

南海北部陆架区夏季上升流数值研究*

经志友^{1,2}, 齐义泉², 华祖林¹

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301)

摘要: 采用三维斜压非线性数值模式并结合卫星遥感资料分析, 对南海北部陆架区夏季上升流进行了初步研究。研究表明, 上升流是南海北部陆架区 6—9 月的一个规律性现象, 而不是个别年份的特殊现象; 海南岛东部沿岸及雷州半岛以东广州湾东南部一带海域(琼东上升流区)、汕头沿岸直至福建沿岸南日群岛附近海域(粤东上升流区)夏季表层及次表层海水均表现出明显的低温、高盐、高密等陆架上升流特征; 上升流中心主要位于海南岛以东清澜湾至七洲列岛之间 111°10'E、19°45'N 附近, 陵水湾至陵水沿岸 110°15'E、18°25'N 附近, 粤东汕头沿岸 116°45'E、22°50'N 附近及澎湖列岛以西 118°E、23°40'N 附近。同时通过对模拟结果与 QuikSCAT 风场的比较分析发现, 沿岸上升流与局地风场有着密切的关系, 夏季西南风及风应力旋度对琼东沿岸上升流的形成有着非常积极的作用; 而粤东沿岸风应力旋度较小, 但夏季西南风仍是诱发粤东沿岸上升流的重要因素之一。

关键词: 南海北部; 上升流; 数值研究; QuikSCAT 风场; 甚高分辨率红外辐射计 (AVHRR) 海表温度
中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2008)03-0001-08

Numerical study on summer upwelling over northern continental shelf of South China Sea

JING Zhi-you^{1,2}, QI Yi-quan², HUA Zu-lin¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

Abstract: Summer upwelling system over the northern continental shelf of the South China Sea is investigated with a three-dimensional baroclinic nonlinear numerical model forced by QuikSCAT winds. The modeling results show that the summer upwelling is a regular phenomenon during June-September in the area. The surface and subsurface water represent obvious continental shelf upwelling characteristics, such as low temperature, high salinity and high potential density in the east of the Hainan Island, the east of the Leizhou Peninsula and the southeast of the Zhangjiang Bay (the upwelling areas in the east of Hainan Island), and the inshore areas from the Shantou Coast to the Nanri Islands of Fujian province (the upwelling areas in the eastern Guangdong). The centers of the upwelling are mostly located at 111°10'E, 19°45'N between the Qinglan Bay and the Qizhou Archipelago of eastern Hainan Island, at 110°15'E, 18°25'N between the Lingshui Bay and Lingshui coast, at 116°45'E, 22°50'N of the Shantou inshore and at 118°E, 23°40'N of western Penghu Archipelago. The climatic satellite remote sensing data (AVHRR SST) also shows that the existence of summer upwelling over the northern continental shelf of the South China Sea, and the upwelling areas and centers are consistent very well with the modeling results. At the same time, the QuikSCAT winds are compared with an upwelling index, which indicates that the coastal upwelling has

收稿日期: 2007-07-09; **修订日期:** 2007-10-12。孙淑杰编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-201); 国家重点基础研究发展(973)计划(2006CB403604); 国家 863 计划(2006AA09A109); 国家自然科学基金项目(50679019 和 50009001); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金项目

作者简介: 经志友(1979—), 男, 江苏省扬州市人, 博士研究生, 主要从事近海环境及水动力学研究。

* IFREMER 提供了 QuikSCAT 风场资料, NOAA 提供了 WOA01 温盐资料, NASA 提供了 AVHRR SST 资料, SOC 提供了热通量资料, 在此一并表示感谢。

a close relationship with local wind fields. The southwest winds and wind stress curl during summer play very positive roles in inducing the coastal upwelling in the east of Hainan Island. Whereas the wind stress curl in the east of Guangdong inshore shows a little smaller during summer, the southwest wind is also one of the most important factors inducing the summer coastal upwelling in the east of Guangdong inshore.

Key words: northern South China Sea; upwelling; numerical study; QuikSCAT wind; AVHRR SST

南海是西北太平洋最大的半封闭式边缘海, 总面积约为 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 平均深度超过 2 000m。其北部拥有宽广的陆架区, 陆架区等深线分布基本与岸线平行, 呈东北-西南走向^[1,2](图 1)。该海区主要受东亚季风影响, 季节变化明显, 夏季盛行西南风, 风向大致平行于海岸线, 冬季则转为东北风^[3]。

南海北部陆架海域是我国近海主要的季节性上升流区之一^[4-5]。关于南海北部存在的上升流现象已有大量研究报道^[4-18]。早在 20 世纪 60 年代初, Wyrski^[6]便推测香港附近海域夏季可能出现局部暂时性上升流; Niino 等^[7]也指出夏季在海南岛东部海域及汕头以南局部海域有上升流发生。与此同时, 管秉贤等^[8]根据 1959—1960 年间全国海洋普查资料, 首次系统地分析了广东外海的夏季上升流现象, 指出在南海北部近岸存在有 3 个上升流区, 其位置分别在海南岛东岸、汕头沿岸一带以及广州湾以南雷州半岛以东海域; 并指出夏季西南风是沿岸上升流的主要驱动力。其后, 曾流明^[9]、于文泉^[10]、邓松^[11]、韩舞鹰等^[12]根据不同年份的海洋

调查资料分别对夏季粤东沿岸、七洲列岛附近海域、琼东沿岸等局部上升流现象进行了分析与研究。李立^[4,13]及洪启明等^[5]根据 20 多年来我国科学家在南海项目研究中得到的历史资料, 对南海北部陆架上流作了进一步研究, 指出夏季上升流是南海北部陆架区的共同现象, 属于一个上升流系; 南海北部陆架区上升流系的空间尺度在沿岸方向上应为海盆尺度。同时, Li^[13]及吴日升等^[14]总结指出, 南海北部陆架区夏季上升流在时间和空间上都不是均一的, 不同作者所报道的实际上是陆架区夏季上升流的若干中心。20 世纪 80 年代以来, 随着数值模式和卫星遥感技术的不断发展, 数值模式及卫星遥感数据在海洋学研究中得到了广泛的应用, 其中郭飞等^[15]根据 1959—1990 年的调查资料建立了一个琼东沿岸上升流二维模式, 对琼东沿岸上升流进行了初步数值研究; 庄伟等^[16]分析了 2000 年夏季卫星遥感海表温度、风场资料及观测资料, 结果显示 2000 年夏季粤东沿岸有明显的上升流存在, 且上升流强度与风场的变化密切相关。

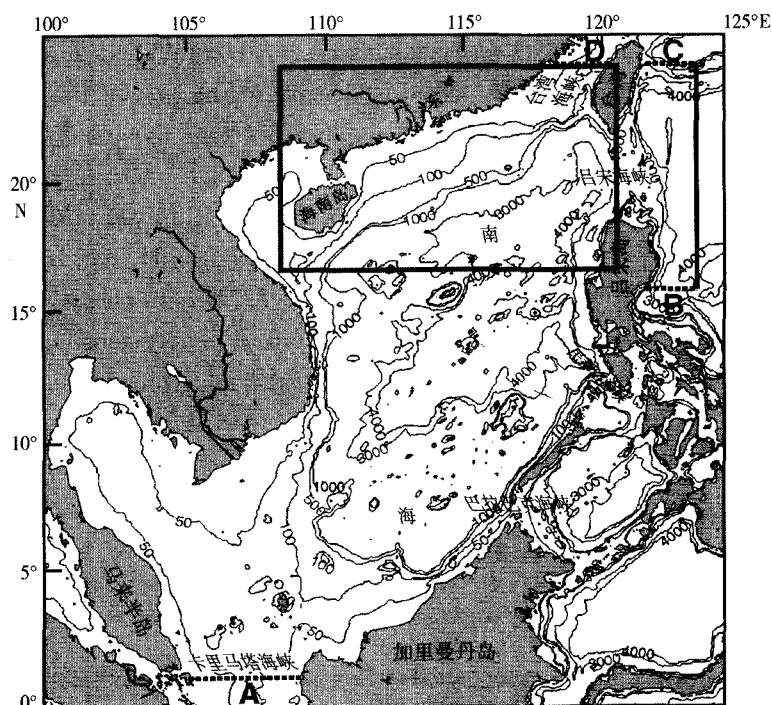


图 1 南海海底地形及开边界位置(水深单位: m)

Fig. 1 Topography (in meters) of South China Sea and open boundary locations

关于南海北部陆架区夏季上升流中心的形成机制,目前尚不清楚^[14],但普遍认为夏季西南季风是引起陆架区上升流的重要因素之一。以往的研究多是基于局部海域实测资料的现象分析,缺乏对南海北部陆架区夏季上升流的整体认识;同时,关于南海北部陆架区上升流的三维数值模拟研究目前也不多见。基于以上考虑,本文以三维斜压非线性海洋模式为基础,建立高分辨率南海区域模型,采用高分辨率 QuikSCAT 卫星散射计风场数据^[17,18]、海面净热通量以及真实海底地形,同时考虑边界流等动力因子,并结合卫星遥感海表温度资料的分析,对南海北部陆架区夏季上升流进行数值研究,并对上升流的消长过程与局地风场之间的关系作初步探讨。

1 卫星遥感海表温度揭示的上升流现象

图 2 为南海北部 7 月气候态海表温度(SST)空

间分布图,数据来源于美国宇航局(NASA)喷气推进实验室(JPL)提供的甚高分辨率红外辐射计(AVHRR)海表温度(SST)气候态数据,该数据的空间分辨率为 4km。从 AVHRR SST 空间分布图中可以直观地看到,南海北部陆架区夏季海表温度存在着明显的低值区,主要存在于海南岛东部沿岸、雷州半岛以东广州湾东南部直至珠江口南部一带海域(图 2 中区域 a),粤东沿岸(图 2 中区域 b)和福建沿海(图 2 中区域 c)以及台湾浅滩海域(图 2 中区域 d)。其中,琼东沿岸强上升流区主要位于从三亚以南至七洲列岛以西呈带状分布的沿岸海域,该上升流区海表温度普遍低于外海 1—2℃;广州湾东南部上升流区主要存在于七洲列岛以北、琼州海峡以东直至珠江口外海一带海域。同时,我们也可以从图中看出,琼东沿岸上升流和粤西沿海上升流在分布形态上表现为一个整体,只是琼东沿岸上升流强度稍大;粤东沿岸从香港海域附近直至福建的南日群岛附近均存在有明显的低温带,尤其

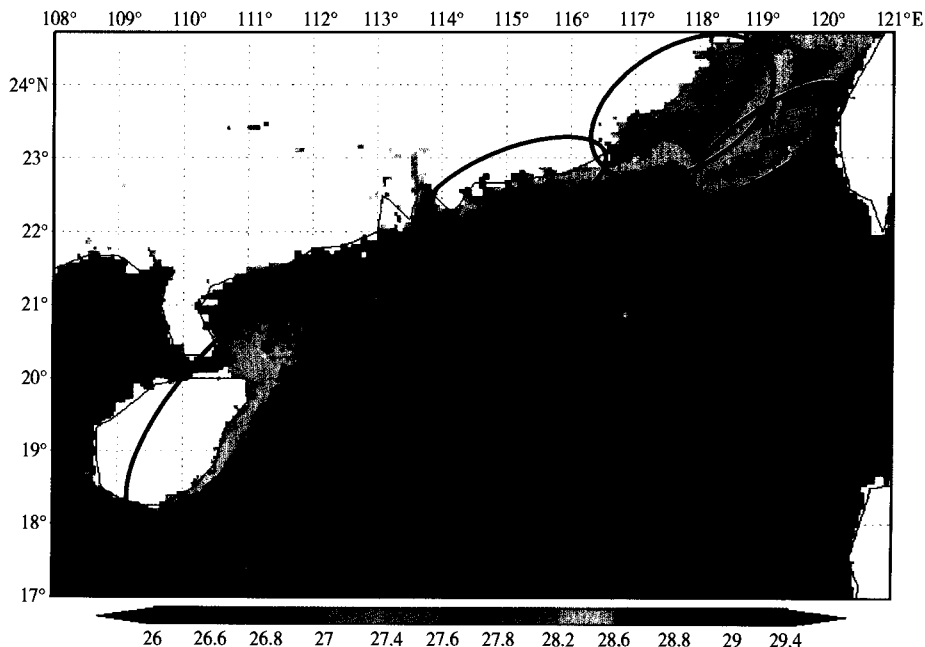


图 2 南海北部 7 月份气候态卫星遥感海表温度(AVHRR SST) 分布图(单位:℃)

Fig. 2 Climatic satellite remote sensing sea surface temperature (AVHRR SST) in northern continental shelf of South China Sea in July (unit:℃)

是从汕头沿岸至南日岛以南的近海海域存在有大面积强上升流区,其海表温度普遍低于外海 2—3℃,空间尺度约为 150—200km。在台湾岛以西的澎湖列岛附近的台湾浅滩也存在有明显的“月牙形”低温带,其海表温度低于外海 2—2.5℃。另外,从气候态卫星遥感海表温度的分布也可以看出,南海北部陆架区夏季上升流是该海区的一个规律性现象,而不是个别年份的特殊现象。

2 物理模式及计算方案

2.1 物理模式

本文所采用的模式为 ECOMSED^[19]。该模式水平方向采用正交曲线网格,垂直方向采用 σ 坐标。计算过程中,垂向涡动粘性系数和热力垂向涡动扩散系数由改进后的 Mellor-Yamada 2.5 阶湍流

闭合模型计算得到, 湍流粘性扩散系数采用 Smagorinsky^[20] 计算方案。

2.2 模式参数及资料

模式计算区域选为 99°00'—124°00'E、0°00'—25°00'N; 水平分辨率为 (1/6)° × (1/6)°; 垂直方向分 25 层, 斜压时间步长取为 20min, 正压时间步长取为 30s。模式采用美国国家地球物理数据中心(NGDC)的 etopo5 地形资料, 同时考虑风场、热通量和边界流作用。风场采用法国海洋开发研究

院(IFREMER)提供的 2000 年 1 月 1 日—2005 年 12 月 31 日每天一次的 QuikSCAT 卫星散射计风场资料, 空间分辨率为 0.5° × 0.5°; 初始温盐采用 NGDC 提供的 WOA01 温盐数据; 海表热通量来自南安普顿大学国家海洋中心(NOCS); 开边界位置设在如图 1 中标示的 A、B、C、D 处, 各开边界法向体积输运基于以往的观测和研究成果得到^[6,21,22](表 1), 计算区域入流和出流流量保持平衡。

表 1 主要开边界的各月流量

Tab. 1 Monthly throughflows through open boundaries

开边界	10 ⁶ m ³ · s ⁻¹											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
A	-3.125	-2.250	-0.750	0.750	2.250	3.000	3.000	2.125	0.375	-1.250	-2.750	-3.375
B	27.375	29.000	31.000	32.375	33.125	32.625	30.875	29.875	29.625	28.500	26.50	26.125
C	-23.625	-26.000	-29.000	-31.500	-33.500	-33.500	-31.500	-29.625	-27.875	-25.500	-22.500	-21.875
D	-0.625	-0.750	-1.250	-1.625	-1.875	-2.125	-2.375	-2.375	-2.125	-1.750	-1.250	-0.875

2.3 计算方案

首先以 1 月气候态温盐及风场作为模式积分的初始场和强迫场, 采用诊断模式固定温盐, 从静止状态开始积分, 积分时间为 1 年, 得到 1 月的诊断流场, 作为进一步积分的初始场; 然后以此为基础, 采用气候态日平均 QuikSCAT 风场强迫, 结合气候态海面净热通量及边界流量, 采用预报模式进行预报计算, 模式在周期性外强迫下计算 5 年。南海北部陆架区是本文的重点关注区域, 该区域平均水深不足 1 000m, 计算较容易达到准稳态; 同时计算结果显示, 从第 4 年开始, 区域总能量已呈稳定的周期性变化, 本文取第 5 年数据来进行分析。

3 结果分析

在上述初始条件和边界条件下, 计算结果较好地再现了黑潮、南海西边界流、北部沿岸流、中尺度涡等南海主要流系及基本特征, 同时也较好地揭示了南海北部陆架区的上升流现象及其生消变化特征。限于篇幅, 本文仅分析与北部陆架区夏季上升流现象有关的一些计算结果。

3.1 南海夏季基本环流

南海近乎封闭的地理特征使得局地强迫成为南海环流的主要驱动因素, 其中本地风场的作用尤为重要^[23](图 3a)。图 3b 为模拟的南海夏季(7 月)

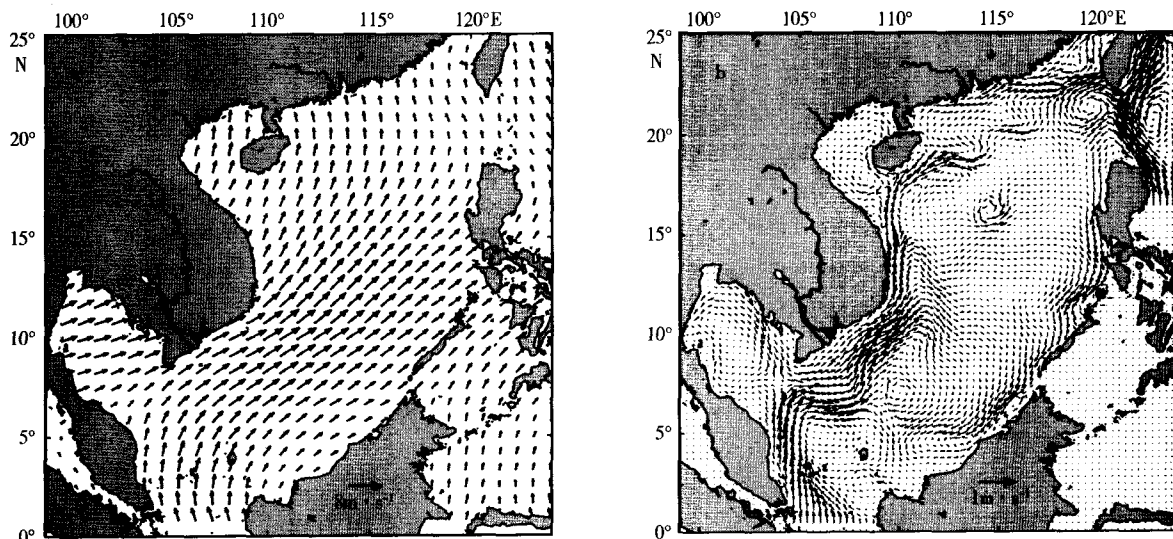


图 3 南海夏季 QuikSCAT 风场矢量图(a)和模拟的夏季 5m 层流场图(b)

Fig. 3 Summer winds derived from QuikSCAT (a) and general circulation of 5m layer (b) in South China Sea

5m 层流场图。从图中可以看出，南海夏季上层环流整体上呈一个反气旋状，沿中南半岛海岸存在一支显著的北向西边界强流，5m 层最大流速达 $0.87\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，其主轴一直影响到了海南岛东南部及南海北部陆架区。另外，夏季黑潮在流经吕宋海峡时其主轴并没有直接进入南海，而是通过黑潮流套、黑潮南海分支、水体交换及涡旋等形式向南海传递大洋信息并影响南海环流。从图中可以看到，吕宋海峡西部黑潮流套和闭合的反气旋涡占据范围较广，流速较大且上下层差异不明显（下层流场图略），5m 层最大流速为 $0.82\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，与观测结果基本一致^[24,25]。

南海北部陆架区尤其是海南岛东南部地形复杂，等深线密集，同时受局地风场、黑潮入侵等因子影响，流态复杂，涡旋活跃，是南海研究的重点和难点海区之一。计算结果显示，当南海西边界流到达海南岛南部 $17^{\circ}30'N$ 附近时，流幅有所减小，但流速仍较大，为 $0.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。由于受到海南岛的阻挡及地形作用，在夏季西南风的作用下，西边界流沿着琼东沿岸继续往东北方向运动，其主轴基本沿着 200m 等深线流动，流速和流幅逐渐减小，最后和粤东沿岸流一起汇入台湾海峡。另外，在等深线密集的陆架坡折处存在着一些中小尺度的涡旋，如海南岛东南部 $113^{\circ}E$ 、 $16^{\circ}30'N$ ，海南岛东部 $113^{\circ}45'E$ 、 $19^{\circ}10'N$ 及东沙群岛附近均存在较为明显的涡旋，这与卫星高度计观测结果基本一致^[26--28]。

3.2 南海北部陆架区上升流

夏季沿岸上升流中心的主要特征就是低温高盐，因此低温高盐等值线与岸线组成的封闭区域往往可用于确定上升流的中心位置^[9,12]。图 4 为模拟的南海北部陆架区夏季上升流特征图。从模拟结果来看，南海北部陆架区主要存在着 2 个较大的上升流区，其位置分别位于海南岛东部沿岸及雷州半岛以东广州湾东南部一带海域（琼东上升流区）和粤东汕头沿岸直至福建沿岸南日群岛附近海域（粤东上升流区），其上升流中心分别位于清澜湾至七洲列岛之间 $111^{\circ}10'E$ 、 $19^{\circ}45'N$ 附近，陵水湾至陵水沿岸 $110^{\circ}15'E$ 、 $18^{\circ}25'N$ 附近，汕头沿岸 $116^{\circ}45'E$ 、 $22^{\circ}50'N$ 附近及澎湖列岛以西 $118^{\circ}E$ 、 $23^{\circ}40'N$ 附近。从图 4a—d 中可以看到，两大主要上升流区大致与岸线走向一致，以七洲列岛附近上升流最强，中心 5m 层温度为 $28^{\circ}C$ ，低于同纬度外海 $1.5^{\circ}C$ ，15m 层温度为 $24^{\circ}C$ ，低于外海 $3.5^{\circ}C$ ，盐度为 34.2，高于外海 0.2；粤东上升流区强上升流主要位于汕头沿岸至厦门海域附近 60km 近岸海域内，

上升流中心 5m 层温度为 $28^{\circ}C$ ，低于同纬度外海 $1.2\text{—}1.5^{\circ}C$ ，15m 层中心海水温度为 $25^{\circ}C$ ，低于同纬度外海 $3\text{—}3.5^{\circ}C$ ，盐度和密度也明显高于外海。

大致与岸线走向一致，以七洲列岛附近上升流最强，中心 5m 层温度为 $28^{\circ}C$ ，低于同纬度外海 $1.5^{\circ}C$ ，15m 层温度为 $24^{\circ}C$ ，低于外海 $3.5^{\circ}C$ ，盐度为 34.2，高于外海 0.2；粤东上升流区强上升流主要位于汕头沿岸至厦门海域附近 60km 近岸海域内，上升流中心 5m 层温度为 $28^{\circ}C$ ，低于同纬度外海 $1.2\text{—}1.5^{\circ}C$ ，15m 层中心海水温度为 $25^{\circ}C$ ，低于同纬度外海 $3\text{—}3.5^{\circ}C$ ，盐度和密度也明显高于外海。

从以上模拟结果的分析可以看出，模拟的南海北部陆架上升流区及上升流中心位置与卫星观测结果吻合良好；同时也验证了南海北部陆架区夏季上升流是该海区的一个规律性现象，并非个别年份的特殊现象。

变化的“双峰性”即是其典型效应之一^[4]。图 5a、b 中红色曲线为模拟的两个典型上升流区（琼东沿岸上升流区和粤东沿岸上升流区）5m 层海水温度季节变化曲线。从图中可以看到，两大上升流区 5m 层海水温度均表现出显著的“双峰”季节变化特征，其中琼东沿岸上升流区两个波动峰分别出现在 6 月上旬和 9 月中旬（图 5a）。该海区年最低水温出现在 1、2 月，3 月开始回升，6 月上旬达到第一个峰值；入夏后太阳辐射增强，海面净热通量增大，但海水温度反而持续下降，到 7 月中旬达到最低，随后逐步升高，9 月中旬达到第二个峰值；此后水温随着秋冬季节的来临又逐渐下降。粤东沿岸水温变化曲线与琼东沿岸类似（图 5b），不过 2 个峰值分别出现在 7 月中旬和 9 月上旬，水温在 8 月中旬达到盛夏最低谷。这说明海区除因太阳辐射的季节变化导致的水温季节变化外，夏季还存在着其它因素影响使得水温下降。由于南海北部陆架区夏季并不存在水平方向同一层次的冷水来源，所以该现象显然与较深层次冷水的上升运动有关，即由于下层水的涌升而形成上升流。

从以上模拟结果的分析可以看出，南海北部陆架区夏季存在着显著的上升流现象，两大上升流区——琼东上升流区和粤东上升流区的表层及次表层水均表现出明显的低温、高盐、高密等陆架上升流特征；南海北部陆架区的上升流现象主要发生在 6—9 月，且其影响在气候态年变化曲线上仍然十分明显，表明夏季上升流为该海区的规律性现象。

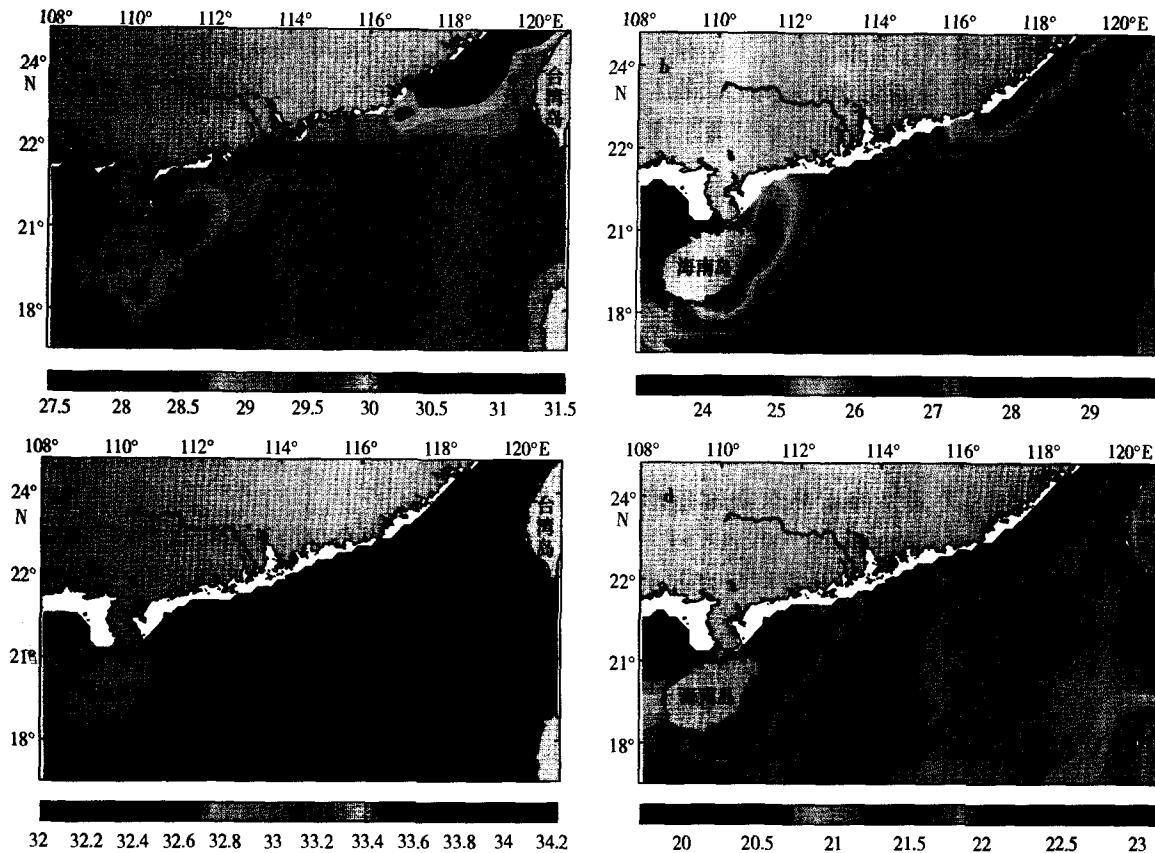


图 4 南海北部陆架区夏季上升流模拟结果

a. 5m 层温度 b. 15m 层温度 c. 15m 层盐度 d. 15m 层位势密度

Fig. 4 Modeling results of temperature of 5m (a) and 15m (b) layer, salinity of 5m layer (c) and potential density of 15m layer (d) of summer upwelling over northern continental shelf of South China Sea

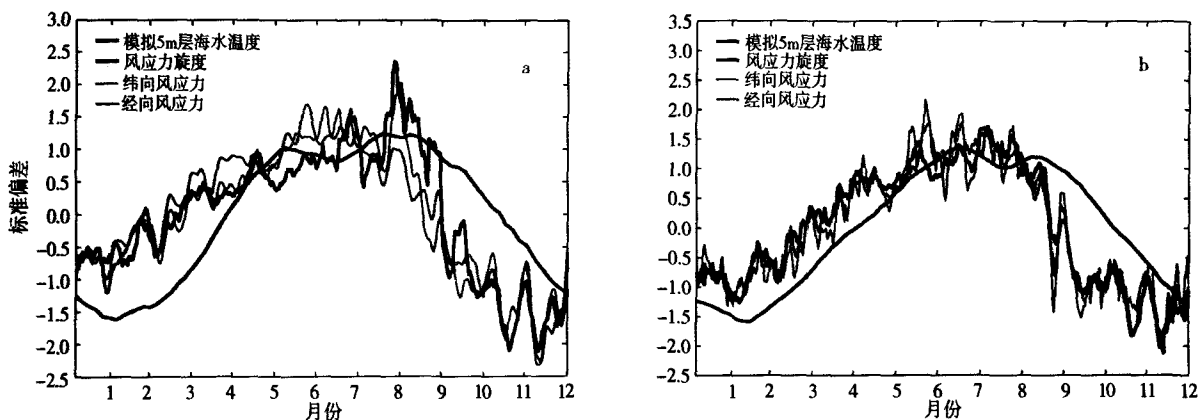


图 5 模拟的南海北部陆架区强上升流区 5m 层海水温度与 QuikSCAT 纬向风应力、经向风应力及风应力旋度时间序列图
a. 琼东沿岸强上升流区; b. 粤东沿岸强上升流区

Fig. 5 Time series of modeling temperature of 5m layer, QuikSCAT zonal wind stress, meridional wind stress and wind stress curl in stronger upwelling areas along eastern Hainan Island (a) and eastern Guangdong (b)

3.3 局地风场与上升流的关系

南海北部陆架区夏季上升流形成及变化的动力学机制非常复杂,除了风场和海底地形外,陆架环流、涡旋、海气通量、岛屿等都会对上升流的形成及变化有着重要的影响。局地风场作为引起沿岸上

升流的最重要动力因子之一,在过去的研究中已经得到证实^[3-6,16]。本文通过数值模拟与卫星散射计风场资料相结合,进一步分析局地风场与沿岸上升流的相关关系。

图 6 为根据 QuikSCAT 卫星散射计风场资料

计算得出的夏季南海北部风应力旋度和 Ekman 抽吸速度分布图，在平面直角坐标系下二者的计算公式为：

$$\text{风应力旋度 } \text{Curl}_z = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y},$$

Ekman 抽吸速度

$$\omega_e = \left[\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right] / \rho_0 f = \text{Curl}_z / \rho_0 f$$

其中， Curl_z 为风应力旋度； τ_x 、 τ_y 为纬向风应力和经向风应力； ω_e 为由 Ekman 抽吸引起的垂向速度； ρ_0 为海水密度 $1.025 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； f 为科氏力参数。从图 6 我们可以看出，整个琼东沿海 7 月气候态平均的风应力旋度均为正值，平均风应力旋度达 $0.27 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ ，由此形成的 Ekman 抽吸速度为 $0.7 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；且位置与模拟的琼东沿岸强上升流区对应良好，说明风应力旋度对该海域上升流的形成有着十分有利的作用。另外，夏季琼东沿岸盛行西南风，上层海水在西南风的作用下形成离岸 Ekman 输送，促使下层水涌升补偿，同样有利于琼东上升流的形成。从图 5a 中也可以看出，琼东沿岸强上升流区风应力旋度、纬向风应力和经向风应力与 5m 层海水温度有着很好的相关关

系，相关系数分别为 0.694、0.642 和 0.623，说明琼东沿岸无论是风应力还是风应力旋度对沿岸上升流的形成均有着积极的作用。而粤东沿岸情况则有所不同，图 6a、b 显示，夏季粤东沿岸风应力旋度普遍较小，一般不超过 $0.05 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ ，一些区域甚至出现负值，由此引起的 Ekman 抽吸速度也就非常小了，也就是说粤东沿岸风应力旋度对沿岸上升流并没有太大贡献。但从图 3a、b 可以看出，夏季北部陆架区沿岸流在西南风作用下沿着广东及福建沿岸自西南往东北方向流动，由于 Ekman 效应，西南风引起表层海水的离岸运动，从而诱生沿岸上升流。从图 5b 可以看到，粤东沿岸纬向风应力和经向风应力与模拟的 5m 层海水温度也有着较好的相关关系，相关系数分别为 0.773 和 0.771，说明虽然风应力旋度对夏季粤东沿岸上升流的形成贡献不大，但夏季西南风引起的表层 Ekman 输送对沿岸上升流的形成有着十分重要的作用。因此，无论是琼东上升流区还是粤东上升流区，夏季西南风都是其沿岸上升流形成的重要动力因子之一。由于文章篇幅限制，关于南海北部陆架区夏季上升流的动力学机制探讨将另文讨论。

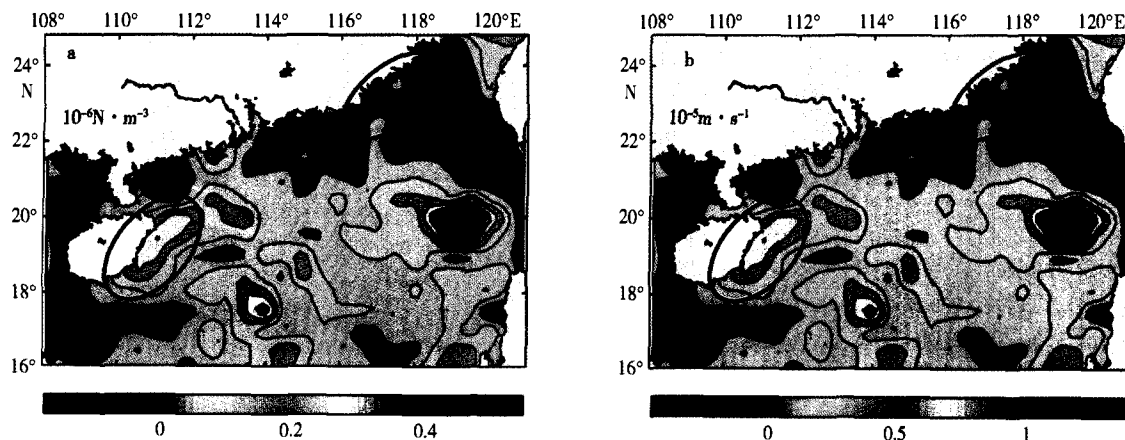


图 6 南海北部夏季风应力旋度及 Ekman 抽吸分布图

a. 风应力旋度 ($10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$)；b. Ekman 抽吸速度 ($10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Distributions of summer wind stress curl (a) ($10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$) and summer Ekman pumping (b) ($10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

4 结 论

本文采用三维斜压非线性数值模式 EOCM-SED，结合多种卫星遥感资料的分析，对南海北部陆架区夏季上升流进行了数值研究，并对其与局地风场的关系作了初步探讨。分析结果表明：

(1) 南海北部陆架区夏季上升流是一个规律性现象，上升流海区表层及次表层水均表现出明显的

低温、高盐、高密等陆架上升流的特征。

(2) 强上升流区主要位于海南岛以东沿岸及雷州半岛以东广州湾东南部海域(琼东沿岸上升流区)和汕头沿岸直至福建沿岸南日群岛附近海域(粤东上升流区)；上升流中心主要位于海南岛沿岸清澜湾至七洲列岛之间 $111^{\circ}10' \text{ E}$ 、 $19^{\circ}45' \text{ N}$ 附近，陵水湾至陵水沿岸 $110^{\circ}15' \text{ E}$ 、 $18^{\circ}25' \text{ N}$ 附近，汕头沿岸 $116^{\circ}45' \text{ E}$ 、 $22^{\circ}50' \text{ N}$ 附近及澎湖列岛以西 118° E 、 $23^{\circ}40' \text{ N}$ 附近。

(3) 琼东上升流主要发生在 6 月上旬—9 月中旬, 7 月中旬达到最强; 粤东沿岸上升流则主要发生 7 月中旬—9 月上旬, 8 月中旬表现得最强。

(4) 无论琼东上升流区还是粤东上升流区, 夏季西南风都是其上升流形成的重要动力因子之一。夏季琼东沿岸风应力引起的表层 Ekman 输送和风应力旋度引起的 Ekman 抽吸对沿岸上升流的形成均有着积极的作用; 而在粤东沿岸, 夏季风应力旋度对其沿岸上升流的贡献不大, 但夏季西南风引起的表层 Ekman 输送对沿岸上升流的形成同样有着十分重要的作用。

参考文献:

- [1] 苏纪兰. 南海环流动力机制研究综述[J]. 海洋学报, 2005, 27(6): 1—8.
- [2] XIE SHANG-PING, XIE QIANG, WANG DONG-XIAO, et al. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108: 1—13.
- [3] 李立, 吴日升, 孙湘平. 中国近海区域水文特征[C] // 苏纪兰. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社, 2005: 272—278.
- [4] 李立. 珠江口以西陆架夏季上升流的研究[J]. 台湾海峡, 1990, 9(4): 338—346.
- [5] 洪启明, 李立. 粤东陆架区夏季的上升流[J]. 台湾海峡, 1991, 10(3): 272—277.
- [6] WYRTKI K. Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959—1961: Physical Oceanography of the Southeast Asia Waters (NAGA Report 2) [J]. La Jolla, Calif: Scripps Inst. of Oceanogr, 1961: 195.
- [7] NIINO H, EMERY O. Sediment of shallow portions of East China Sea and South China Sea [J]. Geological Society of American Bulletin, 1961, 72: 731—761.
- [8] 管秉贤, 陈上及. 中国近海的海流系统[R]. 青岛, 中国科学院海洋研究所, 1964.
- [9] 曾流明. 粤东沿岸上升流迹象的初步分析[J]. 热带海洋学报, 1986, 5(1): 68—73.
- [10] 于文泉. 南海北部上升流的初步探讨[J]. 海洋科学, 1987, (6): 7—10.
- [11] 邓松. 七洲列岛以南上升流分析[R]. 广州: 国家海洋局南海分局, 1987.
- [12] 韩舞鹰, 马克美. 粤东沿岸上升流的研究[J]. 海洋学报, 1988, 10(1): 52—59.
- [12] 韩舞鹰, 王明彪, 马克美. 我国夏季最低表层水温海区—琼东沿岸上升流区的研究[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(3): 167—275.
- [13] LI L. Summer upwelling system over the northern continental shelf of the South China Sea—physical description [C] // SU J, CHUANG W S, HSURH R Y (eds.). Proceedings of the Symposium on the Physical and Chemical Oceanography of the China Seas. Beijing: China Ocean Press, 1993: 58—68.
- [14] 吴日升, 李立. 南海上升流研究概述[J]. 台湾海峡, 2003, 22(2): 269—277.
- [15] 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.
- [16] 庄伟, 王东晓, 吴日升, 等. 2000 年夏季福建、广东沿海上升流的遥感与船舶观测分析[J]. 大气科学, 2005, 29(3): 438—444.
- [17] BRUNO B, SABRINA S, ABDERRAHIM B, et al. Modeling the structure and variability of the southern Benguela upwelling using QuickSCAT wind forcing [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: 1—18.
- [18] RISIEN C M, MELLOR C J C, REASON F A, et al. Variability in satellite winds over the Benguela upwelling system during 1999—2000 [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: 1—15.
- [19] BLUMBERG A F. An estuarine and coast ocean version of POM[C] // Proceedings of the Princeton Ocean Model Users Meeting. Princeton, N. J. 1996.
- [20] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91, 99—164.
- [21] FANG GUO-HONG, ZHAO BAO-REN, ZHU YAO-HUA. Water volume transport through the Taiwan Strait and the continental shelf of the East China Sea measured with current meters [C] // Oceanography of Asian Marginal Sea (TAKANO K ed.). Amsterdam: Elsevier, 1991: 345—358.
- [22] 方国洪, 魏泽勋, 崔秉昊, 等. 中国近海域际水、热、盐输运: 全球变网格模式结果[J]. 中国科学, 2002, 32(12): 969—977.
- [23] 李立. 南海上层环流观测研究进展[J]. 台湾海峡, 2002, 21(1): 114—125.
- [24] 仇德忠, 杨天鸿, 郭忠信. 夏季南海北部一支向西流动的海流[J]. 热带海洋学报, 1984, 3(4): 65—72.
- [25] 许建平, 苏纪兰. 黑潮水入侵南海的水文分析(II) 1994 年 8—9 月期间的观测结果[J]. 热带海洋学报, 1997, 16(2): 1—23.
- [26] HWANG CHEINWAY, CHEN SUNG-AN. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(10): 943—965.
- [27] WANG GUI-HUA, SU JI-LAN, CHU P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(21): 2121.
- [28] 程旭华, 齐义泉, 王卫强. 南海中尺度涡的季节和年际变化特征分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(4): 51—59.