

2013~2018 年珠江河口伶仃洋水域 悬浮泥沙季节性变化分析*

贾淇文¹, 章桂芳^{1,2,3}, 唐世林⁴, 张浩然¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 广州 510275
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
4. 中国科学院南海海洋研究所 / 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301

摘要: 珠江河口是珠三角经济建设发展的重要区域, 悬浮泥沙浓度的运移规律和影响因素是河口研究的核心问题, 遥感反演可以实现大面积水域的动态、连续、同步观测, 快速获取悬浮泥沙的时空分布特征。本研究采用 2013~2018 年 Landsat 8 OLI 数据, 对实测水质参数及光谱进行相关性分析, 选取最佳波段组合后用拟合方程建立悬浮泥沙浓度的遥感模型, 对珠江河口伶仃洋水域悬浮泥沙进行定量反演并计算 4 季悬浮泥沙动态变化。结果显示伶仃洋水域的悬浮泥沙浓度有着明显的时间和空间的分布规律: 时间上体现为夏季悬浮泥沙浓度较高, 冬季悬浮泥沙浓度较低; 空间上体现为悬浮泥沙的走向呈东北-西南的条带状, 由西南沿岸向外海逐渐降低, 形成“西高东低, 北高南低”的分布。悬浮泥沙浓度的时空分布也受到诸多因素的影响: 珠江冲淡水的扩展以西向为主是悬浮泥沙浓度高值区多出现于西南部的重要原因; 水下地形和风向转变对珠江河口悬浮泥沙的时空分布具有显著影响; 排水、排沙和降雨量的季节性变化直接影响了悬浮泥沙的季节性变化; 人类活动对珠江河口的悬浮泥沙变化也具有较大影响。

关键词: 珠江河口; Landsat 8 OLI; 悬浮泥沙; 时空分布; 影响因素

中图分类号: X87 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)05-0059-13

Seasonal variation of suspended sediments in the Lingdingyang waters of the Pearl River Estuary from 2013 to 2018

JIA Qiwen¹, ZHANG Guifang^{1,2,3}, TANG Shilin⁴, ZHANG Haoran¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Guangzhou 510275, China
3. Guangdong Laboratory of Southern Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
4. State Key Laboratory of Tropical Oceanography / South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: The Pearl River Estuary is an indispensable region for the economic and social development of the Pearl River delta. The migration law and influencing factors of suspended sediment concentration are the core issues of the estuary research. Remote sensing inversion can realize the dynamic, continuous,

* 收稿日期: 2020-01-23

录用日期: 2020-03-04

网络首发日期: 2021-05-24

基金项目: 广州市科技计划项目(201707010209); 广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515010733); 中山大学高校基本科研业务费青年教师团队(中青年骨干教师科研能力提升)项目(2021qntd23); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0302); 国家自然科学基金(41402297)

作者简介: 贾淇文(1995年生), 女; 研究方向: 环境遥感; E-mail: jiaqw@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 章桂芳(1981年生), 女; 研究方向: 地表过程RS和GIS综合分析; E-mail: zhgfang@mail.sysu.edu.cn

and synchronous observation of a large area of water and quickly obtain the spatiotemporal distribution of suspended sediment. In this study, the Landsat 8 OLI data from 2013 to 2018 was used to analyze the correlation between the spectra and the parameters of water quality. By selecting the best band combination and using fitted equations, a remote sensing model of suspended sediment concentration is established to quantitatively invert the suspended sediment in the Lingdingyang waters of the Pearl River Estuary and calculate the dynamic changes of suspended sediment in seasons. The results show that the concentration of suspended sediment in the waters of the Lingdingyang area has clear spatiotemporal patterns, showing temporally higher concentration in summer and lower concentration in winter, and spatially strips of northeast-southwest of decreasing from the coast to the sea, i. e., high in west and north, low in east and south. The temporal and spatial distribution of suspended sediment concentration is affected by several factors; the westward expansion of the freshwater in the Pearl River is the main factor causing the high value of suspended sediment concentration in the southwest; the underwater terrain and wind direction, have a significant impact on the distribution of suspended sediment concentration; seasonal changes in drainage, sediment discharge, and rainfall directly affect the seasonal changes of suspended sediment concentration; and human activities also have a greater impact on the changes of suspended sediment in the Pearl River Estuary.

Key words: the Pearl River Estuary; Landsat 8 OLI; suspended sediment; spatial and temporal distribution; influence factors

河口是海岸带的组成部分,它是入海径流和海洋的枢纽,既是流域物质的归宿,又是海洋的开始,是联系大陆与海洋之间物质和能量交换的重要场所^[1]。在河口系统中,悬浮泥沙是一个十分重要的水质指标^[2],从河口流入的泥沙对全球生物与化学物质的循环以及碳氮等生命物质的循环非常重要,是河口海岸自然调整中的关键问题;其次,悬浮泥沙也是河口地区港口与航道工程十分关心的问题,入海口大量的泥沙淤积对海岸防护带的稳定和海洋航运的通畅都有不同程度的危害;同时,细颗粒泥沙又是各种营养盐和污染物的重要载体,由于污染物与泥沙有吸附效应,泥沙输移对污染物的迁移和循环也起重要作用;再者,入海泥沙通量直接对河口海岸地区滩地围垦、渔业生产和水资源等产生影响。因此,悬浮泥沙的分布格局对水质、地貌、生态环境方面的研究以及海岸工程、港口建设等具有重要意义,也是分析河口海岸冲淤变化、估算河流入海物质通量、研究海洋沉积地貌演变的重要参数^[3-11]。传统的河口悬浮泥沙监测主要是依赖实地水样处理和悬浮浓度实测,虽然获取的悬浮泥沙浓度值相对精确,但近岸河口水域的悬浮泥沙往往具有广泛的时空变异尺度,传统的采样方法只能获取离散的时空分布数据^[12],遥感方法能够克服常规方法的不足,实现大面积水域的动态、连续、同步观测,快速地检测水域悬浮泥沙的时空分布特征,具有周期

短、空间分辨率高和覆盖范围广的优势^[13-16]。悬浮泥沙浓度、颗粒大小及其组成是影响离水反射率的主要因素^[17],建立卫星传感器离水辐射率和水体悬浮泥沙浓度之间的数学关系,可以实现对悬浮泥沙浓度的反演与时空动态监测^[5, 7, 11, 18-19]。随着卫星技术的发展,高时间分辨率,高空间分辨率以及高光谱分辨率遥感技术为河口水质动态监测提供了更为有效的技术支持^[20-22]。

珠江河口是一个极为复杂的大尺度河口系统^[23],多年平均输沙量超过一亿万吨^[24],其中超过四成左右的泥沙输送到口门外,造成珠江各个河口口门逐年淤积,严重影响了河口的泄洪能力^[25],研究珠江河口悬浮泥沙浓度和运移规律是研究珠江河口形态和演变规律的核心问题,也对珠江河口的海岸工程、港口建设、渔业生产等有着重要的意义。可靠的数值模型对该区域的悬浮泥沙研究有着重要的作用,针对珠江河口悬浮泥沙的遥感反演已有一些研究实例,如根据实地水体亮度值或反射率计算其与悬浮泥沙浓度的拟合关系^[17, 26-31]。其中较多研究采用遥感影像,如NOAA/AVHRR^[32-33]、FY-1D^[34]、TM^[35]、SeaWiFS^[36]、MERIS^[37]、MODIS^[38-39]、Landsat^[17, 40]等提出了不同的定量模型,对悬浮泥沙浓度进行遥感反演。但是,珠江口是我国地形最为复杂的典型河口之一,各河口湾波浪、潮流的作用强度各不相同,口门来水来沙差异大,导致珠江河口悬浮泥沙浓度变化迅速,区域性差异大,具有明

显的季节变化^[19, 25, 38]。已有珠江口悬浮泥沙的遥感研究侧重于单幅影像悬沙反演模型的建立, 基于反演结果的悬沙时空变化分析研究则较为欠缺, 对影响珠江河口悬浮泥沙浓度时空分布的自然因素的系统分析也较为薄弱。本次研究选取珠江河口的最大水域伶仃洋, 基于实测光谱数据和实测泥沙浓度对悬浮泥沙浓度进行模拟, 将结果用于2013~2018年的Landsat 8 OLI影像的悬浮泥沙定量反演, 以此为基础分析伶仃洋河口悬浮泥沙浓度的时空分布特征, 并对影响悬浮泥沙浓度的自然因素和人类活动影响进行相关讨论, 初步获得影响悬浮泥沙浓度时空分布的主要因素及其驱动机制。

1 材料与方法

1.1 研究区域

珠江流域是一个复合的流域, 由西江、北江和东江组成, 珠江流域面积约45万 km²^[34]。珠江河口位于东经113°00′~114°00′和北纬21°30′~22°45′之间, 与南海北部相连, 是三角洲网河和残留河口湾并存的亚热带河口。珠江携带大量的水、泥沙和污染物流经河网区, 经多通道从虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门及崖门八个口门汇入珠江口, 输往南海, 形成“三江汇合, 八口分流”的水系特征。本次研究区域主要以伶仃洋区域为主(图1), 珠江口伶仃洋是珠江口东四口门的入海口, 华南最大的河口湾, 北窄南宽, 形成喇叭状, 长期保持“三滩两槽”的稳定格局, 位处粤港澳大湾区的核心地带, 建有广州港、深圳港等重要港口, 对华南区域的对外交流和贸易具有重要作用。

1.2 数据

1) 光谱数据及悬浮泥沙浓度: 数据来源为

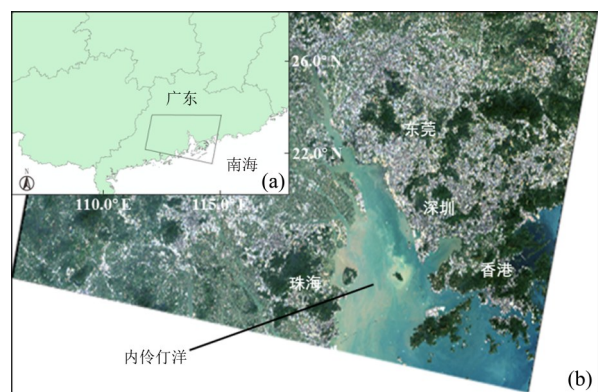


图1 伶仃洋研究区域示意图

Fig. 1 The study area of the Lingdingyang waters

2013年伶仃洋地区的水面光谱实测, 光谱测试仪器为usb2000, 波谱范围200~1100 nm, 波谱分辨率为0.1~10 nm, 在采集光谱的同时, 采集水表样品后进行实验室悬浮泥沙浓度测试, 作为定量反演珠江口悬浮泥沙含量的基础数据, 实测点位共13个。

2) 遥感数据: 数据类型为Landsat 8 OLI, 下载自美国地质调查局(<https://www.usgs.gov/>), 原始下载数据共包括2013年1月到2018年12月之间的175景OLI遥感影像, 根据质量控制原则选取31景质量较好的OLI影像。

3) 月排沙量和径流量数据: 数据来源为中华人民共和国水利部(<http://www.mwr.gov.cn/>)的中国河流泥沙公报^[41], 根据高要站(西江)、石角站(北江)和博罗站(东江)的3个水文站的月径流量和排沙量数据(<http://www.mwr.gov.cn/>), 共有17份数据, 用于计算2013~2018年间的季度径流量和季度排沙量。

4) 面平均降雨数据: 数据来源为中华人民共和国水利部(<http://www.mwr.gov.cn/>)的中国水情年报^[42], 由于数据限制无法获取2015~2017年珠江流域面积降雨量, 以全国面积降雨量代替, 因此共获取了2007~2014年珠江流域的面积降雨量和2015~2017年间全国面积降雨量。

5) 风向和风速数据: 珠海唐家镇气象站2017年的风向和风速数据(<http://rp5.ru/>), 数据频率为3 h一个, 共有数据2885个。

6) 水下地形数据: 珠江河口水下DEM数据, 数据来源为Google Earth, 空间分辨率为30 m。

1.3 处理过程

数据处理平台主要为ENVI 5.3、ArcGis 10.2和ERDAS 2016, 数据处理主要包括数据预处理流程、悬浮泥沙浓度反演模型确定和悬浮泥沙浓度反演3个过程, 然后基于悬浮泥沙浓度进行时空分布特征和影响因素分析。

数据预处理流程主要包括: ① 质量控制: 选取出珠江河口上部含少量薄云或珠江河口水体出露基本完整的影像。对部分薄云影像使用ERDAS软件做水体上方薄云的刮云操作, 消除薄云对水体信息提取的影响。② 辐射定标和大气校正: 利用ENVI(5.3)的辐射定标工具Landsat Calibration完成影像的辐射定标, 将传感器记录的数字像元值(DN)转换为绝对辐射亮度并利用ENVI提供的FLAASH大气模块对Landsat 8影像进行大气校正, 消除大气和光照等因素影响, 获得水体表面反射

率。③ 水域掩膜：利用水体在近红外波段几乎无反射，在陆地却有高反射的特征，使用单波段水域提取的方法，通过调节阈值来分离水体和陆地，对水体进行掩膜，仅保留研究区域的水体部分。

悬浮泥沙浓度反演模型主要是根据实地采集的水面光谱数据和悬浮泥沙浓度测试数据进行建模。根据已有研究，悬浮泥沙在约 400 nm 的蓝波段具有吸收特征，555 nm 左右的绿波段和 670 nm 左右的红波段具有反射特征，因此 Landsat 8 OLI 数据的 B3、B4 波段是探测悬浮泥沙浓度的有利波段，也是研究中常用波段 [17, 43-44]。本研究首先将实测光谱数据等效转换到 Landsat 8 OLI 传感器相应的各个波段，将转换后的各波段及波段组合和 B3、B4 组合波段与悬浮物浓度做相关分析，其中 B1~B4 的相关系数分别为 0.710、0.729、0.697、0.750，B4/B3 的相关系数为 0.566，(B3+B4)/(B3/B4) 的相关系数为 0.761，最终选择相关性最高的 (B3+B4)/(B3/B4) 作为自变量，分别尝试线性、二次、三次、指数和对数等函数进行拟合，各种函数拟合结果的相关性较为接近，线性拟合结果如图 2 所示。以前的研究多是对单时相影像做了反演研究 [17, 38, 40]，但多时相的影像反演更适合用简单稳定的线性模型，可以减小差异性。因此，选择线性模型 $y=145.304x+3.941$ 作为最终的拟合方程，对选取的所有时相的 Landsat 8 OLI 影像进行悬浮泥沙浓度定量反演。

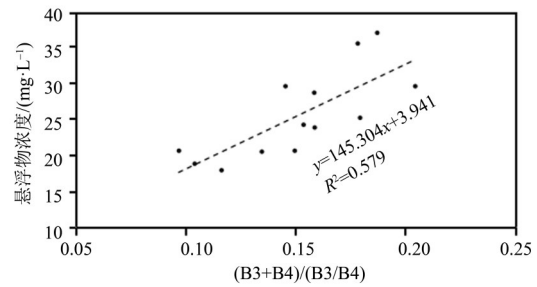


图 2 珠江河口悬浮泥沙浓度线性反演模型
Fig. 2 Linear inversion model of suspended sediment concentration in the Pearl River Estuary

根据图像获取的时相，将其分为春夏秋冬 4 个季节，计算每个季节伶仃洋水域的悬浮泥沙浓度均值，分析悬浮泥沙浓度的时空分布特征，结合冲淡水、水下地形、风、径流量、排沙量、降雨量和人类活动等分析悬浮泥沙浓度的影响因素和驱动机制。

2 结果与讨论

2.1 悬浮泥沙浓度季节性时空分布

使用获取的反演模型对经过质量控制后的 31 景 OLI 数据进行悬浮泥沙浓度反演，统计 2013~2018 年间的每个季节的悬浮泥沙浓度均值，得出这期间伶仃洋悬浮泥沙浓度均值图 (图 3) 和高浓度分布图 (图 4)，依次分析伶仃洋悬浮泥沙浓度的时空分布特征。

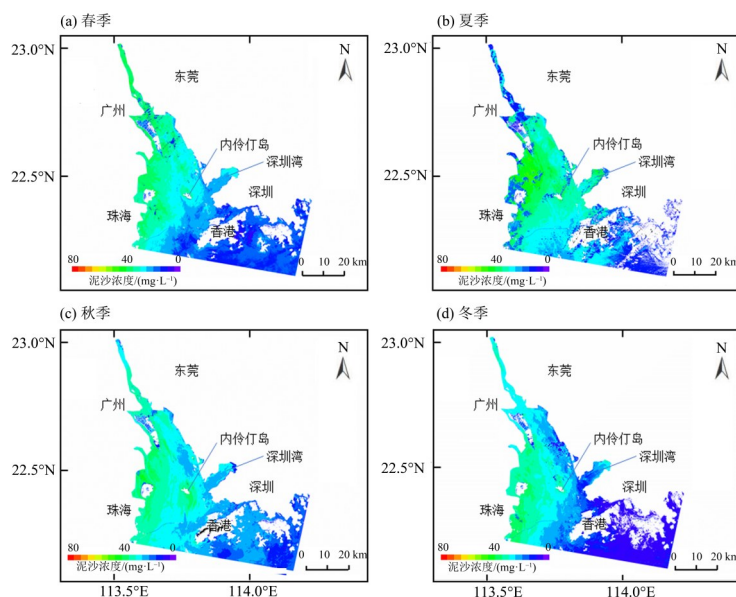


图 3 2013~2018 年伶仃洋水域悬浮泥沙浓度季节性均值时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of seasonal mean value of suspended sediment concentration in the Lingdingyang waters from 2013 to 2018

(1) 从悬浮泥沙浓度分布时间上来看, 体现为夏季悬浮泥沙浓度较高, 冬季悬浮泥沙浓度较低(图3和图4)。以2016年的悬浮泥沙浓度统计为例(表1), 夏季悬浮泥沙的中值和均值均为4个季节的最高值, 均超过30 mg/L, 冬季的均值和中值是4个季节中的最小值, 秋季是夏季高浓度向秋季低浓度过渡的季节, 研究区悬浮泥沙浓度的均值和中值的数值大小均在夏、冬数值的区间范围内, 春季是低值的冬季向高值的夏季过渡的季节, 均值和中值也基本在冬、夏两个季节的数值区间内, 秋季的泥沙浓度略高于春季的泥沙浓度。

(2) 从悬浮泥沙浓度分布空间上来看(图3), 伶仃洋悬浮泥沙的走向呈东北-西南的条带状, 由西南沿岸向外海逐渐降低, 形成“西高东低, 北高南低”的分布, 这与前人的研究结果一致^[38]。

深圳湾悬浮泥沙浓度高于其西部水域, 内伶仃岛周围出现悬浮泥沙浓度递减区, 另外内伶仃岛两侧出现两条低浓度条状区域, 形成西北-东南方向“高低值相间”的分布现象, 悬浮泥沙浓度高值出现于西南沿岸、内伶仃岛和深圳湾区域(图4)。以2016年为例, 夏季的高浓度区域所占面积最大, 30 mg/L以上的像元数量有50.53%, 远高于其他季节的占比(春季27.06%, 秋季36.43%, 冬季20.11%), 见表1。低值出现于研究区域的东南区, 也就是香港周围的水域, 浓度在0~20 mg/L之间, 说明该区域含沙量低, 水质清澈。另外, 图3和图4显示, 春、秋、冬3个季节的悬浮泥沙浓度递减条带状边界清晰, 过渡平稳, 夏季的悬浮泥沙浓度递减条带边界较紊乱, 其原因将在下一部分进行讨论。

表1 2016年伶仃洋水域悬浮泥沙浓度统计

Table 1 Statistics of suspended sediment concentration in the Lingdingyang waters in 2016

浓度范围/(mg·L ⁻¹)	春				夏			
	像元数	像元占比/%	均值 ¹⁾	中值 ²⁾	像元数	像元占比/%	均值 ¹⁾	中值 ²⁾
0~10	72 861	2.58	6.70	6.48	51 102	2.29	5.57	5.63
10~20	1 049 129	37.08	17.29	17.36	73 727	3.31	15.35	15.32
20~30	941 698	33.28	24.50	24.12	978 171	43.86	26.84	26.86
30~40	614 023	21.70	34.83	34.70	775 293	34.76	33.72	33.09
40~50	149 620	5.29	43.52	42.94	296 440	13.29	44.73	44.63
50~60	2 074	0.07	51.10	50.60	55 406	2.48	51.93	51.25
60~70	0	0	0	0	55	0.00	60.64	60.33
0~70			24.64	22.06			31.37	30.31
浓度范围/(mg·L ⁻¹)	秋				冬			
	像元数	像元占比/%	均值 ¹⁾	中值 ²⁾	像元数	像元占比/%	均值 ¹⁾	中值 ²⁾
0~10	150 484	5.36	7.32	3.54	721 958	25.33	6.53	6.18
10~20	499 097	17.77	15.92	16.10	748 249	26.25	15.91	16.65
20~30	1 135 924	40.44	25.54	25.82	806 903	28.31	24.03	23.52
30~40	968 468	34.48	33.96	33.82	572 487	20.09	33.81	33.75
40~50	54 775	1.95	41.97	41.64	699	0.02	41.37	40.70
50~60	18	0.00	52.99	52.14	7	0.00	51.39	51.42
60~70	1	0.00	67.86	67.86	0	0	0	0
0~70			26.08	27.19			19.43	19.46

1) 和2) 分别为泥沙浓度的均值和中值, 单位为mg/L。

2.2 影响悬浮泥沙浓度时空分布因素分析

悬浮泥沙浓度的时空分布特征与很多因素相关, 珠江冲淡水、水下地形、风、径流量和排沙量、降雨、风浪的掀沙以及人类活动等都是重要

影响因素^[19, 33, 38, 43]。

2.2.1 珠江冲淡水 珠江冲淡水是由珠江在河口与邻近陆架区与南海高盐度水混合后产生的^[44-46], 珠江冲淡水扩散路径和范围有明显的季节性变化,

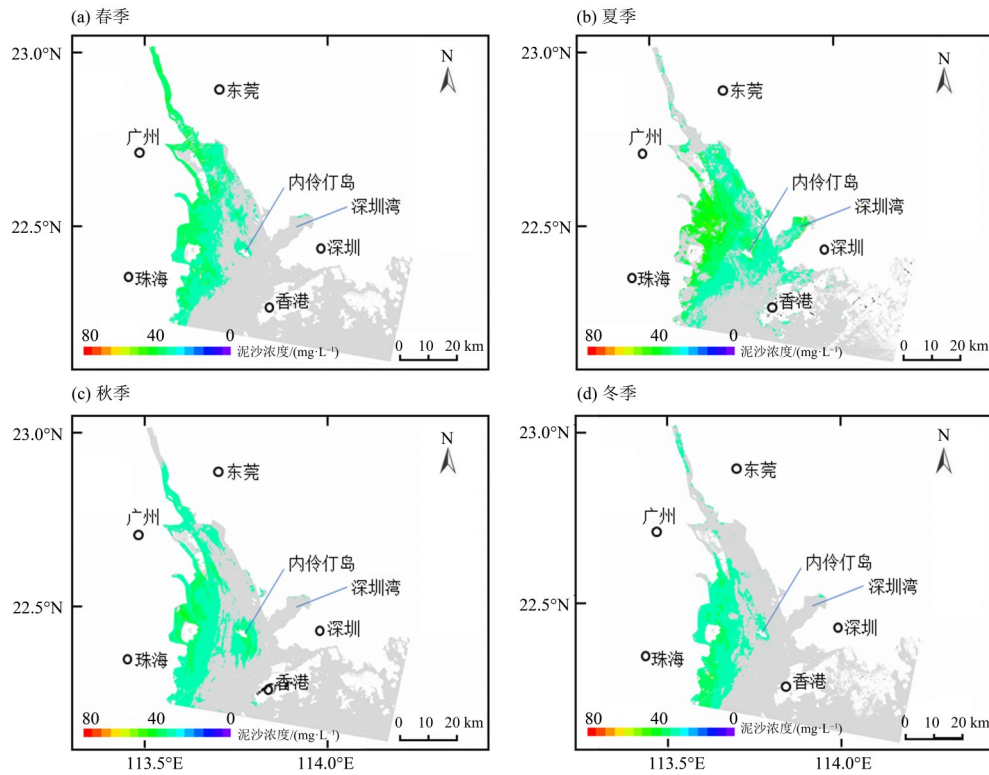


图 4 2013~2018 年伶仃洋悬浮泥沙季节性高浓度均值空间分布 ($\geq 30 \text{ mg/L}$)

Fig. 4 Spatial distribution of mean high-concentration mean value of suspended sediment in the Lingdingyang waters from 2013 to 2018 ($\geq 30 \text{ mg/L}$)

表层冲淡水在夏季以“似对称扩展型”同时向东和西两个方向扩展，其余季节以西向扩展为主^[47-50]，冲淡水向东扩散时，有助于其向外海扩展。由于珠江冲淡水以强西向扩散为主，大量携沙水向西扩散，导致了珠江河口悬浮泥沙浓度的高值出现在河口西侧。夏季珠江表层冲淡水扩展方向与其他季节的差异性较好地解释了夏季悬浮泥沙浓度递减条带的不平稳和边界紊乱。

2.2.2 水下地形 关于水深与悬浮泥沙浓度的相关性表明：总体上悬浮泥沙浓度随水深的增加而降低^[51]。伶仃洋水下高程图显示：伶仃洋水深自北向南逐渐加深，内伶仃岛两侧呈楔形嵌入（图 5），从而呈现三滩两槽的分布格局^[52-53]，因此，西滩海域淤积向东南方向扩展，中部浅滩北端轻微蚀退南部淤积，东侧浅滩冲淤相对平稳^[54]。珠江河口悬浮泥沙的高浓度分布在内伶仃洋两侧同样形成了两条明显的西北-东南方向的低值条带区（图 4）。东侧浅滩是由于珠江冲淡水只有夏季才会向东扩散，其余季节向西扩散，所以只有夏季悬浮泥沙浓度较高，因此珠江冲淡水是影响东侧浅滩的悬浮泥沙浓度的主要因素之一。除东侧浅滩外，另外的两滩两槽区域水下地形与悬浮泥沙分

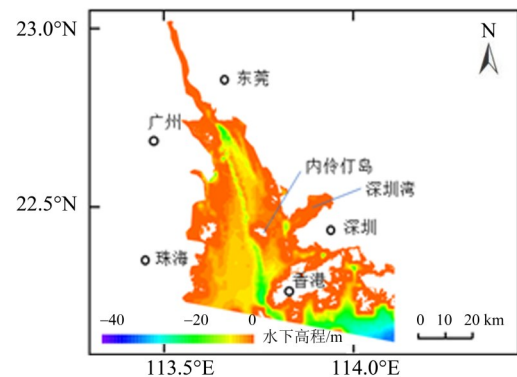


图 5 伶仃洋水下高程图（数据来自 Google Earth）

Fig. 5 The Lingdingyang estuary underwater elevation map (data from Google Earth)

布具有极为相似的变化趋势，等深线的迁移方向大致体现悬浮泥沙浓度的梯度变化，有着“水深浓度低，水浅浓度高”的趋势，说明水下地形是影响悬浮泥沙浓度空间分布的重要自然因素。

2.2.3 风 风对悬浮泥沙的影响主要体现在：风向的转变对伶仃洋悬浮泥沙浓度空间分布有着重要的影响，风速的大小引起不同强烈程度的再悬浮，对悬浮泥沙浓度空间变化也有着重要影响。

从研究区域 2017 年风向风速统计结果（图 6）可

知,该地区春季为相对较弱的东南风(SE),夏季为相对较弱的偏南风(S),秋季和冬季为相对较强的东北风(NE)。在冬季至次年夏季东北季风向西南季风过渡时,夏季的偏南风引起沉积物再悬浮,会将水中悬浮物由西南向东部推进,造成珠江河口东侧浓度增高和内伶仃岛左侧的条带凹槽没有出现低值现象。过渡之后风向流场基本一致吹向西南沿岸,引起沉积物再悬浮增加了西南沿岸的悬浮物浓度。

台风能在短时间内影响或改变河口环流^[55],

引起悬浮泥沙浓度剧增,有研究显示台风影响下悬浮泥沙浓度剧烈增大数倍至数十倍^[56]。本文统计了2013~2017年对珠江河口有影响的台风共31起。由于台风常伴有强风、暴雨,如果水体上空的厚云严重影响了遥感影像的获取质量,往往在质量控制中会将其筛选掉。另外,虽然台风期间的强风速使再悬浮的作用剧增,悬浮泥沙浓度增大,但是其作用时间短,Landsat重访周期限制了对该现象的补充能力,所以并未在悬浮泥沙季节性浓度图中捕捉到台风的强烈影响。

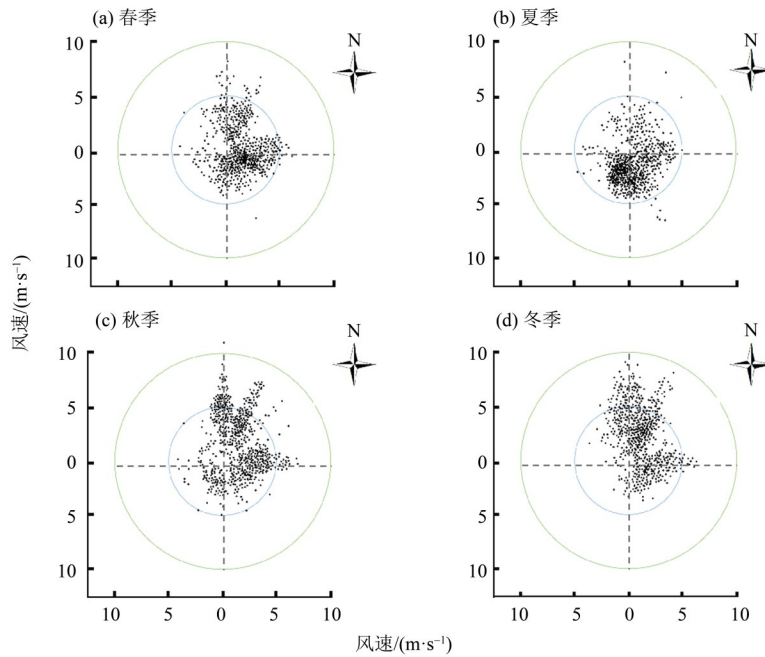


图6 2017年伶仃洋风力和风速数据统计图

Fig. 6 Statistical graph of wind and wind speed data in 2017

2.2.4 径流量 影响珠江口悬浮泥沙浓度的时间变化控制因素之一为径流量,随着径流量的增加,大部分海域悬浮泥沙浓度会有不同程度的增加,径流减少则会使得悬浮泥沙浓度降低^[33]。统计珠江流域3个代表性水文站(高要站(西江)、石角站(北江)和博罗站(东江))的径流量、得出2013~2018年3个重点水文站的四季径流量统计表(图7)。从径流量统计数值来看(图7),2013~2018年夏季径流量占比最大,均占比为39.62%。冬季径流量占比最小,均占比为12.58%。春、秋两季径流量相差不大,均在夏季和冬季占比之间,均占比分别为25.70%和22.10%。径流量的季节性变化和悬浮泥沙的季节性变化表现出较为一致的变化,说明径流量是影响伶仃洋水体悬浮泥沙季节性变化的显著因素。

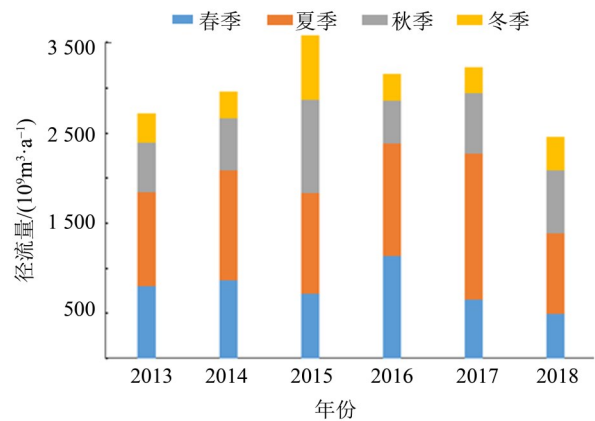


图7 2013~2018年伶仃洋季度径流量统计
各季节均值占比:春季25.7%;夏季39.62%;
秋季22.10%;冬季12.58%。

Fig. 7 Runoff statistics by quarter during 2013-2018

2.2.5 排沙量 排沙量的差异显著影响含沙量的分布,排沙量的增大会增加高浓度含沙水体的扩散面积和浓度^[38]。统计珠江流域3个代表性水文站(高要站(西江)、石角站(北江)和博罗站(东江))的排沙量,从得出的统计数值来看(图8),2013~2018年夏季排沙量占比最大,均占比为56.59%。冬季排沙量占比最小,均占比为3.15%。春、秋两季排沙量依然在夏季和冬季占比之间,均占比分别是24.74%和15.53%,春、秋季节排沙量的差异存在的原因可能是由于夏季径流量太大,水动力作用强,挟沙能力也很强,将大量上游物质携带到下游导致秋季可携带的上游物质大量减少,从而秋季和春季径流量相差不大的情况下排沙量相差较大。夏季排沙量增大,高浓度范围也随之增大,冬季排沙量最小高浓度范围也是4个季节中的最小(图8)。排沙量的季节性变化规律和悬浮泥沙的季节性变化规律有着相似性,排沙量的变化规律同高浓度扩散范围也有着密切关系,表明排沙量也是影响伶仃洋悬浮泥沙浓度时空变化的重要因素。

2.2.6 降雨量 降雨量也是影响悬浮泥沙的重要因素之一^[19]。统计2007~2014年珠江流域3个代表性水文站(高要站(西江)、石角站(北江)和博

罗站(东江))的面平均降雨量和2015~2017年全国面平均降雨量,从获得的统计数据来看(图9),无论从珠江流域面平均降雨量还是全国面平均降雨量分析,夏季的降雨量都是4个季节中的最大值,接近全年降雨量的一半。冬季的降雨量最少,占比不到全年的1/10。春、秋两季相差不大,其平均降雨量占比在夏、冬两季占比之间,均值在全年降雨量的1/5~1/4之间。降雨量的季节性变化和与悬浮泥沙浓度的季节性变化同步性,说明降雨量的季节性变化也是影响伶仃洋悬浮泥沙浓度季节性变化的重要因素。

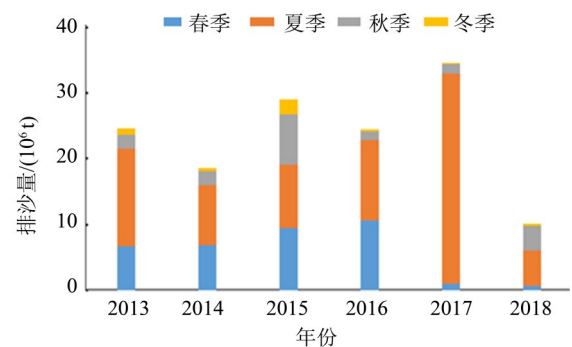


图8 2013~2018年季度排沙量统计

Fig. 8 Statistics of sediment discharge by quarter during 2013-2018

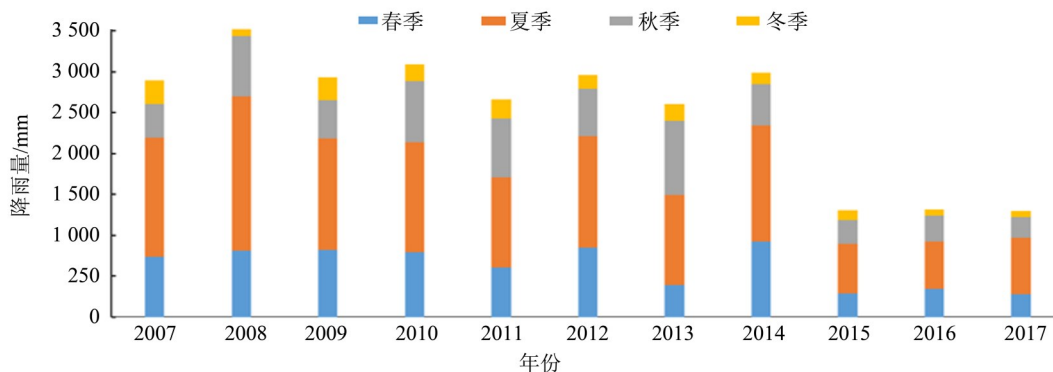


图9 2007~2017年季度面平均降雨量统计(珠江流域:2007~2014;全国:2015~2017)

Fig. 9 Statistics of average rainfall in the fourth quarter during 2007-2017(the Pearl River basin: 2007-2014; China: 2015-2017)

2.2.7 人类活动 人类活动对珠江口悬浮物的输送和浓度变化也会造成很大的影响^[56-57],主要行为有:①森林砍伐造成水土流失,大量泥沙从上游冲到下游,增加珠江口水体的悬浮物浓度;②大坝建设会快速减少水体的沉积物负荷量,加速三角洲海岸线的衰退,河口水体的悬浮物也会相应减少;③近50年来珠江口围填海的区域面积不断增大^[58],大量的围填减少了三角洲的水域面积,改变了径流的扩散方向,影响了河口悬浮泥

沙浓度的分布;④采砂活动:上游河道的采砂活动造成八大口门河沙分配发生变化,对下游河口悬浮泥沙浓度的分布也会造成重要影响;自2002年以来伶仃洋海域共批准了96个海砂开采项目^[56],大量的海砂开采项目对水下地形地貌产生了剧烈的影响,从而影响悬浮物浓度的分布情况。

2013~2017年港珠澳大桥香港口岸围填面积不断增大,口岸与香港岛之间桥梁的建成都对该地区附近水域中悬浮泥沙浓度分布有着一定影响

(图10)。大桥香港口岸施工期间的遥感影像图显示, 围填海施工期间会增加施工区域附近局部水体的悬浮泥沙浓度(图10(a,c)); 施工结束后的遥感影像图也表明, 口岸周围悬浮泥沙浓度较高,

口岸边至远岸浓度逐渐降低(图10(b,d))。因此, 桥梁两侧水域的悬浮泥沙浓度明显增高, 说明人类围填海对水体悬浮泥沙浓度分布有非常明显的影响。

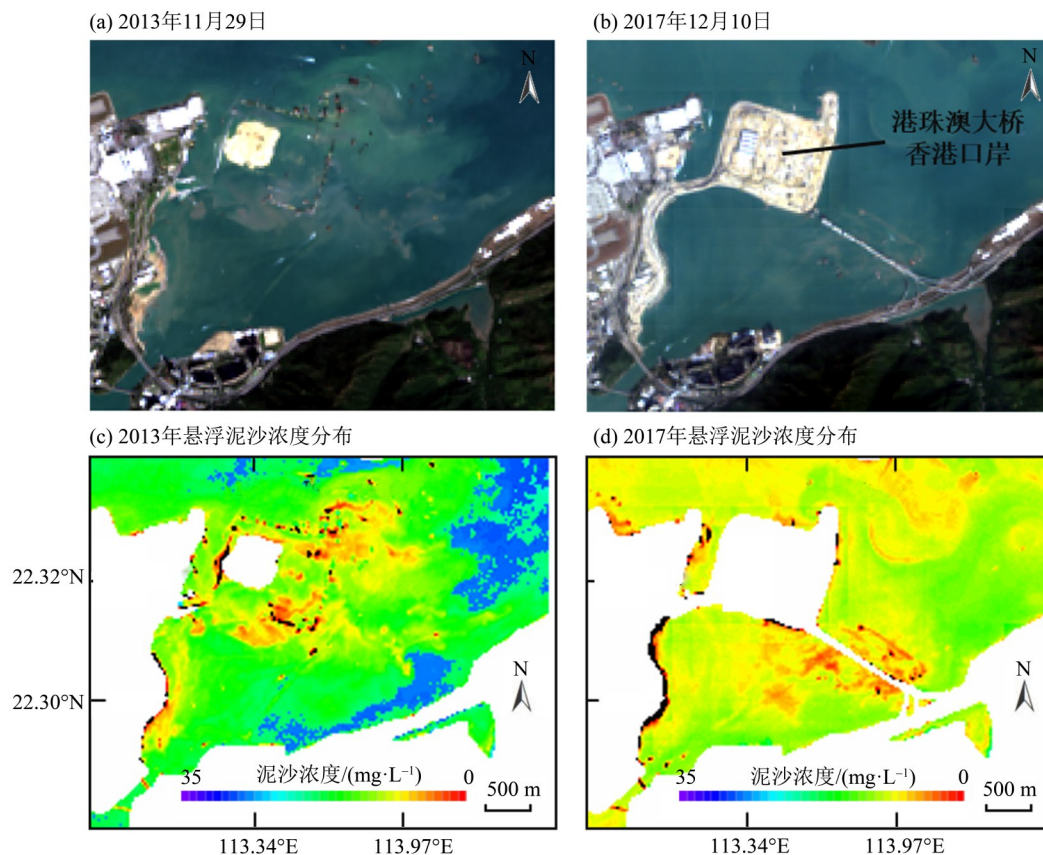


图10 港珠澳大桥香港口岸围海造田前后遥感影像及悬浮泥沙分布

(a)和(b)为2013年和2017年围海造田前后卫星影像图; (c)和(d)为2013年和2017年围海造田前后悬浮泥沙浓度分布图。

Fig. 10 The remote sensing images and spatial distribution of suspended sediment concentration before and after the sea reclamation of Hong Kong port of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

3 结论

本文基于Landsat 8 OLI数据和实测数据线性反演模型, 对2013~2018年珠江河口伶仃洋水域悬浮泥沙浓度进行了季节性均值统计, 分析了其时空分布特征及其影响因素, 得出如下主要结论:

1) 珠江河口悬浮泥沙浓度的季节性分布具有显著的时空特征: 时间上表现为夏季悬浮泥沙浓度较高, 冬季节悬浮泥沙浓度较低, 秋冬季节悬浮泥沙浓度相差不大介于夏、冬之间; 空间上表现为悬浮泥沙浓度呈东北-西南的条带状分布, 西南沿岸向外海逐渐降低, 内伶仃岛两侧出现两条低浓度条状区域, 形成西北-东南方向“高低值相间”的分布现象。

2) 伶仃洋水域季节性悬浮泥沙浓度分布特征显示: ① 珠江冲淡水西向为主要研究区西侧浓度较高的因素; ② 除东侧浅滩外, 水下地形的“三滩两槽”的分布格局与悬浮泥沙的“两滩两槽”的分布格局趋势极为相似, 显示地形因素对悬浮泥沙的显著控制; ③ 东侧浅滩的夏季高值主要由东北季风向西南季风转换导致; 其余季节风向流场基本一致吹向西南沿岸, 引起沉积物再悬浮增加了西南沿岸的悬浮物浓度; 台风对悬浮物浓度短时间剧烈影响未能被本次研究所用的遥感影像捕捉; ④ 排水量、排沙量和降雨量的时间分布特征与悬浮泥沙浓度一致, 都体现为夏季最大、冬季最小, 春秋季节过渡增减; ⑤ 人类活动也是影响悬浮泥沙浓度分布不可忽视的原因之一。

参考文献:

- [1] 陈吉余,陈沈良. 河口海岸环境变异和资源可持续利用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 1-7.
CHEN J Y, CHEN S L. Estuarine and coastal environment changes and resource sustainable utilization [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(2): 1-7.
- [2] SYVITSKI J P M, VOROSMARTY C J, KETTNER A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean [J]. Science, 2005, 308(5720): 376-380.
- [3] 黄岁樑, WAI O W H. 水环境污染物迁移转化研究与泥沙运动 [J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 205-211.
HUANG S L, WAI O W H. Pollutant transport-transformation in aquatic environment and sediment motion [J]. Advances in Water Science, 1998, 9(3): 205-211.
- [4] 刘大召,付东洋,沈春燕,等. 二类水体悬浮泥沙遥感研究进展 [J]. 海洋环境科学, 2010, 29(4): 611-616.
LIU D Z, FU D Y, SHEN C Y, et al. Study advances on remote sensing of suspended sediment in estuaries and coastal case water [J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(4): 611-616.
- [5] MAO Z, CHEN J, PAN D, et al. A regional remote sensing algorithm for total suspended matter in the East China Sea [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124:819-831.
- [6] 潘德炉,龚芳. 我国卫星海洋遥感应用技术的最新进展 [J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2011, 10(1): 1-10.
PAN D L, GONG F. Progress in application technology of satellite ocean remote sensing in China [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2011, 10(1): 1-10.
- [7] 胡卫国,孟令奎,张东映,等. 资源一号 02C 星图像水体信息提取方法 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 43-47.
HU W G, MENG L K, ZHANG D Y, et al. Methods of water extraction from ZY-1 02C satellite imagery [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(2): 43-47.
- [8] DOXARAN D, LAMQUIN N, PARK Y, et al. Retrieval of the sea water reflectance for suspended solids monitoring in the East China Sea using MODIS, MERIS and GO-CI satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 146: 36-48.
- [9] 姜广甲,段国钦,黄志雄,等. 珠江口海域主导光学因子的遥感分类及其变化特征 [J]. 海洋学报, 2016, 38(9): 64-75.
JIANG G J, DUAN G Q, HUANG Z X, et al. Remote sensing classification of the dominant optically active components and its variations in the Pearl River Estuary [J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(9): 64-75.
- [10] 田清. 近 60 年来气候变化和人类活动对黄河、长江、珠江水沙通量影响的研究 [D]. 上海:华东师范大学, 2016.
TIAN Q. Impacts of climate change and human activity on the water and sediment flux of the Yellow, Yangtze and Pearl River basins over the past 60 years [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [11] 田建林,邓儒儒,秦雁,等. 基于遥感反演的珠江三角洲水体污染源目视解译实证研究 [J]. 经济地理, 2018, 38(8): 172-178.
TIAN J L, DENG R R, QIN Y, et al. Visual interpretation and spatial distribution of water pollution source based on remote sensing inversion in Pearl River Delta [J]. Economic Geography, 2018, 38(8): 172-178.
- [12] WANG J J, LU X X, LIEW S C, et al. Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: An example from the Yangtze River, China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(8): 1082-1092.
- [13] 潘德炉,毛天明,李淑菁,等. 卫星遥感监测我国沿海海水色环境的研究 [J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 240-246.
PAN D L, MAN T M, LI S J, et al. Study on ocean color environment of China Coast by satellite remote sensing [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(3): 240-246.
- [14] DEKKER A G, VOS R J, PETERS S W M. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes [J]. Science of the Total Environment, 2001, 268(1): 197-214.
- [15] 丁晓英,许祥向. 应用遥感技术分析韩江河口悬沙的动态特征 [J]. 国土资源遥感, 2007(3): 71-73.
DING X Y, XU X X. A remote sensing analysis of characteristics of suspended sediment movement in Hanjiang estuary [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007(3): 71-73.
- [16] 程乾,刘波,李婷,等. 基于高分 1 号杭州湾河口悬浮泥沙浓度遥感反演模型构建及应用 [J]. 海洋环境科学, 2015, 34(4): 558-563.
CHENG Q, LIU B, LI T, et al. Research on remote

- sensing retrieval of suspended sediment concentration in Hangzhou Bay by GF-1 satellite [J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(4): 558-563.
- [17] 黄彦歌. 基于实测光谱与 Landsat 8 OLI 影像的珠江河口伶仃洋水质参数遥感反演 [D]. 广州: 广州大学, 2017.
- HUANG Y G. Remote sensing inversion of water quality parameters in internal Lingding of Pearl River Estuary based on field spectral data and Landsat 8_OLI image [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- [18] DOGLIOTTI A I, RUDDICK K G, NECHAD B, et al. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156:157-168.
- [19] 李文凯. 河口海域悬浮泥沙时空动态遥感研究—以珠江口为例 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2017.
- LI W K. Remote sensing of suspended sediments concentration spatial-temporary dynamics in estuary water — A case in the Pearl River Estuary [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2017.
- [20] ZHANG M W, TANG J W, DONG Q, et al. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2):392-403.
- [21] FENG L, HU C M, CHEN X L, et al. Human induced turbidity changes in Poyang Lake between 2000 and 2010: Observations from MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117. DOI: 10.1029/2011JC007864.
- [22] HE M X, HU L B, HU C M. Harbour dredging and fish mortality in an aquaculture zone: assessment of changes in suspended particulate matter using multi-sensor remote-sensing data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(11/12): 4383-4398.
- [23] 吴超羽, 包芸, 任杰, 等. 珠江三角洲及河网形成演变的数值模拟和地貌动力学分析: 距今 6000~2500a [J]. *海洋学报*, 2006, 28(4):64-80.
- WU C Y, BAN Y, REN J, et al. A numerical simulation and morphodynamic analysis on the evolution of the Zhujiang River Delta in China: 6000 ~ 2500 a BP [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 64-80.
- [24] 朱小鸽, 何执兼, 邓明. 最近 25 年珠江口水环境的遥感监测 [J]. *遥感学报*, 2001, 5(5): 396-400.
- ZHU X G, HE Z J, DENG M. Monitoring of water color for Pear River estuary over twenty years [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(5): 396-400.
- [25] 王现方, 谢宇峰, 黄胜伟. 珠江河口水沙治理应用研究 [M]. 武汉: 长江出版社, 2006.
- [26] 李京. 水域悬浮固体含量的遥感定量研究 [J]. *环境科学学报*, 1986, 6(2): 166-173.
- LI J. A study on determination of concentration of suspended solids in water by remote sensing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1986, 6(2):166-173.
- [27] 舒守, 陈健, 邓仁达. 遥感反射光谱测试与应用研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [28] 黎夏. 悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用 [J]. *环境遥感*, 1992, 7(2):106-114.
- LI X. A united equation for remote sensing quantitative analysis of suspended sediment and its application at Zhujiang River Estuary [J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1992, 7(2):106-114.
- [29] 王艳姣. 基于悬浮泥沙影响的水深遥感方法研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- WANG Y J. Application of remote sensing technology to map water depth by weakening the influence of suspended sediment [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2006.
- [30] 禹定峰, 邢前国, 陈楚群, 等. 利用导数光谱估算珠江河口水体悬浮泥沙浓度 [J]. *生态科学*, 2010, 29(6):563-567.
- YU D F, XING Q G, CHEN C Q, et al. Using derivative spectrum to estimate suspended sediment concentration of estuarine waters [J]. *Ecological Science*, 2010, 29(6):563-567.
- [31] 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): 600-35.
- FU D Y, LUAN H, LIU D Z, et al. Analysis of suspended sediment concentration remote sensing models in winter and spring in the Pearl River estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(4):600-635.
- [32] 邓明, 黄伟, 李炎. 珠江河口悬浮泥沙遥感数据集 [J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(4):341-348.
- DENG M, HUANG W, LI Y. Data collection of remote sensing derived suspended sediment concentration in Zhujiang River Estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4):341-348.
- [33] 陈晓玲, 袁中智, 李毓湘, 等. 基于遥感反演结果的悬浮泥沙时空动态规律研究 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(8): 677-681.
- CHEN X L, YUAN Z Z, LI Y X, et al. Spatial and temporal dynamics of suspended sediment concentration in the Pearl River Estuary based on remote sensing [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan Uni-*

- versity, 2005, 30(8): 677-681.
- [34] 陈晓翔, 丁晓英. 用 FY-1D 数据估算珠江口海域悬浮泥沙含量 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(增刊): 194-196.
CHEN X X, DING X Y. Study on Estimating the suspended sediment concentration in the Pearl River Estuary using FY-1D data [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(Suppl): 194-196.
- [35] 刘小平, 邓儒儒, 彭晓鹏. 悬浮泥沙定量遥感综合模式及其在珠江口的应用 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(3): 109-113.
LIU X P, DENG R R, PENG X J. An integrated model for quantitative remote sensing measurement of suspended sediment and its application in the Pearl River Estuary [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005, 44(3): 109-113.
- [36] 杨锦坤, 陈楚群. 珠江口二类水体水色三要素的优化反演 [J]. 海洋通报, 2007, 26(5): 15-20.
YANG J K, CHEN C Q. An optimal algorithm for the retrieval of chlorophyll, suspended sediments and gelbstoff of case II waters in the Pearl River Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2009, 11(1): 13-23.
- [37] 刘汾汾, 陈楚群, 唐世林, 等. 基于现场光谱数据的珠江口 MERIS 悬浮泥沙分段算法 [J]. 热带海洋学报, 2009, 28(1): 9-14.
LIU F F, CHEN C Q, TANG S L, et al. A piecewise algorithm for retrieval of suspended sediment concentration based on in situ spectral data by MERIS in Zhujiang River Estuary [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(1): 9-14.
- [38] 朱樊, 欧素英, 张铄涵, 等. 基于 MODIS 影像的珠江口表层悬浮泥沙浓度反演及时空变化分析 [J]. 泥沙研究, 2015 (2): 67-73.
ZHU F, OU S Y, ZHANG S H, et al. MODIS images-based retrieval and analysis of spatial-temporal change of superficial suspended sediment concentration in the Pearl River Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2015 (2): 67-73.
- [39] 高峰, 王云鹏, 胡歆怡. 基于 Crosta 方法的珠江口总悬浮物遥感异常信息提取研究 [J]. 绿色科技, 2019 (6): 1-8.
GAO F, WANG Y P, HU X Y. Study on remote sensing abnormal information extraction of total suspended matter in the Pearl River Estuary on Crosta method [J]. Journal of Green Science and Technology, 2019 (6): 1-8.
- [40] 栾虹. 基于 Landsat 8 珠江口悬浮泥沙及叶绿素 a 浓度遥感反演及时空变化 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2016.
LUAN H. Based on Landsat 8 the suspended sediment concentration and chlorophyll a concentration of the Pearl River Estuary remote sensing inversion and time and spatial change [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2016.
- [41] 中华人民共和国水利部. 2013-2018 年中国泥沙公报 [R/OL]. <http://www.mwr.gov.cn/>.
- [42] 中华人民共和国水利部. 2007-2017 年中国水情年报 [R/OL]. <http://www.mwr.gov.cn/>.
- [43] 王训明. 人工挖沙对珠江水系水情的影响研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
WANG X M. Research of the Pearl River Delta's water condition and water environment influence by sand excavation [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [44] 杨阳, 李锐祥, 朱鹏利, 等. 珠江冲淡水季节变化及动力成因 [J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 36-44.
YANG Y, LI R X, ZHU P L, et al. Seasonal variation of the Pearl River diluted water and its dynamical cause [J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(1): 36-44.
- [45] LUO L W, ZHOU D W. Responses of the river plume to the external forcing in Pearl River Estuary [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2012, 15(1): 62-69.
- [46] OU S Y, ZHANG H, WANG D X. Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River Estuary in summer [J]. Environ Fluid Mech, 2009, 9(5): 471-492.
- [47] 薛惠杰, 柴扉, 王丽娅, 等. 珠江口及其邻近海域环流模式结构 [C]//中国海洋学文集, 2001: 138-151.
XUE H J, CHAI F, WANG L Y, et al. Zhujiang River Estuarine circulation model [C]//Chinese Ocean Anthology, 2001: 138-151.
- [48] CHEN Z Y, PAN J Y, JIANG Y W. Role of pulsed winds on detachment of low salinity water from the Pearl River plume: upwelling and mixing processed [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(4): 2769-2788.
- [49] 丁扬. 南海北部环流和陆架陷波研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
DING Y. Investigation on the circulation and coastal trapped waves in the northern South China Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [50] 陈希荣, 朱佳, 孙振宇, 等. 2015 年 7-8 月珠江冲淡水扩展特征的观测与分析 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(6): 841-848.
CHEN X R, ZHU J, SUN Z Y, et al. Observation and analysis of the extension characteristics of the Pearl Riv-

- er diluted water from July to August in 2015 [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2018, 57(6): 841-848.
- [51] 王强. 基于遥感反演的海阳离岸海域悬浮泥沙时空分布特征研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2019.
- WANG Q. Spatial temporal distribution of suspended sediment in offshore region of Haiyang city by remote sensing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [52] 刘沛然, 闻平, 周作付, 等. 珠江口伶仃洋滩槽发育演变影响因素分析 [J]. *台湾海峡*, 2000, 19(1): 119-124.
- LIU P R, WEN P, ZHOU Z F, et al. Analysis of influencing factor on shoal and though development of Lingdingyang Bay at Zhujiang estuary [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, 19(1): 119-124.
- [53] 夏真. 珠江口内伶仃洋水下地形地貌特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(1): 19-24.
- XIA Z. Characters od underwater topography and geomorphology in inner Lingdingyang firth of the Pearl River (Zhujiang river) estuary [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(1): 19-24.
- [54] 李团结. 伶仃洋地形地貌阶段性演变过程及趋势分析 [D]. 武汉:中国地质大学, 2017.
- LI T J. Analysis of Lingding Bay landform stage evolution and trends [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [55] 欧素英. 华南不同类型热带风暴驱动下珠江口表层悬沙分布趋势 [J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(3): 22-31.
- OU S Y. Surface suspended sediment distribution of Pearl River estuary under tropical storms with different wind and river discharge forcing [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(3): 22-31.
- [56] 王浩斌. 风暴对长江口悬浮泥沙浓度的影响及其动力机制 [D]. 上海:华东师范大学, 2018.
- WANG H B. A study of the suspended sediment concentration in response to the typhoon in the Yangtze Estuary and its dynamic mechanism [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [57] 赵获能. 珠江河口三角洲近165年演变及对人类活动响应研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- ZHAO D N. Morphological evolution of the Pearl River Delta in the past 165 years and its response to human activities [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [58] 张晓洁, 黄华梅, 王平, 等. 1973-2015年珠江口海岸线变化和围填海变化分析 [J]. *海洋湖沼通报*, 2016(5): 9-14.
- ZHANG X J, HUANG H M, WANG P, et al. Change analysis of coastline and sea reclamation in Pearl River Estuary from 1973-2015 [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2016(5): 9-14.

(责任编辑 秦社彩)