

褚言皓, 吴文娟, 李鹏, 等. 黄河口悬浮泥沙时空动态及其驱动机制[J]. 海洋学报, 2022, 44(6): 150–163. doi:10.12284/hyxb2022059

Chu Yanhao, Wu Wenjuan, Li Peng, et al. Temporal and spatial dynamics of suspended sediment and its driving mechanism in the Yellow River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(6): 150–163. doi:10.12284/hyxb2022059

# 黄河口悬浮泥沙时空动态及其驱动机制

褚言皓<sup>1</sup>, 吴文娟<sup>2</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 陈沈良<sup>1\*</sup>

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 2. 黄河河口海岸科学研究所, 山东 东营 257091)

**摘要:** 受径流输沙、风浪、潮汐等影响, 河口近岸海域悬浮泥沙具有显著的时空变化。本文基于小时分辨率的 GOCI 遥感影像, 利用最优遥感反演算法, 结合空间分析和统计方法, 深入研究黄河口及邻近海域悬沙时空动态特征及驱动机制。结果表明, 径流输沙对悬沙浓度的影响以河口近岸区为主, 高径流输沙对悬沙浓度分布影响可达距岸约 20 km, 并向弧东近岸方向扩散。大风可引起清水沟老河口区泥沙强烈再悬浮, 形成高浓度悬沙区。涨落潮对小时尺度的悬沙浓度影响显著, 并影响悬沙的南北扩散。大潮悬沙浓度变化和扩散范围均大于小潮, 潮流流速不同是造成该差异的主要原因。水深与悬沙浓度之间存在较明显的负相关关系, 根据不同驱动因素的差异, 悬沙浓度随着水深的增加呈现出指数型、幂函数型、线性 3 种关系。

**关键词:** GOCI; 悬浮泥沙; 时空动态; 驱动因素

中图分类号: TV142; TV148<sup>+.5</sup>

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)06-0150-14

## 1 引言

河口海岸地区是河海相互作用的关键地带, 具有各种复杂的物理、化学和生态过程。大型河流源源不断地向海洋输送丰富的悬浮颗粒物, 不仅可以作为载体影响营养物和污染物的分布扩散, 在促进近岸海域碳、氧和营养盐的循环中也扮演重要角色<sup>[1-2]</sup>; 同时, 悬浮物质的运输、沉降、再悬浮等物理过程对水下水地形塑造, 海岸线的侵蚀推进都有着重要影响<sup>[3]</sup>。此外, 悬浮颗粒物可显著增加海水浊度, 并通过散射和吸收造成穿透海面的太阳光的衰减, 是近岸海域初级生产力和氧循环的重要调节因子<sup>[4]</sup>。相应地, 悬浮物质的运输和时空动态也会对河口海岸地区复杂的自然环境和动力条件产生响应。河流的自然改道变迁<sup>[5]</sup>、径流与输沙<sup>[6]</sup>、潮汐与潮流<sup>[7]</sup>、风浪和风暴潮<sup>[8]</sup>等都对悬浮颗粒物时空变化具有驱动作用。因此, 深

入开展河口近岸海域悬浮颗粒物时空动态特点以及驱动机制研究具有重要的科学意义。

黄河是中国第二大河, 也是世界上含沙量最大的河流之一, 以水少沙多著称于世<sup>[9]</sup>, 每年携带大量的泥沙进入半封闭的渤海, 河口近岸海域存在高浓度的悬浮泥沙。近年来黄河入海水沙显著减少, 由水少沙多逐渐转变为枯水少沙<sup>[10-11]</sup>, 特别是流域大型水库建设和调水调沙等人类活动对入海水沙和近岸海域动力环境产生重要影响<sup>[12-14]</sup>。许多研究者通过原位数据观测和数值模拟对黄河口悬浮泥沙的运输和时空变化已做过大量研究<sup>[15-21]</sup>, 但大面积现场同步观测耗时费力且难度较大, 数值模拟也有着精度不高等缺点。

卫星遥感技术具有数据观测空间范围广、时间序列长、成本低等特点, 能够弥补传统方法的诸多不足, 已广泛应用于黄河口悬浮泥沙的研究。黄海军等<sup>[22]</sup>较早开展黄河口高浊度水体光谱测量并与悬沙浓度

收稿日期: 2021-06-27; 修订日期: 2021-08-30。

基金项目: 国家自然科学基金(U1706214); 河口海岸学国家重点实验室开放课题(SKLEC-KF202001)。

作者简介: 褚言皓(1997—), 男, 山东省青岛市人, 主要从事河口海岸遥感及应用研究。E-mail: cyh199720@163.com

\* 通信作者: 陈沈良(1964—), 男, 浙江省海盐县人, 教授, 主要从事河口海岸学及其应用研究。E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

建立回归方程; 樊辉等<sup>[23]</sup>利用 Landsat TM/ETM+影像波段建立反演方程进行悬沙浓度估算, 但并未利用实测数据对结果进行精度验证; 刘振宇等<sup>[24]</sup>利用 Landsat 8 影像建立黄河口悬沙反演的两参数线性模型, Zhang 等<sup>[25]</sup>针对 Landsat TM 和 Landsat ETM+影像建立了黄河口悬沙浓度反演的经验模式, 认为悬沙浓度季节性变化与黄河入海水沙和潮流有关; Qiu 等<sup>[26]</sup>利用 Landsat 8 建立反演模型, 仅对影响悬沙浓度的风浪和径流量输沙因素进行了探讨; Shi 和 Wang<sup>[27]</sup>利用 MODIS 影像对黄渤海和东海悬浮物特性进行研究, 发现年际和季节平均悬浮物浓度空间分布和变化受沉积物再悬浮驱动, 再悬浮过程与季节性风和沉积物特性有关。众多研究对黄河口悬沙浓度的反演模型精度最高可达到 85%~90% 以上<sup>[24-27]</sup>, 且已从多个方面对黄河口悬沙浓度驱动因素进行深入分析, 但不够系统全面。迄今对黄河口悬沙浓度研究所使用卫星影像的时间分辨率较低, 通常为 1 天或数天 1 景, 在研究以不规则半日潮为主的黄河口悬沙日变化和小时变化方面尚不能满足需求。

韩国于 2010 年发射的 COMS 卫星所携带的 GOCI 传感器是世界上第一颗静止轨道卫星海洋水色传感器, 共有 8 个波段(6 个可见光波段, 2 个近红外波段), 空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 1 h, 成像时

间为北京时间 8:30~15:30, 可以有效观测黄河口悬沙浓度的短周期输运特点和时空变化。因此, 本文基于 GOCI 卫星影像结合实测数据, 利用优选出的反演算法, 结合空间分析和数理统计方法, 探究不同时间尺度黄河口悬沙浓度的分布特征, 全面系统分析径流输沙、风、涨落潮、大小潮等因素对黄河口悬浮泥沙浓度输运和时空分布特征的影响。

## 2 研究区概况

研究区域为现行黄河口及其邻近海域, 包括莱州湾北部和孤东近岸海域(图 1b 黑色虚线框)。研究区气候主要为温带大陆性季风气候区, 四季分明, 降水集中在夏季; 研究区常风向为 SSE 和 E 向, 强风向为 NE 向, 冬季和春季出现大风天的频率较高, 历史上曾出现 36.9 m/s 的极大风速值<sup>[28]</sup>。河口区及其邻近海域潮汐类型主要是不规则半日潮, 潮差较小属于弱潮型河口<sup>[29]</sup>; 与潮汐相对应, 河口地区潮流主要为不规则半日潮流, 以往复流为主, 莱州湾和渤海湾以旋转流为主<sup>[30]</sup>, 涨潮流往南向莱州湾方向, 落潮流向西北往渤海湾方向<sup>[31]</sup>; 研究区波浪主要为风生浪, 波浪方向和强度与盛行风的方向和强度相关, 冬半年风浪方向偏北, 夏半年风浪方向偏南。

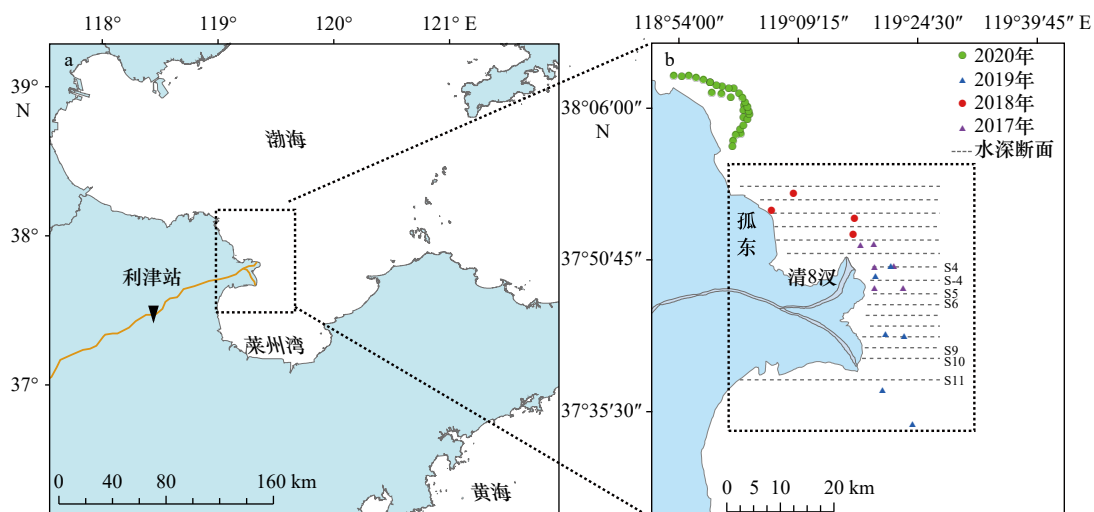


图 1 研究区及悬沙实测点位

Fig. 1 Study area and sampling sites of suspended sediment concentration

## 3 材料与方法

### 3.1 实测数据

为获得研究区表层悬沙浓度实测数据, 分别于 2017 年 8 月 6~9 日、2018 年 8 月 25~30 日、2019 年 7 月 12~15 日和 2020 年 9 月 6 日在黄河口及其邻近海域进

行定点和走航式观测, 详见表 1, 采样点如图 1 所示。悬沙浓度数据测定采用抽滤烘干称重法计算得到, 由于影像质量受云的影响较大, 本文选取影像质量较好的日期所对应的数据共 84 组。其他数据包括孤东验潮站 2018 年逐时潮位和风速风向数据, 还搜集了 2018 年黄河口附近 16 条断面水下地形数据(图 1b)。

表 1 悬沙浓度实测数据

Table 1 Measured data of suspended sediment concentration

日期	数据量/个	悬沙浓度范围/(mg·L <sup>-1</sup> )
2017年8月6日	14	2.2~47.8
2017年8月7日	12	1.4~248.5
2017年8月8日	6	3.6~48.6
2018年8月25日	10	10.9~195.26
2018年8月26日	11	3.6~405.07
2018年8月27日	8	4.2~34.4
2019年7月12日	10	10~40
2019年7月15日	6	10~80
2020年9月6日	7	9.7~46.9

### 3.2 卫星数据及预处理

所用 GOCI 影像数据来自韩国海洋卫星中心 (KOSC)(表 2), 可获取 Level-1 和 Level-2 两类数据。本文选择 Level-1B 数据, 该数据已经过辐射校正和几何校正, 但没有经过大气校正<sup>[32]</sup>。使用 SeaDAS7.5.3 进行大气校正, SeaDAS 是由美国国家航空与航天局 (NASA) 开发的专门用于处理水色遥感数据的专业软件, 内含多种大气校正算法, 选用 MUMM 算法进行大气校正, 该算法由 Ruddick 等<sup>[33]</sup>于 2000 年提出, 对浑浊水体的大气校正效果较好, 得到广泛应用<sup>[34-39]</sup>, 在黄河口具有较好的适应性。

### 3.3 悬沙浓度遥感反演模型

针对 GOCI 遥感影像的悬沙浓度反演算法中, 较经典的是 GOCI 官方处理软件 GDPS 内含的两种反演算法, 分别是 YOC 算法<sup>[40]</sup>和 Case2 算法<sup>[41]</sup>。YOC 算法是根据 1998-2007 年在黄、东海收集的大量原位

表 2 所用 GOCI 影像信息

Table 2 GOCI imagery information used in this study

成像日期	可用影像/景	成像日期	可用影像/景
2017年7月8日	8	2018年8月27日	5
2017年8月6日	8	2018年8月30日	8
2017年8月7日	8	2018年11月1日	8
2017年8月8日	8	2018年12月13日	8
2017年8月9日	8	2019年7月11日	8
2018年7月16日	8	2019年7月12日	8
2018年7月22日	8	2018年7月15日	3
2018年8月25日	8	2018年7月16日	8
2018年8月26日	4	2020年9月6日	8

生物光学数据得出的区域经验算法, 开始主要应用于 SeaWiFS 水色遥感传感器数据, 后广泛用于 GOCI 影像的反演, 函数形式为指数型多波段函数。Case2 算法是根据韩国邻近海域实测数据得出的区域经验算法, 适用于较浑浊水体的悬沙反演, 函数形式为指数型多波段函数。此外, 余佳<sup>[42]</sup>开发出利用 MODIS 数据反演黄、渤海悬沙浓度的指数模型, 被多次应用, 并被李阳东等<sup>[43]</sup>改进应用于 GOCI 影像, 函数形式为指数型单波段函数。Li 等<sup>[39]</sup>结合黄河口近岸海域实测数据, 提出一种适用于黄河口邻近海域的悬沙浓度反演算法, 计算了 22 年的悬浮颗粒物浓度, 取得了较高的精度, 函数形式为指数型多波段函数。

## 4 结果与分析

悬浮泥沙反演模型的选择是研究黄河口悬浮泥沙时空动态及驱动机制的关键, 因此首先需要对典型反演算法的优劣进行比较, 选取最适算法。河口及其邻近海域悬沙的时空变化受径流输沙、风(浪)、潮汐, 以及水深地形的影响和制约, 为了阐明各影响因素对悬沙时空变化的驱动机制, 针对某一因素选取适合的影像进行对比分析。

### 4.1 悬沙浓度反演模型的优选

选取上述 4 种 GOCI 悬沙浓度反演模型的反演结果(表 3), 与悬沙浓度实测数据(表 1)进行对比。利用 3 个统计学参数对数据进行精度验证, 包括相关系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和平均绝对百分比误差(MAPE)。验证结果如图 2 所示, 从精度验证结果看出, YOC 算法  $R^2$  值为 0.205 4, 在高浓度值上反演结果不稳定; Case2 算法  $R^2$  值为 0.619 6, 对低浓度值的反演略高; 余佳算法  $R^2$  值为 0.422 0, 在低浓度值上反演结果过高; Li 算法  $R^2$  值在 4 种算法中最高, 达到 0.897 5, 均方根误差为 20.18, 绝对百分比误差为 18.03%, 在 4 种算法中精度最高。总的来说, 反演精度非线性模型高于线性模型, 多波段模型高于单波段模型, 可见光波

表 3 悬沙浓度反演模型列表

Table 3 List of suspended sediment concentration inversion models

算法	模型	适用地区
YOC	$SSC=10^{0.649+25.623(R_{rs555}+R_{rs660})-0.646(R_{rs490}/R_{rs555})}$	黄海、东海
Case2	$SSC=10^{0.08832+1.627(R_{rs745}/R_{rs555})+1.121(R_{rs680}/R_{rs490})}$	韩国近岸海域
余佳算法	$SSC=0.6358\exp(87.65R_{rs555})$	黄海、渤海
Li 算法	$SSC=10^{1.019(R_{rs660}/R_{rs555})+10.394R_{rs490}+0.835}$	黄河口近岸海域

段在高浓度水体中会出现快速饱和情况, 而近红外波段与高浓度悬沙的反射率  $R_s$  有很好的正相关性<sup>[44-45]</sup>。

综上, Li 算法在黄河口悬沙反演中的效果较好, 能够满足研究需要, 因此选用 Li 算法进行悬沙反演。

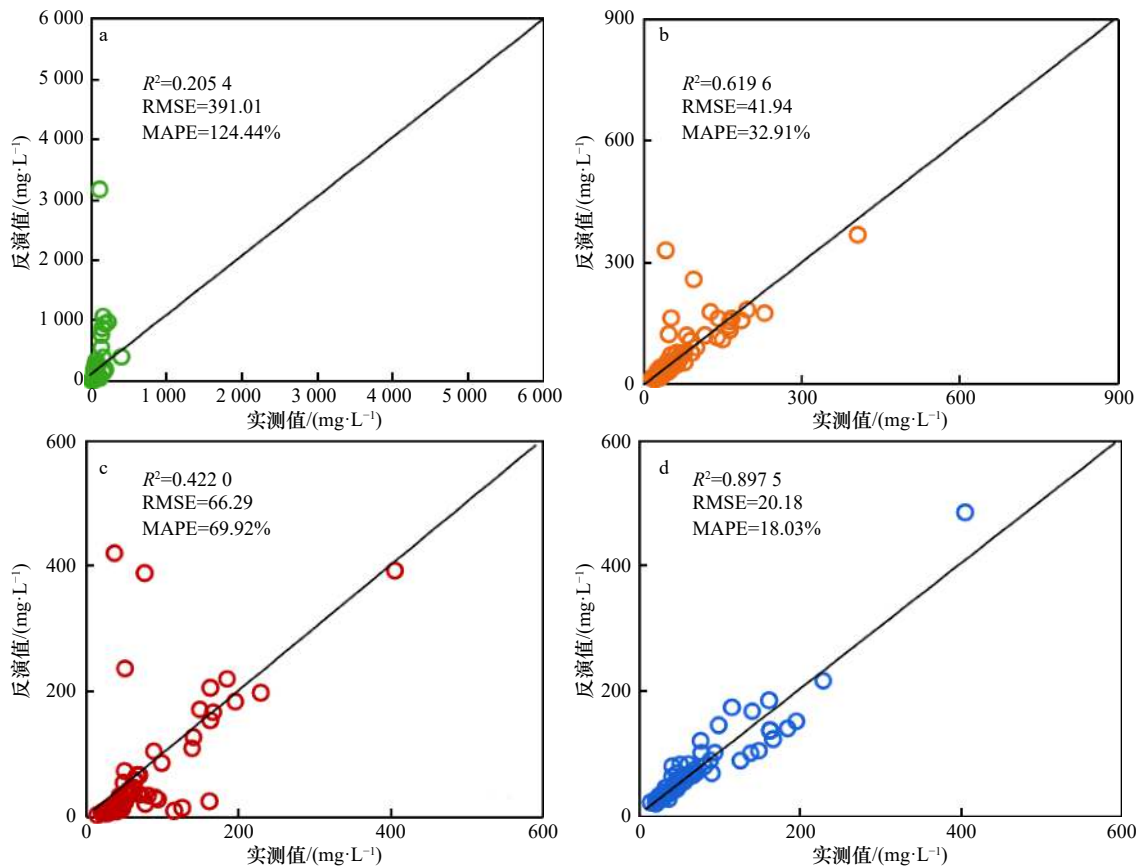


图2 悬沙浓度反演与实测值散点图

Fig. 2 Scatterplot of GOCI-derived versus measured suspended sediment concentration

a. YOC 算法; b. Case2 算法; c. 余佳算法; d. Li 算法

a. YOC algorithms; b. Case2 algorithms; c. Yu algorithms; d. Li algorithms

#### 4.2 径流输沙对悬沙浓度的影响

选取 2018 年 7 月 16 日和 2017 年 7 月 8 日进行对比, 两天都处于大潮期且潮差相似, 分别为 1.02 m 和 0.90 m, 风速较小, 风况为微风。主要区别在于 2018 年 7 月 16 日利津站实测径流量为 2 520.00 m<sup>3</sup>/s, 日输沙量约为 4.81×10<sup>6</sup> t; 2017 年 7 月 8 日利津站径流量为 440.00 m<sup>3</sup>/s, 日输沙量约为 3.10×10<sup>4</sup> t, 两日径流和输沙量相差较大, 分别代表相似海洋动力条件下高、低径流输沙量情形。从图 3 反演得到的高、低径流输沙量的研究区日均悬沙浓度, 可以看出在相似海洋动力条件下, 低径流输沙量黄河口悬沙向外扩散距离很短且浓度低, 主要集中在口门处; 而高径流输沙量黄河口悬沙向外扩散距离扩大, 口门外海域受到影响, 并且向孤东近岸方向扩散。

利用空间分析手段定量探究径流输沙对悬沙浓度空间分布的影响, 设定悬沙浓度不小于 150 mg/L

为高浓度, 确定高浓度悬沙分布范围, 结果如图 3 所示。低径流输沙情景下, 高浓度悬沙主要集中在口门附近, 大于 150 mg/L 的面积为 25.00 km<sup>2</sup>, 150 mg/L 等值线距口门约 3 km 处; 最高值出现在口门附近, 为 386.34 mg/L, 自近岸向外海悬沙浓度变化较小。高径流输沙情景下, 高浓度悬沙向口门外扩散距离最远可超过 17.14 km 处, 大于 150 mg/L 面积达到 316.00 km<sup>2</sup>; 口门外最高悬沙浓度值达到 1 377.62 mg/L, 向外悬沙浓度急剧降低, 具体情况见表 4。上述现象表明, 高径流输沙对悬沙浓度空间变化的影响在河口区大于其他区域、近岸大于远岸, 径流输沙可影响到距岸约 17~20 km 处。

#### 4.3 风对悬沙浓度的影响

黄河口近岸海域受季风影响大, 许多研究从冬夏季或者月均数据来反映风对悬沙分布的影响, 但将多时期数据平均后会掩盖短期天气变化造成的影响。

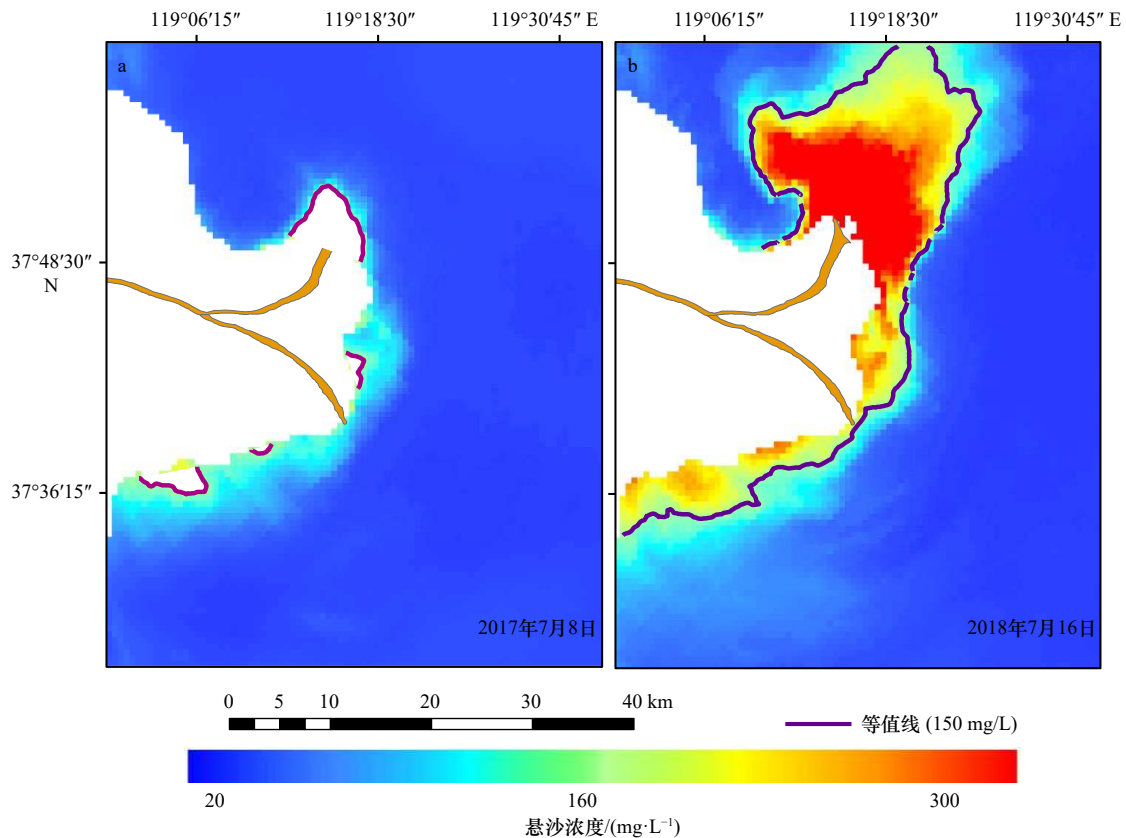


图 3 低(a)、高(b)径流输沙量条件下河口悬沙浓度分布对比

Fig. 3 Suspended sediment concentration distribution in the estuary under low (a) and high (b) fluvial sediment discharges

表 4 不同情景下高浓度悬沙 (不小于 150 mg/L) 情况

Table 4 High-concentration suspended sediment (no less than 150 mg/L) under different scenarios

情景	径流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	日输沙量/( $10^4 \text{ t}$ )	面积/ $\text{km}^2$	最大值/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大扩散范围/ $\text{km}$
高径流输沙	2 520.00	481.00	316.00	1 377.62	17.14
低径流输沙	440.00	3.10	25.00	386.34	2.77
微风(2.1 m/s)	770.00	11.81	23.50	1 501.33	5.31
大风(8.9 m/s)	370.00	2.45	783.00	1 692.60	21.56
大潮(1.12 m)	2 520.00	481.00	316.00	1 377.62	17.14
小潮(0.49 m)	3 490.00	1 079.00	196.25	1 365.80	13.55

注：“情景”列括号内分别是微风、大风情况下的风速和大、小潮的潮差。

因此, 本文选择具有风速明显差异而其他条件相似的两日进行对比, 进一步阐明风对悬沙分布的影响。选取 2018 年 12 月 13 日和 2018 年 11 月 1 日两天进行对比, 两日潮差相近 (分别为 0.96 m 和 0.82 m), 都属于低径流输沙 (径流量分别为  $370 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $770 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 日输沙量分别为  $2.45 \times 10^4 \text{ t}$  和  $11.81 \times 10^4 \text{ t}$ ), 主要区别在于二者风速不同, 12 月 13 日 8 h 平均风速为  $8.9 \text{ m/s}$ , 11 月 1 日风速为  $2.1 \text{ m/s}$ , 分别代表大风日和微风日。两日反演结果如图 4 所示, 大风日莱州湾中北部和孤东近岸悬

沙浓度与微风日相比明显增高, 而入海口附近两日悬沙浓度相差不大, 主要是由于口门附近主要为径流输沙量所控制。

微风情景下高浓度悬沙 (不小于  $150 \text{ mg/L}$ ) 主要集中在现行口门附近, 面积为  $23.50 \text{ km}^2$ , 高浓度悬沙最远扩散到距岸约  $5 \text{ km}$  处; 最高值出现在口门外, 达到  $1 501.33 \text{ mg/L}$ 。大风情景下高浓度悬沙除现行河口外, 莱州湾北部也出现高值区, 高浓度悬沙面积达到  $783.00 \text{ km}^2$ , 最高值依然出现在现行河口外, 达到  $1 692.60 \text{ mg/L}$ ,

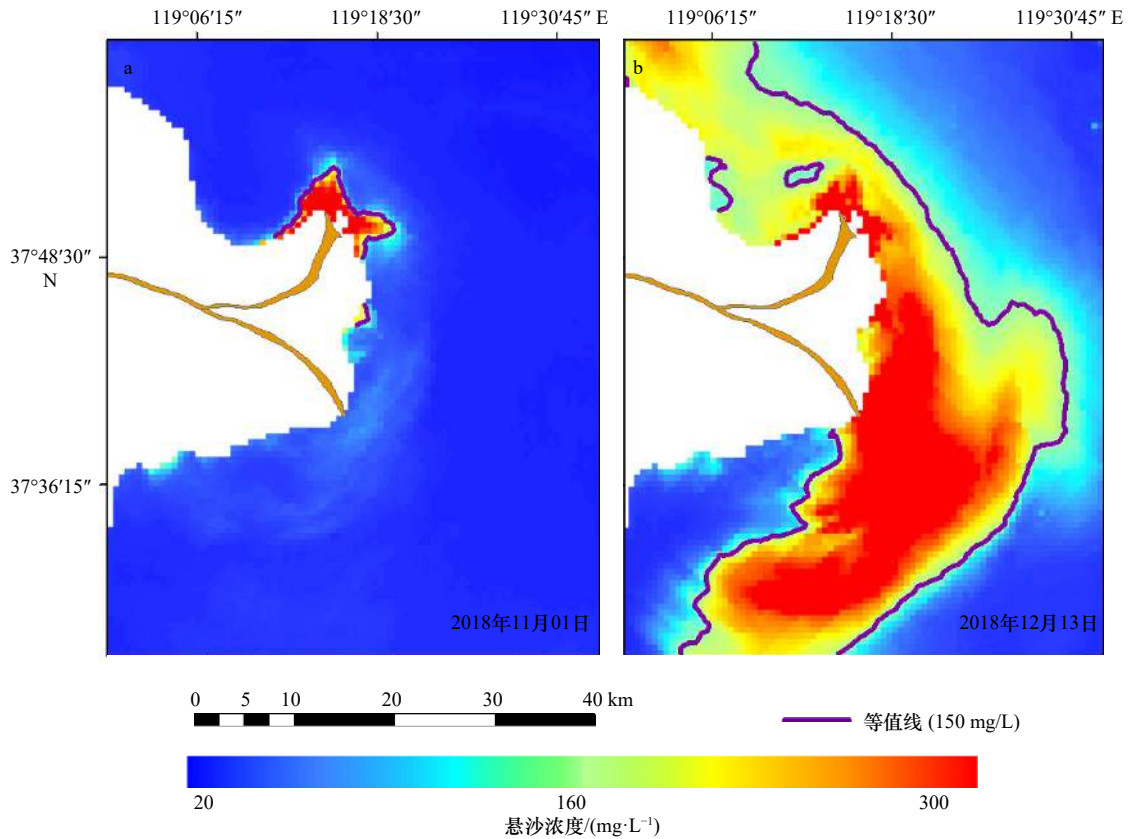


图4 微风(a)和大风(b)情况下研究区悬沙浓度分布

Fig. 4 Suspended sediment concentration distribution in the study area on light (a) and gale (b) breeze days

高浓度悬沙在莱州湾北部可以扩散到距岸 20 km 以上。

河口附近主要受径流输沙控制,风对悬沙浓度的影响较小,大风和微风情况下浓度差异并不大;相反距现行河口较远的莱州湾中北部和老河口,大风和微风天气下浓度差异巨大。因此,风对悬沙输运的影响主要体现在偏北大风增加有效波高,引发强浪;同时水流流速增加,波-流联合底床剪切应力大于底床侵蚀剪切应力,引起底沙强烈再悬浮。

#### 4.4 涨落潮流对悬沙浓度的影响

选取 2018 年 7 月 22 日 8:30–15:30 共 8 景 GOCI 影像对黄河口海域悬沙输运的日变化特征进行分析。该日平均风速为 5.05 m/s,属于微风状态,反演结果如图 5 所示。该日 8:30–10:30、14:30–15:30 为落潮时段,10:30–14:30 为涨潮时段,研究区高浓度悬沙(不小于 150 mg/L)集中在河口地区,主要来源于黄河入海输送,老河口区和莱州湾北部悬沙变化并不强烈。高浓度悬浮泥沙输运随着涨落潮发生变化,其摆动变化方向和范围在以往的研究中往往还停留在定性描述,对其定量表述能更直接详细的体现悬沙浓度随涨落潮的变化。

为定量描述摆动方向和范围,本文以某一固定点为射线的端点(图 6 绿色圆圈)进行角度构建,现行河

口近岸海域悬沙变化范围大且明显,老清水沟流路及莱州湾北部近岸悬沙浓度范围变化很小,故变化角度的衡量主要在现行河口外的海域,运用 ArcGIS 和 CorelDRAW 软件进行绘制测量。8:30–10:30 为落潮,潮流向西北往孤东方向流动,从 150 mg/L 等值线摆动(图 6a)来看,高浓度悬沙在该时段往西北方向移动;其变化范围(图 6b)向西增加约 4°,东方向减小约 24°,总度数减小约 20°。10:30–14:30 为涨潮,潮流向南往莱州湾方向流动,高浓度悬沙该时段向东南移动,变化范围向东南增加约 47°,西方向减小 24°,总度数增加约 23°。14:30–15:30 为落潮,高浓度悬沙向西增加约 3°,东方向减小约 11°,总度数减小约 8°,可见高浓度悬沙运移方向与涨落潮流方向有较好的一致性。

在其他相似条件下,涨落潮是造成 1 日内悬沙浓度差异变动的主要原因,不仅体现在高浓度悬沙运移方向随涨落潮方向发生改变,小时间断面悬沙浓度值也有很大差异,通过提取同一位置逐时悬沙浓度值发现,其变化可大于 100 mg/L,这一现象主要发生在现行河口近岸海域,老河口与莱州湾近岸小时间悬沙浓度变化小于 100 mg/L;另从图 6 可看出,涨落潮对悬沙南北扩散影响大而对其向深水区扩散影响有限。

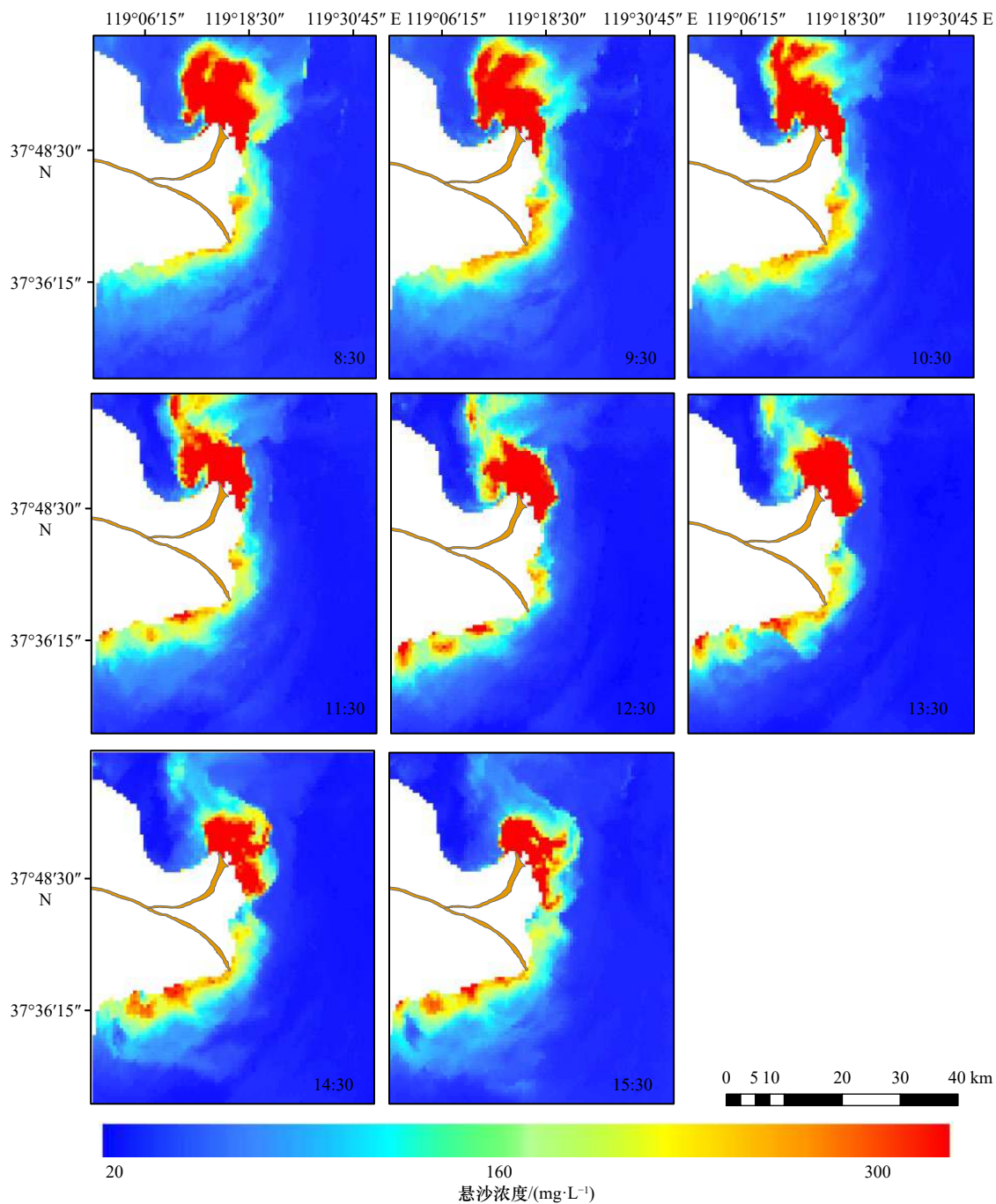


图5 涨落潮各时段悬沙浓度分布

Fig. 5 Suspended sediment concentration variations during a tidal cycle

上述现象发生的原因,一方面是涨落潮流挟带悬沙在南北方向移动,造成同一位置不同时间悬沙浓度的巨大差异;另一方面涨落潮导致的水平和垂直剪切可能引起底部泥沙再悬浮。

#### 4.5 大小潮对悬沙浓度的影响

为研究大、小潮期间悬沙时空变化差异,选取2018年7月22日(小潮)和7月16日(大潮)进行分析。两日风速相近(日均风速分别为5.05 m/s和5.01 m/s),径流和输沙量基本相当(径流量分别约为3 490 m<sup>3</sup>/s

和2 520 m<sup>3</sup>/s,日输沙量分别为1.079×10<sup>7</sup> t和4.81×10<sup>6</sup> t),而7月22日潮差为0.49 m,7月16日为1.12 m。根据GOCI影像反演得到的大、小潮的日平均悬沙浓度分布显示(图7),大潮期悬沙扩散范围明显大于小潮期。

平均值反映的是日尺度上大、小潮悬沙浓度的差异,而标准差和变异系数能够体现小时尺度上大、小潮悬沙浓度的绝对和相对变化。图8a与图8b分别是7月22日和7月16日悬沙浓度的标准差,22日标准差在0.66~705.00 mg/L之间变化,16日标准差在0.78~

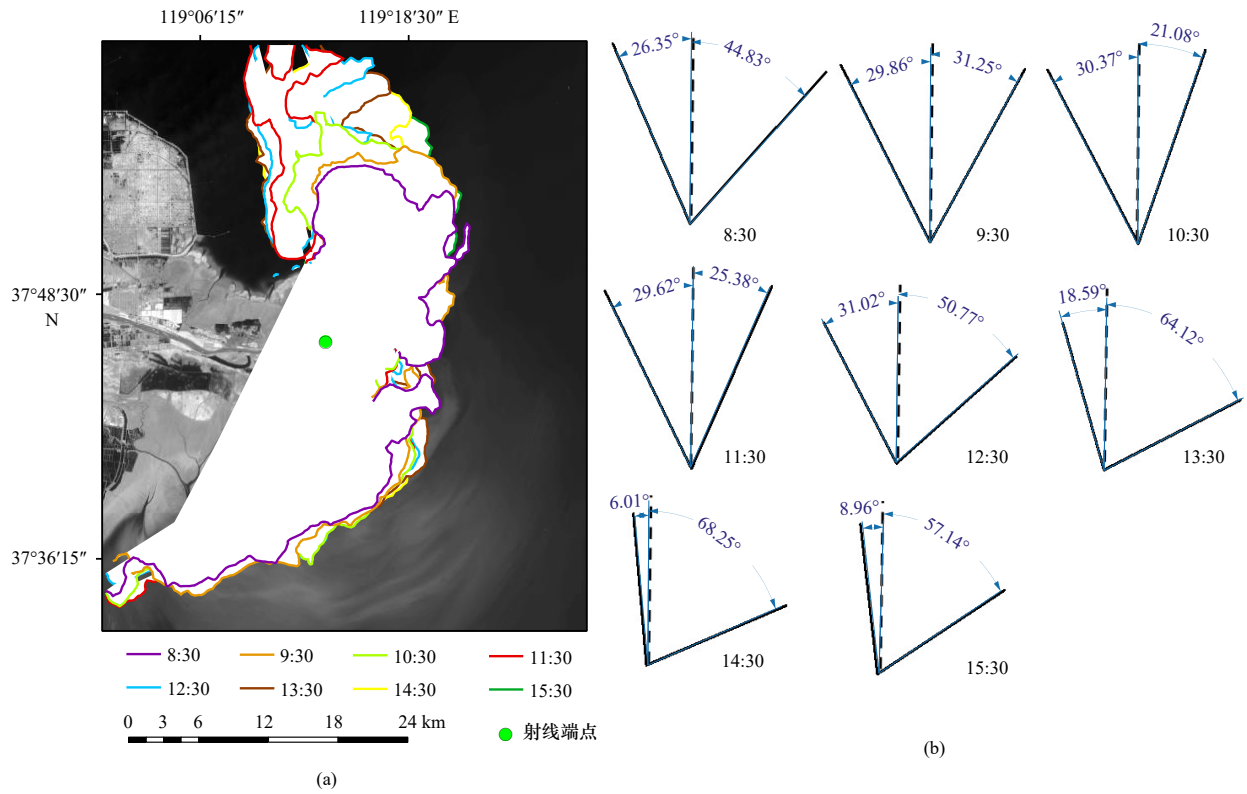


图6 涨落潮各时段高浓度悬沙(不小于 150 mg/L)边界与摆动角度  
 Fig. 6 Boundary and swing angle of high-concentration suspended sediment (no less than 150 mg/L) during each period of flood and ebb tides

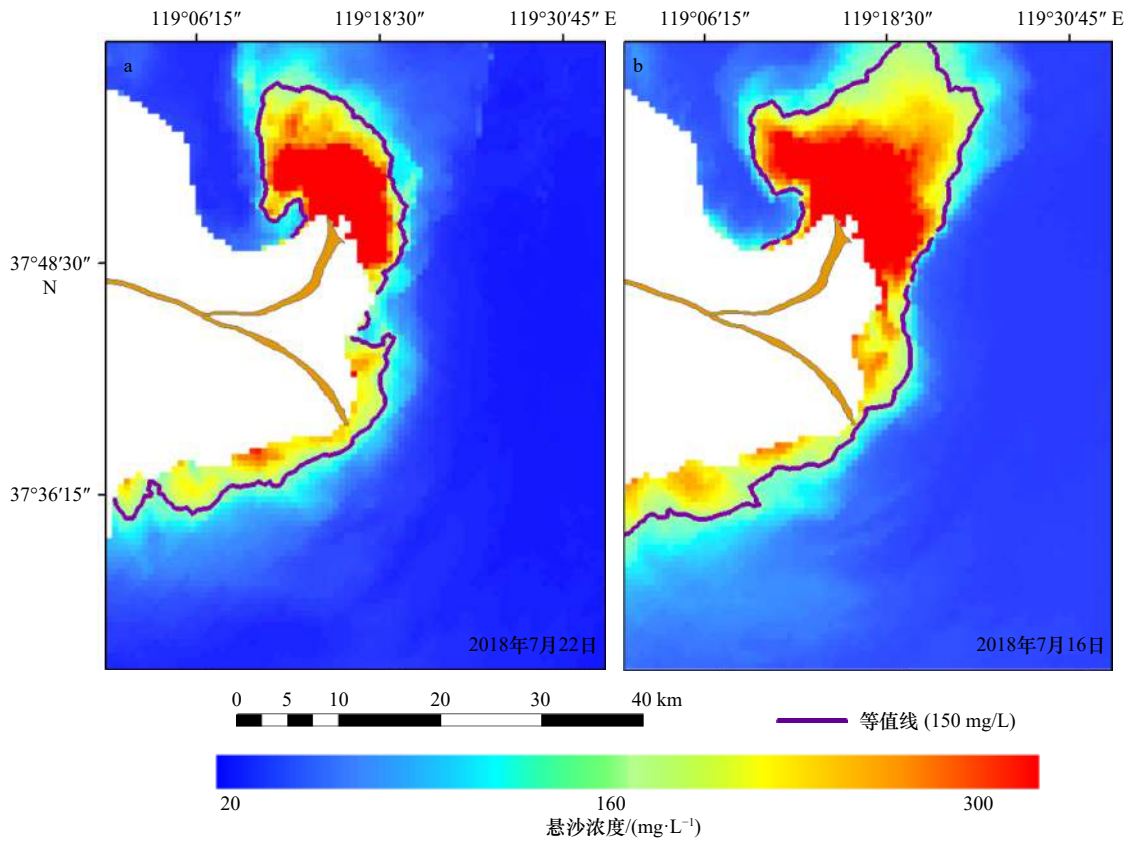


图7 小潮(a)与大潮(b)期间的悬沙浓度分布  
 Fig. 7 Suspended sediment concentration distribution at neap (a) and spring (b) tides

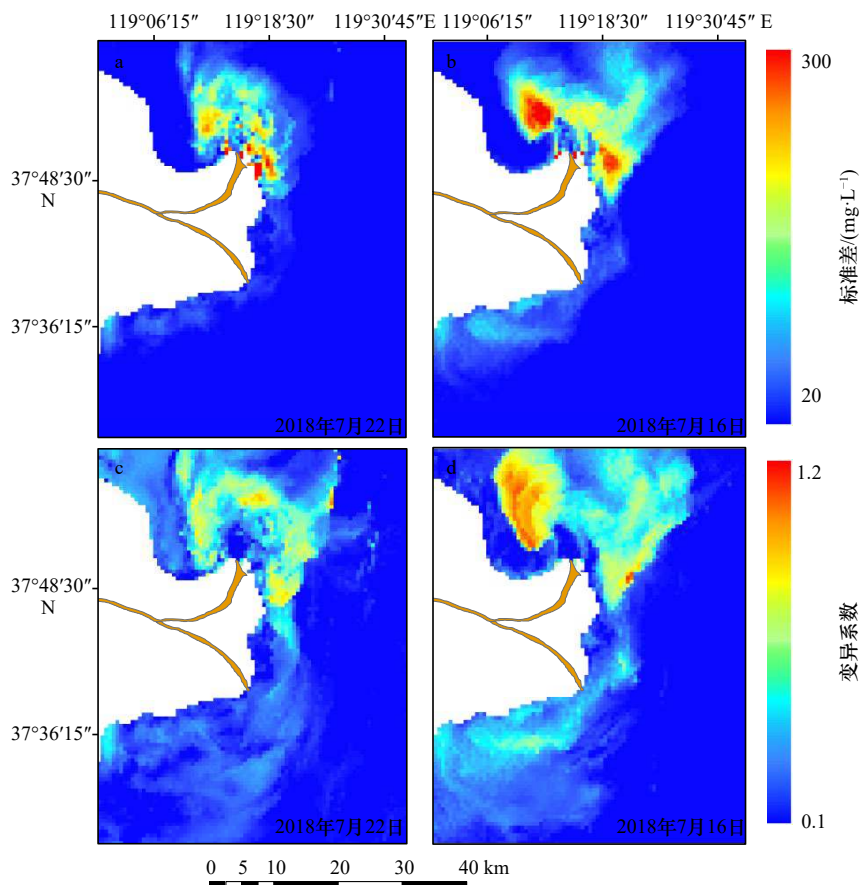


图8 小潮(a, c)与大潮(b, d)悬沙浓度标准差(a, b)及变异系数(c, d)

Fig. 8 The standard deviation (a, b) and coefficient of variation (c, d) of the suspended sediment concentration between the neap tide (a, c) and the spring tide (b, d)

833.00 mg/L之间变化。

大潮期间研究区悬沙浓度的绝对变化量大于小潮期间,标准差较大的区域主要集中在河口两侧和近岸区域,大潮较高的流速促进了底部沉积物的再悬浮。两日的变异系数有着类似的特点,16日变异系数在研究区近岸海域以及莱州湾北部出现明显高值区,说明大潮期近岸悬沙浓度不仅绝对变化量大,相对变异幅度也很大,悬沙浓度小时变化并不均匀;而小潮期不论是绝对变化量还是相对变异幅度都较大潮期小。黄河口近岸沉积物以粉砂质为主,大潮流速的快速波动变化引起的底沙再悬浮是大小潮悬沙浓度变化的主要原因。

#### 4.6 水深对悬沙时空分布的影响

以上讨论了不同因素对研究区悬沙时空分布的影响,无论哪种因素,随着离岸距离的增加,其对悬沙运输的影响都有一定的空间范围(表4),超过此范围,悬沙浓度的变化很小。显然这与水深有着密切联系,水深影响着波浪作用、切变锋的发育以及泥沙的再悬浮等,进而影响悬沙运输与时空分布。为进一步明确水深与悬沙扩散的关系,分析了不同要素驱动下

悬沙浓度随着水深的变化趋势。

首先,利用2018年实测断面水深数据插值得到水深图(图9a),在现行河口、老河口外设置A、B两区域,各随机选取200个样本点。提取高、低径流输沙,大风微风、大小潮等不同驱动机制下的样本点水深和悬沙数据,利用SPSS进行曲线拟合,结果如图10所示。水深与悬沙浓度的关系主要有指数、线性和幂函数3种,总的来看,不同驱动条件下悬沙浓度随水深变化各有特点,但总体呈降低趋势。一个重要原因在于,随着水深增加,水体表层和底层的混合作用较弱,底层再悬浮沉积物很难进入表层,导致水深越深悬沙浓度越低。而水深又与水下地形关系密切,水下地形直接影响着水深。从水下地形剖面形态来看(图9),A区域水下地形随着离岸距离增加先逐渐变陡后变平缓;B区域水下地形随着离岸距离增加有一个淤积区,坡度变小,水深变浅,后逐渐变陡,总体上水深随着坡度逐渐变深,具体分析如下。

微风状态下区域A、B的悬沙浓度与水深呈指数关系(图10),悬沙浓度随着水深增加的降低速度先

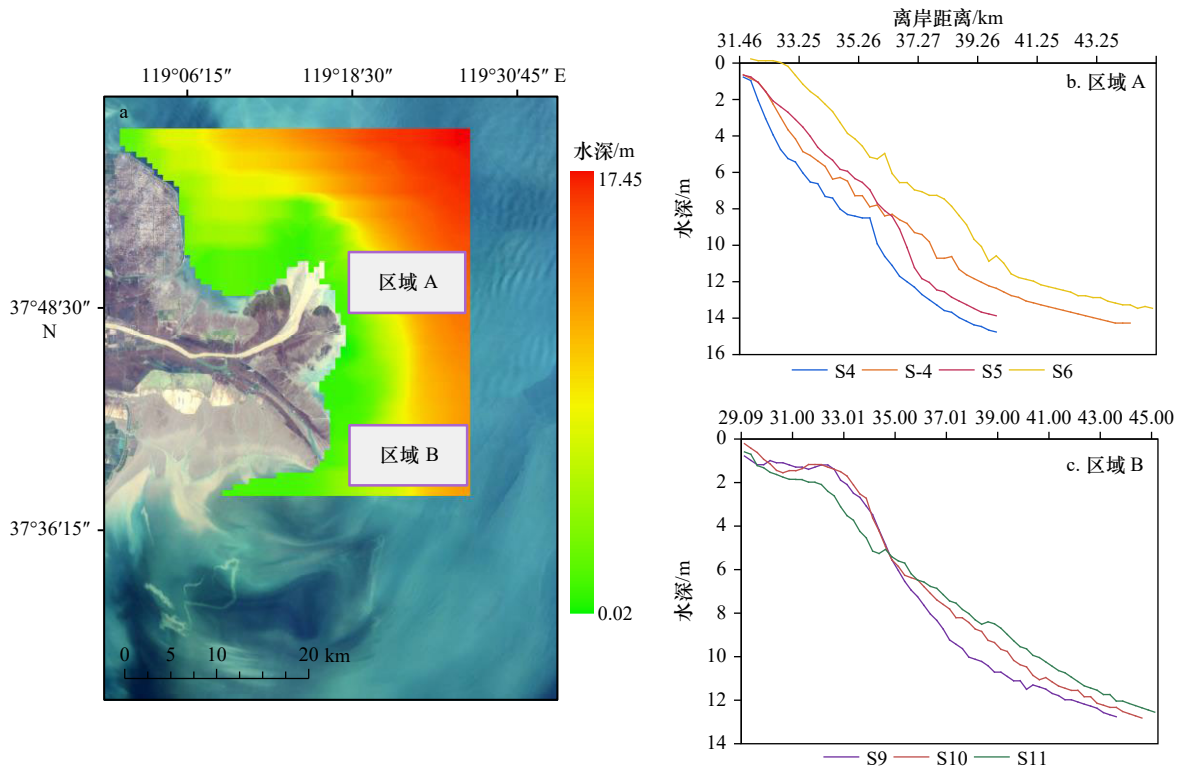


图9 研究区水深及水下地形断面

Fig. 9 Water depth topography in the study area and its transections

b和c中各断面的位置见图1

The location of sections in b and c see fig. 1

快后慢;大风状态下悬沙浓度与水深呈线性关系,悬沙浓度降低速度随着水深增加变化较平稳,差异变小。上述现象主要是因为大风引发风浪导致底沙再悬浮,近岸浅水区与离岸深水区悬沙浓度差异减小,悬沙浓度随水深下降速度较平缓。

不同径流输沙情况下悬沙浓度随水深变化呈现不同特点。低径流输沙量(7月8日)情况下,悬沙浓度随水深的降低呈幂函数关系,但总体上无论是区域A还是区域B,悬沙浓度值的变化并不大。与之相对应,高径流输沙量(7月16日)下,区域A悬沙浓度随水深降低的速度很快,随着水深增加悬沙浓度的差异很大,二者呈线性关系;而区域B悬沙浓度的差异程度低于现行河口,悬沙浓度呈幂函数型下降趋势。

相比于风力状况和径流输沙量,大小潮差异下悬沙浓度随水深的变化特点相似。无论是大潮(7月16日)还是小潮(7月22日),现行河口外悬沙浓度都较高,随着水深的增加,大潮悬沙浓度呈线性下降,小潮悬沙浓度呈指数型下降;在老河口,大、小潮期间悬沙浓度随水深的增加都呈现出幂函数型下降趋势,且二者降低速度基本类似,差异不大。

## 5 结论

受径流输沙和海洋动力的影响,河口及其邻近海域的悬沙处于不断的动态变化中。利用GOCI卫星影像,结合悬沙实测数据,选取最佳悬沙浓度反演算法,对黄河口邻近海域悬沙浓度进行定量反演,研究径流输沙、风、潮汐变化和水深地形对悬沙浓度时空变化的驱动影响。得到如下认识:

(1) 比较了4种利用GOCI影像反演黄河口泥沙的典型算法,结果发现黄河口悬沙反演模型普遍使用非线性形式,且多波段模型精度优于单波段模型;含有近红外波段的模型对高浓度悬沙反演结果更好。

(2) 黄河入海水沙主导了现行河口悬沙的扩散范围,低径流输沙条件下高浓度悬沙最近仅扩散到距岸3 km左右,高径流输沙量下的影响范围可达到距岸约20 km处。

(3) 风及其产生的风浪引起泥沙强烈再悬浮,因此距河口较远的莱州湾中北部和老河口,大风和微风天气下浓度差异较大,大风天气悬沙浓度明显升高,高浓度悬沙扩散面积可达约800 km<sup>2</sup>。

(4) 涨落潮影响悬沙浓度和输运方向,高浓度悬

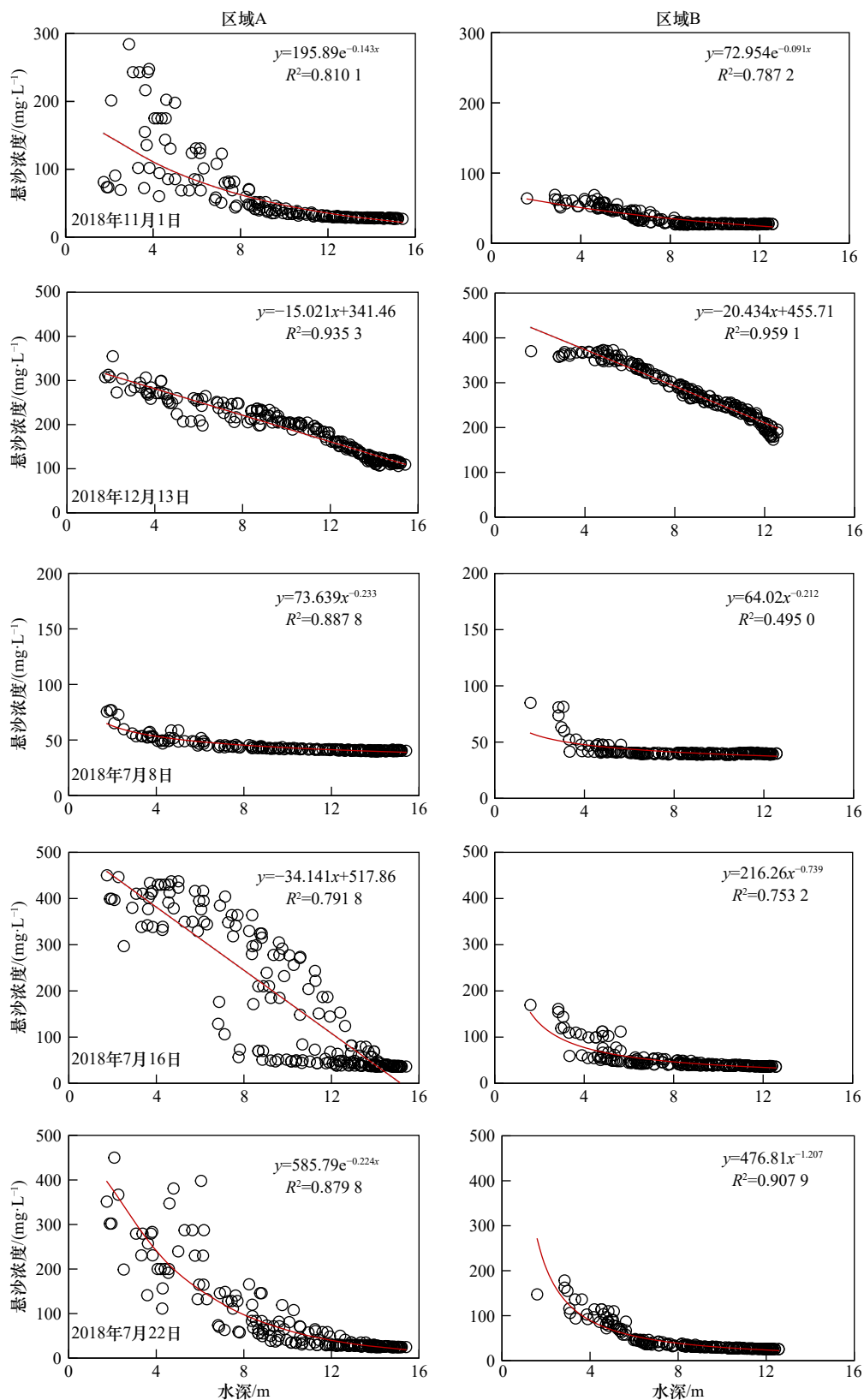


Fig. 10 Curve fitting of suspended sediment concentration against water depth

沙和羽状流移动方向与涨落潮方向基本一致。大小潮的影响体现在大潮流速加快引起的底沙再悬浮,使得大潮悬沙绝对浓度和变异程度都高于小潮。

(5) 水深同样是影响悬沙浓度分布的一个重要因素。总体来说,悬沙浓度随水深的增加呈降低趋势,具体呈现出指数、线性和幂函数3种变化形式。

## 参考文献:

- [1] Meire P, Ysebaert T, Van Damme S, et al. The Scheldt estuary: a description of a changing ecosystem[J]. *Hydrobiologia*, 2005, 540(1/3): 1–11.
- [2] Wang Houjie, Wu Xiao, Bi Naishuang, et al. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): a review[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 93–113.
- [3] van der Wal D, van Kessel T, Eleveld M A, et al. Spatial heterogeneity in estuarine mud dynamics[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(3): 519–533.
- [4] Van der Molen J, Ruardij P, Greenwood N. A 3D SPM model for biogeochemical modelling, with application to the northwest European continental shelf[J]. *Journal of Sea Research*, 2017, 127: 63–81.
- [5] Fu Yutao, Chen Shenliang, Ji Hongyu, et al. The modern Yellow River Delta in transition: causes and implications[J]. *Marine Geology*, 2021, 436: 106476.
- [6] Zhang Xiaohe, Fichot C G, Baracco C, et al. Determining the drivers of suspended sediment dynamics in tidal marsh-influenced estuaries using high-resolution ocean color remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111682.
- [7] van der Wegen M. Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal basin morphodynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(2): 447–460.
- [8] Mariotti G, Fagherazzi S, Wiberg P L, et al. Influence of storm surges and sea level on shallow tidal basin erosive processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C11): C11012.
- [9] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1–21.
- [10] 刘锋, 陈沈良, 彭俊, 等. 近60年黄河入海水沙多尺度变化及其对河口的影响[J]. *地理学报*, 2011, 66(3): 313–323.  
Liu Feng, Chen Shenliang, Peng Jun, et al. Multi-scale variability of flow discharge and sediment load of Yellow River to sea and its impacts on the estuary during the past 60 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 313–323.
- [11] 王俊杰, 拾兵, 巴彦斌. 近70年黄河入海水沙通量演变特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 52–62,69.  
Wang Junjie, Shi Bing, Ba Yanbin. Evolution characteristics of runoff and sediment fluxes of Yellow River into Bohai Sea in recent 70 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 52–62,69.
- [12] 王开荣. 黄河调水调沙对河口及其三角洲的影响和评价[J]. *泥沙研究*, 2005(6): 29–33.  
Wang Kairong. Impact and evaluation of water and sediment regulation in the Yellow River on the estuary and its delta[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005(6): 29–33.
- [13] 毕乃双, 杨作升, 王厚杰, 等. 黄河调水调沙期间黄河入海水沙的扩散与通量[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2): 27–34.  
Bi Naishuang, Yang Zuosheng, Wang Houjie, et al. Characteristics of dispersal of the Yellow River Water and sediment to the sea during water-sediment regulation period of the Yellow River and its dynamic mechanism[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 27–34.
- [14] 韩其为. 小浪底水库初期运用及黄河调水调沙研究[J]. *泥沙研究*, 2008(3): 1–18.  
Han Qiwei. Study on preliminary operation of Xiaolangdi Reservoir and flow-sediment regulation of the Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2008(3): 1–18.
- [15] 乔淑卿, 石学法, 白亚之, 等. 黄河口及邻近渤海海域悬浮体和沉积物中有机碳、氮的分布特征及其影响因素[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 354–362.  
Qiao Shuqing, Shi Xuefa, Bai Yazhi, et al. Distribution of organic carbon, nitrogen in suspended and surface sediments and their controlling factors off the Huanghe (Yellow River) Mouth and the nearby Bohai Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 354–362.
- [16] 刘锋, 陈沈良, 周永东, 等. 黄河2009年调水调沙期间河口水动力及悬沙输移变化特征[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 1–8.  
Liu Feng, Chen Shenliang, Zhou Yongdong, et al. Effect of water-sediment regulation in Yellow River on hydrodynamics and suspended sediment transport in its estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(6): 1–8.
- [17] 王海龙, 李国胜. 黄河入海泥沙在渤海中悬移输送季节变化的数值研究[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(2): 129–137.  
Wang Hailong, Li Guosheng. Numerical simulation on seasonal transportation of suspended sediment from Huanghe (Yellow) River to Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(2): 129–137.
- [18] 王厚杰, 杨作升, 毕乃双. 黄河口泥沙输运三维数值模拟 I—黄河口切变锋[J]. *泥沙研究*, 2006(2): 1–9.  
Wang Houjie, Yang Zuosheng, Bi Naishuang. 3-D simulation of the suspended sediment transport in the Yellow River mouth I: shear front off the Yellow River mouth[J]. *Journal of Sediment Research*, 2006(2): 1–9.
- [19] 李国胜, 王海龙, 董超. 黄河入海泥沙输运及沉积过程的数值模拟[J]. *地理学报*, 2005, 60(5): 707–716.  
Li Guosheng, Wang Hailong, Dong Chao. Numerical simulations on transportation and deposition of SPM introduced from the Yellow River to the Bohai Sea[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 707–716.
- [20] 冯秀丽, 吴世强, 林霖, 等. 黄河三角洲埕岛近岸海域悬浮泥沙运动[J]. *海洋科学*, 2003, 27(12): 66–70.  
Feng Xiuli, Wu Shiqiang, Lin Lin, et al. Offshore suspended sediment transport in Huanghe Delta Chengdao marine area[J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(12): 66–70.
- [21] 李广雪. 黄河入海泥沙扩散与河海相互作用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(3): 1–10.

- Li Guangxue. Suspended sediment dispersal and interaction of river-sea off the Yellow River mouth[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(3): 1–10.
- [22] 黄海军, 李成治, 郭建军. 黄河口海域悬沙光谱特征的研究[J]. *海洋科学*, 1994, 18(5): 40–44.  
Huang Haijun, Li Chengzhi, Guo Jianjun. A study on the spectral feature of suspended matter in the Huanghe River delta area[J]. *Marine Sciences*, 1994, 18(5): 40–44.
- [23] 樊辉, 黄海军, 唐军武. 黄河口水体光谱特性及悬沙浓度遥感估测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(7): 601–604.  
Fan Hui, Huang Haijun, Tang Junwu. Spectral signature of waters in Huanghe Estuary and estimation of suspended sediment concentration from remote sensing data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(7): 601–604.
- [24] 刘振宇, 崔廷伟, 李佳, 等. 黄河口悬浮物浓度Landsat 8 OLI多波段反演研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1579–1585.  
Liu Zhenyu, Cui Tingwei, Li Jia, et al. Suspended particle concentration retrieval in Yellow River Estuary using multi-band of Landsat 8 OLI[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1579–1585.
- [25] Zhang Minwei, Dong Qing, Cui Tingwei, et al. Suspended sediment monitoring and assessment for Yellow River estuary from Landsat TM and ETM+ imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146: 136–147.
- [26] Qiu Zhongfeng, Xiao Cong, Perrie W, et al. Using Landsat 8 data to estimate suspended particulate matter in the Yellow River estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(1): 276–290.
- [27] Shi Wei, Wang Menghua. Satellite views of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 2012, 104: 30–45.
- [28] 张永强. 莱州湾风暴潮过程增水、波浪、风暴潮流数值模拟研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2010.  
Zhang Yongqiang. The numerical study of storm surge, wave and tide in Laizhou Bay[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2010.
- [29] 胡春宏, 吉祖稳, 王涛. 黄河口海洋动力特性与泥沙的输移扩散[J]. *泥沙研究*, 1996(4): 2–11.  
Hu Chunhong, Ji Zuwen, Wang Tao. Characteristics of ocean dynamics and sediment diffusion in the Yellow River estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 1996(4): 2–11.
- [30] 黄海军, 樊辉. 黄河三角洲潮滩潮沟近期变化遥感监测[J]. *地理学报*, 2004, 59(5): 723–730.  
Huang Haijun, Fan Hui. Change detection of tidal flats and tidal creeks in the Yellow River delta using Landsat TM/ETM+ images[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 723–730.
- [31] 陈沈良, 谷硕, 姬泓宇, 等. 新入海水沙形势下黄河口的地貌演变[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(5): 60–66.  
Chen Shenliang, Gu Shuo, Ji Hongyu, et al. Processes of the Yellow River Mouth on new water and sediment condition[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(5): 60–66.
- [32] Ryu J H, Han H J, Cho S, et al. Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS)[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 223–233.
- [33] 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.
- [34] Fettweis M, Nechad B, Van den Eynde D. An estimate of the suspended particulate matter (SPM) transport in the southern North Sea using SeaWiFS images, in situ measurements and numerical model results[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(10/11): 1568–1583.
- [35] Kowalczuk P, Darecki M, Zablocka M, et al. Validation of empirical and semi-analytical remote sensing algorithms for estimating absorption by coloured dissolved organic matter in the Baltic Sea from SeaWiFS and MODIS imagery[J]. *Oceanologia*, 2010, 52(2): 171–196.
- [36] 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[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146: 24–35.
- [37] Higa H, Sugahara S, Salem S I, et al. An estimation method for blue tide distribution in Tokyo Bay based on sulfur concentrations using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 235: 106615.
- [38] Choi J, Pak Y J, Ahn J H, et al. GOCI, the world's first geostationary ocean color observation satellite, for the monitoring of temporal variability in coastal water turbidity[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C9): C09004.
- [39] Li Peng, Ke Yinghai, Wang Dawei, et al. Human impact on suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China: evidence from remote sensing data fusion using an improved spatiotemporal fusion method[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141612.
- [40] 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[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(5): 627–650.
- [41] Choi J K, Park Y J, Ryu J H. Retrieval of suspended sediment concentration in the coastal waters of yellow sea from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)[C]//Proceeding of International Symposium of Remote Sensing. Korean Society of Remote Sensing, 2013: 809–812.
- [42] 余佳. 黄海悬浮体分布及季节性变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
Yu Jia. Seasonal variation and distribution of suspended sediment in the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.

- [43] 李阳东, 吴珍瑜, 常亮. 基于GOCI影像进行渤海表层悬浮泥沙浓度估算的新方法[J]. 海洋湖沼通报, 2020(3): 80–88.  
Li Yangdong, Wu Zhenyu, Chang Liang. A novel method for the estimation of suspended sediment concentration in Bohai Sea based on GOCI images[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(3): 80–88.
- [44] Li Peng, Ke Yinghai, Bai Junhong, et al. Spatiotemporal dynamics of suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China during the past two decades based on time-series Landsat and Sentinel-2 data[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110518.
- [45] Long C M, Pavelsky T M. Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129: 197–209.

## Temporal and spatial dynamics of suspended sediment and its driving mechanism in the Yellow River Estuary

Chu Yanhao<sup>1</sup>, Wu Wenjuan<sup>2</sup>, Li Peng<sup>1</sup>, Chen Shenliang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Institute of the Yellow River Estuary and Coast Science, Dongying 257091, China)

**Abstract:** Affected by fluvial sediment discharge, wind waves and tides, etc., suspended sediment in estuaries and adjacent waters has significant temporal and spatial changes. Based on the GOCI remote sensing images at hourly resolution, this paper uses the optimal remote sensing inversion algorithm, combined with spatial analysis and statistical methods to deeply study the temporal and spatial dynamic characteristics and driving mechanism of suspended sediment in the Yellow River Estuary and adjacent waters. The results show that the impact of fluvial sediment discharge on the concentration of suspended sediment is concentrated in the nearshore area of the estuary. The impact of high fluvial sediment discharge on the distribution of suspended sediment concentration can reach about 20 km offshore and spread to the Gudong nearshore area. Strong winds can cause intensive resuspension of sediment near the old river mouth of Qingshuigou, forming a high-concentration suspended sediment area. The flood and ebb tides have a significant impact on the hourly-scale suspended sediment concentration, and affect the dispersal of suspended sediment from north to south. The variation and dispersal range of the suspended sediment concentration in the spring tide are larger than that of the neap tide due to different tidal flow velocities. There is an obvious negative correlation between water depth and suspended sediment concentration. According to the difference of driving factors, the suspended sediment concentration present exponential, power function, and linear relationships with the increase of water depth.

**Key words:** GOCI; suspended sediment; temporal and spatial dynamics; driving factors