

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

黄以琛, 李 炎*, 邵 浩, 李永虹

(近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361005)

摘要: 基于 2006 年 6~8 月和 2006 年 12 月~2007 年 2 月的 MODIS 数据, 分析北部湾夏季和冬季的海表温度、叶绿素及浊度的时空分布特征, 并引入叶绿素与浊度的比值探讨浊度的控制因素, 揭示径流、环流、风场和地形对北部湾上层水体环境要素的调控机制。夏季北部湾海表温度分布较为均匀, 叶绿素浓度和浊度值沿岸带较高, 外海较低。沿岸流海域浊度的主要影响因子是陆源输出物质和再悬浮沉积物, 上升流海域则是浮游植物影响为主。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和浊度均明显高于夏季, 再悬浮沉积物的影响也高于夏季。夏季发育跨中央海域的东向物质输送通道, 冬季则发育西向物质输送通道。

关键词: 北部湾; 海表温度; 叶绿素; 浊度; 分布特征; MODIS

中图分类号: X 145

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2008)06-0856-08

北部湾是位于我国南海西北隅($16^{\circ}\sim 21^{\circ}30'N$, $105^{\circ}40'\sim 111^{\circ}E$)的一个半封闭海区, 三面被陆地包围, 东部为琼州海峡与海南岛, 南端经开阔口门与南海相通。湾内等深线的分布趋势大致和海岸平行, 深度沿岸较浅, 向湾中部和湾口逐渐加深(图 1)。沿岸众多大小河流携带大量陆源营养物质输入其中, 使该海湾水产资源丰富, 为我国第四大渔场^[1]。北部湾属热带、亚热带气候, 夏季盛行西南风, 冬季盛行东北风, 对该海区的水文特征和环流机制的影响举足轻重。1961~1964 年中越北部湾海洋综合调查队组织的联合调查以后, 调查区域多限于中国一侧, 影响了区域海洋学系统认识的深入。

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。海表温度(SST)、叶绿素和浊度是目前可由水色遥感观测的主要上层水体环境参数。近年来 Tang 等利用 SeaWiFS 和 AVHRR 等水色卫星遥感资料, 研究了北部湾 SST 和叶绿素的变化趋势, 初步获得了二者的时空分布特征及其主要控制机制^[2]。赵辉等通过多种卫星遥感资料探讨了南海西北部叶绿素浓度的分布及其对环境因子的响应, 认识到其空间分布特征和季风等海洋环境因素之间的密切关系^[3]。陈楚群等

基于 SeaWiFS 遥感叶绿素的时空分布特征, 分析了叶绿素浓度与环流状况的耦合性, 认为其分布格局受南海环流结构的控制^[4]。亦有一些学者利用 MODIS、SeaWiFS 等多传感器数据研究了沿岸水体的浊度分布特征^[5-6]。但就利用遥感数据研究北部湾同一时间序列内的 SST、叶绿素和浊度的分布特征及相互关系, 则尚未见到相关报道。

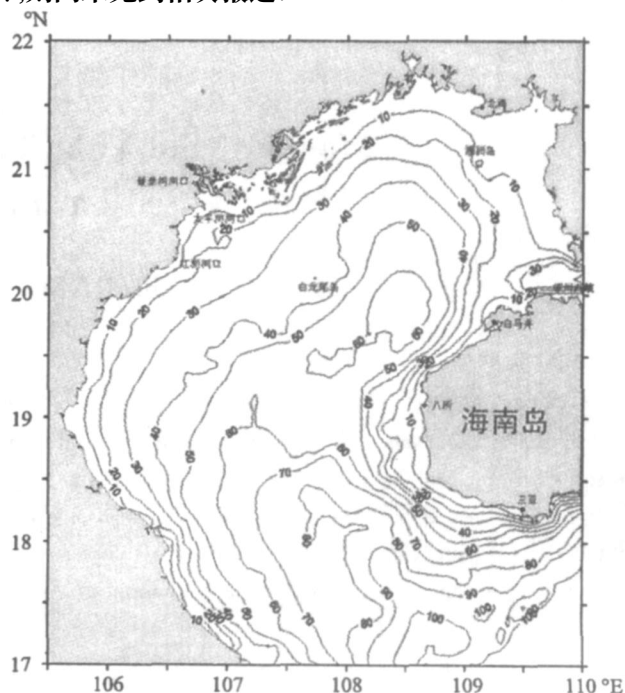


图 1 北部湾等深线图(单位: m)

Fig. 1 Map and topography of Beibu Gulf

收稿日期: 2008-05-13

基金项目: 国家 908 专项(908-01-ST09), 国家自然科学基金项目(40476023)资助

*通讯作者: liyan@xmu.edu.cn

SST与叶绿素是了解该海区的水文、初级生产力及水质情况所必需的环境参数。浊度(Turbidity)可以反映悬浮颗粒物浓度的变化,对研究水动力环境与物质输运有特殊意义^[7-8]。以往也有些学者对与其分布规律相关的海域水文条件进行形成机制方面的研究。杨士瑛等认为夏季粤西沿岸流部分海水通过琼州海峡进入北部湾,揭示了琼州海峡和北部湾夏季沿岸流的重要特征并进行了机制分析^[9]。蔡昱明等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,研究该海区的生产力结构和环境调控^[10]。van Maren等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^[11]。

本文基于MODIS遥感数据,统计北部湾海域2006年夏季与冬季的SST、叶绿素及浊度的月平均数据,结合QuikSCAT遥感风场的月平均数据和厦门大学承担的国家908专项北部湾区块2006年两个航次数据,分析了三者的时空分布状况并初步探讨了其调控机制。

1 数据与方法

1.1 遥感数据来源及处理

1.1.1 MODIS 卫星遥感数据

本文所用数据为美国国家宇航局(NASA)哥达德

空间飞行中心(GSFC)提供的MODIS L2_LAC级数据产品,空间分辨率1 km,时间序列为2006年6~8月,2006年12月~2007年2月。处理数据运用的是NASA发布的SeaWiFS资料分析系统,以及SeaDAS 4.9系统和ENVI 4.2软件。SST和叶绿素a产品是由SeaDAS 4.9软件的标准算法计算所得^[12];浊度计算采用厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室在NASA的MODIS标准归一化离水辐射率(nLw)基础上开发的算法,其公式如下^[13]:

$$Turb(NTU) = 56.609 \left(\frac{nLW_{667\text{ nm}}}{nLW_{488\text{ nm}}} \right)^{2.2985}$$

该算法由2003年3~4月黄东海航次25个YSI6600浊度传感器测量的表层(0~1.5 m)浊度与剖面光谱法测量的 $nLW_{670\text{ nm}}/nLW_{490\text{ nm}}$ 比值数据对导出,经863福建示范区在2005年10月~2006年3月在台湾海峡取得的24个YSI6600表层浊度与MODIS相应波段($nLW_{667\text{ nm}}/nLW_{488\text{ nm}}$)数据对检验,算法具有普适性^[14]。

利用上述算法得到SST、叶绿素和浊度的逐日数据,并经质量控制后计算获得三者的逐月平均以及季节平均数据,本文以6~8月代表夏季,12月~次年2月代表冬季。

1.1.2 QuikSCAT 风场数据

QuikSCAT风场数据来源于美国JPL实验室的

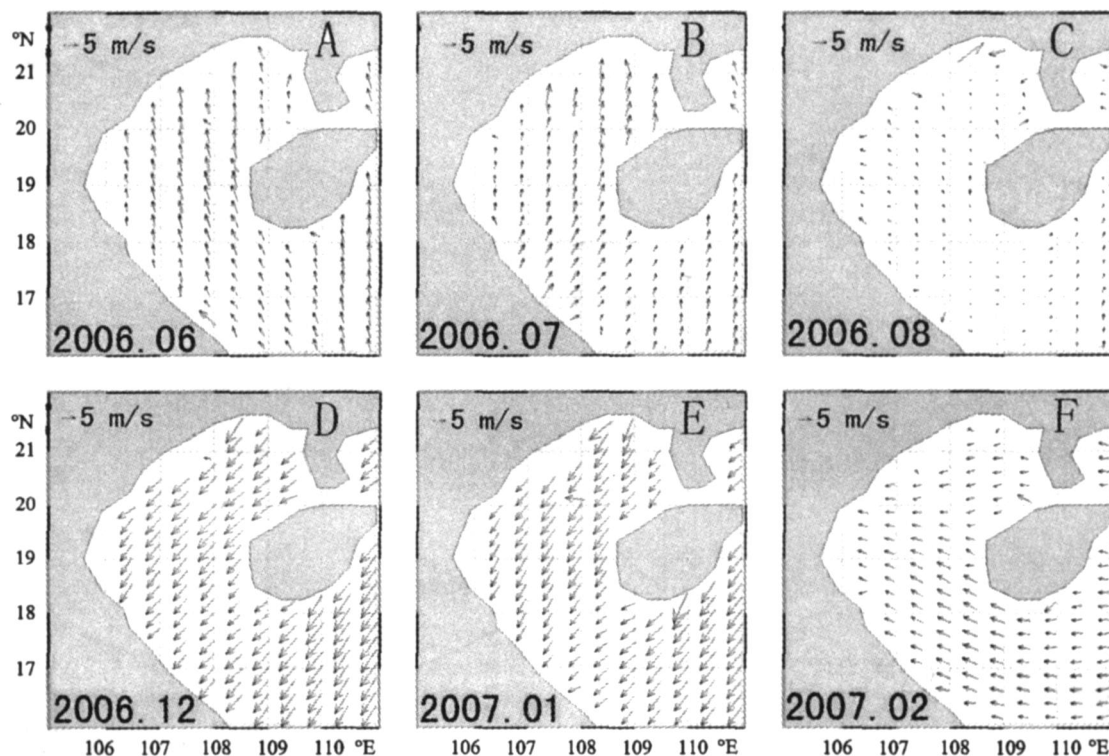


图2 QuikSCAT风场月平均分布图

Fig.2 Monthly averaged QuikSCAT images showing distribution of wind in the Beibu Gulf

资料中心^[15],其水平分辨率为 0.25 度,时间跨度亦为 2006 年 6~8 月,2006 年 12 月~2007 年 2 月。月平均风场分布图显示,6 月海区以风向不甚稳定的偏南风为主,平均风速不超过 5 m/s,7 月北部湾大部海区盛行西南风,平均风速 5~10 m/s,到 8 月平均风速明显转弱;12 月~次年 1 月,整个北部湾盛行强而稳定的东北风,平均风速 5~10 m/s,从东北向西南逐渐递减,到 2 月逐渐转为偏东风(图 2)。

1.2 遥感数据的检验

现场观测数据是卫星遥感数据的检验依据。引用 2006 年 7 月 15 日~8 月 7 日及 2006 年 12 月 25 日~2007 年 1 月 22 日“实验 2 号”北部湾航次期间,由 Seabird-917 型 CTD 测量的 1 m 层水温 and 浊度,以及由 Turner 10U5 现场荧光测定仪采用现场荧光法测定的叶绿素 a 浓度数据,作为校验卫星遥感数据的依据^[16-17]。检验内容包括:(1)采用 2 h 的时间窗口与 1 km 的空间窗口选取同步遥感与现场数据对进行的观测精度检验(图 3 中的实心点);(2)叶绿素 a 与浊度还采用航次期间统计的 MODIS 遥感观测中间值的 3 km × 3 km 空间窗口平均值,与航次大面观测成果进行数据对匹配(图 3 中的空心点),以考察遥感观测统

计成果的代表性。参考 Sasaka 等^[18]的方法,对检验数据组进行相关分析。其中,先对叶绿素和浊度的数据组进行对数转化后(以 10 为底)再进行误差分析。

图 3 展示了 MODIS 遥感数据与现场观测数据的对比关系。SST 的遥感观测精度相对较高,但夏季近表层存在的垂向温度梯度,可能带来相对较大的误差,冬季则由于云层的影响而使误差大于夏季;叶绿素 a 的遥感观测精度较高,航次代表性好。浊度的遥感观测值比同步现场观测值略低,但航次期间的遥感观测统计值比大面观测值有偏低 1 个数量级左右的离散。可见由于浊度时空分布的不稳定与遥感观测样本代表性的偏差,夏冬两个航次期间所取得的遥感观测主要反映了其中的低浊阶段的分布特征,比如沉积物再悬浮作用较弱的低海况时段的特征,但仍可以反映浊度平面分布的趋势。尽管因为检验数据组的样本不足,但是上述检验仍说明,这批遥感观测结果可以在可接受的置信度下,反映有关海洋要素季节变化的空间差异。

2 结 果

2.1 SST

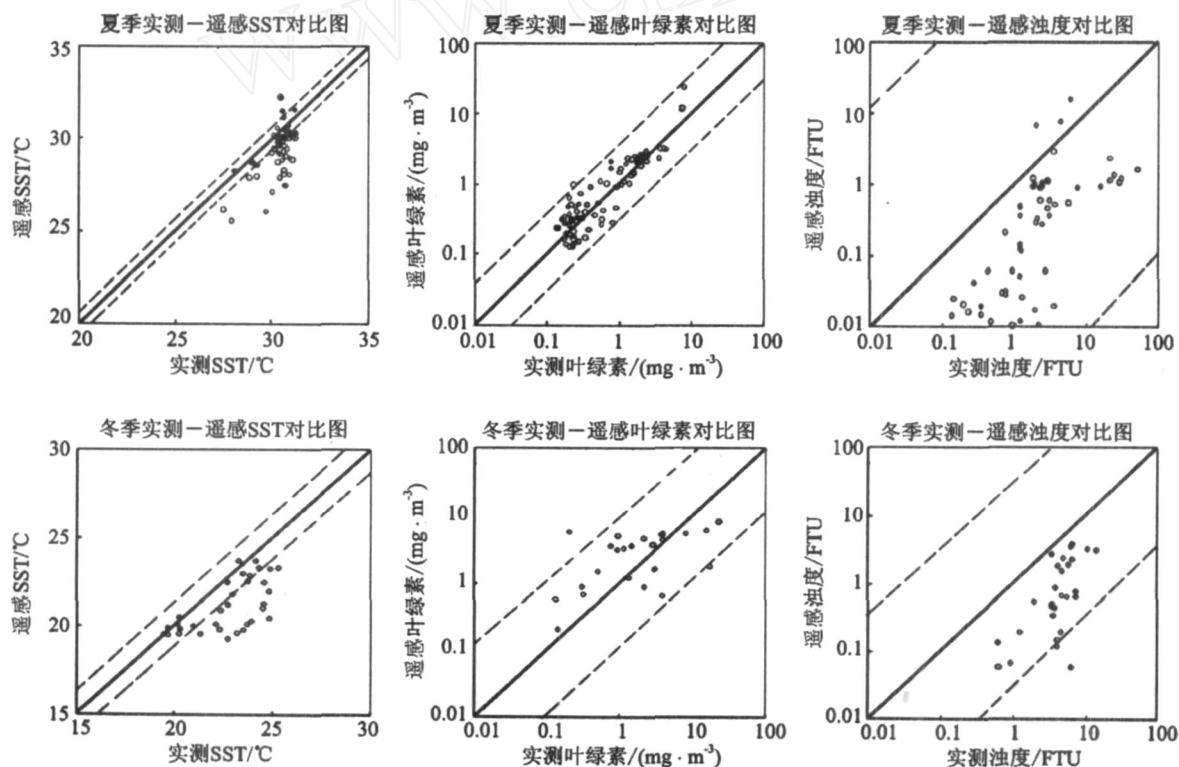


图 3 2006 年 7 月 15 日~8 月 7 日及 2006 年 12 月 25 日~2007 年 1 月 22 日“实验 2 号”北部湾航次期间的实测与遥感数据对比图

1:1 线的左右两条虚线内的范围表示在空心点标准差范围内的置信区间

Fig. 3 Comparison between in-situ data and MODIS derived data in Beibu Gulf, time series: from July 15 to Aug 7, 2006 and from Dec 25, 2006 to Jan 22, 2007

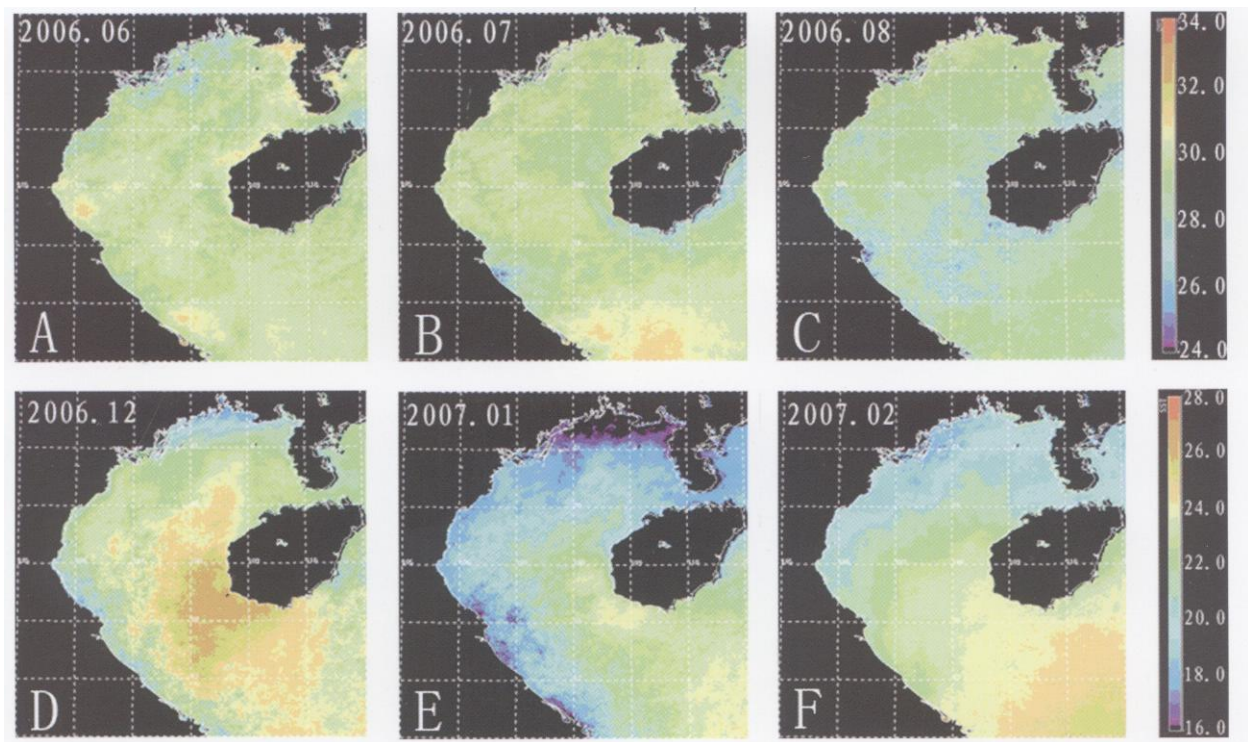


图 4 北部湾 SST 月平均分布图
Fig.4 Monthly averaged MODIS SST images in the Beibu Gulf

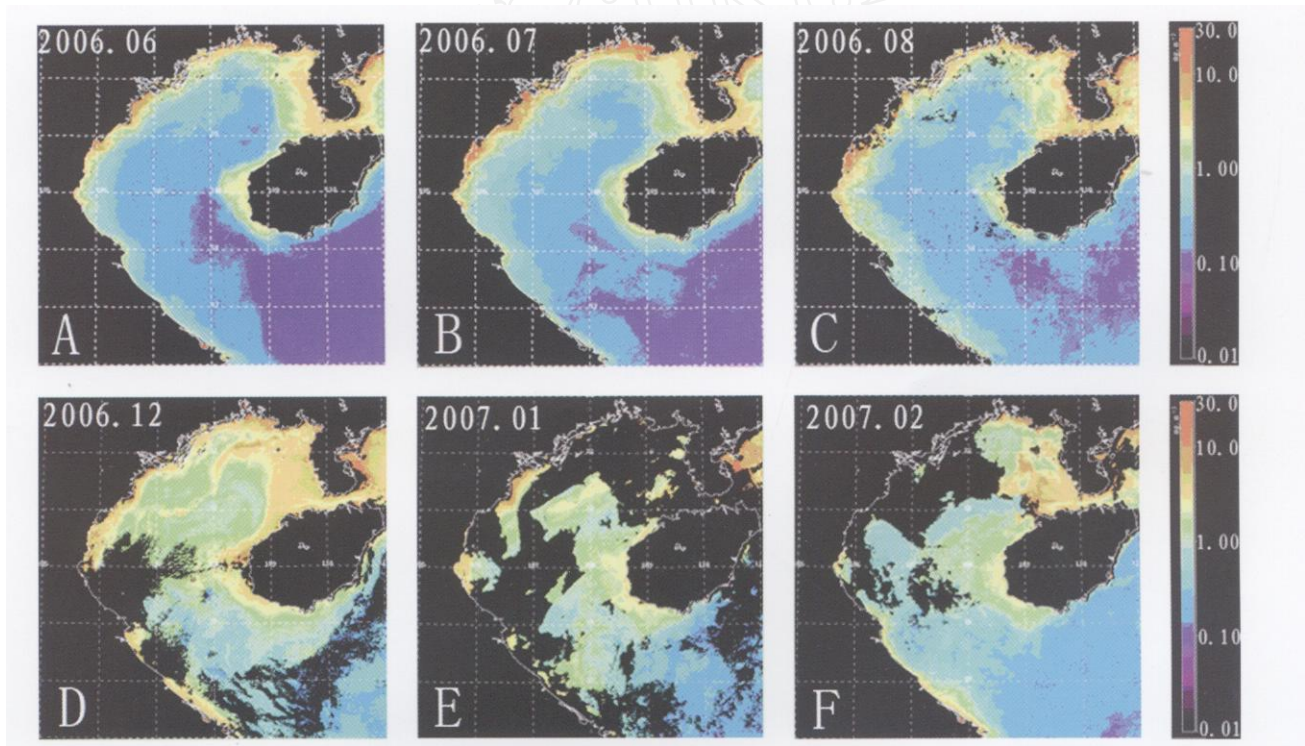


图 5 北部湾表层叶绿素月平均分布图
Fig.5 Monthly averaged MODIS Chl-a images in the Beibu Gulf

夏季北部湾海域 SST 分布较为均匀,一般为 30 ℃ 左右,水平温度梯度不明显.沿岸温度稍微高于海湾中部(图 4A~C).西南风最强的 7 月,北部湾口门越南一侧沿岸、海南岛南部与东南部沿岸均出现相对低温

带,海南岛西侧及中央海域的北部湾口门,则发育了一支自南向北延伸的暖水舌(图 4B).

冬季北部湾海域的 SST 近岸低于远岸,北部低于南部.北部湾口门海南岛一侧有明显暖水舌入侵,其舌

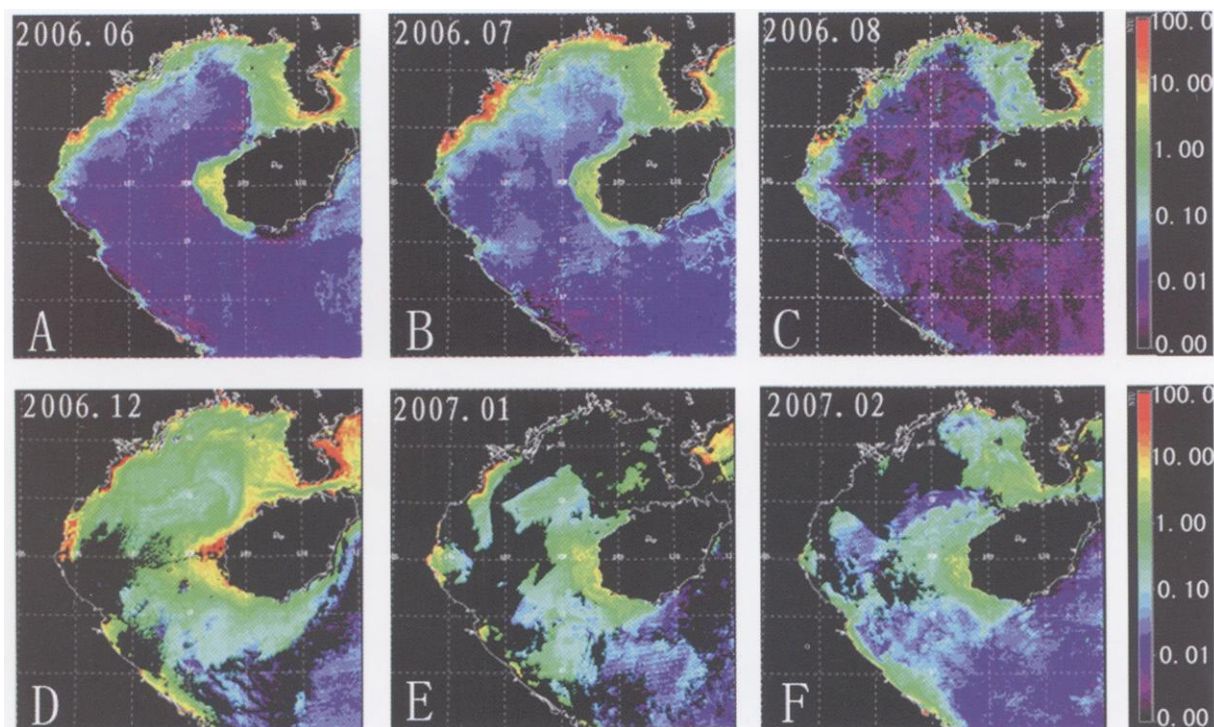


图 6 北部湾浊度月平均分布图

Fig. 6 Monthly averaged MODIS Turbidity images in the Beibu Gulf

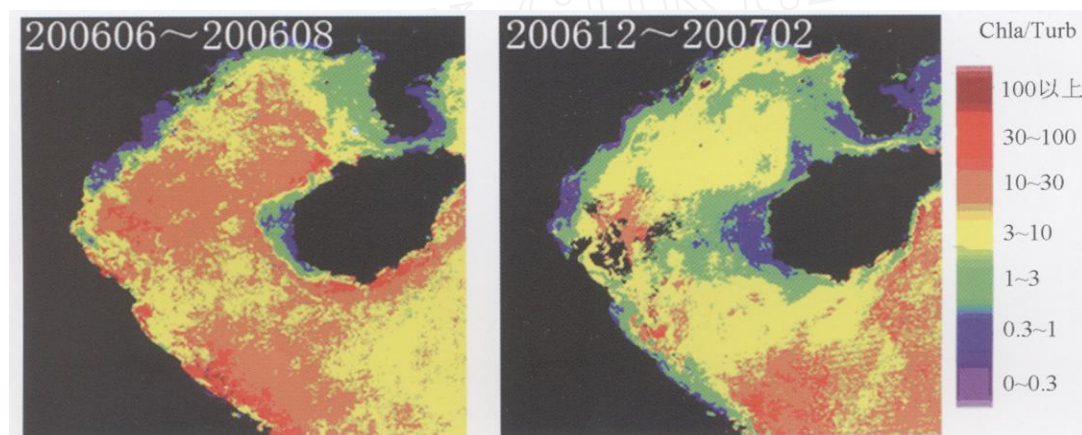


图 7 夏冬季叶绿素-浊度比值分布

Fig. 7 Seasonal averaged MODIS images showing the distribution of K (ratio of Chl-a and Turbidity) in Beibu Gulf

状前锋可达湾顶. 此格局在 12 月最为明显, 暖水舌与邻近水体有 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差 (图 4D). 1 月, 整个北部湾海域的 SST 都有较大幅度下降, 北部沿岸海域降至 $16\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$, 口门海南岛一侧暖水舌的 SST 下降到 $22\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但分布格局基本不变 (图 4E). 到 2 月, 整个北部湾海区开始回暖, 温度最低的北部沿岸海域升到 $18\sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$, 口门 SST 可达 $25\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, 由于越南一侧升温相对较快, 形成了暖水团自口门整体向北推进的局面 (图 4F).

2.2 叶绿素

北部湾海域夏季与冬季表层叶绿素的分布趋势大致相同, 都存在近岸高与远岸低的分布特征. 西北沿岸河口区的叶绿素可高达 $8.0\sim 10.0\text{ mg/m}^3$, 琼州海峡西口和海南岛西部沿岸也存在稳定的叶绿素高值区, 叶绿素浓度范围约为 $1.0\sim 3.5\text{ mg/m}^3$ (图 5 A~C). 北部湾口门与口外的开阔海区, 叶绿素低到 1.0 mg/m^3 以下且分布均匀.

夏季, 北部湾中央海域与口外开阔海域的叶绿素浓度普遍偏低, 但从 6~8 月略有增大趋势. 北部湾西侧沿岸流的叶绿素高值区发育一系列东向扩散的羽状

舌,其中,红河口外的羽状舌向东偏南扩散到白龙尾岛一带。冬季,北部湾中央海域和口外开阔海域的叶绿素浓度值较之夏季显著增大,北部湾东侧沿岸流叶绿素高值区发育一系列西向扩散的羽状舌。粤西沿岸流的叶绿素高值区也经琼州海峡向西扩展,形成琼州海峡西口 30 m 以浅水域的叶绿素高值区,并沿 30 m 等深线,在北部湾北部沿岸流外缘发育一东北-西南走向的 S 型叶绿素高值带,其浓度约为 $1.2 \sim 4.0 \text{ mg/m}^3$ (图 5D, E)。至 2 月,北部湾中央海域和口外开阔海域的叶绿素浓度逐渐降低与接近,琼州海峡西口和海南岛西侧的高值区亦有缩小趋势(图 5F)。

2.3 浊度

北部湾海域表层浊度具有与表层叶绿素类似的时空分布特征,基本为沿岸高与远岸低,冬季高于夏季。夏季,红河口、琼州海峡西口沿岸、海南岛西部沿岸均存在浊度高值区,越南红河口外羽状舌东向扩散,中央海域浊度值低于 0.1 NTU。各区浊度均在 7 月达到夏季最高,8 月有不同程度的回落(图 6A~C)。冬季的 12 月,琼州海峡西口沿岸、海南岛西部沿岸的浊度高值区及其羽状舌向西扩展,形成一较为宽阔的高浊度带,整个海区的浊度值与夏季相比明显升高(图 6D)。这种分布特征一直维持到 1 月(图 6E)。进入 2 月后,琼州海峡西口沿岸、海南岛西侧沿岸,以及中央海域的浊度均有一定幅度的下降,其中口门和口外海区的浊度值已与夏季时没有明显的差别。

3 讨论

3.1 区域海洋学背景

北部湾海区 SST、表层叶绿素和表层浊度的分布特征同水深、风场及环流等背景因素有密切的联系:(1) 与水深较大的北部湾中央海域相比,环北部湾的沿岸浅水区域的陆源和底床物源影响,以及混合作用与相关混合锋等水动力结构的明显影响,左右了近岸与远岸水域的差异现象。(2) 北部湾环流具有相当成分的密度流存在,并受到季节性的风生环流影响^[19-20]。南海高密水终年由口门中部与东侧流入北部湾,低密度的越南沿岸流则从口门西侧流出北部湾,琼州海峡则终年以西向流占优势,气旋式环流占全年的主导地位^[21-24]。冬季的东北季风加强了气旋式环流的优势地位;夏季的西南季风则叠加了反气旋式的风生环流^[19-20]。

3.2 SST 分布的调控机制

夏季整个海区受太阳辐射的影响而升温, SST 分布较为均匀,等温线水平梯度不明显,一般未能表现出

锋面和环流等作用。西南风影响强烈的 7 月,才在北部湾口门越南一侧沿岸、海南岛东南至西南沿岸海域,出现上升流所致的相对低温带。6 月在北部中越分界线一带也斑状分布低温区,可能与该区大潮差和岛群背景下的潮混合作用有关。

冬季由于整个海区 SST 等温线水平梯度大,充分表现出锋面和环流的作用。水深低于 30 m 的环北部湾浅水海域,垂向混合作用强,水温随海岸带气候等因素变化显著^[21],出现低温低盐的沿岸水以及外缘的混合锋。低温的沿岸水沿琼州海峡、广西沿岸到越南沿岸,形成东北风驱动下逆时针旋转的沿岸流。与此对应,逆时针旋转的气旋式环流引导南海的暖水北上,沿深槽呈舌状楔入海南岛西岸至北部湾中央海域的大片海域。由于混合条件等区域差别,沿环流方向的 SST 梯度还是出现波动:12 月~次年 1 月北部湾西侧的越南沿岸流,出现下游的西北-东南向岸段一带的 SST 低于上游的红河口岸段的现象,而北部湾东侧的暖水舌,也出现海南岛西南海域的 SST 高于口外开阔海域的现象。

3.3 叶绿素分布的调控机制

在相对稳定的光照与温度条件下,叶绿素浓度的变化主要受水体中营养盐的制约,而营养盐的分布受海流与混合状况的影响^[4]。夏季北部湾大部分区域的表层叶绿素浓度值较低且分布较为均匀,仅在沿岸的狭窄带状海域存在高值区。这是由于夏季是南海周边地区的雨季,有超过 50 % 年径流量的淡水通过诸多大小河流注入海洋^[9],同时也将大量陆源营养物质输送到沿岸流。该季节越南一侧沿岸叶绿素高值区所发育一系列东向扩散的羽状舌,显然受风生漂流所调控。在北部湾中央海域,表层增温显著且水平分布均匀,垂直对流混合较弱,水体出现层化现象,形成温跃层(20~30 m 水层)。在跃层之下的叶绿素浓度较高,30 和 50 m 层的浓度比 20 m 以浅的水层分别高 2.6 和近 4 倍^[1]。温跃层和层化现象限制了下层营养盐的向上输运和浮游植物的生长,使表层叶绿素浓度较低。在海南岛西侧浅滩,南海次表层高密水的输入以及浅滩水体的强混合,有利于将下层营养盐输送到表层,维持浮游植物良好生长,故出现较大面积的叶绿素高值区。而北部湾口门越南一侧沿岸、海南岛东南至西南沿岸海域的上升流,也有利于将下层高营养盐水体输送到沿岸带,维持沿岸呈条带状分布的叶绿素高值带^[22]。

冬季水温的降低与强而稳定的东北风相作用,导致中央海域层化现象减弱,垂向混合较夏季充分,为光合浮游植物生长提供了丰富的营养物质^[6],叶绿素浓度较之夏季有明显的升高。在南海次表层高密水输运、

浅滩水体的强混合,以及西向为主的风生漂流影响下,海南岛西侧浅滩叶绿素高值区面积远大于夏季。沿岸流聚集了近岸输入、底部混合,以及粤西沿岸流经琼州海峡西向输入等来源的营养物质,维持了环北部湾条带状分布的沿岸叶绿素高值带。琼州海峡西口沿北部湾北部沿岸流外缘所发育的 S 型叶绿素高值带,与低温低盐沿岸水外缘的混合锋基本吻合。

3.4 浊度分布的调控机制

浊度主要反映水体中的悬浮体特征,悬浮体分布则与径流、环流、潮流、波浪及水深等动力因素密切相关,也与悬浮泥沙、浮游植物等物质来源有关,是各种自然条件的综合反映。由于浊度的分布特征和叶绿素有一定的相似性,本文尝试利用叶绿素与浊度的比值来探讨浊度调控机制的区域分布。将叶绿素与浊度的比值表示为 K 。2006 年夏季和冬季的 K 值分布见图 7。总体分布特征是,近岸海域 K 值较小(0~0.3),远岸海域 K 值较大(3~100 以上),表明悬浮泥沙是影响近岸海域浊度的主要因素,浮游植物是影响远岸海域浊度的主导因素。

K 值分布图显示,夏季琼州海峡东口、海南岛西侧浅滩、红河口及其邻近区域等海域的 K 值介于 0.3~1.0 之间(图中为蓝色区域),表明该类海域浮游植物对浊度的贡献因素较小,强动力环境引起的底层沉积物再悬浮,加之河流入海所输送的陆源悬浮泥沙,构成了悬浮体的主要成份^[25],浮游植物等所占比例则相对较低。琼州海峡西口沿岸海域(图中为绿色区域), K 值介于 1~3 之间,则表明沿岸流悬浮体的成份已经有所改变,浮游植物的比例上升,悬浮泥沙的比例则下降。 K 值介于 3~10 间(图中为黄色区域)为沿岸流与中央海域的过渡带,其中红河口一带以及北部湾口门越南一侧,均出现该带向东舌状延伸趋势,表现为两条东向跨越中央海域的物质输运通道。中央海域的 K 值一般介于 10~30 间(图中为褐色区域),悬浮体中主要的成份为浮游植物,悬浮泥沙比例已经很低。北部湾口门越南一侧沿岸、海南岛东南至西南沿岸海域的上升流海域,还有海南岛洋浦港外海域,成片出现 K 值达 100 以上(图中为红色区域)的浮游植物高度控制海域。

冬季, K 值介于 0.3~1.0 之间的悬浮泥沙主控海域(图中为蓝色区域)中,琼州海峡东口、海南岛西侧浅滩等相比夏季明显向西扩展,红河口及其邻近区域则向南扩展, K 值介于 1~3 之间(图中为绿色区域)的环北部湾沿岸流,也出现向西或向南扩展的趋势。冬季悬浮泥沙主控水舌的运动受到整个北部湾气旋式环流与局域风生流的共同影响,除强化了沿岸流外,还发

育了北部沿岸流外缘和海南岛西侧浅滩两条西向跨越中央海域的物质输运通道。在中央海域,伴随着混合作用的加强,浮游植物的大量繁殖导致叶绿素浓度上升,活跃的泥沙再悬浮也导致悬浮泥沙影响增加,结果该海域的大部分的 K 值为 3~10(图中为黄色区域),悬浮泥沙比例明显高于夏季。 K 值达到 100 以上(图中为红色区域)的浮游植物高度控制海域,仅零散分布在口门西部越南一侧海域。

4 结 论

夏季 SST 分布较为均匀,等温线梯度不明显;冬季等温线自沿岸向外出现较为明显的温度梯度,湾北部最低,湾中至湾北中部沿海南海岛一侧出现暖水舌,反映了气旋式环流的影响。

沿岸海区的表层叶绿素高于离岸海区。夏季水体出现层化,中央海域的叶绿素值较低;冬季水体垂向混合增强,为上层水体提供更多营养物质,使叶绿素浓度整体水平明显高于夏季。

浊度的分布特征与叶绿素有一定的相似性,叶绿素-浊度的比值系数 K 表明沿岸高浊度带主要是由陆源输送的悬浮泥沙和底层沉积物再悬浮所致,浮游植物的影响较小;从近岸到中央海域 K 值变化说明在离岸较远的海域,浮游植物成为水体悬浮物质的主要组成之一。夏冬季存在分别从东西两方向跨越中央海域的横向物质输送通道。

致谢:承蒙厦门大学近海海洋环境国家重点实验室张彩云、商少凌二位老师在 MODIS 数据处理方面提供的帮助,以及黄凌风、孙振宇老师在北部湾现场实测数据,谢燕双在 QuikSCAT 风场数据方面的支持,谨此表示感谢!

参考文献:

- [1] 刘子琳,宁修仁,蔡昱明. 北部湾浮游植物粒径分级叶绿素 a 和初级生产力的分布特征[J]. 海洋学报:中文版, 1998,20(1):50-57.
- [2] Tang Danling, Hiroshi Kawamura, Ming-an Lee T D, 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, 2003,85:475-483.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Chen Zhiqiang, Hu Chuanmin, Frank Muller-Karger. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250

- m imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109:207 - 220.
- [6] Anatoly A, Gitelson, John F Schalles, Christine M Hladic. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries, Chesapeake Bay case study[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109:464 - 472.
- [7] 时伟荣, 沈焕庭, 李九发. 河口浑浊带成因综述[J]. 地球科学进展, 1993, 8(1): 8 - 13.
- [8] 沈焕庭. 我国河口最大浑浊带研究的新认识[J]. 地球科学进展, 1995, 10(2): 210 - 212.
- [9] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报: 中文版, 2003, 25(6): 1 - 8.
- [10] 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.
- [11] 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: 503 - 519.
- [12] NASA, Ocean Color Web. The Chl_a concentration [EB/OL]. <http://seadas.gsfc.nasa.gov>.
- [13] 厦门大学海洋遥感与数值模拟研究组. NASA MODIS 浊度 [EB/OL]. <http://ois.xmu.edu.cn/modis/modis-turb.htm>.
- [14] 吴荻. 福建近海水质环境遥感数据与现场生态浮标数据的对比[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [15] PO. DAAC. JPL. Sea winds on QuikSCAT [EB/OL]. <http://podaac.jpl.nasa.gov>.
- [16] 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 [C]//胡建宇, 等主编. 北部湾海洋科学研究论文集 (第一辑). 北京: 海洋出版社, 2008.
- [17] 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 [C]//胡建宇, 等主编. 北部湾海洋科学研究论文集 (第一辑). 北京: 海洋出版社, 2008.
- [18] Sasaoka Kosei, Saitoh S, Asanuma I, et al. Temporal and spatial variability of chlorophyll_a in the western subarctic Pacific determined from satellite and ship observations from 1997 to 1999[J]. Deep Sea Research, 2002, 49(24/25): 5557 - 5576.
- [19] 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 (第一册) [R]. 1964.
- [20] 俎婷婷. 北部湾环流及其机制的分析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [21] 苏纪兰, 主编. 中国近海水文 [M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 293.
- [22] 钟欢良. 北部湾北部春季环流分析[J]. 海洋通报, 1995, 14(1): 81 - 85.
- [23] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 11 - 23.
- [24] 杨士瑛, 陈波, 李培良. 用温盐资料研究夏季南海水通过琼州海峡进入北部湾的特征[J]. 海洋湖沼通报, 2006, 1: 1 - 7.
- [25] 杨克红, 初凤友, 杨海丽, 等. 海南岛东西陆架秋季悬浮体分布特征对比[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(8): 12 - 15.

Seasonal Variations of Sea Surface Temperature, Chlorophyll-a and Turbidity in Beibu Gulf, MODIS Imagery Study

HUANG Yi-chen, LI Yan*, SHAO Hao, LI Yong-hong

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This study described temporal and spatial variations of sea surface temperature (SST), chlorophyll-a (Chl_a) and turbidity (Turb) distributions in the Beibu Gulf using MODIS derived images from June 2006 to August 2006 (summer) and from December 2006 to February 2007 (winter). The ratio of the chlorophyll-a and turbidity was introduced to trace the routes of suspended particulate matter. The results reveal significant seasonal features. In summer, warm surface water distributes evenly in the whole gulf while Chl_a and Turb concentrations are relatively lower and uniformity. The turbid coastal waters fringed the gulf are strongly related to river-output and re-suspended sediments, and the phytoplankton dominated waters are linked with upwelling area. In winter, the cold surface water is keeping on the northwest part while the tongue shape warm water is coming from southwestern gulf. Chl_a and Turb concentrations are higher than in summer because of intensified vertical mixing, as well as heavy input of suspended sediments and others from the Qiongzhou Strait. The distributions of ratio of the chlorophyll-a and turbidity also indicate two eastward particulate transporting routes across the gulf in summer and two westward routes in winter.

Key words: Beibu Gulf; SST; Chl-a; turbidity; distribution; MODIS