Beijing Huayun Shinetek Company, Beijing 100081, China

**Abstract: Objectives:** Lakes on the Tibetan Plateau are sensitive indicators of global climate change, and relevant studies on lakes are important for exploring the natural evolution of lakes and their interactions with climate. Since climate change, precipitation, glacial melt, and evaporation on the highland areas can easily cause abrupt changes in lake extent, both temporal and spatial resolution are frequently needed in the images used for dynamic monitoring

项目资助：国家重点研发计划项目 (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

通讯作者：孙开敏, 博士, 教授。sunkm@whu.edu.cn

of highland lakes. The Moderate Resolution Imager (MERSI-II) aboard domestic FengYun(FY) satellite provides extensive coverage every day, it has not yet been verified whether its 250 m image can be used for highland lake monitorin. **Methods:** By using the monitoring data from contemporaneous third-party datasets and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) as the true value in the lakes on the Tibetan Plateau, this paper analyzed the applicability of FY-3D MERSI-II data for plateau lake monitoring. **Results:** It was found that the average accuracy of MERSI-II images for lake area quantification accuracy reaches 95.12%, and the average lake boundary fitness reaches 91.21%. With the advantage of high-frequency monitoring, long time series of highly dynamic water monitoring applications can benefit from MERSI-II images. To further confirm the application potential of MERSI-II data, the effects of improved spatial quality on increases in lake-wide monitoring capacity were analyzed. Compared to the initial results, the application performance of optimized MERSI-II data had significantly improved with an average lake area quantification accuracy of 2.62% and an average lake boundary fitness of 4.53%. For its spatial resolution hyper-segmentation potential and quantitative lake monitoring capability, FY-3D has good potential for high-frequency lake monitoring applications.

**Keywords:** FengYun-3D Satellite; MERSI-II Sensor; 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<sup>[1]</sup>。青藏高原地区分布的内陆湖泊, 约占全国湖泊总数量和总面积的 41%和 57%<sup>[2]</sup>, 是全国湖泊的重要组成部分, 其受到人类活动的干扰较少<sup>[3]</sup>, 是理解高原生态环境变化机理的钥匙<sup>[4]</sup>。

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<sup>[5]</sup>, 加上日益剧烈的冰川消融<sup>[6]</sup>, 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<sup>[7]</sup>, 这就要求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。

现有的高原湖泊变化研究, 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<sup>[8-12]</sup>, 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, 以下简称为 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), 可以呈现比较精细化地物边界, 被广泛应用在较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 天/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<sup>[13]</sup>, 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<sup>[14]</sup>。

自 2000 年以来, MODIS、VIIRS 和 OLCI 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<sup>[15]</sup>。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 的粗空间分辨率为人所诟病<sup>[16]</sup>。

FY-3 系列是我国第二代极轨太阳同步气象卫星, 其中 FY-3D 卫星是该系列第四颗卫星, 于 2017 年 11 月 15 日成功发射, 其载荷配置和性能指标均达到了国际先进水平。MERSI-II 是搭载在 FY-3D 上的核心传感器之一 (以下简称 MERSI-II), 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<sup>[17]</sup>。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 的波段。同时 MERSI-II 增强了精细地物的观测表征能力, 相较 MODIS 额外增加了三个波段数据, 比 MODIS 数据有更加优越广泛的应用空间和价值<sup>[17]</sup>。但目前尚未见到有成果量化地分析评价 FY-3D MERSI-II 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数据在高原湖泊范围监测中的应用能力进行评价。同时为进一步验证FY-3D 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质量提升方法提高MERSI-II数据空间分辨率,对比分析其湖泊监测应用能力的改善情况。最后对MERSI-II数据在高原湖泊范围监测应用中的能力进行了归纳总结,并对数据的未来应用进行展望。

## 1 研究区域

青藏高原占地面积约 250 万 km<sup>2</sup>, 平均海拔超过 4000 m, 其上分布有 32843 个湖泊<sup>[18-20]</sup>。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(图 1)作为实验区。

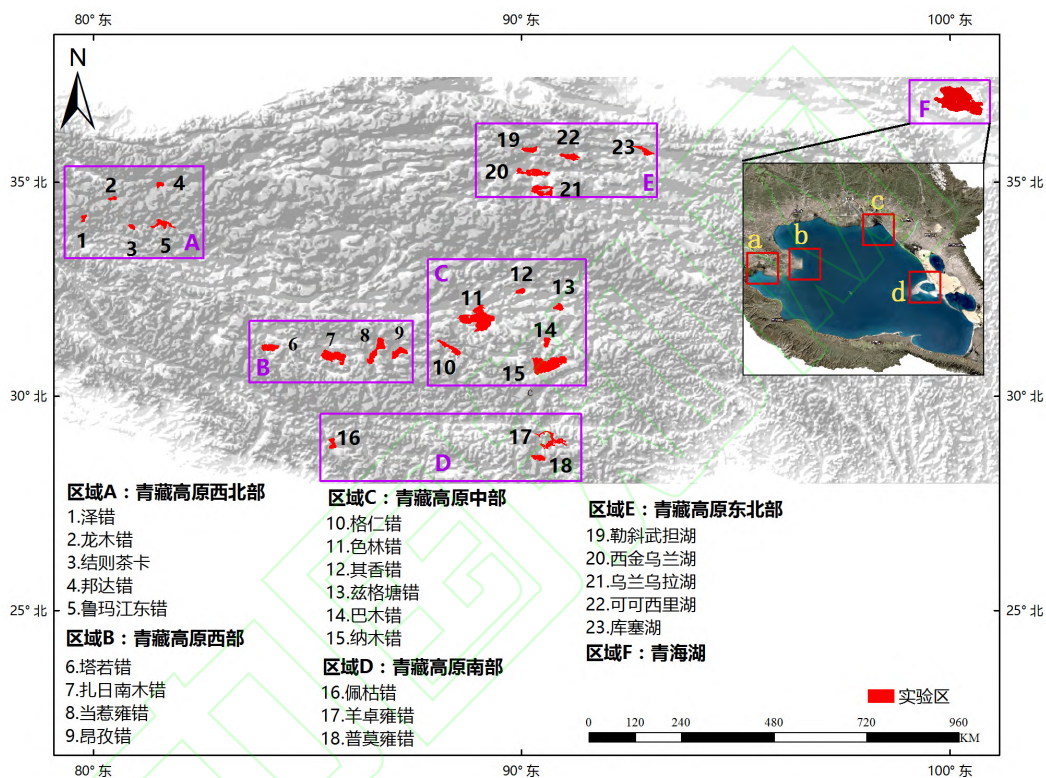


图 1 青藏高原 23 个研究湖区以及青海湖应用区空间分布概况

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

青海湖是世界著名的湿地自然保护区<sup>[21]</sup>, 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。湖东是倒淌河谷底, 湖体西北角是那杂滩涂沼泽地(图 1 a); 西北岸的布哈河(图 1 b)和湖

东北岸的沙柳河(图 1 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(图 1 d), 复杂的周边地物给青海湖的提取带来了困难<sup>[22]</sup>。

## 2 数据准备

### 2.1 数据概况

FY-3D 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 空间分辨率为 250 m, 波段 5-23 空间分辨率为 1000 m, 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 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 天。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/>。

本文中所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 两传感器参数及部分波段设置

Tab. 1 Sensor Parameters and Band Settings of Two Sensors

传感器	波段设置			
	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)》<sup>[21,23-24]</sup> 来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans>)。

本文中，4.2 节和 4.3 节所使用的实验数据，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，选择影像采集时间最接近基准数据 (同期)，且云量覆盖度低于 10% 的 FY-3D MERSI-II 遥感数据，以提高用作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。MERSI-II 数据整个预处理阶段的流程图如图 2 所示。

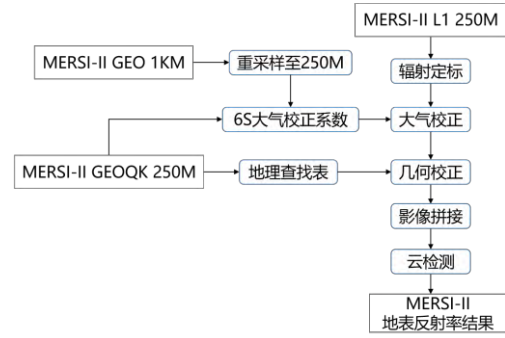


图 2 MERSI-II 数据预处理流程图

Fig.2 Pre-processing Flow about MERSI-II

本研究采用最新的 6S 模型 (6SV2.1) <sup>[25-26]</sup> 对 MERSI-II 数据进行严格大气校正，将地面理想化为朗伯体，模拟传感器接收到的大气表观反射率。采用 6S 模型获取大气表观反射率，将其转化为地表反射率的一系列参数，逐像元计算每幅影像的地表反射率。

采用地理查找表 (Geographic Lookup Table, GLT) 方法，对 MERSI-II 进行几何校正。将几何定位文件 (含经度和纬度) 生成一个 GLT 文件，通过查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 0.005°。

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、时间准同步的 MERSI-II 做相对几何校正。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

本文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大津阈值<sup>[27]</sup>辅助下的归一化水体指数法（Normalized Difference Water Index, NDWI）<sup>[28]</sup>提取 MERSI-II 影像中的湖泊水体范围。

大津阈值法也叫最大类间方差法，用来确定图像二值化分割的阈值<sup>[27]</sup>。该算法假设图像像素可以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 定义如式(1)，进行波段运算后，利用大津阈值法，自动的调整最适阈值，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。

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

式中： $\rho_{green}$  为绿波段的反射率，对应 MERSI-II 波段 2； $\rho_{nir}$  为近红外波段的反射率，对应 MERSI-II 波段 4。

本文采用改进的归一化差异水体指数法 (Modified NDWI, MNDWI)<sup>[29-30]</sup>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，同时在该阶段，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，我们采用“多专家修正”的策略，修正组五人 3 人以上认可则完成修正。

### 3.2 超分质量提升

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<sup>[31]</sup>（图 3）。

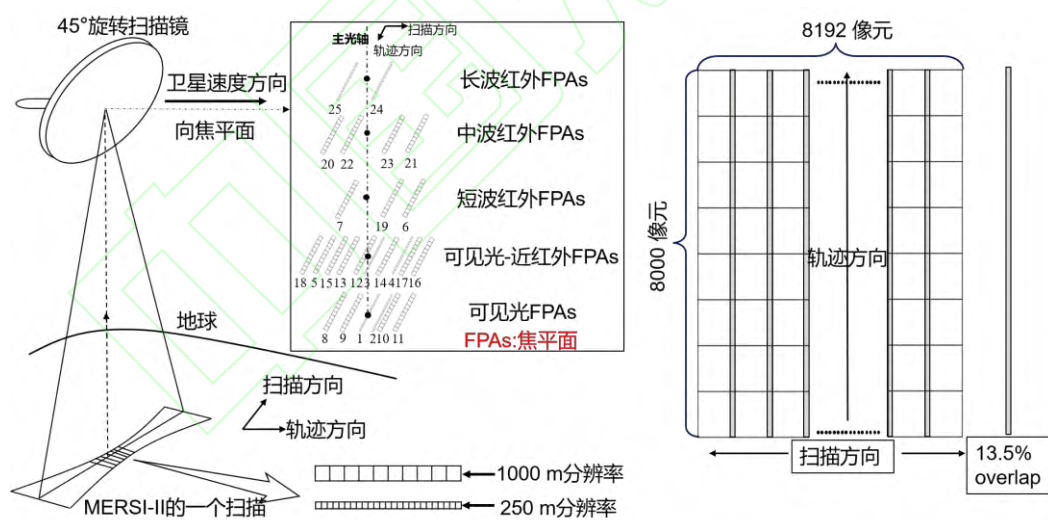


图 3 MERSI-II 成像原理及 250 m 成像模式下的重叠扫描示意图

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

MERSI-II 传感器对每个像素的 13.5% 重叠扫描模式（图 3）导致影像空间质量或锐度的降低，重叠的影像为数据处理提供了充足的冗余<sup>[32]</sup>（图 4）。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<sup>[32]</sup>。

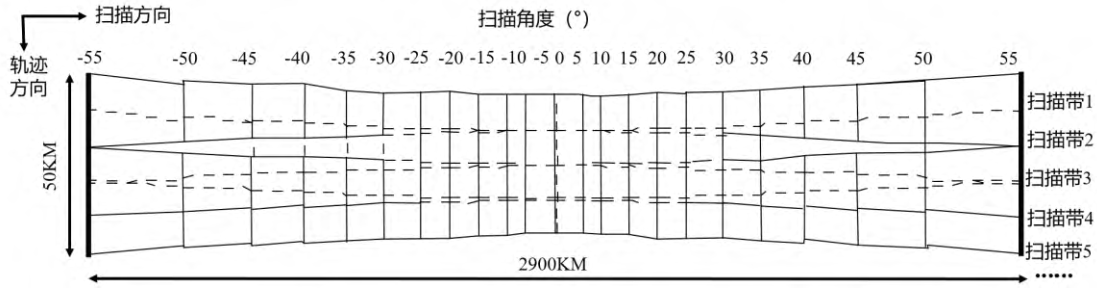


图 4 MERSI-II 的扫描模式示意图

Fig.4 Scanning Mode of MERSI-II

因此本研究提出顾及 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。算法的详细原理如图 5 所示。超分处理的详细算法包含以下三个步骤：

(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，减弱摆扫并扫的方式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子中（图 5）。

(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，摆扫方向也是固定的，每一条扫描带上的扫描点存在纵向横向上的相互

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，对同一扫描条上的重叠区域冗余数据进行利用，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，以提高落在每个小采样格子中的扫描点数量。

本文方法主要是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，没有破坏影像本身的定量特性。

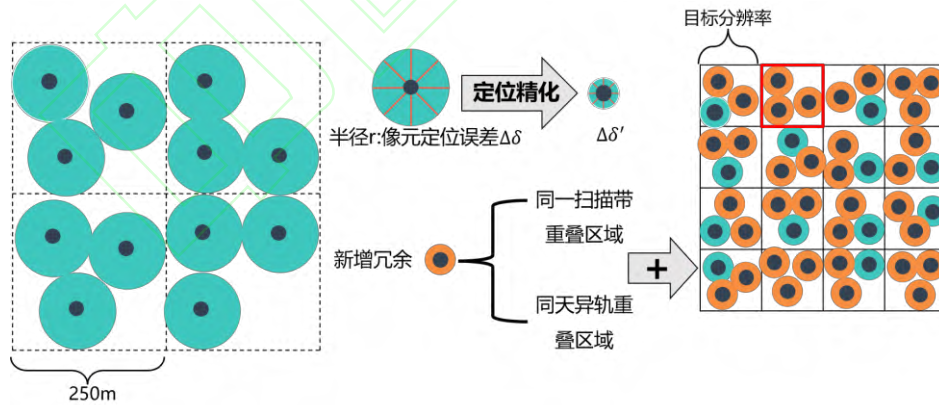


图 5 空间分辨率提升原理

Fig. 5 Principle of Spatial Resolution Enhancement

### 3.3 精度评价指标

使用准确率  $Acc_s$ 、边界拟合精度  $S_a$ 、均方根差 RMSE (Root Mean Square Error)

和差均值 DAM (Difference Absolute Mean) 评价实验结果。

$Acc_s$  描述水域面积定量反演的准确率，定义如下：

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

上述式中,  $n$  为样本数量,  $X_i$  为观测真值,  $\hat{X}_i$  为 MERSI-II 反演值。

本文提出了  $S_a$  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,  $S_a$  定义如式 (3) 所示。

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

式中  $I(i, g)$  是 MERSI-II 提取结果 ( $i$ ) 与湖泊范围真值 OLI ( $g$ ) 的交集;  $D(i, g)$  表示  $i$  与  $g$  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。定义如公式 (4)、(5) 所示:

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

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

## 4 研究结果与分析

### 4.1 总体概述

总体来说, 湖泊在影像上的表征如图 6 所示, 影像均采用采取 3、4、2 的波段组合形式。图 6 中 2、3、4 列分别为 OLI 影像、原始 MERSI-II 影像 (MERSI<sub>before</sub>), 以及空间质量提升至 150 m 的 MERSI-II (MERSI<sub>after</sub>) 影像。以纳木错 (编号 15)、羊卓雍错 (编号 7) 和色林错 (编号 11) 为例, 可以看出, MERSI<sub>before</sub> 相较于 OLI 数据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<sub>after</sub> 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。

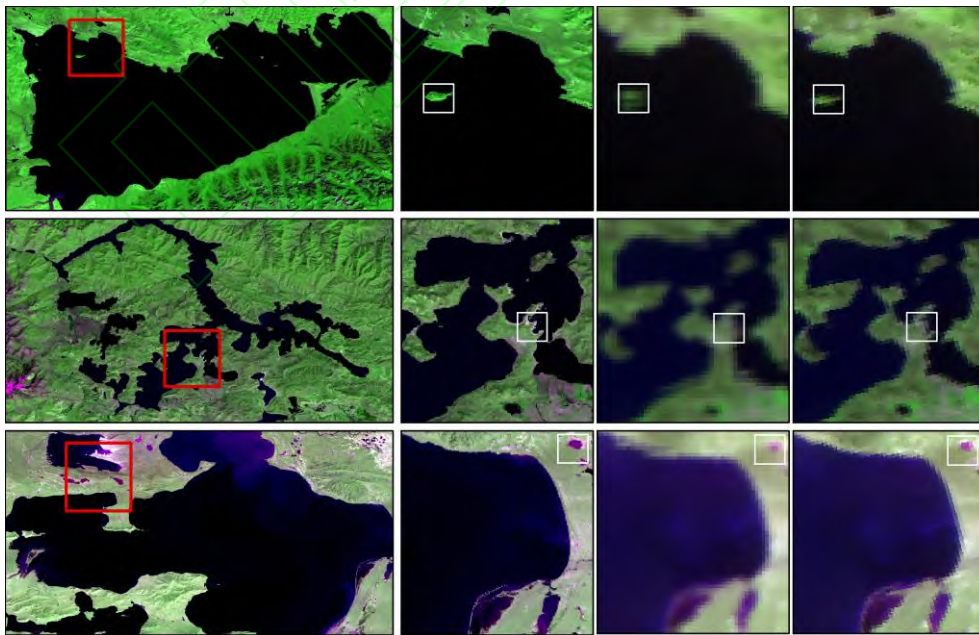


图 6 湖泊在遥感影像上的表征形式 (2、3、4 列分别为 OLI 影像、MERSI<sub>before</sub> 影像和 MERSI<sub>after</sub> 影像)

Fig.6 Representation of Lakes on Remote Sensing Images

针对本研究涉及的 MERSI-II 绿波段和 近红外波段, 从地表反射率偏差的角度, 对



上述研究结果产生的原因分析如下。反射率偏差由两影像对应波段作差得到，像元反射率大小经过了 1000 倍放大。图 7 显示了 MERSI<sub>after</sub> 和 MERSI<sub>before</sub> 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。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，如湖岸及有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。

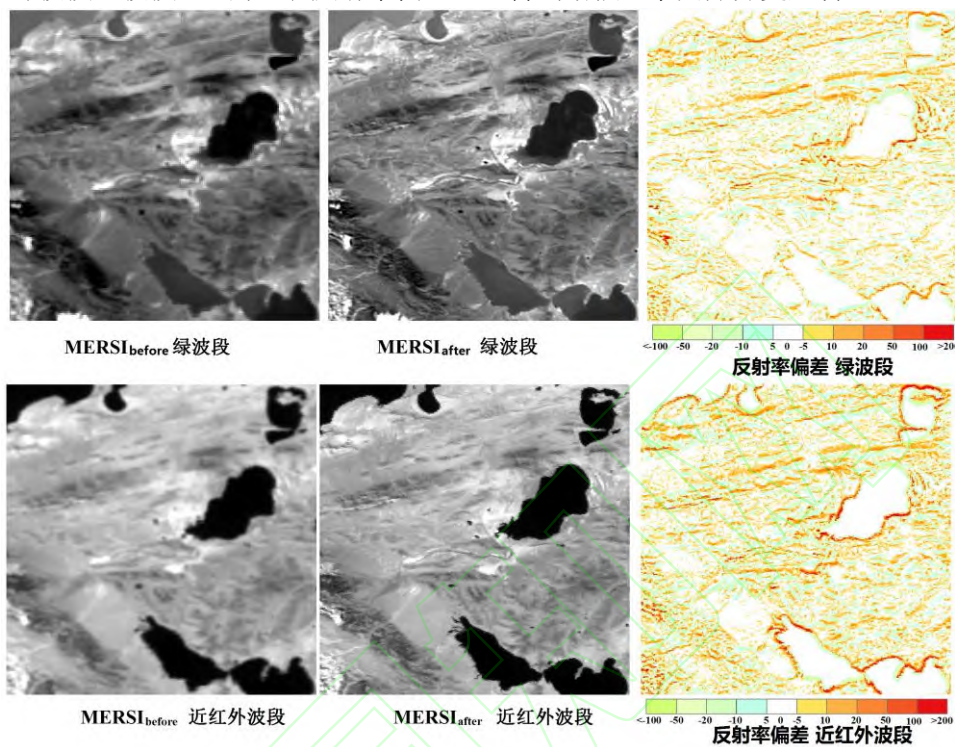


图 7 MERSI<sub>before</sub> 和 MERSI<sub>after</sub> 绿波段、近红外波段地表反射率偏差图

Fig.7 Surface Reflectance Deviation in Green Band and Near Infrared Band Between MERSI<sub>before</sub> and MERSI<sub>after</sub>

#### 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如表 2。MERSI<sub>before</sub> 在 23 个测试湖泊上，面积定量精度  $Acc_s$  平均值为 95.12%，MERSI<sub>after</sub> 较

MERSI<sub>before</sub> 提高了 2.62%，平均精度达到 97.74%。两者在 17 号湖泊羊卓雍错上的精度都达到最低，分别为 82.98% 和 90.53%，在 3 号湖泊结则茶卡上精度最高，达到 98.97% 和 99.60%。

表 2 湖泊面积计算统计表

Tab.2 Statistical Table of Lake Area

湖名	采集日期	公开数据集 (km <sup>2</sup> )	MERSI <sub>before</sub> (km <sup>2</sup> )	MERSI <sub>after</sub> (km <sup>2</sup> )	$Acc_s$ MERSI <sub>before</sub>	$Acc_s$ MERSI <sub>after</sub>
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	328.2	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	2025.64	1955.88	1994.24	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	2426.59	2492.00	2438.49	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	1045.52	1112.57	1060.76	93.59%	98.54%
兹各塘错	2020/10/15	242.47	249.12	244.55	97.26%	99.14%

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较为规则，羊卓雍错湖边界不规则且极富细节，无法在低分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。

面积定量结果的误差棒型误差图反映了 MERSI-II 在湖泊面积定量上与 OLI 的差异。如图 8，误差图直观地表明以 OLI 数据下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。同时可以看出，空间质量提升算法对 MERSI-II 数据湖泊反演应用效果有较为显著的改善（红色误差棒明显短于黑色误差棒）。

湖泊面积 (KM<sup>2</sup>)

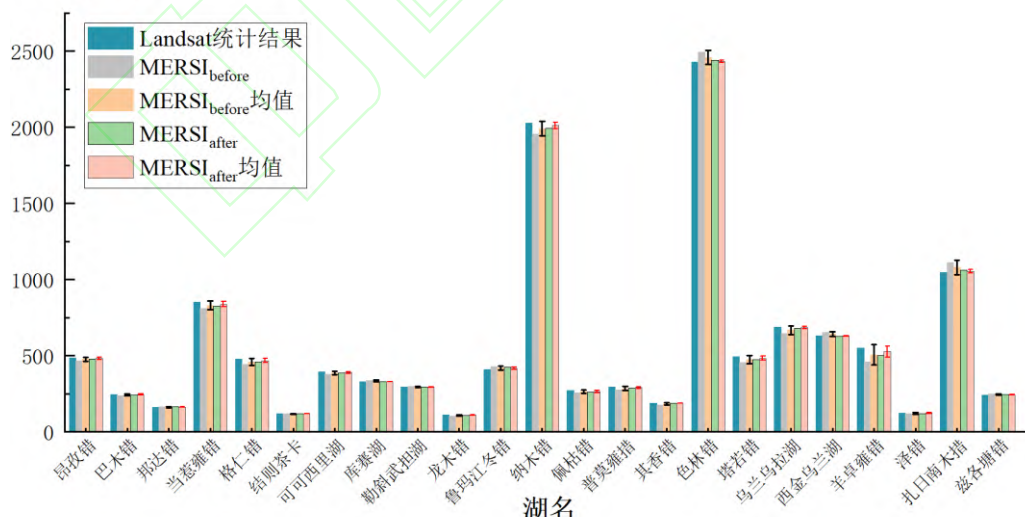


图 8 湖泊面积定量结果误差棒型误差图

Fig.8 Error Bar Graph for Lake Area

质量提升前后的 MERSI-II 边界拟合度 分别为 95.85% (15 号纳木错) 和 78.88% (17 统计如图 9 所示。MERSI<sub>before</sub> 最高和最低  $S_a$  号羊卓雍错)，平均  $S_a$  达到 91.21%，

MERSI<sub>after</sub> 较 MERSI<sub>before</sub> 提升了 4.44 个百分点, 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)。凭借高频次的数据库优势, 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。

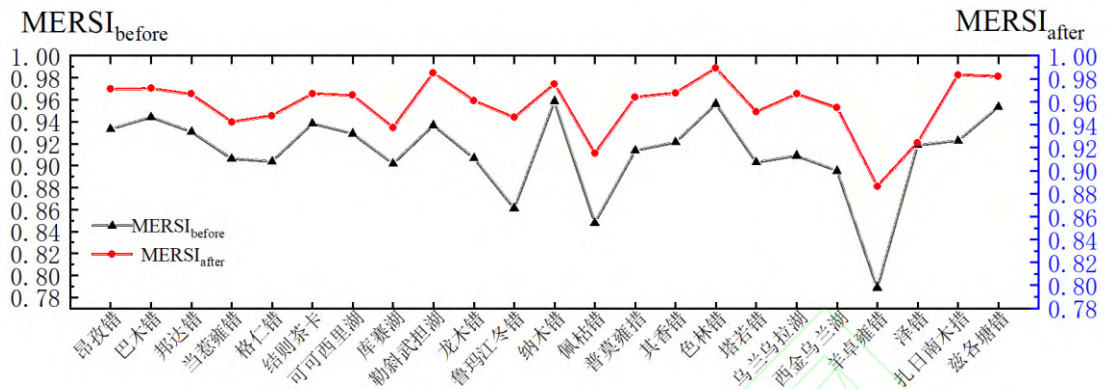


图 9 23 组实验湖区边界拟合度统计折线图

Fig.9 Folding Line Graph of Boundary Fitness Statistics for 23 Lakes

表 2 中湖泊面积统计序列的均方根差 RMSE 和差均值 DAM 计算结果如表 3 所示。从序列数学统计角度来说, MERSI<sub>after</sub> 得到的 23 个湖泊的面积序列有着更低的 RMSE (16.24) 和 DAM (11.19), 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 3 湖泊反演结果均方根差和差均值

Tab.3 Statistics of RMSE and DAM

影像	RMSE	DAM
MERSI <sub>before</sub>	36.58	26.64
MERSI <sub>after</sub>	16.24	11.19

### 4.3 青海湖定量应用分析

时间准同步的 OLI、原始 MERSI-II 数据反演的矢量化青海湖边界如图 10 (a)、图 10 (b) 所示。四年间青海湖面积呈扩张趋势, 变化集中在湖北部和西部。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。

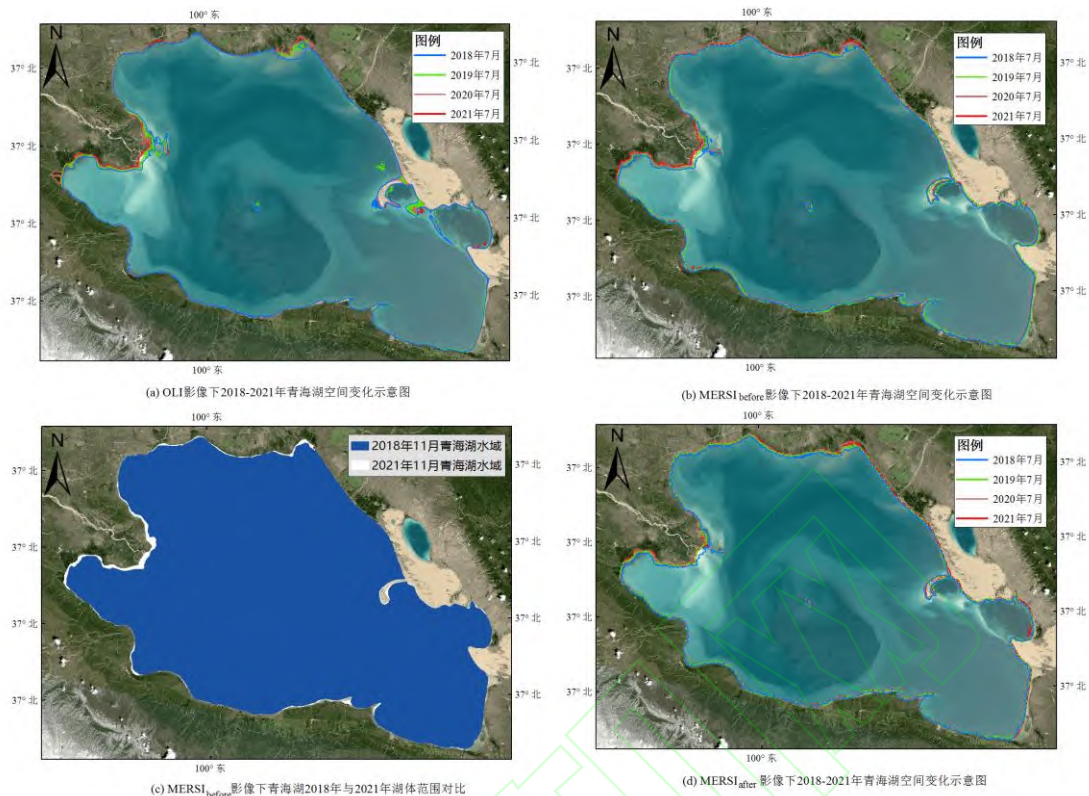


图 10 青海湖应用验证结果图（底图为 OLI 影像）

Fig.10 Map of application validation results for Qinghai Lake

青海湖三年间范围变化如图 10（c），主要变化集中在湖周边聚集区，沙湖岛以及水体堆积物区域，与图 10（a）中，OLI 影像目视下得到的结论一致。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<sup>[33-34]</sup>一致。

图 10（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 影像中丢失沙湖岛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湖岛堆积物。

## 5 结语

本文选取了 23 个青藏高原典型湖区，涉及东西南北中五个区域，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 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，本文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。本文得出以下结论：

（1）在 23 个实验区上，原始 MERSI-II 数据对湖泊面积定量平均精度达 95.12%，边界平均拟合度达 91.22%。FY-3D MERSI-II 具备高原水体监测的能力，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，超分得到的 150 m 分辨率的 MERSI-II 数据，相较于原始 250 m 的影像，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 4.53%，达到 95.74%；

（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将

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] LANG Qin, NIU Zhenguo, HONG Xiaoqi, YANG Xinying. 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(郎芹, 牛振国, 洪孝琪, 杨鑫莹. 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)
- [2] Zhang G, Yao T, Chen W, 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] Xinrui Wang, Rui Jin, Jian Lin, Xiangfei Zeng, Zebin Zhao. Automatic Algorithm for Extracting Lake Boundaries in Qinghai-Tibet Plateau based on Cloudy Landsat TM/OLI Image and DEM. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(4): 882-892(王鑫蕊, 晋锐, 林剑, 曾祥飞, 赵泽斌. 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)
- [4] Zhang G Q, Wang M M, Zhou T and Chen W F. 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(张国庆, 王蒙蒙, 周陶, 陈文锋.2022. 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, 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
- [6] Jouberton Achille, Shaw Thomas E, Miles Evan, McCarthy Michael, Fugger Stefan, Ren Shaoting, Dehecq Amaury, Yang Wei, Pellicciotti Francesca. Warming-induced monsoon precipitation phase change intensifies glacier mass loss in the southeastern Tibetan Plateau.[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(37)
- [7] Cao G, Hou P, Zheng Z, 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] CHEN Chao, HE Xinyue, FU Jiaoqi, CHU Yanli. A Method of Flood Submerging Area Extraction for Farmland Based on Tasseled Cap Transformation from Remote Sensing Images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(10): 1560-1566(陈超, 何新月, 傅姣琪, 褚衍丽. 基于缨帽变换的农田洪水淹没范围遥感信息提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1560-1566)
- [9] Nan Y, Jianhui L, Wenbo M, 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, Lv A, Zhu W, 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, 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, Chen W, 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, Wang J, 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, Li Y, 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] Duan H T, Cao Z G, Shen M, Ma J G and Qi T C. 2022. Review of lake remote sensing research[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 3-18(段洪涛, 曹志刚, 沈明, 马金戈, 齐天赐.2022. 湖泊遥感研究进展与展望. 遥感学报[J], 26(1): 3-18)
- [16] Tao S, Fang J, Zhao X, et al. Rapid loss of lakes on the mongolian Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112 (7): 2281-2286
- [17] Jin S, Zhang M, Ma Y, et al. Adapting the dark target algorithm to advanced MERSI sensor on the FengYun-3-D 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, Yao T, Xie H, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103269.
- [19] Zhang G, Xie H, Kang S, 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, Luo W, Chen W, et al. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau[J]. *Sci. Bull*, 2019, 64 (18): 1306-1309
- [21] Tang L, Duan X, Kong F, et al. Influences of climate change on area variation of Qinghai Lake on Qinghai-Tibetan Plateau since 1980s[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-7
- [22] Lian X-H, Qi Y, Wang H-W, et al. Assessing changes of water yield in Qinghai Lake Watershed of China[J]. *Water*, 2019, 12 (1): 11
- [23] Zhang, G. (2019). The lakes larger than 1km<sup>2</sup> in Tibetan Plateau (V3.0) (1970s-2021). *National Tibetan Plateau Data Center*, DOI: 10.11888/Hydro.tpd.c.270303. CSTR: 18406.11.Hydro.tpd.c.270303 (张国庆.青藏高原大于1平方公里湖泊数据集 (V3.0) (1970s-2021) :国家青藏高原科学数据中心, 2019)
- [24] Zhang G, Yao T, Xie H, 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): 6762-6774
- [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): 4455-4464
- [27] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1979, 9 (1): 62-66
- [28] Mcfeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. *International journal of remote sensing*, 1996, 17 (7): 1425-1432
- [29] Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the Modified Difference Water Index (MNDWI) [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2005, 9(5): 589-595. (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)
- [30] TANG Qihong, ZHANG Xuejun, QI Youcun, CHEN Shaohui, JIA Guoqiang, MU Mengfei, YANG Jie, YANG Qiquan, HUANG Xin, YUN Xiaobo, LIU Xingcai, HUANG Zhongwei, TANG Yin. Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle: Progress and Perspectives[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1872-1884(汤秋鸿, 张学君, 戚友存, 陈少辉, 贾国强, 穆梦斐, 杨杰, 杨其全, 黄昕, 运晓博, 刘星才, 黄忠伟, 唐寅. 遥感陆地水循环的进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1872-1884)

- [31] HUANG Xuxing, YANG Yong, SHE Yuchen, JING Zhenhua, HU Xiuqing, GAO Xudong, LI Shuang. Analysis on geolocation error of FY-3D MERIS imaging[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(4): 8-18 (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)
- [32] Min min, Bai Yu, Hu Xiuqing, et al.. Evaluation and comparison of modulation transfer function for FY-3B/C MERIS on early orbit[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1838-1844 (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)
- [33] Guo Fengjie, Li Ting, Ji min, et al. Time series analysis and prediction of Qinghai Lake area from 2000 to 2019 [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22( 2) : 740-748 (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(02):740-748)
- [34] Qi miaomiao, YAO Xiaojun, LIU Shiyin et al. Dynamic change of Lake Qinghai shoreline from 1973 to 2018 [J]. *Lake Sciences*, 2020, 32(02):573-586 (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(02):573-586)

**网络首发:**

**标题:** 基于风云三号D星MERSI-II影像的高原湖泊范围监测能力分析

**作者:** 苗顺霞, 孙开敏, 胡秀清, 瞿建华, 刘俊怡

**DOI:** 10.13203/j.whugis20220653

**收稿日期:** 2023-06-04

**引用格式:**

苗顺霞, 孙开敏, 胡秀清, 等. 基于风云三号D星MERSI-II影像的高原湖泊范围监测能力分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220653 (MIAO Shunxia, SUN Kaimin, HU Xiuqing, et al. Capability Analysis of Lake Extent Monitoring in Highland Region from MERSI-II onboard FY-3D[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20220653)

**网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!**

---

**您感兴趣的其他相关论文:**

风云三号D星天基BDS实时定位性能分析

吴春俊, 孙越强, 王先毅, 白伟华, 孟祥广, 杜起飞

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 248-259

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200187>