

2000 年夏季福建、广东沿海上升流的遥感与船舶观测分析

庄 伟^{1, 2} 王东晓¹ 吴日升³ 胡建宇²

1 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, 广州 510301

2 厦门大学海洋系/亚热带海洋研究所, 厦门 361005

3 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005

摘 要 通过对卫星遥感数据和航次资料的分析, 对粤东沿岸 2000 年 7 月份的上升流现象进行了综合分析。结果表明: 观测期间, 珠江冲淡水向东扩展的趋势很明显, 与此同时, 粤东沿岸(116°E)以东附近沿岸海域的水团具有低温、高盐的性质, 显示了沿岸上升流的存在。通过对卫星遥感海表温度(SST)和风场的比较可知, 上升流强度和风场的变化密切相关, 海面风场平行岸分量的变化是夏季该上升流强度发生改变的重要原因。

关键词 粤东 上升流 卫星遥感 锋面

文章编号 1006-9895(2005)03-0438-07

中图分类号 P407

文献标识码 A

Coastal Upwelling off Eastern Fujian-Guangdong Detected by Remote Sensing

ZHUANG Wei^{1, 2}, WANG Dong-Xiao¹, WU Ri-Sheng³, and HU Jian-Yu²

1 *Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301*

2 *Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005*

3 *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005*

Abstract Based on satellite remote sensing data and the shipboard measurements taken in July 2000, upwelling phenomena off Fujian-Guangdong coast are analyzed. The results reveal that during the investigation, the Pearl River runoff extended eastward evidently. Meanwhile, the surface water mass to the east of 116°E has characteristics of low temperature, high salinity and high density, which indicate the existence of coastal upwelling. By the analysis of AVHRR SST and QuikSCAT wind field, it is also manifested that there is a close relationship between the upwelling intensity and the sea surface wind field. The variations of alongshore components of sea surface wind field have important influence on the intensity of the coastal upwelling.

Key words eastern Guangdong, upwelling, remote sensing, front

1 引言

福建—广东沿岸海域是闽浙沿岸水、南海水团、珠江冲淡水的交汇处。该海区地形是宽阔的陆架; 主要受东亚季风影响, 季节变化明显, 夏季盛

行西南风。

夏季福建—广东沿岸海域存在上升流。近年来, 该海区相关水文研究已经证实了这一点。陈金泉等^[1]通过实测资料分析, 首先指出夏季在东山至汕头之间近岸海域存在上升流, 并认为西南季风以

及地形的影响是该上升流发生的重要因素。此后的一些研究分别利用现场观测资料和卫星遥感数据多次证实该海区夏季的上升流现象^[2~4]。李立等^[5]的研究还表明: 夏季在上升流海区附近普遍存在温、盐度锋面现象。曾流明^[6]、于文泉^[7]和韩舞鹰等^[8]通过对不同年份航次资料的分析, 报道了夏季粤东沿岸海域的风生上升流; 由于受风和径流等因素的影响, 对应于不同年份, 其中心位置的时空变异较大。李立^[9]和洪启明等^[10]根据多年历史资料的综合分析, 进一步指出: 粤东上升流可能是南海北部海盆尺度的季节性上升流的一部分。综上所述, 以往的研究表明: 福建—广东沿岸经常出现上升流, 在不同的年份, 上升流的位置和强度存在明显差别。由于以往的研究多是基于实测资料的现象分析, 因此, 上升流消长过程及其与局地风场之间的关系并不清楚。

20 世纪 80 年代以来, 随着卫星遥感技术的不断进步, 卫星遥感数据在海洋学研究中得到了广泛的应用。本文应用了几种不同的卫星遥感数据, 并与航次资料相结合, 拟从两个方面对福建—广东沿岸上升流进行研究: (1) 夏季福建—广东沿岸上升流和锋面的卫星遥感证据以及局地风场对上升流的影响; (2) 夏季的上升流航次观测佐证。

2 数据和方法

美国 NASA 的 JPL (Jet Propulsion Laboratory, 喷气推进实验室) 提供了 NOAA 气象卫星甚高分辨率红外辐射计 (AVHRR) 的逐日海表温度 (SST) 数据, 该数据的空间分辨率为 9.28 km。

通过 AVHRR SST 图不仅可以直观地表示出上升流区的分布和演变^[4,11], 还可以结合 QuikSCAT 卫星遥感海面风场数据, 分析上升流和风应力之间的关系。QuikSCAT 卫星风场资料同样是由 JPL 提供, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

此外, 2000 年 7 月 10 日到 8 月 2 日厦门大学和国家海洋局第三海洋研究所联合利用“延平 2 号”海洋调查船进行了台湾海峡南部至珠江口附近海域的海洋综合调查。调查期间采用了美国 Sea Bird 公司的 SBE19 和 SBE25 温度、盐度、深度剖面仪 (CTD) 进行了定点观测。大多数站位分别位于 A 断面 (A1~A10)、B 断面 (B1~B13) 和 P 断面 (P1~P9) 上 (图 1)。同时, 本航次还使用 SBE21 表层温盐仪进行表层水温和盐度的走航式观测, 采样的时间间隔设定为 10 s。利用这些资料可以与卫星遥感观测到的上升流现象进行比较研究。

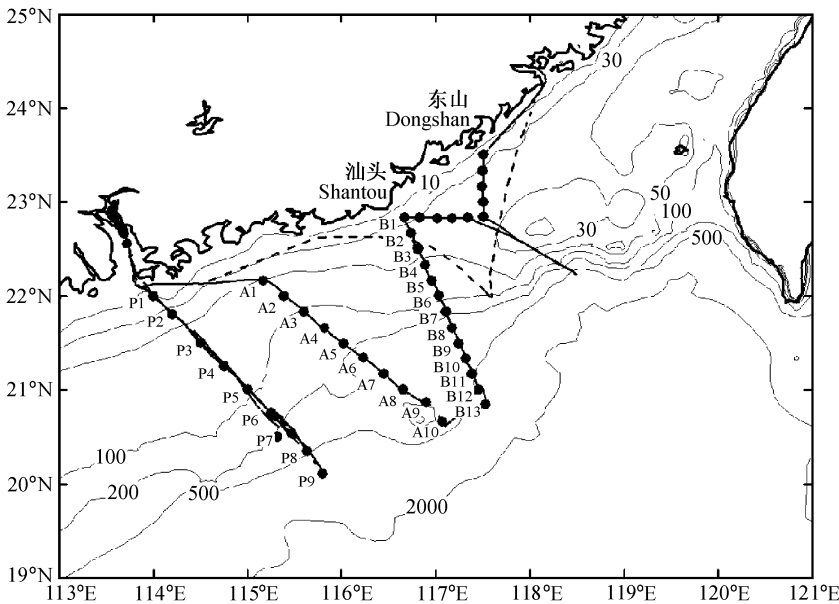


图 1 研究海区海底地形(单位: m)及 2000 年 7 月 10 日~8 月 2 日航次的航行路线和 CTD 站位图。虚线表示去程, 实线表示回程, 黑点表示 CTD 站位
Fig. 1 Bottom topography (m) of the study region with sailing track and CTD stations of the cruise (Jul. 10 – Aug. 2, 2000). The dashed line and the solid line represent the track of launching out and going back, respectively. The black dots are CTD stations

3 结果分析

3.1 卫星遥感 SST 所揭示的上升流和锋面

将 2000 年 6 月 1 日~8 月 31 日期间 NOAA 卫星 AVHRR 逐日 SST 数据进行平均, 得到当年夏季的平均海面温度分布 [图 2a(见彩图)]。可以发现, 沿岸海水的表层温度从西南向东北呈逐渐降低的趋势, 116°E 以东沿岸表层水温普遍低于 28.8°C, 其中东山岛以东近岸海域是一个表层水温低于 27.6°C 的低温区。

在逐日 AVHRR SST 分布图中, 研究海域在 2000 年 7 月 11 日、25 日和 26 日白天云覆盖相对较少, 因此, 可以选取这三个时刻的 SST 数据, 应用 Wang 等^[12]介绍的锋面提取方法作出海表温度及锋面分布图(图 3a~c), 同时, 利用 QuikSCAT 卫星遥感海面风场资料分析相应日期的风场变化(图 3d~f)。图 3 的结果表明: 7 月 11 日研究海域盛行东南风, 此时, 福建—广东沿岸海域不存在明显的低温区, 海面温度梯度也相对较弱, 只有零星的锋面像素。而 7 月 25~26 日期间, 研究海区盛行西南风, 东山岛至汕头沿岸海域存在一片连续的低温区, 中心温度低于 27.5°C。在该低温区与其周

围的相对高温海域之间, 形成了一条连续的温度锋面, 将沿岸低温水团和周围相对高温的南海表层水团分隔开。

3.2 海面风场对上升流区域 SST 的影响

上述遥感观测的结果表明: 2000 年夏季, 福建—广东沿岸海域存在明显的上升流现象。同时, 图 3a 和图 3b、c 的显著差异以及图 2a 中的温度梯度明显小于图 3b、c 的事实都说明: 该上升流并非稳定存在的。为了进一步探讨该海域上升流强度的影响因子, 可以选取一个大致平行于岸且包围该上升流区的矩形区域(如图 2 所示)作为重点区域, 用 AVHRR SST 数据和遥感海面风场资料来研究矩形区域内上升流强度和风场之间的关系。

在图 2a 中, 低温中心的温度低于 27.6°C, 且在图 3b、c 中, 上述连续的温度锋面在靠近沿岸低温区一侧的温度也大都在 27.5°C 左右。以往现场观测的多年月平均水温场的结果^[7]同样表明: 7 月份, 汕头近海沿岸上升流区的表层水温低于 27°C, 而外海的表层水温普遍高于 28°C。因此, 本文以低于 27.5°C 的沿岸低温区域来表征沿岸上升流区。由于云的影响, 在某些时段内, 矩形区域内可能会出现没有或只有很少有效 SST 数据点的情况。因

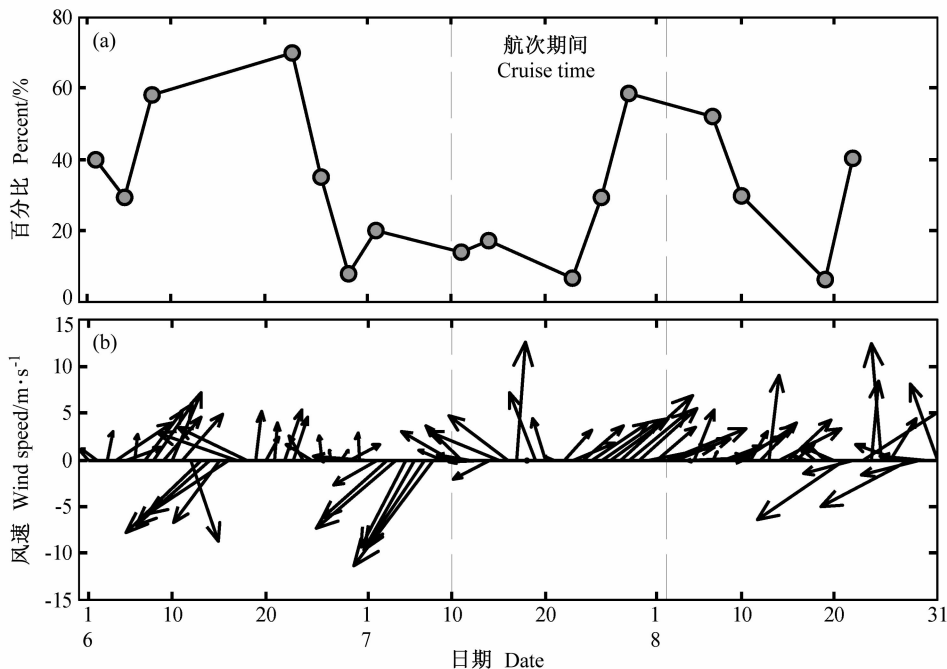


图 4 2000 年 6~8 月所选矩形区域(如图 2 所示)内 SST 低于 27.5°C 的面积所占百分比(a, 圆点表示百分比值的有效值)和同一区域内的平均风矢量时序变化(b)示意图

Fig. 4 (a) Time series of the percentage of the area with SST lower than 27.5°C in the selected rectangle in Fig. 2 (the dots denote the valid data of percentage), and (b) the stick diagram of wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) averaged over the same sea region during Jun. - Aug. 2000

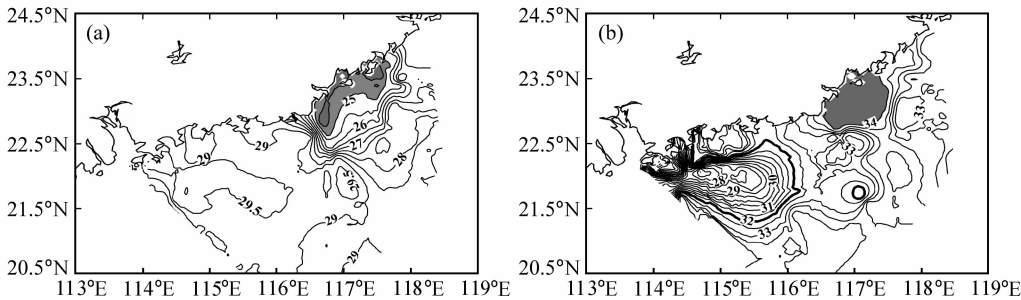


图 5 (a) SBE21 海表温度, 等值线间隔为 0.5℃, 阴影区低于 25℃; (b) SBE21 海表盐度, 等值线间隔为 0.5 PSU, 阴影区高于 34 PSU, 粗线表示 32 PSU 等值线

Fig. 5 (a) In situ SST with contour interval (CI) 0.5℃, area with values lower than 25℃ is shaded; (b) in situ Sea Surface Salinity (SSS) with CI 0.5 PSU, area with values higher than 34 PSU is shaded and the bold isohaline is 32 PSU

此, 本文以三天为一个时间单位, 将每三天内低于 27.5℃ 区域的面积和所有不被云或陆地覆盖的有效值区域总面积分别进行累加, 然后用前者除以后者, 得到该时段内上升流区域面积在有效值区域总面积中所占的比重。显然, 有效值个数越少, 所得到的百分比值的可信度就越低。因此, 对于有效像素少于 300 个的情况, 计算结果将被视为无效值。将计算结果(图 4a)与红色矩形区域内的平均海面风场(图 4b)进行比较, 可以看到: 虽然由于云的覆盖, 在一些时段内(例如 6 月 10~21 日)上升流区域面积所占百分比无法得知, 但从现有的有效值看来, 上升流强度较大时, 同期的海面风向大都是西南风; 而上升流较弱时, 同期的海面风向多为东南风或东北风。从总体趋势来看, 研究海域 2000 年夏季的上升流强度变化可分为强—弱—强的三个阶段。对应于这三个阶段的平均海面温度分布如图 2b~d, 从图中可以清楚地看出矩形区域内的 SST 同样经历了先从低温到高温, 再从高温到低温的变化过程, 和图 4a 中上升流强度的变化趋势相吻合。

3.3 沿岸上升流的实测证据

图 5a, b 是由 SBE21 表层温盐仪所测的海表温度和盐度的平面分布图, 图中东山至汕头沿海海域存在一片连续的低温高盐区, 表层水温低于 25℃, 盐度值大于 34 PSU (Practical Salinity Unit, 实用盐度单位)。此外, 低盐冲淡水自珠江口向东扩展的趋势很明显, 32 PSU 等盐线所包围的区域形成了一个从珠江口向东扩展的巨大的低盐水舌, 珠江径流与海水混合形成的沿岸水团基本覆盖了 116°E 以西的沿岸海域。马应良等的研究^[13]表明: 粤东

沿岸水的主要特征是盐度低, 密度小, 只分布于表层附近, 厚度一般不及 10 m。珠江径流是沿岸水的主要来源, 径流量的大小直接影响沿岸水的密度大小和空间分布。

B 断面 30 m 以浅水层所有采样点的温度-盐度点聚图(图 6)也为该海域上升流的存在提供了佐证。B 断面上层不同区域之间的温、盐差异显著, 近岸海域(B1~B3 站位)30 m 以浅水层的海水具有低温、高盐和高密的性质; 而同一层次 B5~B12 站位的海水则相对高温低盐, 密度也相对较低。B 断面近岸海域的高密度水团是该海域具有上升流的重要指示。此外, 从 B 断面的温、盐剖面分布图(图

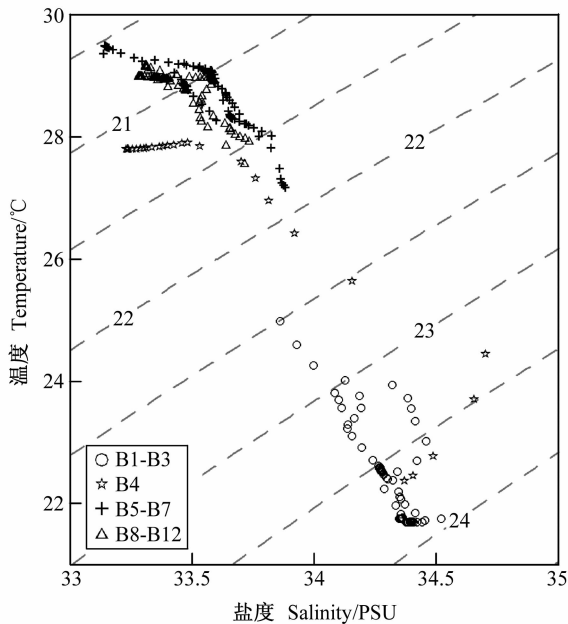


图 6 B 断面所有站位 30 m 以浅层的温度-盐度点聚图
Fig. 6 Temperature-salinity diagram for all stations of the transect B with depth shallower than 30 m

略)中可以看到:在近岸海域,等温线和等盐线向岸抬升,具有明显的上升流迹象;而 A 断面和珠江口外的 P 断面的温、盐度剖面图(图略)中却未见明显的等温线和等盐线的抬升。

实测证据和遥感证据的结果相吻合,进一步证明了在调查期间,东山至汕头沿岸海域有次表层的低温高盐水涌升到达表层,上升流现象较 116°E 以西的沿岸海域明显得多。

4 讨论

实测资料和遥感数据的分析结果都表明:夏季东山至汕头沿岸海域存在上升流,与之形成鲜明对比的是: 116°E 以西近岸海域的上升流很弱,无法影响到表层。这种现象并不能用海面风场的空间分布的差异来解释。因为从图 3 可知:7 月 25~26 日西南季风盛行, 116°E 以西近岸海域的海面风场平行于岸的分量也很强,有利于上升流的形成。但是,该海域的海表温度却普遍较高。相关的分析结果还表明:调查期间,珠江冲淡水向东扩展, 116°E 以西近岸海域表层为低盐的沿岸水团所覆盖,而 116°E 以东海域受沿岸水团的影响很微弱。一些历史观测资料的分析结果^[6, 8]表明:在 1979 年 7 月和 1982 年 8 月, $114^{\circ}\text{E} \sim 116^{\circ}\text{E}$ 之间的沿岸海域均存在强上升流现象,其影响可达表层。同期,粤东沿岸海域的表层盐度普遍较高,说明沿岸水势较弱。事实上,珠江径流量的大小直接影响沿岸水的密度大小和空间分布。淡水的浮力输入越大,沿岸水的密度就越低,所形成的海水层结就越稳定,稳定的层结将阻碍上升流沿地形的爬升。因此,沿岸水团的分布也是影响福建—广东沿岸上升流空间分布的一个重要因素。

5 小结

本文通过对 NOAA 卫星 AVHRR 资料得到的高分辨率 SST 数据和 QuikSCAT 卫星遥感海面风场数据的分析,并结合 2000 年 7 月份的航次资料,对福建—广东沿岸的上升流现象进行了研究。结果可以归纳为以下几点:

(1)东山至汕头沿岸海域存在上升流现象。该上升流并非始终稳定存在。分析表明,海面风场平行岸分量的变化是夏季该上升流强度发生改变的重要原因。上升流强度较大时,同期的海表风向大都

是西南风;而上升流较弱时,同期的风场多为东南风或东北风。受其影响,2000 年夏季粤东沿岸上升流的总体变化趋势表现为强—弱—强的三个阶段。

(2)在上升流区的次表层水团和沿岸表层水团的交汇处形成了明显的海洋锋。

(3)观测期间,珠江冲淡水向东扩展的趋势很明显,受其影响, 116°E 以西近岸海域表层为低盐的沿岸水团所控制,使该海域的海水层结比其他海域更加稳定,稳定的层结阻碍了上升流沿地形的抬升,因此,该海域的沿岸上升流明显弱于沿岸水势较弱的一些年份。

福建—广东沿岸上升流形成和变化的动力学机制十分复杂,除了风和江河径流的作用,南海内区流场和南海北部地形也是上升流的影响因子。进一步研究该海域上升流的动力学机制还有待于更丰富的数据和更全面的分析。

致谢 感谢编辑和两位审稿人提出了宝贵意见和建议。同时,美国 JPL 的 PO. DAAC 提供了丰富的卫星遥感资料,在此同样表示感谢。

参考文献

- [1] 陈金泉,傅子琅,李法西. 关于闽南—台湾浅滩渔场上升流的研究. 台湾海峡, 1982, **1**(2): 5~13
Chen J Q, Fu Z L, Li F X. A study on upwelling in Minnan—Taiwan Shoal Fishing Ground. *J. Oceanogr. Taiwan Strait* (in Chinese), 1982, **1**(2): 5~13
- [2] 肖晖. 台湾海峡西部沿岸上升流的研究. 台湾海峡, 1988, **7**(2): 141~142
Xiao H. Studies of coastal upwelling in western Taiwan Strait. *J. Oceanogr. Taiwan Strait* (in Chinese), 1988, **7**(2): 135~142
- [3] 李立,李达. 台湾海峡西侧水道夏季的水文特征与上升流. 台湾海峡, 1989, **8**(4): 353~359
Li L, Li D. Summer hydrographic features of west channel of Taiwan Shoals and the coastal upwelling. *J. Oceanogr. Taiwan Strait* (in Chinese), 1989, **8**(4): 353~359
- [4] Hu J Y, Kawamura H, Hong H S, et al. Hydrographic and satellite observations of summertime upwelling in the Taiwan Strait: A preliminary description. *Terres. Atmos. Oceanic Sciences*, 2001, **12**(2): 415~430
- [5] 李立,郭小钢,吴日升. 台湾海峡南部的海洋锋. 台湾海峡, 2000, **19**(2): 147~156
Li L, Guo X G, Wu R S. Oceanic fronts in the southern Taiwan Strait. *J. Oceanogr. Taiwan Strait* (in Chinese), 2000, **19**(2): 147~156

- [6] 曾流明. 粤东沿岸上升流迹象的初步分析. 热带海洋, 1986, **5**(1): 68~72
Zeng L M. A preliminary analysis of indicators of offshore upwelling off eastern Guangdong. *J. Tropical Oceanogr.* (in Chinese), 1986, **5**(1): 68~72
- [7] 于文泉. 南海北部上升流的初步探讨. 海洋科学, 1987, (6): 7~10
Yu W Q. A preliminary approach of the upwelling for the northern South China Sea. *Marine Science* (in Chinese), 1987, (6): 7~10
- [8] 韩舞鹰, 马克美. 粤东沿岸上升流的研究. 海洋学报, 1988, **19**(1): 52~59
Han W Y, Ma K M. A study of eastern Guangdong coastal upwelling. *Acta Oceanol. Sin.* (in Chinese), 1988, **19**(1): 52~59
- [9] Li L. Summer upwelling system over the northern continental shelf of the South China Sea—a physical description. Proceedings of the Symposium on the Physical and Chemical Oceanography of the China Seas. Su J, Chuang W S, Hsueh R Y, Eds. Beijing: China Ocean Press, 1993. 58~68
- [10] 洪启明, 李立. 粤东陆架区夏季的上升流. 台湾海峡, 1991, **10**(3): 272~277
Hong Q M, Li L. A study of upwelling over continental shelf off eastern Guangdong. *J. Oceanogr. Taiwan Strait* (in Chinese), 1991, **10**(3): 272~277
- [11] DiMarco S F, Chapman P, Nowlin W D, Jr. Satellite observations of upwelling on the continental shelf south of Madagascar. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(24): 3965~3968
- [12] Wang D X, Luo L, Liu Y, et al. Seasonal and interannual variability of thermal front in the Tonkin Gulf. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, v 4892, 2003, 415~425
- [13] 马应良, 许时耕, 钟欢良, 等. 南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告. 北京: 海洋出版社, 1990. 184~214
Ma Y L, Xu S G, Zhong H L, et al. *Report on Decadal Hydrographic Investigations in the Sea Area Adjacent to the Shelf of the Northern South China Sea* (in Chinese). China Ocean Press, Beijing, 1990. 184~214

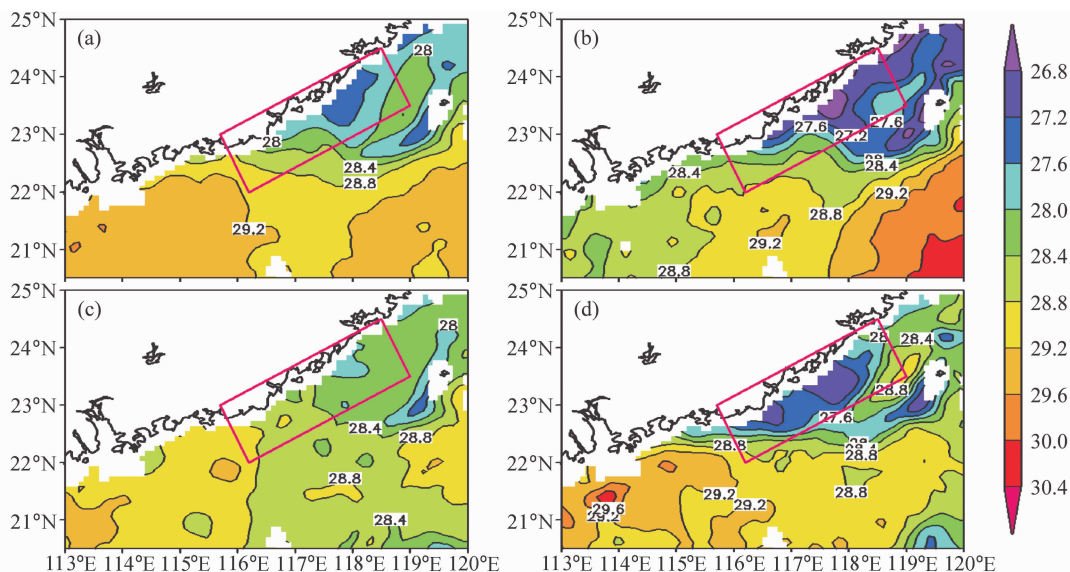


图2 研究海区在2000年不同时段平均NOAA卫星遥感AVHRR海表温度分布图:(a)6月1日~8月31日;(b)6月7~27日;(c)7月4~24日;(d)7月28日~8月9日。等值线间隔为0.4℃,红色矩形区域内是沿岸低温区
Fig. 2 Sea surface temperature in the study domain, derived from AVHRR/NOAA daily data in 2002, averaged over (a) Jun. 1 – Aug. 31, (b) Jun. 7 – Jun. 27, (c) Jul. 4 – Jul. 24, and (d) Jul. 28 – Aug. 9, respectively. The contour interval (CI) is 0.4℃ and the red rectangle represents the selected region

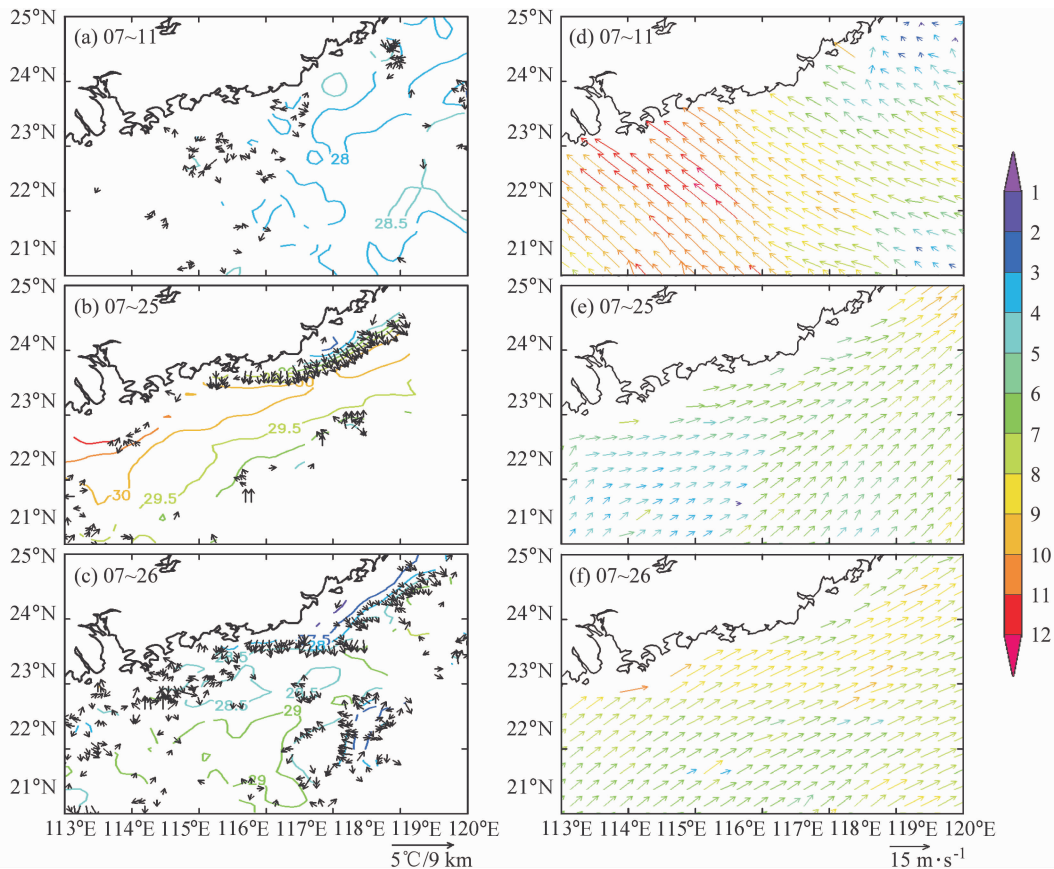


图3 2000年7月的温度分布曲线和温度梯度矢量图(仅作出大于0.5℃/9km的梯度矢量,a~c)以及相应的海面风场图(d~f)
Fig. 3 SST distribution (contours) and Temperature gradient vectors (only values over 0.5℃/9km shown, a~c) and QuikSCAT sea surface wind field (d~f) in Jul 2000