

浙江近海夏季表层悬浮体浓度和浊度特征及其在遥感解译中的应用

李金铎, 段悦, 蒋叶娟*

自然资源部宁波海洋中心, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年2月8日; 录用日期: 2025年3月1日; 发布日期: 2025年3月10日

摘要

浙江近海悬浮体浓度(SSC)和水质浊度(WT)空间分布差异巨大, 利用遥感反演的方法获得SSC误差较大。根据2023年夏季浙江近海水体大量同步实测数据, 对SSC和WT分布特征、影响因素进行了分析。结果表明, 表层水体的温度对SSC和WT影响不大, 盐度与二者均为负相关, 细颗粒悬浮物具有较高SSC和WT。在杭州湾至象山港海域, 二者与叶绿素 a 含量呈负相关, 而在象山港以南海域, SSC和WT大幅减小, 水体中生物颗粒的含量对浊度的大小有很大的影响。分为杭州湾至象山港海域、象山港至台州湾海域和台州湾以南海域三个区域, 根据线性回归分析结果建立浙江近海三个区域的SSC和WT换算关系并进行了验证。中部的象山港到台州湾海域SST和WT在适当的范围内, 二者的换算关系精确度最高。在高SST悬浮体浓度或高生产力海域, 相关性变差。实际使用中应当注意。

关键词

悬浮体浓度, 浊度, 浙江近海

Characteristics of Suspended Sediment Concentration and Water Turbidity in Zhejiang Offshore Area and Its Application in Remote Sensing Interpretation

Jinduo Li, Yue Duan, Yejuan Jiang*

Ningbo Marine Center, Ministry of Natural Resources, Ningbo Zhejiang

Received: Feb. 8th, 2025; accepted: Mar. 1st, 2025; published: Mar. 10th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李金铎, 段悦, 蒋叶娟. 浙江近海夏季表层悬浮体浓度和浊度特征及其在遥感解译中的应用[J]. 海洋科学前沿, 2025, 12(1): 9-15. DOI: 10.12677/ams.2025.121002

Abstract

The spatial distribution of suspended sediments concentration (SSC) and water turbidity (WT) in the offshore of Zhejiang varies greatly, and the errors in obtaining SSC are large using remote sensing inversion methods. Based on a large number of simultaneous measured data of Zhejiang offshore water body in summer 2023, the distribution characteristics of SSC and WT, and the influencing factors were analyzed. The results show that the temperature of the surface water body has little influence on the SSC and WT, salinity is negatively correlated with both, and fine particles of suspended matter have high SSC and WT. In the waters from Hangzhou Bay to Xiangshangang Bay, both are negatively correlated with the chlorophyll *a* content, whereas in the waters south of Xiangshangang Bay, the SSC and WT are greatly reduced, and the content of biomass particles in the water body has a great influence on the magnitude of turbidity. Three regions, namely, Hangzhou Bay to Xiangshangang Bay, Xiangshangang Bay to Taizhou Bay, and south of Taizhou Bay were divided in the study area, and the SSC and WT conversion relationships of the three areas were established and verified based on the results of linear regression analysis. The SST and WT in the central Zhejiang offshore sea area were in the appropriate range, and the accuracy of the conversion relationship between the two was the highest. The correlation becomes not significant at high SST suspended sediments concentration or high productivity waters. This should be noted in practical use.

Keywords

Suspended Sediment Concentration, Water Turbidity, Zhejiang Offshore Area

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受到较高的陆源输入和初级生产力的影响, 大陆边缘的近海悬浮体浓度(Suspended Sediment Concentration, SSC)较高。作为研究泥沙运动和海洋生物化学过程及进行海洋环境监测评价的重要参数, 其获取传统上采用采水抽滤法, 较为繁琐、费时, 仅能得到离散的 SSC 数据[1][2]。随着科技的发展, 利用遥感反演的方法可以获得水体的浊度(Water Turbidity, WT), 同时通过室内标定或者统计分析得到的 SSC 和 WT 转换关系, 进一步得到 SSC。这种方法经济便捷, 能够获得具有较高时空分辨率的长期连续的 SSC 和 WT 信息[2]-[4]。但是, SSC 是表征水体中泥沙颗粒、生物碎屑和各种絮凝体等的质量含量, 而 WT 是表征水体的一种光学性质, 二者具有不同的物理意义; 而且二者均受到多种因素的影响, 如区域水动力条件、泥沙的粒度、密度和颜色等特征、海水的理化性质、有机颗粒的大小和含量等, 因而其转换关系式的误差比较难以控制, 有一定的适用海域和范围[1][5]-[8]。

浙江近海受到长江入海泥沙由北向南运输的影响, 北部杭州湾和舟山群岛地区水体浑浊, 悬浮体浓度很高, 可达 200 mg/L 以上, 向南部逐渐降低, 到温州外海浓度为 20 mg/L 以下[8]-[11]。前人的研究指出, 研究区的悬浮体分布主要受控于陆源入海沉积物和东海流系, 悬浮体浓度和海水浊度具有较高的相关性[9]; 悬浮体偏南向净输移[11]; 表层水体总悬浮体和无机悬浮体浓度冬季高于夏季, 而有机悬浮体浓度则夏季较高[7]。近年来, 浙江近海包括表层水体 SSC 和 WT 等参数在内的遥感反演的研究逐渐广泛开展[3]-[5][10]。庞重光等选取典型区域的水色和水温遥感资料反演特定年份黄东海冬季悬浮泥沙的平面分

布,并分析了其动力成因[2];叶小敏等建立了杭州湾及邻近海域卫星遥感反演方法模型,相对误差小于19%,可有效得到该海域总悬浮物浓度并用以分析其时空变化特征[2];Cai等则重点探讨了杭州湾海域悬浮物浓度遥感反演的算法[3];郑鹭飞提出了一种改进的浊度遥感算法,在中国近岸高浊度海域得到较为精确和稳定的结果,但在低浊度海域的精度不高[4]。这些研究都具有较高的指导价值,但是取得的成果仍然是只适用于局部典型区域的,精度也参差不齐,SSC空间差异巨大的整个浙江近海的研究尚比较欠缺。2023年夏季获得浙江近海SSC和WT的大量同步数据,本文尝试对其进行分析讨论,建立本区不同海域水体浊度与悬沙浓度较为简单实用的转换关系,并讨论其影响因素和使用范围,从而可以利用卫星图像反演出难于获得的悬浮体浓度数据,应用于浙江近海科研和海洋开发利用的实际工作中。

2. 资料与方法

在浙江近海2023年夏季海洋环境监测中,从近岸至外海方向布置采样断面(见图1),使用有机玻璃采水器采水,现场抽滤悬浮物到预先经过高温灼烧和称重的滤膜上(直径47 mm,孔径0.7 μm),冷冻保存。同时使用OBS-3A型光学后向散射浊度计(美国D&A公司)测量水体浊度值(WT, FTU),使用SBE-19Plus高精度温盐深剖面仪(CTD)(美国SeaBird公司)测量温度和盐度数据,采用荧光分光光度法测量水体中叶绿素 a 浓度。

航次结束后在陆地实验室进行悬浮体浓度和粒度测试。将样品滤膜置于冷冻干燥器冻干后称重,计算得到悬浮体的质量浓度(SSC, mg/L)。每批次样品中均插入已灼烧、称重的空白滤膜样品,用于控制数据的精度。将滤膜上的悬浮体样品刮入烧杯,加入蒸馏水和分散剂六偏磷酸钠溶液静置一昼夜,超声波振荡15分钟,使用Microtrac 3500型激光粒度仪(美国Microtrac公司)测试悬浮体粒度组成。采用平行样品进行质量控制,平行样误差小于5%。

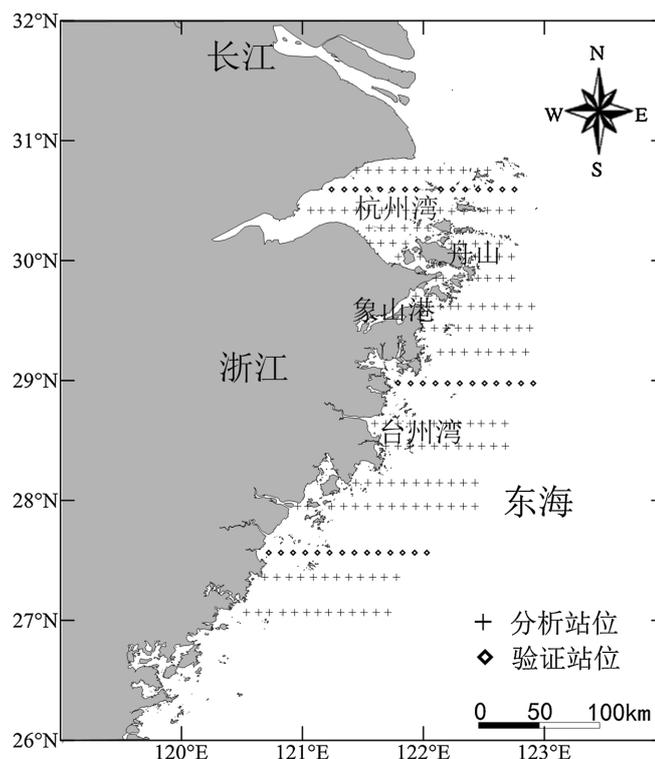


Figure 1. Distribution of the sampling positions of SSC and WT in Zhejiang offshore
图 1. 研究区域和采样站位图

使用 SPSS21.0 软件包进行统计分析,使用 Surfer15.0 软件制图。分析研究区 SSC 和 WT 整体分布情况时采用全部 206 站数据,探讨 SSC 和 WT 转换关系时采用其中 159 站数据,另外 47 站数据用于验证。

3. 结果与讨论

3.1. SSC 和 WT 大小、分布及影响因素

测试结果表明,浙江近海夏季表层水体 SSC 由北部向南部海域大幅减小,差异可达 100 倍以上(见图 2)。在北部的杭州湾和舟山群岛海域,SSC 大多在 200~800 mg/L,最大可达约 1500 mg/L,象山港以南海域在 200 mg/L 以下,台州湾以南海域减小到 20 mg/L 以下。同时,水体的浊度也呈现相同的分布特征,北部海域水体浑浊,WT 大多在 200 FTU~800 FTU,最大可达 1000 FTU 以上,到象山港以南和台州湾以南海域减小到 100 和 10 FTU 以下。二者在从西侧近岸到东部外海的方向上呈现减小趋势。实测结果与文献中的结论相当,显示了长江入海泥沙向南输运的宏观格局[2]-[4] [9]。

考虑到这种空间分布上巨大的南北差异,将浙江近海海域从北向南分为杭州湾至象山港海域、象山港至台州湾海域和台州湾以南海域三个区域进行探讨。三个区域表层水体的 SSC 和 WT 分别与同时测得的温度、盐度、悬浮物的颗粒粒径和叶绿素 *a* 含量等因子做相关分析(见表 1、表 2),其中与温度的相关性统计检验概率 *P* 值小于 0.05,其他相关关系 *P* 值均小于 0.01,表明分析结果具有统计学意义。结果表明,温度、盐度、悬浮物的粒径对 SSC 和 WT 在三个区域均具有相同的影响方向和相似的影响程度。二者与温度相关性都很小,不是主要影响因素。二者与盐度均为负相关。在盐度较低的北部河口和近岸区域,陆源碎屑入海和浅水区较强的水动力条件造成较高的 SSC 和 WT,在浙江中南部海域,海水盐度高,海水清澈,SSC 和 WT 较低。另外,研究表明,盐度对于悬浮体颗粒的絮凝作用有较大的影响,较高的盐度引起水中悬浮泥沙絮凝沉降,从而影响 SSC 和 WT [9] [11]。二者与悬浮物粒径之间也均呈负相关,说明细颗粒物富集的水体中 SSC 和 WT 更高[6] [12]。

Table 1. Correlations between surface sediments concentrations (SSC) and water temperature, salinity, chlorophyll *a* content and suspended particles median diameter in summer Zhejiang offshore

表 1. 浙江近海夏季悬浮体浓度与温度、盐度、悬浮体粒径和叶绿素 *a* 含量的相关关系

区域	温度(°C)	盐度(‰)	颗粒中值粒径(mm)	叶绿素 <i>a</i> (µg/L)
杭州湾至象山港	0.1646	-0.3318	-0.2180	-0.3475
象山港至台州湾	0.0136	-0.2386	-0.3078	0.8199
台州湾以南	0.0156	-0.4576	-0.3000	0.6832

Table 2. Correlations between surface water turbidity (WT) and temperature, salinity, chlorophyll *a* content and suspended particles median diameter in summer Zhejiang offshore

表 2. 浙江近海夏季表层水体浊度与温度、盐度、悬浮体粒径和叶绿素 *a* 含量的相关关系

区域	温度(°C)	盐度(‰)	颗粒中值粒径(mm)	叶绿素 <i>a</i> (µg/L)
杭州湾至象山港	0.0988	-0.3868	-0.2372	-0.3928
象山港至台州湾	0.0688	-0.1635	-0.2840	0.5990
台州湾以南	0.0509	-0.4941	-0.2700	0.4716

SSC 和 WT 与水体中叶绿素 *a* 含量的相关性在三个区域却有明显的差异。在北部的杭州湾至象山港海域,SSC 和 WT 与叶绿素 *a* 含量负相关,该区水体浑浊,低的透光性严重制约了该区域浮游生物的生长,叶绿素 *a* 含量低。而在象山港以南海域,SSC 和 WT 低,该海域在较充分的营养盐、光照以及较适

宜的温盐等条件形成较高的初级生产力[7] [13], 二者与叶绿素 *a* 具有相当高的正相关关系。黄以琛等的研究指出, 悬浮泥沙是影响近岸较高浊度区域的主要因素, 而浮游植物是影响较清澈的远岸海域浊度的主要因素[14]。象山港以南的浙江近海, 悬浮体组成中生物颗粒含量相对泥沙颗粒含量的比率有所增加, 水中的生物颗粒含量对 SSC 和 WT 大小有较大的影响。

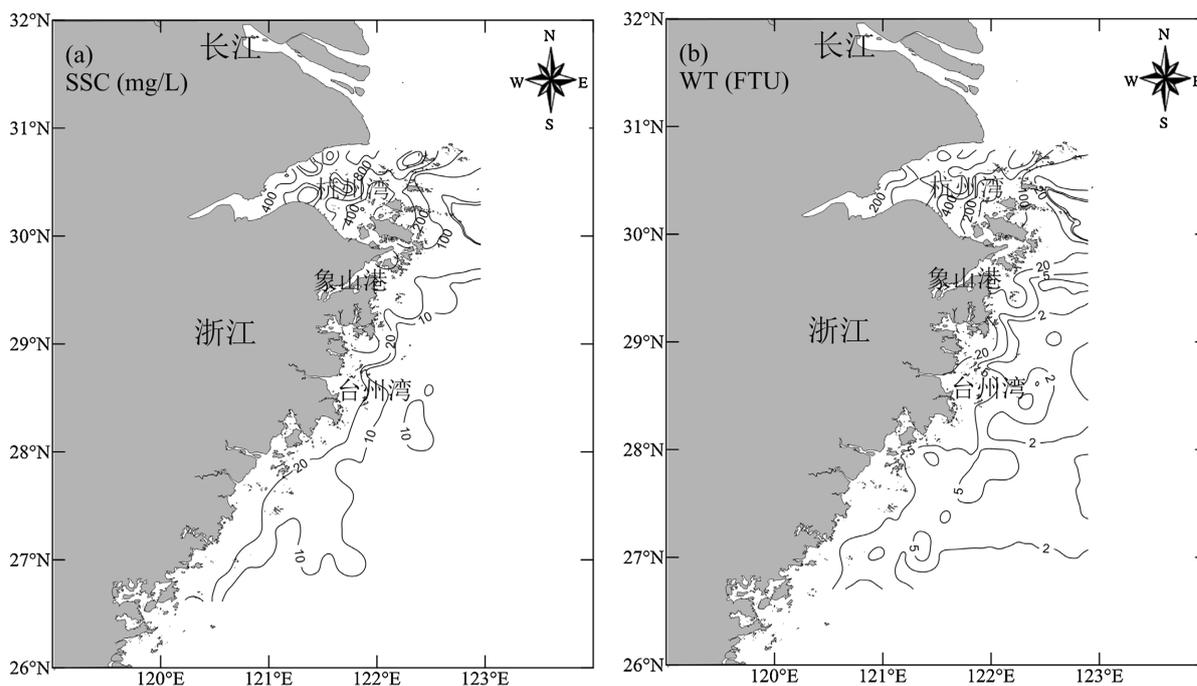


Figure 2. Distribution of SSC ((a), mg/L) and WT ((b), FTU) in the study area
图 2. 研究区 SSC ((a), mg/L)和 WT ((b), FTU)分布图

3.2. SSC 与 WT 换算关系

分别对浙江近海三个区域的实测数据进行线性回归分析, 其方差分析的概率 *P* 值均小于显著性水平 0.05, 说明三个区域的线性关系式均具有统计学意义。根据分析结果得出三个区域的 SSC 和 WT 换算关系:

$$\text{杭州湾至象山港海域: } Y = 1.2732X + 88.01 \quad (3-1)$$

$$\text{象山港至台州湾海域: } Y = 1.601X + 4.36 \quad (3-2)$$

$$\text{台州湾以南海域: } Y = 1.7927X + 10.17 \quad (3-3)$$

分别使用上述关系式计算三个区域的验证站位 SST 的推算值, 将其与实测值进行对比(见图 3), 可以看出中部的象山港到台州湾海域, SST 和 WT 分别大致在 10~100 mg/L 和 10~100 FTU 时, 相关性高, 二者的换算关系精确度较高, 实测值和推算值误差小于 15%。在浙江近海的北部海域, SST 和 WT 很高, 二者相关性较差, 推算值和实测值最大误差可达 25%左右, 前人的研究也得出了相似的结论[8] [9]。另外, 薛元忠等指出, 对高 SST 水体, WT 测量仪器发射器发出的红外线可能会被泥沙部分阻挡, 造成其读数基本不变或者反而降低, 使得二者相关性变差[12]。而在台州湾以南海域, 水清沙少, SST 和 WT 二者相关性也较差, 推算值和实测值最大误差可达 35%左右。一方面是由于 SST 和 WT 值很小, 小的绝对误差会造成较大的相对误差。另一方面, 可能是受到悬浮体中生物组分的影响, 其与不同密度的泥沙颗粒按不同比例组成悬浮体, 从而影响悬浮体质量浓度; 同时, 研究指出, 海水中的生物组分会影响浊度仪器的散射强度, 引起水体浊度数据的偏高[7] [14]。因此, 在近岸特别高 SST 海域和上升流区等高生产力

海域，SST 和 WT 的换算关系使用时应当考虑悬浮体浓度和生物组分的影响。

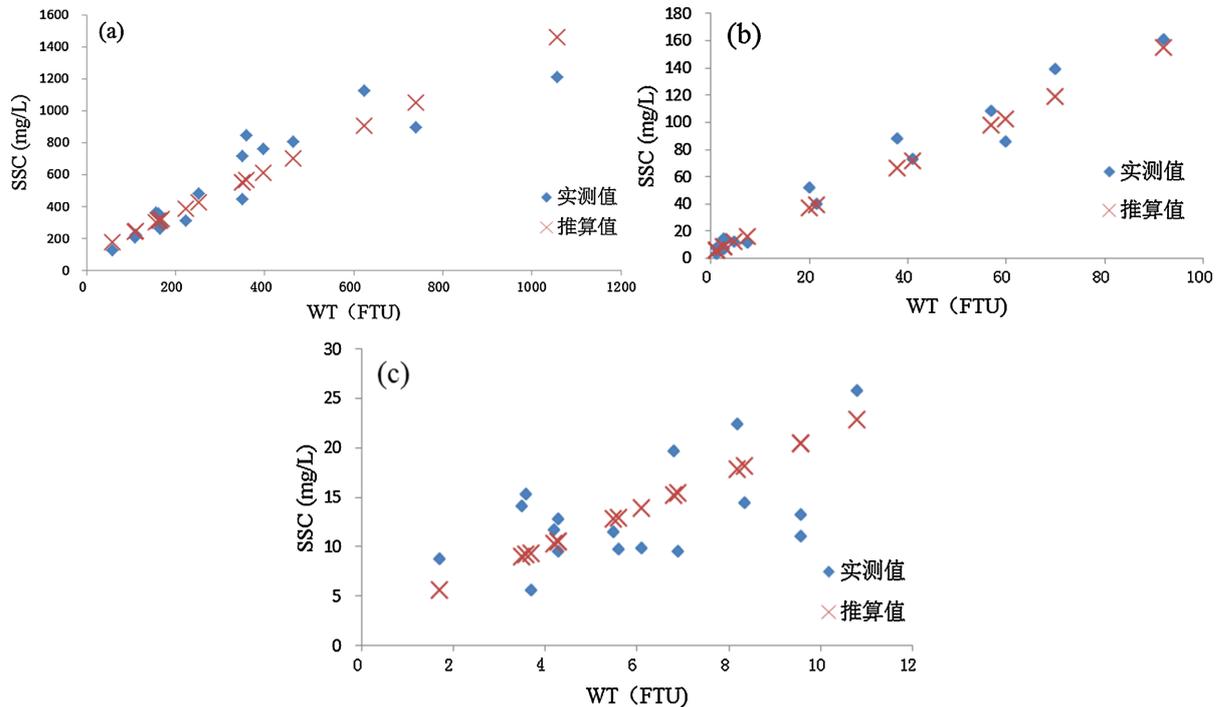


Figure 3. Comparison of the measured and calculating SSC (mg/L) in the study area: (a) Changjiang Estuary to Xiangshan Bay; (b) Xiangshan Bay to Taizhou Bay and (c) South of Taizhou Bay

图 3. 研究区实测与推算 SSC (mg/L) 对比图: (a) 杭州湾至象山港海域; (b) 象山港至台州湾海域; (c) 台州湾以南海域

4. 结论

浙江近海夏季实测表层 SSC 和 WT 总体上呈现明显的正相关，根据其在空间分布上巨大的差异性，分为杭州湾至象山港海域、象山港至台州湾海域和台州湾以南海域三个区域，根据线性回归分析结果建立浙江近海三个区域的 SSC 和 WT 换算关系。

表层水体的温度对 SSC 和 WT 影响不大。盐度与二者均为负相关。细颗粒悬浮物具有较高 SSC 和 WT。在杭州湾至象山港海域，二者与叶绿素 *a* 含量呈负相关，低透光性影响了初级生产力。而在象山港以南海域，SSC 和 WT 大大减小，水体中生物颗粒的含量对浊度的大小有很大的影响。

中部的象山港到台州湾海域相关性最强，说明 SST 和 WT 在适当的范围内时，二者的换算关系精确度最高。在高 SST 悬浮体浓度或高生产力海域，相关性变差。实际使用中应当注意。

根据最新大量实测数据建立不同海域 SSC 与 WT 转换关系，并详细分析研究区 SSC 和 WT 特征及换算关系的影响因素，从而得出较前人的研究更加精准和稳定的关系式，可以用于浙江近海水体的遥感解译，推算较难获得的悬浮体浓度。

基金项目

宁波海洋中心海洋科技基金项目(基于国产海洋一号卫星影像的水质数据遥感反演)。

参考文献

- [1] 魏晓, 汪亚平, 杨旻, 等. 浅海悬沙浓度观测方法的对比研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 161-170.

- [2] 庞重光, 杨扬, 刘志亮. 黄东海悬浮泥沙输运结构及其形成机制[J]. 泥沙研究, 2010(3): 24-30.
- [3] 王震, 乔璐璐, 王云飞. 东中国海表层悬浮体浓度卫星遥感反演研究进展[J]. 沉积学报, 2016, 34(2): 293-307.
- [4] 郑鹭飞. 东中国海水体浊度遥感算法及时空分布规律研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [5] Cai, L., Tang, D., Li, X., Zheng, H. and Shao, W. (2015) Remote Sensing of Spatial-Temporal Distribution of Suspended Sediment and Analysis of Related Environmental Factors in Hangzhou Bay, China. *Remote Sensing Letters*, **6**, 597-603. <https://doi.org/10.1080/2150704x.2015.1062158>
- [6] Sehgal, D., Martínez-Carreras, N., Hissler, C., Bense, V.F. and Hoitink, A.J.F. (2022) A Generic Relation between Turbidity, Suspended Particulate Matter Concentration, and Sediment Characteristics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **127**, e2022JF006838. <https://doi.org/10.1029/2022jf006838>
- [7] 崔倩芳, 潘德炉, 白雁, 等. 东海陆架表层水体有机与无机悬浮体的季节分布特征[J]. 海洋学研究, 2012, 30(4): 55-64.
- [8] 翟世奎, 张怀静, 范德江, 等. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 693-699.
- [9] 刘开发, 石学法, 刘焱光, 等. 东海内陆架泥质区夏季悬浮体的分布特征及影响因素分析[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(1): 37-46.
- [10] 叶小敏, 王晓梅, 邹斌, 等. 杭州湾及其邻近海域总悬浮物浓度卫星遥感[J]. 空间科学学报, 2023, 43(6): 1058-1068.
- [11] 胡吉连, 杜晓琴. 舟山海域悬浮体的特征及输运机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(6): 39-48.
- [12] 薛元忠, 何青, 王元叶. OBS 浊度计测量泥沙浓度的方法与实践研究[J]. 泥沙研究, 2004(4): 56-60.
- [13] 王智慧, 黄备, 魏娜, 等. 基于空间自相关的杭州湾及其邻近海域叶绿素 *a* 分布特征及其影响因素研究[J]. 海洋环境科学, 2015, 43(3): 398-406.
- [14] 黄以琛, 李炎, 邵浩, 等. 北部湾夏冬季海表温度、叶绿素和浊度的分布特征及调控因素[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(6): 856-863.