

基于走航观测的长江口邻近海域悬浮颗粒物高频变化研究

肖懿哲^{1,2}, 王桂芬^{1,2*}, 徐文龙^{1,2}, 姜龙^{1,2}, 吴祥柏³, 何金燕^{1,2}, 张银雪^{1,2}

¹ 河海大学自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 江苏 南京 210098;

² 河海大学海洋学院, 江苏 南京 210098;

³ 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212100

摘要 基于 2018 年 5 月 27 日—31 日长江口邻近海域的海洋科学综合调查, 利用船载走航式表观光谱观测系统进行了定点及连续光谱测量, 结合快速多参数水质仪和声学多普勒流速剖面仪同步观测结果, 研究了悬浮颗粒物 (SPM) 的高频变化特征及其影响因素。研究表明, 长江口邻近海域 SPM 浓度存在高频变化特征, 且受潮汐作用影响显著。在退潮周期内, 其浓度在定点站位内有明显的先上升后下降过程, 且浓度高值与高流速相对应。断面走航观测显示, SPM 在短时间内变化特征存在明显的空间差异。在水深较浅的区域中局地再悬浮过程的作用明显, 且 SPM 浓度与流速之间有着良好的对应关系, 而在水深较深、离岸较远的区域中 SPM 浓度的变化则可能与长江冲淡水过程相关。

关键词 海洋光学; 悬浮颗粒物; 走航光谱测量; 高频变化

中图分类号 P733.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0601004

High-Frequency Variation of Suspended Particle Matter in Sea Area Adjacent to Yangtze Estuary Based on Underway Observation

Xiao Yizhe^{1,2}, Wang Guifen^{1,2*}, Xu Wenlong^{1,2}, Jiang Long^{1,2}, Wu Xiangbai³,
He Jinyan^{1,2}, Zhang Yinxue^{1,2}

¹ Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

² College of Oceanography, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

³ School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212100, China

Abstract Based on a comprehensive marine scientific survey conducted in the sea area adjacent to the Yangtze Estuary from May 27 to May 31, 2018, a fixed point and continuous spectrum observation with the ship-based underway apparent spectrum observation system is carried out. Simultaneous observation results of a rapid multi-parameter water quality meter and an acoustic Doppler current profiler are also incorporated to study the high-frequency variation of the suspended particulate matter (SPM) and its influencing factors. The results show that the SPM concentration in the sea area adjacent to the Yangtze Estuary demonstrates high-frequency variations and significant influence by the tide. During the ebb period, the SPM concentration at the fixed station distinctly increases first and then decreases, with high value corresponding to the high current velocity. Underway transect

收稿日期: 2021-08-05; 修回日期: 2021-09-20; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(41776045)、江苏省自然科学基金(BK20200517)、中央高校基本科研业务费专项资金(2017B06714)

通信作者: *guifenwang@hhu.edu.cn

observation results exhibit obvious regional differences in the variation characteristics of the SPM in a short time. In a shallower area, the local resuspension process plays a dominant role, with a close relationship between SPM concentration and the current velocity. In contrast, the concentration variation of the SPM in farther offshore areas with deeper depth may be related to the Yangtze River diluted water process.

Key words oceanic optics; suspended particulate matter; underway spectral measurement; high-frequency variation

1 引言

悬浮颗粒物(SPM)作为水体重要的光学组分,会通过吸收和散射作用改变水下光场,进而影响海洋初级生产力^[1]。针对 SPM 的监测在泥沙输运、营养盐流动和污染物运移等研究方面也有重要价值^[2-3]。受陆源输入、底质再悬浮以及地形变化等诸多因素的影响,在人类活动较多的河口、近岸海域中 SPM 浓度较高,且在较短时间内(小于 1 h)有很大的变化幅度,有些研究学者将这种短时间内的变化表述为高频变化特征^[4-5]。

作为中国径流量最大的河流,长江每年携带大量悬浮物质进入海洋,再加上潮汐、季风及复杂地形等诸多因素的影响,长江口邻近海域的 SPM 时空分布复杂多变^[6-9],故对其高频变化特征的研究受到了国内外学者的广泛关注^[4-5,8-10]。然而,受制于观测手段,最初对此区域的研究多集中在季节与大小潮周期分布特征的变化^[11-12]。受冬季风和环流系统的影响,冬季泥沙大量输出,SPM 含量较高;夏季则因温跃层存在,垂向混合受限,表层 SPM 浓度较低^[10,12]。此外,受到潮汐动能变化的影响,大潮期间 SPM 浓度普遍高于小潮^[9,11]。

长江口邻近海域易受径流、潮汐等水动力及风场、气温等大气强迫过程的影响^[13],并且 SPM 浓度还存在明显的短周期内变化特征。因此,季节尺度上进行研究显然不能满足需求。前人基于现场定点站位观测指出在潮周期内 SPM 浓度有明显变化,高值对应低潮位,低值对应高潮位,这与该区域潮差较大、潮流较强和易受长江口及杭州湾泥沙扩散影响等因素密切相关,涨落潮的平流作用很大程度上会引发 SPM 变化^[9,14]。赵盖博等^[15]通过原位座底连续观测的方式研究发现,在陆架浅海区中,SPM 分布会受到潮流、波浪等多种要素的综合影响,平流作用会导致其浓度及分布产生水平空间的变化。潮流及风浪的湍混合还会造成垂直方向上 SPM 的扩散,进而对局地分布产生影响。

随着观测技术的发展,利用水色卫星遥感手段对水色要素高频变化的监测研究日益增多^[16-18]。利用水色光谱变化特征可有效反演得到 SPM 浓度的

变化^[13,17]。He 等^[5]基于地球静止海洋水色成像仪(GOCI)及浮标数据对近岸海域 SPM 日变化过程进行探讨;发现盐度与 SPM 浓度呈现明显的负相关关系,并认为潮汐是重要影响因素;指出台风等偶发性强风事件会造成 SPM 浓度短时间增加。周钰等^[18]将 GOCI 观测与有限体积海岸海洋模型(FVCOM)模拟的潮流潮汐数据相结合,研究认为在长江浅滩区域造成潮周期内 SPM 浓度变化的主要因素是潮致混合强度,且混合强度大小较 SPM 浓度高低存在约 2 h 滞后。Ding 等^[4]则探讨了“葵花 8 号”卫星高频监测 SPM 浓度变化的能力;发现长江口 SPM 浓度 1 h 内的浓度达到的最大值是初始值的两倍多;指出在监测沿岸高动态水域泥沙变化方面,高时间分辨率及长周期观测不可或缺。

目前对于 SPM 高频变化的研究多基于遥感数据,且现场同步观测相对匮乏,尤其在受潮汐影响显著的河口区域。受云层、天气等自然因素的影响以及近岸海域算法精度不足的限制,观测数据的时空分辨率也难以满足研究需求。走航表观光谱观测平台具有在不同天气条件下进行长时间、连续高频和多参数同步测量的优势,近年来已被广泛应用于全球海洋综合调查中^[19-20],也为近岸海域 SPM 观测提供了有效手段^[21]。本文基于长江口邻近海域连续走航观测时获取的水体表观光谱数据来反演 SPM 浓度,并进一步结合同步实测海流、温度和盐度等水文要素,探讨其高频变化特征及影响因素。

2 数据和方法

2.1 航次调查

采用的现场实测数据来自 2018 年春季海洋科学综合调查(HHU-OCN-2018)航次,调查船为“润江一号”,调查海域范围为 29.8°N~31.2°N,121.6°E~123°E,时间为 2018 年 5 月 27 日—31 日。航次开展了定点站位连续观测及连续走航观测,采用船载走航式表观光谱观测系统(GZSS_CruiseAOP)测量海面水色光谱并计算遥感反射率 R_{rs} ,光谱测量范围为 320~950 nm,光谱分辨率为 3.3 nm,采样间隔约为 5 min。利用声学多普勒流速剖面仪(ADCP,频率为 600 kHz)测量水深、流速和流向等

数据,采样间隔为 0.5~1.0 s,剖面单元层厚度为 0.5 m。快速多参数水质仪(RBR maestro)被用于每个站点的温度、盐度、叶绿素 a、溶解氧和浊度等参数的剖面观测,定点站位每隔 1 h 完成一次投放。

定点站位(122°30.319'E, 30°47.776'N)处于杭州湾以东,长江口东南,近嵊泗县。于 2018 年 5 月 27 日 20:00—29 日 02:00 期间进行了连续 32 h 的水文观测,间隔为 1 h。5 月 28 日白天利用水体表面光谱观测系统进行了 10 h 的光谱观测,获得了 114 组数

表 1 D 断面各站点位置分布

Table 1 Location distribution of each station in section D

Station name	Longitude	Latitude	Station name	Longitude	Latitude
D2	122°15.942'E	30°56.893'N	D3	122.20.566'E	30°53.910'N
D4	122°25.521'E	30°51.011'N	D5	122°30.264'E	30°47.833'N
D6	122°34.896'E	30°44.896'N	D7	122°39.736'E	30°41.707'N
D8	122°44.680'E	30°38.840'N	D9	122°49.443'E	30°35.741'N

2.2 光谱数据处理

高光谱遥感反射率 R_{rs} 数据通过船载走航式表面光谱观测系统(GZSS_CruiseAOP)获取。该系统集成了 1 个辐照度传感器(RAMSES-ACC-VIS)和 2 个辐亮度传感器(RAMSES-ARC-VIS)。借助测量系统配置的自稳云台,采用“水面之上”法^[22]获取光谱数据,测量过程遵循美国航空航天局(NASA)海洋光学测量规范^[23],收集向上的海面辐亮度 L_{water} 、向下的天空辐亮度 L_{sky} 以及总的下行辐照度 E_s 。每个测量时间点在 1 min 内完成 15 条光谱测量。遥感反射率的计算公式为

$$R_{rs} = (L_{water} - \rho L_{sky}) / E_s, \quad (1)$$

式中: ρ 为气-水界面菲涅耳反射率,其大小取决于观测时太阳方位、天空光辐射分布、光谱仪观测几何、风速、风向和海面粗糙度等因素,取值范围一般为 0.02~0.06^[16]。定点站位光谱观测时的风速范围为 0.09~2.60 m/s。走航观测时的风速范围为 0.2~5.6 m/s,仅个别站点的风速在 5 m/s 左右。为表征每个时间点光谱测量的稳定性,选取 570 nm 波长处的 R_{rs} 和 E_s 数据计算变异系数,即多条光谱的标准差与平均值的比率。在对现场测量数据分析后可知,各时间段内绝大部分 R_{rs} 测量结果的变异系数低于 10%,相应 E_s 变异系数绝大部分低于 5%。由此,可以认为观测区域内测量过程受风速影响较小,在后续计算中将 ρ 近似取值为 0.023。图 1 分别给出了定点及断面观测获取的部分 R_{rs} 光谱,可见不同浊度水体中观测到的水色光谱分布有明显

差异,其中 NTU 为比浊度法浊度单位。5 月 30 日沿 D 断面(D2~D9)进行来回走航观测,断面各站点位置的分布如表 1 所示,光谱测量的时段为 8:50—18:35。走航路线大致分三段:1)从 D9 站出发,到达 D2 站,由于光线的原因,故在 D7 站附近才开始进行光谱测量;2)从 D2 站调转头原路返回至 D9 站;3)从 D9 站返回至 D6 站附近。

航次调查过程中获取的有效光谱数据的时间间隔为 5~15 min,参照已有研究^[4-5],将观测期间发现的小时级变化表述为高频变化特征。

差异,其中 NTU 为比浊度法浊度单位。

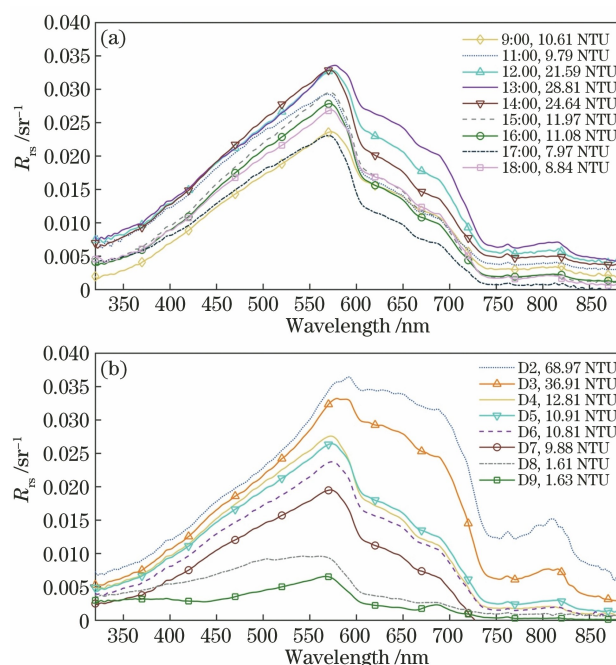


图 1 研究区域各站点遥感反射率光谱。(a)定点站位(2018 年 5 月 28 日);(b)连续走航断面

Fig. 1 Remote sensing reflectance spectrum of each station in study area. (a) Fixed station (May 28, 2018); (b) continuous underway section

2.3 悬浮颗粒物反演算法

所研究水域浊度多集中在 50 NTU 以下,不属于高度浑浊水体,选择了唐军武等^[24]提出的适用于黄、东海二类水体的反演算法,其表达式为

$$\lg C_{\text{SPM}} = \beta_0 + \beta_1 [R_{rs}(555) + R_{rs}(670)] + \beta_2 \left[\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)} \right], \quad (2)$$

式中： β_0 、 β_1 和 β_2 均为模型参数，其取值分别为 0.58213、23.84071 和 -0.485332； C_{SPM} 为 SPM 的质量浓度，单位为 mg/L。除此之外，还将文献[24]中的算法与 Shen 等[25]、D'sa 等[26]、Nechad 等[27]以及 Qiu 等[28]提出的反演算法进行了比较，具体结果见 3.1 节。

2.4 潮汐、潮流数据

为获得走航过程中每条光谱测量时刻对应站位的潮汐、潮流的变化，采用适用于沿海及河口区域的三维水动力模型 GETM^[29] 模拟得到的潮汐及潮流数据。该模式可有效模拟近岸区域的潮汐过程，在先前研究中已经得到了充分验证^[30]。本文也将 GETM 模拟的潮位数据与 2018 年 5 月潮汐表预测数据进行了比较，如图 2 所示。2018 年 5 月中二者的相关系数 r 达到 0.97，均方根误差为 0.227 m。航次期间二者相关系数和均方根误差分别为 0.98 和 0.217 m，表明在此区域模拟效果较好。

3 结果与讨论

3.1 悬浮颗粒物反演效果的对比分析

前人在长江口邻近海域的研究表明，浊度和 SPM 间存在明显的线性关系^[12-31]。浊度常被作为 SPM 测量的简单指标^[32-33]，一定程度上可反映出 SPM 浓度的变化趋势。直接将时空匹配后的实测浊度数据用于表征实测 SPM 浓度的变化，以评估不同算法在此区域的表现，共得到 28 个样本点，如图 3 所示。可以发现，文献[26]、文献[27]和文献[28]中的反演算法在低浊度时反演表现不佳，如图 3(c)~(e)所示。文献[24]和文献[25]中算法的反演结果与实测浊度之间相关性较好，决定系数 R^2 分别达到 0.93 和 0.94。调查过程中表层实测浊度的最高值仅有 69.97 NTU，且根据 B3 站仅有的 3 组时间匹配的测量结果来看，实测 SPM 浓度分别为 16.17、8.70、6.40 mg/L，文献[24]中算法反演的结果为 12.80、8.25、6.20 mg/L，相较文献[25]中算法反演的结果更接近实测数值（52.53、33.67、23.96 mg/L），即在此区域中文献[25]中算法反演的结果存在一定程度上的高估。因此，选择文献[24]中的算法用于 SPM 浓度的反演。

3.2 定点站位处悬浮颗粒物高频变化的分析

图 4 为 2018 年 5 月 28 日定点站位处由光谱观

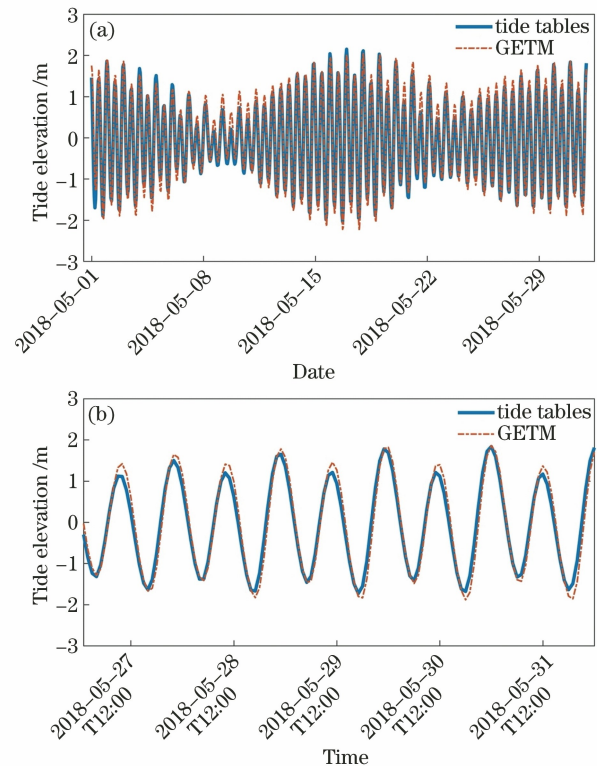


图 2 不同时间点处绿华山站 GETM 模式潮位与潮汐表潮位的比较。(a) 2018 年 5 月；(b) 航次期间（2018 年 5 月 27—31 日）

Fig. 2 Comparison of tide elevation simulated by GETM and tide tables at Lühuashan Station at different time points. (a) May 2018; (b) during voyage (May 27—31, 2018)

测反演获取的 SPM 浓度及潮位变化的对比图。可以发现，SPM 浓度在观测期间存在较为复杂的高频变化特征。在 09:00—11:30 以及 15:00—19:00 中，SPM 浓度处于较低水平且变化相对平缓。在 11:30—15:00 中，SPM 浓度较高，最高值可以达到 63.76 mg/L。在此期间，浊度也表现出相似的变化特征。观测时间内包含一个完整的落潮周期，结合实测潮位变化特征可发现，当落潮开始时，SPM 浓度未出现增长，仍处于较低水平，随着潮位变化进入落急阶段，SPM 浓度迅速上升，高值区（时间段为 11:42—14:42）的 SPM 浓度均值达到 33.94 mg/L，是开始阶段浓度的约 3.53 倍。在进入落憩阶段后，SPM 浓度迅速降低至较低水平，并一直持续到观测结束，此阶段平均 SPM 浓度仅为 11.16 mg/L。

对于近岸海域短周期内 SPM 出现的变化，已有研究通常认为其与水平方向上潮汐平流输运作用及垂向上的地底层泥沙的再悬浮过程息息相关，且泥沙的局地悬浮和迁移过程会很大程度上影响水体

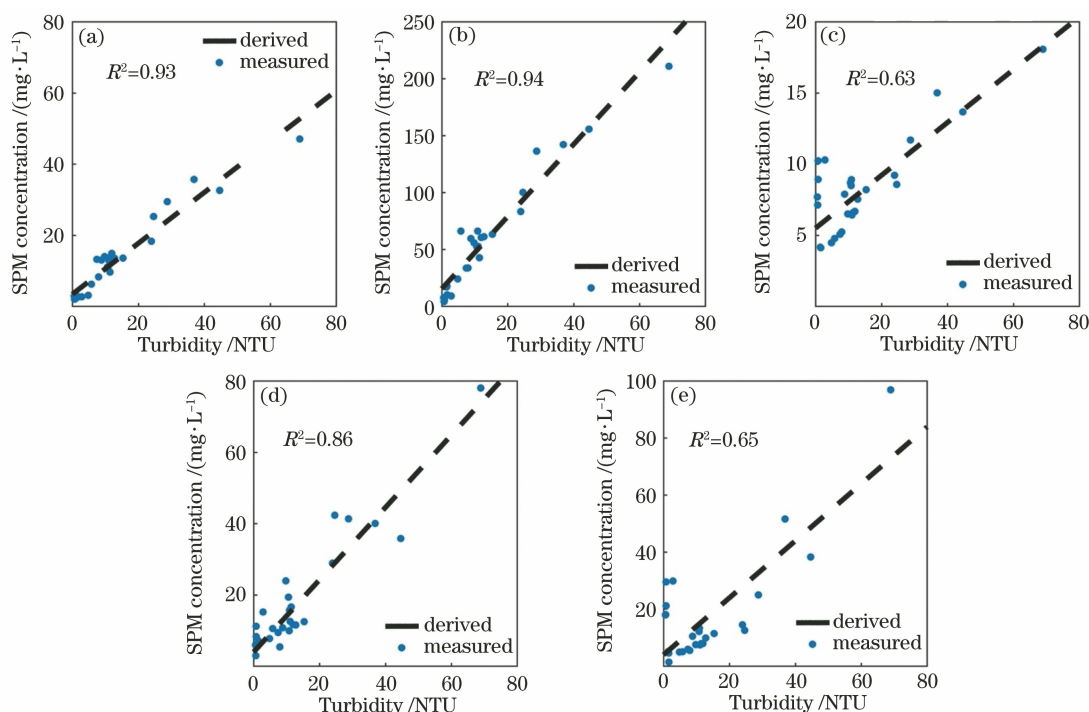


图 3 不同算法反演得到的 SPM 浓度与实测浊度的比较。(a)文献[24]; (b)文献[25]; (c)文献[26]; (d)文献[27]; (e)文献[28]

Fig. 3 Comparison between SPM concentration derived by different algorithms and measured turbidity. (a) Ref. [24]; (b) Ref. [25]; (c) Ref. [26]; (d) Ref. [27]; (e) Ref. [28]

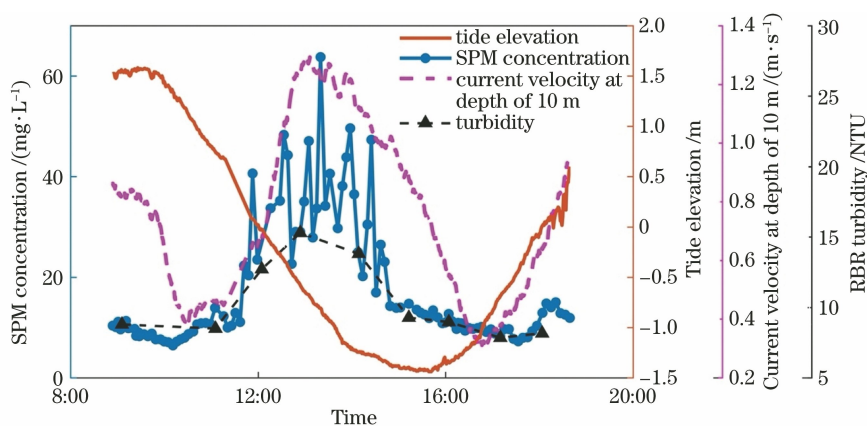


图 4 2018 年 5 月 28 日时定点站位 SPM 浓度、潮位、10 m 水深流速及浊度随时间的变化

Fig. 4 SPM concentration, tide elevation, current velocity at depth of 10 m and turbidity varying with time at fixed station on May 28, 2018

的 SPM 浓度^[14,34-36]。为探讨潮周期内 SPM 浓度变化的原因,根据在定点站位测量的浊度、温度、盐度剖面数据和 ADCP 流速数据进行综合分析,如图 5 所示,其中 PSU 为实用盐标。为更清晰展现变化大小,后续绘制浊度分布图像时取浊度对数形式,定义浊度为 N 。研究发现,在 5 月 28 日 00:00—04:00、12:00—14:00 这些表层浊度出现峰值的时间,相应的表层盐度也较高,且温度处于较低的水平。与之相反的是,在 16:00—20:00 中表层浊度浓度处于低

值,此时表层的温度较高,盐度较低。浊度剖面呈现的由底层向上扩散的分布趋势可认为是当水体强烈混合造成表层 SPM 浓度升高时,底层低温、高盐水体被带至表层的垂向作用造成的,如图 5(a)所示。通常局地底层泥沙的再悬浮过程与底层切应力是不可分割的,风浪和潮汐更是 SPM 浓度重要的影响因素。由于观测期间整体风浪较弱,变化不显著,故未考虑风浪的影响,仅考虑流速变化对底层切应力的作用。对图 5(d)所示的同步测量的流速数据进

行分析可知,在水体浊度较高处,流速处于整个时间段内的最大值,且流速较低时刻处的浊度也会较低。在弱风浪条件下,悬浮物质的局地再悬浮过程主要与潮流流速相关。流速增加的同时,底部剪切应力会增强,这会增强颗粒物再悬浮过程,使表层 SPM

浓度升高。若潮流流速较小,则底部切应力会相应减小,很难再使底部颗粒物悬浮到海表。随着沉降作用逐步大于悬浮作用,表层 SPM 浓度逐渐降低。光谱观测期间 SPM 浓度与图 4 所示的 10 m 水深处流速的变化相一致,而观测时间又恰好处于大潮

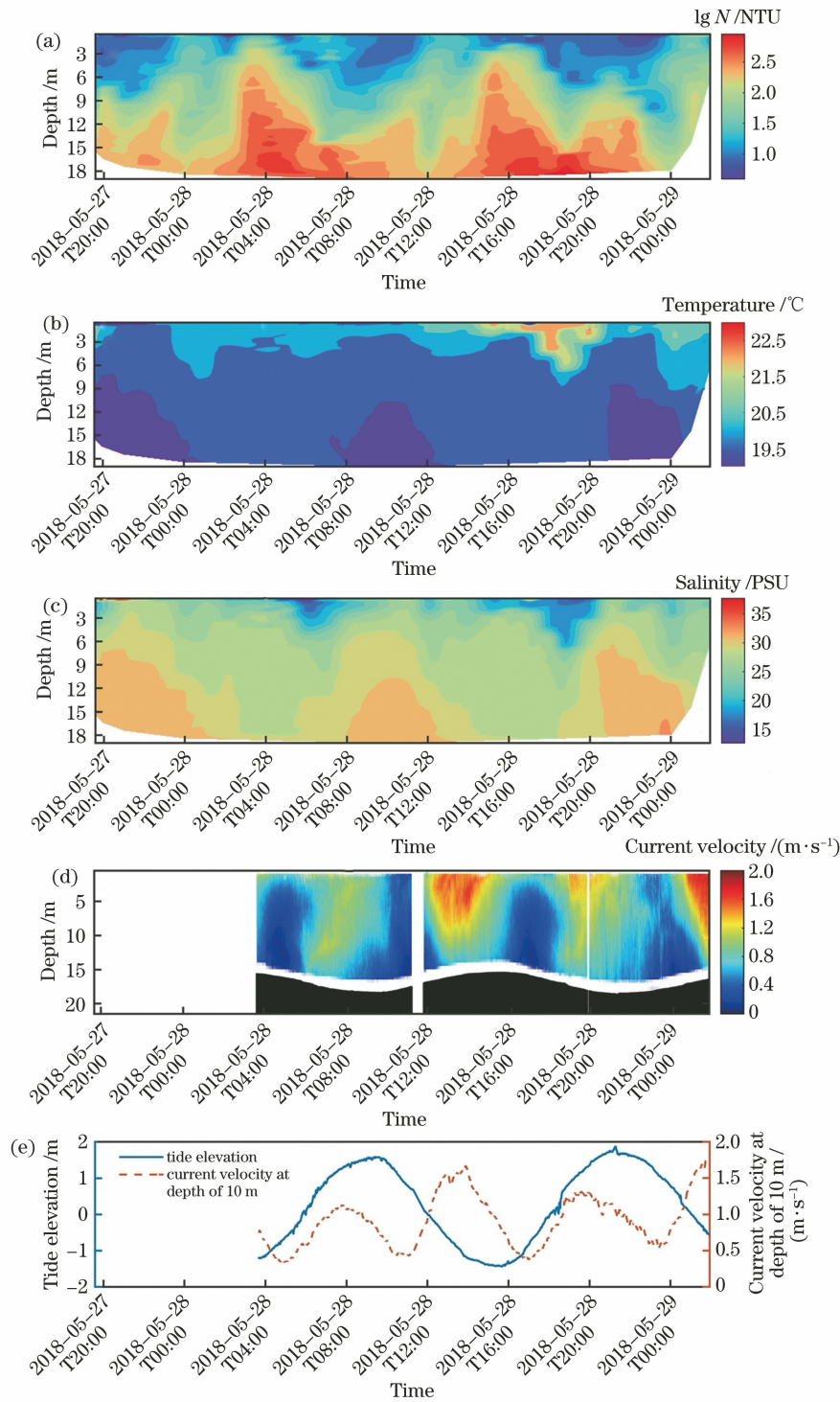


图 5 定点站位处不同参数随时间的变化。(a)浊度;(b)温度;(c)盐度;(d)流速;(e)潮位与 10 m 水深处流速
 Fig. 5 Different parameters varying with time at fixed station. (a) Turbidity; (b) temperature; (c) salinity; (d) current velocity; (e) tide elevation and current velocity at depth of 10 m

时期,此时潮差较大,潮流的动力过程相对较强,水体混合强烈。相较小潮时,大潮期间水体层化较弱^[37],这为底质再悬浮创造了条件。

基于定点站位温度、盐度及流速对 SPM 浓度变化趋势影响的综合分析表明,涨落潮期间流速的变化控制并影响了局地的再悬浮作用,这会对表层 SPM 浓度产生影响,此时会出现高、低流速分别对应高、低 SPM 浓度的现象。该现象与前人在杭州湾、长江口等区域对 SPM 浓度变化的研究较为一致^[38-39]。

3.3 不同区域短时间内悬浮颗粒物变化差异及其影响因素

对 2018 年 5 月 30 日 10 h 内 3 次往返走航光谱观测结果分析可知,约 65 km 范围内 D 断面 SPM 分布具有明显时空差异,如图 6(a)所示。可以发现:SPM 整体呈现出西高东低的分布特征,近岸区域明显高于离岸站点,近岸 D2 和 D3 区域 SPM 浓度平均高达 31.93 mg/L,而离岸 D8 和 D9 站位的 SPM 浓度均值仅为 2.95 mg/L;中间海域(D3~D8 站位)水体 SPM 浓度在 11.68 mg/L 附近变化。这种分布特征一定程度上反映了观测海域 SPM 浓度的空间格局,与已有基于遥感图像的研究结果类似^[5,25]。然而,同一位置不同时刻的观测结果存在较大差别,表明在研究区域内 SPM 的时间变化特征明显。

SPM 浓度相对较高的 D2 附近的海域位于长江口外,易受径流输入影响且水深较浅、底层物质更易悬浮。这些因素可能是造成该位置 SPM 浓度远高于其他区域的主要原因。D8 和 D9 附近海域的水深超过 35 m,且该海域距离岸边较远,不论潮汐平流输运,还是当地泥沙再悬浮作用对其影响都十分有限。就 D2、D9 区域而言,光谱走航观测前后到达相同位置的时间间隔(约 1 h 内)相较断面中间区域较短,故先后反演结果变化不大。然而,在断面中间区域(D3~D8 站),不同时间 SPM 的反演结果明显不同,以 D5 和 D7 附近区域最为突出。

为深入研究 SPM 在短时间内的变化特征及影响因素,选取区域 A(D5 站位附近)和区域 B(D7 站位附近)结合水环境要素进行对比分析,如图 6(b)所示。

3.3.1 区域 A

此区域以 D5 站为中心,水深约为 15 m,9:55—10:45 时间段(区域 A 中的圆点)内走航光谱反演的 SPM 浓度均值仅为 11.76 mg/L 远小于 13:40—14:30 时间段(区域 A 中的菱形)内经过此区域的反

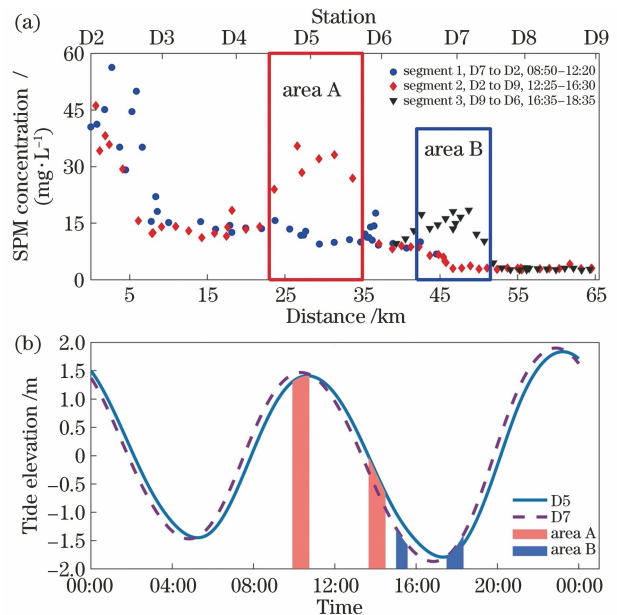


图 6 走航过程中不同参数的变化。(a) D 断面上 SPM 浓度的变化;(b)区域 A、B 中的潮位变化(2018 年 5 月 30 日)

Fig. 6 Variation of different parameters during voyage. (a) Variation of SPM concentration in section D; (b) tide elevation in areas A and B (May 30, 2018)

演均值(29.98 mg/L)。因为在走航过程中每个测量点的时间、位置不同,潮位也不相同,使用 GETM 模式模拟区域 A、B 内的潮位变化发现,SPM 浓度较低的 9:55—10:45 时段处于涨潮末期,SPM 浓度较高的 13:40—14:30 则处于落潮中期。若平流占据主导,受来自沿岸的低盐、高浊水输入的影响,表层 SPM 浓度的升高很可能伴随着盐度的下降。根据盐度剖面数据来看,SPM 浓度的升高并未伴随明显的盐度降低过程,不能体现平流的作用。

航段一、二先后两次到达 D5 站时 RBR 观测的浊度、温度及盐度分布如图 7(a)~(c)所示。可以发现:10:30 时的表层浊度为 9.37 NTU,小于 14:15 时的 39.61 NTU,与光谱反演结果一致;比较两次测量的温盐剖面,在浊度较低的时段,对应着相对较高的温度,较低的盐度。ADCP 测量的流速数据如图 7(d)所示。可以发现,当 SPM 浓度较高时,流速更大,这与定点站位的水体变化特征一致。

基于以上分析,SPM 浓度高、低分别对应涨、落潮,剖面数据未体现平流作用。然而,SPM 浓度与流速之间存在着良好的对应关系,且流速是控制再悬浮过程的主要因素,故认为该时间段区域 A 内局地再悬浮过程占据主导作用。

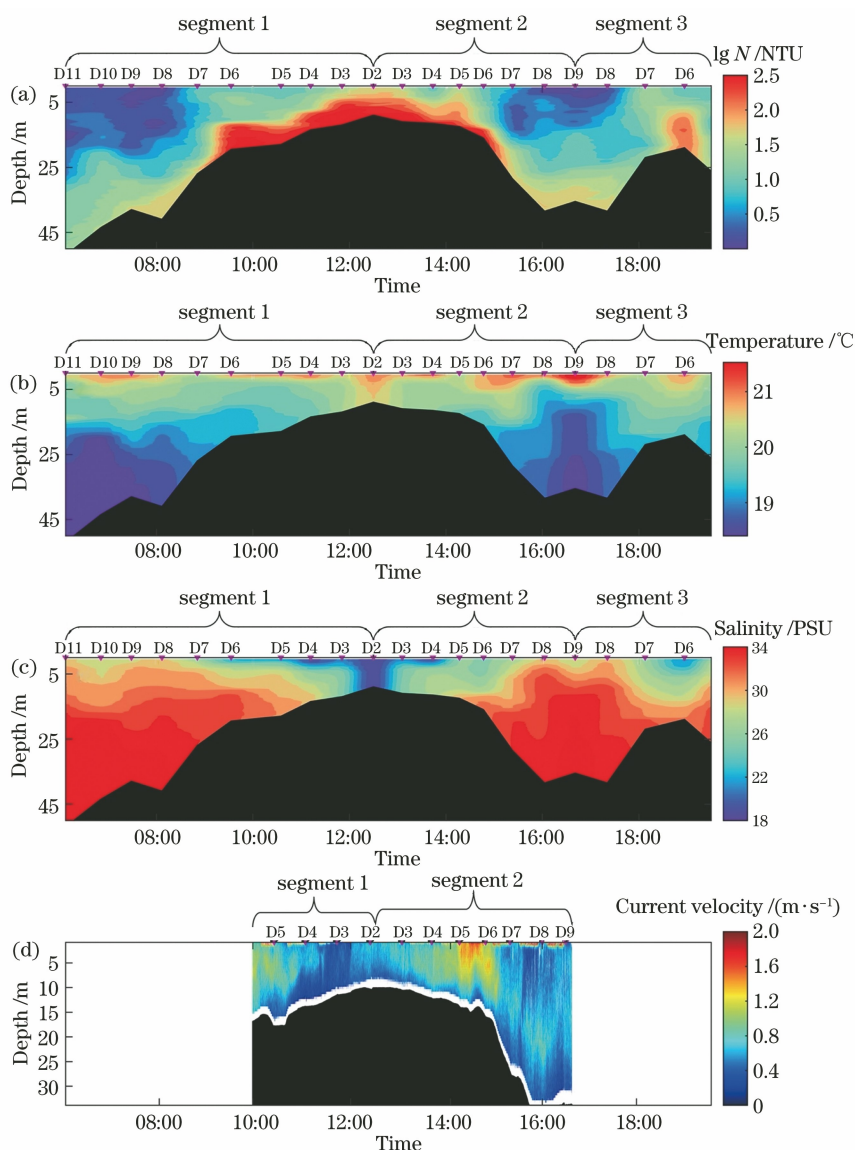


图 7 D 断面三个航段处不同参数的变化。(a) 浊度；(b) 温度；(c) 盐度；(d) 流速

Fig. 7 Variation of different parameters in three segments of section D. (a) Turbidity; (b) temperature; (c) salinity; (d) current velocity

3.3.2 区域 B

区域 B 以 D7 站为中心, 水深为 30 m 左右, 15:00—15:35 时间段(区域 B 中的菱形)内走航光谱反演的 SPM 浓度均值为 4.43 mg/L, 其值仅为 17:30—18:20 时间段(区域 B 中的三角形)内经过此区域的反演均值的 1/3。与区域 A 不同, 航行至此处时, 分别位于落潮末期和涨潮初期, 流速均较小, 加之水深相对较深, 与水深较浅区域、流速较大时刻相比, 潮流引起的底部剪切应力也较小, 此处底层物质的再悬浮作用很难影响到水体表层。从图 7 中航段二、三两次到达 D7 站附近时 RBR 的测量数据可以看出, 表层 SPM 浓度较高的 18:00 较另一时刻, 表层盐度减小, 故认为造成区域 B SPM 浓度差

异的原因不再是流速变化导致的局地再悬浮作用。陈沈良等^[40]在对杭州湾口 SPM 浓度进行研究时也发现类似现象, 在湾口、湾外区域, 流速对 SPM 的影响较小, 在水深较大(水深约为 33 m)的测站处, 流速几乎没有影响, 湾外区域平流起主导作用。

GETM 模式对该区域海流流向的模拟如图 8 所示, 其中矩形框为断面所在位置, 箭头代表流向。可以发现, 该时间段内, 流向一直为东南方向, 由长江口沿岸向外海扩散, 航段三经 D7 站处发现的表层盐度降低的现象也可反映该区域受淡水团输入影响。以盐度为 31 PSU 的等盐线限制长江冲淡水扩散范围, 春季影响范围主要位于 123°E 以西, 长江口、杭州湾及舟山附近海域^[41]也在影响范围之列。

因此,可推断该区域出现的 SPM 浓度变化与长江口冲淡水过程存在关联,冲淡水过程将沿岸混浊、低

盐水体运输至此与当地水体混合,从而导致表层水体盐度降低,浊度升高。

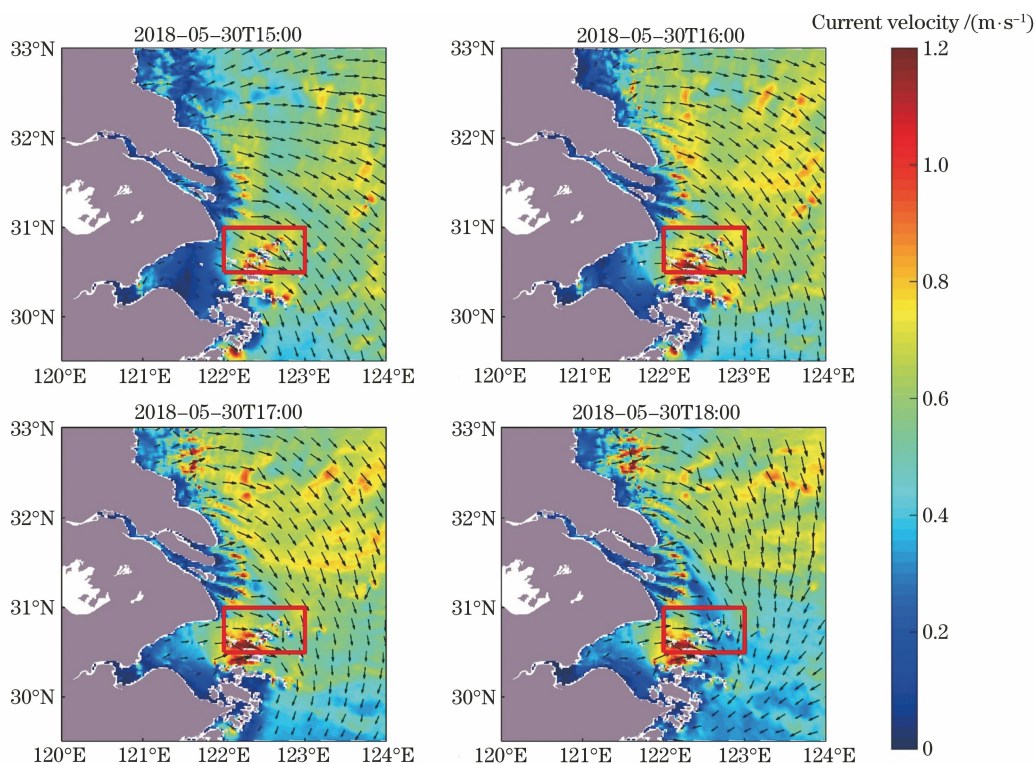


图 8 GETM 模拟海流流速、流向

Fig. 8 Ocean current velocity and direction simulated by GETM

4 总 结

基于长江口邻近海域连续定点及走航观测探讨了该区域中 SPM 的高频变化特征,并结合同步水文数据对 SPM 浓度变化的影响因素进行了讨论。研究发现,该区域内 SPM 存在着显著的高频变化特征,对应一个落潮周期。同一站点定点观测的 SPM 浓度经历了明显的先上升后下降过程,与流速变化一致,且局地再悬浮过程起到了主导作用。基于断面走航观测发现,研究海区中 SPM 浓度整体上呈现出近岸高、离岸低的空间格局,但在短时间内不同区域的 SPM 反演结果存在明显差异。对于水深较浅的区域,SPM 浓度受局地再悬浮过程的影响较为明显,与流速正相关。对于部分较深水域,局地再悬浮过程不明显,长江冲淡水携带的高浊度水体平流作用可能是引起 SPM 变化的主要原因。此外,定点观测调查还捕捉到了 SPM 浓度所具有的较高频率的变化特征,但由于相关水文数据取样频率的限制,具体影响因素有待后续进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Eleveld M A, Pasterkamp R, van der Woerd H J, et al. Remotely sensed seasonality in the spatial distribution of sea-surface suspended particulate matter in the southern North Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80(1): 103-113.
- [2] Ilyina T, Pohlmann T, Lammel G, et al. A fate and transport ocean model for persistent organic pollutants and its application to the North Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 63(1/2): 1-19.
- [3] Mayer L M, Keil R G, Macko S A, et al. Importance of suspended particulates in riverine delivery of bioavailable nitrogen to coastal zones [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(4): 573-579.
- [4] Ding X S, He X Q, Bai Y, et al. High-frequency and tidal period observations of suspended particulate matter in coastal waters by AHI/Himawari-8 [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27387-27404.
- [5] 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.
- [6] Chen R R, Jiang X Z. Analysis of suspended sediment variations from the Yangtze Estuary to Zhejiang-Fujian Provincial coastal waters using remotely sensed data [J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(3): 89-101.

- 陈瑞瑞, 蒋雪中. 长江河口悬浮泥沙向浙闽沿岸输运近期变化的遥感分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(3): 89-101.
- [7] Zhu J J, Zhang J W, Mao Y, et al. Temporal and spatial distribution of suspended particles in Qingcaosha reservoir of the Yangtze River estuary based on Landsat-8 OLI[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2201001.
朱晶晶, 张靖玮, 毛颖, 等. 基于 Landsat-8 OLI 的长江口青草沙水库悬浮颗粒物时空分布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 2201001.
- [8] Dai Q, Gong F, Huang H Q, et al. Monitoring the dynamic of suspended sediment using tower-based water spectrum observing system in the Hangzhou Bay[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9221: 92210Q.
- [9] Chen S L. Seasonal, neap-spring variation of sediment concentration in the joint area between Yangtze Estuary and Hangzhou Bay[J]. Science in China Series B, 2001, 44(1): 57-62.
- [10] Bian C W, Jiang W S, Song D H. Terrigenous transportation to the Okinawa Trough and the influence of typhoons on suspended sediment concentration[J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(10/11): 1189-1199.
- [11] Shi W, Wang M H, Jiang L D. Spring-neap tidal effects on satellite ocean color observations in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(C12): C12032.
- [12] Wang Y Z, Jiang W S. Numerical simulation of variations in winter and summer suspended material concentrations in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2007, 25(1): 28-33.
王勇智, 江文胜. 渤、黄、东海悬浮物质量浓度冬、夏季变化的数值模拟[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(1): 28-33.
- [13] Shi W, Wang M H. Satellite observations of the seasonal sediment plume in central East China Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2010, 82(4): 280-285.
- [14] Chen S L, Zhang G A, Yang S L, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangtze River estuary and its adjacent waters[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 260-266.
陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 260-266.
- [15] Zhao G B, Bian C W, Xu J P. A field study of shear stress and suspended sediment concentration in the bottom boundary layer under the influences of tidal currents and wind waves [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(11): 83-91.
赵盖博, 边昌伟, 徐景平. 潮流和风浪对海底边界层剪切应力和悬浮物浓度影响的观测研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(11): 83-91.
- [16] Li Z H, Chen Z Z, Wang L Y, et al. Remote sensing inversion of concentration of phytoplankton chlorophyll and carotenoid from GOCI measurements in coastal waters[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0201001.
李正浩, 陈志钊, 王力彦, 等. 结合 GOCI 数据反演近海浮游植物叶绿素和类胡萝卜素浓度[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0201001.
- [17] Wang F, Zhou B, Liu X M, et al. Remote-sensing inversion model of surface water suspended sediment concentration based on *in situ* measured spectrum in Hangzhou Bay, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(6): 1669-1677.
- [18] Zhou Y, Xuan J L, Huang D J. Tidal variation of total suspended solids over the Yangtze Bank based on the geostationary ocean color imager[J]. Scientia Sinica Terrae, 2020, 50(9): 1280-1288.
周钰, 宣基亮, 黄大吉. 基于 GOCI 观测数据的长江浅滩悬浮泥沙的潮周期变化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(9): 1280-1288.
- [19] Boss E, Picheral M, Leeuw T, et al. The characteristics of particulate absorption, scattering and attenuation coefficients in the surface ocean; Contribution of the Tara Oceans expedition [J]. Methods in Oceanography, 2013, 7: 52-62.
- [20] Brewin R J W, Dall'Olmo G, Pardo S, et al. Underway spectrophotometry along the Atlantic Meridional Transect reveals high performance in satellite chlorophyll retrievals[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 183: 82-97.
- [21] Hu J C, Pan D L, Wang D F, et al. Development and validation of the data processing method for the underway water Hyperspectral Surface Acquisition Systems [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(6): 519-525.
胡佳臣, 潘德炉, 王迪峰, 等. 走航水体高光谱观测系统 SAS 的数据处理方法开发与检验[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(6): 519-525.
- [22] Tang J W, Wang X M, Song Q J, 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(B10): 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(B10): 1-7.
- [23] Mobley C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements [J].

- Applied Optics, 1999, 38(36): 7442-7455.
- [24] Tang J W, Tian G L, Wang X Y, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 37-44.
唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法 [J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.
- [25] Shen F, Zhou Y X, Peng X Y, et al. Satellite multi-sensor mapping of suspended particulate matter in turbid estuarine and coastal ocean, China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11/12): 4173-4192.
- [26] D'Sa E J, Miller R L, McKee B A. Suspended particulate matter dynamics in coastal waters from ocean color: application to the northern Gulf of Mexico [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(23): 5423-5427.
- [27] Nechad B, Ruddick K G, Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(4): 854-866.
- [28] Qiu Z F. A simple optical model to estimate suspended particulate matter in Yellow River Estuary [J]. Optics Express, 2013, 21(23): 27891-27904.
- [29] Burchard H, Bolding K. GETM: a general estuarine transport model, scientific documentation [EB/OL]. [2021-01-06]. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC23237>.
- [30] Jiang L, Gerkema T, Wijsman J W M, et al. Comparing physical and biological impacts on seston renewal in a tidal bay with extensive shellfish culture [J]. Journal of Marine Systems, 2019, 194: 102-110.
- [31] Zhai S K, Zhang H J, Fan D J, et al. Corresponding relationship between suspended matter concentration and turbidity on Changjiang Estuary and adjacent sea area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(5): 693-699.
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.
- [32] Chen H R, Zhang J W, Wang S Q, et al. Study on diurnal variation of turbidity in the Yangtze estuary and adjacent areas by remote sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0501003.
陈黄蓉, 张靖玮, 王胜强, 等. 长江口及邻近海域的浊度日变化遥感研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0501003.
- [33] Shao M H, Zhang S X, Ma J X. The standard, basic unit and instrument for measurement of turbidity [J]. Ocean Technology, 1997, 16(4): 50-61.
邵秘华, 张素香, 马嘉蕊. 略论浊度标准、单位和测量仪器的研究与进展 [J]. 海洋技术, 1997, 16(4): 50-61.
- [34] Krivtsov V, Gascoigne J, Jones S E. Harmonic analysis of suspended particulate matter in the Menai Strait (UK) [J]. Ecological Modelling, 2008, 212(1/2): 53-67.
- [35] Li Y, Jia J J, Zhu Q G, et al. Differentiating the effects of advection and resuspension on suspended sediment concentrations in a turbid estuary [J]. Marine Geology, 2018, 403: 179-190.
- [36] Weeks A R, Simpson J H, Bowers D. The relationship between concentrations of suspended particulate material and tidal processes in the Irish Sea [J]. Continental Shelf Research, 1993, 13(12): 1325-1334.
- [37] Li X, Hu G D, Shi Z, et al. Mixing, stratification and tidal straining in dry season within the north passage of the south branch/south channel of the Changjiang River estuary [J]. Port & Waterway Engineering, 2013(9): 79-88, 94.
李霞, 胡国栋, 时钟, 等. 长江口南支南港的北槽枯季水体中混合、层化与潮汐应变 [J]. 水运工程, 2013(9): 79-88, 94.
- [38] Yang Y, Wang Y P, Gao J H, et al. Hydrodynamics and fine-grained sediment resuspension in Changjiang estuary during dry seasons [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2006, 42(6): 643-655.
杨旻, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口枯季水动力悬沙特征与再悬浮研究 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 2006, 42(6): 643-655.
- [39] Yu D, Yu Z F, Dou W J, et al. Hourly variability of surface suspended sediment concentration in Hangzhou bay in winter [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2014, 13(4): 373-379.
余丹, 于之锋, 窦文洁, 等. 杭州湾冬季表层水体悬浮泥沙质量浓度的逐时变异 [J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2014, 13(4): 373-379.
- [40] Chen S L, Gu G C. Modeling suspended sediment concentrations in the mouth of Hangzhou bay [J]. Journal of Sediment Research, 2000(5): 45-50.
陈沈良, 谷国传. 杭州湾口悬沙浓度变化与模拟 [J]. 泥沙研究, 2000(5): 45-50.
- [41] Wang K M, Xiong X J, Guo B H, et al. The extension form and seasonal variation of the Changjiang diluted water during 2006—2007 [J]. Coastal Engineering, 2012, 31(1): 46-54.
王凯敏, 熊学军, 郭炳火, 等. 2006—2007 年长江冲淡水的扩展形态及季节变化 [J]. 海岸工程, 2012, 31(1): 46-54.