

李慧真, 王雨辰, 段高雨, 等. 基于 GEE 的黄河口表层悬浮泥沙浓度时空分布及其影响因素分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(8): 178–190, doi:10.12284/hyxb2023090

Li Huizhen, Wang Yuchen, Duan Gaoyu, et al. Analysis of the temporal and spatial distribution of suspended sediment concentration and its influencing factors in the Huanghe River Estuary based on GEE[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(8): 178–190, doi:10.12284/hyxb2023090

# 基于 GEE 的黄河口表层悬浮泥沙浓度时空分布及其影响因素分析

李慧真<sup>1</sup>, 王雨辰<sup>1</sup>, 段高雨<sup>1</sup>, 黄珏<sup>1\*</sup>

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 黄河三角洲作为我国重要的生态功能区, 探究入海口处表层悬浮泥沙浓度 (Suspended Sediment Concentration, SSC) 分布及其影响因素对沉积物侵蚀再悬浮、河口海岸带生态过程等具有指导意义。本文基于色度角与 SSC 之间的关系建立了适于黄河口及邻近海域的 SSC 反演模型 ( $R^2=0.80$ , MRE=11.0%, RMSE=1.35 mg/L)。借助 GEE 平台, 研究得到 2000–2021 年黄河口及邻近海域 SSC 的时空分布特征和变化规律, 并从自然和人类活动两方面进行影响因素分析。研究区年均 SSC 呈波动下降的趋势 ( $-1.83 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{a})$ ); 空间分布表现为由近岸向远岸逐渐降低的趋势; 扩散区间 (年均 SSC > 20 mg/L) 仅在距离河口 4.8~14.6 km 之间, 黄河入海泥沙对现行黄河口处泥沙扩散影响有限。波浪与悬浮泥沙浓度存在相同的季节特征, 非调水调沙期间, 有效波高与 SSC 年代际月均值呈现正相关关系 ( $r=0.66$ ,  $p<0.01$ ); 调水调沙期间, 现行黄河口门以及莱州湾处 SSC 受风速、有效波高影响有限, 调水调沙占主导地位。调水调沙期间的来沙系数与高浓度区面积变化率呈正相关的关系, 调水调沙结束后 (16 d 内), 高浓度区 (SSC > 200 mg/L) 边界由距沿岸约 1.3 km 扩大至约 2.5 km。

**关键词:** GEE (Google Earth Engine) 平台; 色度角; 黄河口及邻近海域; 悬浮泥沙浓度; 调水调沙

中图分类号: X87; P734.2<sup>31</sup>

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)08-0178-13

## 1 引言

水体悬浮泥沙浓度 (Suspended Sediment Concentration, SSC) 是表征水质的重要参数之一, 其对于港口停运、河岸地区生态过程、海岸工程等有着直接影响。海岸、河口区是陆海交界地带, 陆地海洋相互作用显著, 因此存在着很多的问题, 其中最主要的一个问题就是泥沙问题, 如泥沙所引起的岸滩演变、港口航道的淤积等<sup>[1]</sup>。因此, 黄河口及邻近海域的悬浮泥沙浓度在水质、生态、经济、人文等方面研究意义重大, 是水色研究的重要方向<sup>[2]</sup>。

传统悬浮泥沙的研究主要采用实测数据进行分析, 如朱超祁等<sup>[3]</sup>通过对黄河水下三角洲进行为期 134 d 的原位观测得到了该海域海水浊度等数据。获取的相关数值虽准确但难以实现研究区长时序大范围监测, 而遥感卫星的实时动态观测结果可以得到悬浮泥沙的连续时空分布特征, 并应用于后续分析<sup>[4-7]</sup>。Yunus 等<sup>[8]</sup>利用 GEE (Google Earth Engine) 技术估算切萨皮克湾的总悬浮物 (Total Suspended Solids, TSS) 浓度, 结合长期归档卫星资料和野外观测, 对湾水 TSS 浓度和时空格局进行了评价; Zhao 等<sup>[9]</sup>基于遥感数据重建 2003–2016 年渤海海面悬沙浓度的时空分布, 探

收稿日期: 2022-11-30; 修订日期: 2023-03-16。

基金项目: 国家自然科学基金 (42076185, 41706194); 山东科技大学科研创新团队支持计划 (2019TDJH103)。

作者简介: 李慧真 (2001—), 女, 山东省临沂市人, 研究方向为水色遥感。E-mail: lihuizhen\_2001@163.com

\* 通信作者: 黄珏, 女, 湖南省韶山市人, 副教授, 研究方向为水环境遥感。E-mail: huangjue@sdust.edu.cn

究并得到风速、黄河径流量和输沙量对悬浮泥沙时空分布的影响; Li 等<sup>[10]</sup>选择悬浮颗粒物反演模型基于 1 164 幅卫星影像研究了 2011–2021 年渤海悬浮颗粒物的时空动态并分析海洋动力对其的影响, 为 SSC 的长期变化和调控机制研究提供了有用的信息; 周媛等<sup>[11]</sup>、吴文娟和付慧微<sup>[12]</sup>与樊彦国等<sup>[13]</sup>分别基于遥感影像建立波段组合算法反演 SSC 并分析其时空分布特征; 姜丽君等<sup>[14]</sup>在不依赖实测数据的条件下利用单波段比值法对莱州湾表层悬浮泥沙分布情况与扩散机制进行了分析, 认为水色时空研究机制与其环境响应等问题有待进一步研究; 潘彬<sup>[15]</sup>基于 200 幅 Landsat 遥感影像建立土壤水分评估模型(Soil and Water Assessment Tool, SWAT), 分析了黄河水沙通量在不同情景下的变化趋势, 但由于黄河流域广阔, 遥感影像数据的镶嵌和拼接工作量巨大。现有研究大多基于波段光谱反射率与实测数据之间的关系建立悬浮泥沙反演模型, 各经验模型虽均具有一定的指示意义, 但对水体的时空变化反应敏感, 有区域性、阶段性的限制<sup>[16]</sup>。殷子瑶等<sup>[17]</sup>、王芳等<sup>[18]</sup>、王一飞等<sup>[19]</sup>分别利用色度角与水体透明度、营养状态指数(Trophic Status Index, TSI)、水色指数(Forel-Ule Index, FUI)等构建模型进行水质参数反演, 研究显示色度角模型具有较好精度和可靠性, 在水质反演方面具有明显的应用潜力和优势。部分学者依据短时序内遥感影像进行研究, 但大量遥感影像的下载、预处理、数据分析等操作使得研究时段有限且工作量巨大; 部分学者基于悬浮泥沙变化规律, 着重分析自然因素对其分布变化的影响机制, 但人为因素的作用, 特别是大型工程设施对悬浮泥沙时空分布变化的影响规律还少有报道。

因此, 本文选取色度角参量, 利用与 SSC 之间的关系建立反演模型; 借助 GEE 平台对 2000–2021 年的长时序遥感影像数据进行批量处理和分析, 以解决数据下载量大、处理困难等问题, 进而得到黄河口及邻近海域悬浮泥沙的时空分布规律; 在此基础上, 分析入海泥沙、波浪对黄河口及邻近海域悬浮泥沙时空分布的影响, 并着重以小浪底调水调沙为典例分析人类活动的影响。本文研究结果将为黄河口环境管理以及黄河三角洲生态功能区可持续发展提供支持。

## 2 研究区概况与数据

### 2.1 研究区概况

黄河口系陆相弱潮堆积性河口, 位于渤海湾与莱州湾交汇处, 通过水道连接黄河与渤海。黄河径流挟带泥沙注入河口滨海区, 大量泥沙经扩散、沉降、再

悬浮, 造成深远且持续的影响<sup>[20]</sup>。因此, 研究黄河口悬浮泥沙浓度具有重要意义。本文以黄河口及邻近海域(37°08′~38°47′N, 117°57′~120°09′E)为研究区域, 分析表层 SSC 时空分布及其影响因素。

### 2.2 实测数据

山东东营黄河入海口及莱州湾水体悬浮泥沙浓度的实测数据来自中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 将采集的表层含沙海水样本采用负压抽滤法过滤(滤膜孔径为 0.45  $\mu\text{m}$ , 按总量的 20% 设置校正膜), 然后烘干滤膜并进行多次称重, 直至前后两次测量结果的差值小于 0.01 mg, 随后基于水样体积和泥沙质量计算得到悬浮泥沙浓度<sup>[16]</sup>。采样站点位置如图 1 所示, 数据采集时间为 2012 年 9 月 10 日、14 日、19 日、20 日。共获取与 MODIS 传感器过境时间相匹配(同一天)的 27 组实测数据。

### 2.3 遥感数据

本文建立 SSC 反演模型使用的 MOD09GA.061 中 1 km 和 500 m 影像数据和分析时空变化使用的 MOD09A1.061 中 8 d 合成 500 m 影像数据均来源于 GEE(<https://earthengine.google.com/>)。MODIS 地表反射率产品(MOD09)进行大气校正时, 去除了大气气体、气溶胶、薄卷云和陆地临近效应的影响<sup>[21]</sup>。但利用 MOD09 数据进行水质参数监测, 仍需考虑剩余气溶胶散射的影响<sup>[22]</sup>。因此, 本文采用 GEE 平台自带的云量去除函数对云层进行掩膜处理, 并筛选掉像元数较小的影像。

### 2.4 气象及其他数据

本文使用的 2000–2021 年间年均降水数据来自于山东省统计局官网(<http://tjj.shandong.gov.cn/>); 2000–2021 年的黄河入海水年均含沙量以及小浪底调水调沙数据来自于水利部黄河水利委员会黄河网(<http://www.yrcc.gov.cn/>); 实测风速风向数据来自中国国家气象网(<http://data.cma.cn/>); 有效波高数据来自欧洲中期尺度预报中心(Europe an Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的第五代全球气候和大气再分析数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu/>), 分辨率为 0.5°。

### 2.5 GEE 平台

GEE 由于其高效的地理空间数据存储、处理、分析和可视化功能被广泛应用在时间序列分析或大范围制图等环境遥感领域<sup>[23]</sup>。本文基于 GEE 平台在线处理所有遥感影像数据, 无需下载大量遥感数据, 云平台数据处理效率高, 为本研究遥感数据的调用、处理、储存、分析等提供了高效技术支持。

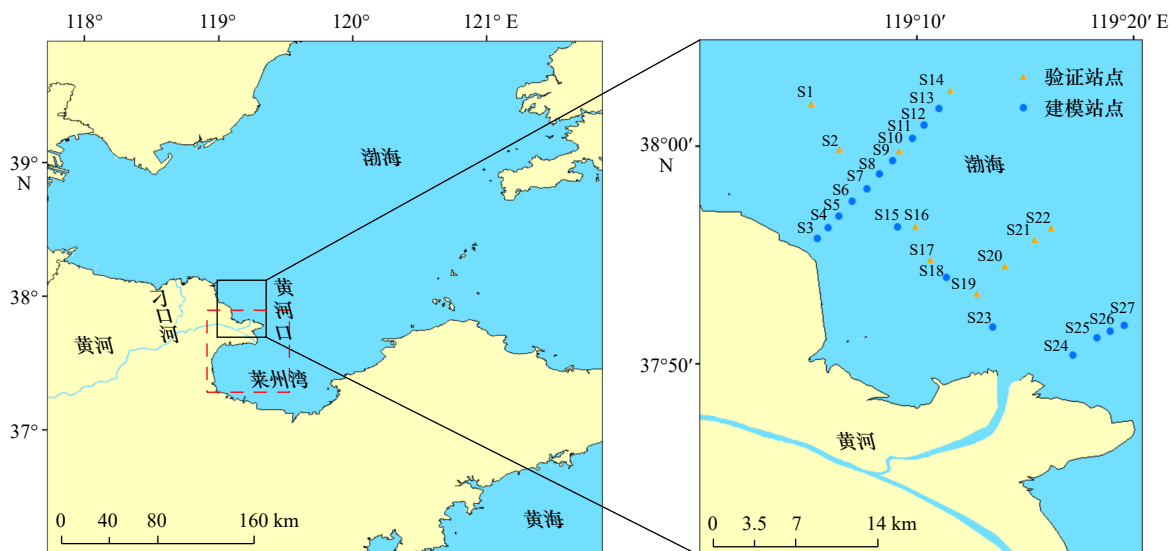


图 1 黄河口及邻近海域采样站点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling stations in Huanghe River Estuary and adjacent sea areas

图中红框为 5.3.2 节中的研究范围

Red box is the research scope in Section 5.3.2

## 2.6 精度评价

本文进行悬浮泥沙算法精度评价的指标采用均方根误差 (RMSE)、平均相对误差 (MRE) 和决定系数 ( $R^2$ ), 表达式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - X_i|}{X_i} \times 100\%, \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (3)$$

式中,  $Y_i$  为模型计算得到的 SSC;  $X_i$  为实测 SSC;  $N$  代表用于验证的样本数;  $\bar{X}$  为实测 SSC 平均值。

## 3 黄河口悬浮泥沙反演模型

### 3.1 色度角的计算

本文拟基于色度角 ( $\alpha$ ) 构建 SSC 遥感反演模型, 为了获取这一参数, 本文使用 CIE-RGB 到 CIE-XYZ 转换模型计算国际照明委员会 (Commission Internationale de L'Éclairage, CIE) 颜色系统中的光谱三刺激值  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 。计算中需使用 3 个可见光波段 (波长分别为 469 nm、555 nm 和 645 nm) 的光谱反射率 ( $R_{rs}(\lambda)$ )<sup>[24-25]</sup>, 转换模型如下:

$$X = 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B, \quad (4)$$

$$Y = 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B, \quad (5)$$

$$Z = 0.0000R + 0.0565G + 5.5934B, \quad (6)$$

式中,  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别代表可见光红、绿、蓝波段的光谱反射率。

将  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  按照下式归一化为 0 和 1, 得到色度角坐标 ( $x, y$ )<sup>[24-25]</sup>:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad (7)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (8)$$

利用 Wang 等<sup>[25]</sup> 提出的计算方法, 计算得到色度角:  $\alpha' = \arctan2(y', x') = \arctan2[x - (1/3), y - (1/3)]$ . (9)

为消除光谱反射率  $R_{rs}(\lambda)$  和等效 MODIS 波段引起的系统偏差, 需对色度角进行系统误差  $\Delta$  校正。本文使用 Wang 等<sup>[25]</sup>, Van der Woerd 和 Wernand<sup>[26]</sup> 提出的更适用于 MODIS 陆地波段的误差校正方法, 公式为

$$\Delta = 33.0860b^5 - 221.6000b^4 + 512.6500b^3 - 468.4000b^2 + 137.2700b + 4.6374, \quad (10)$$

式中,  $b = \alpha'/100$ 。根据式 (10) 计算得到校正后的色度角为

$$\alpha = \alpha' + \Delta. \quad (11)$$

### 3.2 悬浮泥沙模型构建

在 27 组黄河入海口附近的 SSC 实测数据中, 选取 17 组用于建模; 选取与实测数据对应位置准同步的 MOD09GA 影像数据计算得到色度角, 并与实测数据构建反演模型; 剩余的 10 组作为测试样本用于检验模型精度和准确性。具体数据信息如表 1 所示。

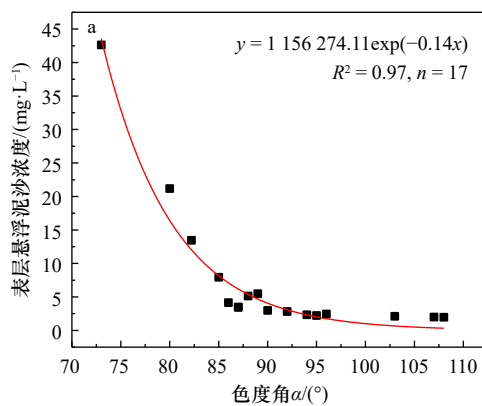
### 3.3 悬浮泥沙反演模型

本文基于 GEE 平台利用式 (3) 至式 (6), 通过回归、建模等步骤建立色度角与实测表层 SSC 之间的

表 1 实测数据信息

Table 1 Measured data information

采样时间/影像时间	建模数据站点	验证数据站点
2012年9月10日	S3、S4、S5、S6、S7、S8、S9、S10、S11、S12、S13	S10、S14
2012年9月14日	S24、S25、S26、S27	
2012年9月19日	S15、S18、S23	S1、S2、S16、S17
2012年9月20日		S19、S20、S21、S22



经验关系,如图 2a 所示。结果表明,表层 SSC 随着色度角的增大呈负指数型减小,两者呈负相关,模型  $R^2$  为 0.97,具体公式如下:

$$SSC = 1156274.11\exp(-0.14\alpha). \quad (12)$$

同时,如图 2b 所示,实测 SSC 与反演计算得到的 SSC 较均匀的分布在 1:1 线的两侧,  $R^2 = 0.80$ ,  $MRE = 11.0\%$ ,  $RMSE = 1.35 \text{ mg/L}$ ,表明本文建立的经验模型精度较高,可以用于反演黄河口悬浮泥沙分布情况。

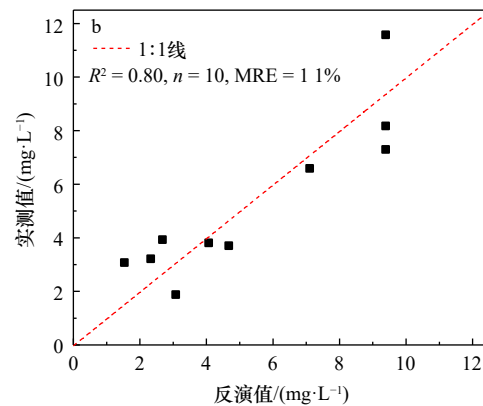


图 2 SSC 反演模型的校准(a)与验证(b)

Fig. 2 Calibration (a) and verification (b) of the SSC inversion model

## 4 时空分析

本文基于 GEE 平台依据式 (11) 反演得到了 2000–2021 年所有影像(共 1 005 景)的悬浮泥沙分布结果,并按照年份取平均,得到了 22 年以来黄河口及邻近海域悬浮泥沙逐年空间分布图(图 3)。研究区近岸海域悬浮泥沙年际变化明显,若以悬浮泥沙浓度大于  $200 \text{ mg/L}$  的区域为高浓度区,则 2002 年高浓度区面积最大,为  $6\,634.15 \text{ km}^2$ ; 2018 年高浓度区面积最小,为  $1\,095.34 \text{ km}^2$ 。根据 SSC 逐年统计结果(图 4),可以看出 22 年来研究区悬浮泥沙浓度的均值在  $53 \sim 128 \text{ mg/L}$  之间变化,均值为  $(88.08 \pm 0.04) \text{ mg/L}$ 。在 2002 年达到最高,为  $127.12 \text{ mg/L}$ , 2018 年急剧下降达到最低,为  $53.04 \text{ mg/L}$ 。研究区 SSC 年均值变化规律基本呈现出在波动中下降的变化趋势(趋势线斜率为  $-1.83 < 0$ ), 每年降低  $1.83 \text{ mg/L}$ 。

分析多年月均悬浮泥沙分布结果(图 5),发现悬浮物浓度较大的月份是 1–3 月和 11–12 月,其中 1 月悬浮泥沙浓度均值最高,为  $206.40 \text{ mg/L}$ ,高浓度区面积为  $10\,756.02 \text{ km}^2$ ; 较小的月份是 5–9 月,其中 6 月悬浮泥沙浓度均值最低,为  $24.82 \text{ mg/L}$ ,高浓度区面积为  $659.69 \text{ km}^2$ ; 而 4 月和 10 月悬浮泥沙浓度中等。

研究区近岸海域悬浮泥沙浓度季节变化明显(图 6),最小值为 2009 年夏季,为  $14.24 \text{ mg/L}$ ; 最大值为 2010 年冬季,为  $200.86 \text{ mg/L}$ 。22 年来黄河口及其邻近海域悬浮泥沙浓度逐渐降低(趋势线斜率为  $-0.81 < 0$ )。各年份中春季(3–5 月)和冬季(12 月至翌年 2 月)的悬浮泥沙浓度一般高于夏季(6–8 月)和秋季(9–11 月),但季节变化并不稳定。

图 7 为 22 年来研究区 SSC 季均值变化(图 7a 至图 7d)和年均分布(图 7e),发现年均高浓度区面积为  $2\,061.24 \text{ km}^2$ ; 夏季(6–8 月)SSC 均值最低,为  $46.28 \text{ mg/L}$ ,高浓度区面积少于年均值高浓度区面积,仅有  $1\,208.36 \text{ km}^2$ ; 秋季(9–11 月)高浓度区面积明显大于夏季,略高于年均值,为  $2\,621.74 \text{ km}^2$ ,SSC 均值达到了  $73.14 \text{ mg/L}$ ; 冬季(12 月至翌年 2 月)高浓度区面积最大为  $10\,655 \text{ km}^2$ ,悬浮泥沙浓度季均值最高为  $204.90 \text{ mg/L}$ ; 春季(3–5 月)高浓度区面积为  $4\,165.05 \text{ km}^2$ ,SSC 均值为  $88.18 \text{ mg/L}$ ,一般低于冬季,略高于夏季。

根据 2000–2021 年的 SSC 年均值、季均值、月均值空间分布图,发现在不同的时间尺度上,研究区 SSC 空间分布总体呈现近岸区大于远岸区的特征,高悬浮泥沙浓度现象始终存在于黄河三角洲北部海域、黄河口附近及莱州湾西北部。

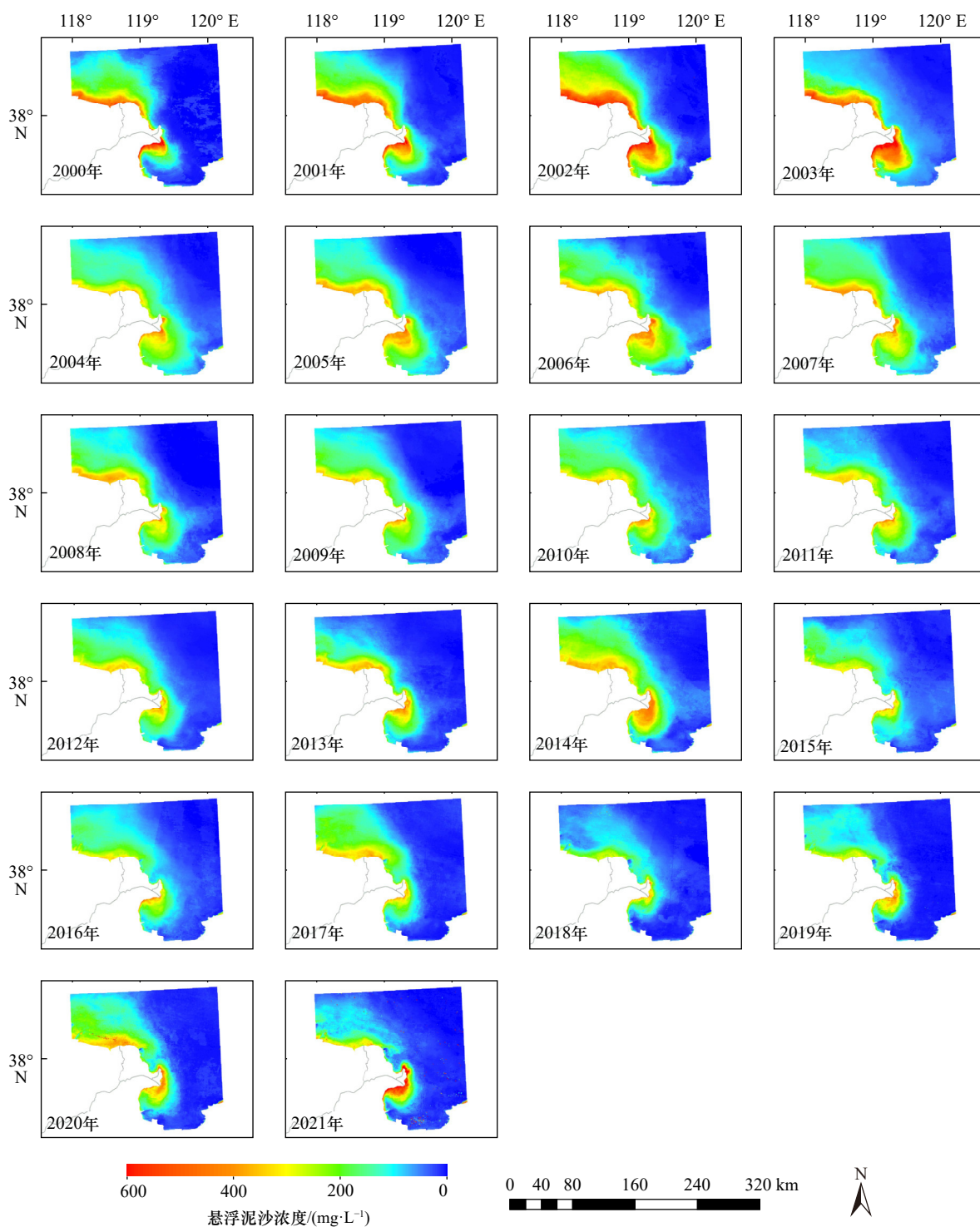


图3 2000-2021年黄河口及邻近海域SSC逐年均值分布

Fig. 3 Annual mean distribution of SSC in the Huanghe River Estuary and its adjacent sea areas from 2000 to 2021

## 5 讨论

### 5.1 误差来源

本文研究得到的黄河口及邻近海域的悬浮泥沙浓度时空分布存在一定的不确定性。其原因可能是因为实测数据数量不够,分布范围窄,且大多分布于近岸,实测数据结果易受底质泥沙高反射影响而与实际数

据产生偏差,最终对模型精度产生一定影响。多云多雨的气候特点使得夏季(6-8月)影像数据质量比较差,可用影像数量较少,在一定程度上对最后的反演结果造成影响。此外,本文所构建的经验模型可能存在可移植性差,应用到长时序分析时可能会产生误差。

### 5.2 SSC反演模型可靠性分析

基于MODIS数据的SSC遥感反演的研究中,常

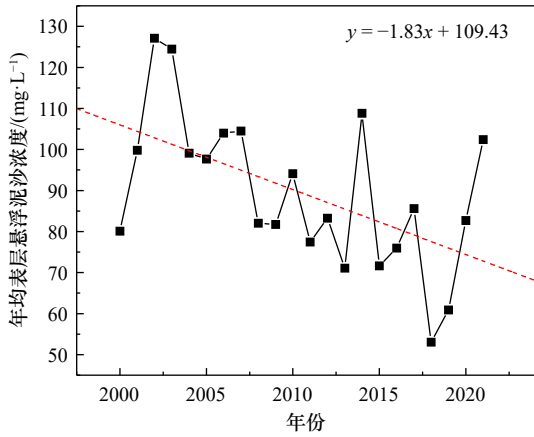


图4 2000–2021年黄河口及邻近海域SSC年均值变化  
Fig. 4 Annual mean change of SSC in the Huanghe River Estuary and its adjacent sea areas from 2000 to 2021

用的遥感反演因子主要有: 单波段(B1、B3、IR)<sup>[27–29]</sup>、双波段比值(B3/B2、B1/B3、B4/B1)<sup>[30–35]</sup>以及色度角<sup>[25–26, 36]</sup>等。多项研究证明基于色度角的反演方法是一种受外界影响较小、稳定性强, 能够有效反演水色参数的重要方法<sup>[17–19]</sup>。为了进一步分析本研究提出的模型的可靠性, 本文对比了多种SSC反演模型。如表2所示, 本文提出的色度角模型仅在R<sup>2</sup>上略逊于其余模型, 但在RMSE及MRE方面有着较大优势。对比结果证明本文构建的模型具有较好的反演精度

和可靠性, 可以精确反演黄河口附近海域的SSC。

### 5.3 影响因素分析

研究表明, 黄河口及邻近海域的悬浮泥沙分布主要受到黄河入海泥沙、海洋动力以及小浪底调水调沙等因素的影响<sup>[37–39]</sup>, 因此本文基于GEE平台借助遥感手段, 从自然环境和人类活动两方面对黄河口及邻近海域悬浮泥沙时空分布的影响因素进行分析。

#### 5.3.1 自然因素

本文通过建立年均SSC和花园口以下流域年均降水量之间的统计关系, 经过Pearson相关分析得到两者相关系数值为0.07,  $p > 0.05$ , 因而说明降水量对研究区悬浮泥沙的影响有限。

本文依据黄河网所提供的2000–2021年利津站年均含沙量数据与年均SSC建立统计关系, 结果如图8所示, 年均含沙量与年均SSC之间的相关系数 $r$ 为0.45, 显著性分析得到 $p < 0.05$ 。年均含沙量与研究区内年均SSC存在中等程度的正相关性, 但现有研究指出, 随着黄河入海径流量和输沙量的减少, 黄河入海泥沙对于黄河三角洲近岸的影响范围也迅速减小<sup>[8, 38]</sup>。根据图3可知, 泥沙会以现行黄河口为中心向四周扩散, 扩散区间(年均SSC > 20 mg/L)在距离河口4.8~14.6 km之间, 即黄河输沙影响的最大范围也仅在15 km以内, 与Zhao等<sup>[9]</sup>研究一致。

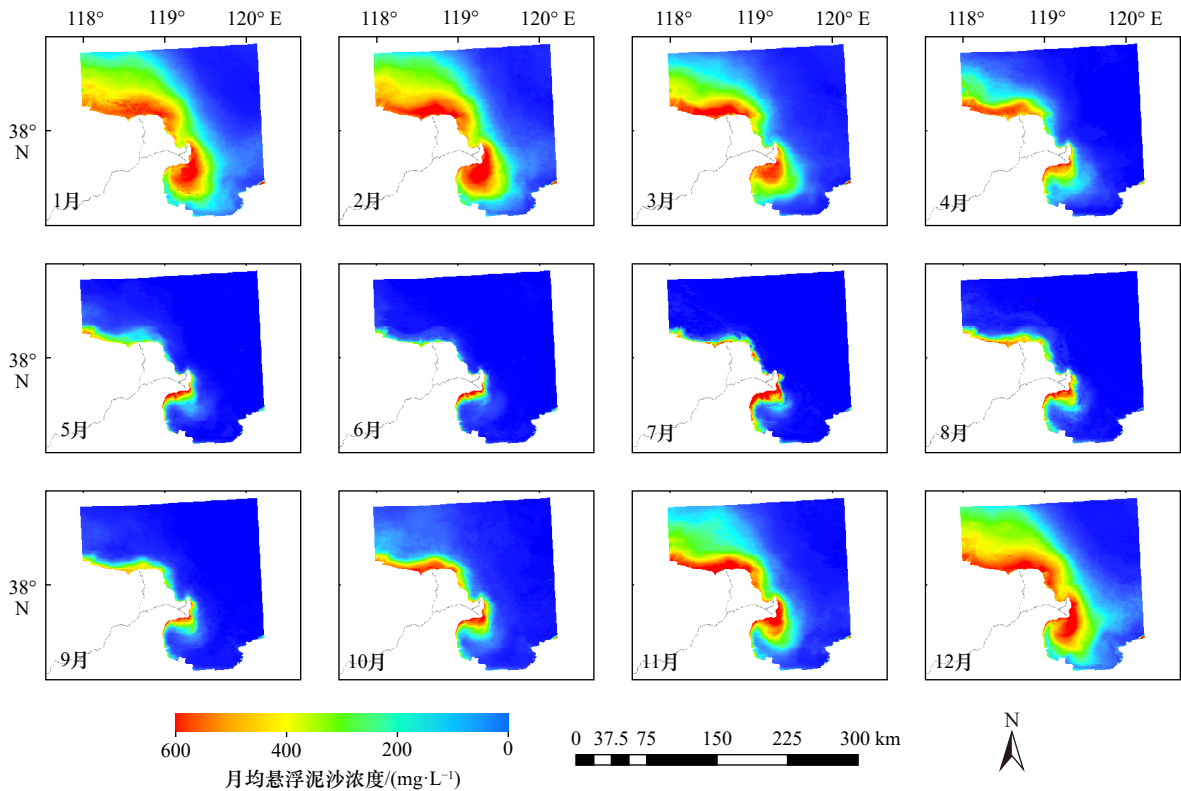


图5 2000–2021年黄河口及邻近海域SSC月均值分布  
Fig. 5 Monthly mean distribution of SSC in the Huanghe River Estuary and its adjacent sea areas from 2000 to 2021

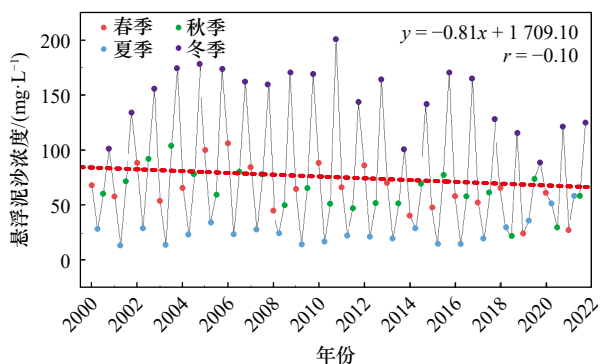


图 6 2000–2021 年黄河口及邻近海域 SSC 季均值变化

Fig. 6 Seasonal mean change of SSC in the Huanghe River Estuary and its adjacent sea areas from 2000 to 2021

风浪是影响泥沙再悬浮的重要因素。由 2000–2021 年研究区内月均波高统计图(图 9)可知,研究区

内波浪动力呈现出显著的季节特征,夏季平均波高基本在 1.0 m 以下,超过一半的波高小于 0.5 m,超过 1 m 的波高占比仅约为 5%,而冬季平均波高较大,超过 0.5 m 的波高占比大于 60%。结合图 5 可知,黄河丰水期(5–9 月)波浪较弱且悬浮泥沙浓度较低,黄河枯水期(10 月至翌年 4 月)波浪较强且悬浮泥沙浓度较高。通过有效波高与悬浮泥沙浓度年代际月均值的统计(图 10)可知,各年冬季研究区内悬浮泥沙浓度相对较大,月均有效波高最大值出现在 2015 年 12 月(1.32 m),而各年夏季悬浮泥沙浓度较小,月均有效波高最小值出现在 2014 年 8 月(0.33 m)。研究区内 SSC 逐年递减,除调水调沙期间(图内标黄),各时段有效波高与 SSC 年代际月均值基本呈现正相关关系,相关系数为 0.66,  $p < 0.01$ ;而调水调沙期间,两者之间的相关关系变弱,相关系数变为  $-0.16$ ,  $p > 0.05$ ,

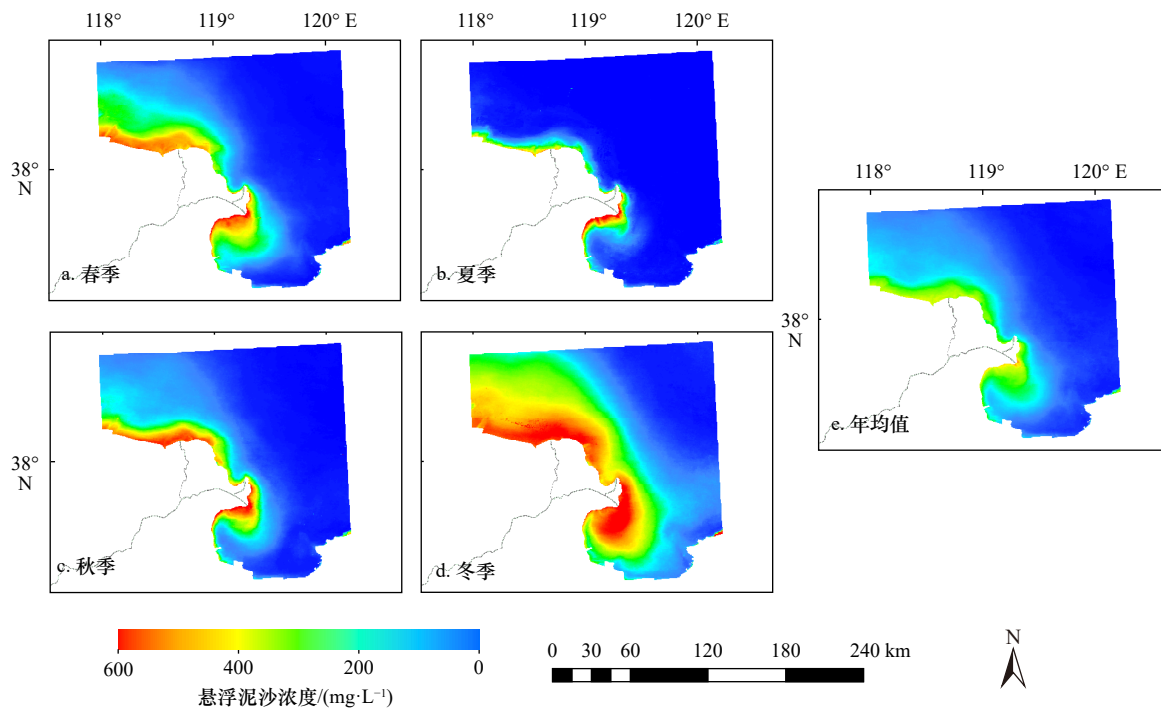


图 7 黄河口及邻近海域 SSC 季均值(a、b、c、d)和年均值(e)分布

Fig. 7 Seasonal mean (a, b, c, d) and annual mean (e) distribution of SSC in the Huanghe River Estuary and its adjacent sea areas

表 2 悬浮泥沙浓度遥感反演模型比较

Table 2 Comparison of remote sensing inversion models of suspended sediment concentration

$X_1$	模型	$R^2$	RMSE	MRE/%
B1	$SSC = \exp(0.290 + 47.02X_1)$ [28]	0.87	40.57	15.50
IR	$SSC = 0.21 - 40.88X_1 + 34\,419.43X_1^2 - 1\,85\,335X_1^3$ [29]	0.90	11.20	12.50
B1/B4	$SSC = 3.407 \times \exp(3.708X_1)$ [30]	0.80	5.06	11.00
B1/B4	$SSC = 0.493\,2 \times \exp(4.215X_1)$ [31]	0.81	4.75	12.50
$\alpha$	$SSC = 1\,156\,274.11 \times \exp(-0.14X_1)$ (本文)	0.80	1.35	11.00

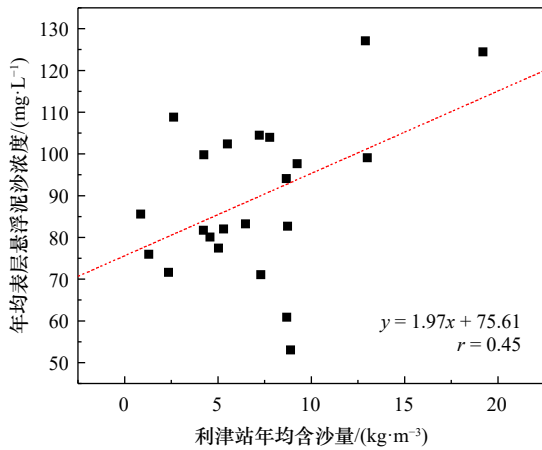


图 8 2000–2021 年利津站年均含沙量与 SSC 的关系  
Fig. 8 Relationship between incoming sediment coefficient and SSC in Lijin Station from 2000 to 2021

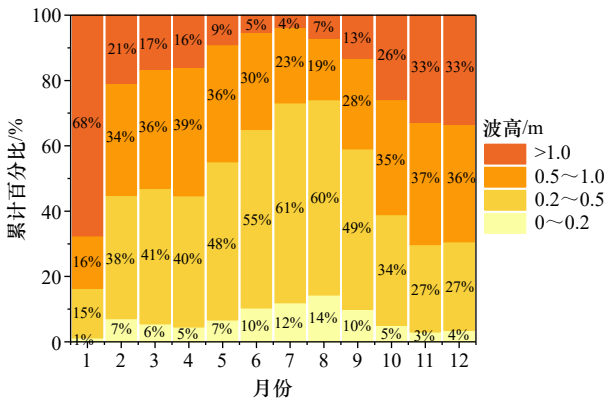


图 9 研究区逐月波高等级分布  
Fig. 9 Monthly wave height grade distribution in the study area

有效波高对 SSC 影响有限。

根据林聪泳等<sup>[38]</sup>的研究结果发现, 本文研究区内存在两个高流速区, 分别位于现行黄河口处和刁口河口附近。高流速区的存在会影响泥沙输沙率。并且在经过周期为 3 s、平均波高为 0.5 m 的波浪影响后, 黄河三角洲近岸的悬浮泥沙浓度增大现象明显。可见, 波浪掀沙对该研究区悬浮泥沙分布产生重要

影响。

除此之外, 前人研究认为潮汐也是影响黄河口附近 SSC 变化的重要驱动因素<sup>[40–42]</sup>。本文尝试探究潮汐对研究区悬浮泥沙分布的影响, 但由于 MODIS 遥感影像时间分辨率不足, 未发现明显规律。

### 5.3.2 小浪底调水调沙

现有研究发现, 剧烈的人类活动严重影响了黄河水沙运动以及河道演变规律, 使黄河不再具备自然河流的动态变化规律<sup>[39]</sup>。自 2005 年小浪底水文站正式实施调水调沙开始, 黄河口水沙条件也随之发生重大变化<sup>[30]</sup>。本文通过对比小浪底调水调沙年份与未进行调水调沙年份在同一时段内的 SSC 反演结果, 探究小浪底调水调沙对黄河口悬浮泥沙分布的影响。考虑到刁口河道已经成为废弃的黄河水沙通道(图 1), 因此小浪底调水调沙基本不会对黄河三角洲北部的悬浮泥沙分布产生影响, 所以本部分将现行黄河口门以及莱州湾作为主要研究区域。

根据黄河网泥沙公报所提供的小浪底水文站的相关数据, 小浪底水文站于 2006–2014 年、2018–2021 年进行过调水调沙。考虑到汛期影像云量过多、质量过差的影响, 最终筛选得到研究年份: 2006–2010 年、2012 年、2014 年以及 2018–2021 年。由于小浪底水利工程每年调水调沙时间不确定, 再加上水利工程开始调水后水头会在 4~6 d 内到达黄河口, 因此为了方便统计数据做相关性分析, 取以上研究年份调水调沙时间的交集, 计算得到调水调沙前 1~16 d(每年 6 月 14–30 日, 称之为时段一)所有可用影像的平均值、调水调沙期间(每年 7 月 1 日至 8 月 17 日, 称之为时段二)所有可用影像的平均值、调水调沙后 1~16 d(每年 8 月 18 日至 9 月 3 日, 称之为时段三)所有可用影像的平均值以及未调水调沙年份(2015–2017 年)在对应时段的所有可用影像的平均值, 进行对比分析(图 11)。研究发现调水调沙前, 悬浮泥沙的分布范围主要在黄河口门以及莱州湾西北部海

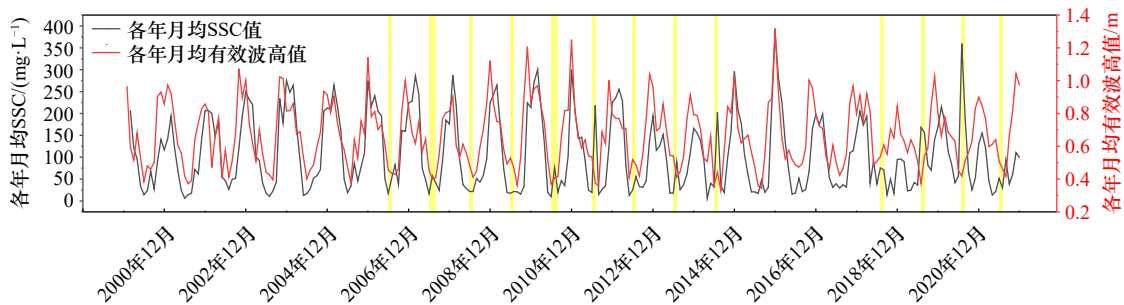


图 10 研究区各时段有效波高与 SSC 年代际月均值关系图  
Fig. 10 Relationship between effective wave height and SSC interdecadal monthly mean value in the study area

域。调水调沙期间,黄河口门以及莱州湾西北部海域的悬浮泥沙均向外扩散。调水调沙结束后,各处悬浮

泥沙仍继续向外扩散,高浓度区(SSC > 200 mg/L)边界由调水调沙前至距沿岸约 1.3 km 扩大至约 2.5 km。

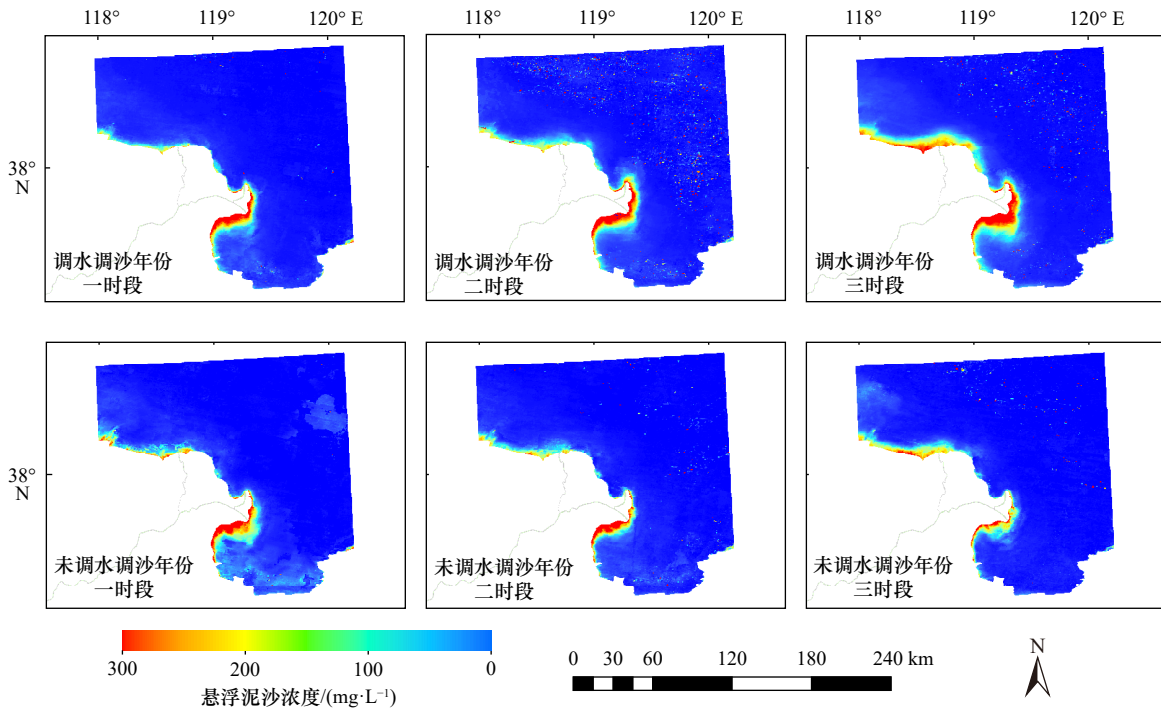


图 11 小浪底水文站调水调沙年份与未调水调沙年份 SSC 反演结果对比

Fig. 11 Comparison of SSC inversion results between the year of water and sediment regulation and the year of no water and sediment regulation at Xiaolangdi Hydrological Station

此外,根据山东东营气象站 2006–2017 年实测风向值,总结得到以上年份各年 6–9 月份风向基本为东南风。计算各年 6–9 月的平均风速与总平均风速(图 12),并将后者作为比较基准值。定义平均风速变化率为

$$dV = \frac{|V_i - V|}{V} \times 100\%, \quad (13)$$

式中,  $dV$  为平均风速变化率;  $V_i$  为平均风速;  $i$  为年份;  $V$  为总平均风速,其值为 2.16 m/s。据此公式,发现各年 6–9 月的平均风速变化率大致在 10% 以内(图 12)。由以上分析可知,研究区各年 6–9 月的风速风向及夏季有效波高(图 9)均变化较小,对 SSC 分布影响有限,因此,本文认为在 6–9 月现行黄河口门以及莱州湾处 SSC 分布变化的主要影响因素是小浪底的调水调沙。

针对图 11 进行时间角度的对比分析,本文仅针对图 1 红框所示范围进行高浓度区(SSC > 200 mg/L)面积统计。根据式(13)计算得到研究年份一、三时段高浓度区面积变化率:

$$dS = \frac{S_{\text{after}} - S_{\text{before}}}{S_{\text{before}}} \times 100\%, \quad (14)$$

式中,  $dS$  为高浓度区面积变化率;  $S_{\text{before}}$  为一时段高浓度区面积;  $S_{\text{after}}$  为三时段高浓度区面积。若小浪底调水调沙使得黄河口以及莱州湾西北部区域高浓度区面积扩大,则  $dS$  为正值,反之则为负值。

依据泥沙公报提供的 2006–2021 年小浪底实输沙量与径流量数据,计算 6–9 月实输沙量与径流量的

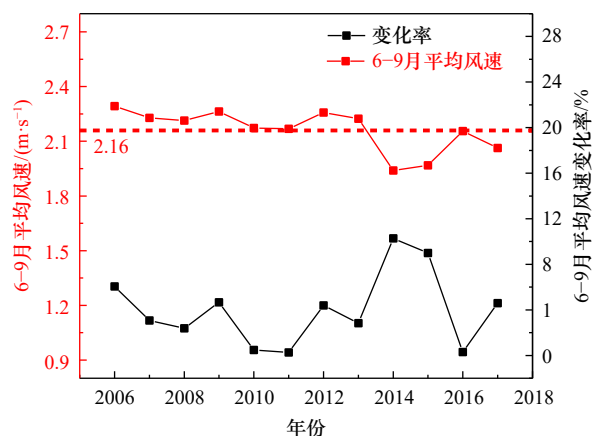


图 12 2006–2017 年各年 6–9 月的平均风速及其变化率

Fig. 12 Average wind speed and its change rate from June to September in 2006 to 2017

比值作为调水调沙期间的来沙系数,并建立其与高浓度区面积变化率的关系(图 13)。研究发现进行调水调沙的年份,高浓度区面积变化率均为正值,最大值出现在 2019 年,为 107.29%,最小值出现在 2009 年,为 3.91%;未调水调沙年份的面积变化率均为负值,2015 年高值区面积减小最大,变化率为-56.31%。调水调沙期间的来沙系数与高浓度区面积变化率基本呈现正相关的关系,即调水调沙期间的来沙系数增

大,调水调沙前后高浓度区面积变化率增大。如 2006-2008 年,调沙期间的来沙系数由 3 179.27 mg/L 增加至 7 365.99 mg/L,高浓度区面积增长率由 12.35% 增加至 87.86%。由此,本文认为小浪底进行调沙在一定时间内改变了黄河口自然状态下的悬浮泥沙分布规律,使黄河口以及莱州湾西北部海域悬浮泥沙浓度增加,分布范围扩大。

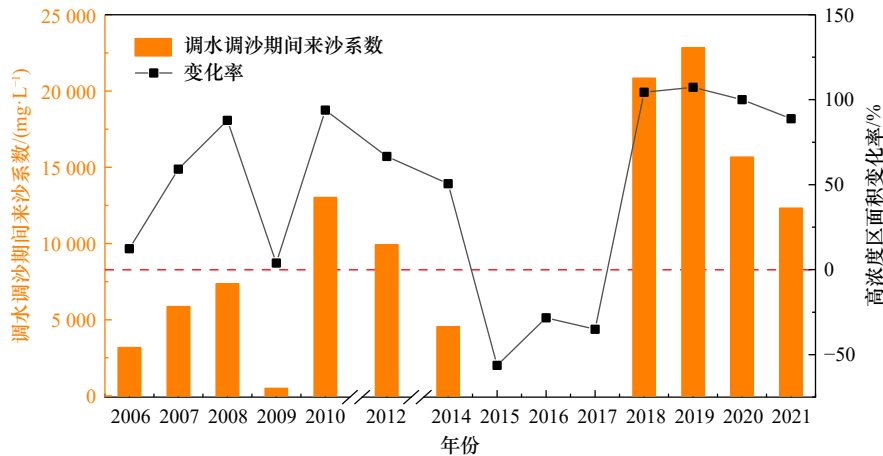


图 13 调水调沙期间来沙系数与调水调沙前后高浓度区面积变化率关系图

Fig. 13 Relationship between incoming sediment coefficient during water and sediment regulation and area change rate of high concentration area before and after water and sediment regulation

## 6 结论

本文利用 GEE 平台对黄河口及邻近海域悬浮泥沙时空分布进行研究,得到 2000-2021 年间研究区悬浮泥沙的时空分布规律,并从自然环境和人类活动两方面对研究区悬浮泥沙的时空分布及其影响因素进行分析,得到以下结论:

(1) 本文基于色度角与悬浮泥沙浓度之间的关系建立了适于黄河口及邻近海域的悬浮泥沙浓度反演模型,经验证,模型反演值与实测值具有较好的一致性,平均相对误差(MRE)为 11.0%。

(2) 22 年间黄河口及邻近海域悬浮泥沙浓度呈波动下降的趋势,最高值出现在 2015 年;空间分布规律较稳定,表现为近岸高远岸低,且黄河三角洲北部海

域、黄河口附近以及莱州湾西北部区域的悬浮泥沙浓度一直较高。

(3) 黄河口及邻近海域悬浮泥沙浓度与黄河入海泥沙、风浪相关,扩散区间(年均 SSC > 20 mg/L)仅在距离河口 4.8~14.6 km 之间,黄河入海泥沙对现行黄河口处泥沙扩散影响有限,波浪与悬浮泥沙浓度存在相同的季节特征,非调水调沙期间,有效波高与 SSC 年代际月均值呈现正相关关系( $r = 0.66, p < 0.01$ )。

(4) 黄河口以及莱州湾区域在风和波浪影响较为稳定的情况下受到小浪底调水调沙的影响明显,悬浮泥沙扩散现象明显,调水调沙期间的来沙系数与高浓度区面积变化率基本呈现正相关的关系,高浓度区(SSC > 200 mg/L)边界由调水调沙前至距沿岸约 1.3 km 扩大至约 2.5 km。

## 参考文献:

- [1] 梁丙臣. 海岸、河口区波-流联合作用下三维悬沙数值模拟及其在黄河三角洲的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.  
Liang Bingchen. Numerical simulations of three dimensional suspended sediment transport with wave-current co-existing and its applications in Huanghe Delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [2] 贾淇文, 章桂芳, 唐世林, 等. 2013-2018 年珠江河口伶仃洋水域悬浮泥沙季节性变化分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(5): 59-71.  
Jia Qiwen, Zhang Guifang, Tang Shilin, et al. Seasonal variation of suspended sediments in the Lingdingyang waters of the Pearl River

- Estuary from 2013 to 2018[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(5): 59–71.
- [3] 朱超祁, 单红仙, 刘晓磊, 等. 基于原位观测的黄河水下三角洲悬浮物浓度叠加锯齿模型[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 195–201.  
Zhu Chaoqi, Shan Hongxian, Liu Xiaolei, et al. The superposed sawtooth model of suspended sediment concentration in the Yellow River subaqueous delta based on in-situ observation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 195–201.
- [4] 伊兆晗, 胡日军, 李毅, 等. 福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(6): 53–66.  
Yi Zhaohan, Hu Rijun, Li Yi, et al. Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(6): 53–66.
- [5] 宋子豪. 基于遥感反射率分类的鄱阳湖悬浮泥沙浓度反演研究[J]. *河南科技*, 2021, 40(10): 121–124.  
Song Zihao. Research on retrieval of suspended sediment concentration in Poyang Lake based on remote sensing reflectance classification[J]. *Journal of Henan Science and Technology*, 2021, 40(10): 121–124.
- [6] 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.  
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.
- [7] 侯雪姣. 基于遥感的长江中下游大型湖库悬浮泥沙浓度时空动态及其与湿地植被覆盖的关系研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.  
Hou Xuejiao. Remote sensing-based spatial-temporal dynamics of sediment concentrations and its relationship with wetland vegetation coverage in large lakes and reservoirs of the middle and lower reaches of the Yangtze River[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- [8] Yunus A P, Masago Y, Hijioka Y. Analysis of long-term (2002–2020) trends and peak events in total suspended solids concentrations in the Chesapeake Bay using MODIS imagery[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 299: 113550.
- [9] Zhao Gaibo, Jiang Wensheng, Wang Tao, et al. Decadal variation and regulation mechanisms of the suspended sediment concentration in the Bohai Sea, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(3): e2021JC017699.
- [10] Li Peng, Chen Shenliang, Ke Yinghai, et al. Spatiotemporal dynamics of suspended particulate matter in the Bohai Sea, China over the past decade from the space perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158210.
- [11] 周媛, 郝艳玲, 刘东伟, 等. 基于Landsat 8影像的黄河口悬浮物质量浓度遥感反演[J]. *海洋学研究*, 2018, 36(1): 35–45.  
Zhou Yuan, Hao Yanling, Liu Dongwei, et al. Estimation of suspended particulate matter concentration based on Landsat 8 data in the Yellow River Estuary[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2018, 36(1): 35–45.
- [12] 吴文娟, 付慧薇. 基于高分一号遥感卫星的黄河口海域悬沙时空分布研究[C]//2021(第九届)中国水利信息化技术论坛论文集. 北京: 北京沃特咨询有限公司, 2021: 582–590.  
Wu Wenjuan, Fu Huiwei. Spatial-temporal distribution of suspended sediment in the Yellow River estuary based on GF-1 remote sensing satellite[C]//2021 (9th) Proceedings of China Water Conservancy Informatization Technology BBS. Beijing: Beijing Wote Consulting Co, Ltd, 2021: 582–590.
- [13] 樊彦国, 孟志河, 张磊, 等. 基于遥感光谱反射率反演黄河口海域Ⅱ类水体悬浮泥沙浓度模型[J]. *海洋科学*, 2010, 34(9): 60–63.  
Fan Yanguo, Meng Zhihe, Zhang Lei, et al. Based on remote sensing spectral reflectance inversion of suspended sediment concentration model of surface water at the Yellow River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(9): 60–63.
- [14] 姜丽君, 王庆, 徐洋, 等. 基于遥感反演的莱州湾水色变化的多时相分析[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(3): 551–559.  
Jiang Lijun, Wang Qing, Xu Yang, et al. Multi-temporal analysis of water color variation in Laizhou Bay based on remote sensing images[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(3): 551–559.
- [15] 潘彬. 黄河水沙变化及其对气候变化和人类活动的响应[D]. 济南: 山东师范大学, 2021.  
Pan Bin. Variations of runoff and sediment and their responses to climate change and human activities in the Yellow River[D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2021.
- [16] 刘晓, 黄海军, 刘艳霞, 等. 黄河三角洲附近海域悬浮泥沙浓度估算[J]. *人民黄河*, 2013, 35(2): 10–12.  
Liu Xiao, Huang Haijun, Liu Yanxia, et al. Estimation of suspended sediment concentration in the sea water near the Yellow River Delta[J]. *Yellow River*, 2013, 35(2): 10–12.
- [17] 殷子瑶, 江涛, 杨广普, 等. 1986–2017年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究[J]. *海洋科学*, 2020, 44(4): 21–32.  
Yin Ziyao, Jiang Tao, Yang Guangpu, et al. The spatial-temporal variation of water clarity and its influencing factors in Jiaozhou Bay from 1986 to 2017[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(4): 21–32.
- [18] 王芳, 青松, 刘楠, 等. 基于色度角的岱海水体营养状态遥感评估[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1150–1163.  
Wang Fang, Qing Song, Liu Nan, et al. Remote sensing assessment of trophic status based on chromaticity angle in Lake Daihai[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4): 1150–1163.
- [19] 王一飞, 宫兆宁, 张园, 等. 基于多源传感器的FUI水色指数提取与应用[J]. *自然资源遥感*, 2021, 33(3): 262–271.  
Wang Yifei, Gong Zhaoning, Zhang Yuan, et al. Extraction and application of Forel-Ule index based on images from multiple sensors[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(3): 262–271.
- [20] 蒋超. 黄河口动力地貌过程及其对河流输入变化的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.  
Jiang Chao. Morphodynamic processes in the Yellow River estuary and their responses to variation of riverine supply[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.

- [21] Wang Shenglei, Li Junsheng, Zhang Bing, et al. A simple correction method for the MODIS surface reflectance product over typical inland waters in China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(24): 6076–6096.
- [22] Yin Ziyao, Li Junsheng, Huang Jue, et al. Steady increase in water clarity in Jiaozhou Bay in the Yellow Sea from 2000 to 2018: observations from MODIS[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2021, 39(3): 800–813.
- [23] Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, et al. Google Earth Engine for geo-big data applications: a meta-analysis and systematic review[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 164: 152–170.
- [24] CIE. Commission Internationale de l'Éclairage Proceedings, 1931[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1932.
- [25] Wang Shenglei, Li Junsheng, Shen Qian, et al. MODIS-based radiometric color extraction and classification of inland water with the Forel-Ule scale: a case study of Lake Taihu[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(2): 907–918.
- [26] Van der Woerd H J, Wernand M R. True colour classification of natural waters with medium-spectral resolution satellites: SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI[J]. *Sensors*, 2015, 15(10): 25663–25680.
- [27] Shi Kun, Zhang Yunlin, Zhu Guangwei, et al. Deteriorating water clarity in shallow waters: evidence from long term MODIS and *in-situ* observations[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 68: 287–297.
- [28] 乔晓景, 何报寅, 张文, 等. 基于MODIS的长江中游河段悬浮泥沙浓度反演[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(8): 1090–1095.  
Qiao Xiaojing, He Baoyin, Zhang Wen, et al. Modis-based retrieval and change analysis of suspended sediment concentration in middle Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(8): 1090–1095.
- [29] Cui Lijuan, Qiu Yue, Fei Teng, et al. Using remotely sensed suspended sediment concentration variation to improve management of Poyang Lake, China[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2013, 29(1): 47–60.
- [30] 王林, 杨建洪, 李冠男, 等. 江苏近岸海域HJ CCD影像悬浮泥沙遥感反演[J]. *海洋科学*, 2016, 40(2): 77–83.  
Wang Lin, Yang Jianhong, Li Guannan, et al. Retrieval of suspended sediment concentration from HJ-CCD imagery in Jiangsu coastal sea[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(2): 77–83.
- [31] Zhan Weikang, Wu Jie, Wei Xing, et al. Spatio-temporal variation of the suspended sediment concentration in the Pearl River Estuary observed by MODIS during 2003–2015[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 172: 22–32.
- [32] Binding C E, Greenberg T A, Watson S B, et al. Long term water clarity changes in North America's Great Lakes from multi-sensor satellite observations[J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(6): 1976–1995.
- [33] Kratzer S, Håkansson B, Sahlin C. Assessing Secchi and photic zone depth in the Baltic Sea from satellite data[J]. *Ambio*, 2003, 32(8): 577–585.
- [34] Olmanson L G, Bauer M E, Brezonik P L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10, 000 lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(11): 4086–4097.
- [35] Duan Hongtao, Ma Ronghua, Zhang Yuanzhi, et al. Remote-sensing assessment of regional inland lake water clarity in Northeast China[J]. *Limnology*, 2009, 10(2): 135–141.
- [36] Ren Jingli, Zheng Zhubin, Li Yunmei, et al. Remote observation of water clarity patterns in Three Gorges Reservoir and Dongting Lake of China and their probable linkage to the Three Gorges Dam based on Landsat 8 imagery[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1554–1566.
- [37] 姚前前. 小浪底调水调沙对黄河口来水来沙条件和海岸线演变规律的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.  
Yao Qianqian. Influence of flow/sediment regulation in Xiaolangdi on incoming flow/sediment condition and coastline evolution of the Yellow River Estuary[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.
- [38] 林聪泳, 陈沈良, 李鹏, 等. 黄河三角洲北部近岸悬浮物季节性分布及驱动因素[J]. *海洋学报*, 2021, 43(12): 152–160.  
Lin Congyong, Chen Shenliang, Li Peng, et al. Seasonal distribution and driving forces of suspended particulate matter in the northern Yellow River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(12): 152–160.
- [39] 李平, 丰爱平, 陈义中, 等. 2005年黄河调水调沙期间入海泥沙扩散研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2010(4): 72–78.  
Li Ping, Feng Aiping, Chen Yizhong, et al. The diffusion studies of sediment into sea during the period of Yellow River water and sediment regulation, 2005[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2010(4): 72–78.
- [40] 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.  
Chen Qiong, Tang Shilin, Wujie. Spatial-temporal variation of suspended sediment in the Pearl River Estuary retrieved from GF-4 satellite data[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(2): 65–76.
- [41] 孟令鹏, 胡日军, 李毅, 等. 福宁湾海域冬季大潮期悬浮泥沙输运特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 61–73.  
Meng Lingpeng, Hu Rijun, Li Yi, et al. Transport characteristics of suspended sediment in Funing Bay during spring tide in winter[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(3): 61–73.
- [42] 陆建忠. 遥感反演与数值模拟耦合的渤海悬浮泥沙输移研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.  
Lu Jianzhong. Study on suspended sediment transport coupling remote sensing retrieval and numerical simulation in the Bohai Sea, China[J]. Wuhan: Wuhan University, 2010.

# Analysis of the temporal and spatial distribution of suspended sediment concentration and its influencing factors in the Huanghe River Estuary based on GEE

Li Huizhen<sup>1</sup>, Wang Yuchen<sup>1</sup>, Duan Gaoyu<sup>1</sup>, Huang Jue<sup>1</sup>

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** The Huanghe River Delta is an important ecological function area in China. It is of guiding significance to explore the distribution of suspended sediment concentration (SSC) at the estuary and its influencing factors for sediment erosion and re-suspension, and the ecological process in the estuary and coastal zone. Based on the relationship between chromaticity angle and SSC, an SSC inversion model ( $R^2 = 0.80$ , MRE = 11.0%, RMSE = 1.35 mg/L) suitable for the Huanghe River Estuary and its adjacent sea areas is established in this paper. With the help of the GEE (Google Earth Engine) platform, the spatial and temporal distribution characteristics and changing rules of SSC in the Huanghe River Estuary and its adjacent sea area during the 22 years from 2000 to 2021 were studied, and the influencing factors were analyzed from two aspects of nature and human activities. The annual average value of SSC in the study area showed a downward trend ( $-1.83 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{a})$ ). The spatial distribution shows that SSC gradually decreases from near shore to far shore; the diffusion interval ( $\text{SSC} > 20 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{a})$ ) is only 4.8–14.6 km away from the estuary, and the influence of sediment from the Yellow River on the current sediment diffusion at the estuary is limited. The wave and suspended sediment concentration have the same seasonal characteristics. During the non-water and sediment regulation period, there is a positive correlation between the effective wave height and the SSC interdecadal monthly average ( $r = 0.66$ ,  $p < 0.01$ ). During the period of water and sediment regulation, the current SSC at the mouth of the Huanghe River and Laizhou Bay is limited by wind speed and effective wave height, and water and sediment regulation is dominant. During the period of water and sediment regulation, there is a positive correlation between the incoming sediment coefficient and the area change rate of high-concentration areas. After the water and sediment regulation (within 16 days), the boundary of the high concentration area ( $\text{SSC} > 200 \text{ mg}/\text{L}$ ) is expanded from about 1.3 km to about 2.5 km from the coast.

**Key words:** GEE (Google Earth Engine) platform; hue angle; Huanghe River Estuary and adjacent sea area; suspended sediment concentration; water and sediment regulation