

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019021301

南海北部湾表层悬浮体分布规律

李珏^{1,2}, 乔璐璐^{1,2}, Le DucCuong^{1,3}, 薛文静^{1,2}, 杨宏达^{1,2}, 王勇智⁴, 姚志刚⁵

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100
3. 越南科学院海洋环境与资源研究所, 海防 180000
4. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061
5. 物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266100

摘要: 受实测数据海域位置的限制, 目前基于遥感手段对北部湾表层悬浮体的研究, 在部分海域如海湾西部精度不高, 且缺乏对悬浮体浓度 (suspended sediment concentration, SSC) 季节变化的研究。基于 2003—2017 年 MODIS-Aqua 卫星 L1B 数据, 结合海南岛西部、广西沿岸和越南沿岸实测数据, 建立表层 SSC 的反演模型, 获得北部湾海域 2003—2017 年月均表层 SSC 分布, 并对其影响因素进行初步探讨。结果显示: 北部湾表层 SSC 存在 3 个终年高值区, 包括广西沿岸、海南岛西侧和红河三角洲沿岸; 受河流输沙和海洋动力季节变化影响, SSC 表现为冬季和夏季较高、春季最低的季节变化特征; 热带气旋过境导致北部湾海域 SSC 增高, 其中热带风暴“贝碧嘉”过境时位于路径右侧的雷州半岛西部 SSC 较多年平均值增幅达 75%。

关键词: MODIS; 悬浮体; 季节变化; 北部湾

中图分类号: P736.21 **文献标识码:** A

Surficial distribution of suspended sediment in Beibu Gulf of the South China Sea

LI Jue^{1,2}, QIAO Lulu^{1,2}, LE DucCuong^{1,3}, XUE Wenjing^{1,2}, YANG Hongda^{1,2}, WANG Yongzhi⁴, YAO Zhigang⁵

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Key Lab of Submarine Sciences & Prospecting Techniques, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
3. Institute Of Marine Environment and Resource, Haiphong 180000, Vietnam
4. First Institute of Oceanography, MNR., Qingdao 266061, China
5. Key Lab of Physical Oceanography, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

Abstract: The study of surficial suspended matter based upon remote sensing is not accurate enough in Beibu Gulf, especially in the western part of the Gulf, due to location constraint. In addition, the data on seasonal variation in suspended sediment concentration (SSC) is lacking in the area. In this paper, a retrieval algorithm for surficial suspended sediment concentration was established by analyzing the images from the MODIS-Aqua satellite in the years from 2003-2017 and the in situ measured data from the Gulf, and thus the distribution of surficial SSC in Beibu Gulf is revealed and carefully studied. The results suggest that the main high-value areas of the surficial suspension are located along the coast of Guangxi, the west side of Hainan Island and the Red River Delta. Under the influence of fluvial sediment transport and ocean dynamics, SSC are higher in winter and summer rather than other seasons in the coastal areas, and reaches the lowest in spring. The transit of tropical cyclones will lead to the increase in SSC. SSC on the west side of Leizhou Peninsula increased by 75% compared with the multi-year average owing to the transit of tropical storm Bebinca.

Key words: MODIS; suspended sediment; seasonal variations; Beibu Gulf

北部湾位于南海西北部, 北面为我国广西沿海, 东面与雷州半岛、海南岛相邻, 西面为越南沿海, 南面即南海深水盆地, 以琼州海峡与南海北部

陆架相连。北部湾等深线大体与岸线平行, 由海岸向湾内和湾口地区逐渐加深, 平均水深约为 50 m (图 1)。入海河流众多, 其中越南沿岸主要有红河,

资助项目: 国家自然科学基金“浙闽沿岸泥质带冬季悬浮体的沉积机制”(41476030), “黄海暖流的沉积动力机制研究”(40906025); 中国东盟海上合作基金“长江三角洲与红河三角洲全新世沉积演化对比研究”; 泰山学者建设工程专项项目; 国家重点研发计划“大型水库调控下河口沉积动力过程及其生物地球化学效应”(2016YFA060093)

作者简介: 李珏(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事沉积动力学研究, E-mail: lijue1019@163.com

收稿日期: 2019-02-13; **改回日期:** 2019-08-28. 文凤英编辑

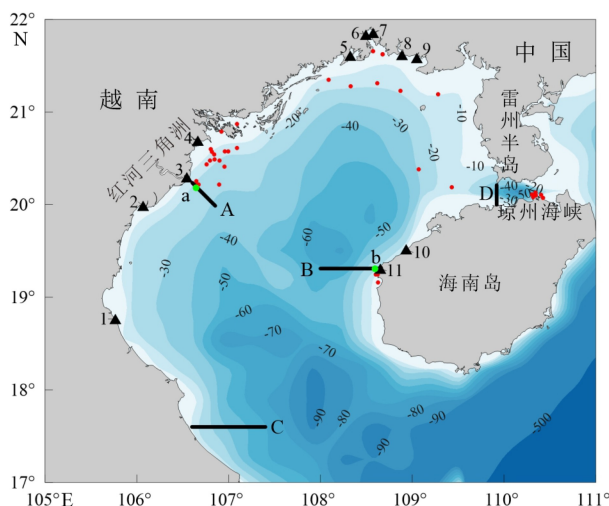


图 1 北部湾区域图

等值线为水深, 单位为 m; 红点为表层悬浮体浓度实测站位; 黑色三角为北部湾沿岸主要河流入海口位置(1.Lam River, 2.Day, 3.Balat, 4.Van Uc, 5.防城河, 6.茅岭江, 7.钦江, 8.大风江, 9.南流江, 10.珠碧江, 11.昌化江); 黑色线段(A、B、C、D)为选取的研究断面; 绿色点(a、b)为选取的研究点位。

Fig.1 Map of Beibu Gulf

Contours indicate isobaths in meters. Red dots are the investigation position. Black triangles represent the estuaries of the rivers(1.Lam River, 2.Day, 3.Balat, 4.Van Uc, 5.Fangcheng River, 6.Maoling River, 7.Qinjiang River, 8.Wind River, 9.Nanliu River, 10.Zhubi River, 11.Changhua River).

Black lines represent the selected research section. Green dots are the selected observation places.

海南岛沿岸有珠碧江、昌化江, 广西沿岸有南流江、钦江、防城河等^[1-2]。

悬浮体输运过程中的“源”与“汇”是陆-海相互作用研究的核心内容^[3-4], 对表层悬浮体分布的研究可以为北部湾水质环境和与南海间物质交换等研究提供基础资料。由于北部湾特殊的地理位置, 我国于 20 世纪 60 年代初与越南合作开展了两次覆盖整个北部湾海域的海洋综合调查^[5-6], 对北部湾区域水文气候、地质地貌等多个方面进行了研究。此后, 我国对北部湾海域独立开展的调查研究多局限于东部海域^[7], 大多学者主要基于近岸局部海域的现场实测数据开展悬浮体分布与输运研究。

21 世纪以来, 随着信息技术的不断发展, 卫星遥感成为获取大范围海域长时间连续数据的有力手段, 为悬浮体浓度(suspended sediment concentration, SSC)的获取提供了更多的可能^[8-11]。一些学者基于卫星遥感资料和实测水文泥沙资料, 对北部湾悬浮体分布、叶绿素浓度、海表温度和浊度的季节变化趋势进行了研究。北部湾悬浮体分布具有明显地域性特征, 琼州海峡和海南岛西部近海 SSC 由近海

向海湾中部逐渐减小^[12-13], 浓度整体较小, 在广西沿海最高值仅为 50 mg/L^[14]。河流输沙是北部湾悬浮体的主要来源, 湾顶的南流江是廉州湾悬浮体的主要物质来源^[15], 湾西岸的红河携带大量悬浮体入海。河流入海悬浮体在沿岸流的作用下会向外海输运, 但大部分会在河口附近沉积^[16-18], 入海口附近 SSC 明显较高^[19]。海南岛西南海域, 受冬季离岸风等影响, 海表悬浮体在风浪和潮流作用下发生再悬浮, 高浓度悬浮体向深海方向递减扩展。冬季, 在季风作用下北部湾水体垂向混合增强, 海湾中部叶绿素浓度升高^[20]; 夏季北部湾水体出现层化, 中央海域叶绿素浓度、水体浊度均较低^[21-22]。洋流、季风、离岸流、河流入海、近岸地形等, 是控制北部湾海域 SSC 分布的主要因素。利用卫星遥感资料对台风前后 SSC 及分布特征进行对比, 发现台风易造成 SSC 剧烈变化, 如 2014 年 7 月“威马逊”台风过境后, 越南中东部北部湾海域、雷州半岛西侧 SSC 增幅明显, 海南岛西北部局部地区由台风前的 2.86 mg/L 增加到 7.68 mg/L^[23]。但由于受实测数据海域位置的限制, 目前基于遥感手段对北部湾表层悬浮体的研究, 在部分海域如海湾西部精度不高, 且缺乏对 SSC 季节变化的研究。

本文基于 2003—2017 年 MODIS-Aqua 卫星海表反射率数据, 利用海南岛西部、琼州海峡、北部湾湾顶和越南沿岸等实测 SSC, 通过建立遥感反射率和实测表层 SSC 的拟合关系, 实现南海北部湾表层 SSC 的反演, 研究其季节变化规律以及影响机制。

1 数据及方法

1.1 数据来源

MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)是美国 EOS(地球观测系统)计划的主要传感器之一, 其数据可以从 NASA 官网(<https://www.nasa.gov/>)免费申请获得。本文收集了 2003—2017 年 MODIS-Aqua 卫星每个白天的 L1B 数据, 空间分辨率 1 km, 空间范围 16°~22°N, 105°~111°E, 用于分析研究海域表层 SSC 季节变化特征。

风场资料来源于 RSS(remote sensing systems)的 CCMP(cross-calibrated multi-platform)风场, 该资料结合了遥感、浮标以及模型计算结果, 时间分辨率 6 h, 空间分辨率 0.25°×0.25°。热带气旋(tropical cyclone, TC)数据来源于 Unisys Weather 相关网站(http://50.206.172.193/hurricane/w_pacific/index.php)以

及美国国家海洋和大气管理局(NOAA)官方网站(<https://www.noaa.gov/>)。

现场实测资料包括表层 SSC 数据和河流含沙量数据。实测表层 SSC 数据来源于越南海洋环境和资源研究所、自然资源部第一海洋研究所、中国海洋大学的现场监测数据,并收集了部分文献资料^[7,24]。实测表层 SSC 数据用于遥感反射率反演,站位基本覆盖了北部湾北侧、东侧、西侧的悬浮体高浓度区。河流附近含沙量数据包括越南海洋环境和资源研究所提供的红河 2009 年 Balat 河口含沙量,以及昌化江下游水体多年月平均含沙量数据^[25]。

1.2 遥感反射率反演

利用 NASA 官网提供的 Seadas 软件,对 MODIS-Aqua 卫星的 L1B 级遥感数据进行除云,削弱太阳耀斑影响,保留反射高值等处理后,将其转换成各波段的遥感反射率(Rrs)数据,最终获得 412、443 nm 等共 10 个波段的反射率。

在利用卫星遥感反演海洋表层 SSC 的研究中,大多数学者都是选取对 SSC 分布敏感的反射波段进行组合^[26]。本研究借鉴 Zhang 等 2010 年提出的反演算法来反演表层 SSC^[27],提取与实测数据在空间和时间上最匹配的反射波段(即 555、645、488 nm 波段)进行组合,建立反射波段 Rrs 和实测表层 SSC 的拟合关系,实现北部湾表层 SSC 的反演,反演公式见式(1)。

$$\log_{10}SSC = 0.6431 + 27.21 \times (Rrs555 + Rrs645) - 0.5298 \times \left(\frac{Rrs488}{Rrs555} \right) \quad (1)$$

式中: Rrs555、Rrs645、Rrs488 分别表示 555、645、488 nm 波段的反射率。通过对悬浮体敏感的 555 nm 和 645 nm 波段反射率进行相加增加两者相关性,同时减去 488 nm 和 555 nm 波段的反射率比值以削弱叶绿素对反演结果的影响。反演结果决定系数 R^2 为 0.84,均方根误差 RMSE 为 3.71 mg/L,图 2 展示了 MODIS 遥感反演结果与现场观测数据的拟合关系。

基于每日 SSC,通过算术平均的方法,得到北部湾海域 2003—2017 年多年平均表层悬浮体月均浓度。

2 北部湾表层 SSC 分布

2.1 表层 SSC 区域分布特征

北部湾海域表层 SSC 整体较低,一般低于

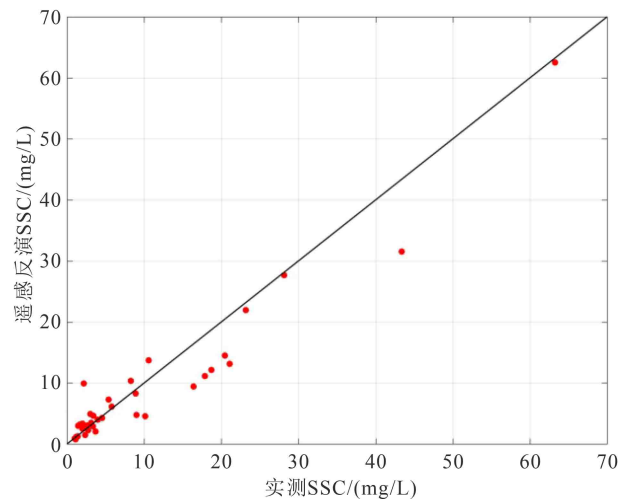


图 2 北部湾实测表层 SSC 与遥感反演结果对比图
Fig.2 Comparison between in-situ data and MODIS derived data for Beibu Gulf

50 mg/L,表现出明显的近岸高、远岸低的分布特点。浓度等值线大致沿等深线分布。高 SSC 区主要集中在广西沿岸主要河流入海口处、海南岛西侧以及红河各个分支入海口处,其中广西沿岸、海南岛西侧和红河三角洲沿岸 SSC 大于 20 mg/L(图 3),雷州半岛西侧大面积海域 SSC 约为 5 mg/L,海湾中部大部分海域 SSC 低于 1 mg/L。

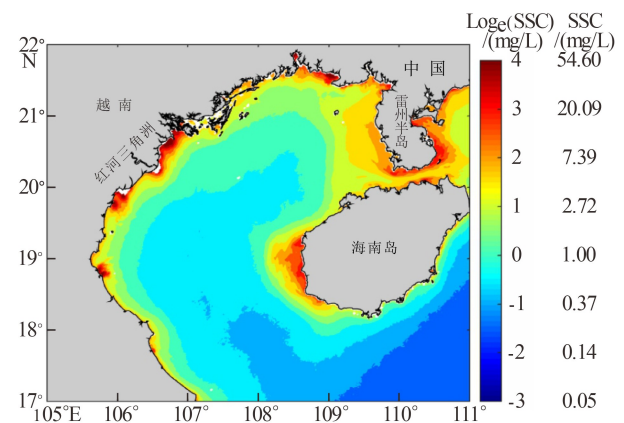


图 3 北部湾 2003—2017 年年均表层悬浮体分布
Fig.3 Monthly surficial suspended sediment concentration in Beibu Gulf from 2003 to 2017

2.2 表层 SSC 季节变化规律

北部湾海域表层 SSC 全年在量级上差异不大,但仍表现出季节变化特征(图 4)。

12 月至次年 2 月,北部湾沉积动力环境表现为冬季特征,SSC 量值整体较高(图 4a—c)。近岸 SSC 高值区分布范围较大,但量值逐月减小。12 月为湾平均 SSC 最高的月份,大面积海域 SSC 大于

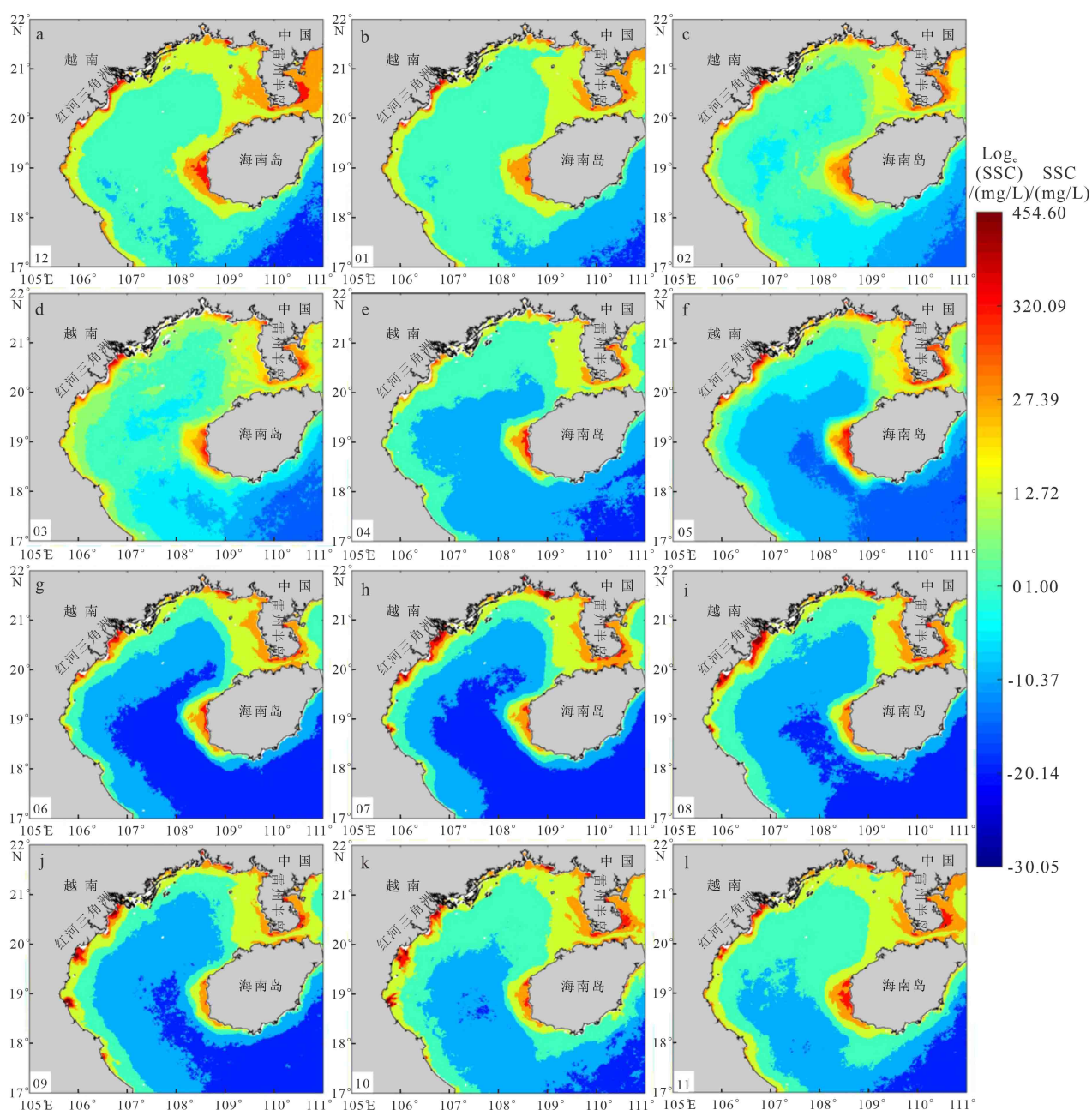


图 4 北部湾 2003—2017 年多年平均各月 SSC 分布图

Fig.4 Average monthly surficial SSC in Beibu Gulf

1 mg/L, 在海南岛西侧及越南红河三角洲海域表层 SSC 超过 20 mg/L。

3—5 月, 北部湾沉积动力环境变化不大, 表现为春季特征, SSC 较冬季整体下降(图 4d—f)。高值区(~ 20 mg/L)仅分布在几个河流入海口, 海南岛西侧浓度仍较高, 达 10 mg/L。SSC 高值水体逐月往陆地方向回退, 5 月湾中心海域 SSC 降至 0.5 mg/L。

6—8 月(图 4g—i), 表现为夏季特征, 近岸 SSC 有所增大, 中部海域 SSC 仍较低。近岸高值区分布与冬季大体接近, 主要集中在河流入海口处, 但范围明显减小, 冬季高浓度值与近岸浅水再悬浮

有关, 而夏季高值则与入海泥沙增多有关。在北部湾西岸红河主要支流 Balat 的入海口处, 高浓度表层悬浮体往东方向上分布较远。8 月红河三角洲附近海域 SSC 达到全年最高, 在红河支流 Van Uc 河口附近 SSC 可超过 50 mg/L。

9—11 月, 表现为秋季特征, 北部湾表层悬浮体开始向湾中心扩展, SSC 仍较高。越南红河三角洲沿岸 SSC 高值区开始逐月减小, 11 月仅在红河支流入海口处有小范围高值分布; 但海南岛西侧 SSC 逐月升高, 并向南、向西扩展, 11 月 SSC 可达 20 mg/L。

纵观整个海湾表层 SSC 的时间变化, 12 月至

5月北部湾区域(17.1°~21.92°N, 105.6°~109.92°E^[28])平均SSC一直呈逐月下降趋势,6月开始回升但在9月又有回落,10月为秋季SSC最大月份。12月北部湾区域平均SSC约为3.40 mg/L,为全年最大,12月至次年1月冬季平均SSC约为2.75 mg/L;3—5月SSC均较低,其中5月为全年SSC最低月份,SSC约为1.74 mg/L,春季区域平均SSC约为1.85 mg/L;夏季区域平均SSC约为2.21 mg/L;秋季区域平均SSC约为2.60 mg/L。

从空间分布来看,雷州半岛西侧终年存在着SSC大于2.72 mg/L的水体,12月有较大范围SSC大于7.39 mg/L的水体分布;海南岛西侧SSC的季节变化与雷州半岛较为类似,但在昌化江等河流入海口附近存在终年高值区;广西沿岸也存在SSC高值区,但范围极小;红河三角洲沿岸受红河入海泥沙季节变化影响,在7、8、9、10月高值分布都较为明显,局部海域超过50 mg/L。

2.3 北部湾主要断面表层悬浮体分布

选取北部湾红河主要支流Balat入海口处断面(断面A,图5a)、海南岛西侧19.31°N昌化江入海口附近断面(断面B,图5b)分析河流入海口处高浓度悬浮体月变化及近岸高浓度悬浮体向海湾中部扩展特征,西岸湾口17.6°N附近断面(断面C,图5c)分析红河入海物质向南海输运特征,琼州海峡109.92°E处断面(断面D,图5d)分析北部湾与南海北部陆架悬浮体输运特征,各断面位置如图1所

示。12月至次年1月,研究海域低浓度水体向海湾中部扩展较远(图5a—c),近岸在12月存在小范围的高值区。1—4月近岸SSC均较小,琼州海峡南北向水体SSC的梯度较大(图5d)。5月,研究海域各断面近岸SSC开始升高,Balat入海口在8月达到最高,昌化江入海口在6月达到最高。9—11月,近岸仍存在表层SSC较高的水体,但范围和向外扩展距离均较小。琼州海峡北侧即雷州半岛沿岸SSC终年高于南侧,即海南岛沿岸。

3 北部湾表层悬浮体分布控制因素

根据前人研究,表层SSC分布与风、海洋环流、入海泥沙通量等因素密切相关。

3.1 季风和环流

根据CCMP风场计算的南海北部湾区域平均风场,冬季盛行东北风,平均风速可超4 m/s;夏季盛行偏南风,平均风速小于4 m/s(图5e)。夏季,北部湾西岸表层悬浮体的向东扩展主要受控于季节风向,偏南风Ekman作用下有利于其向海湾中部扩展。冬季,在强北风作用下,近岸出现悬浮体高浓度区,且海湾中部SSC超过1 mg/L。

前人研究发现北部湾表层环流呈现较明显的风生流特征^[29-36]。冬季,在风场驱动及地形约束下,越南沿岸表层环流为东南向沿海岸线流动,可将北部湾悬浮体向南海输运(图5c),Balat河口处表层

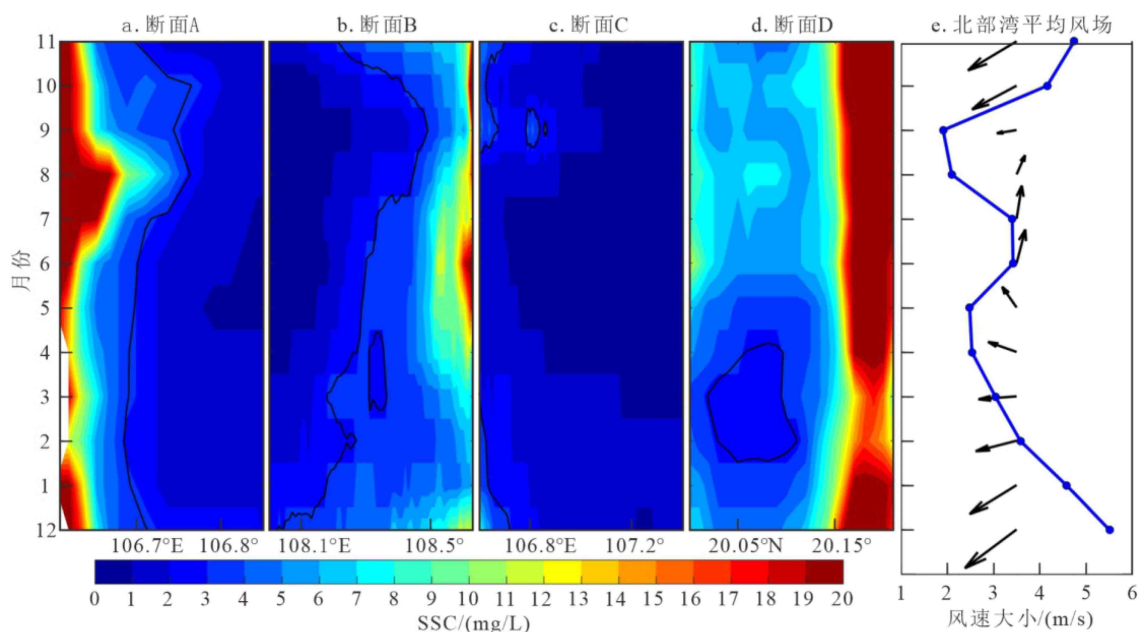


图5 北部湾主要断面表层SSC(a, b, c, d)及北部湾区域平均风场(e)随时间变化

Fig.5 Variation of surficial SSC and average wind field conditions (e) in the selected sections (a, b, c, d) of Beibu Gulf with time

悬浮体向海湾中部扩展不明显(图 5a); 夏季受增温和淡水径流的影响, 北部湾西岸仍为沿岸南下的沿岸流, 南向季风有利于近岸表层悬浮体向海湾中部扩展(图 5a)。

琼州海峡海流绝大多数时间向西, 仅在夏季个别月份西风风速较大时发生转向, 而在雷州半岛和琼州海峡东侧, 逆时针涡旋流的存在促使其形成现代沉积中心, 由此入海泥沙可穿越过琼州海峡向西输运至北部湾^[37-40]。

3.2 热带气旋

除季风、环流外, 极端天气也是影响北部湾表层悬浮体分布的重要原因。尽管夏季平均风速较小, 但在热带气旋经过时, 风速短时间内急剧增大, 往往会造成表层悬浮体的大幅升高, 同时在控制区域环流的基础上进一步影响表层悬浮体的分布。

北部湾是热带气旋发生频率较高的海区^[41-42], 2003—2017 年过境北部湾的各种等级 TC 共有 43 个, 年均接近 3 个, 其中 2013 年 6 月, 第 5 号热带风暴“贝碧嘉”穿过北部湾, 过境风速为 35~0 m/s。选取 2013 年 6 月表层悬浮体分布与多年平均值进行对比(图 6), 可以看到受台风右侧增强理论的作用, “贝碧嘉”路径右侧的 SSC 较多年平均值(图 6b)明显增大, 即 SSC 变化最剧烈的海域为雷州半岛西侧, SSC 增幅超 10 mg/L, 可达多年平均值的 75%; 海南岛西北海域 SSC 增幅也可达 50%。而在红河三角洲 30 m 等深线以浅的近岸浅水区, SSC 明显降低, 30 m 等深线以外的海湾中部 SSC 则升高。这可能与无风暴时近岸高浓度悬浮体被海洋锋面限制

在近岸浅水^[43], 而风暴加强了水平和垂直混合, 使得近岸悬浮体得以向海湾中部输运, 因此浅水区 SSC 降低, 深水区 SSC 升高。

3.3 沿岸河流入海泥沙

北部湾沿岸有众多河流携带悬浮泥沙入海, 是影响河口地区 SSC 分布的主要因素, 各河流输沙量主要表现为夏季高、冬季低的季节变化特征^[44]。

广西沿岸南流江、钦江输沙量和流量均为下半年较大^[45-46], 因此, 北部湾湾顶广西沿岸夏季出现小范围 SSC 较高水体; 但冬季沿岸河流处于枯水期, 近岸浅水区 SSC 高值主要受控于增强的海洋动力。

在北部湾西岸, 根据收集的 2009 年红河最大支流 Balat 河口站含沙量数据(图 7), 可以看出 12 月至次年 4 月入海河流含沙量较小, 6—9 月雨季含沙量较大。河口断面 A 及 a 站(位置如图 1) SSC 的季节变化及高浓度 SSC 分布范围与该河流输沙量呈现明显的正相关, 而北部湾湾口断面 C 处 SSC 季节变化与 Balat 入海河流含沙量变化无直接关联, 说明河流入海物质只影响到河口附近海域。

海南岛第二大河流昌化江入海口位于海南岛西部。依据前人研究中昌化江河口水文资料^[25], 可以看出昌化江入海口含沙量在 12 月至次年 4 月极小, 在 6—10 月较大; 除 10—12 月外, b 站(位置如图 1) SSC 与河流下游含沙量呈正相关(图 8)。这说明河流输沙是昌化江河口邻近海域悬浮体的主要来源。冬季 12 月, 尽管昌化江下游含沙量较低, 但 b 站 SSC 仍较高, 与冬季受该海域增强的风浪和海流等海洋动力控制有关。但 10 月昌化江下游含沙

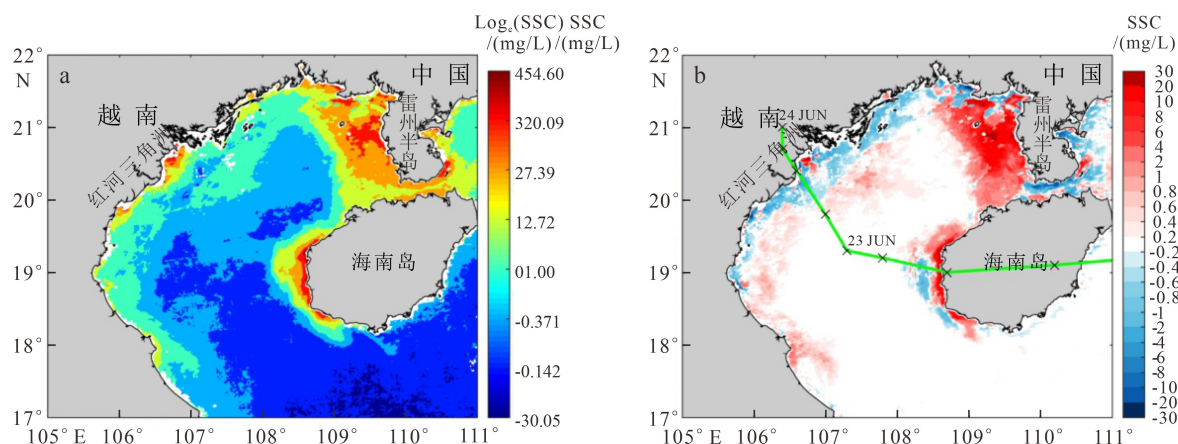


图 6 2013 年 6 月北部湾表层悬浮体分布 (a) 及其与多年平均 6 月的差值 (b)

注: 绿色线为 2013 年第 5 号热带风暴“贝碧嘉”过境路线。

Fig.6 Distribution of surficial suspended sediment in Beibu Gulf in June 2013 (a) and its difference from average annual mean in June (b)

Note: The green line is the route of the tropical storm Bebinca.

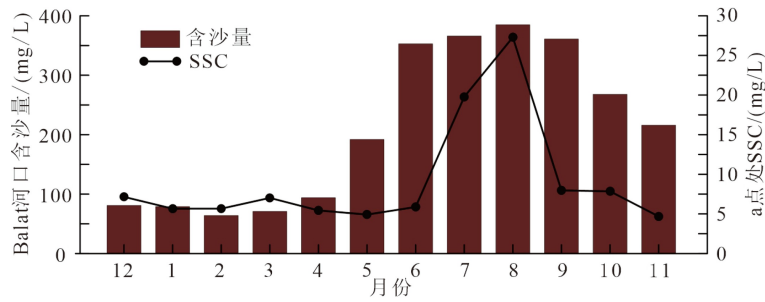


图7 2009年各月15日 Balat 河口含沙量及 a 点处多年月平均 SSC 分布

Fig.7 The sediment concentration in the Balat estuaries on the 15th of each month in 2009 and the SSC distribution of each month at site a

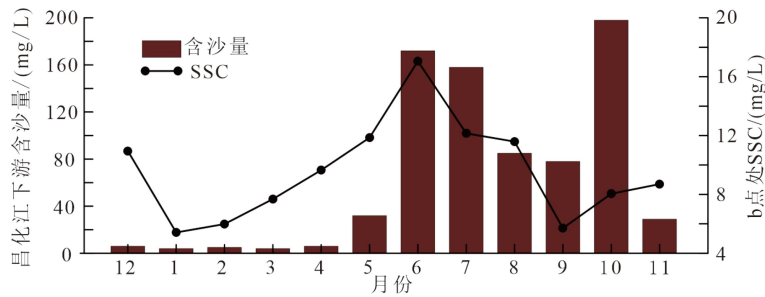


图8 昌化江下游水体多年月平均含沙量^[25]及 b 站处多年月平均 SSC 分布

Fig.8 Average monthly sediment concentration at the lower reaches of the Changhua river^[25] and the SSC distribution of each month at site b

量呈现异常增大,而 SSC 相对较低,具体原因有待进一步研究。

4 结论

(1)北部湾海域表层 SSC 高值区主要分布在红河三角洲邻近海域、广西沿岸河流入海口处和海南岛西部海域,这些海域 SSC 终年较高,浓度均超过 20 mg/L。

(2)北部湾表层 SSC 呈现明显的季节变化特征,全海域平均 SSC 季节变化为:冬季、秋季、夏季和春季依次降低。冬季,近岸 SSC 为年内最高值,可超过 50 mg/L;春季,随着冬季风的减弱,北部湾海域表层 SSC 明显降低;夏季,受河流入海泥沙增多影响,近岸河口附近 SSC 升高;从 9 月开始,随着风向转换及径流减弱,北部湾 SSC 分布开始向冬季特征过渡。

(3)北部湾海域表层 SSC 影响因素:冬季高浓度悬浮体主要受控于较强的冬季风及波浪;夏季河流入海物质的增多在河口形成高 SSC 区,但冬季河口的高值区主要受控于海洋动力要素;夏季尽管平均风速较小,但热带气旋可导致局部海域 SSC 提升,2013 年 6 月热带风暴“贝碧嘉”导致路径右侧表

层 SSC 增幅达 75%,从海南岛过境的热带气旋有利于海南岛沿岸物质向湾中心输送。

致谢: 在反演过程中得到了广东海洋大学李薛提供的广东海洋大学海洋遥感信息技术实验室 MODIS 卫星遥感悬浮泥沙资料,在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References)

- [1] 李高聪,高抒,戴晨. 海南岛主要入海河流域地貌演化[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(1): 121-130. [LI Gaocong, GAO Shu, DAI Chen. Geomorphological evolution of major catchment basins of Hainan Island, southern China [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(1): 121-130.]
- [2] 麻德明,丁绍昆,谢宜欣. 基于DEM的北部湾入海河流汇水区及子流域划分[J]. *海洋开发与管理*, 2016, 33(9): 99-103. [MA Deming, DING Shaokun, XIE Yixin. Division of river catchment and sub-catchment in Beibu Gulf based on DEM [J]. *Ocean Development and Management*, 2016, 33(9): 99-103.]
- [3] 李军,高抒,曾志刚,等. 长江口悬浮体粒度特征及其季节性差异[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(5): 499-510. [LI Jun, GAO Shu, ZENG Zhigang, et al. Particle-size characteristics and seasonal variability of suspended particulate matters in the Changjiang River estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(5): 499-510.]

- [4] 郭志刚, 杨作升, 张东奇, 等. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体输运的阻隔作用[J]. 海洋学报, 2002, 24(5): 71-80. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, ZHANG Dongqi, et al. Seasonal distribution of suspended matter in the northern East China Sea and barrier effect of current circulation on its transport [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(5): 71-80.]
- [5] 中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室. 中越合作北部湾海洋综合调查报告[R]. 北京: 中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室, 1964. [Scientific and Technical Committee of the People's Republic of China Ocean Group Integrated Marine Investigation Office. A report of comprehensive marine survey of Beibu gulf and Vietnam[R]. Beijing: Scientific and Technical Committee of the People's Republic of China Ocean Group Integrated Marine Investigation Office, 1964.]
- [6] 中越北部湾海洋综合调查队. 中越北部湾海洋综合调查报告[R]. 北京: 国家科委, 1965. [China-Vietnam Joint Oceanic Comprehensive Survey Team. China-Vietnam Beibu Gulf comprehensive survey report[R]. Beijing: State Science and Technology Commission, 1965.]
- [7] 胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学研究论文集[M]. 北京: 海洋出版社, 2008. [HU Jianyu, YANG Shengyun. Proceedings of Marine Science Research in Beibu Gulf[M]. Beijing: Ocean Press, 2008.]
- [8] Chen Z Q, Hu C M, Muller-Karger F. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(2): 207-220.
- [9] 申力, 许惠平, 吴萍. 基于光谱特征的MODIS影像东海水体类别信息提取[J]. 遥感信息, 2011(3): 71-76. [SHEN Li, XU Huiping, WU Ping. Water class extraction of the East China Sea using MODIS data based on spectral characteristics [J]. *Remote Sensing Information*, 2011(3): 71-76.]
- [10] 余佳, 王厚杰, 毕乃双, 等. 基于MODIS LIB数据的黄海悬浮体季节性分布的反演[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 1-9. [YU Jia, WANG Houjie, BI Naishuang, et al. Seasonal distribution and variation of suspended sediment in the Yellow Sea in 2010 based on retrieved monthly data from MODIS LIB imagery [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 1-9.]
- [11] 贾丽莉, 张安定, 吴孟泉. 基于MODIS的2013年黄海海域浒苔灾害的时空分布[J]. 鲁东大学学报: 自然科学版, 2015, 31(2): 172-177. [JIA Lili, ZHANG Anding, WU Mengquan. Spatial and temporal distribution characteristic of enteromorpha in Shandong Peninsula in 2013 on the basis of MODIS data [J]. *Journal of Ludong University: Natural Science Edition*, 2015, 31(2): 172-177.]
- [12] 李占海, 柯贤坤, 王倩, 等. 琼州海峡水沙输运特征研究[J]. 地理研究, 2003, 22(2): 151-159. [LI Zhanhai, KE Xiankun, WANG Qian, et al. Characteristics of water and sediment transport in the Qiongzhou Strait [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 151-159.]
- [13] 杨海丽, 郑玉龙, 黄稚. 海南近海海域浊度与悬浮颗粒物粒径的分布特征[J]. 海洋学研究, 2007, 25(1): 34-43. [YANG Haili, ZHENG Yulong, HUANG Zhi. Characteristics of turbidity and suspended particle size distribution on adjacent area of Hainan [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2007, 25(1): 34-43.]
- [14] 许晟轶. 广西重点港湾流场和悬浮泥沙输移数值模拟[D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2010. [XU Shengyi. Numerical simulation for the current and suspended sediment in the key bays of Guangxi offshore area[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2010.]
- [15] 谷东起, 吴桑云. 廉州湾南部海域泥沙来源及运移趋势分析[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(1): 25-31. [GU Dongqi, WU Sangyun. Analysis of the sediment sources and the transport tendency in the southern Lianzhou Bay [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2001, 19(1): 25-31.]
- [16] Van Maren D S. Water and sediment dynamics in the Red River mouth and adjacent coastal zone [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(4): 508-522.
- [17] 王文娟. 东中国海表层悬浮体分布的遥感反演及输运机制研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2008. [WANG Wenjuan. Study on the suspended matter's distribution from remote sensing retrieval and its movement mechanisms in the surface layer of the East China Seas[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2008.]
- [18] 肖晓. 南海北部湾底质沉积物粒度和泥沙运移趋势研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2015. [XIAO Xiao. Surface sediment grain size and transport of the Beibu Gulf in South China Sea[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [19] 孟凡晓, 陈圣波, 张国亮, 等. 基于Landsat-8数据南海近岸悬浮泥沙与叶绿素a浓度定量反演[J]. 世界地质, 2017, 36(2): 616-623, 642. [MENG Fanxiao, CHEN Shengbo, ZHANG Guoliang, et al. Quantitative inversion of nearshore suspended sediment and chlorophyll-a concentration based on Landsat-8 data in South China Sea [J]. *Global Geology*, 2017, 36(2): 616-623, 642.]
- [20] Tang D L, Kawamura H, Lee M A, et al. Seasonal and spatial distribution of chlorophyll-a concentrations and water conditions in the Gulf of Tonkin, South China Sea [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 475-483.
- [21] 黄以琛, 李炎, 邵浩, 等. 北部湾夏冬季海表温度、叶绿素和浊度的分布特征及调控因素[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2008, 47(6): 856-863. [HUANG Yichen, LI Yan, SHAO Hao, et al. Seasonal variations of sea surface temperature, chlorophyll-a and turbidity in Beibu Gulf, MODIS imagery study [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2008, 47(6): 856-863.]
- [22] 黄以琛. 基于MODIS的北部湾与台湾海峡浊度季节分布及机制研究[D]. 厦门大学硕士学位论文, 2008. [HUANG Yichen. Seasonal distribution and mechanism of turbidity in Beibu Gulf and Taiwan Strait by MODIS[D]. Master Dissertation of Xiamen University, 2008.]
- [23] 李薛. 基于卫星遥感与再分析资料研究南海上层水体对台风的响应[D]. 广东海洋大学硕士学位论文, 2017. [LI Xue. Studying upper ocean of South China Sea responses to typhoon based on remote-sensing data and reanalysis data[D]. Master Dissertation of Guangdong Ocean University, 2017.]
- [24] 高婕. 基于遥感分析的海南省昌化江河口泥沙运移模式研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2014. [GAO Jie. Research of sediment transport model of Changhua river estuary in Hainan province based on the analysis of remote sensing[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2014.]
- [25] 张黎明, 魏志远, 曹启民, 等. 近40年来海南省三大河下游水体的含

- 沙量特征及影响因素[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 765-769. [ZHANG Liming, WEI Zhiyuan, CAO Qimin, et al. Characteristics and impact factors of sediment concentration in lower reaches of three great rivers of Hainan province in the recent 40 years [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(4): 765-769.]
- [26] 王震, 乔璐璐, 王云飞. 东中国海表层悬浮体浓度卫星遥感反演研究进展[J]. 沉积学报, 2016, 34(2): 292-307. [WANG Zhen, QIAO Lulu, WANG Yunfei. Progress on retrieval models of suspended sediment concentration from satellite images in the Eastern China Seas [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(2): 292-307.]
- [27] 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.
- [28] 于向东. 北部湾边界: 海域划界的成功实践[J]. 东南亚纵横, 2005(1): 44-49. [YU Xiangdong. The Tonkin Bay border, a successful case of solving the dispute over border division of sea area [J]. *Around Southeast Asia*, 2005(1): 44-49.]
- [29] 俎婷婷. 北部湾环流及其机制的分析[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2005. [ZU Tingting. Analysis of the current and its mechanism in the Gulf of Beibu[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2005.]
- [30] Gao J S, Xue H J, Chai F, et al. Modeling the circulation in the Gulf of Tonkin, South China Sea [J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(8): 979-93.
- [31] 陈振华. 北部湾环流季节变化的数值模拟与动力机制分析[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2013. [CHEN Zhenhua. Numerical simulation on seasonal variation of ocean circulation and its dynamic mechanism in the Beibu Gulf[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2013.]
- [32] 高劲松, 陈波. 北部湾冬半年环流特征及驱动机制分析[J]. 广西科学, 2014, 21(1): 64-72. [GAO Jingsong, CHEN Bo. Analysis on characteristics and formation mechanism of the winter boreal circulation in the Beibu Gulf [J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(1): 64-72.]
- [33] 侍茂崇. 北部湾环流研究述评[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 313-324. [SHI Maochong. Study comments on circulation in Beibu Gulf [J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(4): 313-324.]
- [34] 高劲松, 陈波, 侍茂崇. 北部湾夏季环流结构及生成机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 58(2): 286-299. [GAO Jingsong, CHEN Bo, SHI Maochong. Summer circulation structure and formation mechanism in the Beibu Gulf [J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(2): 286-299.]
- [35] 丁扬. 南海北部环流和陆架陷波研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2015. [DING Yang. Investigation on the circulation and coastal trapped waves in the northern South China Sea[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [36] 方雪原, 娄安刚, 贺成奇. 北部湾冬季风生环流的数值模拟及其对海洋环境的影响分析[J]. 海洋湖沼通报, 2015(1): 129-133. [FANG Xueyuan, LOU Angang, HE Chengqi. Numerical simulation of wind-driven circulation and its impact on marine environment in winter of the Beibu Gulf [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2015(1): 129-133.]
- [37] 曹振铎, 鲍敏, 管卫兵, 等. 北部湾东北部水团分布及季节变化分析[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 532-542. [CAO Zhenyi, BAO Min, GUAN Weibing, et al. Water-mass evolution and the seasonal change in northeast of the Beibu Gulf, China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(3): 532-542.]
- [38] 许冬, 初凤友, 李家彪, 等. 粤西-琼东北近海沉积物的运移和沉积[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(3): 905-917. [XU Dong, CHU Fengyou, LI Jiabiao, et al. Transport and deposition of sediment on the shelf off western Guangdong to northeastern Hainan [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(3): 905-917.]
- [39] 陈达森, 陈波, 严金辉, 等. 琼州海峡余流场季节性变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2006(2): 12-17. [CHEN Dasen, CHEN Bo, YAN Jinhui, et al. The seasonal variation characteristics of residual currents in the Qiongzhou Strait [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(2): 12-17.]
- [40] Shi M C, Chen C S, Xu Q C, et al. The role of Qiongzhou strait in the seasonal variation of the South China Sea circulation [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(1): 103-121.
- [41] Le DucCuong. 北部湾海域沉积动力环境对台风“威马逊”响应的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2019. [Le D C. Numerical Simulation of the Sedimentary Dynamic Changes Response to the Super Typhoon Rammasun in the Gulf of Tonkin[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2019.]
- [42] 杨亚新, 夏剑东. 西北太平洋热带气旋活动特征[J]. 中国航海, 2019, 42(2): 114-119. [YANG Yaxin, XIA Jiandong. Characteristics of northwest Pacific tropical cyclones [J]. *Navigation of China*, 2019, 42(2): 114-119.]
- [43] Qiao L L, Liu S D, Xue W J, Liu P, et al. Spatiotemporal variations in suspended sediments over the inner shelf of the east China sea with the effect of oceanic fronts[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106600>.
- [44] 谷国传, 胡方西. 我国沿海近岸带水域的悬沙分布特征[J]. 地理研究, 1989, 8(2): 1-15. [GU Guochuan, HU Fangxi. The characteristics of the distribution of the suspended sediments in coastal regions of China [J]. *Geographical Research*, 1989, 8(2): 1-15.]
- [45] 黎树式. 南亚热带独流入海河流水沙变化过程研究——以南流江为例[D]. 华东师范大学博士学位论文, 2017. [GU Guochuan, HU Fangxi. The characteristics of the distribution of the suspended sediments in coastal regions of China[J]. *Geographical Research*, 1989, 8(2): 1-15.]
- [46] 黎树式, 黄鹤. 近50年钦江水沙变化研究[J]. 广西科学, 2018, 25(4): 409-417. [LI Shushi, HUANG Hu. Variations of runoff and sediment in Qinjiang River in the past 50 years [J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(4): 409-417.]