0254-6124/2023/43(6)-1058-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YE Xiaomin, WANG Xiaomei, ZOU Bin, WANG Futao. Satellite Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentration in Hangzhou Bay and Its Adjacent Waters (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1058–1068. DOI:10.11728/cjss2023.06.2023–0099

# 杭州湾及其邻近海域总悬浮物浓度卫星遥感*

叶小敏[1,2] 王晓梅[1,2] 邹 斌[1,2] 王福涛[3]

1(国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

2(自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室 北京 100081)

3(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

**摘 要** 近海及海湾总悬浮物是重要的水质参数之一，而杭州湾及其邻近海域是典型的海湾与近岸海域，与人类关系密切。卫星遥感广泛应用于海水总悬浮物浓度的探测与分析。利用现场实测数据，建立了中国 HY-1C/D 卫星水色水温扫描仪（Chinese Ocean Color and Temperature Scanner, COCTS）及其他当前在轨的典型水色遥感器在杭州湾及邻近海域的总悬浮物卫星遥感反演方法模型，模型平均相对误差不高于 19%。反演并融合获得了 HY-1C/D 等多源卫星 2015－2022 年杭州湾及邻近海域的总悬浮物浓度卫星遥感及其融合数据。融合数据经实测数据对比验证，两者之间线性相关系数为 0.72，平均相对偏差为 26%。卫星遥感结果表明，2015－2022 年间杭州湾及其邻近海域总悬浮物浓度年际变化不大，其线性变化不超过其年平均浓度值的 0.5%。研究结果表明利用包括 HY-1C/D 卫星 COCTS 等的海洋水色遥感载荷，可有效遥感反演得到杭州湾及其邻近海域的总悬浮物浓度并分析其时空变化特征。

**关键词** 杭州湾，总悬浮物浓度，HY-1C/D 卫星，遥感

**中图分类号** P714，P731.2，X87

# Satellite Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentration in Hangzhou Bay and Its Adjacent Waters

YE Xiaomin[1,2] WANG Xiaomei[1,2] ZOU Bin[1,2] WANG Futao[3]

1(*National Satellite Ocean Application Service*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081)

2(*Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081)

3(*Aerospace Information Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100094)

**Abstract** The Total Suspended Matter (TSM) in the coastal water area and sea bays is one of the important water quality parameters, and Hangzhou Bay and its adjacent waters are typical gulfs and off-

* 民用航天技术预先研究项目（D040107）和国家重点研发计划项目（2022YFC3104900, 2022YFC3104903）共同资助

2023-09-12 收到原稿，2023-11-04 收到修定稿

E-mail：yxm@mail.nsoas.org.cn. 通信作者 王晓梅，E-mail：xmwang@mail.nsoas.org.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

shore waters with close relationships with humans. Satellite remote sensing is widely used for monitoring and analyzing the concentration of total suspended matter in seawater. Satellite remote sensing retrieval models of TSM concentration for Chinese Ocean Color and Temperature Scanner (COCTS) on the HY-1C and HY-1D satellites and other typical ocean color remote sensors currently in orbit in Hangzhou Bay and its adjacent waters were developed using *in-situ* measured data. The average relative errors of the models are not greater than 19%. TSM concentration in Hangzhou Bay and adjacent waters from 2015 to 2022 was retrieved and merged from multi-source satellite data including HY-1C/D. The merged products in this study have been validated against *in-situ* measured data with the linear correlation coefficient of 0.72 and an average relative error of 26%. The results indicate that the inter-annual variation of the TSM concentration in Hangzhou Bay and its adjacent waters is not significant in the period from January 2015 to December 2022, and its linear variation does not exceed 0.5% of its annual average concentration value. The results of the study indicate that the TSM concentration and its temporal and spatially variation characteristics in Hangzhou Bay and its adjacent waters can be effectively retrieved from space broad ocean color remote sensing payloads including COCTS on the HY-1C/D satellites.

**Key words** Hangzhou Bay, Total suspended matter concentration, HY-1C/D satellites, Remote sensing

## 0 引言

总悬浮物(Total Suspend Matter, TSM)是指悬浮在水中的固体物质,主要包括悬浮泥沙和浮游植物,是水质分类与评价的重要参数之一,直接影响水体光学性质。卫星遥感监测近海和海湾 TSM 浓度研究主要集中在针对遥感载荷波段设置的反演方法或模型及其对应的大气校正方法[1–11]。例如 Ma 等[6]和 Tang 等[5]分别针对 HY-1A 卫星 CCD 和 COCTS 建立了黄东海的水色要素遥感反演模型; Zhang 等[10]建立了黄东海针对 MODIS 的总悬浮物反演模型; He 等[9]利用地球静止卫星水色数据在杭州湾海区开展大气校正并获得了悬浮物的日间动力过程。杭州湾内水体具有高浑浊性,是典型的卫星遥感 TSM 浓度的研究试验区。杭州湾水体的 TSM 浓度卫星遥感研究,包括基于 GOCI 的悬浮泥沙遥感反演[12]、基于 OLCI 的悬浮物浓度估算及其数据适用性分析[13]、基于 GF-1 卫星和 GF-4 卫星的悬浮泥沙浓度遥感反演模型的构建[14,15]。针对单一遥感载荷,尤其是针对新型遥感载荷的反演研究较多,而多载荷遥感结果融合、反演结果长时序分析研究较少。

中国 HY-1C 和 HY-1D(HY-1C/D)卫星分别自 2018 和 2020 年发射以来,实现了全球海洋水色水温的遥感监测[16–18]。对于 HY-1C/D 卫星的 TSM 浓度遥感, Cai 等[19]利用 HY-1C 卫星海岸带成像仪(Coastal Zone Imager, CZI)分析了舟山海域岛屿对 TSM 浓度分布的影响。而对 HY-1C/D 卫星水色水温扫描仪(Chinese Ocean Color and Temperature Scanner, COCTS)在杭州湾等近海的总悬浮物浓度遥感反演研究则仍存在研究空白。本文利用现场实测光谱和 TSM 浓度数据,建立 HY-1C/D 卫星 COCTS 在杭州湾及其邻近海域的 TSM 浓度卫星遥感反演模型,同时得到统一形式的 COCTS, VIIRS, MODIS 和 GOCI 等主要水色观测载荷的 TSM 浓度反演模型公式,开展 TSM 浓度多源卫星遥感与融合处理,分析杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度的长时序变化特征。

## 1 研究区域与数据源

杭州湾位于中国浙江省东北部,紧邻长江口,与舟山海域、北仑港海域相连,呈喇叭型。杭州湾是钱塘江入东海形成的喇叭状河口湾,因此其既是海湾又是钱塘江的入海口。杭州湾内的港口航道、滩涂及水产资源丰富,经济开发利用价值巨大。杭州湾及其邻近海域是典型的近岸海域,受人类活动影响较大且与人类关系密切,赤潮灾害频发。陆源污染、围填海工程和旅游观光等不仅给该海域的生态环境带来了较

大的压力，也给当地渔业养殖带来了很大危害[20]。杭州湾是著名的强潮型河口，在强烈的潮流作用下，海湾内沉积物悬浮受强劲复杂的动力作用影响，水中悬浮物浓度很高[14]。

选择中国杭州湾及其邻近海域（28.5°－32.5°N，120.5°－125°E）为研究区，开展水体 TSM 浓度多源卫星遥感反演研究。该研究区同时覆盖了长江口及其邻近海域。研究区地理位置及其遥感影像如图 1 所示。

研究所用数据包括现场观测数据和卫星遥感数据，其中现场观测数据用于 TSM 浓度的卫星遥感反演方法建模与精度检验，卫星遥感数据用于 TSM 浓度遥感反演。

### 1.1 现场观测数据

现场观测的遥感反射比（$R_{rs}$）光谱数据和总悬浮物浓度数据，包括 2003 年黄东海春季和秋季两个航次的观测数据，检验数据还包括 2018 和 2020 年 HY-1C/D 卫星在轨测试、业务化定标与真实性检验航次部分观测数据。本文所用的总悬浮物浓度测量方法是采用大洋悬浮体测量的方法：使用滤膜的孔径为 0.45 μm 的滤膜，用真空过滤装置对海水进行过滤，过滤结束后，用过离子水冲洗容器 1 次，滤膜洗盐 3 次，每次用蒸馏水 50 mL。实验室称重称量天平采用精度为 0.01 mg·L$^{-1}$ 的电子分析天平。分析过程按规范进行，空白滤膜及悬浮体的称重进行了多次称量，前后 2 次称重误差应在 0.01 mg·L$^{-1}$ 数量级以内[5]。实测数据点分布如图 2 所示，该实测数据基本覆盖了杭州湾湾口及长江口外海域，在研究区内均有实测点分布且分布均匀。

图 3 为图 2 中各实测站位处遥感反射比实测曲线，图 3 反射比光谱曲线差异明显，代表了这些站位水体光学特性有所差异，适用于水色要素遥感反演模型的建模。

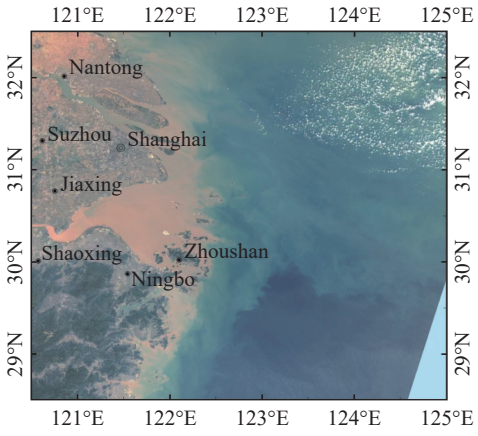



图 1 研究区及其 HY-1C 卫星海岸带成像仪遥感影像（2019 年 11 月 11 日）

Fig. 1 Study area and remotes sensing image acquired by Coastal Zone Imager (CZI) on the HY-1C satellite (11 November 2019)

### 1.2 卫星遥感数据

卫星遥感数据包括：HY-1C/D 卫星水色水温扫描仪（COCTS）数据，Suomi NPP 和 JPSS-1 卫星 VIIRS 数据，Aqua 和 Terra 卫星 MODIS 数据，COMS 卫星 GOCI 数据等。HY-1C/D 卫星 COCTS 于国家卫星海洋应用中心海洋卫星数据分发网获取*。Suomi NPP 和 JPSS-1 卫星 VIIRS，Aqua 和 Terra 卫星 MODIS，COMS 卫星 GOCI 等数据均于美国 NASA 海洋水色网址获取**，其中部分 GOCI 数据于韩国海洋卫星中心下载获取***。本文所用数据源时空分辨率、实测时间范围和幅宽等信息见表 1。

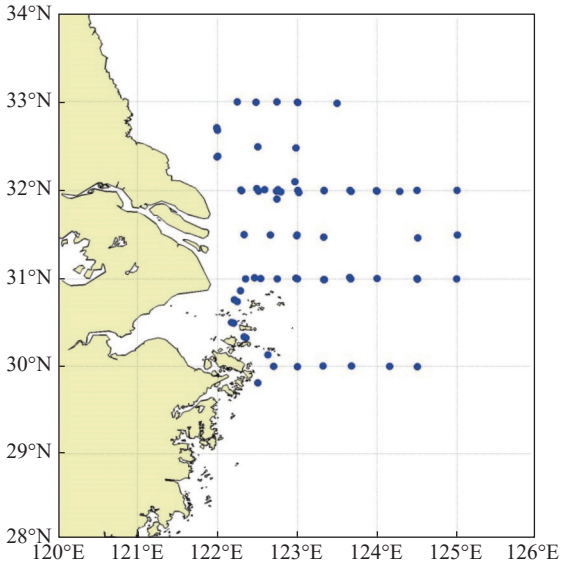



图 2 遥感反演建模所用实测点位置分布

Fig. 2 Locations of *in-situ* measurements used for remote sensing retrieval modeling

* https://osdds.nsoas.org.cn/#/

** https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/

*** http://kosc.kiost.ac.kr

从表 1 所列卫星数据源信息可见, 各卫星载荷对地观测时空分辨率、在轨时间范围均有所差异。为满足研究区的 TSM 浓度遥感, 同时考虑到数据获取途径和资料处理的可行性和可靠性, COCTS 和 GOCI 数据为辐亮度, 开展其大气校正和 TSM 浓度反演, 大气校正方法及其云检测方法参照文献 Ye 等[17]; VIIRS 和 MODIS 数据为大气校正后的遥感反射比, 直接使用本文所建的模型反演 TSM 浓度。

## 2 总悬浮物浓度遥感反演方法

采用对实测光谱和 TSM 浓度实测数据半经验分析的方法, 建立 TSM 浓度的遥感反演方法模型。各遥感载荷波段的等效遥感反射比通过下式计算获得:

$$\langle R_{\mathrm{rs}}(\lambda)\rangle = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\, R_{\mathrm{rs}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}. \tag{1}$$

式中, $S(\lambda)$为遥感载荷光谱响应函数, $R_{\mathrm{rs}}(\lambda)$为实测光谱的遥感反射比。通过分析各遥感载荷的波段设置和特性情况, 建立特征波段与 TSM 浓度间的统计关系式, 研究区内可利用实测数据共计 67 组, 位置分布如图 2 所示。

### 2.1 HY-1C/D 卫星 COCTS 遥感反演模型

由图 2 观测站点位置(不同 TSM 浓度)和图 3 光谱曲线差异可见, 对于 HY-1C/D 卫星 COCTS 的波段设置情况, 在 670 nm 处遥感反射比 $R_{\mathrm{rs}}$值差异明显, 同时 490 至 565 nm 遥感反射比的斜率也存在明显的差异, 由此可得由 490, 565 和 670 nm 波段 $R_{\mathrm{rs}}$的

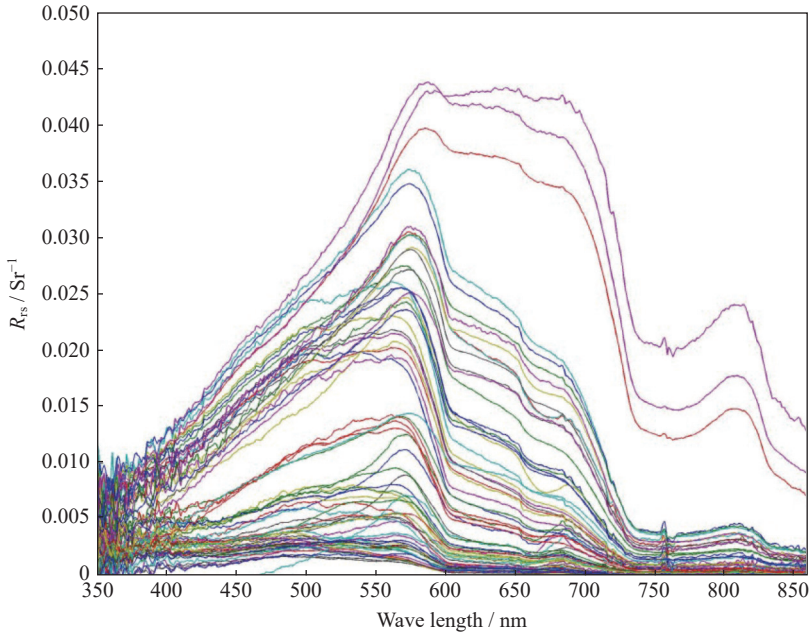



图 3 研究区内实测站点实测遥感反射比光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of remote sensing reflectance at measured stations in the study area

**表 1 卫星数据源信息**

**Table 1 Satellite data source information used in this study**

| 序号 | 传感器/卫星 | 幅宽/ km | 空间分辨率/m | 时间分辨率/d$^{-1}$ | 在轨时间范围(年月) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | COCTS/HY-1C, HY-1D | 3000 | 1100 | 2 | 2018.09—(HY-1C)<br>2020.06—(HY-1D) |
| 2 | GOCI/COMS | 2500 | 250 | 8 | 2010.06— |
| 3 | VIIRS/SNPP, JPSS-1 | 3000 | 750 | 2 | 2011.10—(SNPP)<br>2017.11—(JPSS-1) |
| 4 | MODIS/Terra, Aqua | 2330 | 1000 | 2 | 1999.12—(Terra)<br>2002.05—(Aqua) |

组合并建立 TSM 浓度的遥感反演模型，同时参考文献 Tang 等[5] 遥感反演公式结论，以中心波长为 490, 565 和 670 nm 的波段建立 HY-1C/D 卫星 COCTS 的杭州湾及其邻近海域的 TSM 浓度遥感反演模型。由于 HY-1C 和 HY-1D 卫星 COCTS 在该 3 波段的光谱响应相近，因此采用同一公式计算 TSM 浓度 $C_{\mathrm{TSM}}$，具体如下：

$$X_1 = R_{\mathrm{rs}(565)} + R_{\mathrm{rs}(670)}, \tag{2}$$

$$X_2 = R_{\mathrm{rs}(490)} / R_{\mathrm{rs}(565)}, \tag{3}$$

$$\lg C_{\mathrm{TSM}} = 0.42080 + 22.79800 X_1 - 0.33329 X_2. \tag{4}$$

以实测 $R_{\mathrm{rs}}(\lambda)$ 作为输入，该模型预测值与实测值对比散点如图 4 所示，两者线性相关系数的平方 $R^2$=0.962，平均相对偏差 16.9%。

### 2.2 GOCI，VIIRS 和 MODIS 遥感反演模型

采用相同的方法，分析 GOCI, VIIRS 和 MODIS 的波段设置及光谱响应特性。选用与 COCTS 相近的波段，采用上文 COCTS 适用的 TSM 浓度遥感模型形式，分别建模得到 GOCI, VIIRS 和 MODIS 的 TSM 浓度遥感反演公式。由于 Terra 和 Aqua 卫星 MODIS 的波段响应特性基本相同，因此两星 MODIS 采用相同的 TSM 浓度反演公式系数；SNPP 和 JPSS-1 卫星 VIIRS 的波段响应特性有所差异，则分别建立 SNPP 和 JPSS-1 卫星 VIIRS 的 TSM 浓度反演公式，其模型公式中系数所有差异。图 5 为 GOCI, VIIRS 和 MODIS 在杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度遥感反演模型效果评价散点图。建模相对误差结果显示 GOCI, VIIRS 和 MODIS 的 TSM 浓度遥感反演模型精度均较高（见图 5）。

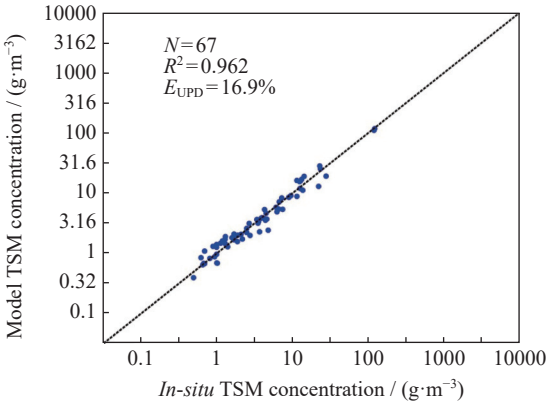



图 4 HY-1C/D 卫星 COCTS 杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度遥感反演模型效果评价散点图

Fig. 4 Scatter plot for evaluating of the TSM concentration remote sensing retrieval model of COCTS on the HY-1C satellite in Hangzhou Bay and its adjacent waters

对于 COCTS, GOCI, VIIRS 和 MODIS 等水色遥感载荷，选取的杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度遥感反演模型，可将其归纳为如下统一形式：

$$X_1 = R_{\mathrm{rs}}(\lambda_{\mathrm{G}}) + R_{\mathrm{rs}}(\lambda_{\mathrm{R}}), \tag{5}$$

$$X_2 = R_{\mathrm{rs}}(\lambda_{\mathrm{B}}) / R_{\mathrm{rs}}(\lambda_{\mathrm{G}}). \tag{6}$$

TSM 浓度反演公式为

$$\lg C_{\mathrm{TSM}} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2. \tag{7}$$

对于每个遥感载荷，上述模型中的波段选择信息见表 2。COCTS, MODIS, VIIRS, GOCI 等遥感载荷在杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度遥感反演模型公式系数和建模效果评价指标（线性相关系数和平均相对误差）汇总见表 3。由表 3 信息可见，COCTS, MODIS, VIIRS 和 GOCI 等水色遥感探测器 TSM 浓度遥感反演模型建模效果较好，相关系数 $R^2$ 均大于 0.96，平均相对误差不高于 19%。

## 3 卫星遥感数据总悬浮物浓度反演与融合

### 3.1 卫星数据遥感反演

卫星遥感数据处理包括针对遥感卫星数据进行辐射定标、云识别、水陆识别、耀斑识别等预处理后，进行大气校正获得多光谱遥感数据的 $R_{\mathrm{rs}}$，使用 Ye 等[17] 的方法对 COCTS 和 GOCI 数据进行云识别、水陆识别、耀斑识别和大气校正等处理。VIIRS 和 MODIS 卫星数据则直接采用 NASA 戈达德太空飞行中心（Goddard Space Flight Center）海洋水色网站*获取的大气校正后的 $R_{\mathrm{rs}}$ 结果，然后利用前文建立的 TSM 浓度反演模型计算得到研究区的水体 TSM 浓度，TSM 浓度遥感反演结果如图 6 所示。

### 3.2 多源卫星遥感数据融合

为开展多源卫星遥感结果的融合，首先计算各卫

* https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/

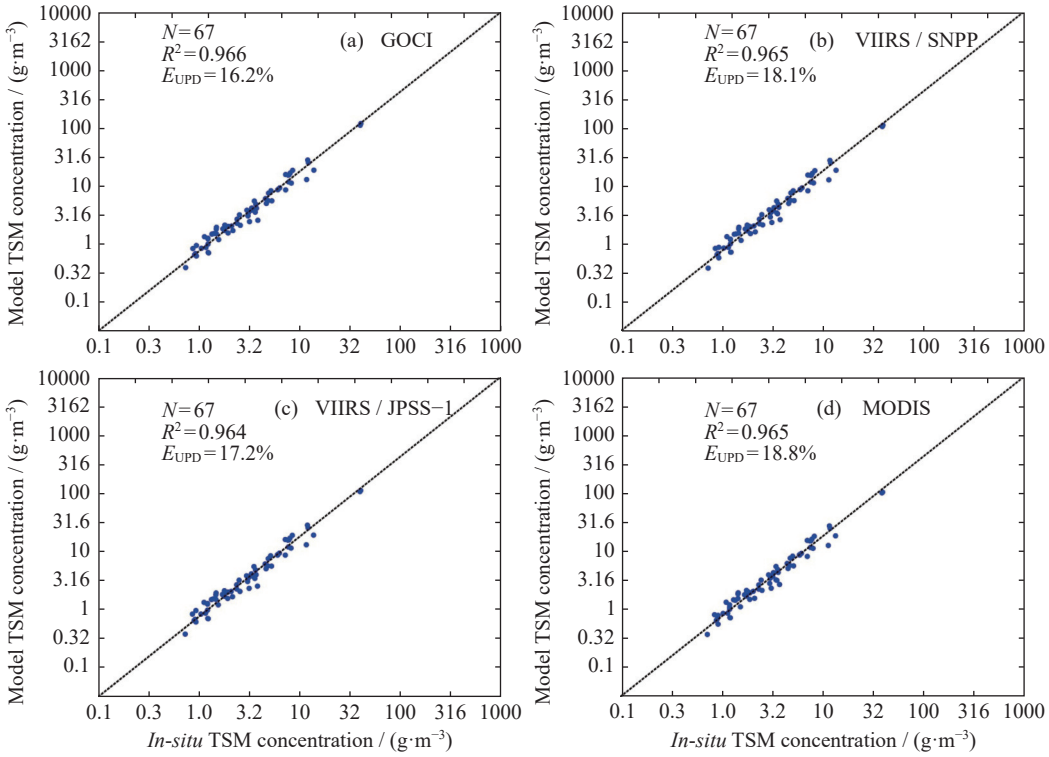



图 5 GOCI，VIIRS（SNPP 和 JPSS-1 卫星）和 MODIS 卫星载荷杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度遥感反演模型效果评价散点图

Fig. 5 Scatter plot for evaluating the TSM concentration remote sensing retrieval models for satellite sensor of GOCI, VIIRS on the SNPP, VIIRS on the JPSS-1, and MODIS in Hangzhou Bay and its adjacent waters

**表 2 杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度遥感反演模型各传感器波段选择信息**

**Table 2 Bands selection information of various sensors for the retrieval models of TSM concentration in Hangzhou Bay and its adjacent waters**

| 传感器 | $\lambda_B$/nm | $\lambda_G$/nm | $\lambda_R$/nm |
|---|---|---|---|
| COCTS | 490 | 565 | 670 |
| MODIS | 488 | 551 | 667 |
| VIIRS/SNPP | 486 | 551 | 671 |
| VIIRS/JPSS-1 | 489 | 556 | 667 |
| GOCI | 490 | 560 | 665 |

星遥感$C_{\mathrm{TSM}}$反演结果间的偏差并开展其一致性分析[21]。偏差计算采用比值的形式表示，即

$$\delta_i^{\mathrm{ref}} = C_{\mathrm{TSM}}^{i}/C_{\mathrm{TSM}}^{\mathrm{ref}}. \tag{8}$$

式中，上角 ref 为参考载荷，一般选择精度较高的遥感载荷反演结果为参考载荷；$i$为待偏差校正的载荷。本文选用 HY-1C 卫星 COCTS 作为参考载荷。偏差校正后的遥感结果为

$$C_{\mathrm{TSM}}^{i,\mathrm{corr}} = C_{\mathrm{TSM}}^{i}(\lambda, b, d)/\langle\delta_i^{\mathrm{ref}}\rangle. \tag{9}$$

对于偏差比值缺失的网格点，则偏差校正后的遥感值为缺失(空白)值。TSM 浓度融合采用加权平均的方法进行融合，数据融合公式采用

$$x = \sum_{i=1}^{n_s}\theta_i w_i x_i \Big/ \sum_{i=1}^{n_s}\theta_i w_i. \tag{10}$$

式中，$n_s$为参与融合的传感器数量总和；$x_i$为每个传感器要素的输入值；$\theta_i$为传感器数据存在的函数，即其值为 1 代表融合数据源中存在该传感器数据，否则取值为 0；$w_i$为每个传感器数据在融合中所占的权重。在数据处理过程中，各传感器数据的不确定性和质量水平相当，因此各传感器权重因子均取值为 1。

以图 6 中各卫星遥感载荷反演得到的 TSM 浓度结果为例，经一致性分析和数据融合所得结果如图 7 所示。数据融合具有提高数据空间覆盖率的优势。以图 6 和图 7 所示数据为例，将 MODIS/Terra,

**表 3 杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度遥感反演模型公式系数及其建模效果评价结果信息**

**Table 3 The formula coefficients and modeling evaluation indicators of TSM concentration remote sensing retrieval models in Hangzhou Bay and its adjacent waters**

| 传感器 | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | 相关系数 $R^2$ | 平均相对误差/(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| COCTS | 0.42080 | 22.79800 | −0.33329 | 0.962 | 16.90 |
| MODIS | 0.60253 | 24.40700 | −0.55732 | 0.965 | 18.80 |
| VIIRS/SNPP | 0.55215 | 24.25332 | −0.50701 | 0.965 | 18.10 |
| VIIRS/JPSS-1 | 0.49413 | 23.46630 | −0.43409 | 0.964 | 17.20 |
| GOCI | 0.49282 | 24.08773 | −0.43924 | 0.966 | 16.20 |

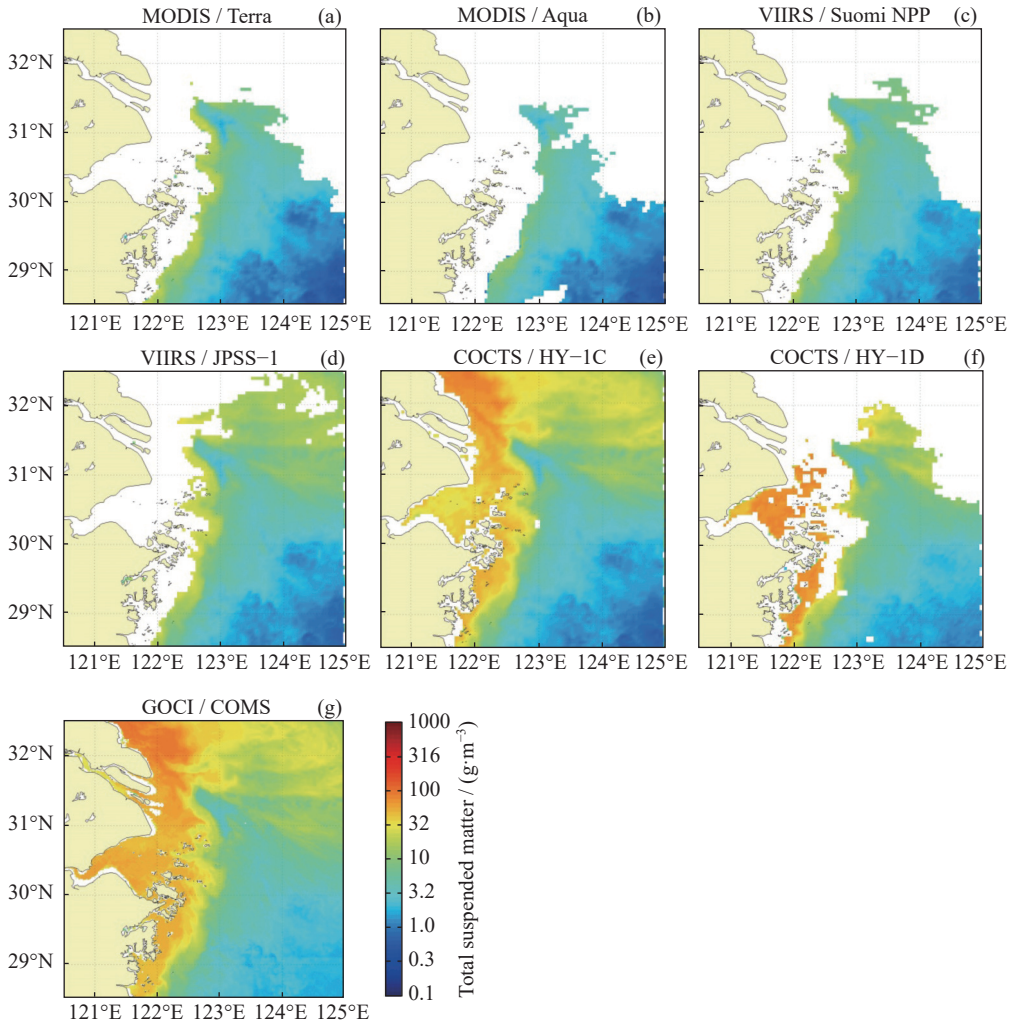



图 6 杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度卫星遥感反演结果（观测日期：2021 年 1 月 13 日）

Fig. 6 Remote sensing retrieval results of TSM concentration from satellites covering the Hangzhou bay and its adjacent sea area (acquired on 13 January 2021)

MODIS/Aqua, VIIRS/Suomi NPP, VIIRS/JPSS-1, COCTS/HY-1C, COCTS/HY-1D 和 GOCI/CMOS 共 7 颗卫星遥感载荷观测的 TSM 浓度进行融合，得到该区域当天的 TSM 浓度融合结果，其数据覆盖率为 97.49%，该覆盖率相对于单星观测数据覆盖率均有所提高(见图 6 和图 7)。

### 3.3 卫星数据遥感结果精度评价

利用实测 TSM 浓度对遥感反演结果进行评估，评估指标包括线性相关系数$R$和相对偏差$E_{\mathrm{UPD}}$，计算公式如下：

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(X_i-\bar{X}\right)\left(Y_i-\bar{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(X_i-\bar{X}\right)^2\left(Y_i-\bar{Y}\right)^2}}, \tag{11}$$

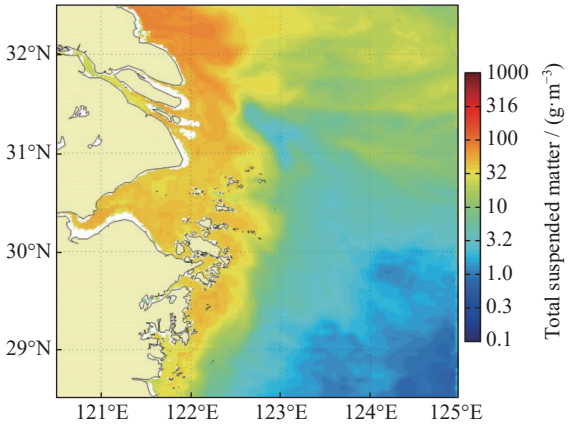



图 7 2021 年 1 月 13 日杭州湾及其邻近海域 TSM 浓度多源卫星遥感融合结果

Fig. 7 Merged TSM concentration from multi-source satellite remote sensing results in Hangzhou Bay and its adjacent waters on 13 January 2021

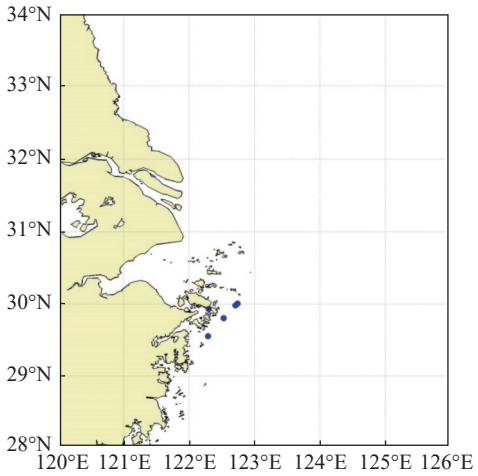



图 8 杭州湾及邻近海域 TSM 浓度精度评估匹配点位置分布

Fig. 8 Locations of matching points for TSM concentration accuracy evaluation in Hangzhou Bay and its adjacent waters

$$E_{\mathrm{UPD}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|X_i-Y_i|}{|X_i+Y_i|}\times 200\%. \tag{12}$$

式中，$N$为匹配数据组的数量，$X_i$和$Y_i$分别为待验证和作为真值的验证数据。

利用 2018 和 2020 年两个航次实测数据对融合 TSM 浓度结果进行精度验证，共匹配获得 5 组数据（2018 年 4 组，2020 年 1 组），匹配点位置见图 8 所示。检验结果对比散点图见图 9。TSM 浓度遥感融合结果与实测数据对比，两者线性相关系数$R$=0.72，平均相对偏差$E_{\mathrm{UPD}}$=26%。

## 4 卫星遥感总悬浮物浓度变化趋势与空间分布

利用本文方法获得 2015 年 1 月至 2022 年 12 月长时序 TSM 浓度卫星遥感与融合结果，使用一元线性回归的方法分析研究区的变化趋势特征。变化趋势分析所使用的数据为卫星遥感反演并融合之后，再进行平均统计的月平均数据。采用一元线性回归分析方法，计算每个网格点的变化速率，得到研究区海域的要素趋势变化分布。对研究区内每个分辨单元内的 TSM 浓度做时间序列的一元线性回归，得到其时序变化率(见图 10)。

研究区内，包括杭州湾、远离海岸的绝大部分海域 TSM 浓度基本保持不变(图 10 中白色区域)或变化不大(年变化率不超过年平均值的 0.5%)。长江口和杭州湾口，以及水陆交界邻近海域表现为降低的变

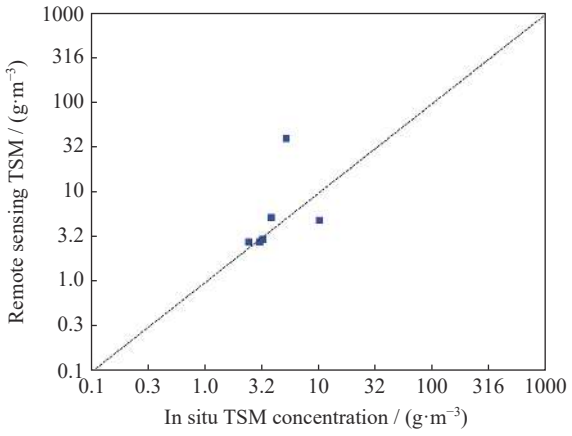



图 9 TSM 浓度融合结果精度检验对比散点图

Fig. 9 Scatter plot for accuracy evaluation of the merged TSM concentration

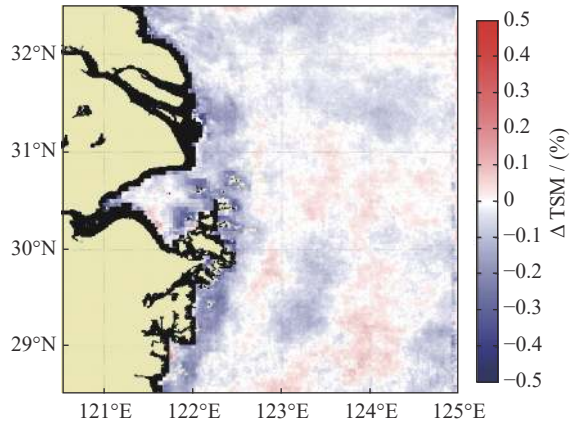



图 10 杭州湾及其邻近海域遥感 TSM 浓度变化趋势（平均年变化率）分布（黑色区域有效遥感观测数据不足 80%）

Fig. 10 Distribution map of TSM concentration change trend (average annual change rate) in Hangzhou Bay and its adjacent waters (The black area in the figure represents the percentage of effective remote sensing data is less than 80%)

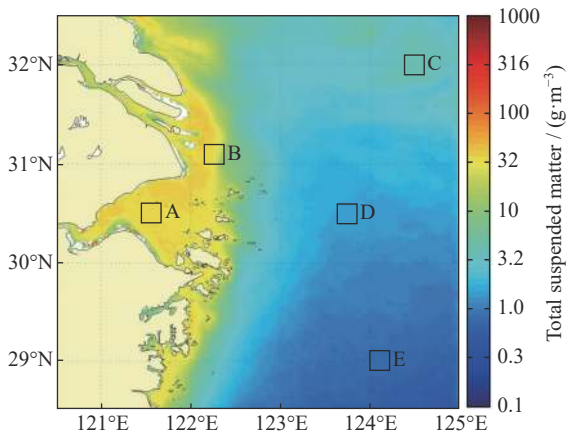



图 11 TSM 浓度卫星遥感数据 2020 年平均分布及分析站位位置分布

Fig. 11 Average distribution map of TSM concentration remote sensing data in 2020 and the location distribution of analysis sites

化趋势。但在靠近长江河口和钱塘江河口等近岸区域(图中黑色区域),由于卫星遥感数据缺失较严重(用于统计分析的数据缺失超过 20%),其结果可信度较低,未开展相关变化趋势统计。

在研究区内选择 5 个典型位置的站位 A～E,分别位于杭州湾、长江口和三个离岸较远的区域,5 个站位位置信息分别见表 4,站位 A～E 地理位置分布情况如图 11 所示。

以上表中站位为中心,在边长为 0.10°的正方形内对月平均 TSM 浓度数据进行取值,将获得的该空间范围内的 TSM 浓度作为该月份的 TSM 浓度值,对 2015－2022 年每月数据进行时间序列分析,得到该位置处的 TSM 浓度时间变化规律。站位 A～E 的 TSM 浓度时序变化曲线如图 12 所示。

由图 12 可见,A～E 位置处 TSM 浓度均呈现明显的周期性变化规律,且周期为 12 个月,A 站位(杭州湾)还存在 6 个月周期。A～E 位置均具有明显的年内季节变化,11 月至次年 1 月 TSM 浓度值最高,6 月至 9 月 TSM 浓度最低,这和该海区长江、钱塘江入海河流枯水期和丰水期等时间变化规律一致。A 位置(杭州湾)处 TSM 浓度年内季节变化相对于其他区域周期规律性较弱,可能是杭州湾内悬浮物浓度较高,受自身水动力环境影响较大,入海的钱塘江径流量对湾内悬浮物浓度的影响占比降低。空间分布上(见图 11),杭州湾和长江口等靠岸海域 TSM 浓度值最大,A 位置处(杭州湾)月平均最高达 50 g·m$^{-3}$,最低约 20 g·m$^{-3}$;B 位置处(长江口)月平均最高达 60 g·m$^{-3}$,最低约 10 g·m$^{-3}$;研究区东南位置(E 站位)TSM 浓度最低,最低达 0.2 g·m$^{-3}$,最高 1.6 g·m$^{-3}$。在高浑浊的近海海域,长江口海域 TSM 浓度年内季节差异性最大,杭州湾 TSM 浓度整体较高,季节性差异(相对于长江口海域)相对较小。

**表 4 TSM 浓度变化分析站点位置信息**

**Table 4 Location information of the sites for TSM concentration variation analysis**

| 站位 | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 位置 | 30.50°N, 121.55°E | 31.10°N, 122.25°E | 32.00°N, 124.50°E | 30.50°N, 123.75°E | 29.00°N, 124.10°E |

## 5 结论

杭州湾、长江口等近海区域的 TSM 浓度变化除了受入海河流径流量等因素影响而存在较强的季节性变化、海域开发以及人工设施影响外,在近海海域还存在由于潮汐作用而导致的日内变化,对于此类条件下的 TSM 浓度监测,则需要利用地球静止轨道水色卫星开展逐小时的高时间分辨率遥感。

基于杭州湾及其邻近海域航次实测的 TSM 浓度

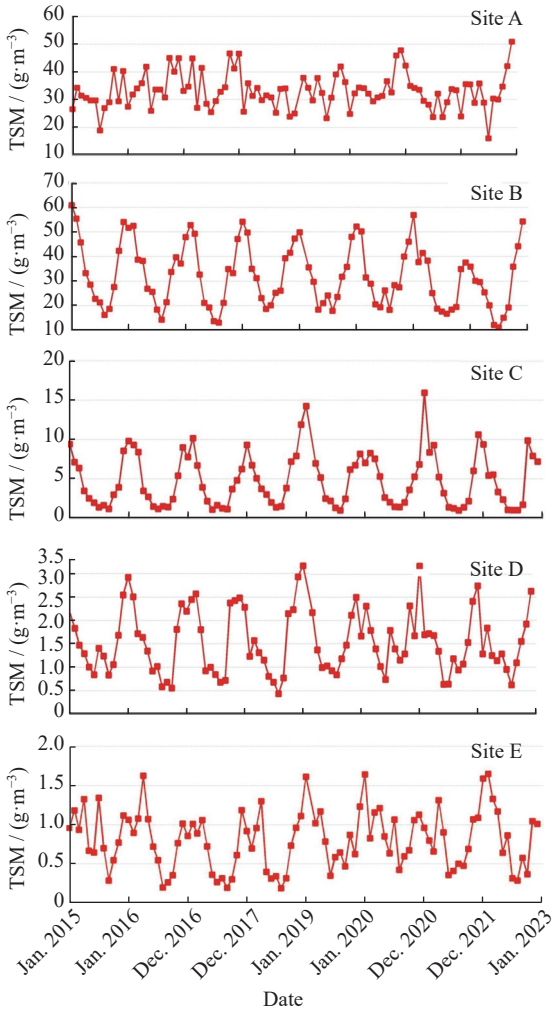



图 12 分析站位 A～E 位置处 TSM 浓度时序曲线

Fig. 12 Time series curve of TSM concentration at analysis site A to site E

和光谱信息数据，建立了中国海洋水色卫星 HY-1C/D 卫星 COCTS, Suomi NPP 和 JPSS-1 卫星 VIIRS, Aqua 和 Terra 卫星 MODIS, COMS 卫星 GOCI 等卫星载荷的 TSM 浓度遥感反演模型，模型精度平均相对误差不高于 19%。使用本文建立的 TSM 浓度遥感反演的局地模型，经遥感反演和融合得到了这些卫星遥感载荷在杭州湾及其邻近海域总悬浮物的遥感反演数据集。遥感融合结果经与实测数据对比验证，两者线性相关系数为 0.72，平均相对偏差为 26%。2015－2022 年卫星遥感结果表明杭州湾及其邻近海域总悬浮物浓度年际变化不大，其线性变化量不超过其年平均浓度值的 0.5%。

利用包括 HY-1C/D 卫星 COCTS 等的海洋水色遥感载荷，可有效遥感反演得到杭州湾及其邻近海域的 TSM 浓度并可分析其时间变化特征。然而如需要获得更高时空分辨率的 TSM 浓度等海洋生态环境要素，则需发展地球静止轨道海洋水色卫星和更高时空分辨率、高性能的海洋生态环境遥感监测卫星。在中国海洋水色卫星方面，规划了发展新一代海洋水色观测卫星、高轨海洋与海岸带环境监测卫星，其将搭载更高时空分辨率和更高性能的极轨卫星及地球静止轨道海洋水色环境遥感载荷，TSM 浓度遥感反演模型将为未来海洋水色卫星建设提供参考。

## 参考文献


[1] TASSAN S, D'ALCALÁ M R. Water quality monitoring by thematic mapper in coastal environments. A performance analysis of local biooptical algorithms and atmospheric correction procedures[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **45**(2): 177-191

[2] TASSAN S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(12): 2369-2378

[3] RUDDICK K G, OVIDIO F, RIJKEBOER M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(6): 897-912

[4] HE M X, LIU Z S, DU K P, *et al*. Retrieval of chlorophyll from remote-sensing reflectance in the China seas[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(15): 2467-2474

[5] TANG Junwu, WANG Xiaomei, SONG Qingjun, *et al*. Statistical inversion models for case II water color elements in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, **22**(Suppl.): 1-7 (唐军武, 王晓梅, 宋庆君, 等. 黄、东海二类水体水色要素的统计反演模式 [J]. 海洋科学进展, 2004, **22**(增刊): 1-7)

[6] MA Chaofei, JIANG Xingwei, TANG Junwu, *et al*. Inverse algorithms of ocean constituents for HY-1/CCD broadband data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, **27**(4): 38-44 (马超飞, 蒋兴伟, 唐军武, 等. HY-1 CCD 宽波段水色要素反演算法 [J]. 海洋学报, 2005, **27**(4): 38-44)

[7] HE X Q, PAN D L, MAO Z H. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **23**(4): 609-615

[8] HE X Q, BAI Y, PAN D L, *et al*. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery using the ultraviolet wavelength for highly turbid waters[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(18): 20754-2077

[9] HE X Q, BAI Y, PAN D L, *et al*. Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **133**: 225-239

[10] ZHANG M W, TANG J W, DONG Q, *et al*. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(2): 392-403

[11] MOLKOV A A, FEDOROV S V, PELEVIN V V, *et al*. Regional models for high-resolution retrieval of chlorophyll a and TSM concentrations in the Gorky reservoir by Sentinel-2 imagery[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(10): 1215

[12] JIANG Binbin, ZHANG Xiaoyu, DU Yong, *et al*. Retrieving high concentration of suspended sediments based on GOCI: An example of coastal water around Hangzhou Bay, China[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2015, **42**(2): 220-227 (江彬彬, 张霄宇, 杜泳, 等. 基于 GOCI 的近岸高浓度悬浮泥沙遥感反演——以杭州湾及邻近海域为例 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 2015, **42**(2): 220-227)

[13] LI Yuan, GUO Yulong, CHENG Chunmei, *et al*. Remote estimation of total suspended matter concentration in the Hangzhou Bay based on OLCI and its water color product applicability analysis[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, **41**(9): 156-169 (李渊, 郭宇龙, 程春梅, 等. 基于 OLCI 数据的杭州湾悬浮物浓度估算及其产品适用性分析 [J]. 海洋学报, 2019, **41**(9): 156-169)

[14] CHENG Qian, LIU Bo, LI Ting, *et al*. Research on remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in Hangzhou Bay by GF-1 satellite[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, **34**(4): 558-563,577 (程乾, 刘波, 李婷, 等. 基于高分 1 号杭州湾河口悬浮泥沙浓度遥感反演模型构建及应用 [J]. 海洋环境科学, 2015, **34**(4): 558-563,577)

[15] SHAO Yujie, HU Yuekai, ZHOU Bin, *et al*. Remote sensing monitoring of suspended sediment concentration based on GF-4 satellite in the Hangzhou Bay[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, **42**(9): 134-142 (邵宇杰, 胡越凯, 周斌, 等. 基于 GF-4 卫星的杭州湾悬浮泥沙浓度遥感监测研究 [J]. 海洋学报, 2020, **42**(9): 134-142)

[16] YE X M, LIU J Q, LIN M S, *et al*. Sea surface temperatures derived from COCTS onboard the HY-1C satellite[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, **14**: 1038-1047. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3033317

[17] YE X M, LIU J Q, LIN M S, *et al*. Global ocean Chlorophyll-a concentrations derived from COCTS onboard the HY-1C satellite and their preliminary evaluation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(12): 9914-9926

[18] YE X M, LIU J Q, LIN M S, *et al*. Evaluation of sea surface temperatures derived from the HY-1D satellite[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, **15**: 654-665

[19] CAI L N, ZHOU M R, LIU J Q, *et al*. HY-1C observations of the impacts of islands on suspended sediment distribution in Zhoushan coastal waters, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(11): 1766

[20] YU Dingfeng, ZHOU Yan, MA Wandong, *et al*. Retrieval of total suspended matter concentration in Hangzhou Bay based on simulated HICO from in situ hyperspectral data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, **30**(4): 171-175 (禹定峰, 周燕, 马万栋, 等. 基于 HICO 模拟数据的杭州湾水体悬浮物浓度遥感反演 [J]. 国土资源遥感, 2018, **30**(4): 171-175)

[21] MÉLIN F, CHUPRIN A, GRANT M, *et al*. Ocean Colour Data Bias Correction and Merging, Algorithm Theoretical Baseline Document of Ocean Colour Climate Change Initiative (OC_CCI) – Phase Two[OL], April 2016, Issue: 3.7, ESA / ESRIN. https://docs.pml.space/share/s/2RVhiuK2SWyhbSthqDDoxg)