

Sentinel-2 MSI 影像水面耀斑时空分布及形成原因实证研究

张方方^{1,2}, 穆昀昌³, 王倩倩^{1,2,4}, 王泽鹏^{1,2,5}, 安金波^{1,2,5},
王胜蕾^{1,2}, 李俊生^{1,2,6}

1. 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094;
2. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094;
3. 北京市测绘设计研究院, 北京 100038;
4. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083;
5. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 101408;
6. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要: 水面耀斑是水体遥感影像上的重要污染信息, 哨兵2号卫星多光谱成像仪 Sentinel-2 MSI (Sentinel-2 Multispectral Imager) 影像上耀斑现象十分普遍, 严重影响了 Sentinel-2 MSI 数据在水体遥感领域的应用。本研究从实证角度出发, 在5个典型研究区开展了耀斑分布提取、耀斑时空分布规律分析及耀斑形成原因的探究工作。本研究发展了基于 UNet 模型的水面耀斑提取算法, 算法总体精度超过 96%。基于提取结果开展了水面耀斑的时空分布规律研究, 结果表明: Sentinel-2 MSI 影像上水面耀斑具有显著的区域和时间分布规律, 部分严重区域耀斑发生频率高达 80%、每景影像上耀斑平均发生面积超过 30%; 水面耀斑的发生主要受太阳角度、观测角度、纬度、轨道位置的影响, 而内陆小型水体受风速、气温等气象因子影响较小; 通过改变成像时间、观测角度、成像方式可以有效降低耀斑发生的频率和强度。本文通过对 Sentinel-2 MSI 影像上水面耀斑现象的量化评估和实证分析, 进一步验证了其形成机制, 为耀斑物理模型的构建和后续卫星减弱水面耀斑的研究提供了数据支撑。

关键词: Sentinel-2 MSI, 耀斑, 时空分布, 形成原因

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 张方方, 穆昀昌, 王倩倩, 王泽鹏, 安金波, 王胜蕾, 李俊生. 2026. Sentinel-2 MSI 影像水面耀斑时空分布及形成原因实证研究. 遥感学报, 30(7): 1997-2009

Zhang F F, Mu Y C, Wang Q Q, Wang Z P, An J B, Wang S L and Li J S. 2026. Empirical study on the spatial-temporal distribution and formation factors of water surface sun glint in Sentinel-2 MSI imagery. National Remote Sensing Bulletin, 30(7): 1997-2009 [DOI: 10.11834/jrs.20265357]

1 引言

水面反射包括太阳直射反射和天空光漫射反射, 其在遥感影像上形成亮斑的现象被称为耀斑。水面耀斑一直是困扰水体遥感的重要问题。耀斑具有强反射特征, 而水体是反射率很低的暗目标, 耀斑的反射强度远大于水体, 导致水体的信号被耀斑掩盖。除了溢油、波浪、内波、涡旋等特殊监测用途外 (Hennings 等, 1994; 张华国 等, 2005;

Turiel 等, 2007; Hu, 2011; Cui 等, 2025), 耀斑一般被认为是遥感影像上的污染信息。此外, 耀斑区域的大气校正十分困难, 进而影响水质参数反演等遥感监测工作。因此, 耀斑的识别、校正、剔除是水体遥感的一项重要工作。如果遥感器成像时能够有效避免水面反射光进入镜头, 就能从源头上减少遥感影像上的耀斑现象, 从而有效增加可用数据量, 并提升水体遥感监测精度和频次, 这对于变化较快的内陆水体具有重要意义。

收稿日期: 2025-09-13; 预印本: 2026-06-18

基金项目:

第一作者简介:

通信作者简介:

欧洲航天局的哨兵 2A/B (Sentinel-2A/B) 卫星上搭载的多光谱成像仪 MSI (Multispectral Imager) 具有 13 个光谱波段、10 m 的高空间分辨率、5 d 的高重访周期, 被广泛应用于陆地和水体遥感监测。但是, 由于其近似垂直的框幅式成像模式, 导致其影像上水体区域耀斑现象十分严重 (Harmel 和 Chami, 2013; Ganguly 等, 2021; Tavares 等, 2021; Wang 等, 2024)。受太阳角度和观测角度的影响, 低纬度地区的耀斑现象尤为严重 (Harmel 等, 2018; Maciel 等, 2019; Tavares 等, 2021), 极端情况下甚至出现几乎全部水面被耀斑覆盖的情形 (Hedley 等, 2018)。严重的耀斑导致 Sentinel-2 MSI 对水体的有效观测数据量大幅降低, 水体区域的有效观测频次远低于其 5 d 重访周期, 严重限制了 Sentinel-2 MSI 数据在水体遥感领域的应用。

为了解决遥感影像的水面耀斑问题, 提升影像的可利用率, 国内外学者发展了很多耀斑校正方法 (Vanhellemont, 2019; Caballero 和 Stumpf, 2020), 主要包括近红外算法 (Hochberg 等, 2003; Hedley 等, 2005; Traganos 等, 2018)、短波红外算法 (Harmel 等, 2018; Vanhellemont, 2019; Zhu 等, 2023; Huang 等, 2025)、基于偏振理论的耀斑校正方法 (周冠华 等, 2007; Zhao 等, 2016; Liang 等, 2019; 陈卫 等, 2019; 张景华 等, 2022)、图像处理等方法 (Yu 等, 2014; Wang 等, 2018; 蓝章礼 等, 2019; 王世瑞 等, 2024)。耀斑校正算法在轻度耀斑影像上能够取得一定的效果, 但是对于重度耀斑和高空间分辨率影像, 校正效果往往不理想 (Zhang 和 Wang, 2010; Kudryavtsev 等, 2017; Wu 等, 2022; 周巨源 等, 2025), 因此这类影像通常采用识别并剔除耀斑污染像元的办法 (陈嘉伟 等, 2011; Kristollari and Karathanassi, 2020)。耀斑的校正和剔除属于后补救措施, 虽有一定作用, 但并不能从根本上解决耀斑区域数据质量受损的问题。产生耀斑的因素有很多, 包括发射窗口、卫星过境日期、过境地方时、太阳角度、观测角度、水面风速等 (潘德炉 等, 1997; Wang 等, 2024; Tavares 等, 2021; Huang 等, 2025)。本研究将从实证角度出发, 研究 5 个典型区域的耀斑发生概率和强度, 并分析其对应的影响因子, 论证 Sentinel-2 MSI 数据水面耀斑产生的主要原因, 以期 Sentinel-2 MSI 及其他

水色卫星的耀斑控制提供数据支撑。

2 数据与方法

2.1 数据和研究区

本研究选择中国东部 5 个湖库作为研究区 (图 1), 其中, 丹江口水库和千岛湖是较清洁水体、小浪底水库是次清洁水体, 呼伦湖和高邮湖是浑浊水体。5 个湖库分别位于 Sentinel-2 MSI 的 3 条轨道上, 其中千岛湖位于第 89 轨道的左侧, 其他 4 个湖库位于轨道的右侧。另外, 丹江口水库和高邮湖位于 33°N 纬线附近。通过这 5 个研究区, 可以研究不同水质状况、轨道位置及地理条件下的水面耀斑分布情况。

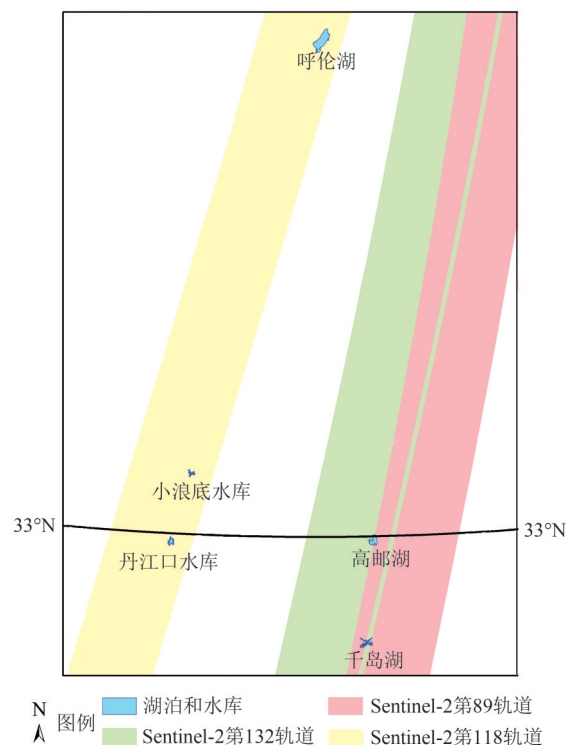


图1 研究区分布

Fig. 1 Distribution of the study area

本文获取了 5 个研究区 2016 年以来的 Sentinel-2A/B MSI L2A 影像 (地表反射率数据), 用于分析耀斑的时空分布规律及其形成原因。为了更客观地反映整个湖区的耀斑分布及占比, 剔除了水面云覆盖较多 (云覆盖率 $>50\%$)、研究区覆盖不完整和有冰雪覆盖的影像, 只保留有效影像。最终, 丹江口水库、小浪底水库、高邮湖、呼伦湖、千岛湖分别获取有效影像 203 景、142 景、171 景、

296景、137景, 合计949景。

另外, 水面耀斑发生的影响因素分析需要用到风速和气温数据, 该数据来自中国气象局全球大气/陆面再分析产品——逐日产品, 从中国气象数据网 ([http://data.cma.cn/CRA\[2025-09-13\]](http://data.cma.cn/CRA[2025-09-13])) 检索下载。资料再分析产品利用成熟的数值预报模型和同化分析技术, 对历史气象观测资料进行重新处理和分析, 重现过去的大气状况, 在天气、气候、环境、海洋和水文等领域具有重要的应用价值。该数据时间分辨率为6 h (本次使用6:00—12:00段的数据), 空间分辨率为34 km (相当于一个湖库的区域平均值)。其中, 近地表2 m气温数据单位为K, 近地表10 m风速数据单位为m/s, 风速进一步分为径向风速和纬向风速。

2.2 耀斑光谱特征分析

Sentinel-2 MSI 影像上的水面耀斑和正常水体在光谱特征上差异较大 (图2)。正常水体具有较

强的吸收作用, 尤其在近红外和短波红外波段吸收更强, 因此这些波段的反射率较低。而水面耀斑由于直接反射太阳光, 反射率整体大幅抬升, 从红波段 (665 nm) 到短波红外波段 (2190 nm) 的光谱形状差异较大 (Vanhellemont, 2019; 王庆瑜, 2025)。特别地, 在705 nm、842 nm、1610 nm波段, 重度耀斑出现了明显的反射峰, 轻度耀斑反射峰不明显, 但是整体反射率明显高于水体, 而水体在705 nm和1610 nm波段并无反射峰。其中, 842 nm波段处3种地物都具有反射峰, 因此不适合用于耀斑特征增强。利用705 nm和1610 nm波段的反射峰 (或高反射值), 可构建表征水面耀斑强弱指数SGI (Sun Glint Index), 用于水面耀斑形成原因的相关分析。

$$SGI = (SR_{705} + SR_{1610})/2 \quad (1)$$

式中, SR_{705} 和 SR_{1610} 分别指705 nm和1610 nm波段的地表反射率, SGI指数表征了耀斑在红边波段和短波红外波段的平均强度。

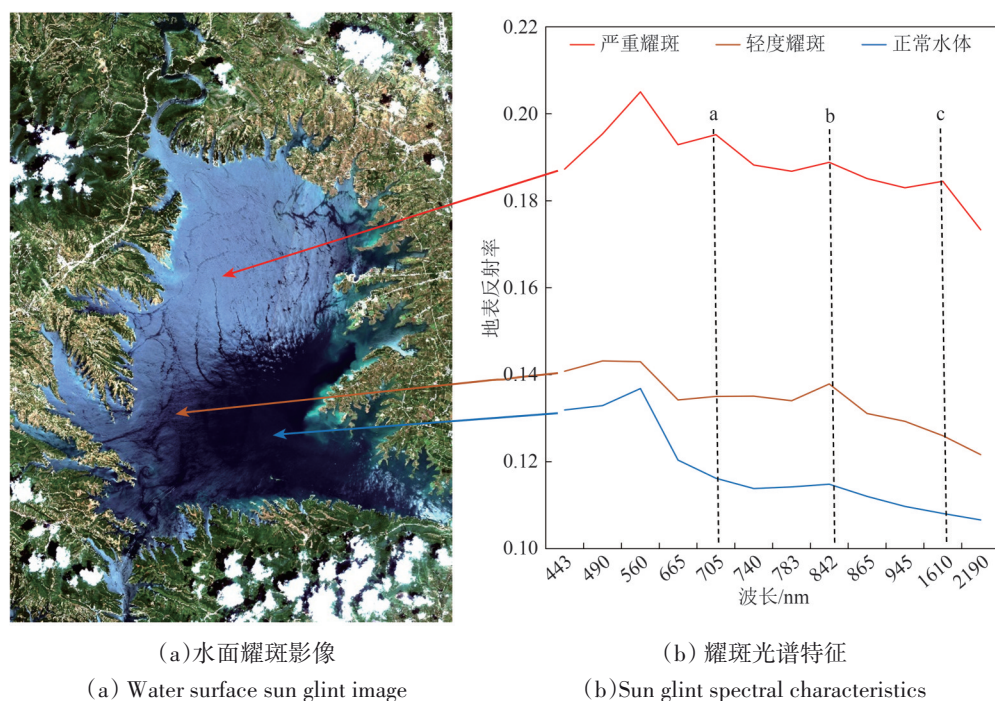


图2 水面耀斑影像特征和光谱特征(a、b、c分别为耀斑光谱的3个特征波长:705 nm、842 nm、1610 nm)

Fig. 2 Characteristics of water surface sun glint image and spectrum (a, b, and c are the three characteristic wavelengths of the sun glint spectrum: 705 nm, 842 nm, and 1610 nm, respectively)

2.3 耀斑分布提取方法

本研究基于UNet模型进行水面耀斑识别。UNet作为一种经典的卷积神经网络模型, 采用编码器—解码器架构, 通过对称的下采样与上采样路径,

并结合跳跃连接实现多尺度特征融合。其中, 编码器逐步提取水面耀斑的抽象特征, 解码器精准恢复目标的空间细节, 跳跃连接则有效缓解了传统模型在细小耀斑区域的信息丢失问题。相

较于常规神经网络模型, 如卷积神经网络 CNN (Convolutional Neural Network) 模型, UNet 模型在保持较高计算效率的同时, 对弱对比度、多尺度分布的耀斑特征具有更强的捕获能力, 适用于复杂背景下水面耀斑的像素级定位。其优势还体现在小样本适应性上, 通过数据增强策略即可在有限标签数据下实现鲁棒性训练。UNet 模型能够平衡模型复杂度与分割精度, 适用于水面耀斑提取。UNet 模型训练需要输入高质量的水面耀斑标签。本研究将 Sentinel-2 MSI 的 12 个波段的地表反射率

作为模型输入, 并增加了与水面耀斑关系密切的太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角 4 个波段数据, 共形成 16 个波段的 UNet 模型训练和预测输入数据。基于这 16 个波段数据, 利用 ENVI 软件, 采用监督分类和人工校验相结合的办法, 从 8 景影像中提取了耀斑分布作为 UNet 模型的耀斑标签影像 (图 3)。该影像为 3 值图, 其中 0、1、2 分别代表耀斑、云、其他地物。所选 8 景耀斑标签影像涵盖了全部 5 个研究区的严重耀斑、轻度耀斑、有云、无云等多种情况。

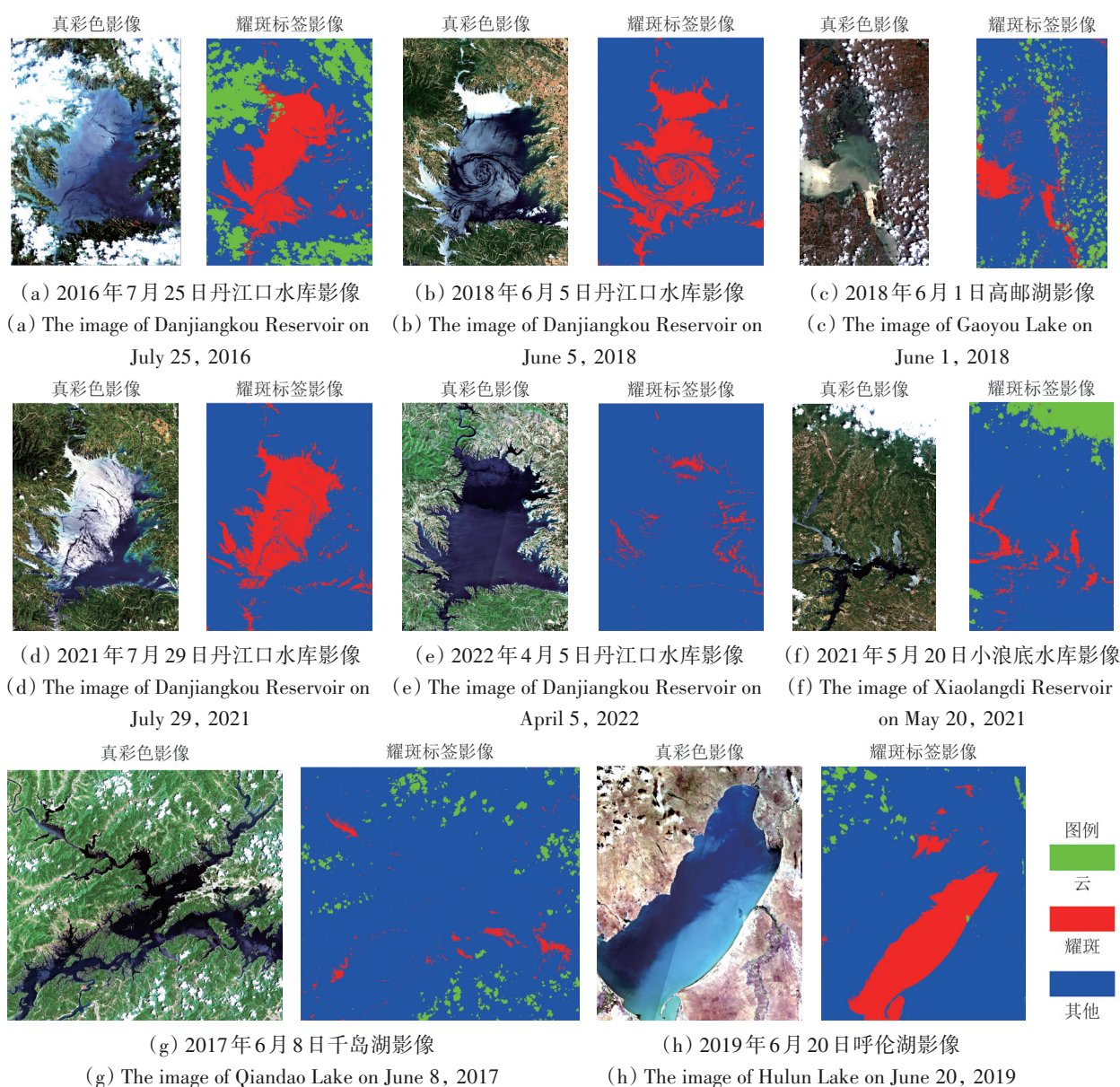


图3 Sentinel-2 MSI 真彩色影像及对应耀斑标签影像

Fig. 3 Sentinel-2 MSI true color images and corresponding sun glint label images

将标签影像裁剪为 512 像素×512 像素的像素块作为 UNet 模型的标签样本, 同时采用错位裁剪的方式增加样本量 (图 4), 8 景标签影像一共裁剪

为 641 个标签样本。641 个标签样本以 8 : 1 : 1 的比例划分为训练集、验证集和测试集, 每个集合样本量分别为 513 个、64 个和 64 个。

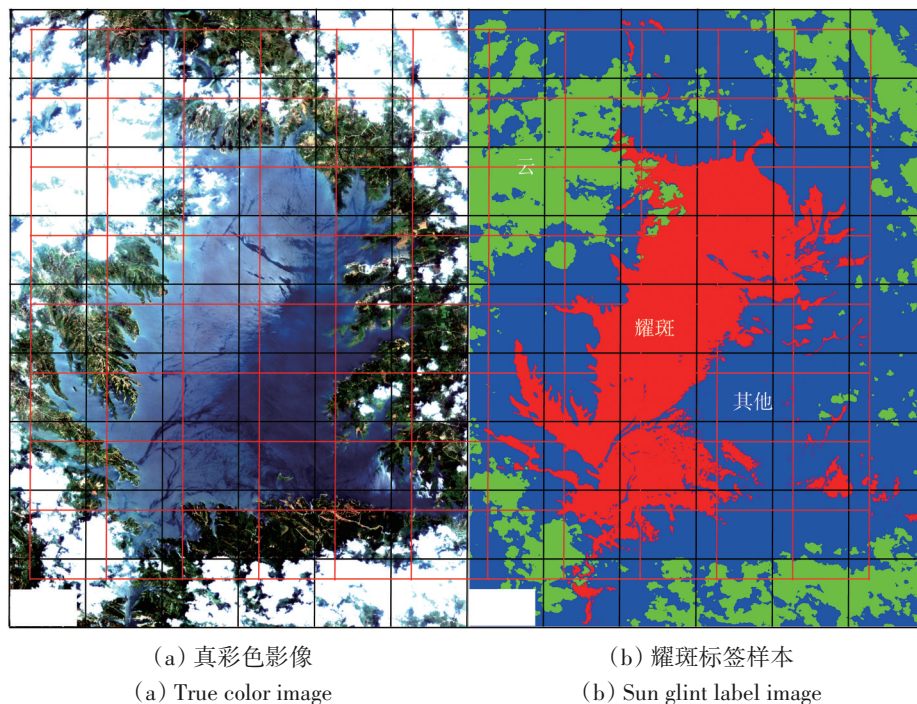


图 4 耀斑标签裁剪方法示意图 (黑色和红色线条为标签样本裁剪分割线)

Fig. 4 Sun glint label cropping method (The black and red line are the cropping dividing lines for Sun glint labels)

UNet 模型训练过程中采取早停策略, 并以平均交并比 MIoU (Mean Intersection over Union) 作为评价指标。在训练过程中, 如果 MIoU 连续 15 个完整训练循环 (Epoch) 未有提升, 则停止训练, 以防止过拟合并节省时间和资源。网络训练参数设置如下: 初始学习率为 3.5×10^{-4} , 优化器为 Adam, 训练轮数为 200, 批次大小为 4。

2.4 耀斑识别精度评价方法

为了客观评价 UNet 模型的性能, 本研究采用了 MIoU、总体精度 OA (Overall Accuracy)、Kappa 系数 (Kappa)、识别精度 (Precision)、召回率 (Recall) 等常用的语义分割指标。以上指标均基于混淆矩阵计算所得, 计算公式如下:

$$\text{MIoU} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\text{TP}_k}{\text{TP}_k + \text{FP}_k + \text{FN}_k} \quad (2)$$

$$\text{OA} = \frac{\sum_{k=1}^n \text{TP}_k}{\sum_{k=1}^n \text{TP}_k + \text{FP}_k + \text{TN}_k + \text{FN}_k} \quad (3)$$

$$\text{Kappa} = \frac{M \sum_{i=1}^n x_{ii} - \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \times \sum_{j=1}^n x_{ji} \right)}{M^2 - \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \times \sum_{j=1}^n x_{ji} \right)} \quad (4)$$

$$\text{Precision}_k = \frac{\text{TP}_k}{\text{TP}_k + \text{FP}_k} \quad (5)$$

$$\text{Recall}_k = \frac{\text{TP}_k}{\text{TP}_k + \text{FN}_k} \quad (6)$$

式中, TP_k 、 TN_k 、 FP_k 、 FN_k 分别为属于 k 类且被正确预测为 k 类的像素数量 (真阳性)、属于 k 类但被错误识别为其他类别的像素数量 (真阴性)、不属于 k 类但被错误识别为 k 类的像素数量 (假阳性)、不属于 k 类且被正确识别为其他类别的像素数量 (假阴性), n 代表类别数, 像素 x_{ij} 表示被预测为 j 类别的 i 类别像素数量, M 为像素总数。

3 耀斑时空分布规律

3.1 耀斑提取精度

基于包含 64 个样本的测试集对耀斑提取结果进行了精度评价, 结果表明, 基于 UNet 模型的水

面耀斑识别精度较高（表1、表2）。其中，MIoU、OA、mAP、Kappa都达到了0.96以上。耀斑、云、其他地物的单项识别精度都达到了较高水平，云和其他地物的识别精度最高，MIoU、ReCall、Precision都超过了0.96，耀斑识别精度略低，但MIoU、ReCall、Precision也超过了0.93。图5展示了耀斑识别结果示例，图中标签图像和预测结果高度相似，强耀斑和弱耀斑都能较好地识别出来，纹理、细节表现都很好。综上，该精度能够满足对Sentinel-2 MSI影像上耀斑时空分布规律的研究。

表1 模型总体精度

Table 1 Overall accuracy of the model

精度指标	MIoU	OA	mAP	Kappa
数值	0.9639	0.988	0.9769	0.9676

3.2 区域分布规律

根据2016年—2024年的949景Sentinel-2 MSI影像所提取的耀斑分布数据，统计了丹江口水库、小浪底水库、高邮湖、呼伦湖、千岛湖的耀斑发

生面积和影像数量（表3）。结果表明，不同研究区的耀斑最大发生面积占比差异较小（都达到或接近100%），但是平均占比差异较大，具有显著的区域差异。丹江口水库耀斑发生面积平均占比接近30%，在5个研究区占比最高，其次是小浪底水库、高邮湖、呼伦湖，千岛湖占比最低，仅有7.0%，不足丹江口水库的1/4。5个研究区都曾发生过几乎全部水面都是耀斑的情况，最大耀斑发生面积占比都超过了80%，甚至超过100%（主要原因是湖区面积有季节性差异，本研究中每个研究区的基准面积是一年的平均面积，丰水期湖区面积较大，耀斑发生面积出现了超过研究区基准面积的情况）。

表2 不同地物精度

Table 2 Accuracy for different land cover types

精度指标	耀斑	云	其他地物
MIoU	0.9378	0.9675	0.9865
ReCall	0.9872	0.9825	0.9894
Precision	0.9494	0.9845	0.9969

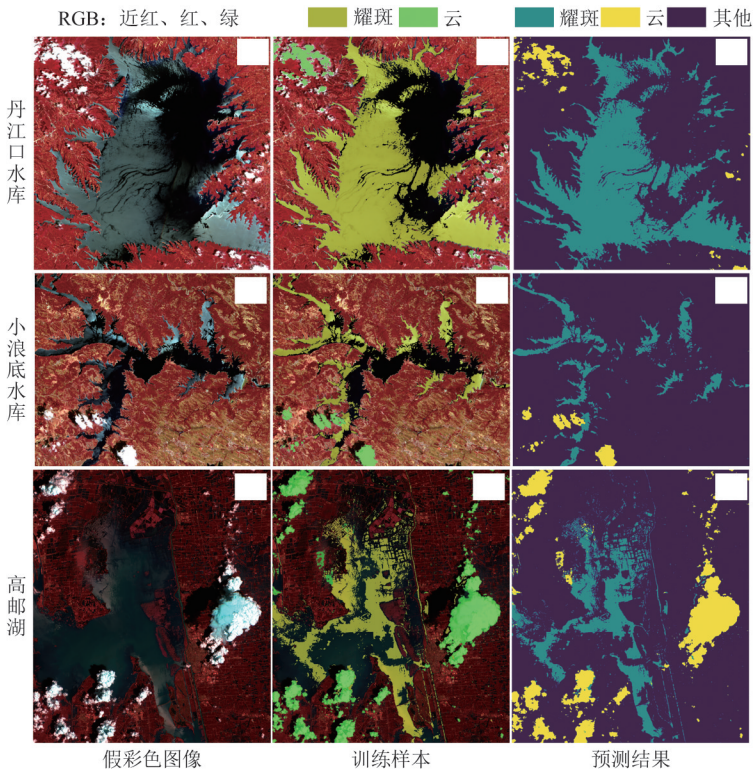


图5 耀斑识别结果示意图(RGB指图像合成方式;近红、红、绿指所用波段:近红外波段、红波段、绿波段)

Fig. 5 Schematic diagram of sun glint identification results (RGB refers to the image synthesis method; near-infrared, red, and green refer to the bands used; near-infrared band, red band, and green band)

根据每一景影像上的耀斑面积占湖区面积的比例，将耀斑严重程度分为4类，其中耀斑面积占比大于或等于60%的为严重、30%—60%的为中

等、5%—30%的为较小、小于或等于5%的为微小。然后，分别统计5个研究区的耀斑严重程度（表4），结果表明，不同研究区不同类型耀斑占比

差异较大。其中,丹江口水库严重和中等两类在5个研究区中都是占比最大的,严重、中等、较小3类合计接近80%,只有20.7%的影像耀斑面积微小。千岛湖和丹江口水库正好相反,耀斑面积微小的一类高达76.6%,其他3类合计占比仅23.4%。小浪底水库、高邮湖、呼伦湖的耀斑严重程度介于丹江口水库和千岛湖之间,以较小和微小两类为主,中等一类也有较高占比,严重一类占比较低。

3.3 时间分布规律

本研究计算了丹江口水库203景影像的SGI,用于表征耀斑强度,在水面范围内均匀布设260个点位,获取所有203景影像在这些点位上的SGI,进而统计SGI指数随时间的分布规律(图6)。统计数据表明,丹江口水库的耀斑强弱和时间高度相关,呈现显著的时间分异规律。耀斑随年积日呈现先升后降的渐变趋势,表现为夏季耀斑强度

较高、冬季较低,春秋天为过渡时段,在第150d前后达到峰值,在0—150d的上升速率大于150—365d的下降速率。

表3 不同区域耀斑面积和占比统计
Table 3 Statistics of sun glint areas and proportions in different regions

序号	湖区(平均基准面积)	耀斑面积和占比	最大值	平均值	标准差
1	丹江口水库 (274.5 km ²)	面积/km ²	287.7	82.0	61.2
		占比/%	104.8	29.9	22.3
2	小浪底水库 (111.3 km ²)	面积/km ²	138.7	26.1	24.1
		占比/%	124.6	23.4	21.6
3	高邮湖 (732.8 km ²)	面积/km ²	759.2	153.2	119.3
		占比/%	103.6	20.9	16.3
4	呼伦湖 (2042.2 km ²)	面积/km ²	1719.2	288.3	310.2
		占比/%	84.2	14.1	15.2
5	千岛湖 (396.3 km ²)	面积/km ²	369.8	27.6	35.6
		占比/%	93.3	7.0	9.0

表4 不同区域耀斑影像数量和占比统计
Table 4 Statistics of sun glint image counts and proportions in different regions

序号	湖区(影像数量)	耀斑影像数量和占比	严重(≥60%)	中等(30%—60%)	较小(5%—30%)	微小(≤5%)
1	丹江口水库 (203景)	数量/景	34	48	79	42
		占比/%	16.8	23.6	38.9	20.7
2	小浪底水库 (142景)	数量/景	14	31	46	51
		占比/%	9.9	21.8	32.4	35.9
3	高邮湖 (171景)	数量/景	9	35	89	38
		占比/%	5.3	20.5	52.0	22.2
4	呼伦湖 (296景)	数量/景	18	33	94	151
		占比/%	6.1	11.1	31.8	51.0
5	千岛湖 (137景)	数量/景	7	1	24	105
		占比/%	5.1	0.8	17.5	76.6

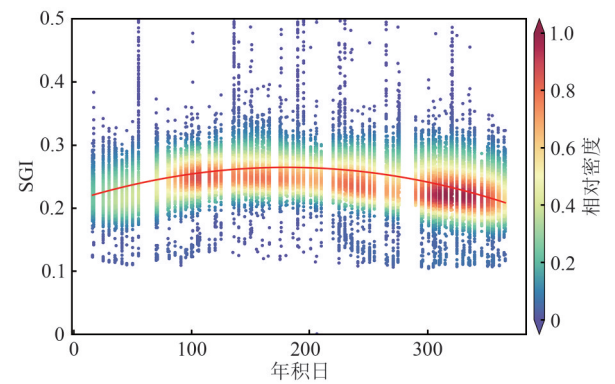


图6 丹江口水库SGI随时间的变化
Fig. 6 Temporal variation of SGI in the Danjiangkou Reservoir

4 耀斑形成原因探究

Sentinel-2 MSI 影像上耀斑的形成可能受太阳和观测角度、气象条件、区域和轨道位置等因素的影响,下文就太阳和观测角度、气象条件、区域和轨道位置3个影响因素进行分析。

4.1 太阳和观测角度影响

本文统计了太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角,并计算了太阳和遥感器之间的相对天顶角和相对方位角,进而分析了上述

观测角度和SGI的关系（图7）。统计结果表明，SGI随太阳天顶角和太阳方位角的增大而减小，也随观测天顶角和观测方位角的增大而减小，但后者的显著性低于前者。SGI随相对天顶角的增大而减小，随着相对方位角的增大而增大。产生上述结果的原因是：太阳角度和观测角度的增大，有利于降低天顶位置遥感器观测方位所接收到的水面镜面反射光，减少镜面反射光进入遥感器，从而降低耀斑强度。太阳和遥感器之间的相对天顶

角和相对方位角共同决定了镜面反射光被遥感器接收的程度，当太阳和遥感器在同一方位时，能最大限度减少镜面反射光到达遥感器的观测方向。Sentinel-2 MSI 遥感器的观测天顶角（图像中心像元 1.4° ）是固定不变的，所以相对天顶角主要由太阳天顶角决定，表现出和太阳天顶角同样的趋势。相对方位角对耀斑强度的影响较大，二者的相对位置越接近，镜面反射光就越难到达遥感器，太阳耀斑就越弱。

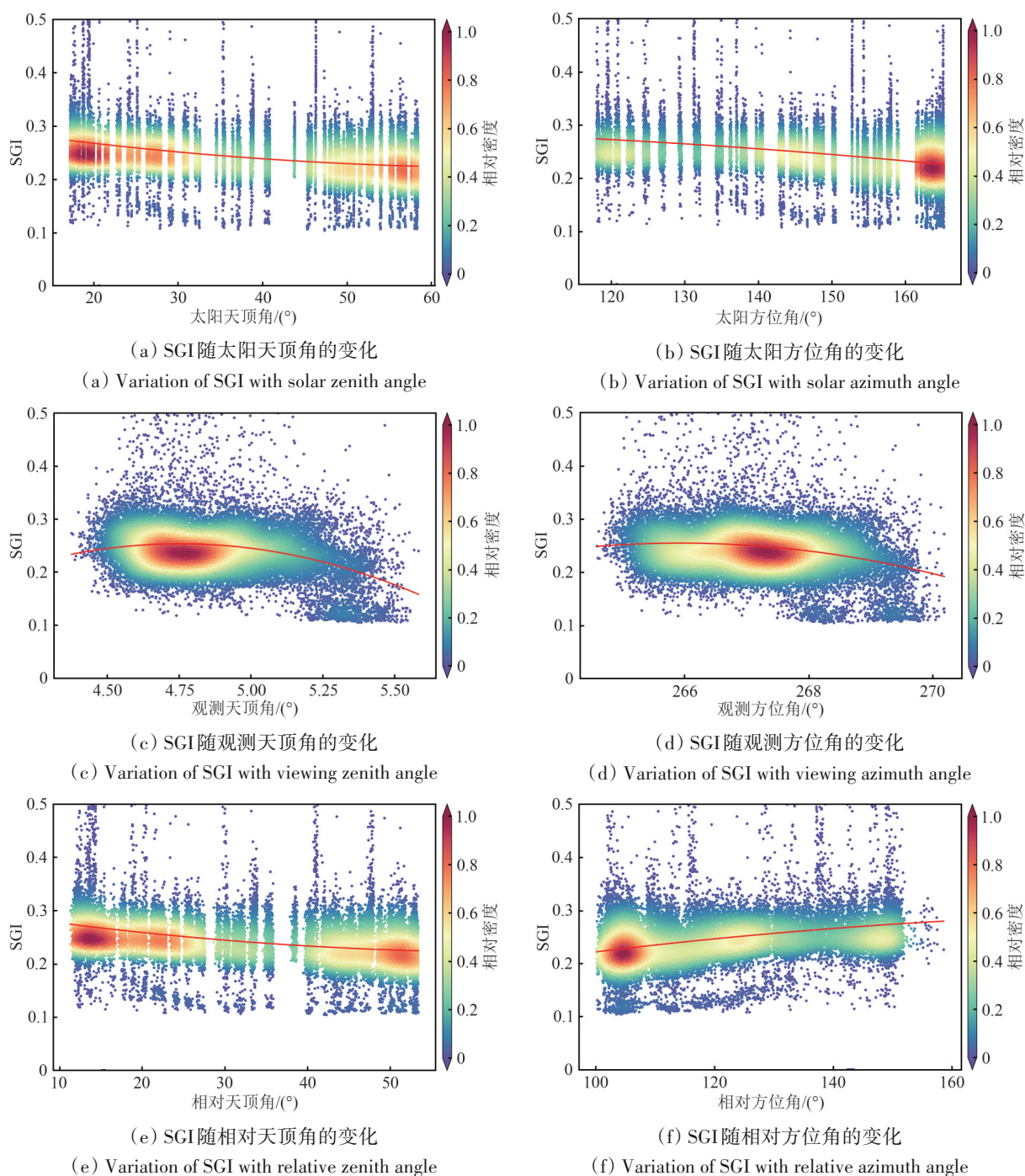


图7 丹江口水库SGI随太阳和观测角度的变化

Fig. 7 Variation of SGI with solar and viewing angles in the Danjiangkou Reservoir

4.2 气象条件影响

风会导致水面波浪,进而产生耀斑;气温和季节有关,从而关联太阳、卫星观测角度。通过对风速、气温与SGI之间关系的统计分析,结果表明,径向风速、纬向风速、径向和纬向合并风速都和耀斑强度没有显著统计关系(图8),这与传统认知略有差异。本研究分析认为,上述结果主要有以下原因:首先,研究区常年风速偏小(± 2 m/s之内),水体面积较小,风浪也较小,由此产生的耀斑有限,且风速较小时耀斑的产生主要由太阳角度和观测角度决定(Fox等,2007;Groetsch等,

2020;Zhu等,2024);其次,丹江口水库的Sentinel-2 MSI影像本身耀斑就很严重,几乎每一景影像都有或多或少的耀斑像元,在此背景下,风浪难以进一步增强耀斑,甚至有些像元由于风导致的水面破碎的原因,反而出现耀斑减弱现象,这可以解释耀斑和风速的统计关系不显著的原因。至于气温,其主要受季节影响,其本身并不能对耀斑强弱造成影响,但由于气温和成像季节高度相关,进而与太阳角度、卫星观测角度高度相关,从而表现为气温和SGI存在显著正相关的假象,但是本质上耀斑和气温没有直接关联。

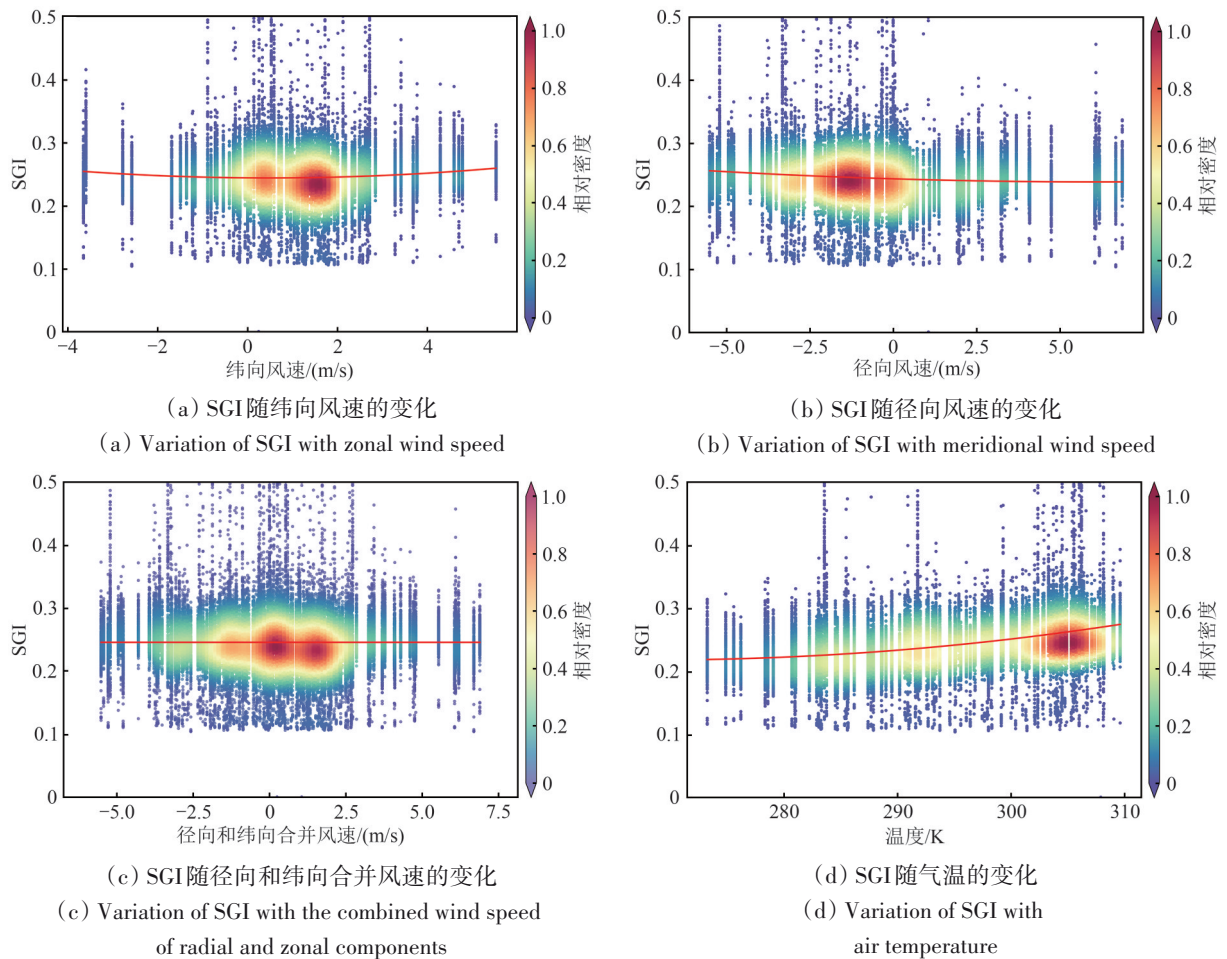


图8 丹江口水库SGI随风速、气温的变化

Fig. 8 Variation of SGI with wind speed and air temperature in the Danjiangkou Reservoir

4.3 区域和轨道位置影响

区域位置对耀斑的产生具有很大影响,本研究主要分析了不同卫星轨道位置、经度、纬度下的耀斑强弱(图1)。本文中,丹江口水库、小浪底水库、呼伦湖均位于Sentinel-2 MSI的第118号

轨道上,且3个水体都处于轨道的偏右侧。由于轨道右侧的卫星观测方位正好位于水面反射方向,容易产生耀斑,因此这3个水体的耀斑都比较严重(表3、表4)。尽管3个水体的纬度不同(其中丹江口水库纬度最低),但纬度越高,太阳天顶角越

大, 卫星近视垂直观测时水面反射光越不容易被遥感器捕获, 因此同一轨道上纬度越高的区域, 影像上耀斑越少。千岛湖位于第89号轨道的左侧, 卫星观测方位和太阳方位相同, 不容易产生耀斑, 因此尽管其纬度低于上述3个水体, 它仍然是5个研究区中耀斑最轻的水体。丹江口水库和高邮湖基本处于同一纬度线 (33°N), 中等、较小、微小3类耀斑占比较为相似, 严重一类高邮湖远低于丹江口水库, 其耀斑面积占比也低于丹江口水库 (表3、表4)。

5 讨论

5.1 耀斑标签样本选择

本文发展了基于UNet模型的水面耀斑提取算法, 该算法是开展耀斑时空分布规律和形成原因探究的基础, 其提取精度直接关系到后续研究的可靠性。UNet模型的关键是耀斑标签样本的制作。本研究选取了8景影像用于耀斑标签样本制作, 并裁剪为641个标签样本用于模型训练、验证和测试。标签样本的设计兼顾了全部5个研究区, 同时涵盖严重耀斑、轻度耀斑、有云、无云等多种情况。这641个标签样本包含641个纹理特征和14282万个像素的光谱特征, 基本覆盖了常见的地物类型, 可以为UNet模型提供丰富的纹理和光谱特征输入, 为耀斑精确提取提供了保障。但是, 制作标签样本所用的影像数量只有8景, 难以覆盖5个区域的不同季节、不同月份, 使得样本难以捕捉物候变化和水质变化带来的地物光谱和纹理特征变化, 可能对耀斑提取结果产生一定影响。后续研究需进一步完善标签样本的覆盖性, 以提升耀斑提取模型的精度和普适性。

5.2 水质对耀斑的影响

高邮湖和丹江口水库处于同一纬度, 且均位于轨道右侧, 二者位置高度相似, 但是丹江口水库的耀斑强度远大于高邮湖, 目前数据还难以解释这一差异的成因。高邮湖的水体浑浊程度远高于丹江口水库, 水质较差 (图9), 耀斑强弱的差异可能受到水质的影响。同样位于轨道右侧的丹江口水库, 其耀斑强度也远高于呼伦湖, 而丹江口水库的水质优于呼伦湖, 除了纬度影响以外, 可能也有水质的影响。然而, 水质优良的丹江口水库和千岛湖之间耀斑强度差异巨大, 而水质较差的呼伦湖和高邮湖之间耀斑强度差距不大。因

此, 水质对耀斑的影响仍然停留在假设阶段, 目前本文的数据难以支撑上述现象, 还需要系统的研究和更丰富的数据来验证水质对耀斑的影响。此外, 高邮湖耀斑弱于丹江口水库的原因也可能与水草较多、湖泊形态破碎、水面积较小等因素有关, 具体情况仍需进一步验证。

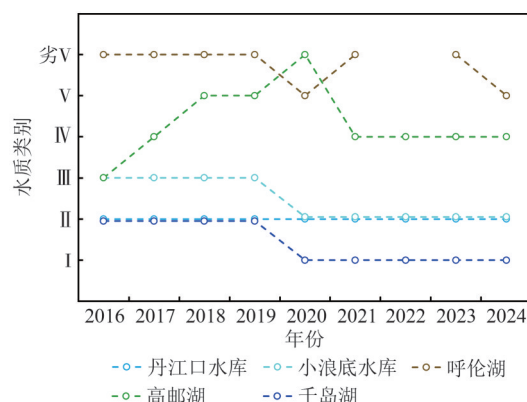


图9 5个研究区水质状况 (图表数据来自国家地表水水质自动监测实时数据发布系统的每4小时间隔数据, 统计了全年所有数据中各水质类别所占比例, 以占比最高的类别作为该湖泊或水库的年度水质类别, 其中呼伦湖2022年数据缺失)

Fig. 9 Water quality status of the five study areas (The chart data are derived from the 4-hour interval data of the National Surface Water Quality Automatic Monitoring Real-time Data Release System. The proportion of each water quality category among all data for the entire year was calculated, and the category with the highest proportion was taken as the annual water quality category for the lake or reservoir. Among them, data for Hulun Lake in 2022 are missing)

5.3 减弱水面耀斑的方法建议

通过本文研究可以发现, Sentinel-2 MSI 影像上耀斑发生的频率和强度都很大, 严重限制了该卫星数据在水体遥感中的应用。分析发现, 产生耀斑的主要因素是太阳角度和卫星观测角度、轨道位置, 气象条件影响较小; 区域纬度虽有影响, 但纬度作为客观存在的事实无法改变。因此, 在遥感卫星设计时应重点考虑太阳角度、观测角度及轨道位置。可通过成像地方时提前、改变卫星观测角度、增加卫星观测倾角或采用推扫成像等方式降低耀斑发生的频率和强度。卫星减弱水面耀斑方案见表5。

后续水色、水资源、水环境应用卫星可根据本文建议适当采用上述1个或多个减弱水面耀斑的方案, 以降低遥感影像上水面耀斑发生频率和强度, 提升遥感影像数据质量, 为水相关研究和应用提供海量有效数据支撑。

表5 卫星减弱水面耀斑方案

Table 5 Satellite-based scheme for mitigating water surface sun glint

序号	考虑因素	方案	优点	缺点
1	太阳角度	卫星成像地方时提前至 10:00—10:30	提高太阳天顶角,降低耀斑强度	光线较弱,可能影响卫星成像质量
2	观测角度	改变卫星观测角度: 太阳直射点以北,卫星观测方向向西北方向倾斜(上午星) 太阳直射点以南,卫星观测方向向西南方向倾斜(上午星)	提高卫星天顶角,降低相对方位角,降低耀斑强度	卫星运行中需调整角度,对卫星的定位姿态要求较高
3	轨道位置	框幅式遥感器增加观测倾角,使得卫星星下点位于卫星影像的右下角点(上午星、太阳直射点以北),可考虑前倾式推扫成像方式	降低相对方位角,减少水面反射光进入传感器	卫星倾斜角度增大,远端像元几何畸变变大

6 结 论

针对 Sentinel-2 MSI 影像上水面耀斑严重的问题,本文选取中国东部 5 个具有不同经纬度和轨道位置的湖库作为研究区,基于 UNet 模型对 5 个研究区 2016 年—2024 年的 Sentinel-2 MSI 影像进行了水面耀斑识别,分析了耀斑的时空分布规律,并对其形成原因进行了初步探究,主要结论包括以下 4 点:(1) 基于 UNet 模型的耀斑识别精度较高,总体精度可达 96% 以上。(2) 水面耀斑具有显著的区域和时间分布规律,5 个研究区中丹江口水库水面耀斑最严重,其次是小浪底水库、高邮湖、呼伦湖,千岛湖最轻;丹江口水库耀斑随年积日呈先升后降的渐变趋势,表现为夏季耀斑强度较高、冬季较低,在第 150 天前后达到峰值。(3) 水面耀斑的形成主要受太阳角度、卫星观测角度、轨道和区域位置影响。耀斑强度随着太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角、相对天顶角的增大而减小,随着相对方位角的增大而增大,随着纬度的提高而减弱。位于轨道右侧的水体,其耀斑强度强于左侧水体。对于内陆小型水体,风速对耀斑几乎无影响;气温和耀斑的相关性本质上是太阳角度和观测角度影响所致,而非直接关联。此外,水质和耀斑的关系仍需要进一步验证。(4) 通过成像地方时提前、改变卫星观测方向、增加卫星观测倾角或采用推扫成像等方式可以降低耀斑发生的频率和强度。

本文从实证角度验证了水面耀斑的形成机制,阐明了其时空分布规律及形成原因,对卫星成像角度控制、耀斑提取算法、耀斑校正建模具有一定的启示作用。本文结论对未来遥感卫星的设计和运行具有重要的参考意义,建议未来发射的水色卫星和陆地观测卫星采取减少水面耀斑的措施,

以提升卫星数据的质量和有效性,这同时也是间接提高卫星观测频次的有效途径,对时间敏感信息的获取具有重要科学意义。

志 谢 感谢欧洲空间局哥白尼计划提供的 Sentinel-2 MSI 数据 (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) 和中国气象数据网提供的气象数据 (<http://data.cma.cn/CRA>)。

参考文献 (References)

Caballero I and Stumpf R P. 2020. Atmospheric correction for satellite-derived bathymetry in the Caribbean waters: from a single image to multi-temporal approaches using Sentinel-2A/B. *Optics Express*, 28(8): 11742-11766 [DOI: 10.1364/OE.390316]

Chen J W, Li Y and Shao H. 2011. Multispectral remote sensing model used for distinguishing sunglint water, non sunglint water and different phases of cloud. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 50(6): 1037-1041 (陈嘉伟, 李炎, 邵浩. 2011. 耀光水体、非耀光水体和云层的多光谱遥感识别模型. 厦门大学学报(自然科学版), 50(6): 1037-1041)

Chen W, Qiao Y L, Sun X B and Yin Y L. 2019. Method for water surface sun glint suppression based on polarized radiation image fusion. *Acta Optica Sinica*, 39(5): 0529001 (陈卫, 乔延利, 孙晓兵, 殷玉龙. 2019. 基于偏振辐射图融合的水面太阳耀光抑制方法. 光学学报, 39(5): 0529001) [DOI: 10.3788/AOS201939.0529001]

Cui A J, Ma Y, Jiang Y, Li S H, Zhang J Y and Wang R F. 2025. Synchronous inversion of bathymetry and wave height using wave textures and sun glint signals. *Ocean Engineering*, 328: 121042 [DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121042]

Fox D, Gonzalez E, Kahn R and Martonchik J. 2007. Near-surface wind speed retrieval from space-based, multi-angle imaging of ocean sun glint patterns. *Remote Sensing of Environment*, 107(1/2): 223-231 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.021]

Ganguly D, Ali S M and Raman M. 2021. Sun glint characterization in an ocean color sensor with different payload tilts and correction algorithms for glint: a study using oceansat-II ocean colour monitor. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(12): 3013-3025 [DOI: 10.1007/s12524-021-01446-y]

Groetsch P M M, Foster R and Gilerson A. 2020. Exploring the limits for sky and sun glint correction of hyperspectral above-surface re-

- flectance observations. *Applied Optics*, 59(9): 2942-2954 [DOI: 10.1364/AO.385853]
- Harmel T and Chami M. 2013. Estimation of the sunglint radiance field from optical satellite imagery over open ocean: Multidirectional approach and polarization aspects. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(1): 76-90 [DOI: 10.1029/2012jc008221]
- Harmel T, Chami M, Tormos T, Reynaud N and Danis P A. 2018. Sunglint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. *Remote Sensing of Environment*, 204: 308-321 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.022]
- Hedley J D, Harborne A R and Mumby P J. 2005. Technical note: simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10): 2107-2112 [DOI: 10.1080/01431160500034086]
- Hedley J D, Roelfsema C, Brando V, Giardino C, Kutser T, Phinn S, Mumby P J, Barrilero O, Laporte J and Koetz B. 2018. Coral reef applications of Sentinel-2: coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping with comparison to Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 216: 598-614 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.014]
- Hennings I, Metzner M and Matthews J. 1994. Sun glitter radiance modulation of submarine sand waves and internal waves//Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena: IEEE, 3: 1735-1738 [DOI: 10.1109/igarss.1994.399550]
- Hochberg E J, Andréfouët S and Tyler M R. 2003. Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7): 1724-1729 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.815408]
- Hu C M. 2011. An empirical approach to derive MODIS ocean color patterns under severe sun glint. *Geophysical Research Letters*, 38(1): L01603 [DOI: 10.1029/2010gl045422]
- Huang W, Zhao J, Li M J, Lou Q S, Yan N Y and Sun S J. 2025. Assessment of atmospheric correction methods in MSI imagery for deriving bathymetry and substrates of shallow-water coral reefs. *Frontiers in Marine Science*, 12: 1495793 [DOI: 10.3389/fmars.2025.1495793]
- Kristollari V and Karathanassi V. 2020. Artificial neural networks for cloud masking of Sentinel-2 ocean images with noise and sunglint. *International Journal of Remote Sensing*, 41(11): 4102-4135 [DOI: 10.1080/01431161.2020.1714776]
- Kudryavtsev V, Yurovskaya M, Chapron B, Collard F and Donlon C. 2017. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: directional spectrum retrieval and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(2): 1369-1383 [DOI: 10.1002/2016JC012426]
- Lan Z L, Huang T, Wang Q Z and Tan L Y. 2019. Asphalt pavement lane line removal method based on mask r-cnn and improved criminisi. *Journal of Graphics*, 40(3): 600-607 (蓝章礼, 黄涛, 王庆珍, 谭立云. 2019. 基于Mask R-CNN与改进Criminisi的沥青路面车道线移除方法. *图学学报*, 40(3): 600-607) [DOI: 10.11996/JG.j.2095-302X.2019030600]
- Liang J A, Wang X, He S and Jin W Q. 2019. Sea surface clutter suppression method based on time-domain polarization characteristics of sun glint. *Optics Express*, 27(3): 2142-2158 [DOI: 10.1364/OE.27.002142]
- Pan D L, Doerffer R, Mao T M and Li S J. 1997. Research on Radiative Simulation Images of Ocean Color Satellites. *Acta Oceanologica Sinica*, 19(6):43-55 (潘德炉, Rdoerffer R, 毛天明, 李淑菁. 1997. 海洋水色卫星的辐射模拟图像研究. *海洋学报*, 19(6): 43-55)
- Maciel D, Novo E, Sander de Carvalho L, Barbosa C, Flores Júnior R and de Lucia Lobo F. 2019. Retrieving total and inorganic suspended sediments in Amazon floodplain lakes: A multisensor approach. *Remote Sensing*, 11(15): 1744 [DOI: 10.3390/rs11151744]
- Tavares M H, Lins R C, Harmel T, Fragoso Jr C R, Martínez J M and Motta-Marques D. 2021. Atmospheric and sunglint correction for retrieving chlorophyll-*a* in a productive tropical estuarine-lagoon system using Sentinel-2 MSI imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 174: 215-236 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.01.021]
- Traganos D, Poursanidis D, Aggarwal B, Chrysoulakis N and Reinartz P. 2018. Estimating satellite-derived bathymetry (SDB) with the google earth engine and sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(6): 859 [DOI: 10.3390/rs10060859]
- Turiel A, Isern-Fontanet J, Garcia-Ladona E and Young J A. 2007. Detection of wave fronts in the Indian Ocean from geostationary sunglint satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 28(17): 3953-3962 [DOI: 10.1080/01431160601047789]
- Vanhellemont Q. 2019. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment*, 225: 175-192 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.010]
- Wang Q Y. 2025. Study on Sun Glint Identification and Correction Model for Lakes and Reservoirs Based on Sentinel-2 MSI Imagery. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (王庆瑜. 2025. 基于Sentinel-2 MSI影像的湖库太阳耀光识别与校正模型研究. 南京: 南京信息工程大学) [DOI: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2025.000892]
- Wang Q Y, Liu H, Wang D, Li D X, Liu W X, Si Y R, Liu Y, Li J L, Duan H T and Shen M. 2024. Assessment of atmospheric correction algorithms for correcting sunglint effects in sentinel-2 MSI imagery: a case study in clean lakes. *Remote Sensing*, 16(16): 3060 [DOI: 10.3390/rs16163060]
- Wang S K, Yu C Y, Sun Y J, Gao F and Dong J Y. 2018. Specular reflection removal of ocean surface remote sensing images from UAVs. *Multimedia Tools and Applications*, 77(9): 11363-11379 [DOI: 10.1007/s11042-017-5551-7]
- Wang S R, Shen F, Li R H and Li P. 2024. Research on water surface glint removal and information reconstruction methods for unmanned aerial vehicle hyperspectral images. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2024(1): 36-49 (王世瑞, 沈芳, 李仁虎, 李鹏. 2024. 无人机高光谱影像水面耀光去除及信息重构方法研究. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2024(1): 36-49) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2024.01.005]
- Wu X Y, Lu Y C, Jiao J N, Ding J, Fu W X and Qian W X. 2022. Using sea wave simulations to interpret the sunglint reflection variation with different spatial resolutions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 1501304 [DOI: 10.1109/lgrs.2020.3033700]

- Yu D H, Han J W, Jin X and Han J G. 2014. Efficient highlight removal of metal surfaces. *Signal Processing*, 103: 367-379 [DOI: 10.1016/j.sigpro.2013.11.021]
- Zhang H and Wang M H. 2010. Evaluation of sun glint models using modis measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111(3): 492-506 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2009.10.001]
- Zhang H G, Huang W G, Zhou C B, Li D L and Xiao Q. 2005. Fractal characterization of IKONOS imagery. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5): 15-18 (张华国, 黄韦良, 周长宝, 厉冬玲, 肖清梅. 2005. 关于IKONOS卫星遥感图像的分形特征研究. *测绘通报*, (5): 15-18)
- Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G, Li B, Zhang Y Ling F, Zhang Y and Liu D. 2022. Suppression technology for saturated water surface glint based on polarization characteristics. *Acta Optica Sinica*, 42(24): 2401009 (张景华, 张焱, 石志广, 李彪, 凌峰, 张毅, 刘荻. 2022. 基于偏振特征的水面饱和耀光抑制技术. *光学学报*, 42(24): 2401009) [DOI: 10.3788/AOS202242.2401009]
- Zhao H J, Ji Z, Zhang Y, Sun X F, Song P F and Li Y S. 2016. Mid-infrared imaging system based on polarizers for detecting marine targets covered in sun glint. *Optics Express*, 24(15): 16396-16409 [DOI: 10.1364/OE.24.016396]
- Zhou G H, Zhao Y C, Geng X R and Li X R. 2007. Correction of sky-glint above water surface based on polarized principle. *Advances in Water Science*, 18(5): 762-767 (周冠华, 赵永超, 耿修瑞, 李小文. 2007. 基于偏振原理的水面反射光的剥离. *水科学进展*, 18(5): 762-767) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2007.05.021]
- Zhou J Y, Wang M X, Jiao J N, Liu J Q, Ding J and Lu Y C. 2025. Correction of sunglint reflection from ocean surface in HY-1C/D CZI images. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(9): 1904-1913 (周巨源, 汪明秀, 焦俊男, 刘建强, 丁静, 陆应诚. 2025. HY-1 C/D 卫星 CZI 数据海面太阳耀光反射校正. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(9): 1904-1913) [DOI: 10.13203/j.whugis.20220628]
- Zhu M Y, Yang C B, Qie L, Xu H, Li Z Q, Xie Y S, Zhang H, Zhang Y, Lan C W and Chen Z T. 2024. Determination of optimal solar-viewing geometry for in-flight polarization calibration using sun glint over ocean. *Applied Optics*, 63(31): 8131-8145 [DOI: 10.1364/AO.536792]
- Zhu X B, Lu Y C, Dou C Y and Ju W M. 2023. Improving sea surface floating matter identification from Sentinel-2 MSI imagery using optical radiative simulation of neighborhood difference. *Optics Express*, 31(17): 27612-27620 [DOI: 10.1364/OE.497219]

Empirical study on the spatial-temporal distribution and formation factors of water surface sun glint in Sentinel-2 MSI imagery

ZHANG Fangfang^{1,2}, MU Yunchang³, WANG Qianqian^{1,2,4}, WANG Zepeng^{1,2,5}, AN Jinbo^{1,2,5},
WANG Shenglei^{1,2}, LI Junsheng^{1,2,6}

1. International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China;
2. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
3. Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing 100038, China;
4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
5. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
6. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Water surface sun glint is a significant source of contamination in water remote sensing imagery. Sun glint phenomena are widespread in Sentinel-2 MSI images, severely limiting the application of Sentinel-2 MSI data in water remote sensing. From an empirical perspective, this study conducted sun glint distribution extraction, analysis of spatial-temporal patterns, and investigation into the causes of sun glint in five typical study areas. This study developed a water surface sun glint extraction algorithm based on the UNet model, with an overall accuracy exceeding 96%. Research on the spatiotemporal distribution patterns of water surface sun glint was conducted on the basis of the extraction results. Water surface sun glint in Sentinel-2 MSI imagery exhibits distinct regional and temporal distribution patterns. In some severely affected areas, the frequency of sun glint occurrence reaches up to 80%, with the average glint-affected area exceeding 30% per image. The occurrence of water surface sun glint is primarily influenced by solar angle, viewing angle, latitude, and orbital position, while inland small water bodies show minimal direct correlation with meteorological factors such as wind speed and air temperature. Adjusting imaging time, viewing angles, and imaging methods can effectively reduce the frequency and intensity of sun glint. On the basis of the quantitative evaluation and empirical analysis of water surface sun glint in Sentinel-2 MSI imagery, this study validates the formation mechanism of sun glint, providing data support for physical models and the mitigation of water surface sun glint in subsequent satellite missions.

Key words: Sentinel-2 MSI, sun glint, spatial-temporal distribution, formation factors

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFD1700802)