



沿海港口疏浚工程悬浮物浓度遥感反演研究*

王文渊, 陈林涛, 徐星璐, 李鑫
(大连理工大学, 辽宁大连 116024)

摘要: 为对沿海港口疏浚工程产生的悬浮物浓度进行有效的高时空分辨率动态监测, 利用静止轨道卫星 GOCI II 高时空分辨率的优势, 根据实测水质样本悬浮物浓度数据和卫星遥感影像预处理后的遥感反射率, 采用参数相关分析方法选取反演波段, 建立基于单波段和波段比值的指数、线性、对数、多项式等反演模型, 比选出最优模型并进行验证。应用该模型对某港区某日航道维护性疏浚作业水域以及倾倒水域的悬浮物浓度变化情况进行监测, 结果表明其高时空分辨率的优势能更好地适应范围小、水质变化迅速的疏浚作业区和倾倒区特点, 可追踪监测工程区域及周围海域悬浮物浓度的连续变化, 为绿色疏浚提供参考。

关键词: 疏浚工程; 遥感监测; 悬浮物浓度; 倾倒区; GOCI II

中图分类号: U616; P237

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0008-06

Remote sensing inversion of suspended particulate matter concentration in coastal port dredging project

WANG Wenyuan, CHEN Lintao, XU Xinglu, LI Xin
(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To effectively and dynamically monitor the concentration of suspended particulate matter produced by dredging projects in harbor waters with high spatial and temporal resolution, this study utilizes the advantages of the geostationary satellite GOCI II, and based on the single band and the band ratio, the inversion bands are selected through parametric correlation analysis. According to the measured suspended particulate matter concentration data of water quality samples and the remote sensing reflectance data after satellite remote sensing image preprocessing, the parameter correlation analysis method is used to select the inversion band, and the exponential, linear, logarithmic and polynomial inversion models based on single band and band ratio are established, and the optimal model is selected and verified. The model is used to monitor the variation of suspended particulate matter concentration in the channel maintenance dredging operation water area and the dumping water area of a port area on a certain day. The results show that the advantages of high spatial and temporal resolution can better adapt to the characteristics of dredging operation area and dumping area with small range and rapid water quality change. It can track and monitor the continuous change of suspended particulate matter concentration in the project area and surrounding waters, and provide reference for green dredging.

Keywords: dredging project; remote sensing monitoring; suspended particulate matter concentration; dumping area; GOCI II

收稿日期: 2024-01-04

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2600200); 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目 (XLYC2203018)

作者简介: 王文渊 (1984—), 女, 博士, 教授, 研究方向为绿色港口空间规划、港口生产系统智能调度、生态型港口水工结构等领域。

疏浚工程产生的污染物会对水域生态环境造成不利影响^[1], 其中悬浮物(suspended particulate matter, SPM)是诸多海洋工程建设、维护期间的主要污染因子^[2], 对海域污染分布和扩散研究十分重要^[3]。SPM 浓度监测方式主要有传统的站点实测和遥感反演法, 传统监测方法效率较低、成本高^[4], 监测范围有限, 不能满足工程区海域悬浮物浓度多变的实际情况; 而遥感反演法具有监测范围大、覆盖面全、灵活等特点, 相比传统检测方法更具优势^[5], 反演方法主要包括分析法^[6]、半分析法^[7]、经验法^[8]、机器学习^[9]等, 可用于湖泊、河口等区域, 监测水质变化^[10-11]。港口疏浚工程作业区域范围相对较小, 水质变化快, 对监测的时间分辨率有更高的要求, 当前未见有针对港口维护性疏浚工程作业产生的 SPM 浓度单日时空分布变化进行遥感反演的研究。近岸工程海域的 SPM 浓度变化具有显著时变特征, 常用的极轨卫星水色传感器如 MODIS、MERIS、SeaWiFS 以及我国的海洋系列卫星等, 受限于其相对较低的时间分辨率($>1\text{ h}$), 难以满足对 SS 的单日时空变化动态监测要求。静止轨道卫星在时间分辨率方面更具优势, 我国地球静止轨道卫星高分四号(GF-4)目前已在河口水体表层悬浮泥沙反演上有所应用^[12]。韩国静止轨道卫星(GOCI II)覆盖我国渤海、黄海和部分东海海域, 已用于叶绿素 a^[13]、海表盐度浓度反演^[14], 而 SPM 浓度反演相关研究尚未见报道。

为对某港口航道维护性疏浚作业产生的 SPM 浓度日变化进行遥感监测研究, 本文根据实测水质样本 SPM 浓度数据和卫星遥感影像, 采用参数相关分析方法选取反演波段, 建立并验证了基于单波段和波段比值的指数、线性、对数、多项式反演模型。基于反演模型, 结合疏浚船队的作业情况, 反演工程区及周围海域 SPM 浓度的连续变化, 揭示了疏浚过程中疏浚区和海洋倾倒区的 SPM 浓度变化特征。所提出的方法可实现高动态海域 SPM 浓度监测, 以期为制定绿色疏浚方案和推进港口海域环境保护提供技术支撑。

1 研究方法

研究技术路线如图 1 所示, 利用实测的悬浮物浓度数据和遥感影像的遥感反射率数据进行相关性分析, 筛选出敏感波段, 用统计学方法构建水体 SPM 浓度的遥感反演模型并进行模型精度验证, 最后将其应用于疏浚工程区 SPM 浓度反演分析。

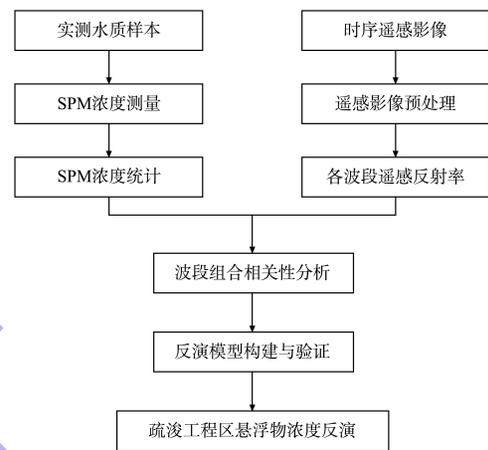


图 1 研究技术路线

2 研究区域概况

某海港于 2023 年 11 月对主航道进行维护性疏浚作业, 施工区域与疏浚物倾倒区域如图 2 所示。

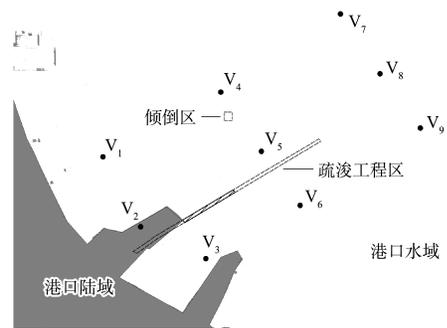


图 2 港区疏浚物临时性海洋倾倒区位置与采样站点分布

3 数据处理

3.1 实测 SPM 浓度数据

采用 2023 年 5 月实测数据, 水质站点位置如图 2 所示, 水质样本通过测量船只获取, 采样深度为水面下 0.5 m, 采样时间为每日整点时刻。SPM 浓度采用称重法测定, 操作过程严格遵守 GB 17378.4—2007《海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析》^[15], 共获得 41 组有效数据。

3.2 遥感数据

卫星拍摄时间与采样时间往往存在一定的时间窗口，其长短对于反演结果影响明显^[16]。GF-4 每日对外分发的数据产品的观测时间未统一，不易与实测水质数据时间相对应。GOCI II 从北京时间 07:15:00 逐小时观测至 16:15:00，每日 10 景，空间分辨率为 250 m，拍摄时间与实测水质数据时间窗口为 15 min，极大减小了反演的不确定性。本研究选取 16 幅 GOCI II L1B 级遥感影像，其中 10 幅的时间为 2022 年 5 月（与实测数据采集时间同步），用于构建遥感反演模型；其他 6 幅的时间为 2023 年 11 月某日，为疏浚施工当日影像，用于悬浮物反演监测。遥感数据均来自韩国海洋卫星中心，使用 ENVI 软件对影像进行辐射定标、几

何校正、大气校正处理后获得遥感反射率。

4 SPM 浓度遥感反演

4.1 反演模型构建

研究选取 GOCI II 前 10 个波段，波长分别为 380、412、443、490、555、620、660、680、709 nm，通过 Pearson 相关分析获取与 SPM 浓度关系密切的敏感波段。将上文得到的 41 份对应实测站点水样 SPM 浓度与遥感反射率数据集随机分为 31 份和 10 份，前者作为训练集用于模型构建，后者用于验证反演模型。由训练集得到各波段遥感反射率和 SPM 浓度之间的相关系数，如表 1 所示，波段 555、620、660、680、709 nm 与 SPM 浓度之间呈现较显著的相关性，因此可以用该 5 个波段构建 SS 反演模型。

表 1 各波段遥感反射率和 SPM 浓度之间的相关系数

波段/nm	380	412	443	490	510	555	620	660	680	709
R	0.22	0.36	0.51	0.57	0.59	0.66	0.81	0.83	0.84	0.85

使用波段比值代替单一波段可以一定程度上增强遥感反射率与 SPM 浓度的联系。因此采用 5 个波段及其波段比值组合进行相关分析，分析之

前进行 Shapiro-Wilk 检验，均符合正态分布。5 个波段及波段比值相关系数见表 2。

表 2 各波段和波段组合的 Pearson 相关系数

波段或波段组合/nm	Pearson 相关系数	概率 <i>p</i>	样本数	波段或波段组合/nm	Pearson 相关系数	概率 <i>p</i>	样本数
555	0.664	<0.001	31	660/709	-0.733	<0.001	31
620	0.805	<0.001	31	680/709	-0.707	<0.001	31
660	0.834	<0.001	31	620/555	0.844	<0.001	31
680	0.843	<0.001	31	660/555	0.864	<0.001	31
709	0.846	<0.001	31	680/555	0.870	<0.001	31
555/620	-0.760	<0.001	31	709/555	0.863	<0.001	31
555/660	-0.754	<0.001	31	620/660	0.843	<0.001	31
555/680	-0.770	<0.001	31	680/620	0.831	<0.001	31
555/709	-0.726	<0.001	31	709/620	0.826	<0.001	31
620/660	-0.812	<0.001	31	680/660	-0.069	0.711	31
620/680	-0.797	<0.001	31	709/660	0.782	<0.001	31
620/709	-0.755	<0.001	31	709/680	0.761	<0.001	31
660/680	0.056	0.766	31				

由表 2 可知，波段组合 680/555 nm 与 660/555 nm 与 SPM 相关性最为显著，分别利用单波段 608、709 nm 与比值波段 680/555 nm 与 660/555 nm 建立 4 种模型进行分析，其表达式、决定系数 R^2 、均

方根误差 M 如表 3 所示。由表 3 可知，基于 660/555 nm 波段构建的指数和多项式模型与 SPM 相关性最好，均方根误差最小，对该比值波段构建的 2 个模型分别进行验证。

表 3 波段/波段比值模型表达式

波段或波段比值/nm	模型类别	表达式	R^2	M
680	指数	$y = 4.6643e^{111.06x}$	0.77	10.71
	线性	$y = 2.5058x - 3.2723$	0.71	11.90
	对数	$y = 21.233\ln x + 126.11$	0.60	14.02
	多项式	$y = 108.692x^2 - 211.29x + 6.9847$	0.75	10.96
709	指数	$y = 5.8792e^{141.13x}$	0.74	11.10
	线性	$y = 3.2836x + 1.3353$	0.72	11.80
	对数	$y = 16.552\ln x + 113.94$	0.59	14.10
	多项式	$y = 139.692x^2 + 863.43x + 6.4333$	0.74	11.24
660/555	指数	$y = 2.7542e^{3.2132x}$	0.79	9.87
	线性	$y = 73.548x - 15.691$	0.75	11.15
	对数	$y = 36.275\ln x + 50.791$	0.66	12.86
	多项式	$y = 80.985x^2 - 24.55x + 7.7807$	0.80	9.98
680/555	指数	$y = 2.8576e^{3.2793x}$	0.77	10.16
	线性	$y = 76.622x - 15.609$	0.76	10.91
	对数	$y = 37.498\ln x + 53.293$	0.68	12.52
	多项式	$y = 69.049x^2 - 6.0944x + 3.9377$	0.79	10.06

注: y 为 SPM 浓度, x 为波段比值或者波段比值。

4.2 反演模型精度评估

采用 M 和平均绝对百分比误差 E 评估模型的反演精度:

$$M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{mod,i} - x_{obs,i})^2} \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{mod,i} - x_{obs,i}}{x_{obs,i}} \right| \quad (2)$$

式中: $x_{mod,i}$ 为第 i 个实测站点的计算值, $x_{obs,i}$ 为第 i 个实测站点的实测值, n 为实测站点的个数。将 10 组验证集数据代入模型验证, 结果见表 4。

表 4 验证集模型误差参数

模型类别	表达式	M	$E/\%$
指数	$y = 2.7542e^{3.2132x}$	4.08	18.85
多项式	$y = 80.985x^2 - 24.55x + 7.7807$	4.26	21.99

图 3 为模型预测值与实测值的对比分析, 由图可知, 两种模型的预测值和实测值拟合良好, 均可应用于 SPM 浓度的反演。指数模型 R^2 为 0.79, E 为 18.85%, 反演性能良好, 因此选择指数模型进行反演研究。得到的反演公式为:

$$c = 2.7542e^{3.2132x} \quad (3)$$

式中: c 为 SPM 浓度, g/m^3 。

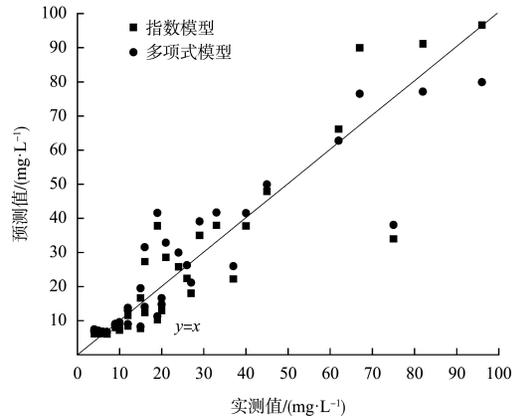
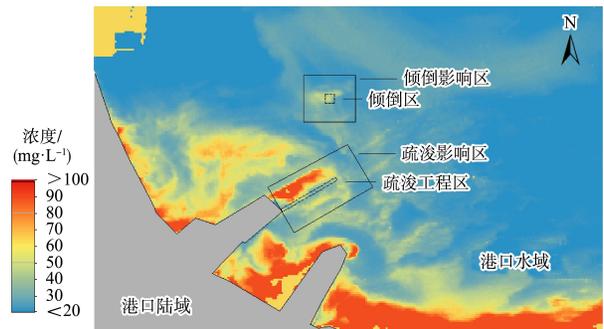


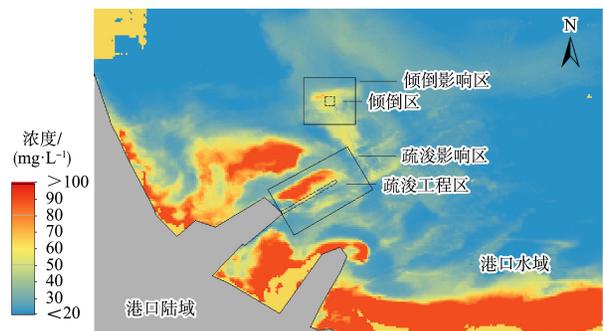
图 3 SPM 浓度模型预测值和实测值对比

4.3 研究区悬浮物遥感分析

利用悬浮物浓度反演模型, 输入研究区域 2023 年 11 月某日 T08:15:00—13:15:00 的基于 GOCI II 的 SS 浓度反演影像, 得到反演结果如图 4 所示。由于疏浚和倾倒入作业后 SPM 随潮流向周围移动扩散, 影响区域也随之变化, 且卫星影像与实际作业具有一定的时间差, 在该时间窗口内悬浮物已随水流向周围海域移动, 因此将疏浚作业区和倾倒入区向周围海域扩张 4 km 分别作为疏浚影响区和倾倒入影响区, 研究此区域内 SPM 浓度变化情况。



a) 08:15:00



b) 09:15:00

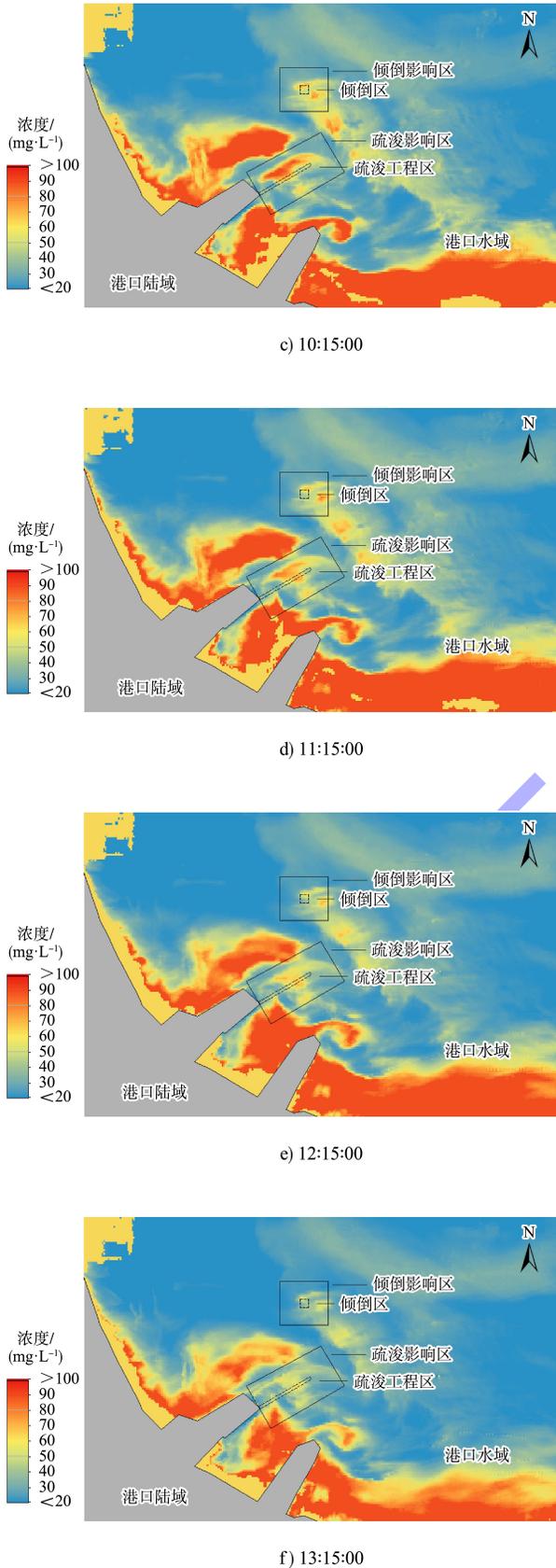


图4 研究区域 SPM 浓度的时空分布

由图4可知，悬浮物反演图像均显示港区近海海域 SPM 浓度由近岸向远海呈递减趋势。疏浚

影响区内条状 SPM 浓度高值区域随水流向外海扩散且浓度逐渐下降，倾倒影响区内团状 SPM 浓度高值区域随时间和水流影响向周围扩散移动，与疏浚物入水后扩散运动一致。

由图5可知，由于疏浚船队2023年11月某日00:00:00—08:00:00疏浚作业频繁，因此08:15:00疏浚影响区平均 SPM 浓度达到最大值，而08:15:00—13:15:00由于通航船舶更多，疏浚船需避让来往船舶，疏浚作业间隔加长且疏浚量有所减少，SPM 在海域中扩散稀释，使得疏浚影响区内条状 SPM 浓度高值区域浓度值逐渐减小。11:15:00疏浚影响区平均 SPM 浓度有所上升是因为西南区域内高浓度 SPM 水体随水流进入疏浚影响区，与区域内疏浚工程无关。在倾倒影响区1号疏浚船于08:43:00倾倒、2号疏浚船于09:30:00倾倒作业后，SPM 平均浓度由08:15:00的31.49 mg/L上升至44.98 mg/L，随后逐渐下降至32.57 mg/L。

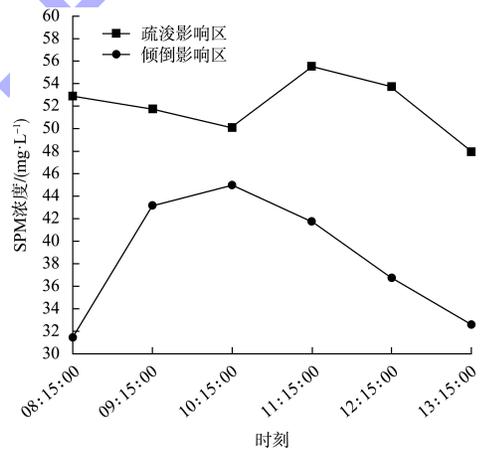


图5 影响区平均 SPM 浓度

5 结语

1) 研究针对传统监测方法对疏浚工程区域作业监测在监测范围和频率上的不足，采用遥感监测的方法，具有效率高、成本低、监测范围大等优势，应用静止轨道卫星 GOCI II 进行监测，更适用于疏浚海域。

2) 基于实测数据，建立了港口近海水域悬浮物浓度的反演模型，模型验证结果表明，基于波段比值的指数模型具有良好的反演能力，相关系数为 0.89，相对误差为 18.85%。

3) 将模型应用于 2023 年 11 月某日航道维护性疏浚工程, 显示出基于 GOCI II 反演的逐时悬浮泥沙图能较好地工程范围内海域悬浮物浓度进行监测, 为绿色疏浚提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 周芳, 陈明波. 港口建设对水动力和水环境的综合影响[J]. 水运工程, 2020(9): 91-96.
- [2] 于川洋, 王林, 赵素芳, 等. 基于多源卫星影像的海洋工程邻近海域悬浮物浓度遥感监测[J]. 环境影响评价, 2023, 45(5): 17-21, 52.
- [3] 孟庆辉, 王林, 陈艳拢, 等. 基于 GOCI 的渤海悬浮物分布及日变化遥感初探[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(6): 73-78.
- [4] ZENG F X, SONG C Q, CAO Z G, et al. Monitoring inland water via Sentinel satellite constellation: A review and perspective [J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2023, 204(10): 340-361.
- [5] 岩腊, 龙笛, 白亮亮, 等. 基于多源信息的水资源立体监测研究综述[J]. 遥感学报, 2020, 24(7): 787-803.
- [6] DEKKER A G, VOS R J, PETERS S W. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes[J]. Science of the total environment, 2001, 268 (1/3): 197-214.
- [7] 顺布日, 青松, 郝艳玲. 基于半分析方法的黄河口悬浮物浓度遥感反演[J]. 海洋科学, 2019, 43(12): 17-27.
- [8] 陈仲锴, 厉小润, 赵辽英. 基于高光谱数据波段选择的茅洲河悬浮物浓度反演[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 27-35.
- [9] 吴陈昊, 付学良, 李宏慧, 等. 基于 M-GA-BP 模型的乌梁素海悬浮物浓度反演研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 49-52.
- [10] 曲伟, 庞治国, 雷添杰, 等. 中小河流治理及监测监管中的遥感技术应用综述[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(7): 23-32.
- [11] 谢恩弘, 吴骏恩, 杨昆. 基于 Sentinel-2 影像的洱海叶绿素 a 质量浓度反演[J]. 环境工程学报, 2022, 16(9): 3058-3069.
- [12] 陈琼, 唐世林, 吴颀. 基于 GF-4 卫星反演的珠江口水体表层悬浮泥沙时空变化特征[J]. 热带海洋学报, 2022, 41(2): 65-76.
- [13] GUO Y Y, WEI X Q, HUANG Z H, et al. Retrievals of Chlorophyll-a from GOCI and GOCI-II Data in optically complex lakes[J]. Remote sensing, 2023, 15(19): 4886.
- [14] KIM D W, KIM S H, BAEK J Y, et al. GOCI-II based sea surface salinity estimation using machine learning for the first-year summer[J]. International journal of remote sensing, 2022, 43(17/18): 6605-6623.
- [15] 国家海洋环境监测中心. 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析: GB 17378.4—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] 宋南奇, 王诺, 吴暖, 等. 填海施工区悬浮物浓度遥感监测方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(5): 1108-1121.

(本文编辑 王传瑜)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部