

基于遥感资料的夏季广东沿岸上升流分布特征*

Characteristics of the Distribution of Upwelling Flow off Guangdong Coast in Summer Based on Remote Sensing Dataset

王妍^{1,2}, 胡运³, 任慧军⁴

WANG Yan^{1,2}, HU Yun³, REN Hui-jun⁴

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏南京 210044; 2. 南京信息工程大学气候与气象灾害协同创新中心, 江苏南京 210044; 3. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛 266100; 4. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044)

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China; 2. Climate and Weather Disasters Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China; 3. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao, Shandong, 266100, China; 4. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China)

摘要:【目的】研究广东沿岸夏季上升流的时空变化规律及其对沿岸区域气候的影响。【方法】采用 Sobel 梯度算法, 综合 MODIS 海表温度和 QuikSCAT 海面风场资料对 2003 年夏季广东沿海上升流的范围、强度、持续时间等时空分布特征进行综合分析。【结果】广东沿岸海域存在明显的上升流现象, 整体呈现强弱强的特征, 在 7 月初出现具有明显上升流特征的低温表层水, 至 7 月底低温水活动减弱至最低, 于 8 月初又存在一个增强的过程; 同时, 上升流并非始终稳定存在。【结论】对比海表温度数据和风场资料可以发现, 上升流的强度、持续时间等与风场的变化存在密切联系, 风场是上升流的一个重要影响因素, 此外, 沿岸水团的分布也是影响广东沿岸上升流空间分布的重要因素。

关键词: 广东沿海 上升流 卫星遥感 海表温度 风场

中图分类号: P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0315-07

Abstract:【Objective】The upwelling off Guangdong coast was studied in order to understand the characteristics of its spatial and temporal distributions, as well as its influence on the coastal regional climate.【Methods】Based on the MODIS sea surface temperature (hereafter, SST) data and sea surface wind of QuikSCA, the upwelling off Guangdong coast was surveyed in the summer of 2003. The characteristics of spatial and temporal distributions, including the range, the

intensity, and the duration, have been comprehensively analyzed using the Sobel gradient algorithm.【Results】The upwelling phenomena were obvious off Guangdong coast, which changed overall from stronger to weaker and then to stronger again. The low surface waters with clear upwelling appeared in early July, decreased to the lowest in late July, and increased again in early August. Meanwhile the

收稿日期: 2015-03-15

修回日期: 2015-05-17

作者简介: 王妍(1979-), 女, 硕士研究生, 实验师, 主要从事海气相互作用方面的研究。

* 国家自然科学基金项目(41276186), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206016)和江苏省高校自然科学基金项目(S5411010001)资助。

upwelling phenomena did not always stably exist. **【Conclusion】** Comparison of SST with wind field suggested that the intensity and duration of upwelling were closely associated with wind variations. The wind field was one of the main factors affecting the upwelling. Furthermore, the distribution of water mass off Guangdong coast had an important influence on the spatial distributions of upwelling.

Key Words: Guangdong coast, upwelling, satellite remote sensing, sea surface temperature, wind field

0 引言

【研究意义】上升流能够将含有丰富营养盐的低温深层水带至表层或近表层,使得沿岸上升流海区的表层或近表层具有明显的低温、高盐、高密度及低溶解氧等特征,不仅直接影响沿岸的区域气候特征,而且使得海水真光层浮游生物的生产力和生物量快速增长,比如在上升流存在区域有害赤潮的发生率明显高于其他海域^[1]。开展沿岸上升流的时空变化规律研究,对于海域生态系统的了解,水质环境监测以及渔业管理等将起到至关重要的作用。**【前人研究进展】**广东沿岸海区是南海沿岸强上升流区域之一。早在 20 世纪 60 年代,管秉贤^[2]根据 1959 年至 1960 年间我国对广东外海综合考察的结果,首次系统分析了广东东部外海的夏季上升流。此后我国海洋工作者多次利用航次资料、实测资料和遥感资料等对广东沿岸上升流做了更为细致的研究。李立等^[3]指出,上升流发生的海域附近,夏季普遍存在着温度和盐度锋面。曾流明^[4]依据现场调查资料,分析了 1979 年夏季广东东部沿岸上升流的结构特征。于文泉^[5]和韩舞鹰等^[6]通过分析不同年份时间段的航次资料,讨论了夏季广东东部沿岸海域的风生上升流,指出风强度、方向和径流等因素都直接或间接影响着上升流的活动,其对应于不同年份时间段中心位置的时空差异会有较大变动。李立^[7]与洪启明^[8]等根据综合分析多年历史水文资料,进一步阐明了广东东部上升流可能是南海北部海盆尺度季节性上升流的一个分支。其他一些研究也同样发现,广东东部沿岸经常出现上升流,受风及径流等影响,在不同的年份,上升流的位置和强度也有着明显差异^[8~10]。另外,海面风场也是影响上升流的一个重要因素。庄伟等^[11]根据实测风场资料表明,夏季上升流的强度受海面风场平行岸分量变化的直接影响:上升流强度较大时,同期的海表风速大,且海表风向大多是西南风;而上升流强度较弱时,同期的风场多为东南风或东北风。**【本文研究切入点】**具体到一个上升流过程的消长变化及局地风场对其影响,仍有待全面了解。另外,上升流伴随较强的锋面特征,在空间分布上有着较高水平梯度的

狭长带状结构。而锋区往往具有很强的斜压结构,是海洋能量从较大尺度向小尺度过渡最强烈的地方,确定上升流锋面的位置,可以帮助更好理解上升流的运动过程。**【拟解决的关键问题】**利用卫星遥感获取的海面温度与海面风场资料,通过提取上升流锋面信息,分析 2003 年夏季广东沿岸上升流消长过程和局地风场对其影响。

1 数据和方法

1.1 卫星遥感资料

本文采用的卫星遥感资料包括海表温度和海面风场数据。海表温度资料从 NASA (美国国家航空航天局) 官方网站免费获取,由 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), 即中等分辨率成像光谱仪观测所得。由于云的影响,海表温度数据存在部分缺失的情况。为了分析上升流消长过程的变化特征,本文选取 2003 年 7 月、8 月受云影响较小的数据,对广东沿岸上升流进行分析,研究区域选定为 $114^{\circ} \sim 118^{\circ} \text{E}$, $22^{\circ} \sim 24^{\circ} \text{N}$ 。海面风场资料由 QuikSCAT 卫星获得,由美国 NASA 的 JPL (Jet Propulsion Laboratory), 喷气推进实验室提供。海面风场数据选取的时间段与海表温度数据选取的时间段相同,均为 2003 年 7 月、8 月。

1.2 锋面提取方法

本文通过梯度算法来提取温度锋面,进而分析上升流运动情况。梯度算法首先计算研究海域内某物理量的梯度,并通过多次试验来选择合适的梯度阈值,再将大于梯度阈值所对应的区域视为锋面大体位置。目前常用的梯度算法为沿网格方向的一般梯度算法、Sobel 梯度算法和 Prewitt 梯度算法。在进行求解中心点的差分运算时,Sobel 算法和 Prewitt 算法赋予相邻网格方向上差分以不同的权重,充分考虑了周围格点对中心点的影响,在一定程度上抑制了数据运算中产生的噪音;此外,Sobel 算法被认为可以有效增强数字图像的边缘可视性。因此,本文采用 Sobel 算法作为梯度算法。

在利用 Sobel 算法计算海表温度 SST 梯度时,Sobel 算子包含两组 3×3 的矩阵,分别为横向及纵

向,将网格数据作平面卷积,即可分别得出横向及纵向的数据差分近似值。如果以 A 代表原始数据, G_x 和 G_y 分别代表经横向及纵向边缘检测的数据梯度,其公式如下:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A \& G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A.$$

海表温度的梯度 G 可以通过下式得到:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}.$$

海表温度的梯度求出后,图像中经常存在椒盐噪声,影响梯度极大值分布的判断,因此需要对梯度数据进行适当的滤波处理。本文选择中值滤波方法进行非线性数据噪音去除,在去噪的同时保留图像的细节和边缘。以研究区域 2002 年 8 月 5 日海表温度数据为例(图 1),滤波效果非常明显。

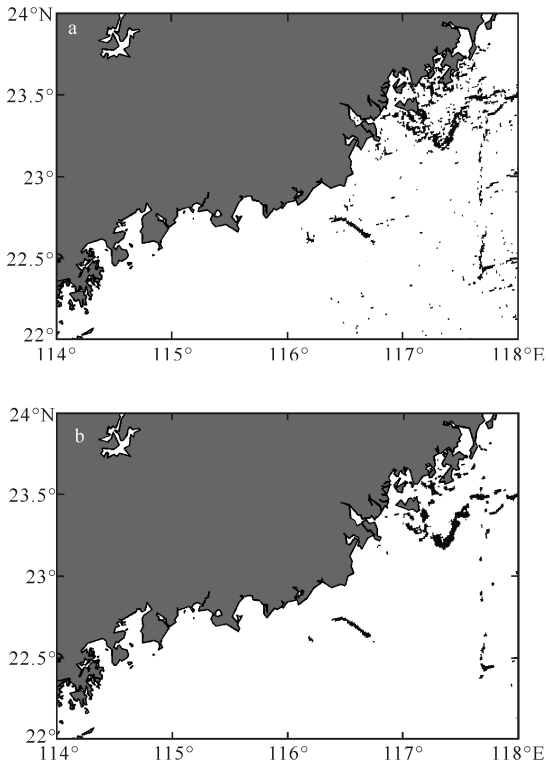


图 1 2002 年 8 月 5 日广东沿岸海表温度 SST 梯度分布
Fig. 1 Gradient distribution of sea surface temperature (SST) off eastern coast of Guangdong in August 5, 2002

a: 只利用梯度算法; b: 经梯度算法后再进行中值滤波处理。图中黑色区域为阈值选取为大于 1.9 的锋面位置。

a: using the gradient algorithm only; b: using the median filtering after gradient algorithm. The frontal positions with the threshold value larger than 1.9 are denoted with black areas.

1.3 处理流程

选取合适的的数据后,进行数据处理,其具体的迭代流程如下:

- (1) 选取初始点 a_0 , 利用实验方法或经验方法, 多次取值选取最佳梯度阈值 $\alpha > 0$, 并令 $k = 0$;
- (2) 计算梯度 $G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$;
- (3) 检查是否满足条件 $G \geq \alpha$, 若满足则转(5), 否则继续;
- (4) 令 $k = k + 1$, 转(2);
- (5) 输出结果, 若 a_{k+1} 存在, 转(4), 否则计算结束。

2 结果

本文通过梯度算法对海表温度数据进行处理, 分析上升流低温表层水出现的时间、范围及强度等特征, 然后对比海表温度数据和风场资料, 分析上升流的强度、持续时间等与风场变化的关系。

2.1 上升流分布和变化特征

从图 2 可以看出, 7 月 6 日到 7 日广东东部海岸和福建南部海岸存在一个独特的冷水带(图 2a 和 2b, 约 23.15°N), 表面海水温度小于 26°C 。冷水带区域覆盖至北部 23.45°N 附近, 此时只存在小范围区域(面积约 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$)。在海区内有一个较强的锋面, 锋面处海表温度(Sea Surface Temperature, SST)增加约 2°C 。

7 月 15 日至 16 日左右, 该表层冷水带范围达到最大值(面积约 $4.0 \times 10^4 \text{ km}^2$), 横跨 22.75°N 与 24°N 之间的广东东部海岸和福建南部海岸(图 2c 和 2d)。且较大范围的表层水温度都小于 26°C , 表层冷水带与暖水带之间的过渡地带(约 22.55°N)较窄, 在该海区存在一个强大的锋面, 温度梯度较大。

至 31 日, 表面冷水(温度小于 26°C)跨度下降到约 48 km(图 2d 和 2e), 仅限于 23°N 与 23.45°N 之间, 且该海区的南部和北部上层充满了温暖的海水(约 28°C)。7 月 31 日, 海表面冷水(小于 26°C)存在于广东东部海岸和福建南部海岸交界(约 23.65°N), 但在 8 月 2 日后它稍微向北转移到 23.71°N 。

8 月 2 日后, 广东东部海岸和福建南部海岸交界处的部分海洋表层水逐渐由 28°C 的表层暖水再次变冷为小于 26°C 的冷水, 而范围也增加了约 3000 km^2 (图 2f)。可以看出在 7 月底, 海表面冷水活动强度减弱, 上升流在 8 月初会有一个增强的过程, 但此次上升流过程与 7 月中旬相比上升流的强度减弱许多, 并在此后逐渐消失。

综上所述, 广东沿岸上升流在 2003 年 7 月、8 月

总体变化趋势表现为强→弱→强的3个阶段。

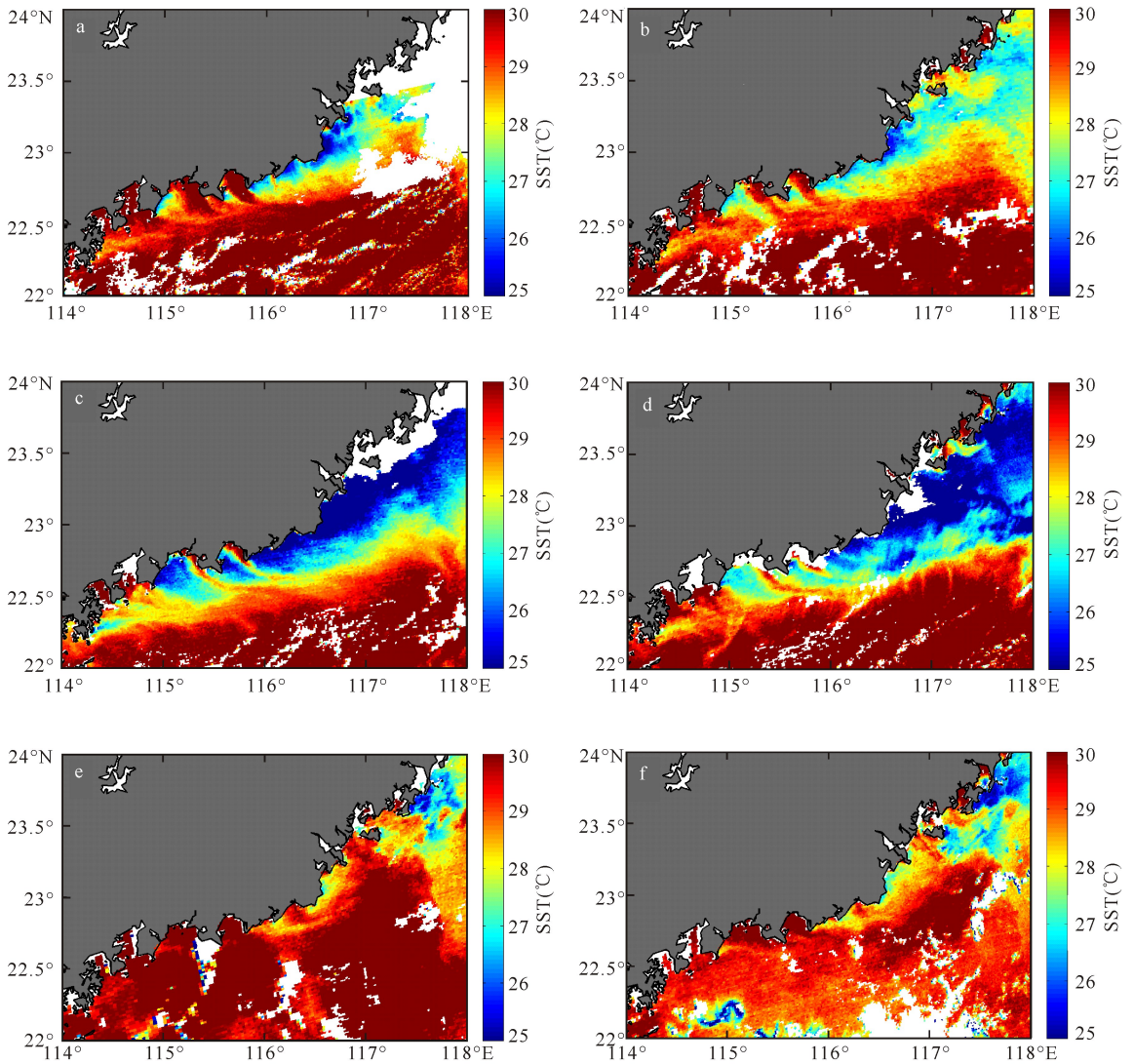


图2 2003年MODIS海表面温度(SST)图像

Fig. 2 Figures of sea surface temperature(SST)for MODIS in 2003

a:7月6日;b:7月7日;c:7月15日;d:7月16日;e:7月31日;f:8月2日。

a:6 July ;b:7 July ;c:15 July ;d:16 July ;e:31 July ;f:2 August.

2.2 锋面及强度变化

采用 Sobel 梯度算法对海表温度数据提取梯度后,再进行中值滤波处理得出的 MODIS 海表面温度(SST)梯度图像(图3)。

从2003年7月7日的图像可以看出,相对于其他30°C的暖水海域,该日广东东部海域存在着较大区域的冷水带(图2b,水温介于27°C与27.5°C之间,位于23.45°N)。锋面结构较完整,锋面狭窄(图3b),呈现倒U字型区域,较7月6日(图3a)范围更大,由此可见,上升流已经开始形成,并且向南移动。

从图3c可以看出,7月15日存在着较大范围的

黑色区域,横跨22.5°N至23°N的一个纬度范围,上升流锋面位于23.45°N。而在16日(图3d),上升流锋面南移至22.65°N,其东北部海域黑色区域稀疏,海温降至26°C以下。

至7月底,23.35°N以南黑色区域更加稀疏(图3e),温度大于29°C,温度梯度变幅很小;23.35°N以北海区还存在着黑色区域,维持着上升流过程,其总体变化趋势已经很弱。但于8月2日左右,上升流的锋面区域范围扩大,由原先的23.35°N延伸至22.63°N(图3f),出现了一个上升流变强的过程。

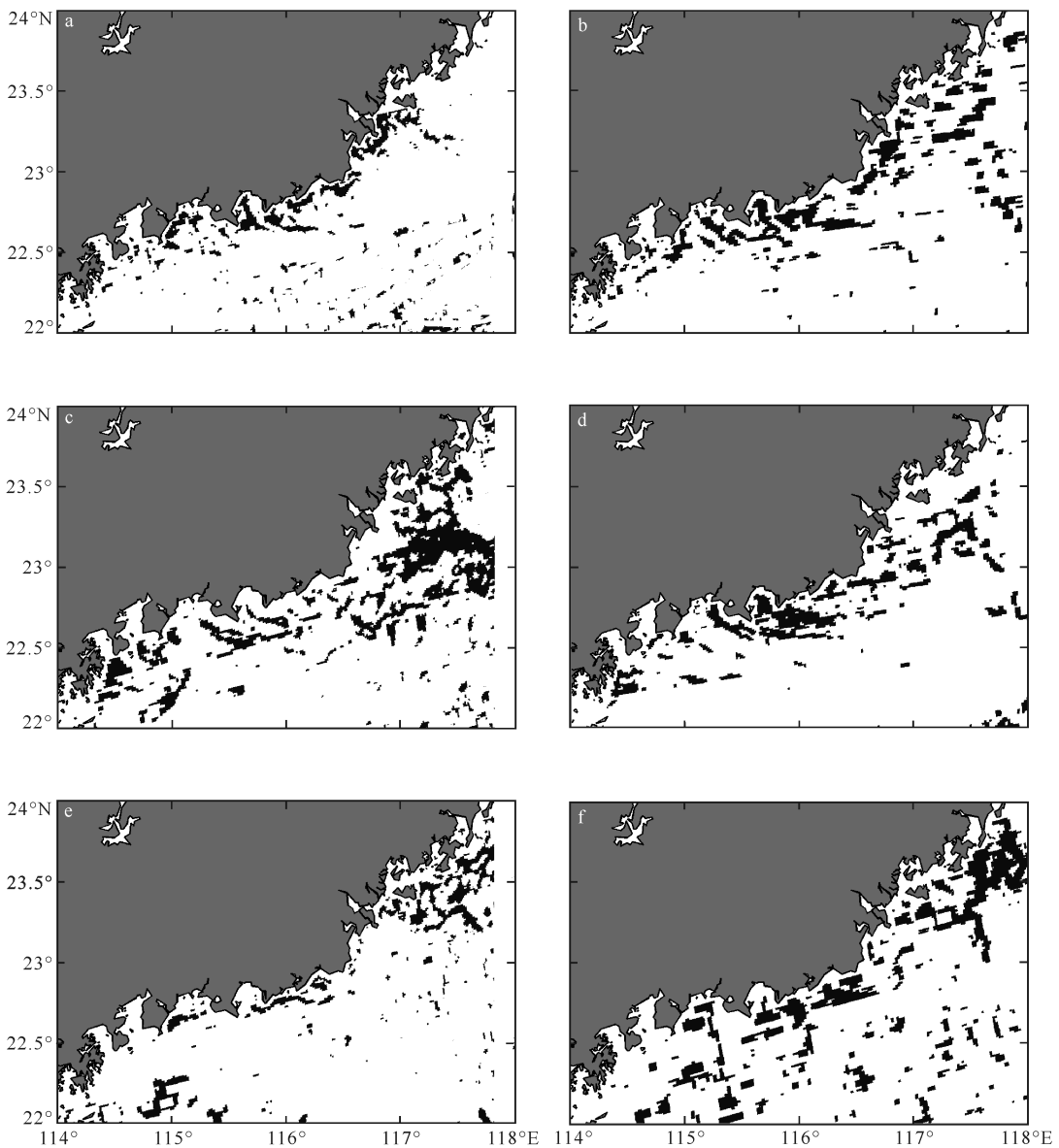


图3 经 Sobel 算法计算梯度后再进行中值滤波处理得出的 2003 年 MODIS 海表面温度(SST)梯度图像

Fig. 3 Gradient distribution of sea surface temperature(SST) for MODIS in 2003 using the median filtering after Sobel gradient algorithm

a:7月6日;b:7月7日;c:7月15日;d:7月16日;e:7月31日;f:8月2日。图中黑色区域为阈值选取为大于1.9的锋面位置。

a:6 July;b:7 July;c:15 July;d:16 July;e:31 July;f:2 August. The frontal positions with the threshold value larger than 1.9 are denoted with black areas.

2.3 上升流与风场的关系

风场数据采用的是 QickScat 周平均卫星风场数据(图 4)。7月初,广东沿海岸域盛行东南风,此时广东沿海岸域存在明显的低温区,海面温度梯度也相对较弱,只有零星的锋面存在。而7月3日至17日的时期内(图 4a、b、c),研究海区盛行西南风,广东沿海岸域存在一片连续的较大范围的低温区,中心温度低于 27℃。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。在7月24日

后(图 4d),广东沿海岸域盛行东南风,此时上升流明显减弱,上升流中心北移,范围区域明显缩小。在7月底、8月初的时刻,风向产生短暂的变化,使得上升流产生一定的增强,随后风向又转至夏季盛行的东南风风向。

风场与上升流变化特征有很好的对应关系,上升流强度较大时,同时期的海面风向大,且风向大都是西南风;而上升流较弱时,同期的海面风向多为东南风或东北风。

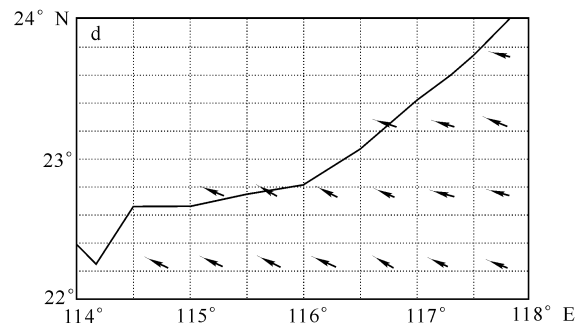
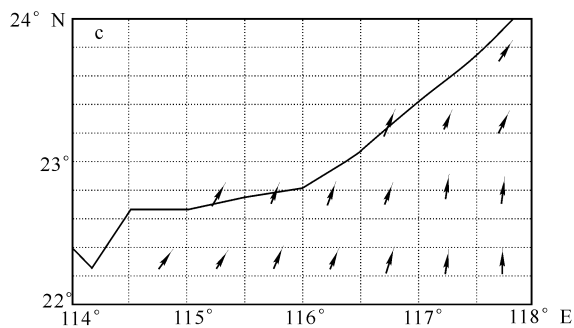
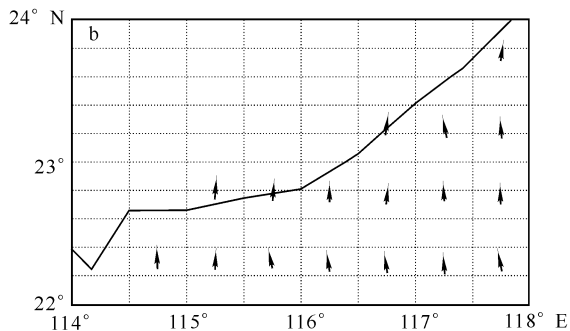
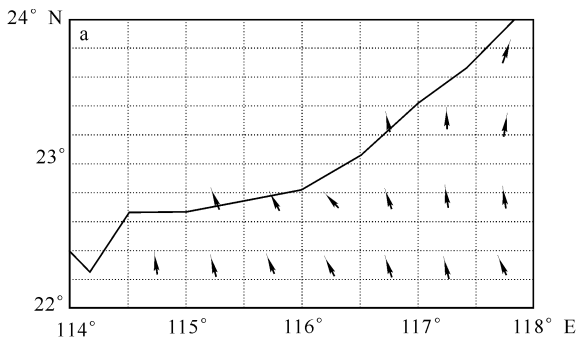


图4 2003年22°~24°N, 114°~118°E处广东沿岸风向数据

Fig. 4 The wind direction off Guangdong coast(22°~24° N, 114°~118°E) in 2003

a: 7月3日; b: 7月10日; c: 7月17日; d: 7月24日。

a: 3 July ; b: 10 July ; c: 17 July ; d: 24 July.

3 讨论

本文选用2003年7月至8月的海表温度及风场资料,研究发现,夏季广东东部沿海存在着明显的上升流现象。从总体趋势来看,研究海域2003年夏季的上升流强度变化可分为强→弱→强的3个阶

段。其他研究者同样揭示该区域的SST存在先低温到高温,再从高温到低温的转变过程^[11],和本文分析所得上升流强度的变化趋势吻合。

通过分析温度分布及梯度范围的差异,广东东部沿海上升流并非稳定存在,这和风场的大小和方向有着密切的相关关系。从本文分析中可以看出上升流强度较大时,同时期的海面风向大,且风向大都是西南风;而上升流较弱时,同期的海面风向多为东南风或东北风。同时从2003年7月至8月的广东上升流可以看出,当风矢量的强度及方向改变后,存在一个很短的滞后时间段,上升流也发生显著变化。风场的时间、范围及强度等有较强的季节变化与年际变化,因而不同的年份,广东沿岸上升流的存在时间、出现范围和强度变化也有着较大的年际差异^[12]。

另外,颜廷壮^[13]针对中国沿岸上升流研究现状分析了中国沿岸上升流形成的原因,其研究表明广东东岸沿岸上升流属于风生类上升流,其中心位置约22°~22.6°N, 115°E附近海域,冷水范围为21.8°~22.8°N, 114°~116.5°E近岸附近海域,多发生在6月至8月^[4,6]。

从图4风向的变化可以看出广东沿岸上升流的形成过程为一个补偿过程,其动力是艾克曼(Ekman)离岸输送分量。它推动近岸表层水离岸外流,所以产生了中层和深层水向上的补偿运动。风和径流(主要是珠江径流)是影响该上升流的主要因子,并且由于风和径流的时空差异性,导致了上升流存在着时空变异。

此外,海表温度和风场资料分析结果还发现,7月5日后至17日时上升流范围没有较大改变,只是底层冷水上涌至表层,使海表温度下降到26℃以下,并且维持在22.63°N以北。这种现象不能用海面风场的时间分布差异来解释:从图4可知,7月17日左右,海面风盛行西南季风,116°E以西近岸海域的海面风场平行于岸的分量也很强,这种情况有利于上升流的形成,但该海域的海表温度却普遍较高。可能的原因是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^[11]。因此,沿岸水团的分布也是影响广东沿岸上升流空间分布的重要因素。

4 结论

本文利用Sobel梯度算法,通过对2003年7月MODIS海表温度数据和同时期QuickScat海面风场数据进行分析,得出以下几点结论:(1)广东东部沿岸

海域夏季存在明显的上升流现象,在上升流海区的沿岸表层水团和次表层水团交汇处,存在明显的海洋锋;(2)广东东部沿岸上升流属于风生类季节性上升流,该上升流的强弱与盛行风的变化有着较强的对应关系;(3)2003年夏季广东东部沿岸上升流的总体变化趋势表现为强→弱→强的3个阶段。同时,沿岸水团的分布也是影响广东沿岸上升流空间分布的重要因素。

参考文献:

[1] Tang D L, Kawamura H, Doan-Nhu H, et al. Remote sensing oceanography of a harmful algal bloom off the coast of southeastern Vietnam[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2004, 109(C3).

[2] 管秉贤. 中国近海的海流系统[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 1964.

Guan B X. The Current System of Chinese Offshore [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 1964.

[3] 李立, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡南部的海洋锋[J]. *台湾海峡*, 2000(2): 147-156.

Li L, Guo X G, Wu R S. Oceanic fronts in southern Taiwan Strait [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000(2): 147-156.

[4] 曾流明. 粤东沿岸上升流迹象的初步分析[J]. *热带海洋*, 1986(1): 68-73.

Zeng L M. A preliminary analysis of indicators of offshore upwelling off eastern Guangdong[J]. *Tropic Oceanology*, 1986(1): 68-73.

[5] 于文泉. 南海北部上升流的初步探讨[J]. *海洋科学*, 1987(6): 7-10.

Yu W Q. A preliminary approach of the upwelling for the northern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 1987(6): 7-10.

[6] 韩舞鹰, 马克美. 粤东沿岸上升流的研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 1988(1): 52-59.

Han W Y, Ma K M. A study of upwelling over continental shelf off eastern Guangdong[J]. *Acta Oceanologica*

Sinica, 1988(1): 52-59.

[7] Li L. Summer upwelling system over the northern continental shelf of the South China Sea: A 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.

[8] 洪启明, 李立. 粤东陆架区夏季的上升流[J]. *台湾海峡*, 1991(3): 79-85.

Hong Q M, Li L. A study of upwelling over continental shelf off eastern Guangdong[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1991(3): 79-85.

[9] Wang D, Luo L, Liu Y, et al. Seasonal and Interannual Variability of the Thermal Fronts in the Tonkin Gulf [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2003: 415-425.

[10] 肖晖. 台湾海峡西部沿岸上升流的研究[J]. *台湾海峡*, 1988(2): 135-142.

Xiao H. Studies of coastal upwelling in western Taiwan strait[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1988(2): 135-142.

[11] 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(3): 438-444.

Zhuang W, Wang D X, Wu R S, et al. Coastal upwelling off eastern Fujian-Guangdong detected by remote sensing[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005(3): 438-444.

[12] Blanke B, Speich S, Bentamy A, et al. Modeling the structure and variability of the southern Benguela upwelling using QuikSCAT wind forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2005, 110(C7).

[13] 颜廷壮. 中国沿岸上升流成因类型的初步划分[J]. *海洋通报*, 1991(6): 1-6.

Yan T Z. Features and classification of coastal upwellings off China [J]. *Marine Science Bulletin*, 1991(6): 1-6.

(责任编辑:米慧芝)

(上接第 314 页 Continue from page 314)

[8] 宋庆君, 唐军武. 黄海东海海区水体散射特性研究[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 56-63.

Song Q J, Tang J W. The study on the scattering properties in the Huanghai Sea and East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 56-63.

[9] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰, 等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度关系模型[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2688-2694.

Sun D Y, Li Y M, Le C F, et al. Scattering characteristics of Taihu lake and its relationship models with suspended particle concentration [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2688-2694.

[10] Maffione R A, Dana D R. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean

waters [J]. *Proceeding of Applied Optics*, 1997, 36: 6057-6067.

[11] Anon. HydroScat-6 Spectral Backscattering Sensor User's Manual, Revision date: Jan 22, 2002 [EB/OL]. [2014-09-20]. www.hobilabs.com, 2002-01-22/2002-05-10.

[12] Lee Z P, Carderkl, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Applied Optical*, 2002, 41(27): 5755-5772.

(责任编辑:米慧芝)