

基于 GOCI 卫星数据的 2011-2020 年长江中下游三大湖泊悬浮颗粒物浓度遥感反演数据集*

刘成^{1,2,3}, 齐天赐^{3**}, 沈明³, 肖启涛³, 曹志刚³, 仇志强^{1,2,3}, 段洪涛^{1,2,3}

(1: 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

(2: 西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

(3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 211135)

摘要: 悬浮颗粒物 (SPM) 是湖泊水体中的重要光学活性物质, 其物质浓度与水体浑浊度、水色、透明度密切相关, 是衡量湖泊水质的关键指标。太湖、洪泽湖和巢湖作为长江中下游的主要大型湖泊, 受自然与人类活动共同作用, SPM 浓度呈现出显著的时空分异。尽管极轨卫星数据已广泛用于解析该区域湖泊悬浮物浓度的季节-年际动态, 但受限于可用影像覆盖不足, 月/日尺度等高频动态分析仍较匮乏。基于 2011 年 4 月-2020 年 12 月的 GOCI 卫星影像数据以及三大湖泊星地同步数据集, 本文评估现有 SPM 算法性能, 经遴选优化后确立最优反演算法, 应用至卫星影像数据经质量控制后得到三大湖泊长时序 SPM 浓度数据集。数据集为 GeoTiff 格式, 空间参考为 GCS_WGS_1984 地理坐标系, 共计包含 13262 个文件, 其中 2011—2020 年期间, 太湖、洪泽湖与巢湖各季度平均有效观测天数 (全湖可用像元占比 $\geq 85\%$) 分别约为: 23.4、27.5、33.4 和 18.1 天, 17.9、27.4、26.4 和 20 天, 17.3、23.7、26.9 和 21.8 天。验证表明: 三个研究湖泊的反演结果与野外实测数据在空间分异与长时序动态趋势上均高度一致 ($r > 0.95$, MAPE < 15%, RMSE < 5mg/L), 证明数据集的稳定可靠。本数据集较极轨卫星产品显著提升时间分辨率, 可提供更完整的湖泊 SPM 浓度日/月尺度动态, 精准捕捉季节-年际变化趋势。多时相观测优势进一步支持高频 SPM 动态监测, 有效解析暴雨径流、采砂及调水等短期强扰动事件的影响, 为阐明湖泊 SPM 短期-长期时空分异机制提供关键支撑, 具有重要应用价值。

关键词: 湖泊遥感; 悬浮颗粒物; GOCI; 数据集; 长江中下游湖泊

Remote Sensing Inversion Dataset of Suspended Particulate Matter Concentration in Three Major Lakes of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River from 2011 to 2020 Based on GOCI Satellite Data¹

Liu Cheng^{1,2,3}, Qi Tianci³, SHEN Ming³, Xiao Qitao³, Cao Zhigang³, Qiu Zhiqiang^{1,2,3}, Duan Hongtao^{1,2,3}

(1: College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an, 710127, P.R.China)

(2: Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an, 710127, P.R.China)

(3: State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

Abstract: Suspended particulate matter (SPM) concentration is a key optically active constituent governing lake water turbidity,

* 2025-09-18 投稿; 2025-12-11 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (42301422, 42425104, U24A20354) 和江苏省自然科学基金项目 (BK20231094) 联合资助。

通讯作者 Email: tcqi@niglas.ac.cn

colour, and transparency, and thus serves as a critical water-quality indicator. The three largest lakes in the middle–lower Yangtze River basin—Taihu, Hongze, and Chaohu—exhibit pronounced spatio-temporal SPM variability driven by both natural and anthropogenic forces. While polar-orbiting satellites have elucidated seasonal-to-interannual SPM dynamics, the scarcity of cloud-free imagery severely limits analysis at monthly to daily resolutions. To address this, we evaluated existing SPM algorithms using Level-2 imagery from the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) from April 2011 to December 2020 alongside quasi-synchronous in-situ measurements from the three lakes. The best-performing algorithm was selected, optimized, and applied to quality-controlled GOCI imagery to generate a long-term, hourly SPM concentration dataset. This dataset, comprising 13 262 files in GeoTIFF format (GCS_WGS_1984), provides high-temporal-resolution observations. During 2011 – 2020, the mean quarterly counts of valid-observation days (defined as days with $\geq 85\%$ lake area covered by usable pixels) were approximately 23.4, 27.5, 33.4, and 18.1 for Lake Taihu; 17.9, 27.4, 26.4, and 20.0 for Lake Hongze; and 17.3, 23.7, 26.9, and 21.8 for Lake Chaohu. Cross-validation demonstrated excellent agreement between satellite retrievals and in-situ data in both spatial patterns and long-term trends ($r > 0.95$, MAPE $< 15\%$, RMSE $< 5 \text{ mg L}^{-1}$), confirming the product's robustness. Compared to conventional polar-orbiting satellite products, this dataset achieves an order-of-magnitude improvement in temporal resolution, capturing complete daily and monthly dynamics and accurately resolving seasonal and inter-annual SPM variations. The dense time series further enables the detection of short-term, high-magnitude disturbances such as those from rainstorm runoff, dredging, and water-diversion events. Consequently, this dataset provides essential support for elucidating the mechanisms behind short- and long-term SPM variability and is of significant value for lake management and scientific research.

Keywords: remote sensing; suspended particulate matter; GOCI; lakes in middle and lower reaches of the Yangtze River; dataset

悬浮颗粒物 (Suspended Particulate Matter, SPM) 是指悬浮在水中的固体物质, 包括不溶于水的微生物、黏土、泥沙等。悬浮物的存在能够减少进入水体的光能量, 是水体中重要的光学活性物质之一, 对光具有强吸收和强散射的特性, 因此水体中的悬浮物浓度直接决定着水体浑浊度、水色、透明度等光学性质, 进而影响水体的初级生产力和生态系统类型^[1]。同时, 人类活动和气候变化导致湖泊水质不断恶化, 悬浮物吸附的营养盐, 重金属及有毒物质也深刻影响水体中相关物质的迁移-降解-转化过程, 加剧富营养化、有毒污染物积累与泥沙淤积等生态风险^[3]。因此, 湖泊水体悬浮物浓度作为水质评价的核心指标之一, 对其进行长期、有效的监测, 是实现湖泊科学管理与合理保护的重要支撑。

卫星遥感具备大范围、周期性观测的能力, 能够克服传统野外调查手段在时空覆盖上的不足^[6], 结合悬浮物特征波段可以快速且准确地获取水体悬浮物浓度的空间分布, 被广泛应用到湖泊悬浮物监测中^[8]。目前, 已有许多研究利用极轨卫星数据 (Landsat、Aqua/Terra 和 NPP 等) 实现了单个湖泊 (洞庭湖、太湖、洪泽湖)^[10]或者区域湖泊 (内蒙, 东部) 长时序悬浮物浓度监测^[13], 揭示了季节和年际时空变化特征和规律。而极轨卫星时间分辨率至高每天只有一次观测, 难以捕捉暴雨径流、采砂及调水等短期强扰动事件的影响^[15]。在云层覆盖周期与卫星观测时间重合时甚至会影响所捕捉的季节/年际动态的统计代表性。

地球静止轨道卫星可以在一天中进行多次对地观测, 为湖泊提供日间小时频率的观测。自全球首款对地静止观测卫星 ATS 发射以来, 世界各国相继发射了 Meteosat、GOCI、Himawari-8, 9、GOES-R、FY-4 和 GF-4 等静止观测卫星。静止卫星观测频率从最初的每小时一景到如今针对特定区域能够实现每 30 秒一景, 相较于极轨卫星能够提供几倍到几百倍的观测次数。而 GOCI 作为首款对地静止观测海洋水色卫星, 被广泛应用于亚洲东部水体短期动态变化监测。众多学者基于 GOCI 数据, 揭示了水体物质浓度的时空变化特征及其与环境因子的响应机制, 目前已有学者凭借 GOCI 成功识别内陆湖泊 Chla 浓度和藻华独特的日间变化模式^[17]。而 SPM 反演作为水环境遥感研究的热点之一, 以往已有相关针对单个湖泊或者类似浑浊水体的算法研究, 但是尚未在多个湖泊应用并产生标准数据集^[19]。

位于长江中下游的太湖、洪泽湖和巢湖, 分别是我国第三、四和五大淡水湖, 是重要的水源地和生物栖息地。三大湖泊作为典型浅水、地表径流补给型湖泊, 风浪和短期降雨事件入湖河流径流输入等自然因素会显著影响湖泊悬浮物浓度的时空分布^{[11][20]}。同时, 有关部门为缓解太湖水污染启动的“引江济太”水利

工程^[21]、洪泽湖长久以来存在的采砂活动^[22]以及巢湖流域经济快速发展引起的大量营养物质输入^[23]等一系列的人为活动也会引起湖泊悬浮物浓度的剧烈变化。这些自然及人为活动因素的叠加与相互作用甚至会使湖泊悬浮物浓度在季节-年际尺度外可能还存在日-月尺度上的显著分异，而难以被以往基于极轨卫星的数据集准确捕捉。因此本文针对江淮三大湖泊--太湖、洪泽湖和巢湖，评估现有 SPM 算法性能，经遴选优化后确立最优反演算法，并应用到卫星影像数据反演 SPM 分布，剔除有效像元小于 30%的结果后构建了 2011-2020 年江淮三大湖泊小时尺度 SPM 数据集（表 1）。该数据集旨在填补极轨卫星 SPM 产品在时空覆盖性、代表性的不足，为深入研究湖泊 SPM 的日间变化特征提供可靠的数据支持，推动湖泊水质监测与保护工作的进一步发展。

表 1.数据集基本信息简介

Tab.1 Introduction to the basic information of the dataset

条目	描述
数据集名称	《基于 GOCI 卫星数据的 2011-2020 年长江中下游三大湖泊悬浮颗粒物浓度遥感反演数据集》
数据通信作者	齐天赐 (tcqi@niglas.ac.cn)
数据作者	刘成、齐天赐、沈明、肖启涛、曹志刚、仇志强、段洪涛
数据时间范围	2011-2020 年
地理区域	30.8°N-31.6°N, 119.8°E-120.8°E;33°N-33.6°N, 118.1°E-118.9°E;31.4°N-31.7°N, 117.2°E-117.8°E
数据量	720MB
数据格式	.tif
数据链接及数据库	https://doi.org/10.5281/zenodo.16750745
基金项目	国家自然科学基金(编号: 42301422, 42425104, U24A20354)和江苏省自然科学基金项目(编号: BK20231094)

1 数据集研发方法

基于 2011-2020 年覆盖太湖、洪泽湖和太湖的 GOCI 遥感影像数据，本文生产了三个湖泊对应时段的小时尺度 SPM 空间分布数据集。数据集研发流程如图 2 所示，具体流程为：（1）获取 GOCI 原始卫星数据以及 MODIS 气溶胶产品；（2）对 GOCI 数据进行预处理得到遥感反射率并进行标准化与质量控制；（3）评估现有基于 GOCI 数据开发的 SPM 反演算法性能，经遴选得到最适算法并根据实测数据集重新率定算法系数，得到最优 SPM 反演算法；（4）将改进的算法应用到长时序 GOCI 遥感反射率数据，生成标准 SPM 数据集产品。

1.1 验证数据获取

为验证 SPM 数据集在不同湖泊的鲁棒性与长时序的稳定性，分别搜集了（1）2011-2020 年覆盖三大湖泊及同流域典型湖泊的多季节生物光学调查数据集，与（2）太湖湖泊生态系统研究站（简称太湖站，<https://thl.cern.ac.cn/>）2011 年-2016 年月度及季度湖泊水质调查数据集（表 2 和图 1）。其中，生物光学数据集中包含野外实测 R_{rs} 光谱与 SPM 浓度，太湖站水质调查数据集中包含 SPM 浓度。

将 2011-2020 年湖泊生物光学调查实测数据、2011 年-2016 年太湖站水质调查数据集与 GOCI 成像时间，按照±0.5h 的窗口进行匹配，经质量控制剔除云、耀光、藻华等非水体像元及受污染的低质量像元，最终分别得到 103 个星地匹配数据对（其中仅 95 个匹配对包含实测光谱和 SPM 浓度）、98 个星地匹配数据对（仅包含 SPM 浓度）。

1.2 GOCI 卫星遥感数据集获取、预处理与筛选

地球静止轨道海洋颜色成像仪 GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 是韩国海洋科学技术院研发的全球第一颗地球静止轨道卫星 COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) 上的有效载

荷, 其以韩国 (36°N, 130°E) 为中心, 可观测面积为 2500km×2500km, 同时作为水色卫星其波段范围为 412-865nm, 共覆盖可见光至近红外范围的 8 个波段。作为全球少数能提供小时尺度高质量观测数据的水色卫星, GOCI 于 2011 年 4 月正式投入运营, 并于 2021 年 3 月终止服役, 其观测数据的有效覆盖时段为 2011-2020 年。长达 10 年的连续高频观测数据, 是当前回溯长江中下游三大湖泊水色参数历史变化过程的关键数据源之一, 对解析区域湖泊水质长期演变规律具有不可替代的科学价值。

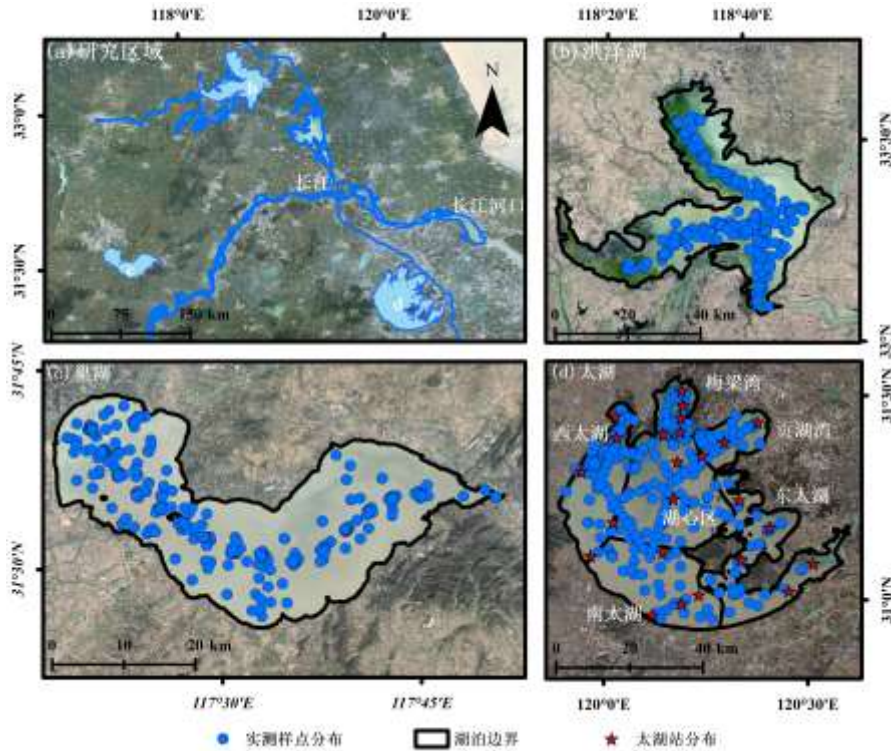


图 1. 长江中下游三大湖泊的地理位置以及野外采样点分布示意图

Fig.1. Schematic map showing the geographic locations of the three major lakes and the distribution of field sampling sites in the middle and lower reaches of the Yangtze River

从韩国海洋卫星中心 (<http://kosc.kiost.ac.kr/>) 下载 GOCI 的 L1B 影像数据, 数据时间跨度为 2011 年 4 月至 2020 年 12 月。L1B 级数据已经通过了韩国卫星中心辐射定标和几何校正处理。利用 SeaDAS 软件中的 SeaDAS-OCSSW 模块对 GOCI L1B 级数据进行处理, 得到经过水汽、臭氧校正与瑞利散射去除后的反射率 (R_{rc}) [24], 用于后续质量控制中对云、藻华、水生植被等非水体像元的剔除。同时, 已有研究表明使用 6SV 大气校正算法在光学特性复杂的浑浊水体具有强鲁棒性 [25], 因此本文使用 6SV 模型进行精确大气校正, 得到遥感反射率 (R_{rs})。从 NASA 地球观测系统数据和信息系统网站 (EOSDIS) 研发的 Earthdata Search 应用程序 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) 下载 MODIS 气溶胶产品 (MOD04_3K、MYD04_3K), 作为 6SV 大气校正的气溶胶光学厚度输入。大气模型为中纬度大气模型, 并根据影像日期选择冬季或夏季。

将 R_{rc} 与 R_{rs} 数据均投影至 WGS 1984 坐标系。为了便于后续一致性检验和水质参数的反演, 对数据进行标准化与质量控制:

(1) 首先, 根据湖泊的矢量边界对数据进行裁剪, 获取太湖范围 (30.8° N—31.6° N, 119.8° E—120.8° E) 数据、洪泽湖范围 (33° N—33.6° N, 118.1° E—118.9° E) 数据和巢湖范围 (31.4° N—31.7° N, 117.2° E—117.8° E) 数据;

表 2. 验证数据集航次信息

Tab.2. Cruise information for the validation dataset

数据来源	航次	湖泊	样点个数
2011—2020 年三大湖泊及同流域典型湖泊多季节生物光学调查数据集	201105、201108-09、201111、201303、201409、201611、201703-05、201709、202010	太湖	382
	201305-07、201309、201406、201409、201501、201504、201510、201609、201612、201702、201704、201708、201711、202008	巢湖	439
	201404-05、201410、201412、201505、201509、201602、201612、202008	洪泽湖	219
	201410、202009	高邮湖	21
2011—2016 年太湖站月度及季度湖泊水质调查数据集	201104-12、201201-12、201301-12、201401-12、201501-12、201601-12	太湖	1380
	202010	漏湖	20

(2) 将 R_{rs} 数据中红光 (R_{rs660})、绿光 (R_{rs555}) 和蓝光波段 (R_{rs490}) 合成真彩色影像 (RGB), 并对下载的 GOCI 数据进行目视解译, 去除掉高云覆盖率及存在太阳耀光污染的影像。

(3) 通过光谱指数剔除云、耀光、藻华、水生植被等非水体像元对悬浮物浓度反演的影响, 具体阈值如下: 当 $AFAI > 0.005$ 时, 视为藻华; 当 $R_{rc490} > 0.14$, $R_{rc555} > 0.16$, $R_{rc660} > 0.15$ 时, 视为云和耀光^[26]; 当 $AFAI > 0.02$, $AVI < 0.024$ 时, 视为沉水植被, 当 $AFAI < 0.01$, $ACMI < 0.03$ 时, 视为浮叶植被^[27]。光谱指数的具体计算公式为:

$$AFAI = R_{rc(745)} - R_{rc(660)} - (R_{rc(865)} - R_{rc(745)}) * \frac{(745-660)}{(865-660)} \quad (1)$$

$$AVI = R_{rc(555)} - R_{rc(490)} - (R_{rc(680)} - R_{rc(490)}) * \frac{(555-490)}{(680-490)} \quad (2)$$

$$ACMI = R_{rc(555)} - R_{rc(412)} - (R_{rc(865)} - R_{rc(412)}) * \frac{(555-412)}{(865-412)} \quad (3)$$

1.3 SPM 反演算法确立

1.3.1 SPM 反演算法综述 本文以“GOCI”、“SPM”及“Suspended Particulate Matter”为关键词, 在 Web of Science 数据库中系统检索了近年来基于 GOCI 数据的 SPM 反演算法研究, 系统梳理对比文献中算法的应用区域、大气校正方法与波段组合等要素后最终筛选出 13 篇代表性文献 (表 3), 并基于 2011-2020 年覆盖三大湖泊及同流域典型湖泊的多季节生物光学调查数据集初步重新率定文献中的算法系数, 表明以 $R_{rs745} + R_{rs865}$ 的波段组合算法性能最佳。

通过梳理可以发现, SPM 反演算法在波段选择、模型形式与应用区域上均呈现出多样化与优化趋势。早期算法多采用单一波段、形式简单的函数, 如 Moon 等^[28]在 Ahn 等^[29]基础上改进的单一波段算法以及 Choi 等^[30]利用 GOCI 红光波段建立的适用于浑浊水体的指数型 TSM 经验算法; 后期逐步发展为多波段组合、比值算法及区域定制化模型, 如 Huang 等^[31]开发了一种以 680 nm 反射率谷值深度为判据的区域经验组合算法以及 Lei 等^[35]基于 GOCI 多波段以及 TSM 反演中常见的波段比值, 筛选出 GOCI TSM 反演最佳波段组合。适用范围从开阔近海水体拓展至光学特性复杂的内陆湖泊, 同时研究热点区域从朝鲜半岛海域

[30]、中国渤海湾、杭州湾^[32]等近岸水体转换到内陆湖泊水体^[34]。

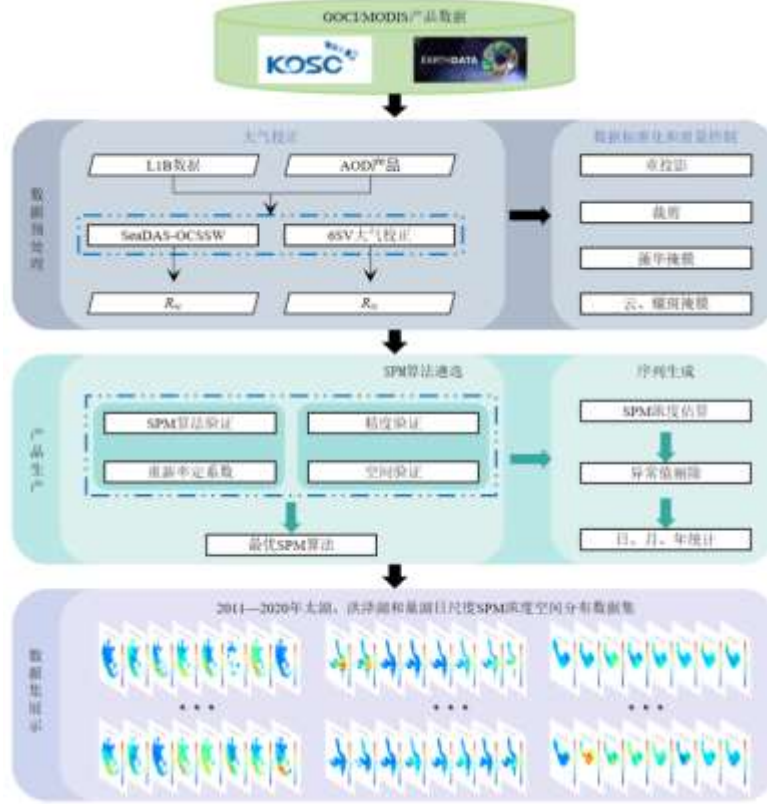


图 2.GOCI 长江中下游三大湖泊 SPM 数据集生成流程

Fig.2. Flowchart for Generating the GOCI SPM Dataset over the Three Major Lakes in the Middle - Lower Yangtze River Basin

1.3.2 SPM 反演算法选择和优化 在开展 SPM 反演算法验证前，首先对 6SV 大气校正精度进行了验证。将实测 R_{rs} 光谱与 6SV 校正后的结果进行对比（图 3），结果表明：在蓝光 412nm 波段和蓝光 443nm 波段出现负值，这可能是由于 6SV 在蓝光波段的过校正问题，因此剔除掉这两波段；除蓝光波段校正结果较差外红光以及红外波段校正效果较好($R^2 > 0.7$)，进一步说明了 6SV 模型适用于湖泊水体精确大气校正。精度评估所使用的决定系数 (R^2)、平均绝对百分比误差 (MAPE) 和均方根误差 (RMSE) 等统计指标的定义与计算公式为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (6)$$

将模型的反演公式应用于实测数据集，通过算法公式计算得到卫星反演的悬浮颗粒物浓度，并将其与实测的悬浮颗粒物浓度进行对比分析。验证结果表明，大多数算法在本文数据集上表现较差，这可能是由于部分算法是基于一类水体（如开阔大洋）的实测数据建立的算法，而其悬浮物浓度往往远低于内陆湖泊，从而会导致严重的低估现象（图 4 (a)，(h)）。而部分算法中遥感反射率所采取 GOCI 大气校正算法不同也会导致其表现较差（图 4 (j)，(d)）。此外，部分算法由于使用了校正精度差的蓝光波段 R_{rs} （图 4），导致了较差的反演结果（图 4 (k)）。在对比的算法当中，Xu 等^[36]综合性能最佳（图 4），这可能

是因为 Xu 等 (2019) 的算法是在光学特性复杂的内陆湖泊太湖上建立的, 同时其使用的大气校正算法为 6SV 大气校正, 再加上反演公式中所涉及的 GOCI 的 745 和 865 波段是本数据集中校正结果最佳的波段 (图 4 (e), (f)), 因此相同的研究区域和大气校正算法, 导致了 Xu 等 (2019) 的模型的表现要强于其他算法。

表 3. 基于 GOCI 卫星数据和实测数据估算 SPM 的代表性经验模型

Tab. 3. Representative empirical models for estimating SPM based on GOCI satellite data and in-situ measurement

ID	Study Area	R _{rs} 校正 算法	Band	R ² \MAPE\RMSE\N(率定系数后)	Reference
1	Ocean	GDPS 内 置算法	R _{rs} 555	R ² =0.11,MAPE=35.44%,RMSE=20.18	Moon et al.2010
2	Bohai	GDPS	R _{rs} 745	R ² =0.6,MAPE=22.16%,RMSE=11.57	Ruddick et al.2012
3	HZB	UV-AC	R _{rs} 745/R _{rs} 490	R ² =0.22,MAPE=30.33%,RMSE=19.72	He et al.2013
4	京畿湾	GDPS 内 置算法	R _{rs} 660	R ² =0.3,MAPE=31.99%,RMSE=17.97	Choi et al.2013
5	NJSW,SKCW	GDPS	R _{rs} 490/R _{rs} 555/R _{rs} 680	R ² =0.223,MAPE=30.69%,RMSE=19.38	Hu et al.2016
6	Bohai	FLAASH	R _{rs} 660	R ² =0.28,MAPE=29.66%, RMSE=18.21	Meng et al.2019
7	Lake Taihu	6S	R _{rs} 745/R _{rs} 680/R _{rs} 555	R ² =0.45,MAPE=27.63%,RMSE=16.18	Huang et al.2015
8	Lake Taihu	6S	R _{rs} 745	R ² =0.60,MAPE=25.98%,RMSE: 13.53	Du et al.2017
9	Lake Taihu	6S	R _{rs} 745	R ² =0.60,MAPE=25.98%,RMSE: 13.53	Hu et al.2018
10	Lake Taihu	6S	R _{rs} 660	R ² =0.3,MAPE=32.38%,RMSE=17.98	Cao et al.2018
11	Lake Taihu	6S	R _{rs} 745/ R _{rs} 865	R ² =0.72,MAPE=22.07%,RMSE=11.39	Xu et al.2019
12	Lake Taihu	UV-AC	R _{rs} 745/ R _{rs} 490	R ² =0.22,MAPE=30.33%,RMSE=19.72	He et al.2019
13	Lake Hongze	6S	R _{rs} 443/ R _{rs} 490/ R _{rs} 555/ R _{rs} 680/ R _{rs} 745/ R _{rs} 865	R ² =0.710,MAPE=22.00%,RMSE=11.551	Lei et al.2020

在此基础上, 为优化 Xu 等 (2019) 算法的参数, 本文采用浓度梯度法重新率定系数, 训练集与验证集按 6:4 划分。重新率定后的算法对于训练集具有较高的反演精度 (图 5 (b))。同时对于验证数据集也有较好的表现, 其决定系数 R²=0.70、均方根误差 (RMSE) 为 17.73 mg/L, 平均绝对百分比误差 (MAPE) 为 29.37%。验证训练数据中, SPM 浓度变化范围为 20-120 mg/L, 表明该算法在较宽浓度范围内具有良好的拟合能力和较强的鲁棒性。将重新率定后的 Xu 等 (2019) 算法作为 SPM 产品生产的最终算法, 算法具体公式为:

$$SPM = 67305.21*(R_{rs}(745)+R_{rs}(865))^2-1634.83*(R_{rs}(745)+R_{rs}(865))+45.87 \quad (7)$$

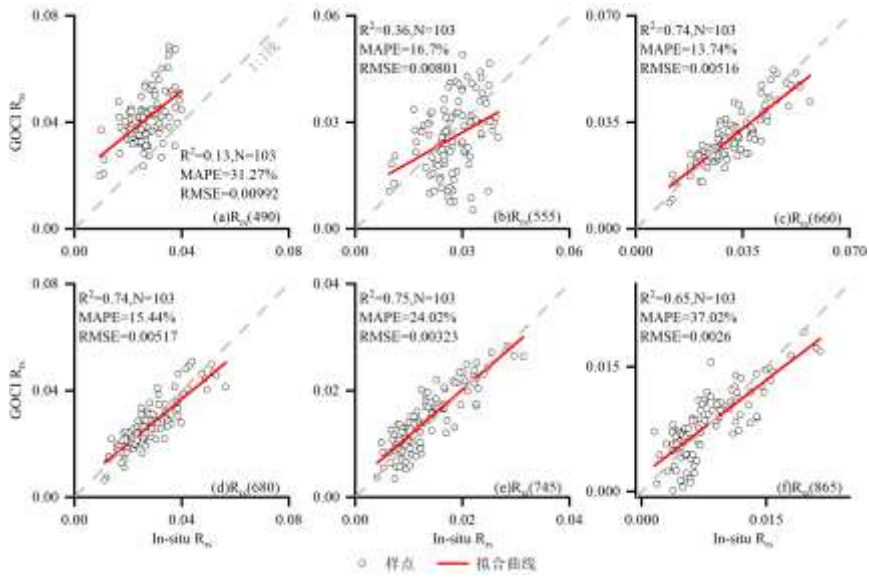


图 3.6SV 大气校正精度验证

Fig. 3. Accuracy validation of 6SV atmospheric correction

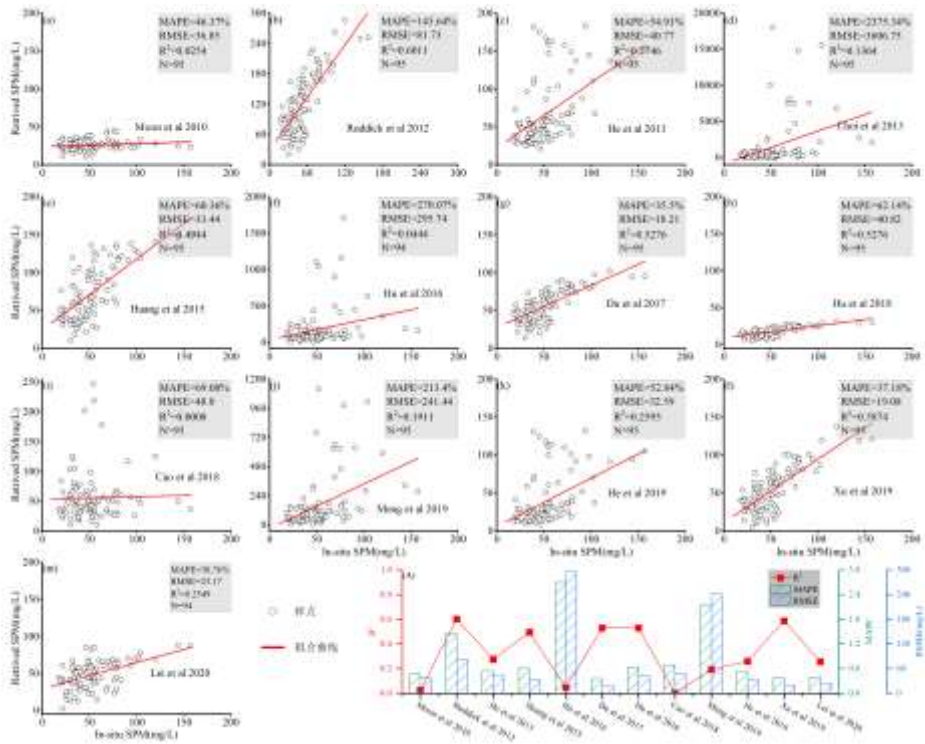


图 4.现有 SPM 反演算法的验证结果。图 A 为所有算法统计指标的对比图。由于 Choi 等人（2013）算法的统计指标与其他算法差异显著，故未在该图中展示

Fig. 4. Validation results of existing SPM inversion algorithms. A is a comparison chart of statistical indicators for all algorithms. The statistical indicators of the Choi et al., 2013 algorithm differ significantly from those of the other algorithms and are therefore not shown in the figure

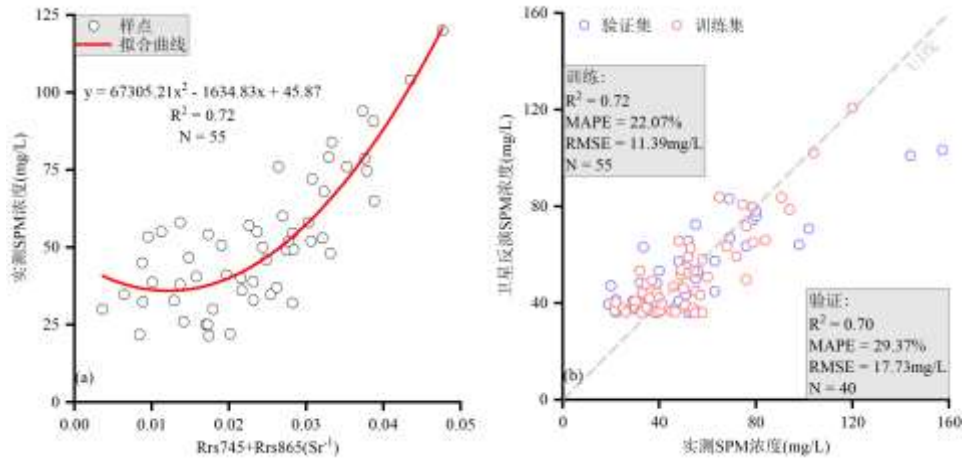


图 5.最佳算法重新拟合和验证

Fig.5. Refitting and validation of the optimal algorithm

1.4 SPM 序列生成

将改进后的最优算法应用于长时序 R_{rs} 数据,反演江淮三大湖泊 SPM 浓度的时空分布。考虑到基于光谱指数阈值的质量控制可能存在个别异常像元的遗漏,导致 SPM 浓度异常反演结果的存在。因此基于野外实测数据集,根据统计特征设置 SPM 浓度异常值阈值为 170 mg/L (即实测 SPM 浓度均值加 3 倍标准差),超出阈值的像元判定为异常值予以剔除。尽管质量控制过程中已剔除非云、耀斑、藻华及陆地像元,但是考虑到邻近效应的影响,进一步对筛选后的高质量像元边界向内腐蚀一个像元。此外,受云层、藻华大面积覆盖等因素影响,部分影像中有效水体像元比例显著降低。为确保数据集整体质量,本文仅保留有效水体像元占比超过 30%的影像用于计算湖泊 SPM 浓度均值。基于每景 GOCI 的 SPM 反演结果,本文按日期对同一天的多景影像进行平均,生成了 2011 年 4 月至 2020 年 12 月的 GOCI 对应时段的日均 SPM 浓度空间分布。在此基础上,进一步按月份计算月均值,并最终统计各年份的年均 SPM 浓度,得到长江中下游三大湖泊的年平均 SPM 空间分布。

2 数据集质量评估

2.1 SPM 反演算法独立验证

由于云、藻和非水体像元的影响,导致经过筛选后的星地匹配样本在时间分布上存在不连续性。为进一步评估算法在长时序下的适用性,本文引入太湖生态研究站 2011-2016 年连续观测的 SPM 浓度数据作为独立验证数据集。验证结果显示,该算法在长时间序列下仍具有良好表现 $R^2 > 0.9$, $MAPE < 15\%$, $RMSE < 5\text{mg/L}$ (图 6)。综合星地匹配验证与太湖站独立验证结果,表明改进后的 Xu 等 (2019) SPM 反演算法在江淮湖泊具有较强的适用性与稳定性,可为长时序湖泊水质监测提供可靠技术支撑。

2.2 SPM 数据集空间分布验证

为进一步验证所构建 SPM 数据集的空间分布合理性,分别在太湖 (2018 年 4 月 9 日)、洪泽湖 (2014 年 3 月 27 日) 和巢湖 (2018 年 5 月 9 日) 选取了晴朗无云的高质量 GOCI 影像,将算法应用到 GOCI 遥感反射率数据集中,再将算法反演的悬浮物空间分布图与 GOCI 的真彩色合成图像进行对比,对反演结果的空间分布进行验证。如图 7 所示,太湖全湖 SPM 反演浓度高值集中在南部和西南部,与 RGB 合成图像中黄褐色水体分布情况一致^[41],这一现象可能与苕溪河、太浦河等河流携带泥沙入湖有关。而洪泽湖由于淮河径流从湖泊西南部输入,其中携带的泥沙和营养物质导致湖泊西南部 SPM 浓度偏高。同样,由于巢湖主要入湖河流如杭埠河、白石山河、南淝河和派河等集中分布在湖泊西部,大量的外源输入导致了巢湖西部 SPM 浓度的高值现象。以上三个湖泊的 GOCI 反演的悬浮物空间分布与实际悬浮物浓度空间分布基本一致,从而证明了本文生成的悬浮物浓度数据集其空间分布符合实际情况,具有实用价值。

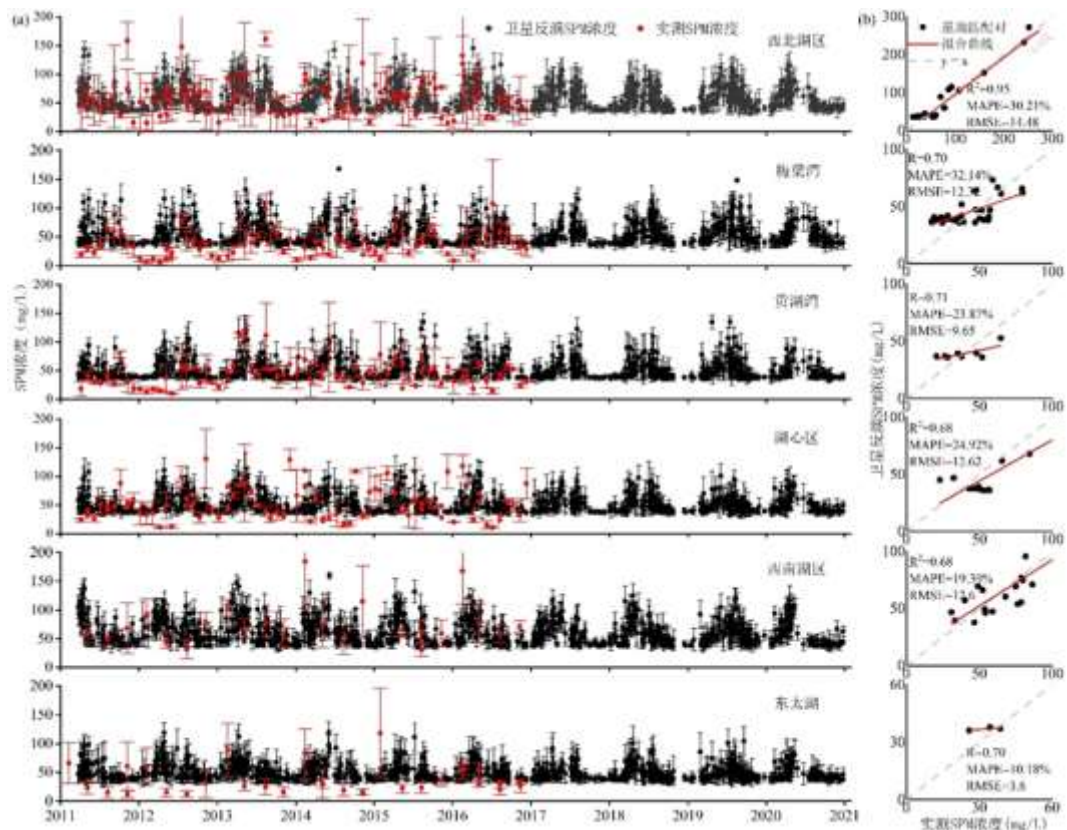


图 6.改进后 SPM 反演算法的太湖站长时序独立验证结果。其中 a 为太湖各子区 GOCI 估算（黑色圆点）与太湖站现场测定（红色圆点）悬浮物浓度的均值时间序列，b 则为太湖各子区太湖站星地匹配数据散点图。

Fig. 6. Independent long-term validation results of the improved SPM retrieval algorithm at the Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research (TLER). (a) shows the time series of mean SPM concentration estimated by GOCI (black circles) and measured at TLER (red circles) for each subregion of Lake Taihu. (b) presents the scatter plot of matchups between GOCI-estimated and in situ - measured SPM concentrations for each subregion by TLER.

2.3 SPM 数据集长时序验证

基于本数据集统计得到 2011—2020 年太湖、洪泽湖和巢湖年均 SPM 浓度时空分布显示（图 8），三个湖泊的 SPM 浓度均表现出明显的空间差异性。从空间分布特征来看，太湖西部、西南部悬浮物浓度整体高于东部水域，与已有研究结果相同。这是由于太湖西部风力作用强、南部苕溪河的径流输入，易导致湖泊沉积物再悬浮和大量泥沙物质输入，从而导致悬浮物浓度偏高^[11]。而洪泽湖 SPM 浓度高值主要集中在湖泊中部、东部，这与洪泽湖有关研究结果一致^[42]。这种空间分布特征主要是由于洪泽湖出湖河流集中分布在湖泊东部，悬浮颗粒会随着水体由西向东迁移，同时东部、中部湖泊风浪大、水流快，易导致悬浮物质再悬浮^[12]。巢湖的 SPM 浓度高值区域集中在湖泊西部，主要受控于西部多条主要入湖河流输入的大量泥沙物质^[43]。从 2011—2020 年三大湖泊全湖年均 SPM 浓度均值变化趋势来看，太湖整体悬浮物浓度在十年间出现上下波动，这是由于太湖 SPM 的年际变化与风力变化高度相关，而风速的不确定性导致太湖 SPM 独特的年际变化特征^[44]；由于洪泽湖当地政府在 2016 年颁发禁止采砂政策，导致了 2017 年悬浮物浓度的大幅下降^[22]，而由于年降雨量和年均风速的波动上升引起径流携带和沉积物再悬浮作用增强^[45]，导致 2018 年往后悬浮物浓度恢复到先前水平并平稳波动；巢湖整体呈现出波动上升趋势，受外源输入影响^[46]，2015 年和 2018 年悬浮物浓度小幅上升。

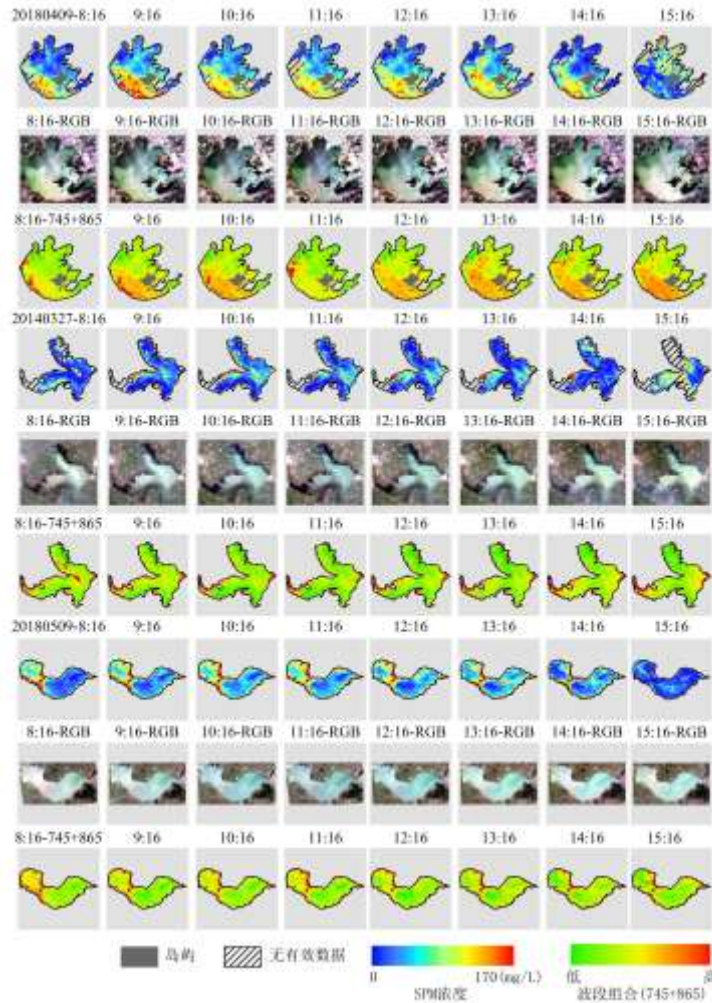


图 7. 长江中下游三大湖泊悬浮颗粒物浓度空间分布反演、波段特征组合与真彩色影像对比

Fig.7. Spatial Distribution Inversion, Band Feature Combination, and True-Color Image Comparison of Suspended Particulate Matter Concentration in the Three Major Lakes of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

3 数据集描述

数据集中 SPM 浓度分布图以 Geotiff 格式进行存储，单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，掩膜处理掉的像元以及质量控制中剔除的异常值像元的数值为 NaN。Tif 文件的空间参考坐标系为 WGS1984 地理坐标系，数据命名方式为“GOCI_id_YYYYMMDDhhmmss_SPM_hourly.tif”。下载地址为：<https://doi.org/10.5281/zenodo.16750745>。其中“id”为湖泊中文拼英的缩写，“TH”、“CH”和“HZ”分别为太湖、巢湖和洪泽缩写“YYYYMMDDhhmmss”为文件的时间戳，其中 YYYY 为年份，MM 表示为月份，DD 为日期，而 hh 表示时刻，从 00-07 分别涵盖上午 8:16 到下午 15:16 的数据，mm 表示分钟，ss 则表示秒。整个数据集共 13262 个文件，涵盖三个湖泊，时间范围为 2011 年 4 月—2020 年 12 月。三个湖泊每个月份的影像数量见表 4，其中巢湖、洪泽湖和太湖 2011-2020 年间每个季度平均影像数量分别为 59.4、135.9、150.8、84.2 景，72.7、143.5、124.4、84.1 景,88.5、144.2、174.4、64.1 景。

4 数据集使用建议

4.1 数据集优势

4.1.1 提供更完整的日尺度 SPM 序列 作为对地静止观测卫星，GOCI 具备一天八景的高频次成像优势，

能够显著提升有效观测能力。为评估其在实际观测中的表现，本文以太湖为例，将 GOCI 与常用高时间分辨率极轨卫星数据 Aqua-MODIS 在 2011-2020 年期间有效观测（可用像元百分比大于 85%）情况进行了对比分析。统计结果表明，GOCI 的月有效观测天数明显高于 MODIS，且由于其高频次观测特点，GOCI 每月可获取的有效影像数量远超 MODIS（图 9）。2011-2020 年间，相较于 MODIS 月均有效观测天数，GOCI 平均每月高出约 6.7 天有效观测，能够提高 287% 的日尺度序列覆盖。在极端情况下 MODIS 月有效观测几乎缺失（2014 年 10 月、2016 月 6 月等），但 GOCI 每月至少能够提供 1 天以上的有效观测。这主要源于 MODIS 成像时间集中在上午或下午固定时段，易受云雨等天气因素影响，导致部分湖体被云层遮挡，可用像元比例降低。相比之下，GOCI 在 8:16 至 15:16 期间每隔一小时获取一景影像，能够捕捉到云层的移动与消散过程，提升全天不同时间段的观测机会，显著提高有效像元比例与数据连贯性。因此，GOCI 相较于传统高时间分辨率卫星，具备获取更多、连续性更强的有效观测数据的优势，在湖泊悬浮物浓度变化监测中具有重要应用价值。

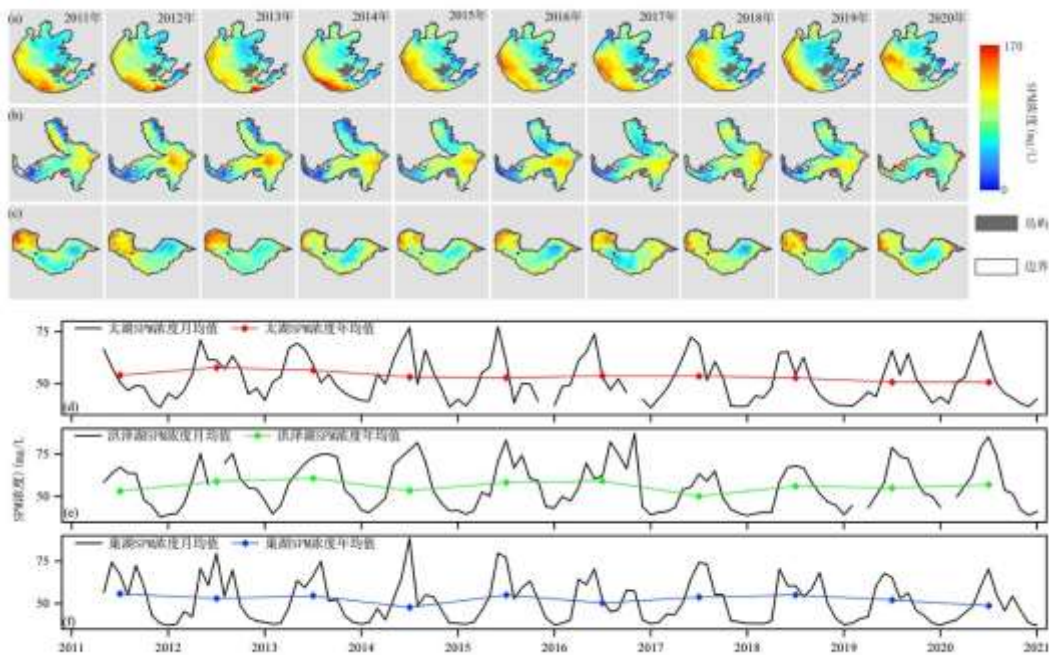


图 8.2011 年-2020 年长江中下游三大湖泊年平均 SPM 浓度空间分布图。其中，a、b 和 c 分别为太湖、洪泽湖和巢湖的年均 SPM 空间分布图，以及 d、e 和 f 分别为 2011 年-2020 年三个湖泊全湖年、月均 SPM 浓度的均值统计。

Fig.8. Spatial distribution of annual mean SPM concentration in the three major lakes of the middle - lower Yangtze River basin, 2011-2020. Panels a, b and c show the annual mean SPM distributions for Taihu, Hongze and Chao Lakes, respectively; panels d, e and f present the lake-wide annual and monthly mean SPM statistics for the three lakes over the period 2011 - 2020.

4.1.2 更具代表性的 SPM 空间分布 在对 GOCI 与 MODIS 在太湖区域的月尺度有效观测天数和有效影像数量进行对比的基础上，本文进一步从像元尺度，分析了两种卫星影像的有效观测能力差异。本文统计了 2011-2020 年两种卫星在太湖区域内各月份多年平均的逐像元月有效百分比空间分布。同时，为反映整体可用数据情况，分别统计了 MODIS 与 GOCI 的全湖平均月可用像元百分比（图 10）。结果表明：剔除部分受云雨等天气影响严重、数据质量较差的月份，GOCI 在太湖区域的月均可用像元百分比最低为 73.8%，平均值达 88.9%；而 MODIS 的月均可用像元百分比最低仅为 36.7%，平均值为 74.4%。进一步分析像元月均有效百分比发现，GOCI 在太湖区域全年各月份的像元月均有效百分比均明显高于 MODIS，尤其在多云雨的 6、7 和 8 月份，10 年间太湖全湖（除水生植被区）6-8 月份像元月均有效百分比的均值分别高出 23%、22%和 26%。综上，无论从整体可用像元比例，还是单像元月度有效观测频率来看，GOCI 均优于 MODIS，

能够提供更加丰富、连续、稳定的观测数据，对于湖泊水质动态变化监测具有显著优势。

表 4.2011-2020 年三大湖泊影像数量统计

Tab.4. Statistics of the Number of Images of the Three Major Lakes, 2011–2020

湖泊	年份	月份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
巢湖	2011	/	/	/	78	41	26	43	15	34	38	25	8
	2012	7	16	36	66	33	11	95	35	53	36	30	23
	2013	4	1	67	68	68	53	62	88	66	61	34	4
	2014	6	4	44	46	36	8	37	10	11	61	27	28
	2015	7	10	32	62	26	13	38	39	46	56	6	9
	2016	14	41	18	45	46	39	85	90	37	9	35	14
	2017	21	31	40	65	77	13	99	54	34	39	30	8
	2018	12	14	46	77	29	37	51	66	31	73	22	2
	2019	6	1	35	57	34	36	47	66	58	18	30	2
	2020	2	25	54	72	66	31	9	61	48	53	50	11
	总计	79	143	372	636	456	267	566	524	418	444	289	109
洪泽	2011	/	/	/	94	38	10	24	9	56	53	12	1
	2012	3	45	34	36	48	/	45	6	56	54	33	23
	2013	3	15	59	81	55	41	32	55	29	69	38	6
	2014	11	5	60	40	51	13	3	16	27	75	16	16
	2015	2	22	49	57	51	18	32	49	41	66	11	18
	2016	24	37	36	46	47	40	49	61	40	1	33	9
	2017	13	27	54	95	72	17	57	25	39	35	29	2
	2018	3	22	27	100	53	74	90	85	78	82	5	1
	2019	6	/	44	38	51	26	14	52	60	36	46	4
	2020	/	41	85	86	41	16	16	38	60	42	21	4
	总计	65	214	448	673	507	255	362	396	486	513	244	84
太湖	2011	/	/	/	93	68	16	41	13	45	39	13	18
	2012	9	20	58	78	84	11	90	50	53	48	27	16
	2013	11	15	35	78	60	19	102	97	53	44	14	11
	2014	25	20	80	48	50	12	54	26	20	84	9	20
	2015	11	31	37	78	40	32	29	66	47	32	/	15
	2016	15	56	52	47	49	22	88	90	49	14	5	/
	2017	35	52	53	85	34	17	89	61	20	13	9	15
	2018	18	40	63	82	39	42	93	115	36	55	2	8
	2019	9	1	39	55	52	30	52	52	62	30	20	9
	2020	3	42	55	79	35	7	3	97	51	32	16	23
	总计	136	277	472	723	511	208	641	667	436	391	115	135

4.2 数据集的应用价值

近年来，国内外研究学者利用极轨卫星数据对内陆水体的悬浮物浓度进行长时序监测，并深入分析了其季节-年际时空变化特征。但由于极轨卫星低时间分辨率以及卫星观测时间可能与云层覆盖周期重合，

使得极轨卫星的可用影像数量不足, 在极端的多云雨季甚至会影响极轨卫星捕捉悬浮物季节/年际动态的统计代表性。而 GOCI 凭借多时相观测特性, 能极大增加其在多云天气下观测到湖体的概率, 使得其相较于 MODIS 卫星在太湖区域具有更强的时空连续性(图 10)。因此本文基于 GOCI 卫星数据构建的长江中下游三大湖泊高时间分辨率悬浮物浓度数据集, 能够弥补极轨卫星产品在多云天气数据缺失, 为研究长江中下游三大湖泊悬浮物浓度季节-年际变化提供数据支撑。

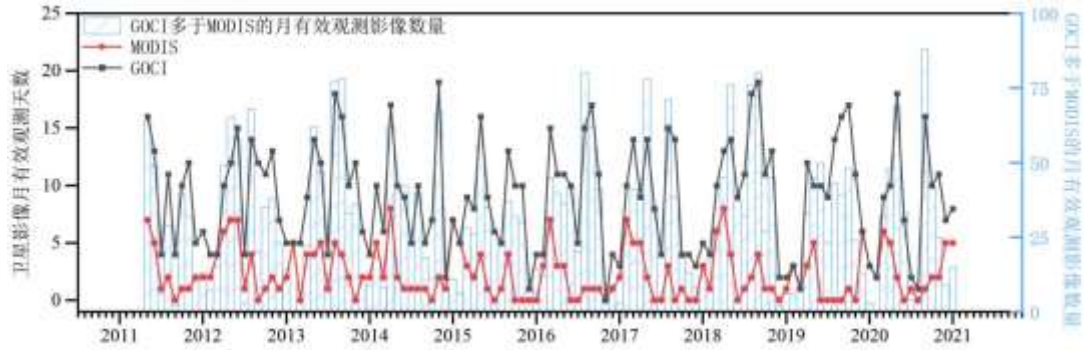


图 9.GOCI 与 MODIS 卫星 2011-2020 年在太湖区域月有效观测天数对比图。有效观测判定标准为 GOCI 单景或八景融合可用像元百分比 $\geq 85\%$, MODIS 单景可用像元百分比 $\geq 85\%$ 。

Fig. 9. Comparison of monthly effective observation days between GOCI and MODIS satellites in the Lake Taihu from 2011 to 2020. The criterion for effective observation is that the percentage of available pixels in a single scene or eight-scene fusion of GOCI is $\geq 85\%$, and the percentage of available pixels in a single scene of MODIS is $\geq 85\%$.

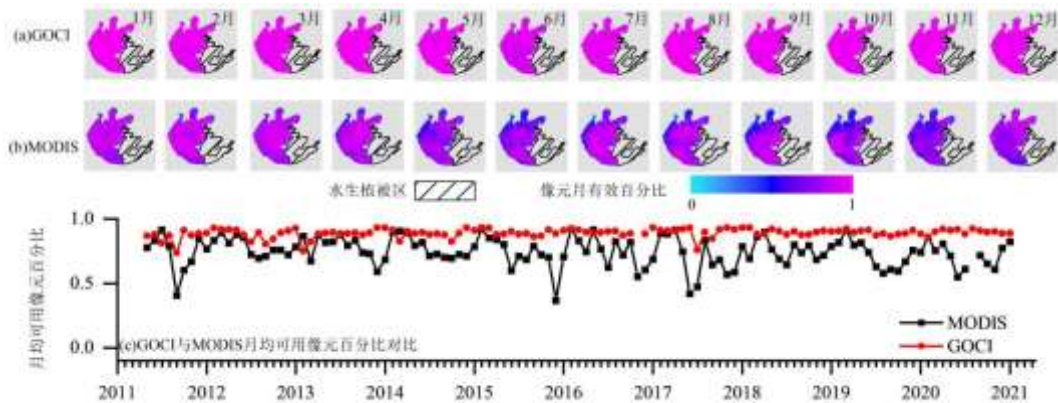


图 10.2011-2020 年 GOCI 与 MODIS 卫星在太湖区域像元月均有效百分比对比图。像元月均有效百分比为像元有效观测天数与月总有效观测天数的比值, 其中对于 GOCI 若像元在一天八景影像中至少在一景中存在有效观测值, 则像元在该天有效观测

Fig. 10. Comparison of monthly average effective pixel percentage between GOCI and MODIS satellites in the Lake Taihu from 2011 to 2020. The monthly average effective pixel percentage is the ratio of the number of effective observation days for a pixel to the total number of effective observation days in a month. For GOCI, if a pixel has at least one effective observation value in the eight daily scenes, it is considered effective for that day.

尽管已有研究揭示了悬浮物浓度与多种环境因子的季节、年际变化关系, 但湖泊水体物质变化具有突发性和短周期性特点, 短期内会出现明显的动态变化。如调水、采砂、农业面源污染等一系列短期人为干扰会引起湖泊悬浮物浓度发生剧烈变化。但受限于传统监测手段空间与时间分辨率的限制, 已往研究难以捕捉到湖泊水体在短期内的快速变化过程。因此本文基于 GOCI 卫星构建的 SPM 浓度数据集以期对突发事件下湖泊悬浮物浓度动态变化进行监测。以采砂活动为例, Cao 等(2017)研究指出洪泽湖日间长期存

在人工采砂作业，而采砂活动易导致水体中的沉积物再悬浮，导致湖泊中悬浮物浓度升高。得益于 GOCI 小时尺度的观测，记录下了 2014 年 4 月 8 日洪泽湖受采砂活动影响发生的日间悬浮物浓度骤增并逐渐下降的过程，期间洪泽湖三个虚拟站点悬浮物浓度平均相差 66.5mg/L，平均相对变化率约 95%（图 11（a1-a3））。

类似的，自然因素如突发强降雨事件、风速和风向等也会显著改变湖泊水体悬浮物含量。其中降雨过程不仅通过地表径流携带泥沙物质快速输入湖泊，还会加剧沿岸水体的水动力扰动，短时间内引发湖泊悬浮物浓度的剧烈波动。与中国气象局（<https://weather.cma.cn/>）气象监测记录相一致，本数据集成功捕捉了 2011 年 4 月 20 日太湖悬浮物浓度受流域内一次降雨事件引起的湖泊不同区域悬浮物浓度剧烈变化，太湖三个虚拟站点悬浮物浓度平均相差 54.5mg/L，平均相对变化率约 64%（图 11（b1-b3））。

此外，本研究基于 GOCI 数据构建的 SPM 数据集能够更好地监测特殊事件下湖泊悬浮物的短期变化。利用 Cao 等（2023）^[47]SPM 反演算法基于 MODIS 数据反演 SPM（图 11），虽然由于传感器与算法不同导致反演结果存在一定偏差（6 个虚拟站点的平均相对偏差为 28.7%），但是空间分布规律基本一致。受到人类活动与自然因素的影响，一天内不同时刻悬浮物浓度可能存在剧烈波动，最高相差 98.8mg/L 和 103.3mg/L（图 11（a1）和（b3）），相当于 MODIS 估算结果的 277%和 92%，是不可忽略的动态变化。综上，本研究构建的数据集能够捕捉湖泊水体悬浮物在短时间内的剧烈变化过程，也为深入研究湖泊生态系统对自然与人为干扰的响应机制、开展湖泊水环境实时监测与科学管理提供了重要数据支撑。

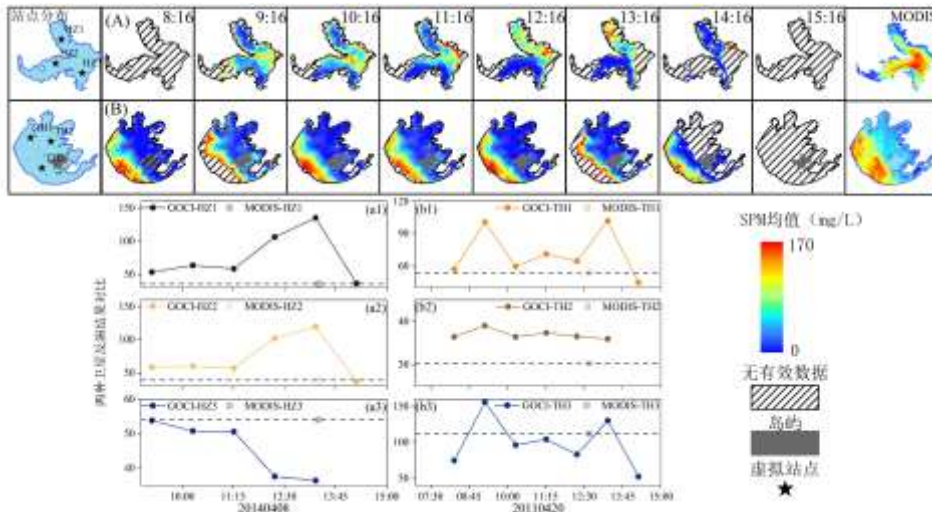


图 11. 在人为因素影响和自然影响下湖泊悬浮物浓度日间变化趋势图。A、B 分别为 2014 年 4 月 8 日洪泽湖、2011 年 4 月 20 日太湖悬浮物浓度卫星反演结果，a1-a3、b1-b3 则对应 2014 年 4 月 8 日、2011 年 4 月 20 日虚拟站点处 MODIS 与 GOCI 悬浮物浓度反演结果对比

Fig.11. Diurnal variation trend of lake suspended particulate matter (SPM) concentration under the influence of human activities and natural factors. Panels A and B represent the satellite retrieval results of SPM concentration in Hongze Lake on April 8, 2014, and Taihu Lake on April 20, 2011, respectively. Panels a1-a3 and b1-b3 correspond to the comparison of SPM retrieval results from MODIS and GOCI at virtual stations on April 8, 2014, and April 20, 2011, respectively.

5 结论

本文针对江淮三大湖泊--太湖、洪泽湖和巢湖，基于 GOCI 卫星数据评估现有 SPM 算法性能，经遴选优化后确立最优反演算法，并对表层水体悬浮物浓度进行逐像元反演，经质量控制后构建了 2011-2020 年江淮三大湖泊小时尺度 SPM 数据集。凭借 GOCI 传感器一天八景的高频次观测特性，以期捕捉湖泊悬浮物浓度在人类活动或者自然因素影响下动态变化。同时本文对数据集产品的精度和空间分布进行验证，结果表明算法在长江中下游区域的适用和数据集结果的真实可靠，进一步评估了遥感数据集与野外站点在长时序上的一致性。此外，本文还展示了数据集的优势特点与应用价值，希望能给相关学者以启发。

6 参考文献

- [1] Cole B E, Cloern J E. An empirical-model for estimating phytoplankton productivity in estuaries. *Marine Ecology Progress Series*, 1987, 36(3): 299-305. DOI: 10.3354/meps036299.
- [2] Zhang YL, Wu ZX, Liu ML et al. Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China. *Limnology and Oceanography*, 2014, 59(4): 1193-1202. DOI: 10.4319/lo.2014.59.4.1193.
- [3] Rickson R. Can control of soil erosion mitigate water pollution by sediments? *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 1187-1197. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.057.
- [4] Matthews M W, Bernard S, Winter K. Remote sensing of cyanobacteria-dominant algal blooms and water quality parameters in Zeekoevlei, a small hypertrophic lake, using MERIS. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 2070-2087. DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.013.
- [5] Neukermans G, Ruddick K, Loisel H et al. Optimization and quality control of suspended particulate matter concentration measurement using turbidity measurements. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2012, 10: 1011-1023. DOI: 10.4319/lom.2012.10.1011.
- [6] Sun DY, Huan Y, Wang SQ et al. Remote sensing of spatial and temporal patterns of phytoplankton assemblages in the Bohai Sea, Yellow Sea, and east China sea. *Water Research*, 2019, 157: 119-133. DOI: 10.1016/j.watres.2019.03.081.
- [7] TASSAN S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. *Applied Optics*, 1994, 33(12): 2369-2378. DOI: 10.1364/AO.33.002369.
- [8] Gordon H R. Radiative-transfer-technique for simulating ocean in satellite remote-sensing calculations. *Applied Optics*, 1976, 15(8): 1974-1979. DOI: 10.1364/AO.15.001974.
- [9] Holyer R J. Toward universal multispectral suspended sediment algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 1978, 7(4): 323-338. DOI: 10.1016/0034-4257(78)90023-8.
- [10] Zheng ZB, Li YM, Guo YL et al. Landsat-Based Long-Term Monitoring of Total Suspended Matter Concentration Pattern Change in the Wet Season for Dongting Lake, China. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13975-13999. DOI: 10.3390/rs71013975.
- [11] Shi K, Zhang YL, Zhu GW et al. Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250m MODIS-Aqua data. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 43-56. DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.029.
- [12] Cao ZG, Duan HT, Cui HS et al. Remote estimation of suspended matters concentrations using VIIRS in Lake Hongze, China. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(4): 462-469. DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2016.04.014.
- [13] Du YX, Song KS, Wang Q et al. Using Remote to Understand the Total Suspended Matter Dynamics in Lakes Across Inner Mongolia. *IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 7478-7488. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.097083.
- [14] Du YX, Song KS, Wang Q et al. Total suspended solids characterization and management implications for lakes in East China. *Science of The Total Environment*, 2022, 806: 151374. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151374.
- [15] Guo YN, Zhang C. Impact of meteorological factors on total phosphorus through suspended matter in Yuela Reservoir. *Water Resources Protection*, 2018, 34 (06): 71-75. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2018.06.12. [果有娜, 张晨. 2018. 气象因素作用下于桥水库悬浮物对总磷的影响. *水资源保护*, 34(06): 71-75.]
- [16] Hou XJ, Feng L, Duan HT et al. Fifteen-year monitoring of the turbidity dynamics in large lakes and reservoirs in the middle and lower basin of the Yangtze River, China. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 107-12. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.006.
- [17] Guo YY, Wei XQ, Huang ZH et al. Retrievals of Chlorophyll-a from GOCI and GOCI-II Data in Optically Complex Lakes. *Remote Sensing*, 2023, 15(19): 4886. DOI: 10.3390/rs15194886.
- [18] Wang SQ, Zhang X, Chen NC et al. Classifying diurnal changes of cyanobacterial blooms in Lake Taihu to identify hot patterns, seasons and hotspots based on hourly GOCI observations. *Journal Of Environmental Management*, 2022, 310: 114782. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114782.

- [19] Shao SD, Wang Y, Liu G et al. A Systematic Review of the Application of the Geostationary Ocean Color Imager to the Water Quality Monitoring of Inland and Coastal Waters. *Remote Sensing*, 2024,16(9): 1623.DOI: 10.3390/rs16091623.
- [20] Hu YD, Zhang YL, Yang B et al. Short-term dynamics and driving factors of total suspended matter concentration in Lake Taihu using high frequent geostationary ocean color imager data. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(4): 992-1003. DOI:10.18307/2018.0412. [胡耀霖,张运林,杨波等.基于高频次GOCI数据的太湖悬浮物浓度短期动态和驱动力分析.湖泊科学, 2018,30(4): 992-1003.]
- [21] Wu HY, Gan Y Y, Jin K. A retrospect on the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu during 2002-2021: Practices, achievements and future challenges.*Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(05): 1393-1412.DOI: 10.18307/2022.0500. [吴浩云, 甘月云, 金科.“引江济太”20年: 工程实践、成效和未来挑战. 湖泊科学, 2022, 34(05): 1393-1412]
- [22] Cao ZG, Duan HT, Feng L et al. Climate- and human-induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 98-113. DOI: 10.1016/j.rse.2017.02.007.
- [23] Zhang WS, Li HP, Xiao QT et al. Urban rivers are hotspots of riverine greenhouse gas (N₂O, CH₄, CO₂) emissions in the mixed-landscape chaohu lake basin.*Water Research*, 2021, 189: 116624.DOI: 10.1016/j.watres.2020.116624.
- [24] Hu CM, Chen ZQ, Clayton TD et al. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment*, 2004.,93(3): 423-441.DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.007.
- [25] Shen M, Duan HT, Cao ZG et al. Determination of the Downwelling Diffuse Attenuation Coefficient of Lake Water with the Sentinel-3A OLCI. *Remote Sensing*,2017,9(12): 1246.DOI: 10.3390/rs9121246.
- [26] Guo YY, Wei XQ, Huang ZH et al. Retrievals of Chlorophyll-a from GOCI and GOCI-II Data in Optically Complex Lakes. *Remote Sensing*, 2023,15(19): 4886.DOI: 10.3390/rs15194886.
- [27] Xue K, Ma RH, Cao ZG et al. Monitoring Fractional Floating Algae Cover Over Eutrophic Lakes Using Multisensor Satellite Images: MODIS, VIIRS, GOCI, and OLCI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4211715.DOI: 10.1109/TGRS.2022.3224221.
- [28] Moon J E,Ahn Y H ,Ryu J H et al. Development of Ocean Environmental Algorithms for Geostationary Ocean Color Imager(GOCI).*Ocean Science Journal*, 2010,47:247-259.DOI:10.1007/s12601-012-0026-2.
- [29] Ahn, Y H., Moon, J E., Gallegos S. Development of Suspended Particulate Matter Algorithms for Ocean Color Remote Sensing.*Korean Journal of Remote Sensing*, 2001,17(4):285-295. DOI:10.7780/kjrs.2001.17.4.285.
- [30] Choi J K, Park Y J, Lee B R et al. Application of the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) to mapping the temporal dynamics of coastal water turbidity.*Remote Sensing of Environment*, 2014,146:24-35.DOI: 10.1016/j.rse.2013.05.032.
- [31] Huang CC, Yang H, Zhu AX et al. Evaluation of the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) to monitor the dynamic characteristics of suspension sediment in Taihu Lake.*International Journal of Remote Sensing*,2015,36(15):3859-3874.DOI: 10.1080/01431161.2015.1070323.
- [32] Nechad B, Ruddick K G, Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(4): 854-866 .DOI: 10.1016/j.rse.2009.11.022.
- [33] He XQ, Bai Y, Pan DL et al.Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2013,133: 225-239.DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.023.
- [34] Du CG, Li YM, Wang Q et al.Tempo-spatial dynamics of water quality and its response to river flow in estuary of Taihu Lake based on GOCI imagery.*Environmental Science And Pollution Research*, 2017, 24(36): 28079-28101.DOI: 10.1007/s11356-017-0305-7.
- [35] Lei SH, Xu J, Li YM et al. An approach for retrieval of horizontal and vertical distribution of total suspended matter concentration from GOCI data over Lake Hongze.*Science of The Total Environment*, 2020,700:134524 .DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.134524.
- [36] Xu YF, Qin BQ, Zhu GW et al. High Temporal Resolution Monitoring of Suspended Matter Changes from GOCI Measurements in Lake Taihu.*Remote Sensing*, 2019,11(8):985.DOI: 10.3390/rs11080985.
- [37] Meng QH, Xu JP, Wang L et al. Diurnal Changes Monitoring and Analysis of the Total Suspended Matters in Bohai Sea Using Geostationary Ocean Color Imager. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 234(1): 012036-012036 .DOI:10.1088/1755-1315/234/1/012036.

- [38] Ruddick K, Vanhellefont Q, Yan J et al. Variability of Suspended Particulate Matter in the Bohai Sea from the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). *Ocean Science Journal*, 2012,47(3):331-345.DOI: 10.1007/s12601-012-0032-4.
- [39] Siswanto E, Tang J W, Yamaguchi H et al. Empirical ocean-color algorithms to retrieve chlorophyll-a, total suspended matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas.*Journal of Oceanography*, 2011, 67(5): 627-650.DOI: 10.1007/s10872-011-0062-z.
- [40] Hu ZF, Pan DL, He XQ et al. Diurnal Variability of Turbidity Fronts Observed by Geostationary Satellite Ocean Color Remote Sensing.*REMOTESENSING*,2016,8(2):147.DOI:10.3390/rs8020147.
- [41] Ma RH,Tang JW,Duan HT et al. Progress in lake water color remote sensing.*Journal of Lake Sciences*,2009,21(2):143-158 .DOI:10.18307/2009.0201.[马荣华,唐军武,段洪涛等.湖泊水色遥感研究进展.湖泊科学, 2009,21(2):143-158]
- [42] Li B, Pu P M, Han A M. Spatio-temporal correlation analysis of water quality in Hongze Lake. *Journal of Lake Science*, 2002, 14(3): 259-266.DOI:10.18307/2002.0311.[李波, 濮培民, 韩爱民.洪泽湖水质的时空相关性分析.湖泊科学, 2002,14(3): 259-266.]
- [43] Chen WJ,He ZW, Gao XJ et al. Analysis of Suspended Particulate Matter Concentration in Chaohu Lake Based on Landsat 8 Data.*Geospatial Information*, 2015,13(03): 101-103+11. DOI:10.3969/j.issn.1672-4623.2015.03.036 [陈婉佳, 何政伟, 高孝杰等.基于 Landsat8 数据的巢湖悬浮物浓度分析. 地理空间信息, 2015, 13(03): 101-103+11.]
- [44] Yin ZY, Li JS, Liu Y et al. Decline of suspended particulate matter concentrations in Lake Taihu from 1984 to 2020: observations from Landsat TM and OLI. *OPTICS EXPRESS*, 2022,30(13):22572-22589.DOI:10.1364/OE.454814.
- [45] 官效然.淮河流域典型湖泊浊度遥感反演及时空变化特征研究[学位论文].南京:南京信息工程大学,2025.
- [46] Zhang JS, Wang H, Liu Y et al. Spatio-Temporal Variation of Total Phosphorus Concentration in the River - Lake System of the Chaohu Basin, 2014 - 2023.2025,17(02):105-111.DOI: 10.3969/j.issn.1674-6732.2025.02.015 [张劲松,王欢,刘阳等.2014—2023年巢湖流域河湖系统总磷浓度时空变化特征分析.环境监控与预警,2025,17(02):105-111.]
- [47] Cao ZG, Hu CM, Ma RH et al. MODIS observations reveal decrease in lake suspended particulate matter across China over the past two decades.*Remote Sensing of Environment*,2023,295.DOI: 10.1016/J.RSE.2023.113724