

文章编号:1671-4229(2023)04-0008-12

环西太平洋海岸带 1990 – 2020 年悬浮泥沙变化 遥感监测和趋势分析

杨现坤^{1a,b}, 周涛^{1a}, 曹博文²

(1. 广州大学 a. 地理科学与遥感学院, b. 广东省农村水环境面源污染综合治理工程技术研究中心, 广东 广州 510006;
2. 帕多瓦大学 土地、环境、农业与林业系, 帕多瓦 35020)

摘要: 太平洋西海岸是世界主要大河的入海口, 近年来气候变化和人类活动持续改变导致太平洋西海岸带的悬浮泥沙浓度显著变化, 使沿海海岸带生态系统受到严重影响。然而, 由于沿海岸带观测站有限, 难以对这些变化进行有效监测。本研究使用3种典型的悬浮泥沙反演算法, 选取1990–2020年的Landsat卫星影像反演太平洋西海岸近岸水域的悬浮泥沙浓度, 并重点分析6大亚洲大河入海口悬浮泥沙的空间分布以及动态变化特征。结果表明: ①3种悬浮浓度模型的反演结果在31年内时空变化趋势上表现出高度一致, 悬浮泥沙浓度在太平洋西海岸6大河口均发生显著下降; ②长时间内长江口、杭州湾以及黄河口悬浮泥沙浓度较高, 而同时期的珠江口以及湄公河口则相对较低, 且不同河口内的悬浮泥沙具有不同的空间分布特征; ③6大河口由于受到降水、上游输沙量、风速以及潮汐等不同主导因素的影响, 具有不同的季节变化特征。本研究成果对海岸带稳定和可持续发展具有重要参考价值。

关键词: 太平洋西海岸; 悬浮泥沙; 遥感; 谷歌地球引擎

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A

Mapping suspended sediment changes in the Western Pacific Coasts during 1990 – 2020

YANG Xian-kun^{1a,b}, ZHOU Tao^{1a}, CAO Bo-wen²

(1. a. School of Geography and Remote Sensing, b. Rural Non-Point Source Pollution Comprehensive Management Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Department of Land, Environment, Agriculture and Forestry, University of Padova, Padova 35020, Italy)

Abstract: The Western Pacific Coasts (WPC) is the terminal of many large Asian rivers. In recent years, climate changes and human activities persistently change the sediment loads to the WPC, resulting in dramatic changes in coastal ecosystems. However, due to the sparse observation stations along the coasts, it is difficult to investigate the changes at large scales. This study, using three representative suspended sediment retrieval models, selected Landsat images from 1990 to 2020 to predict the Suspended Sediment Concentration (SSC) in the coastal waters and analyze the spatial dynamics of SSC in the estuaries of six large Asian rivers. The results indicate that: ① The results from the three SSC models show a highly consistent decreasing trend in SSC changes over the past 31 years in all six major estuaries. ② Overall, the SSC in the Yangtze River Estuary, Hangzhou Bay, and Yellow River Estuary were relatively high, while the Pearl River and Mekong Estuaries were relatively low;

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-07-04

基金项目: 广东省自然科学基金面上资助项目(2021A1515011533)

作者简介: 杨现坤(1981—), 男, 教授, 博士. E-mail: yangxk@gzhu.edu.cn

引文格式: 杨现坤, 周涛, 曹博文. 环西太平洋海岸带 1990 – 2020 年悬浮泥沙变化遥感监测和趋势分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(4): 8 – 19.

the SSC in different estuaries has exhibited different spatial characteristics along the coasts. ③ The six major estuaries have different seasonal characteristics primarily due to different dominant factors such as precipitation, upstream sediment load, wind, and tides. The results of this study are valuable for the stability and sustainable development of the Western Pacific Coasts.

Key words: the Western Pacific Coasts; suspended sediment; remote sensing; Google Earth Engine

悬浮泥沙是近岸水体的重要水质参数,一方面它能够通过改变水体透明度对浮游动植物生长繁育和分布产生影响^[1],以及携带营养物质参与构建沿海水生生态系统^[2];另一方面,河流充足的泥沙供应塑造了河口三角洲、海滩和湿地等地貌格局^[3]。然而,上个世纪以来河流上游持续的大坝建设和水土保持措施开始对泥沙进行拦截,导致世界沿海海域普遍发生泥沙缺乏问题^[4-5]。例如湄公河三角洲的泥沙从坝前到坝后减少了70%以上^[6];黄河在过去60年间输沙量下降了90%^[7];密西西比河流域的大坝建设导致Barataria河岸泥沙减少了1/3^[8]。

西太平洋海岸带位于亚洲大陆和西太平洋之间的过渡区域,包括太平洋西海岸的部分流域、河口和沿海海域,并延伸至大陆架^[9]。该区域不断发生着相互作用和物质交换活动,各种物质对于自然和人为干扰因素十分敏感^[10]。同时,西太平洋海岸带通常是人口密集区,也是各国经济发展的中心区域。西太平洋海岸带作为亚洲主要河流(长江、黄河、珠江、红河和湄公河等)的入海口,河流泥沙输送的下降使西太平洋海岸线的侵蚀程度加剧^[11]。泥沙的供给缺乏加上气候变暖引起的海平面上升,最终会造成海岸线不断收缩^[12-13],整个西太平洋海岸带区域的生态系统稳定会受到影响。因此,本研究旨在对西太平洋海岸带的悬浮泥沙浓度(Suspended Sediment Concentration, SSC)的动态变化进行长时序分析,为有效海岸带可持续发展提供指导。

传统的悬浮泥沙监测一般是通过固定的水文站点记录或者水上船舶的航行间调查来完成。这些方法不仅成本高而且非常耗时,难以获取悬浮泥沙连续的时空动态分布特征^[14];此外,因为河段下游与河口的沉积作用,依靠上游河流水文站点提供的数据无法准确表示沿海水域悬浮泥沙的变化情况。自1974年人类首次使用遥感技术观测SSC以来^[15],由于遥感技术能低成本地提供时间和空间上连续稳定的数据,大量研究人员使用

MODIS、MERIS和Landsat等各种卫星反演水体的SSC^[16-18]。其中,Landsat系列卫星由于空间分辨率高、观测时间长的特点常被用于河口长时序SSC的监测。例如,Cao等^[19]使用Landsat数据反演了珠江口35年内的SSC变化;Luo等^[20]使用Landsat反演了长江口37年的动态变化。然而,由于沿海水域水质参数和光学性质的复杂性^[21],基于局部地区开发悬浮泥沙反演模型通常只在原区域具有最好的效果,使得大部分的长时序研究局限在单个河口。但是,由于这些研究采用的研究模型不同,数据质量不同,研究的时间跨度也不同,使得这些研究结果之间缺乏可比性,无法形成西太平洋海岸带悬浮泥沙变化的共性规律。系统研究西太平洋海岸带多个大河河口间悬浮泥沙长期的时空动态变化的研究还不多见。

本研究基于(Google Earth Engine, GEE)平台,选取1990-2020年的Landsat卫星影像反演整个太平洋西海岸带近岸水体的SSC,以分析其空间特征和时间变化规律。为保证反演精度,本研究选用3个不同类型、不同波段的反演模型进行反演,其中,重点分析太平洋西海岸带中6大河口的SSC的年际变化,并通过监测6大河口悬浮泥沙浓度长期的动态变化,评估整个西太平洋海岸带的悬浮泥沙变化趋势。这项工作对于西太平洋海岸带的稳定和可持续发展具有重要价值。

1 数据和方法

1.1 研究区概述

为了准确地监测西太平洋海岸带悬浮泥沙的动态变化,本研究以北至辽河,南至湄公河的西太平洋海岸线为基线,形成向陆地延伸5 km,向海洋延伸18.52 km的带状区域。据此选取西太平洋海岸带部分水域作为研究区(图1),并以亚洲6大流域入海口为研究重点,系统结合流域特征和地表过程变化研究其悬浮泥沙变化空间特征和时间变化规律。

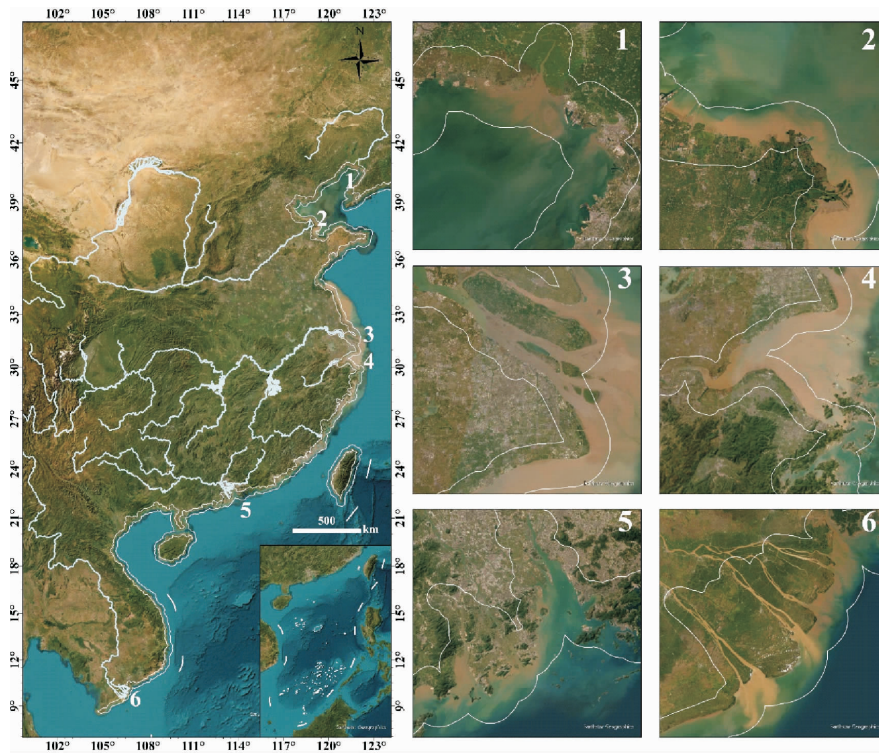


图 1 环西太平洋海岸带及 6 大河口位置图

Fig. 1 Location map of the Western Pacific coastal zone and six major estuaries

图 1 中,辽河口、黄河口、长江口、杭州湾、珠江口和湄公河口是西太平洋海岸带 6 大流域的入海口。辽河发源于河北省广头山,注入渤海,平均年输沙量 $1.19 \times 10^7 \text{ t}$ ^[22]。黄河发源于青藏高原注入渤海,是世界上最浑浊的河流之一,历史输沙量曾达 $5.98 \times 10^8 \text{ t/yr}$ ^[23]。长江发源于青藏高原唐古拉山脉,年均地表径流和输沙量曾达 $9.04 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 和 $4.35 \times 10^8 \text{ t}$ ^[24]。钱塘江入海口杭州湾位于长江入海口以南^[25]。在强风和强潮的影响下杭州湾湾底的泥沙重新悬浮,同时大量泥沙从长江口运输到杭州湾,多重因素下使得杭州湾水域及其浑浊^[26-27]。珠江全长 2 216 km,年均输沙量约为 $7.53 \times 10^7 \text{ t/yr}$ ^[28]。湄公河发源于唐古拉山脉,在输沙量方面湄公河分别是亚洲第三和世界第十一的河流^[29]。

这些河流是西太平洋入海水沙和营养物质的重要贡献者。多年来,人类在这 6 大流域中修建了大量的水库、大坝等水利设施,从而导致沿海生态系统受到影响。

1.2 数据来源和处理分析

Landsat 5/7/8 在时间分辨率(16 d)和空间分辨率(30 m)上保持一致。从 GEE 平台上分别获取了 Landsat 5/7/8 的 Level-2 的地表反射率产品

集合。Landsat5 和 7 的反射率产品使用(Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System, LEDAPS)算法生成,Landsat8 则使用(Land Surface Reflectance Code, LaSRC)算法生成。两种算法校正了大气气体、气溶胶和水蒸气在时间、空间和光谱上变化的散射和吸收效应。

GEE 平台不仅能提供全球完整时间序列卫星影像和各种数据产品,还拥有强大的计算能力,为研究人员开展长时间大范围的研究提供了机会^[30-31]。GEE 提供的云量筛选方法能筛选出高于或低于固定云量的遥感影像,这也导致最终获取的影像数量取决于每个河口影像的云量(辽河口 1 890 张,黄河口 1 810 张,长江口 960 张,杭州湾 815 张,珠江口 1 054 张,湄公河口 1 087 张)。同时,CFMask 算法生成的质量评估波段可以进一步将含云和云阴影像素进行掩膜处理。由于扫描线矫正器故障,2003 年 5 月 31 日后的 Landsat7 ETM+ 影像会出现稳定间隙^[32],一些学者通过插值的方法填补间隙像元值^[33],这里利用 GEE 使用焦点统计算法进行简单填充。

1.3 悬浮泥沙反演模型

由于缺乏统一的全球通用模型,采用多个模型可以降低单一模型反演结果的不确定性^[34-35]。

本研究中选择反演算法主要考虑以下原则:①全球应用模型与区域应用模型结合;②单波段模型与多波段模型结合;③不同开发原理的模型结合(经验模型、半分析模型和分析模型)。基于以上原则,共选择了3个模型应用于Landsat反射率产品进行悬浮泥沙反演:

(1) Nechad 模型

Nechad模型是Nechad开发的多传感器通用算法,是一种基于单波段的半分析算法^[36],已广泛应用于全球范围浑浊水域的悬浮泥沙反演。其表达形式如下:

$$SSC = \frac{A_{\rho}(\lambda)\rho(\lambda)}{\left[1 - \frac{\rho(\lambda)}{C_{\rho}}(\lambda)\right]} + B_{\rho}(\lambda), \quad (1)$$

$$\rho(\lambda) = \pi R_{rs}(\lambda), \quad (2)$$

其中, $A_{\rho}(\lambda)$ 、 $B_{\rho}(\lambda)$ 和 $C_{\rho}(\lambda)$ 是波长 λ 处的无量纲变量, R_{rs} 是波长 λ 处的遥感反射率。Novoa基于红波段下对参数进行了重新校准^[37],结果为 $A_{\rho}(\lambda) = 477$ 、 $B_{\rho}(\lambda) = 0$ 、 $C_{\rho}(\lambda) = 0.1686$ 。

(2) Sert 模型

Sert模型是Shen等^[17]基于长江口原位数据开发的单波段半分析模型,已有研究成功展示了该模型在浑浊水域的应用能力^[38]。其表达形式如下:

$$SSC = \frac{2 \times \alpha \times R_{rs}}{\beta \times (\alpha - R_{rs})}, \quad (3)$$

其中, α 和 β 是经验和波段相关系数, R_{rs} 是波长 λ 处的遥感反射率。Shen等^[39]基于Landsat系列卫星的红波段对参数进行重新校准,Sert模型系数如表1所示。

表1 Sert模型系数
Table 1 Sert model coefficient

传感器	波段	α	β
Landsat-5	3	0.077 1	11.015 8
Landsat-7	3	0.077 3	10.954 3
Landsat-8	4	0.076 3	11.530 6

(3) 曹博文模型

曹博文模型是Cao等^[19]基于珠江口原位数据开发的多波段经验模型,表达形式如下:

$$SSC = 4.6e^{4.227X}, \quad (4)$$

$$X = \frac{B3 + B4}{B3/B4}, \quad (5)$$

其中, $B3$ 和 $B4$ 分别为蓝波段和红波段的遥感反射率。

1.4 统计分析和精度评价

统计分析指标包括计算SSC数据的最小值、最大值、平均值和中位数,以便分析区域内SSC的数据特征。相关性分析使用皮尔森相关性分析方法的相关系数(r)来衡量两个变量之间关联的强度。平均绝对百分比误差(MAPE)和均方根误差(RMSE)用来评价SSC模型的反演效果,表达式如下:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y'_i} \right| \times 100\%, \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}, \quad (7)$$

其中, y'_i 是实测值, y_i 是模型反演值, n 是样本数量。MAPE越小表示模型效果越好,RMSE越小表明反演精度越高。

1.5 时序数据趋势检验

Sen's斜率估计法是一种非参数统计的趋势计算方法,可通过计算统计值 β 检测时间序列数据的变化趋势, β 大于0呈现上升趋势, β 小于0表明呈现下降趋势^[40]。Mann-Kendall(MK)趋势检验是一种已被广泛应用于气候和水文序列的非参数分析方法^[41],通过计算统计值 Z 反映时间序列的变化趋势以及变化程度。 Z 大于0呈现上升趋势, Z 小于0呈现下降趋势。并且当 $|Z|$ 大于或等于1.64、1.96和2.58时,表示趋势通过了置信度为90%、95%和99%的显著性检验。

2 结果

2.1 悬浮泥沙浓度的年际变化

图2展示了1990-2020年辽河口、黄河口、长江口、杭州湾、珠江口和湄公河口SSC的年际变化。结果表明,3个模型在反映各河口年际变化上具有较好的一致性。所有河口的SSC在总体上均呈现出明显的下降趋势,但6大河口的下降程度各有不同。下降程度最大的为长江口,在Sert、Nechad和曹博文模型下,1990-1993年的平均浓度从455.89、276.13和384.19 mg/L分别下降到了2018-2020年的180.41、110.97和222.72 mg/L,分别下降了275.49、165.16和222.72 mg/L(图2d);下降程度居其次的是黄河口,3个模型的SSC分别净下降了215.60、116.02和193.42 mg/L(图2e);下降幅度相对较低的是辽河口和湄公河口,分别下降了107.13、71.74和99.41 mg/L(图2d)以及45.53、40.55和62.35 mg/L(图2f)。表2显示了

各河口 31 年间 SSC 的 Sen's 和 MK 检验结果,进一步呈现了每个河口 SSC 下降趋势的显著性和下降速率。长江口下降趋势最为显著,Z 值和 β 值在

3 个模型下获得最小的次数最多,其次是珠江口;而湄公河口的下降显著性在所有河口中最小,Z 值和 β 在 3 个模型下获得最大的次数最多。

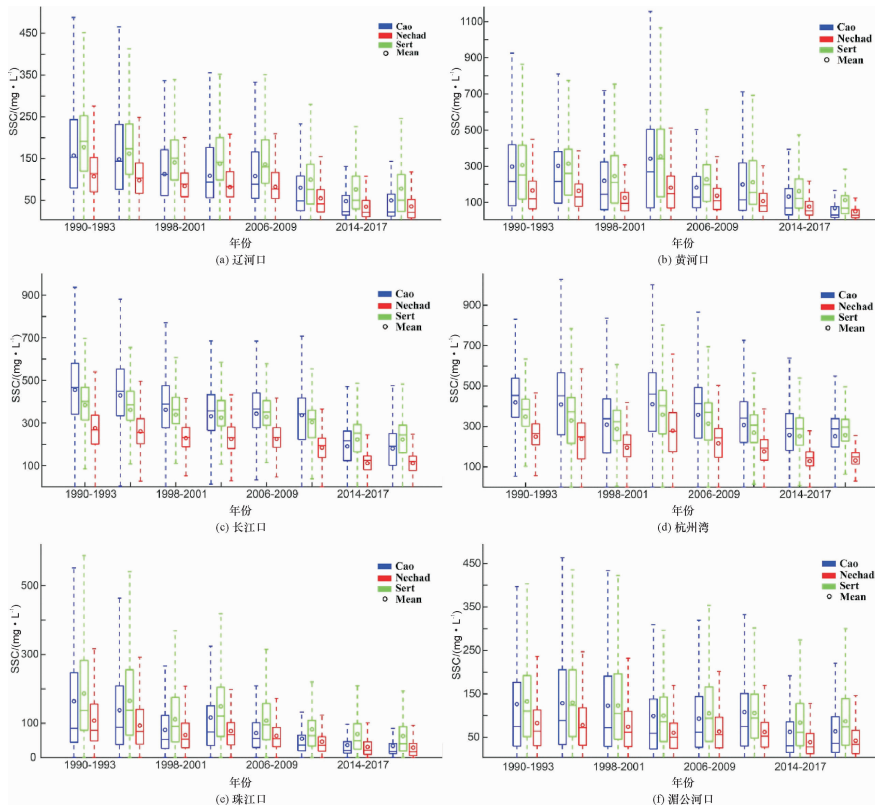


图 2 1990 - 2020 年河口 SSC 在 3 个模型下每四年平均变化箱线图

Fig. 2 Box chart of variation of SSC in estuary every four years from 1990 to 2020 from the three models

表 2 1990 - 2020 年 6 大河口在曹博文模型、Nechad 模型以及 Sert 模型下的趋势检验

Table 2 Trend testing of six estuaries under the Cao model, Nechad model, and Sert model from 1990 to 2020

河口	Cao 模型			Nechad 模型			Sert 模型		
	$\beta/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1})$	Z	P	$\beta/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1})$	Z	P	$\beta/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1})$	Z	P
辽河口	-5.29	-5.44	<0.01	-3.37	-5.30	<0.01	-4.84	-5.20	<0.01
黄河口	-9.39	-4.59	<0.01	-4.78	-4.59	<0.01	-8.23	-4.56	<0.01
长江口	-12.44	-5.95	<0.01	-7.57	-5.10	<0.01	-7.65	-5.68	<0.01
杭州湾	-8.46	-4.42	<0.01	-5.78	-4.41	<0.01	-5.10	-4.42	<0.01
珠江口	-4.77	-5.68	<0.01	-2.84	-5.50	<0.01	-4.60	-5.47	<0.01
湄公河口	-3.19	-3.91	<0.01	-1.88	-4.39	<0.01	-3.81	-2.37	<0.01

值得注意的是,除湄公河口以外,所有河口的 SSC 在 1998 年到 2001 期间都发生了显著下降。有研究表明厄尔尼诺 - 南方涛动会造成水域 SSC 的突变^[42-43],可以推测观察到的大部分河口 SSC 在 1998 - 2001 年显著下降可能与该现象有关。

2.2 悬浮泥沙浓度的季节变化

图 3 表明 3 个模型在反映各河口年内变化上也具有较好的一致性,6 大河口的 SSC 值呈现出明显的季节差异。湄公河口总体表现为夏秋季高于

冬春季,SSC 从夏季开始不断升高后在 9 月份达到最高值。珠江口在春夏季明显高于秋冬季,3 月和 5 月为最高的两个月份,2 月为最低的月份^[16,34,44]。杭州湾在冬春季(11 ~ 4 月)SSC 最高,夏秋季相对较低,从 2 月份开始不断降低并在 6 月份达到最低值。长江口在冬季 SSC 最高,春季 SSC 持续下降直到夏季开始上升。黄河口 SSC 在 11 ~ 3 月较高,4 ~ 10 月较低。辽河口的季节变化与黄河口类似,从 4 月份到 10 月份先减后增^[45]。

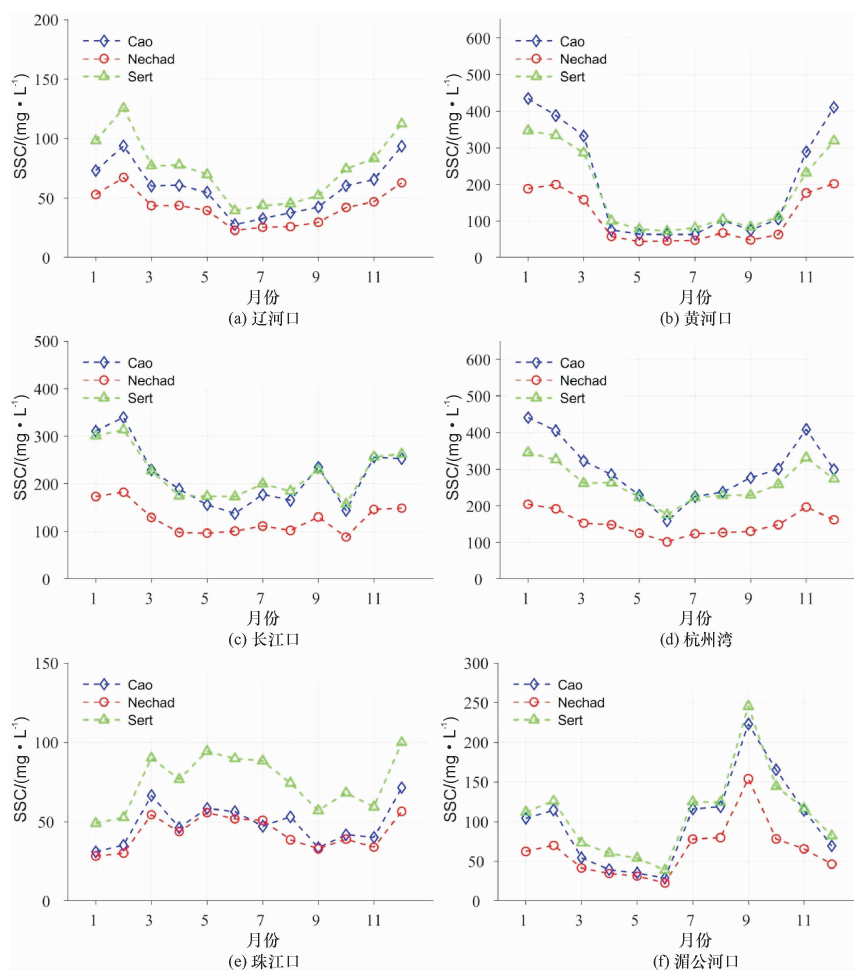


图3 2013-2020年6大河口的SSC在3个模型下的月度变化

Fig. 3 Monthly variation of suspended sediment concentration in six estuaries under three models from 2013 to 2020

河口的季节性变化会受到多种因素的共同影响,6大河口不同的季节性变化差异可能在不同的主导因素影响下产生的。例如湄公河常年受到西南季风的影响,在雨季(6~11月)产生大量降水从而导致SSC浓度上升^[46]。珠江同样受到西南季风和东南季风的影响,但SSC在季节变化上与湄公河口存在差异。同样,长江丰水期(5~11月)与SSC的高峰期并不对应。这表明降水并不是珠江口和长江口SSC季节性变化的主导因素,这些河口SSC的冬季高峰可能受到太平洋洋流和环流的影响^[47]。同时距离长江口相近的杭州湾有着相似季节变化特征,这是由于长江口是杭州湾区域悬浮泥沙的主要来源,杭州湾SSC变化主要受长江口来沙影响。黄河口主要受到黄河排沙量和风的影响^[48]。

2.3 典型河口的悬浮泥沙分布格局

图4是6个河口在2018-2020年的平均SSC分布图,每个河口在3个模型下都具有的一致

的空间分布特征(这里仅显示Sert模型下的空间分布结果)。图4表明在长江口、黄河口和杭州湾明显高于其他河口。图2同样表明在近30年间长江口、杭州湾以及黄河口泥沙浓度较高,大部分或全部时间河口平均SSC值都大于100 mg/L;而辽河口、珠江口浓度则相对较为较低,大部分时间河口平均SSC值小于100 mg/L。辽河口、黄河口以及湄公河口SSC均呈现出由河口内向河口外梯度递减的空间分布特征,而珠江口、长江口以及杭州湾的空间分布规律则相对较为复杂。

为了进一步分析珠江口和长江口长时间内特殊的空间分布变化,本研究在珠江口、长江口多个截面(图4中的ZL1、ZL2, CL1、CL2)进行研究。CL1和CL2分别为沿长江口北部航道和南部航道的截面,SSC在CL1上自西向东梯度递减,而在CL2上梯度递增,这表明长江口的北部航道和南部航道的SSC在横向变换上是相反的(图5)。珠江口SSC在横向截面ZL1上自西向东呈现为“高-

低-高-低-高”的空间变化规律,而在纵向截面 ZL2 上,珠江口 SSC 呈现出自北向南的递减规律(图 6)。除了空间分布规律以外,所有截面的 SSC

随时间推移不断地降低,与第 2.1 部分的年际变化规律保持一致。

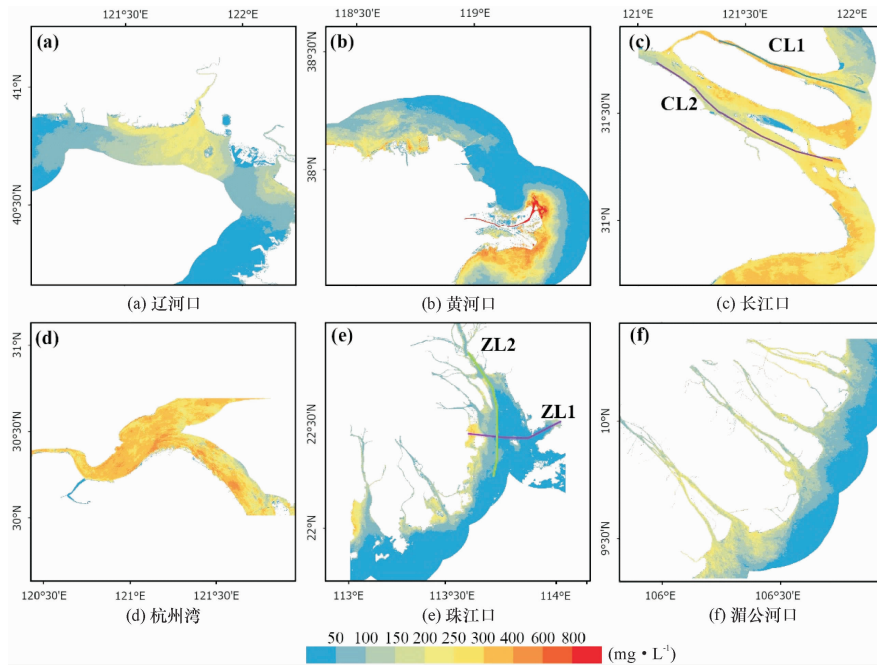


图 4 2018 - 2020 年 6 个河口在 Sert 模型下的平均悬浮泥沙平均分布图

Fig. 4 Average distribution map of average suspended sediment in six estuaries under Sert model from 2018 to 2020
注:ZL1 与 ZL2 分别代表珠江横向截面与纵向截面;CL1 与 CL2 分别代表长江北部航道和南部航道截面。

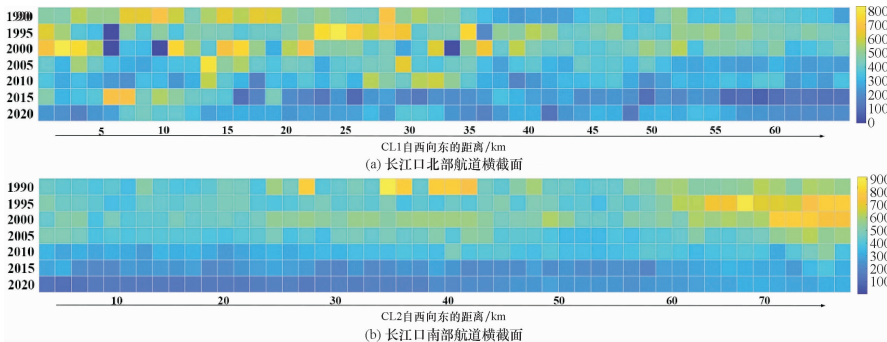


图 5 1990 - 2020 年长江口每 5 年沿截面 SSC 的矩阵变化图

Fig. 5 Matrix variation of SSC along the cross-section of the Yangtze River Estuary every five years from 1990 to 2020

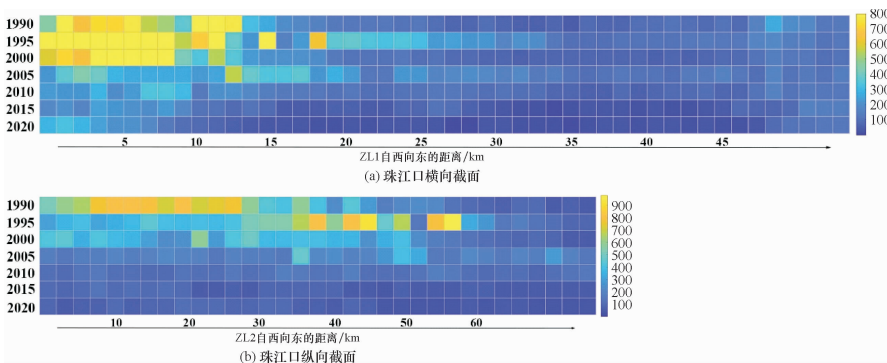


图 6 1990 - 2020 年珠江口每 5 年沿截面 SSC 的矩阵变化图

Fig. 6 Matrix variation of SSC along the cross section of the Pearl River Estuary every five years from 1990 to 2020

2.4 模型验证

为了匹配实测数据和 Landsat 卫星影像数据,在距离采样时间最近的影像上提取以实测数据点为中心的 3×3 像素窗口,取其中位数值用于匹配实测数据。本研究最终获取 8 对实测数据和卫星测量数据用于精度验证(图 7)。

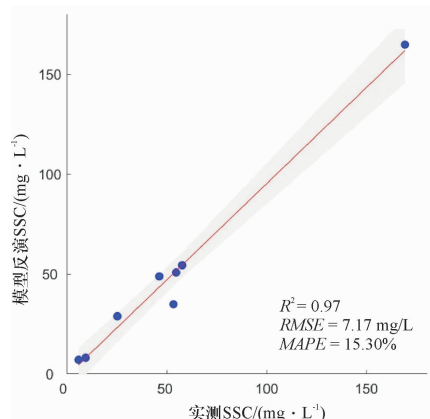


图7 曹博文模型精度验证图

Fig. 7 Cao model accuracy verification chart

图7中散点图显示了模型精度评估的结果。在给定的测试数据集中表现出较高的精度水平($R^2 = 0.97$, $RMSE = 7.17$ mg/L, $MAPE = 15.30\%$)。值得注意的是,珠江口整体SSC较低,模型反演值与真实值偏差通常较小。但是对于浑浊甚至极度浑浊($SSC > 100$ mg/L)的水域,大部分模型通常会低估实际SSC值,这是由于遥感反射率在反演高度浑浊水域时发生的“饱和”效应,同时这种现象在单波段模型中更为严重^[49-50]。由于缺乏实测数据,仅在一个区域进行了验证,该结果可能不具有广泛的代表性。

3 讨论

3.1 年际变化归因分析

自然过程和人类活动是影响河流泥沙通量的共同因素。例如极端的降雨天气会造成河流径流量和泥沙通量激增。然而,不断加剧的人类活动已经成为影响大多数河流入海泥沙变化的主导因素。最近的研究表明,1980年以来世界上50%以上的较大河流在泥沙通量上发生了显著变化,其中大部分发源于亚洲的河流在40年内不断下降^[13]。水坝建设可能是造成亚洲河流输沙量显著下降的最直接原因。例如湄公河流域自1990年

以来大量规划建设水坝,截至2015年已有超过130座大型水坝建成或处于建设和规划阶段。水坝几乎拦截了上游输送的所有沉积物,导致湄公河三角洲中的沉积物在坝前到坝后期间减少了74.1%^[6]。1950年以来长江流域建造的大坝超过50000座^[51],其中,三峡大坝是世界上最大的水利工程。2003年三峡大坝蓄水后导致长江输沙量在5年内减少了近95%^[52]。图8和图9是分别是珠江、长江、黄河和辽河流域的中大型水坝近20年的累计蓄水量和湄公河流域水坝累计发电装机容量变化情况,除辽河以外,所有流域的大坝蓄水量均呈上升趋势。不断增加的大坝极大地拦截了这些河流上游输送的悬浮泥沙,直接导致在河口和海岸带近岸水域观察到SSC显著下降的现象。

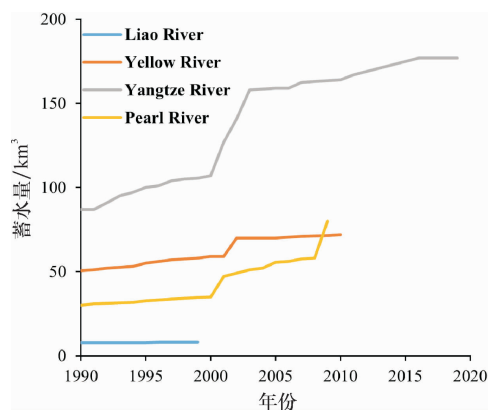


图8 1990-2020年辽河、黄河、长江及珠江流域中大型水坝累积蓄水量变化

Fig. 8 Cumulative storage capacity change of medium and large dams in Liaohe River, Yellow River, Yangtze River and the Pearl River basins from 1990 to 2020

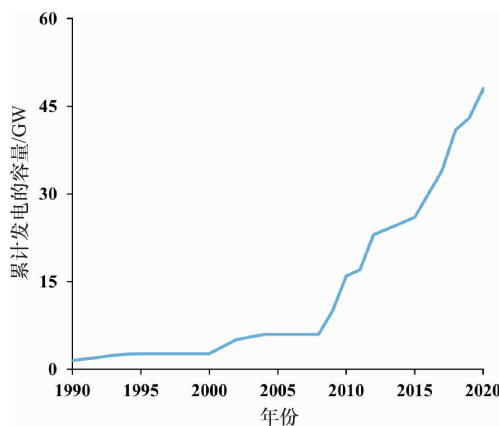


图9 1990-2020年湄公河流域水坝累计发电装机容量

Fig. 9 Accumulated installed power generation capacity of dams in the Mekong River Basin from 1990 to 2020

除大坝建设以外,人类用水以及水土保持措施也可能是造成悬浮泥沙通量减少的原因。例如黄河曾经是世界上最大的产沙河流,在黄土高原地区存在严重的水土流失现象,而水土保持措施通过增加植被覆盖度有效阻止了泥沙进入黄河。同时,大量的工农业用水对黄河水资源的消耗降低了水动力,从而减少了水流的输沙能力^[7,53]。辽河在近 30 年内水坝数量稳定,其输沙量的下降则可能主要由人类用水以及水土保持措施等原因导致。

3.2 造成的影响

随着人类活动不断加剧,20 世纪中叶开始世

界河流普遍发生了入海泥沙下降的现象,随之带来的影响逐渐成为研究人员和国际社会关注的热点问题。河口来沙稳定可以抑制河岸侵蚀(图 10)、地面沉降以及河床下切问题^[54-55]。海岸带承载着世界最密集的人口,全球海岸带范围内仅在河口三角洲地区的居住人口超过 5 亿,并且三角洲通常属于国家发展经济的重心。河流上游泥沙的不断减少会加速河口三角洲地区的侵蚀,从而导致三角洲严重的土地流失^[8]。目前,湄公河、密西西比河、黄河、长江和珠江的三角洲地区都出现了由于入海泥沙收支失衡导致土地流失现象,导致该区域的生态安全和经济发展受到威胁。

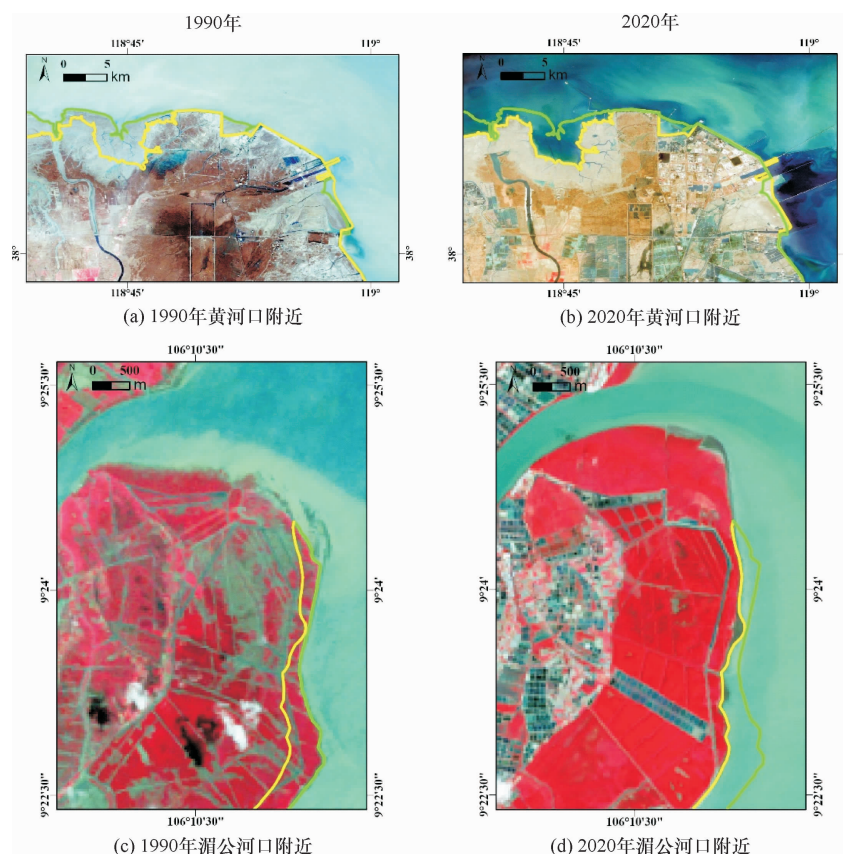


图 10 1990 到 2020 年黄河口和湄公河口侵蚀现象图

Fig. 10 Erosion in the Yellow River and Mekong River estuaries from 1990 to 2020

注:图中绿线和黄线分别代表和 2020 年的岸线。

入海泥沙也是河流的营养来源之一,其含有的有机和无机物质可以为水生动植物提供营养,在河流生态系统中扮演着重要的角色。河流将沉积物输送到沿海海域,成为世界沿海海域营养物的重要贡献者。沉积物通量的降低可能会导致河流以及海岸带水生生物生态系统的破坏和物种多样性的减少。总之,河流泥沙通量的降低对海岸

带生态系统和人类活动产生了广泛影响。因此,需要加强监测和评估工作,及时掌握泥沙通量的变化和影响,以便调整和优化管理措施。

3.3 研究的局限性

自使用遥感手段监测水体悬浮泥沙以来,由于不同水体的成分和光学特征的复杂性^[21],大部分的研究都是针对单个区域的特定 SSC 范围建立

反演模型。为了开发出适用于广泛水域的悬浮泥沙反演模型,一些学者在不同浑浊度的水域中使用不同的波段进行建模,从而避免使用单一波段的“饱和”效应^[37,56-57]。多波段算法为了针对不同浑浊度的水域切换反演波段,需要大量的实测数据确定切换波段的界限或者开发水体的分类算法。然而,水体实测数据的获取是困难的,并且水体实测数据集的不同以及研究目的的差异可能会限制水体分类算法广泛的适用性^[58]。

由于缺乏广泛的实测数据和全球统一适用的遥感反演算法,基于大空间尺度下的悬浮泥沙长时序性研究比较少见。在这一背景下,本研究使用区域性模型对整个西太平洋海岸带部分水域进行反演,可能并不能准确定量表达出这些区域的SSC值。然而,本研究主要关注的是SSC趋势变化方向,而不是从定量的角度分析SSC趋势变化的幅度。从图1和图3可以看出,在相同时间下各区域的SSC值在3个模型下均不相同,但是却保留了相同的年际变化趋势和季节变化趋势。同时,通过对曹博文模型进行精度验证,较高的R方值也证明了模型有能力解释悬浮泥沙的变化趋

势。因此,选用多个区域性模型反演的大尺度下悬浮泥沙的动态变化结果是有价值的。

4 结 论

本研究基于GEE平台,使用3种典型的反演模型对西太平洋海岸带部分水域进行了长达31年(1990-2020)的SSC动态监测。3个模型表现良好,在各种结果上具有较好的一致性。SSC在西太平洋海岸带上的6大河口均呈现出显著的下降趋势。在3个模型的综合结果下,长江口的下降趋势最为显著,而湄公河口的下降趋势的显著性在所有河口中相对较小。6大河口在不同因素的主导下,悬浮泥沙浓度具有不同的季节性差异。大部分河口的SSC表现为由河口内向河口外部递减的趋势,但珠江口和长江口具有其特殊性。SSC在6大河口甚至整个西太平洋海岸带的下降,最直接的原因可能是由于水坝建设等人类活动造成的。本研究从遥感的角度评估了西太平洋海岸带SSC的动态变化,对于太平洋西海岸带生态系统的稳定和保护政策实施具有重要借鉴意义。

参考文献:

- [1] Shi Z, Xu J, Huang X P, et al. Relationship between nutrients and plankton biomass in the turbidity maximum zone of the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 57: 72-84.
- [2] Webster T, Lemckert C. Sediment resuspension within a microtidal estuary/embayment and the implication to channel management[J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, 36: 753-759.
- [3] Darby S E, Hackney C R, Leyland J, et al. Fluvial sediment supply to a mega-delta reduced by shifting tropical-cyclone activity[J]. *Nature*, 2016, 539(7628): 276-279.
- [4] Dai Z J, Fagherazzi S, Mei X F, et al. Decline in suspended sediment concentration delivered by the Changjiang (Yangtze) River into the East China Sea between 1956 and 2013[J]. *Geomorphology*, 2016, 268: 123-132.
- [5] Syvitski J P M, Kettner A J, Overeem I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10): 681-686.
- [6] Van Binh D, Kantoush S, Sumi T. Changes to long-term discharge and sediment loads in the Vietnamese Mekong Delta caused by upstream dams[J]. *Geomorphology*, 2020, 353: 107011.
- [7] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [8] Edmonds D A, Toby S C, Siverd C G, et al. Land loss due to human-altered sediment budget in the Mississippi River Delta[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 644-651.
- [9] Crossland C J, Baird D, Ducrotoy J P, et al. The coastal zone—A domain of global interactions[M]//Crossland C J, Kremer H H, Lindeboom H J, et al. *Coastal fluxes in the Anthropocene*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 1-37.
- [10] 毋亭. 近70年中国大陆岸线变化的时空特征分析[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.
- [11] Fagherazzi S, Edmonds D A, Nardin W, et al. Dynamics of river mouth deposits[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 642-672.
- [12] Li X, Liu J P, Saito Y, et al. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams[J]. *Earth-Science Reviews*,

- 2017, 175: 1-17.
- [13] Dethier E N, Renshaw C E, Magilligan F J. Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans[J]. *Science*, 2022, 376(6600): 1447-1452.
- [14] Dethier E N, Renshaw C E, Magilligan F J. Toward improved accuracy of remote sensing approaches for quantifying suspended sediment: Implications for suspended - sediment monitoring[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(7): e2019JF005033.
- [15] Kritikos H, Yorinks L, Smith H. Suspended solids analysis using ERTS-a data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1974, 3(1): 69-78.
- [16] Zhan W K, Wu J, Wei X, 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.
- [17] Shen F, Verhoef W, Zhou Y X, et al. Satellite estimates of wide-range suspended sediment concentrations in Changjiang (Yangtze) estuary using MERIS data[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33: 1420-1429.
- [18] 温小乐, 徐涵秋. 基于多源同步数据的闽江下游悬浮物定量遥感[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2441-2447.
- [19] Cao B W, Qiu J L, Zhang W X, et al. Retrieval of suspended sediment concentrations in the Pearl River Estuary using multi-source satellite imagery[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3896.
- [20] Luo W, Shen F, He Q, et al. Changes in suspended sediments in the Yangtze River Estuary from 1984 to 2020: Responses to basin and estuarine engineering constructions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150381.
- [21] Sathyendranath S. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters[R]. Dartmouth: International Ocean-Colour Coordinating Group, 2000.
- [22] 张婷婷, 曲伟, 范昊明, 等. 辽河干流表层泥沙浓度的遥感反演与分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2015, 46(5): 596-602.
- [23] Yin S H, Gao G Y, Huang A Q, et al. Streamflow and sediment load changes from China's large rivers: Quantitative contributions of climate and human activity factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 876: 162758.
- [24] Shen F, Suhyb Salama M, Zhou Y X, et al. Remote-sensing reflectance characteristics of highly turbid estuarine waters - a comparative experiment of the Yangtze River and the Yellow River[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(10): 2639-2654.
- [25] 王飞, 王珊珊, 王新, 等. 杭州湾悬浮泥沙遥感反演与变化动力分析[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 48(1): 112-116, 135.
- [26] Chen S L, Zhang G A, Yang S L. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(4): 498-506.
- [27] 刘王兵, 于之锋, 周斌, 等. 杭州湾 HJ CCD 影像悬浮泥沙遥感定量反演[J]. *遥感学报*, 2013, 17(4): 905-918.
- [28] Wang C Y, Li W J, Chen S S, et al. The spatial and temporal variation of total suspended solid concentration in Pearl River Estuary during 1987 - 2015 based on remote sensing[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1125-1138.
- [29] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean: A global synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [30] Kumar L, Mutanga O. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1509.
- [31] 曹博文, 杨现坤, 邱俊良. 基于 Google Earth Engine 的遥感大数据分析研究进展与应用[J]. *地理空间信息*, 2021, 19(4): 13-19.
- [32] 钱乐祥, 李仕峰, 崔海山, 等. 基于单一影像局部回归模型修复的 Landsat 7 ETM SLC-OFF 图像质量评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(5): 21-24.
- [33] Chen J, Zhu X L, Vogelmann J E, et al. A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM + SLC-off images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(4): 1053-1064.
- [34] Yunus A P, Masago Y, Boulange J, et al. Natural and anthropogenic forces on suspended sediment dynamics in Asian estuaries[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155569.
- [35] Xu H Q, Xu G Z, Wen X L, et al. Lockdown effects on total suspended solids concentrations in the Lower Min River (China) during COVID-19 using time-series remote sensing images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 98: 102301.

- [36] 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.
- [37] Novoa S, Doxaran D, Ody A, et al. Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 61.
- [38] Tang R G, Shen F, Pan Y Q, et al. Multi-source high-resolution satellite products in Yangtze Estuary: Cross-comparisons and impacts of signal-to-noise ratio and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6426-6441.
- [39] 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.
- [40] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [41] Kendall M G. Rank correlation methods[M]. 4th ed. London: Griffin, 1975.
- [42] Liu X, Ding D, Li G X, et al. Responses of the sea surface temperature and suspended matter concentration to ENSO events in the Bohai Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2023, 22(3): 697-708.
- [43] Xiao F A, Wang D X, Zeng L L, et al. Contrasting changes in the sea surface temperature and upper ocean heat content in the South China Sea during recent decades[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 1597-1612.
- [44] 付东洋, 栾虹, 刘大召, 等. 珠江口冬春季悬浮泥沙浓度遥感反演模式分析[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(4): 600-604.
- [45] Wang X, Wen Z D, Liu G, et al. Remote estimates of total suspended matter in China's main estuaries using Landsat images and a weight random forest model[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 183: 94-110.
- [46] Heege T, Kiselev V, Wettle M, et al. Operational multi-sensor monitoring of turbidity for the entire Mekong Delta[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(8): 2910-2926.
- [47] Bian C W, Jiang W S, Quan Q, et al. Distributions of suspended sediment concentration in the Yellow Sea and the East China Sea based on field surveys during the four seasons of 2011[J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 121/122: 24-35.
- [48] Zhang M W, Dong Q, Cui T W, 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.
- [49] Petus C, Chust G, Gohin F, et al. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(5): 379-392.
- [50] Moore G F, Aiken J, Lavender S J. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in Case II waters; Application to MERIS[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(9): 1713-1733.
- [51] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1/2): 14-20.
- [52] Tena A, Batalla R J. The sediment budget of a large river regulated by dams (the lower River Ebro, NE Spain)[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(5): 966-980.
- [53] Liu Y, Song H M, An Z S, et al. Recent anthropogenic curtailing of Yellow River runoff and sediment load is unprecedented over the past 500 y[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(31): 18251-18257.
- [54] Manh N V, Dung N V, Hung N N, et al. Large-scale suspended sediment transport and sediment deposition in the Mekong Delta[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(8): 3033-3053.
- [55] Anthony E J, Brunier G, Besset M, et al. Linking rapid erosion of the Mekong River Delta to human activities[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 14745.
- [56] Yu X L, Lee Z P, Shen F, et al. An empirical algorithm to seamlessly retrieve the concentration of suspended particulate matter from water color across ocean to turbid river mouths[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 235: 111491.
- [57] Balasubramanian S V, Pahlevan N, Smith B, et al. Robust algorithm for estimating total suspended solids (TSS) in inland and nearshore coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 246: 111768.
- [58] Jiang D L, Matsushita B, Pahlevan N, et al. Remotely estimating total suspended solids concentration in clear to extremely turbid waters using a novel semi-analytical method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112386.