

2007 年夏季北部湾生态与环境要素分布规律研究^{*}

侍茂崇¹, 陈妍宇¹, 陈波², 丁扬¹, 刘振^{3**}

(1. 中国海洋大学, 山东青岛 266003; 2. 广西科学院, 广西北部湾海洋研究中心, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007; 3. 山东科技大学, 山东青岛 266590)

摘要:为获得北部湾生态要素分布规律更全面的认识, 本文基于北部湾海表层温度、盐度和有关生态参数的遥感数据, 利用 2007 年“908”专项调查资料, 结合海流数值计算结果, 分析了 2007 年夏季(6—8 月)的海表层温度、盐度、叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)、颗粒无机碳(Particulate Inorganic Carbon, PIC)浓度的分布态势并给予合理的动力机制解释:(1)北部湾表层叶绿素 a 浓度呈明显的自东向西、由近岸向湾中部逐渐递减的态势, 高值区为琼州海峡、广西沿岸、越南沿岸和海南岛西南侧近海海域;(2)POC 和 PIC 空间分布特征与叶绿素 a 相似, 低值区均主要集中在湾口水交换较快区域;(3)入侵高盐水的 33.5 PSU 等值线最北可达到 21°N; 湾内存在一个上升流区域形成的高盐核心;(4)北部湾水温的高值区分布在广西沿岸和越南沿岸的浅水区;(5)叶绿素 a、POC 和 PIC 高值区与沿岸径流有关;(6)海南岛西南部叶绿素 a、POC 和 PIC 的高值区与上升流有关。上述分析虽然只是 2007 年一年的结果, 但是结果却具有普遍的意义。

关键词:北部湾 海表温度 海表盐度 叶绿素 a 颗粒无机碳 颗粒有机碳 分布规律

中图分类号: P731.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2019)06-0614-12

0 引言

北部湾位于南海西北部 17°00′—21°30′N, 105°40′—110°00′E, 北临广西壮族自治区, 东靠广东省雷州半岛和海南岛, 西靠越南民主共和国, 南连南海, 以海南岛莺歌嘴与越南来角之间的连线为界。北部湾全部位于大陆架内, 平均深度为 46 m, 属于大陆架上一个浅海湾, 水下地形平坦, 最大水深不超过 100 m(图 1)。

北部湾处于亚热带, 季风特征明显, 冬半年盛行东北季风, 风力较强而稳定; 夏半年盛行西南季风, 东北季风期长于西南季风期。全年总降水量在 1 100~1 700 mm(西北部沿岸在 2 500 mm 以上)。

注入北部湾的河流, 东岸有昌化江, 北岸有南流江、钦江和北仑河, 西岸有红河、马江、朱江和兰江。这些河流中, 对北部湾水文要素(尤其是盐度)影响最大的是红河。

北部湾的水团划分为沿岸水(盐度 \leq 32 PSU)、

^{*} 国家自然科学基金项目(41576024), 山东省重点研发计划项目(2019GHY112049)和广西重点研发计划项目(桂科 AB16380282)资助。

【作者简介】

侍茂崇(1937—), 男, 教授, 主要从事物理海洋学研究, E-mail: mcschi@ouc.edu.cn。

【**通信作者】

刘振(1990—), 男, 博士, 主要从事海洋遥感研究, E-mail: zhliu01@126.com。

【引用本文】

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20191231.001

侍茂崇, 陈妍宇, 陈波, 等. 2007 年夏季北部湾生态与环境要素分布规律研究[J]. 广西科学, 2019, 26(6): 614-625.

SHI M C, CHEN Y Y, CHEN B, et al. Study on the distribution rule of ecological and environmental elements in Beibu Gulf in summer of 2007 [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(6): 614-625.

外海水(盐度 >34 PSU)以及混合水(盐度 $32\sim34$ PSU) 3种。在此基础上,还存在两个季节性水团——湾西北冷水团和湾中底层冷水团。由水团分析可以看出,该湾的海水系由3部分组成:南海高盐水,从南部湾口沿中部和东侧进入北部湾;沿岸低盐水,从该湾西北部,沿西海岸南下流出北部湾,这是南海水与北部湾海水交换的主要通道;外海次高盐水,由东岸的琼州海峡,自东向西流入北部湾。

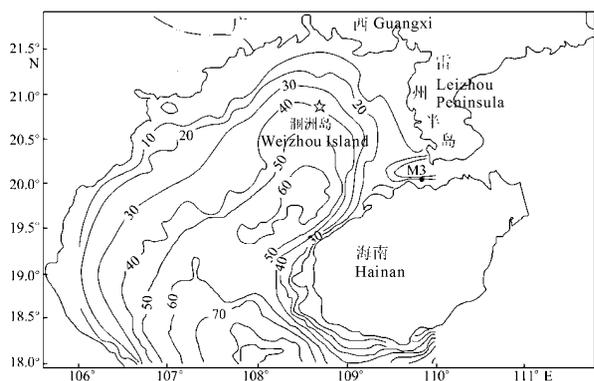


图1 北部湾水深与地形

Fig. 1 Depth and topography of Beibu Gulf

卫星遥感具有周期短、覆盖率高的优点,可以实现实时、同步、大面积、高分辨率的观测,因而获得了广泛的运用。近年来 Tang 等^[1]利用 Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) 和 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 等水色卫星遥感资料,研究了北部湾海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 和叶绿素 a 浓度的变化趋势,初步获得了二者的时空分布特征及其主要控制机制。赵辉等^[2]通过多种卫星遥感资料探讨了南海西北部叶绿素 a 浓度的分布及其对环境因子的响应。陈楚群等^[3]基于 SeaWiFS 遥感叶绿素 a 浓度的时空分布特征,分析了叶绿素 a 浓度与环流状况的耦合性。亦有一些学者利用中等分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、SeaWiFS 等多传感器数据研究了沿岸水体的浊度分布特征。

SST 与叶绿素 a 浓度是了解该海区的水文、初级生产力及水质情况所必需考虑的环境参数。蔡显明等^[4]报道了北部湾粒度分级叶绿素 a 和初级生产力的分布特征。Van Maren 等^[5]则发现北部湾的红河等主要河流入海口南部附近 10 km 以内的悬浮物质浓度处于较高水平。孙振宇等^[6]利用大面实测资料,给出北部湾东部海区 2006 年夏季航次温度、盐度的平面分布特征;郭丰等^[7]同样利用大面实测资料,给

出 2006 年夏季北部湾浮游植物分粒级叶绿素 a 含量的分布特征。黄以琛等^[8]也利用大面实测资料,分析了北部湾夏冬季海表温度、叶绿素 a 和浊度的分布特征及调控因素。张淑平^[9]给出北部湾浮游植物叶绿素 a 及颗粒无机碳的时空分布特征。

众多学者的研究结果表明,北部湾浮游植物叶绿素 a 的这种时空分布格局同反转季风、海表温度、气溶胶光学厚度、潮汐、河流及陆地径流等有密切关系。夏季北部湾海表温度分布较为均匀,叶绿素 a 浓度和浊度值沿岸带较高,外海较低。冬季,湾北沿岸流海域 SST 明显较低,海南岛西侧及中央海域存在一暖水舌,强化的混合作用导致叶绿素 a 和浊度均明显高于夏季,悬浮沉积物的影响也高于夏季。

本文将利用北部湾表层卫星遥感的温度、盐度、叶绿素 a 和颗粒无机碳、有机碳的资料,分析其夏季 (6—8 月) 分布特征,同时利用 Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM) 模型计算北部湾及其邻近海域的分层余流,作为分析北部湾表层温度、盐度、叶绿素 a 和颗粒碳的动力学背景。这是北部湾首次将 5 个要素 (特别是盐度) 联合在一起分析,并且用余流场来解释 5 个要素的分布规律,也为北部湾今后全湾的研究提供一个新思路。

1 材料与方法

1.1 卫星遥感数据

本文采用 MODIS 测定海表层温度、叶绿素 a 浓度、颗粒无机碳和遥感反射率的卫星遥感资料。MODIS 具有 36 个光谱通道,搭载于 TERRA 和 AQUA 两颗太阳同步极轨卫星上,卫星扫描有效宽度为 2 330 km,其三级网格化数据产品提供空间分辨率 4 km 和 8 km 的全球范围的遥感数据,海表层温度、叶绿素 a 浓度、颗粒无机碳、遥感反射率数据均由美国国家航空航天局 (NASA) 免费提供下载。

1.2 卫星反演盐度数据

海表盐度 (Sea Surface Salinity, SSS) 可以通过多种方法确定。遥感数据由于其大面积、多频次、低成本的特点和优势,已越来越多地被用于反演 SSS。微波遥感经常被用于在全球范围内大的空间和时间尺度上连续观测研究海洋盐度,例如土壤湿度海洋盐度 (SMOS) 卫星、Aquarius/SAC-D 卫星,但是这种技术由于 L 波段辐射计粗糙空间分辨率的问题,通常用在开阔海域绘制 SSS,在沿岸水域精细规模研究中的应用受到阻碍。当前的海洋颜色传感器,其数据产

品具有高空间和高时间分辨率的优势。本研究针对北部湾海域,利用中国国家“908”专项(908-01-ST09)收集的海表层盐度数据和 MODIS 2 级标准海色遥感反射率数据,采用经验算法建模型、反演和验证,得到北部湾海域海表层盐度分布。其中,中国国家“908”专项(908-01-ST09)北部湾海表层盐度数据集包括 2006—2007 年间的春、夏、秋、冬 4 个航次,并提供调查区域海表层盐度等值线分布数据,MODIS 2 级标准海色遥感反射率数据均由 NASA 免费提供下载。

1.3 南海与北部湾环流模型

本研究采用的模型为马萨诸塞大学和伍兹霍尔研究所联合开发的 Global-FVCOM 模型,这是一个海冰-海洋完全耦合的原始方程、无结构网格、有限体积海洋模型。模型的外界强迫包括:a) 8 个分潮的平衡潮驱动(M2, S2, N2, K2, K1, P1, O1 和 Q1), b) 海表面风应力, c) 海表面的净热通量和短波辐射, d) 海边面气压梯度, e) 蒸发和降水率, f) 河流淡水^[10]。

模型水平分辨率在南海北部湾约为 15 km。垂向网格采用适应地形的混合坐标,垂向共分 45 层^[11]。在水深大于 225 m 的海域采用 s 坐标,近表层分为均匀的 10 层(每层 5 m),近底层分为均匀的 5 层(每层 5 m),这样可以更好地分辨海表和海底边界层,在陆架和近岸水深小于 225 m 的海域采用 σ 坐标均匀分层。采用混合坐标可以使坐标转换在 225 m 深处平滑过渡,垂向所有层厚度都是 5 m。在北部湾海域,垂向分辨率约为 2.2 m,在水深小于 100 m 的区域分辨率更高。Global-FVCOM 通过半隐格式进行积分,垂向混合基于 MY-2.5 湍封闭方案^[12],水平混合采用 Smagorinsky 湍封闭方案^[13]进行计算,积分的时间步长为 300 s。另外模型利用卫星观测的 SST 和 Sea Surface Height (SSH) 资料进行同化,提高了模型的模拟精度。北部湾和南海区域网格及嵌套边界^[14]如图 2 所示,其中蓝线代表北部湾嵌套边界,风场和热通量等强迫场与全球模型相同。北部湾区域模型的计算结果与全球模型在北部湾的计算结果非常一致,这一方法可以实现高效的数值试验。

1.4 北部沿岸径流

图 3 中越南红河径流量数据为美国学者陈长胜教授于 2012 年在参加越南学术讨论会时,越方科学家在会上提供的^[15];广西沿海入海河流径流量数据则是根据多年统计结果得出的。在本研究的数值计算中,径流量数据采用图 3 中多年平均值。

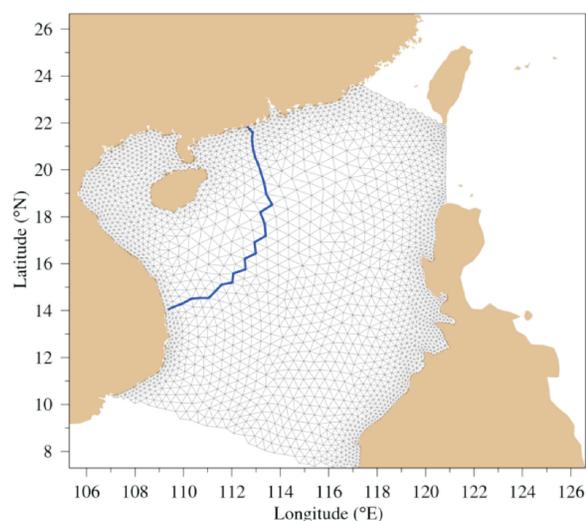


图 2 北部湾、南海区域嵌套模型无结构网格图^[14]

Fig. 2 Unstructured grid of nested models in Beibu Gulf and South China Sea^[14]

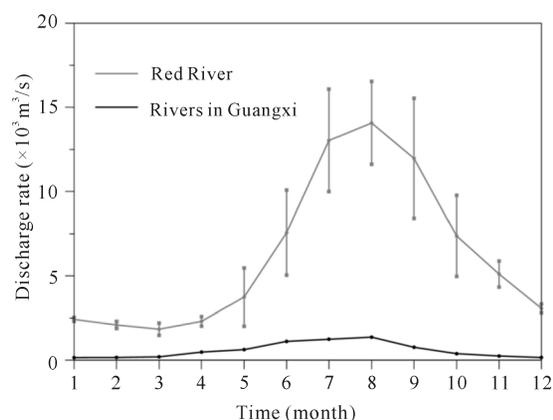


图 3 越南红河和中国广西沿岸河流的气候态月平均淡水流量(红河淡水数据来自于 Chen 等^[15])

Fig. 3 Climatological monthly mean freshwater flux of the Red River in Vietnam and rivers along the coast of Guangxi, China (The flux data of the Red River from Chen et al. ^[15])

2 与夏季海洋初级生产力有关的生态要素和环境要素分布特征

2.1 表层叶绿素 a 的分布特征

水体初级生产力——是指水生植物(主要是浮游植物)进行光合作用的强度。叶绿素 a 是浮游植物光合作用的主要色素,其含量是表征海域浮游植物现存量和反映海水肥瘠程度的重要指标。北部湾是我国重要的渔场和养殖区,对该海域叶绿素 a 含量及其分布特征进行研究,对了解海洋生产力水平、阐明生态系统的机构与功能有重要意义,对海洋生物资源的合理开发和利用亦有参考价值。

从图4中可以看出夏季表层叶绿素a有如下分布规律:

2.1.1 叶绿素a分布的高值区

北部湾表层叶绿素a浓度明显呈自东向西、由近岸向湾中部逐渐递减的规律。高值区有4个,分别是琼州海峡、广西沿岸、越南沿岸和海南岛西南侧近海海域。

(1) 琼州海峡高值区

该区的最高值为 $3\sim 4\text{ mg/m}^3$,是影响北部湾的最大区域。它从琼州海峡东口向西延伸,到达西端之后,一方面向西推进,最远到 109°E 附近;主体部分则向北、西北方向推进。雷州半岛西部、铁山港和北海港离岸海域都是其影响范围。以 2 mg/m^3 等值线为标识,其最大占据面积约 $15\ 000\text{ km}^2$ 。

(2) 广西沿岸高值区

该区的最高值为 $3\sim 7\text{ mg/m}^3$,主要是北海港、钦州港和防城港的近岸区域。以 2 mg/m^3 等值线为标识,其最大占据面积约 $3\ 000\text{ km}^2$ 。

(3) 越南沿岸高值区

主要集中在红河口南北方向近岸的狭长水域,最高值为 $3\sim 7\text{ mg/m}^3$ 。

(4) 海南岛西南侧近海海域高值区

该区的最高值为 2 mg/m^3 附近。北从昌化江口的棋子湾起,向南绕过莺歌海折向东,到三亚港西缘崖州湾止,最大占据海域面积约 $5\ 000\text{ km}^2$ 。

2.1.2 叶绿素a分布的低值区

以 0.2 mg/m^3 等值线为标识,低于这个值的区域,是水深大于 50 m 的“深水区”。在北部湾略有不同的是: $19^\circ 30'\text{N}$ 处,海南岛昌化江口向西、越南一侧向东不符合这个规律。该处 0.2 mg/m^3 等值线向大于 50 m 的“深水区”推进,这可能由于海南岛一侧的昌化江和另一侧越南红河径流排入所致。河口的入海径流量、泥沙通量和营养盐通量增加,以叶绿素a表征的浮游植物生物量自然相应增加。

2.1.3 叶绿素a逐月变化特征

(1) 高值区的变化

总的来看,琼州海峡、广西沿岸、越南沿岸和海南岛西南侧近海海域高值区面积是逐月增加,增加最快的是广西沿岸和越南沿岸。

(2) 低值区的变化

6月、7月、8月叶绿素a低值区是逐月增加。6月,以 0.2 mg/m^3 等值线为标识,低于这个值的区域,是水深大于 50 m 的“深水区”;7月,北方向南收缩,从 $20^\circ 20'\text{N}$ 收缩到 20°N ,即向南移动约 20 km ,但是西向范围却有所增加;8月,低于 0.2 mg/m^3 的低值区已经不存在。

特别要提到 $19^\circ 30'\text{N}$ 处,海南岛昌化江口径流向西影响范围越来越大,6月略见端倪,7月、8月则越过深槽向西达到 40 m 等深线的浅水区。由于昌化江径流扩散这一态势,使得越南红河水入海扩散呈现复杂的结构。

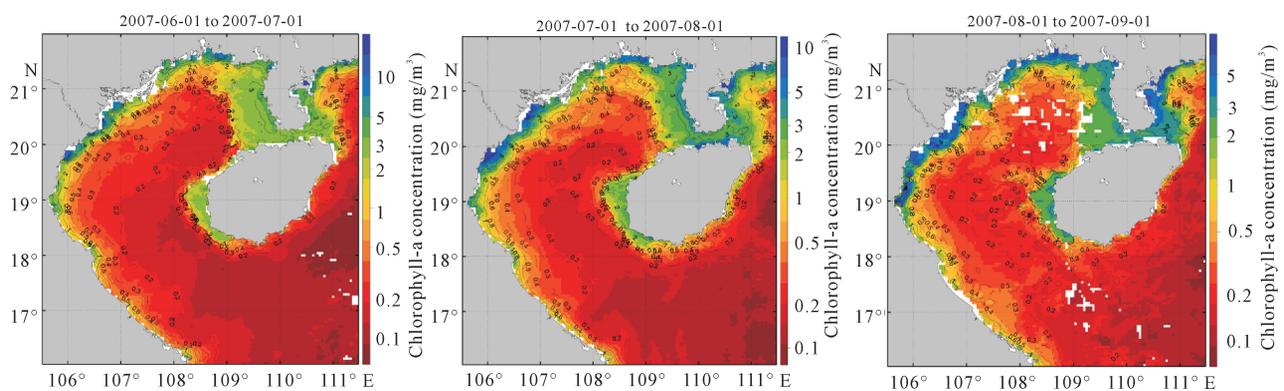


图4 北部湾夏季叶绿素a分布

Fig. 4 Distribution of chlorophyll-a in summer in Beibu Gulf

2.2 表层颗粒有机碳(POC)分布

颗粒有机碳是海洋生态系统中物质循环和能量流动的主要内容,也是评价海区初级生产力的一个重要指标。有生命的POC的新陈代谢造成营养盐浓度的变化,反过来,营养盐浓度的变化又改变有生命的POC的组成及数量。

2.2.1 POC来源

颗粒有机碳是指海水中的有机颗粒物,由生物成分(细菌、植物和浮游动物)和非生物成分(碎屑、排泄物和聚合物)组成,其来源大致有4个方面:

(1) 海洋自生(主要来源)。是指浮游植物通过光合作用将吸收的二氧化碳转换为有生命的POC,进

而通过被海洋动物摄食、被海洋微生物分解实现转移,同时各级生物产生的碎屑、排泄物、聚合物等向水下沉降形成非生命的 POC。

(2)外源输入。主要是指通过河流输入进入海洋以及通过大气将空气中的有机物沉降入海洋中。其中河流输入的 POC 是边缘海中 POC 的重要来源之一。

(3)海洋底部沉积物再悬浮。沉积在海底的

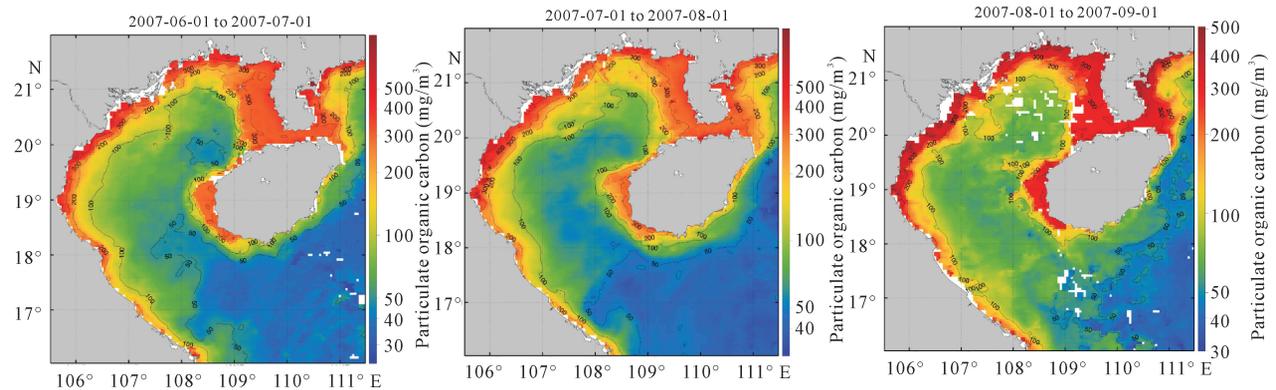


图5 北部湾夏季 POC 分布

Fig. 5 Distribution of POC in summer in Beibu Gulf

(1)琼州海峡高值区

该区是 POC 在北部湾内影响范围最大的区域,自雷州半岛东岸近海起,穿过琼州海峡,向西达到 109°E ,向北占据全部雷州半岛西岸近海区域,其最高值为 $300\sim 400\text{ mg/m}^3$ 。以 200 mg/m^3 等值线为标识,其最大占据面积约 $18\ 000\text{ km}^2$ 。

(2)广西沿岸高值区

该区的最高值为 $300\sim 500\text{ mg/m}^3$,受径流排污影响,主要分布于北海港、钦州港和防城港的近岸区域。

(3)越南沿岸高值区

该区主要存在于河内沿岸,其 POC 浓度为北部湾最高,最高值为 $400\sim 600\text{ mg/m}^3$ 。其中,在马江、宋江口 POC 达到最大,最高值超过 500 mg/m^3 。

(4)海南岛西南侧近海海域高值区

该区的最高值在 300 mg/m^3 附近。其占据区域自昌华江口起呈扇形向西扩展,分布与叶绿素 a 相近,最大占据海域面积约 $4\ 000\text{ km}^2$ 。

2.2.3 POC 分布的低值区

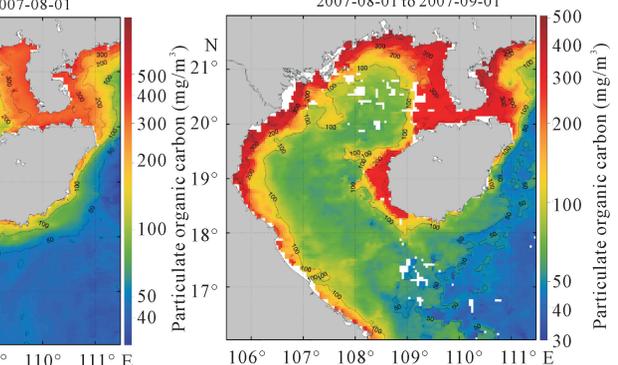
北部湾 POC 浓度由近岸向湾中降低,以 50 mg/m^3 等值线为标识,低于这个值的区域,是 POC 的低值区,主要集中在湾口水交换较快区域。此外,海南岛北部近海区域在 6 月份亦存在一个短暂的低值区。

POC 在受到上升流、强烈海浪等的扰动后会再次进入海水中的现象。

(4)溶解有机碳 DOC 通过沉淀反应形成 POC。

2.2.2 POC 分布的高值区

北部湾 POC 空间分布特征与叶绿素 a 相似。高值区有 4 个,分别是琼州海峡、广西沿岸、越南沿岸和海南岛西南侧近海海域(图 5)。



2.2.4 POC 分布的月变化

(1)高值区的变化

总的来看,北部湾 POC 高值区的分布整体向东偏,即北部湾西岸高值区逐月扩大,东岸高值区逐月减小,但各高值区均有其不同的变化。

(a)琼州海峡高值区

6 月,琼州海峡高值区占据 109°E 以东与雷州半岛之间全部海域,7 月缩至 109.3°E 以东,8 月进一步减小至 109.5°E 以东。

(b)广西沿岸高值区

6 月,整个广西沿岸均被浓度高于 300 mg/m^3 的 POC 占据;7 月, 200 mg/m^3 等值线向北缩进,大于 300 mg/m^3 区域被缩减至钦州湾湾口附近;8 月则重新扩大为整个广西沿岸。

(c)越南沿岸高值区

越南沿岸高值区范围逐月扩大,其中, 200 mg/m^3 等值线逐渐向湾中推进。而中心高值区(POC 浓度大于 400 mg/m^3 区域)则表现为先增大后减小的特征:7 月,沿岸高值区较 6 月略有扩大,至 8 月份又相对缩小。

(d)海南岛西南侧近海海域高值区

以 200 mg/m^3 等值线为标识,3 个月中,该高值区的影响区域变化较小。而 300 mg/m^3 等值线则相对扩大,即高值区面积增大,由 6 月不规则斑块状分

布至7月连成较大一块,而8月高值区面积较7月变化不大,仅相对北移了一段距离。

(2) 低值区的变化

6月、7月、8月 POC 低值区面积逐月减小。6月,以 50 mg/m^3 等值线为标识,低值区可分为湾中和湾口两个区域,其中,湾中低值区位于海南岛北部,且范围较小,而湾口低值区则相对湾口较窄,呈舌状向北部湾内入侵;7月,湾中低值区消失,湾口低值区的舌状入侵区消失,仅剩湾口部分区域存在低值区;8月, 50 mg/m^3 等值线完全退出北部湾,湾内不存在 POC 低值区。

2.3 表层颗粒无机碳(PIC)分布

2.3.1 高值区

北部湾 PIC 浓度的空间分布部分与叶绿素 a 相近,表现为近岸高、湾中低的规律(图 6)。但高值区分布与叶绿素 a 稍有不同的是:PIC 高值区主要在琼州海峡和海南岛西南侧近海海域。

(1) 琼州海峡高值区

琼州海峡高值区主要存在于雷州半岛西岸, PIC 浓度由近岸向湾中递减,影响区域可达 109°E ,向北可扩展至广西近海大部分区域,且大部分区域浓度在 60 mg/m^3 以上。该高值区的主体部分出现在雷州半岛西南侧近岸,其 PIC 浓度最大值超过 100 mg/m^3 。

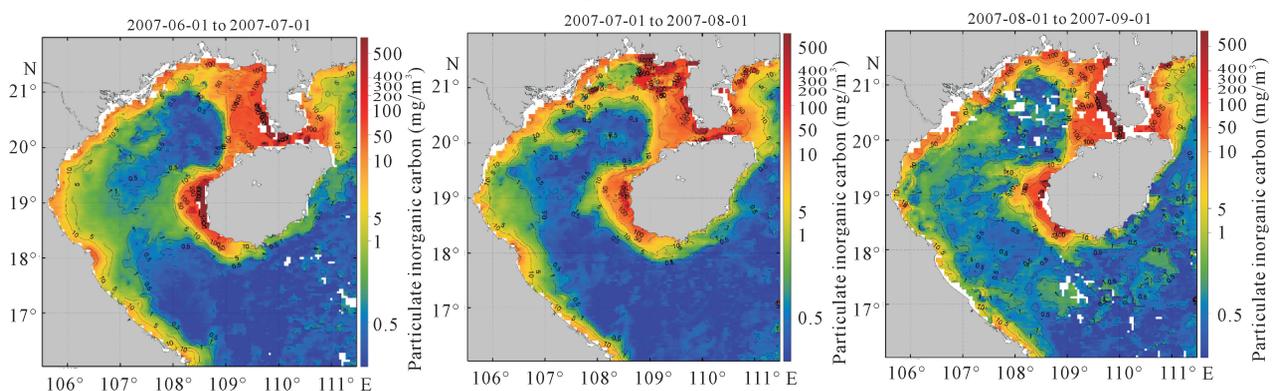


图 6 北部湾夏季 PIC 分布

Fig. 6 Distribution of PIC in summer in Beibu Gulf

(2) 低值区的变化

6月、7月、8月 PIC 低值区面积逐月增加。6月,以 1 mg/m^3 等值线为标识,低值区可分为湾中和湾口两个区域;7月,湾口区域向北扩大,与湾中低值区连通,湾中低值区则向西南进一步扩散,最远可扩展至 106.22°E ;8月,湾中低值区向西扩散至越南沿岸,且在越南近岸区域出现小面积、零星分布的数个低值区。

m^3 。以 50 mg/m^3 等值线为标识,高值区最大占据面积约 $15\,000 \text{ km}^2$ 。

(2) 海南岛西南侧近海海域高值区

与琼州海峡高值区扩散区域较广不同,海南岛西南侧近海海域的高值区分布相对集中,其 PIC 浓度在近岸达到最高,超过 $1\,000 \text{ mg/m}^3$,且离岸锐减,在 70 km 内可削减至小于 2 mg/m^3 。

2.3.2 低值区

以 1 mg/m^3 等值线为标识,低于这个值的区域,是 PIC 的低值区,主要集中在湾中部水深较深区域及湾口水交换较快区域。

2.3.3 PIC 逐月变化特征

在6月、7月、8月3个月中其分布略有不同:

(1) 高值区的变化

总的来看,琼州海峡和海南岛西南侧近海海域高值区面积是先减小后增大。其中,海南岛西南侧的降幅更为明显,其7月份 PIC 浓度由6月份最高值大于 $1\,000 \text{ mg/m}^3$ 快速降至约 200 mg/m^3 ,而在8月继续降低;琼州海峡高值区在3个月中 PIC 浓度最高值均大于 $1\,000 \text{ mg/m}^3$,6月和8月分布相近,但在7月时,原高值区显著减小,并被分割为2个极小的区域,其主体区域转移至广西沿岸,且影响范围较大。

2.4 表层盐度分布

受陆地径流影响,北部湾表层盐度总体呈自西向东、由近岸向湾中部递增的规律(图 7)。

2.4.1 高值区

高盐水主要来自外海,呈舌状,沿着海南岛西南、西北沿岸向湾内入侵, 33.5 PSU 等值线最北可达到 21°N 。湾内存在一个上升流区域,形成盐度核心,位于海南岛西南侧近海区域,中心盐度值在 $34.0 \sim 35.5 \text{ PSU}$ 。

2.4.2 低值区

盐度低值区遍布于琼州海峡和北部湾沿岸区。琼州海峡低盐区海水源于广东沿岸流,穿过琼州海峡沿雷州半岛北上。而沿岸区域低盐区则存在数个低盐核心,位于各径流入海口,盐度均小于 30 PSU。低盐区域范围受径流影响明显,其中,最为显著的是越南马江、宋江入海口及广西南流江入海口区域。

2.4.3 盐度逐月变化特征

在 6 月、7 月、8 月 3 个月中盐度分布略有不同:

(1) 高值区的变化

由于 7 月、8 月份降雨量增大,北部湾海表盐度

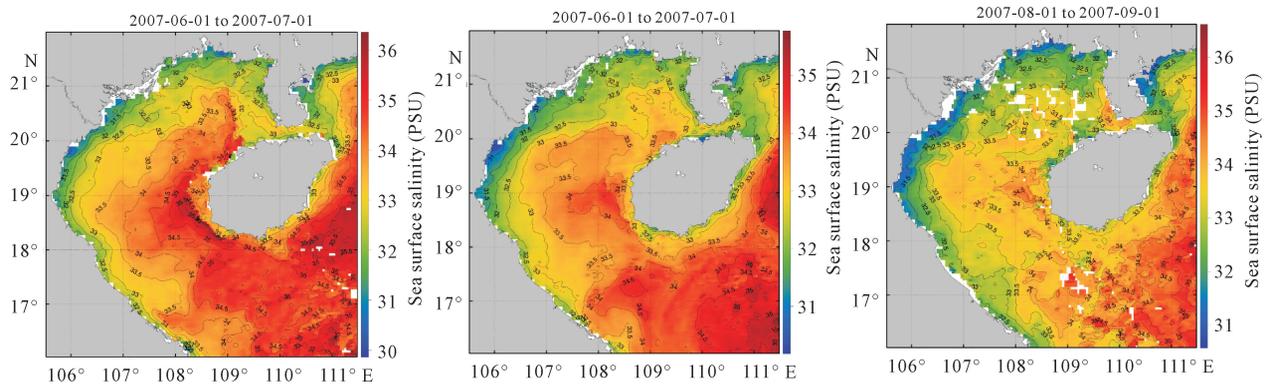


图 7 北部湾夏季盐度分布

Fig. 7 Distribution of salinity in summer in Beibu Gulf

2.5 表层温度分布

北部湾表层温度总体呈自南向北、由近岸向湾中逐渐递增的规律(图 8)。湾中部的水温变化幅度较小,在 29~31℃ 浮动。

2.5.1 高值区

北部湾水温的高值区分布在沿岸浅水区,由于水深较浅,受热升温较快。高值区主要有两个,分别是广西沿岸和越南沿岸。

(1) 广西沿岸高值区

该高值区影响范围最广但并不连续,其中,最大一块区域为自 20.6°N 起,沿雷州半岛向北覆盖至钦州湾口的部分。以 31℃ 等值线为标识,其最大占据面积约 6 000 km²。此外,沿岸零星分布数个小型高值区。

(2) 越南沿岸高值区

越南沿岸的高值区分布并不连续,主要存在于 18.8°N 以北区域,且各区域间隔较大、影响范围较小、分布没有规律。

2.5.2 低值区

表层温度低值区主要有 2 个,分别是琼州海峡、海南岛西南侧近海海域。

整体下降。7 月,对比 6 月盐度,可以发现外海盐度并未有显著降低,但湾中各区域均下降 0.5~1.5 PSU 不等。其中,下降最大的是盐度核心区,其降幅大于 1.5 PSU。8 月,由于降水量减小,高值区盐度相对回升,核心最高盐度较 7 月回升了 0.5 PSU。

(2) 低值区的变化

6 月、7 月、8 月盐度低值区逐月增加。由于 7 月、8 月降雨的增加,各河流径流量显著增加,冲淡水的影响区域进一步扩大。

(1) 琼州海峡低值区

琼州海峡东口存在一个显著的温度低值区,核心温度低于 27℃,低温海水穿过琼州海峡进入北部湾,至西口最低温 28~29℃,离开琼州海峡后温度显著升温至 30℃。但该低值区在 8 月消失。

(2) 海南岛西南侧近海海域低值区

该低值区与盐度高值区相对应,与海南岛西南侧近海的上升流有关,为底层低温、高盐水上涌。核心温度为 28~29℃。

2.5.3 表层温度逐月变化特征

在 6 月、7 月、8 月 3 个月中其分布略有不同:

(1) 高值区的变化

7 月,高值区显著扩大。其中,越南沿岸各个高值区范围略有扩大,中心温度增至 32℃ 以上。而广西沿岸最大的高温区开始向南扩散至海南岛北部和琼州海峡西岸大部分区域。高温核心位置由北海港转移至雷州半岛和海南岛北部近海,核心温度高于 32℃。

8 月,越南沿岸高温区没有明显变化,但雷州半岛西侧海域的高温区向东收缩近半,核心温度仍高于 32℃。

(2) 低值区的变化

3个月里, 越南沿岸和海南岛西南侧近海海域的温度低值区的变化较小, 低温区范围及核心温度未发生显著变化。而琼州海峡低温区则出现了较大改变。

6月, 其东口低温海水沿琼州海峡进入北部湾, 核心低温 29℃; 7月, 东口和琼州海峡低温区消失; 8月, 东口低温区再次出现, 但低温海水未能扩散至西口并进入北部湾。

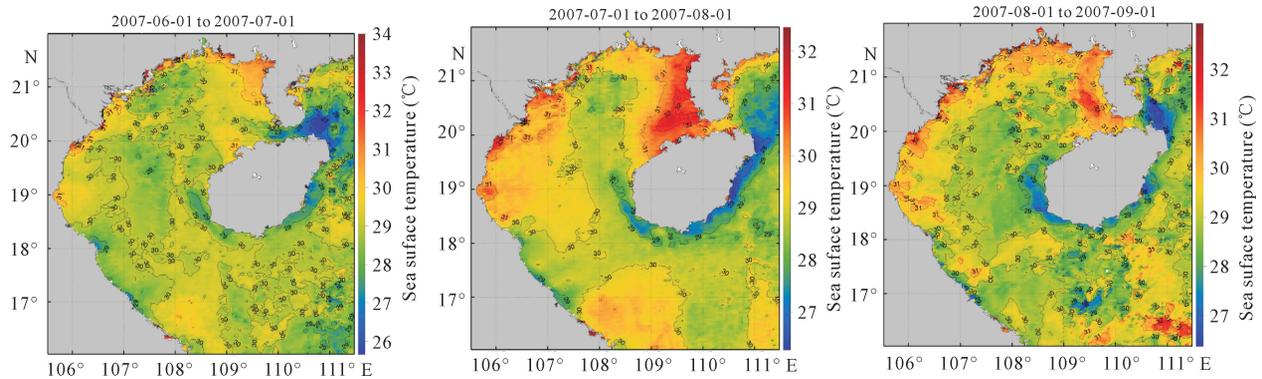


图8 北部湾夏季温度分布

Fig. 8 Distribution of temperature in summer in Beibu Gulf

3 关于生态要素和环境要素分布特征内在规律的认识

3.1 叶绿素 a、POC 和 PIC 高值区与沿岸径流有关

北部湾表层叶绿素 a、POC 和 PIC 浓度明显呈自东向西、由近岸向湾中部逐渐递减的规律。高值区有 4 个, 分别是琼州海峡、广西沿岸、越南沿岸和海南岛西南侧近海海域。只是 PIC 浓度在越南沿岸和广西

沿岸降低较大。究其原因, 高浓度分布与沿岸径流有关。入海径流携带的大量营养盐是海洋生态系统的主要生源物质, 是海洋初级生产力最重要的影响因素。

3.1.1 广西沿海有大量径流

广西沿海有大量入海河流, 年总径流量为 $1.836 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 具体如表 1 所示。

表 1 广西主要入海径流量月平均值^[16] ($\times 10^8 \text{ m}^3$)

Table 1 Monthly average value of main runoff into the sea in Guangxi^[16] ($\times 10^8 \text{ m}^3$)

河流 Rivers	月平均径流量 Monthly average runoff												总和 Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
南流江 Nanliujiang River	1.5	1.6	1.9	5.4	6.3	11.5	10.5	14.4	7.3	3.4	2.6	1.7	68.1
大风江 Dafengjiang River	0.2	0.2	0.3	1.1	1.4	3.2	3.9	4.5	1.8	0.8	0.5	0.3	18.6
钦江 Qinjiang River	0.4	0.3	0.5	1.2	1.7	3.5	3.8	4.3	1.9	1.0	0.7	0.5	20.1
茅岭江 Maolingjiang River	1.1	0.9	1.1	2.3	2.7	3.5	4.4	4.9	4.6	2.2	1.0	0.8	29.5
防城河 Fangchenghe River	0.3	0.4	0.5	0.8	1.4	2.5	4.1	4.5	2.0	1.1	0.7	0.4	18.7
北仑河 Beilunhe River	0.6	0.6	1.0	1.7	3.3	4.5	6.5	5.1	2.8	1.8	0.8	0.5	29.2

3.1.2 越南沿海入海径流更多

越南境内进入北部湾的河流有红河、马江、朱江和兰江。1964 年出版的《中越合作北部湾海洋综合调查报告》^[17] 显示: 1960 年和 1962 年, 流入北部湾诸河流的径流总量为 $1.4 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 其中, 越南沿岸河流径流量占 94.5%, 约为 $4\ 195 \text{ m}^3/\text{s}$, 中国广西沿岸

河流径流量占 5.5%, 约为 $244 \text{ m}^3/\text{s}$ 。从径流量的年变化来看, 以 7 月、8 月最大, 2—4 月最小。以 1960 年的红河为例, 8 月径流量为 $2.504 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 4 月径流量为 $1.71 \times 10^9 \text{ m}^3$, 相差超过 15 倍。2012 年, 越南科学家在学术会议上提供的红河平均径流量为 $6\ 250 \text{ m}^3/\text{s}$, 比 20 世纪 60 年代统计的径流量高出近

一倍。

3.1.3 昌化江入海径流的影响

昌化江,亦称昌江,是海南岛的第二大河,从东方市穿过昌化县的昌化港西流入南海,在入海口冲出一个广阔的喇叭口。昌化江干流全长 232 km,平均入海水量 $5.0 \times 10^9 \sim 5.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。从图 4~7 中可以看出,昌化江的入海径流对叶绿素 a、POC、PIC 和盐

度具有明显的影响。

3.1.4 粤西径流和海南南渡江径流的影响

广东粤西入海径流(主要是珠江)、海南南渡江入海径流西向的物质输运是琼州海峡西口表层叶绿素 a、POC 和 PIC 浓度高的主要原因,夏季表层海流运动可以佐证(图 9)。

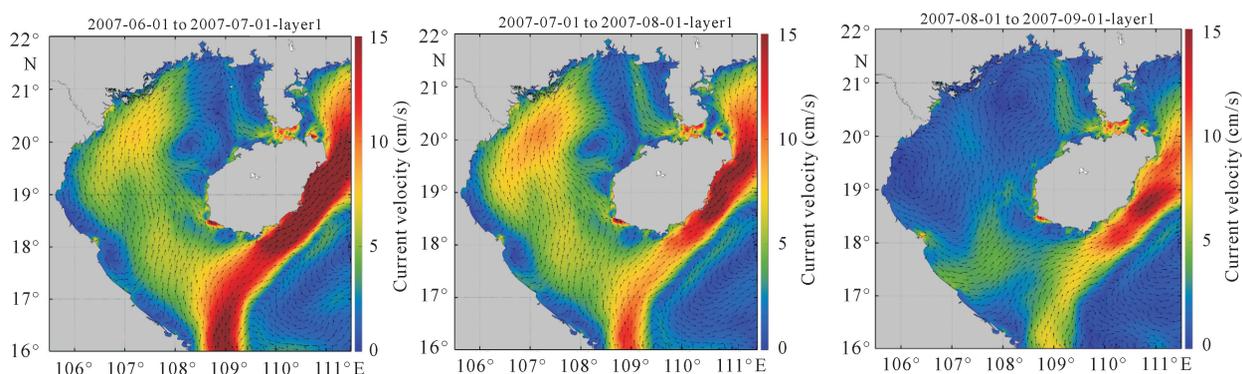


图 9 北部湾夏季表层流场分布

Fig. 9 Distribution of surface layer flow field in summer in Beibu Gulf

从图 9 中虽然只能看到雷州半岛东部一个气旋涡将海水转向西部,再通过琼州海峡进入北部湾,实际上粤西的叶绿素 a、POC 的高值区与琼州海峡西部的叶绿素 a、POC 的高值区(图 4~6)和低盐水(图 7)连成一片。表层海流图没有显示的原因在于我们使用平均风场。一次东北大风过程,特别是一次台风引起的陆架陷波^[14],可以持续数日将粤西沿岸水向琼州海峡输运。

南渡江是海南岛最大河流,从海口市进入琼州海峡,年径流量 $6.68 \times 10^9 \text{ m}^3$,和广西最大径流的南流江相当。

3.2 海南岛西南部叶绿素 a、POC 和 PIC 高值区与上升流有关

3.2.1 前人研究成果

上升流是从表层以下铅直上升的海流,是表层流场产生水平辐散所造成。上升流把深水区大量的海水营养盐(磷酸盐、硝酸盐等)带到表层,提供了丰富的饵料,因此,具有高浮游植物生物量和高初级生产力。

根据 Hsueh 和 O'Brien^[18]的“海流上升流”机制,在完整的潮周期内,由于潮流流向的周期性变化,由底边界层效应引发的上升流和下沉流恰好抵消。但是,潮流绕岬角呈近似圆周运动,由此产生的离心力总是离岸的,该离心力必须由一个额外的压力梯度力与之平衡。在惯性参考系下,正是这个额外的压力梯

度力提供了潮流转弯运动的向心力,而海南岛西南部的岬角地形导致这里上升流的出现。吕新刚^[19]通过计算,得到最大可能流速分布(图 10)。强流中心就是上升流最强区域。

3.2.2 气旋环流可能是导致大面积上升流的主要原因

除上述原因之外,这个区域的气旋环流可能是导致大面积上升流的主要原因,其基本依据是:上升流的主要特征是高盐、高初级生产力分布的范围。

(1)高盐、高初级生产力分布的范围和岬角地形引起的分布范围显著不同

按照前面遥感结果(图 7),6 月相对高盐区域以 34.5 PSU 等盐度线为代表,构成的区域接近 9 000 km²,高盐中心(35.5 PSU)远离海岸几十千米;7 月、8 月相对高盐区域以 34.0 PSU 等盐度线为代表,构成的区域分别降至 5 000 km² 和 2 000 km²,高盐中心也是离开海岸几十千米。这与地形引起的上升流有明显区别;地形引起的上升流位置基本固定,面积也不会大起大落;更重要的是,盐度最高值最靠近海岸区域。

叶绿素 a 高值区,北从昌化江口的棋子湾起,向南绕过莺歌海折向东,到三亚港西缘崖州湾止,最大占据海域面积约 5 000 km²;POC 高值区分布与叶绿素 a 相近,最大占据海域面积约 4 000 km²。尽管面积和吕新刚^[19]结果相近,但是月变化和范围的延伸

方向却有显著差别。

(2)与环流计算结果比较吻合

图 11 中给出了夏季中层(此次计算的是第 5 层)环流分布。从 11 图中可以看出:6 月,在 18°—19°N、117°45'—118°45'E 存在一个气旋涡,该位置与 6 月

的高盐区分布基本吻合;7 月,同样有一个气旋涡存在,只是形状和高盐区有较大差别;8 月,近岸区域是反气旋涡,远岸区域是气旋涡,在这两个涡旋之间是辐散带,底层水在这里上升。所以图 7 中高盐区远离海岸,呈不规则形状向西延伸。

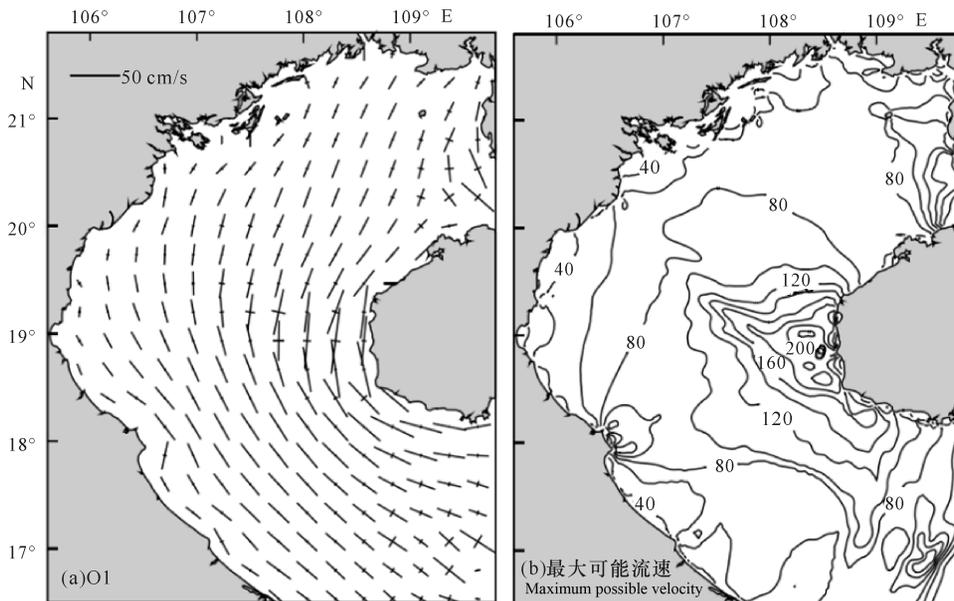


图 10 北部湾正压潮汐潮流模式计算结果^[19]

Fig. 10 Results of barotropic tide and tidal current model in Beibu Gulf^[19]

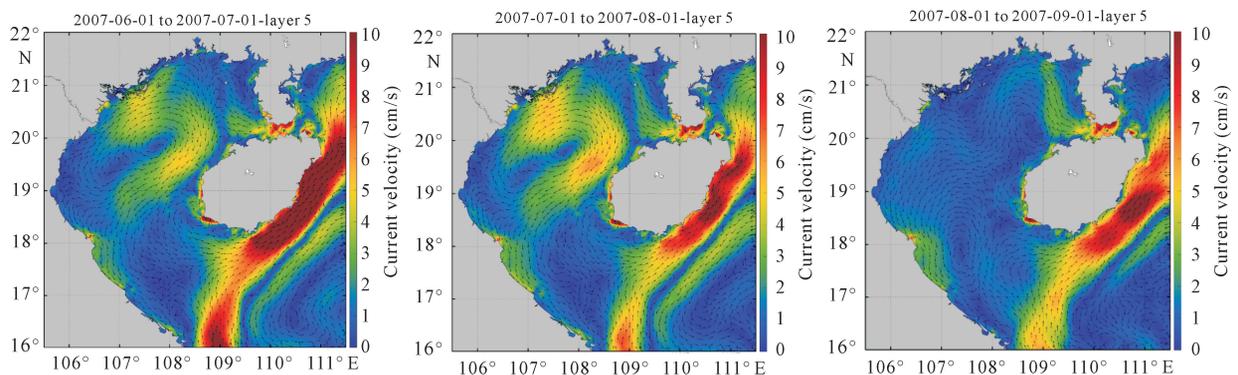


图 11 北部湾夏季中层流场分布

Fig. 11 Distribution of middle layer flow field in summer in Beibu Gulf

4 结论

通过分析遥感资料,得知 2007 年北部湾夏季生态和环境要素基本分布特征如下:

4.1 阐述了生态要素和环境要素分布特征

(1)北部湾表层叶绿素 a 浓度明显呈自东向西、由近岸向湾中部逐渐递减的规律。高值区有 4 个,分别是琼州海峡、广西沿岸、越南沿岸和海南岛西南侧近海海域。高值区面积逐月增加;低值区域是水深大

于 50 m 的“深水区”。

(2)北部湾 POC 空间分布特征与叶绿素 a 相似,但是北部湾西岸高值区逐月扩大,东岸高值区有逐月减小的趋势;低值区主要集中在湾口水交换较快区域;6 月、7 月、8 月 POC 低值区面积逐月减小。

(3)北部湾 PIC 空间分布特征与叶绿素 a 相似。低值区主要集中在湾中部水深较深区域及湾口水交换较快区域。

(4)高盐水主要来自外海,呈舌状,沿着海南岛西

南、西北沿岸向湾内入侵,33.5 PSU 等值线最北可达到 21°N。湾内存在一个上升流区域,形成盐度核心,位于海南岛西南侧近海区域,中心盐度值在 34~35.5 PSU。盐度低值区遍布琼州海峡和北部湾沿岸区。由于 7 月、8 月降雨量增大,北部湾海表盐度整体下降。

(5)北部湾水温的高值区分布在沿岸浅水区,主要有两个,分别是广西沿岸和越南沿岸。

4.2 研究了决定生态要素和环境要素分布特征的主要机制

在研究要素分布特征时,我们还进行同步海流计算。将夏季逐月平均风场输入南海嵌套模式之中,计算了北部湾小区域流场。因此,我们的余流场中包含风海流和潮汐余流,只是没有考虑密度流。因为北部湾是浅海,密度流要比潮汐余流小一个数量级,可以暂时略去不计。在分析水文与生态要素分布特征时,总是将它们与海水运动联合起来讨论,这样更容易揭示要素分布特征的内在规律。通过流场得到结论:

(1)叶绿素 a、POC 和 PIC 高值区与沿岸径流有关。

(2)海南岛西南部叶绿素 a、POC 和 PIC 高值区与上升流有关。

4.3 贡献与不足

4.3.1 本文主要贡献

(1)第一次系统给出北部湾夏季表层叶绿素 a、POC、PIC、温度和盐度的分布;

(2)第一次将北部湾海流数值计算结果作为动力学背景场,对北部湾夏季表层叶绿素 a、POC、PIC、温度和盐度的分布规律做出合理的解释;

(3)对海南岛西南部近岸水域的叶绿素 a、POC 和 PIC 高值区形成提出新见解:认为上升流是该处高值区形成的主要因素。

4.3.2 本文的不足

本文存在不足之处:径流量采用多年平均,而非 2007 年实测值,这会给海流数值计算带来一定误差;海流数值计算中未考虑密度的变化,也会给海流数值计算带来误差。正因为如此,海流数值计算结果,并不能完全解释生态要素和环境要素分布。

参考文献

[1] 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.

- [2] 赵辉,唐丹玲,王素芬.南海西北部夏季叶绿素 a 浓度的分布特征及其对海洋环境的响应[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(6):31-38.
- [3] 陈楚群,施平,毛庆文.南海海域叶绿素浓度分布特征的卫星遥感分析[J]. *热带海洋学报*, 2001, 20(2):66-70.
- [4] 蔡昱明,宁修仁,刘诚刚.1999 年夏季南海北部和北部湾海域粒度分级叶绿素 a 和初级生产力的分布特征[J]. *海洋科学集刊*, 2002(44):11-21.
- [5] VAN MAREN D S, HOEKSTRA P. Dispersal of suspended sediments in the turbid and highly stratified Red River plume [J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(4):503-519.
- [6] 孙振宇,胡建宇,陈照章,等.北部湾东部海区 2006 年夏季航次温、盐度的平面分布特征:北部湾海洋科学研究论文集(第一辑)[C].北京:海洋出版社,2008.
- [7] 郭丰,吴易超,黄凌风,等.2006 年夏季北部湾浮游植物分粒级叶绿素 a 含量的分布特征:北部湾海洋科学研究论文集:第一辑[C].北京:海洋出版社,2008.
- [8] 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.
- [9] 张淑平.北部湾浮游植物叶绿素及颗粒无机碳的时空分布特征[D].湛江:广东海洋大学,2015.
- [10] GAO G P, CHEN C S, QI J H, et al. An unstructured-grid, finite-volume sea ice model: Development, validation, and application [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(c8). DOI:10.1029/2010JC006688.
- [11] CHEN C S, GAO G P, QI J H, et al. A new high-resolution unstructured-grid finite-volume Arctic Ocean model (AO-FVCOM): An application for tidal studies [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114, C08017. DOI:10.1029/2008JC004941.
- [12] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem [J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(4):851-875.
- [13] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations: I The basic experiment [J]. *Monthly Weather Review*, 1963, 91(3):99-164.
- [14] 丁扬.基于观测和数值模型的南海北部陆架海环流和陆架陷波研究[D].青岛:中国海洋大学,2015.
- [15] CHEN C S, LAI Z G, BEARDSLEY R C, et al. Current separation and upwelling over the southeast shelf of Vietnam in the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C3). DOI:org/10.1029/2011JC007150.

- [16] 莫景强. 广西沿海地区人海径流与开发利用水资源研究[J]. 资源评价, 1993(2): 17-21.
- [17] 国家科委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[M]. 第一册. 北京: 国家科学技术委员会, 1964.
- [18] HSUEH Y, O'BRIEN J J. Steady coastal upwelling induced by an alongshore current [J]. Journal of Physical Oceanography, 1971, 6: 238-242.
- [19] 吕新刚. 黄东海上升流机制数值研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.

Study on the Distribution Rule of Ecological and Environmental Elements in Beibu Gulf in Summer of 2007

SHI Maochong¹, CHEN Yanyu¹, CHEN Bo², DING Yang¹, LIU Zhen³

(1. Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266003, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Marine Environment Science, Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266590, China)

Abstract: In order to obtain a more complete and comprehensive understanding of the distribution rule of ecological elements in Beibu Gulf, the distribution of sea surface temperature, salinity, chlorophyll-a, particulate organic carbon (POC) and particulate inorganic carbon (PIC) in summer (June, July, August) of 2007 were analyzed and a rational explanation of the dynamic mechanism was given based on remote sensing data of sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS) and ecological parameters in Beibu Gulf and dataset collected from project "908" and combined with the numerical model results of current field. (1) The concentration of chlorophyll-a in the surface layer of Beibu Gulf was gradually decreasing from east to west, from the coastal area to the middle of the Gulf. The high-value areas were Qiongzhou Strait, Guangxi Coast, Vietnam Coast, and the coastal waters on the southwest side of Hainan Island. (2) The spatial distribution characteristics of POC and PIC were similar to those of chlorophyll-a, and the low-value areas were mainly concentrated in areas with fast water exchange in the entrance of bay. (3) The 33.5 psu contour that invaded the high salt water far reached the north of the Gulf until 21°N. There was a high salt core formed in an upwelling area within the bay. (4) High temperature areas of Beibu Gulf were distributed in the shallow waters along the coast of Guangxi and Vietnam. (5) High values of chlorophyll-a, POC and PIC were related to coastal runoff. (6) High values of chlorophyll-a, POC and PIC in the southwestern part of Hainan Island are related to the upwelling. Although the above analysis is only a one-year result in 2007, the result is of universal significance.

Key words: Beibu Gulf, sea surface temperature, sea surface salinity, chlorophyll-a, particulate inorganic carbon, particulate organic carbon, distribution rule

责任编辑: 陆雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxk@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>