

海南岛西岸上升流与暖池的数值研究*

Numerical Study on the Upwelling and Warm Pool off the Western Coast of Hainan Island

高劲松¹,陈波¹,何小英¹,侍茂崇²

GAO Jing-song¹,CHEN Bo¹,HE Xiao-ying¹,SHI Mao-chong²

(1. 广西科学院 广西近海海洋环境科学重点实验室,广西南宁 530007;2. 中国海洋大学,山东青岛,266003)

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Environment Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266003, China)

摘要:【目的】进一步探讨海南岛西岸的上升流与暖池的特征及生成机制。【方法】首先构建更为全面的控制模型(控制实验),包括日平均风场、热通量、侧边界通量、潮汐强迫以及河流径流等强迫场,然后在控制实验基础上,构建无潮汐强迫、无热通量强迫、无季风强迫等3个敏感性实验来分析3种强迫因子对海南岛西岸上升流与暖池的作用。【结果】夏季海南岛西岸存在上升流,该上升流受热通量和潮混合共同控制,缺乏其中任何一项上升流都会消失,而西南季风起反作用。另外,海南岛西岸在冬半年为暖池控制,秋季更为显著。东北季风引起的垂直混合与潜热通量对暖池起相当作用,ENSO事件对暖池的强度也有一定影响。【结论】控制实验结果与“908”调查结果及历史观测数据吻合较好,在流场与水团验证方面效果理想。另外,敏感性实验结果得出了比前人更完善的海南岛西岸上升流与暖池生成机制的观点。

关键词:海南岛西岸 上升流 暖池 数值模型(POM) 敏感性实验

中图分类号:P731.21 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)04-0331-07

Abstract:【Objective】This study aims to further reveal the characteristics and formation mechanisms of the upwelling and warm pool off the western coast of Hainan Island.【Methods】The control model (control experiment) is firstly built, forced by the forcing of daily averaged wind and heat flux, river discharges, tidal harmonics, as well as the lateral flux. And then three sensitive experiments without tidal harmonics, heat flux or monsoon wind are constructed to analyze the effects of these three forcing factors on the upwelling and warm pool off the western coast of Hainan Island.【Results】The upwelling off the western coast of Hainan Island exists in summer and will disappear without the forcing of heat flux or tidal mixing, indicating the combined dominant effect of heat flux and tidal mixing on this upwelling, whereas the southwesterly wind plays the negative role. Additionally, there is a warm pool off the western coast of Hainan Island in winter boreal, and the strength of warm pool is stronger in fall than that in winter. The vertical mixing induced by northeasterly wind has the considerable effect as the latent heat flux on the warm pool, and the events of ENSO also affect the strength of warm pool.【Conclusions】The results of control model are consistent with the in situ results from project "908" and historical observation, including the current field and water mass validations, and new findings about the formation mechanisms of the upwelling and warm pool off the western coast of Hainan Island are achieved based on the sensitive experiments.

Key words: western coast of Hainan Island, upwelling, warm pool, numerical model (POM), sensitive experiments

收稿日期:2014-04-02

修回日期:2014-06-02

作者简介:高劲松(1984-),男,助理研究员,博士,主要从事近海环流与物质输运研究。

* 广西自然科学基金重大项目(2012GXNSFEA053001)和广西科学院基本科研业务费项目(13YJ22HY06)资助。

【研究意义】海南岛位于北部湾的东部,介于 $18^{\circ} \sim 20^{\circ}N, 108.3^{\circ} \sim 111^{\circ}E$ 。上升流作为环流的重要组成部分,对生态系统有重要影响。上升流通常把深层丰富的营养盐带到上层海洋,有助于鱼类的大量繁殖,因此上升流区通常对应著名的渔场。目前,海南岛东岸的上升流研究文献较多,但西岸的上升流研究较少。另外,冬季暖池的存在对于调节整个北部湾的气候有重要作用。因此,深入研究海南岛西岸的上升流与暖池对于海洋经济发展、资源开发有重要意义。

【前人研究进展】海南岛西岸的水文特征,离不开北部湾环流的大背景。而北部湾环流 60 年来存在较多争议点,例如夏季环流是气旋式^[1~3]还是反气旋式^[4~7],是季风驱动^[8~11]还是密度梯度^[1~2],或者是琼州海峡的西向水量或位涡驱动^[3,11~13],以及海南岛西北岸流在冬季是南向还是北向等。文献[14~17]应用 POM 模型构建了南海西北部三维斜压环流模型,深入研究北部湾冬、夏季环流结构、特征及机制,分析北部湾冷水团的生消过程及生成机制,所得结果与“908”观测数据吻合较好。2008 年 Lu 等^[18]通过 1960 年夏季中越联合调查的 $19^{\circ}N$ 断面理化要素分布以及气候态卫星 SST 分布,提出夏季海南岛西岸存在上升流的观点。同时通过数值实验认为潮混合是上升流的诱因,而西南风对上升流起反作用,但并没有分析热通量对该上升流的影响,而且使用的现场调查数据为 20 世纪 60 年代的结果。2012 年 Li 等^[19]通过 WOD,卫星 SST 以及 2006~2007 年的“908”专项断面调查数据提出冬半年海南岛西岸为暖池控制的观点,并通过一维混合层模式(PWP)认为海南岛西岸的地形风改变了潜热通量从而导致暖池的生成,但由于该模式缺乏热对流项,因此海南岛西岸暖池的生成机制需进一步深挖。**【本研究切入点】**在北部湾环流结构与机制已得到阐释的大背景下,深入分析海南岛西岸的上升流与暖池具备了可行性与稳定性。**【拟解决的关键问题】**本文借助三维数值模型,应用“908”的观测结果进行验证,在风场、热通量、潮混合、侧边界通量以及河流径流的强迫下,深入分析海南岛西岸上升流与暖池的生成机制,包括热通量对上升流的作用,以及热对流作用下海南岛西岸暖池的生成机制。

1 模型设置

采用普林斯顿大学海洋模型 POM^[20]来模拟北

部湾环流,从 2005 年 12 月 1 日开始积分到 2007 年 12 月 31 日。POM 是解决原始控制方程的三维数值模型,具有自由表面变化和 2.5 阶湍封闭模型^[21]。模型的计算区域如图 1 所示,水平采用曲线坐标,网格数为 399×399 ,水平分辨率从西北向的 0.9km 向东南向的 2km 过渡,垂向上分为 21 层。水深数据来自 ETOPO2v2(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>)。模型中最小水深设为 10m,整个计算海区中最大水深为 2129m,位于海区的东南部。为了突出水深变化,海南岛外海水深大于 200m 的区域都被标为 1 个颜色。沿岸的圆圈代表河流入海口, QS 代表琼州海峡, HSQ 代表越南的 Hoanh Son Quan 岬角, 1、2、3 代表与模拟结果比对的 3 个观测断面(2007 年 4 月), M3、M4、M5(粉色圆圈)代表流速观测站,其中水深场数据来源于 ETOPO2V2。

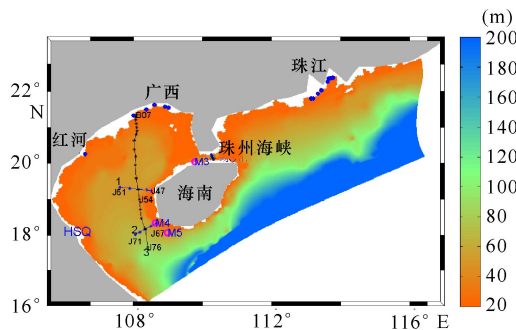


图 1 模型计算区域

Fig. 1 The model domain

日平均的风场数据(<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/air-sea/seawinds.html>)采用耦合多个卫星散射计和数值模型结果的全球分布的风场数据,网格分辨率为 0.25° ^[22]。日平均热通量数据来源于 Woods Hole 研究所的 OAFflux 项目(<http://oaf Flux.whoi.edu/descriptionheatflux.html>),该数据是多个数据库的合成产品,网格分辨率为 1° ^[23]。本文不考虑蒸发和降水的作用。

珠江径流量年平均径流量最大值约为 10300^[24],珠江月平均径流量变化如表 1 所示。根据 Xue 等^[25]和 Wong 等^[26]的研究成果,珠江口可分成 8 个口门,它们的径流量百分比例从西向东依次为 6.0, 6.2, 6.1, 28.3, 11.2, 6.4, 17.3 以及 18.5^[25]。越南红河的月平均径流量采用 Van 等^[27]的结果,而北部湾北部(即广西沿岸)6 个河流气候态的月平均径流量采用观测结果见表 1。

表 1 模型中河流的气候态月平均径流量

Table 1 Climatological monthly discharges of the major rivers in the model

河流 Rivers	月平均径流量 Monthly discharge($\times 10^8 \text{ m}^3$)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
珠江 Pearl River	94.5	91.3	110.8	228.2	453.1	446.6	560.7	469.4	299.9	218.4	157.3	127.1
南流江 Nanliu River	1.50	1.64	1.91	5.39	6.27	11.5	10.5	14.4	7.30	3.55	2.59	1.71
钦江 Qin River	0.37	0.33	0.49	1.22	1.67	3.49	3.76	4.27	1.86	0.96	0.71	0.47
防城河 Fangcheng River	0.34	0.35	0.48	0.78	1.42	2.51	4.11	3.49	2.00	1.08	0.73	0.43
大风江 Dafeng River	0.22	0.20	0.28	1.06	1.43	3.42	3.93	4.46	1.79	0.75	0.48	0.28
茅岭江 Maoling River	1.06	0.90	1.10	2.31	2.65	3.53	4.43	4.93	4.06	2.23	1.04	0.78
北仑河 Beilun River	0.62	0.62	1.00	1.66	3.32	4.48	6.54	5.12	2.82	1.78	0.83	0.54
红河 Red River	6.53	6.53	6.53	6.53	7.62	16.3	32.6	49.0	42.5	30.0	19.1	11.4

开边界采用 6 个主要分潮的调和常数($K_1, O_1, P_1, M_2, S_2, N_2$),数据来自于美国俄勒冈大学的潮汐数值模型结果(<http://volkov. oce. orst. edu/tides/Ys. html>)。该模型在中国海的水平分辨率为 $1/30^\circ$,其中 K_1 和 M_2 的均方根误差(RMS)分别为 1.63cm 和 4.16cm^[28]。开边界的侧向通量采用全球 $1/12^\circ$ HYCOM+NCODA 的数模结果,包括日平均的水位、温度、盐度、正压流速(垂向平均)和斜压流速,本文选取了 2005 年 12 月 1 日到 2007 年 12 月 31 日的数据(<http://hycom. org/>)。与文献[24]的方法一样,采用 Flather^[29]的开边界条件来设置正压流速和 水位;而斜压流速则采用重力波辐射条件和三点平滑法;开边界的温度和盐度则采用迎风格式。

模型的初始条件设为全球 $1/12^\circ$ HYCOM+NCODA 的 2005 年 12 月 1 日的温度和盐度,由于潮汐的存在,水位和流速从 0 开始积分。为了满足 CFL 条件,内模(斜压)和外模(正压)的时间步长分别为 20s 和 1s。在积分 3 个月(即 2006 年 3 月 1 日以后),模型输出日平均的结果。

2 模型稳定性分析

模型的稳定性在文献[14~17]都有提及,包括流速断面的验证、表层水团分布的验证、3 个断面温度与盐度分布的验证、琼州海峡西段垂向流速剖面的验证等,因此本文仅描述未提及的模型验证。图 2 为 1960 年的漂流瓶轨迹图,其中粉色点为漂流瓶的释放位置,琼州海峡内的蓝色点代表琼州海峡西端释放的漂流瓶的终点位置。由图 2 可以看出,从 9 月到来年 1 月,北部释放的漂流瓶基本在南部的越南沿岸收

集到,这与冬半年北部湾的气旋式环流相对应^[17]。而从 2~4 月,北部湾北部释放的漂流瓶基本在北部湾西岸找到,这与春季的气旋式环流一致。从 6~8 月,漂流瓶的移动轨迹显示夏季北部湾北部的环流呈气旋式^[16],而 6 月和 7 月琼州海峡西端释放的 10 个漂流瓶有 5 个最终在海峡的东端找到,这与琼州海峡流较强日震荡特征与夏季月平均流为东向的特征相符合^[14]。说明模型不仅在模拟水团分布上效果较好^[14],而且在模拟上升流方面也表现较佳,如图 3 中的 5 个低温区所示,本文模拟的南海西北部上升流分布与前人研究结果基本一致。其中海南岛西部的上升流对应 Lu 等^[18]提到的上升流,而琼东、琼州海峡东岸、粤西沿岸、粤东沿岸的上升流则在苏纪兰等^[30]研究中都有提及。

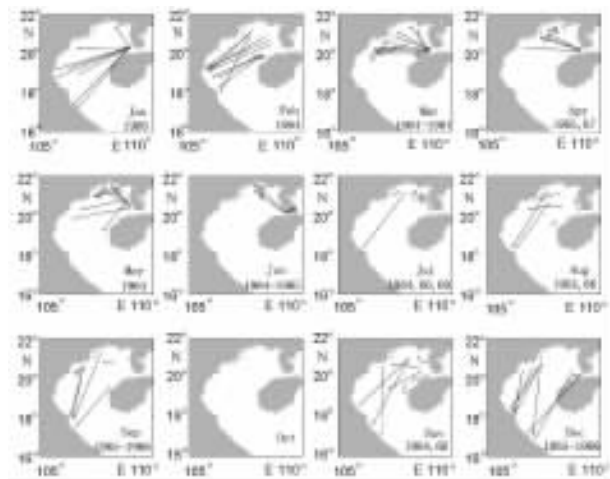


图 2 1964~1969 漂流瓶移动轨迹

Fig. 2 The trajectory of drift bottles between 1964 and 1969

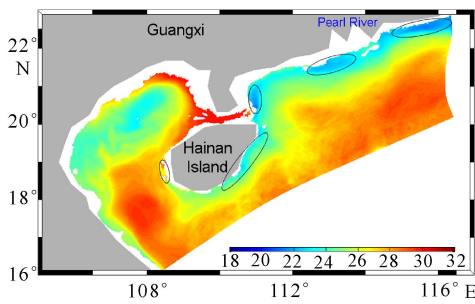


图3 模型模拟的2006年7月20m层水温分布

Fig. 3 The modeled temperature at 20 m level in July of 2006

3 模型数值结果分析

3.1 卫星 SST 数据

图4(a)~(d)分别代表2006年的4月,7月,10月以及2007年的1月的结果。图4(b)中的海南岛西岸断面所取位置参照“908”专项的断面J52—J56^[31]。卫星SST数据来自于Remote Sensing System(REMSS)的产品,其时间和空间分辨率分别为1d和~9km。北部湾的SST季节变化规律如图4所示。在春季(图4a),北部湾水温介于22~28°C之间,湾的西北部水温较低,而南部水温较高,其中南部的高温水可侵入到海南岛西北岸。在夏季(图4b),整个北部湾水温分布均匀,约30°C,其中在海南岛的西岸至东岸有低温水存在,分别与Lu等^[18]、“908”专项观测,以及颜廷壮^[32]和郭飞等^[33]提到的海南岛西岸以及东岸的上升流相对应,同时气候态的月平均SST显示该区域的低温水在7月和8月比较明显。在秋季(图4c),整个北部湾水温分布仍然较均匀,但比夏季低2°C左右,其中湾的西北部沿岸和海南岛的西岸存在高温水,而海南岛西岸的高温水与Li等^[19]提到的暖池相对应。在冬季,北部湾的水温在4个季节中最低,在湾北部降至18°C以下,而南部水温在24°C左右。

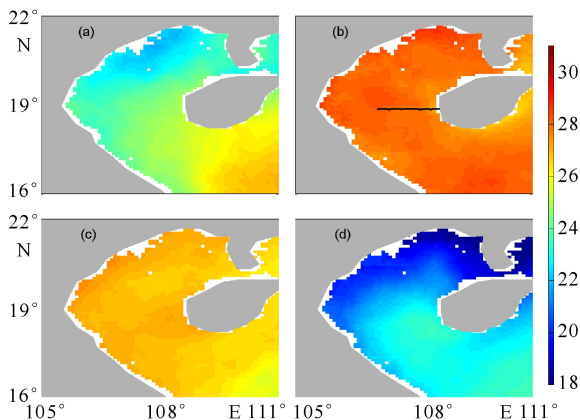


图4 北部湾内卫星SST的季节分布

Fig. 4 The seasonal distribution of remote sensing SST in Beibu Gulf

3.2 上升流数据

“908”专项2006年7月15日~8月7日在海南岛西岸的温度和盐度观测结果显示,该处存在向上爬升的等温线^[31](如图5),比Lu等^[18]提到的上升流位置偏西。本文模拟结果与“908”专项调查相似(如图6)。图6来自于4个数值实验结果,包括控制实验(6a和6e)、无潮汐强迫(6b和6f)、无热通量强迫(6c和6g)、无季风强迫(6d和6h)。其中图6e与6h中的正(负)值分别代表垂向速度向上(下),同时图中的垂向速度为原始数据放大1000倍后的效果。控制实验下,在~108.2°E附近有等温线爬坡现象(图6a),与较强的向上垂向速度相对应(图6e)。无潮汐强迫时,该处的等温线向下倾斜(图6b),同时垂向速度变为向下(图6f),即上升流变为下降流,说明潮混合对该上升流有控制作用,与Lu等^[18]结论一致。无热通量强迫时,海南岛西岸的上升流同样被下降流代替(图6c;6g),这是因为夏季热通量有助于温跃层形成进而保护下层的上升流。因此海南岛西岸上升流受热通量和潮混合共同控制,缺一不可,与Lu等^[18]的结论有所不同,这与其未进行热通量敏感性实验有关。另外,海南岛西岸上升流还受西南季风的影响,在无季风强迫时,该上升流的强度得到加强,最大向上垂向速度从 $7.3 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 8.6×10^{-5}

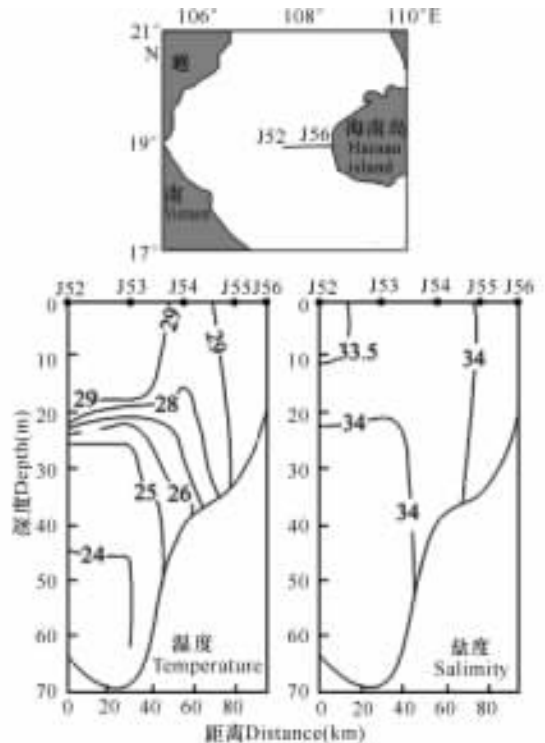


图5 “908”观测的2006年夏季海南岛西岸温度与盐度断面

Fig. 5 The cross sections of temperature and salinity off the western coast of Hainan Island in summer of 2006 from project “908”

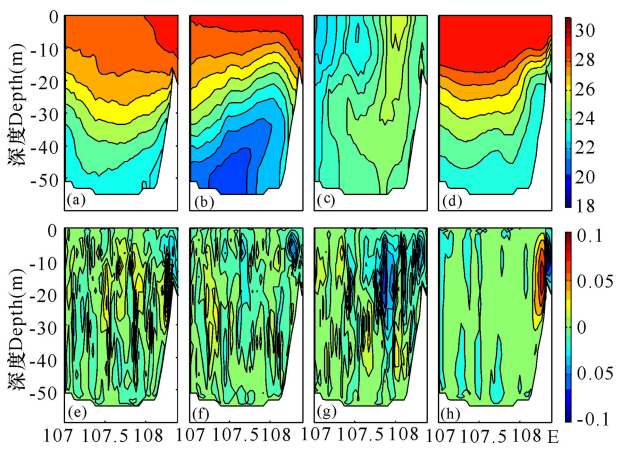


图6 18.9° N断面的水温(a~d)和垂向速度(e~h)分布

Fig. 6 The distribution of temperature (a~d) and vertical velocity (e~h) along the section 18.9°N $m \cdot s^{-1}$ (图6e;6h),而且上升流可抬升至近表层,说明西南季风对该上升流起反作用。

3.3 暖池数据

Li等^[19]根据气候态卫星SST发现海南岛西岸存在暖池,比周围温度高0.5~1.0°C,主要存在于10月到来年1月。该结论与本文的模拟结果一致,如图7所示,其中(a)~(d)分别为2006年10月,11月,12月以及2007年1月的温度分布结果。从图7可以看出海南岛西岸暖池在10月和11月较为强盛,在12月和来年1月逐渐减弱,并在2月消失。根据Li等^[19]的分析结果,潜热通量在海南岛西岸较小是暖池生成的关键,即使风应力为全场平均,暖池依然存在。图8为2006年10月北部湾表层水温在不同实验中的分布情况,其中(a)~(d)分别代表控制实验,无潮强迫,无热通量强迫以及无季风强迫。从图8可以看出,潮汐(图8b)对暖池的影响较小,而无热通量强迫时(图8c)暖池强度减弱较多,说明潜热通量对暖池的影响较大。无季风强迫时暖池基本消失(图8d),说明东北季风引起的垂向混合是暖池生成的关键因子。冬半年北部湾在东北季风作用下混合剧烈,但海南岛西岸的季风在陆地地形作用下风速减弱,从而导致垂向混合减弱,同时在潜热通量作用下形成了海南岛西岸的暖池,与Li等^[19]结论不一致,与该文采用的PWP数值模型缺乏热对流项有关。由于暖池与ENSO事件相关^[19],且2007~2008年为La Niña事件控制,因此随着季风的增强,表层潜热通量的变大使得暖池的温度有所下降,而计算结果表明,2006年10月和11月暖池的表层平均温度比2007年该时期的温度高1°C左右(暖池区域根据卫星SST及模式的水温分布情况,介于108.5°~109° E,以及广西科学 2014年8月 第21卷第4期

18.5°~19° N的海区)。

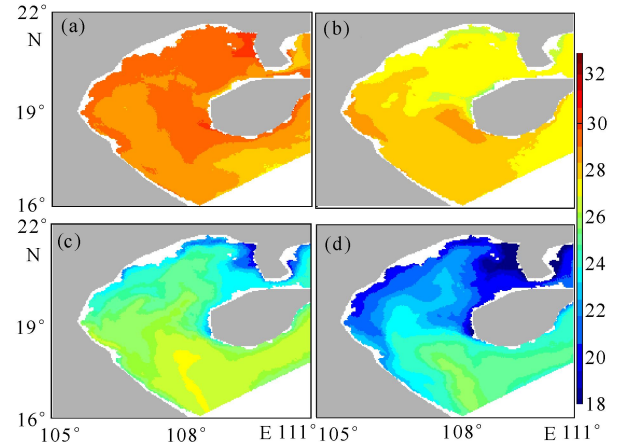


图7 北部湾表层水温分布

Fig. 7 The distribution of surface temperature in Beibu Gulf

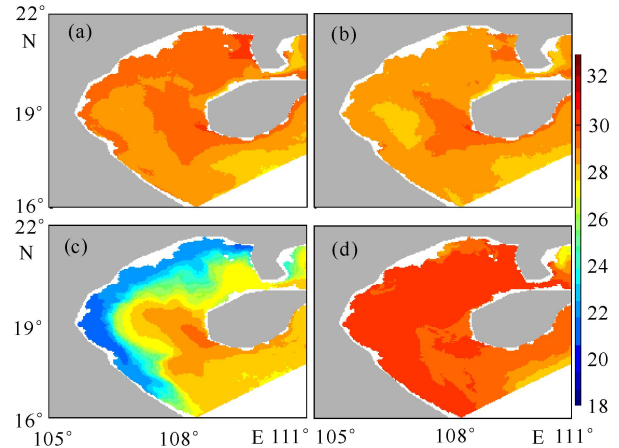


图8 北部湾2006年10月表层的水温分布

Fig. 8 The distribution of surface temperature in Beibu Gulf in October, 2006

4 结论

基于卫星SST,北部湾温度呈明显的季节变化特征,夏季温度最高,冬季最低,春季在湾西北部有大片的冷水存在。同时在夏季海南岛西岸存在明显的低温区,而在冬半年,尤其秋季海南岛西岸则存在暖池区。

海南岛西岸的上升流存在于20m层以下,该上升流受热通量与潮混合共同控制,缺乏其中任一强迫项,上升流将消失。西南季风起反作用,无季风作用时,最大向上垂向速度从 $7.3 \times 10^{-5} m \cdot s^{-1}$ 增加到 $8.6 \times 10^{-5} m \cdot s^{-1}$ 。

海南岛西岸在冬半年为暖池控制,秋季更为明显。东北季风引起的垂向混合与热通量对暖池起相当作用,无季风作用时,暖池基本消失。ENSO事件对暖池的强度有一定影响,2007~2008年的La Niña事件导致2006年10月、11月暖池的表层平均温度

比 2007 年同时期的温度高 1℃ 左右。

参考文献:

- [1] Xia H Y, Li S H, Shi M C. Three-D numerical simulation of wind-driven current and density current in Beibu Gulf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(4): 455-472.
- [2] 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.
Zu T T. Analysis of the current and its mechanism in Beibu Gulf[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [3] Wu D X, Wang Y, Lin X P, et al. On the mechanism of the cyclonic circulation in Gulf of Tonkin in the summer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: C09029. doi:10.1029/2007JC004208.
- [4] 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[R]. 北京: 国家科委, 1964.
Oceanic Comprehensive Survey Office of Ocean Group of State Science and Technology Commission. China-Vietnam Joint Beibu Gulf comprehensive survey report [R]. Beijing: State Science and Technology Commission, 1964.
- [5] 俞慕耕, 刘金芳. 南海环流系统与环流形势[J]. *海洋预报*, 1993, 10(2): 13-17.
Yu M G, Liu J F. South China Sea circulation system and situation[J]. *Marine Forecasts*, 1993, 10(2): 13-17.
- [6] 王道儒. 北部湾冷水团的动力-热力机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 1998.
Wang D R. Study of the dynamic-thermodynamic mechanic of Beibu Gulf cool water masses[D]. Qingdao: Ocean University of China, 1998.
- [7] 孙洪亮, 黄卫民, 赵俊生. 北部湾潮致、风生和热盐余流的三维数值计算[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(5): 561-568.
Sun H L, Huang W M, Zhao J S. Three-dimensional numerical simulation of tide-induced, wind-driven and thermohaline residual currents in Beibu Gulf[J]. *Oceanologia ET Limnologia*, 2001, 32(5): 561-568.
- [8] 刘凤树, 于天常. 北部湾环流的初步探讨[J]. *海洋湖沼通报*, 1980, 1: 9-15.
Liu F S, Yu T C. Preliminary study on the oceanic circulation in Beibu Gulf[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1980, 1: 9-15.
- [9] Manh D V, Yanagi T. A study on the residual flow in the Gulf of Tonkin[J]. *Journal of Oceanography*, 2000, 56: 59-68.
- [10] 郭忠信, 王文质. 北部湾风生环流的数值研究[J]. *热带海洋*, 1983, 2: 207-215.
Guo Z X, Wang W Z. A numerical study of wind-driven circulation in Beibu Gulf[J]. *Tropic Oceanology*, 1983, 2: 207-215.
- [11] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其机制分析[J]. *海洋学报*, 2003, 25: 1-8.
Yang S Y, Bao X W, Chen C S, et al. Analysis on the characteristics and mechanism of current system in west coast of Guangdong Province in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25: 1-8.
- [12] Shi M C, Chen C S, Xu Q, et al. The role of Qiongzhou Strait in the seasonal variation of the South China Sea circulation [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32: 103-121.
- [13] 杨士瑛, 陈波, 李培良. 用温盐资料分析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.
Yang S Y, Chen B, Li P L, et al. A study on the characteristics of water transport from the South China Sea to Beibu Gulf via Qiongzhou Strait in summer in terms of temperature and salinity data[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006, 1: 1-7.
- [14] 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): 979-993.
- [15] Gao J S, Shi M C, Chen B, et al. Responses of the circulation and water mass in Beibu Gulf to the seasonal forcing regimes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(7): 1-11.
- [16] Gao J S, Chen B, Shi M C. Summer circulation structure and formation mechanism in Beibu Gulf[J]. *Science China-Earth Science*, 2014, DOI:10.1007/s11430-014-4916-2.
- [17] 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 J S, Chen B. Analysis of the tidal current spectrum and study of residual current in northern Beibu Gulf [J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(1): 64-72.
- [18] Lu X G, Qiao F L, Wang G S, et al. Upwelling off the west coast of Hainan Island in summer; its detection and mechanisms [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L02604. doi:10.1029/2007GL032440.
- [19] Li J X, Wang G H, Xie S, et al. A winter warm pool southwest of Hainan Island due to the orographic wind wake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: C08036, doi:10.1029/2012JC008189.
- [20] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in three-dimensional coastal ocean models[M]. 4th ed. Washington, DC: Heaps N, AGU, 1987: 1-16.
- [21] Mellor G L, T Yamada T. Development of a turbulence

- closure model for geophysical fluid problems[J]. *Rev Geophys Space Phys*,1982,20:851-875.
- [22] Zhang H M, Bates J J, Reynolds R W. Assessment of composite global sampling; Sea surface wind speed[J]. *Geophysical Research Letters*,2006,33:L17714.
- [23] Yu L, Jin X, Weller R A. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed air-sea fluxes (OAF-lux) project; Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables [R]. Woods Hole Oceanographic Institution, OAF-lux Project Technical Report, 2008; 1-64.
- [24] Xue H J, Chai F, Pettigrew N R, et al. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109; C02017.
- [25] Xue H J, Chai F. Coupled physical-biological model for the pearl river estuary: A phosphate limited subtropical ecosystem [C]//ML Spaulding. In proceedings of the 7th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling. Vancouver; ASCE, 2002; 913-928.
- [26] Wong L A, Chen J C, Xue H J, et al. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters; 1. Simulations and comparison with observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108; C5, 3156.
- [27] van Maren D S, Hoekstra P. Seasonal variation of hydrodynamics and sediment dynamics in a shallow subtropical estuary; the Ba Lat River, Vietnam [J]. *Estuarine, Coast and Shelf Science*, 2004; 60; 529-540.
- [28] Zu T T, Gan J P, Erofeeva S Y. Numerical study of the tide and tidal dynamics in the South China Sea [J]. *Deep-Sea Res I*, 2008, 55; 137-154.
- [29] Flather R A. A tidal model of the northwest European continental shelf [J]. *Memories de la Societe Royale des Sciences de Liege*, 1976, 6(10); 141-164.
- [30] 苏纪兰, 袁业立. 中国近海水文 [M]. 北京: 海洋出版社, 2005
- Su J L, Yuan Y L. *Hydrography of China seas* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2005.
- [31] 陈照章, 胡建宇, 孙振宇, 等. 北部湾东部海区夏季和冬季温盐平面分布特征比较 [C]. 北部湾海洋科学研究论文集; 第 1 辑. 北京: 海洋出版社, 2009; 85-86.
- Chen Z Z, Hu J Y, Sun Z Y, et al. Sectional features of temperature and salinity in Beibu Gulf during July-August, 2006 [C]. The proceedings of the researches on the ocean science in the Gulf of Tonkin-Part I. Beijing: China Ocean Press, 2009; 85-86.
- [32] 颜廷壮. 中国沿岸上升流成因类型的初步分析 [J]. *海洋通报*, 1991, 10(6); 1-6.
- Yan T Z. Features and classification of coastal upwelling off China [J]. *Marine Science Bulletin*, 1991, 10(6); 1-6.
- [33] 郭飞, 侍茂崇, 夏综万. 琼东沿岸上升流二维数值模型的诊断计算 [J]. *海洋学报*, 1998, 20(6); 109-116.
- Guo F, Shi M C, Xia Z W. Two-dimension diagnose model to calculate upwelling off shore of the east coast of Hainan Island [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(6); 109-116.

(责任编辑:尹 闯)