

文章编号: 1674 - 5566(2016)01 - 0142 - 10

舟山近海海域夏季上升流时空特征及其与风场的关系

何青青^{1,2}, 张春玲^{1,2}, 高郭平^{1,2}, 魏永亮^{1,2}, 安佰超^{1,2}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续利用省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

摘 要: 利用 2002 - 2013 年期间的卫星遥感海表温度(SST)数据分析了舟山海域夏季上升流的时空特征,并结合同时期的海面风场数据探讨了风对该海域夏季上升流的影响。对多年夏季月平均的 SST 进行经验正交函数(EOF)分解结果表明,7 月份前两个模态方差贡献率分别为 71.66%、16.55%,8 月份前两个模态方差贡献率分别为 87.03% 和 7.30%,并均通过了显著性检验,舟山近海海域的上升流存在较为明显的年际变化。相关分析显示,经向风速和 SST 异常存在显著的负相关关系,即夏季盛行的西南风有利于上升流的发展。并且,艾克曼(Ekman)体积输运计算结果表明,舟山海域 7、8 月份风生上升流的量级分别为 3.0×10^{-5} m/s 和 1.5×10^{-5} m/s,7 月上升流显著强于 8 月,这与 8 月份观测到的海表显著低温异常相关。

关键词: 舟山近海海域;海表温度;风场;经验正交函数;艾克曼体积输运

中图分类号: P 733 **文献标志码:** A

舟山近海海域位于中国东海西北部的陆架浅海区,岛屿密布,海岸线曲折,沿岸等深线主要呈南北走向,分布比较密集,自西向东水深变化较快。舟山海域是我国近海重要的上升流发生区^[1],上升流可以将深层的营养盐带到表层,促使上层水生生物生长和繁殖,增加该海域的生物多样性^[2],从而形成我国最大近海渔场之一的舟山渔场。因此,研究舟山海域上升流的时空变化及其形成的动力机制,有助于促进对舟山海域对渔场形成和渔业资源变化等的研究。

较早关注和研究我国东部近海的上升流现象,特别是对舟山近海海域上升流的研究可以追溯到二十世纪六十年代初期^[3]。此后,通过现场观测资料也验证了舟山近海存在上升流现象^[4],并有研究提出地形和风的作用是形成上升流的重要原因^[5]。此外,黑潮北上余脉和台湾暖流对该海域的上升流起到主要作用^[6-7];利用该海域的卫星遥感观测资料,验证了上升流特征,并认为风场是上升流形成的重要原因^[8-10]。此外,潮

汐与地形的非线性作用也可以引起上升流^[11];黄祖珂等^[12]、罗义勇^[13]、吕新刚等^[14]对于舟山近海海域的数值模拟,表明潮致上升流也是一个重要机制。这些研究揭示了舟山近海海域产生上升流的不同机制,如潮汐、地形变化、台湾暖流和风场等,并且这些因素往往相互作用产生更加复杂的上升流特征,并存在显著年际差异^[8-9]。而舟山近海海域地形稳定,该海域潮汐主要以非正规半日潮为主,台湾暖流深层水的温、盐性质较为稳定,季节变化及多年变化也不太明显^[15-16],而影响该海域的风场的变化受到天气系统和气候条件的影响,对上升流的季节及年际变化具有重要的影响作用。为此,本文利用高分辨率的卫星遥感海表面温度(SST)资料,以及 QuikSCAT 和 WindSat 海面风场资料,通过经验正交函数(EOF)分解和相关性分析,探讨了舟山海域(121°E - 124°E, 29°N - 30°N)夏季上升流的时空分布及变化特征,并结合 Ekman 体积输运理论估算了风对舟山海域沿岸上升流的效应。

收稿日期: 2015-01-07 修回日期: 2015-06-04

基金项目: 上海市科委重点支撑项目(13230502000); 国家海洋局溢油鉴别与损害评估技术重点实验室资助项目(D - 8005 - 14 - 8003); 上海海洋大学博士科研启动基金项目(A2 - 0302 - 14 - 300071)

作者简介: 何青青(1990—),女,硕士研究生,研究方向为物理海洋学。E-mail: hq1109@126.com

通信作者: 高郭平, E-mail: gpgao@shou.edu.cn

1 资料和方法

1.1 卫星遥感 SST 资料及风场资料

本文根据舟山近海海域夏季上升流对应的海表温度(SST)低温异常的特征,选用由美国国家海洋数据中心提供的2002-2013年6-9月多尺度超高分辨率的卫星遥感SST再分析数据(<http://www.nodc.noaa.gov/SatelliteData/ghrsst/accessdata.html>),其空间分辨率约为1.1 km,对应研究海域的经度和纬度范围分别是121°E-124°E和29°N-32°N。

选用的海面风场数据是美国宇航局(NASA)提供的微波遥感QuikSCAT(Quick Scatterometer)风场数据(时间跨度为2002-2009年)和WindSat(时间跨度为2010-2013年)资料集(<http://www.remss.com/>)。这两个风场数据集的空间分辨率均为0.25°×0.25°。

1.2 EOF分析方法与Ekman体积输送

经验正交函数分解(EOF)方法能够应用于大气和海洋要素的时空特征分析,而得到广泛的应用^[17]。本文将使用该方法开展舟山海域SST在7月和8月时空特征的分析,首先计算了研究海域SST多年月平均距平值,再通过EOF分析分别计算7月和8月海表温度异常的前两个空间模态以及时间系数,并计算其对应第 k 个模态的方差贡献率:

$$R_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^m \lambda_i, k=1, 2, \dots, p (p < m) \quad (1)$$

式中: R_k 为第 k 个模态的方差贡献率; m 为空间点(观测站或网格点); p 为特征向量的个数; λ 为第 i 个模态的特征值。

以及累积方差贡献率:

$$G = \sum_{i=1}^p \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i, (p < m) \quad (2)$$

式中: G 为累积方差贡献率; m 为空间点(观测站或网格点), p 为特征向量的个数, λ 为第 i 个模态的特征值。

使用NORTH等提出的计算特征值误差范围

来进行显著性检验^[18]。 X 的方差 λ 可以简单地用特征根的大小来表示。特征值越高说明其对应的模态越重要,对总方差的贡献越大。其中,第 k 个模态对总方差解释为:

$$\frac{\lambda_k}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \times 100\% \quad (3)$$

为了解实际资料分析中得到的空间模态是否是随机的,需要对分析结果进行统计检验。采用NORTH等^[18]提出的特征值 λ_k 的误差范围:

$$e_j = \lambda_j \sqrt{\frac{n}{2}} \quad (4)$$

式中: e_j 为特征值的误差范围; n 为样本量。当相邻的特征值 λ_{j+1} 满足 $\lambda_j - \lambda_{j+1} \geq e_j$ 时,就认为这两个特征值所对应的经验正交函数是有显著的信号。

2 结果与分析

2.1 上升流现象

根据卫星遥感再分析SST数据,舟山近海海域2002-2013年多年月平均的海表温度分布如图1所示。自6月份开始,舟山近海海域以舟山群岛为中心,在122°~123°E,29.5°~31°N范围内,表现为一个弱的低温中心,温度低于同纬度的值约为0.5℃;7月,该低温中心进一步增强,面积扩大,中心温度低于25℃(邻近海域温度>26℃),温度低于同纬度的外海水温1℃左右;8月该表层低温中心进一步扩大,最低温度低于26.5℃(邻近海域温度接近28℃),温差达到1.5℃左右;9月,舟山群岛为中心的低温中心减弱,与邻近海域的温差在0.5℃以下。由此可得,舟山近海海域以舟山群岛为中心的区域在7月和8月呈显著的低温特征,比同纬度的外海表层水温低1.5℃左右,这与以往研究揭示的夏季上升流现象相一致^[8,10],上升流的作用将深层低温水带到表层从而维持表层的低温。

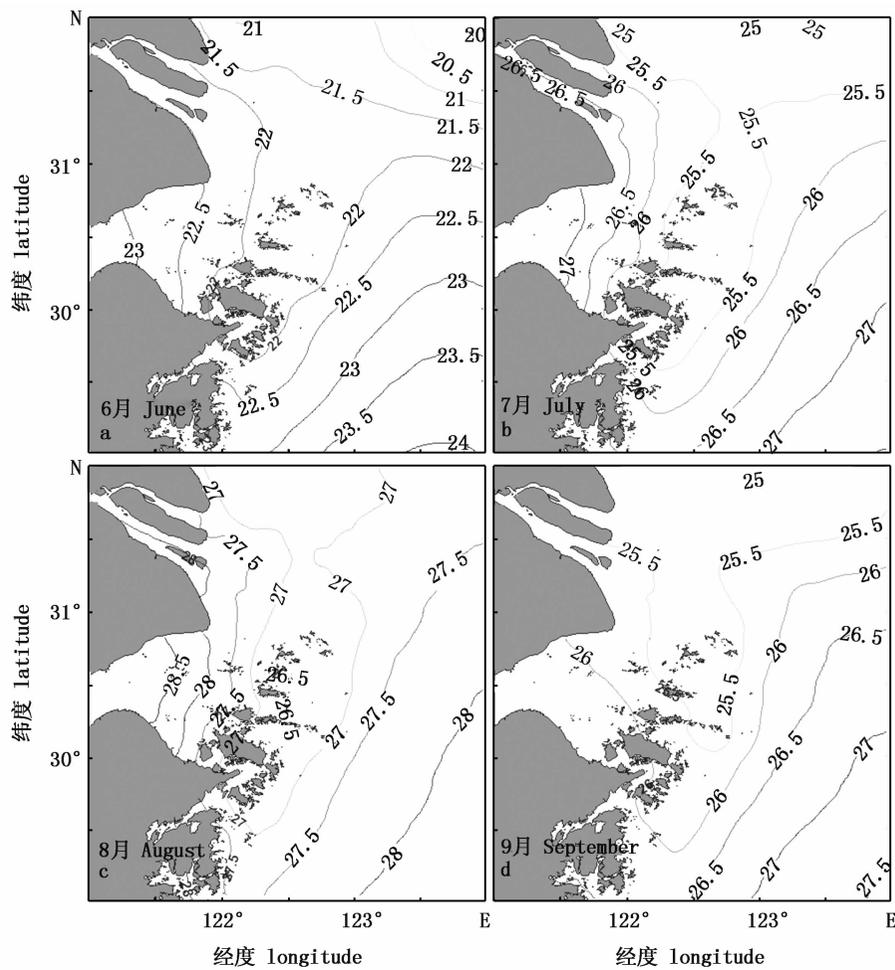


图 1 2002 - 2013 年 6 - 9 月多年月平均 SST (°C) 分布

Fig. 1 Monthly averaged SST (°C) distribution of June to September between 2002 and 2013

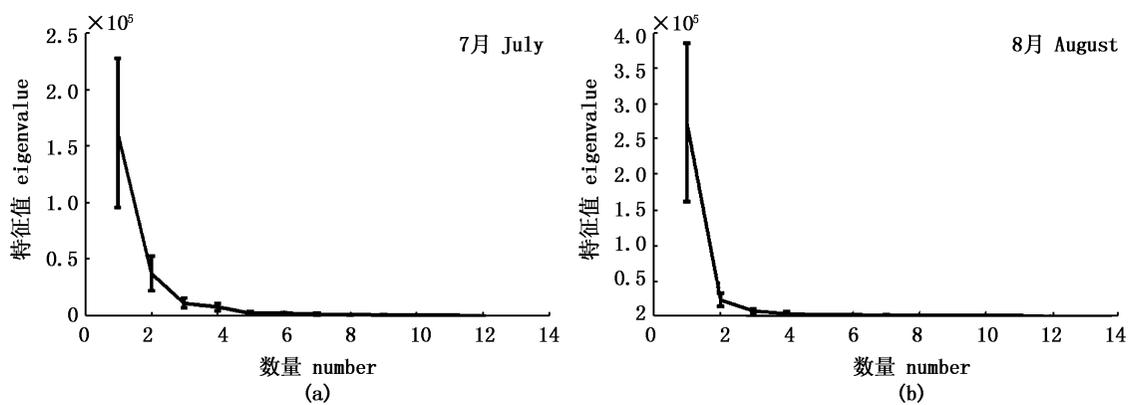


图 2 7、8 月 EOF 分解的特征根及 95% 的信度误差

Fig. 2 The characteristic roots by EOF analysis and 95 percent of reliability error in July and August

2.2 上升流的时空特征

为进一步探讨舟山近海海域夏季上升流的时空特征,以 7、8 月份为例,对该海域夏季的月

平均 SST 距平场(SSTa)进行 EOF 分解,获取 SST 方差变化的空间模态和时间变率。7 月份前两个模态方差贡献率分别为 71.66% 和 16.55%,8 月

份前两个模态方差贡献率,分别为 87.03% 和 7.30%,并均通过了显著性检验。如图 2 所示,在 95% 的置信度下,7、8 月份前两个模态的特征值误差相对独立,没有重叠,即前两个模态具有显著差别,能够分别代表该海域海表异常时空变化信号。下面将分别对该海域海表异常的前两个模态所反映的不同月份上升流的时空变化规律进行分析。

舟山近海海域夏季 7 月份 SSTa 经 EOF 分解得到的第 1 模态时空分布如图 3 所示。由图可见,在整个研究海域第一模态均为正相关,SSTa 在空间上具有很好的整体一致性,在研究时间区

间 SSTa 与较大范围的温度变化相一致。

7 月份,正值长江、钱塘江入海径流剧增时期,因偏南风的作用沿岸流呈舌状往北流,舟山群岛处的流速相对较小,因此 SST 变率较小的值出现在舟山群岛海域,温度变化相对周围海域较稳定,表明此处存在强盛的上升流。对应的第一模态时间系数为正值时,表现为整个海域 SST 偏高。反之,则为偏低。由图 3(b)第一模态的时间系数可知,2002、2003 年夏季 SST 偏低,2004 - 2008 年呈偏高趋势,2009、2010 年降低,2011 - 2013 年又升高,基本保持 2 - 3 年的年际变化周期。

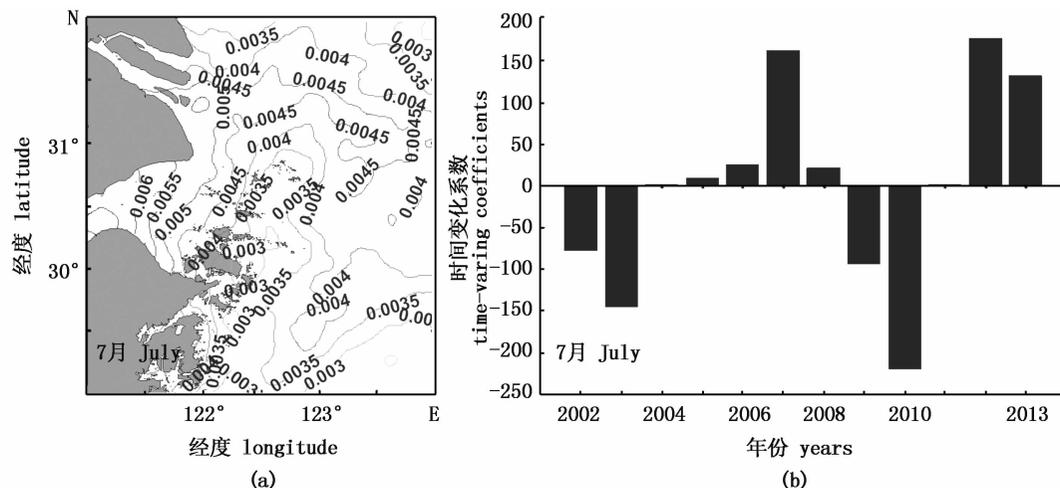


图 3 7 月 EOF 第一模态空间分布 (a) 和时间系数 (b)

Fig. 3 (a) The spatial distributions and (b) time-varying coefficients of the first mode of EOF in July

由图 4(a) 可以看出,第二模态的 SSTa 变化趋势在空间上呈现西北部海域为正值,东南部海域为负值的反相分布特征,表明这两个区域具有相反的海表温度变化趋势。夏季,东海北部近海以东南风居多,东海南部盛行西南风,海表温度变率较大。图 4(b) 为第二模态时间系数,时间变化系数为正值时,表现为西北部海域海表温度上升和东南部海域的海表温度下降,时间变化系数为负则说明西北部海域海表温度下降和东南部海域的海表温度上升。由第二模态的时间系数也可以看出,与第一模态反映的 SST 变化类似,以西北部海域为例,2002、2003 年夏季 SST 偏低,2004、2005 年呈偏高趋势,2006 - 2008 年又表现

为偏低,而后 2009、2010 年升高,2011、2012 年降低,2013 年又升高,2 - 3 年的变化周期更为明显。

与图 4(a) 类似,8 月份海表温度异常的第一模态(图 5a)在整个研究海域均为正相关,这表明该海域 SST 变化趋势在空间上具有很好的整体一致性。8 月份偏南风相对减弱,舌状沿岸流有所减弱。SST 变率值大体呈南北走向,从北向南递减。对应的第一模态时间系数为正值时,表现为整个海域 SST 偏高。反之,则为偏低。由图 5(b) 可知,2005、2009、2011 和 2012 年的 8 月份该海域温度偏低,其他年份偏高,SST 随年份呈波动变化,但并没有显著的变化周期。

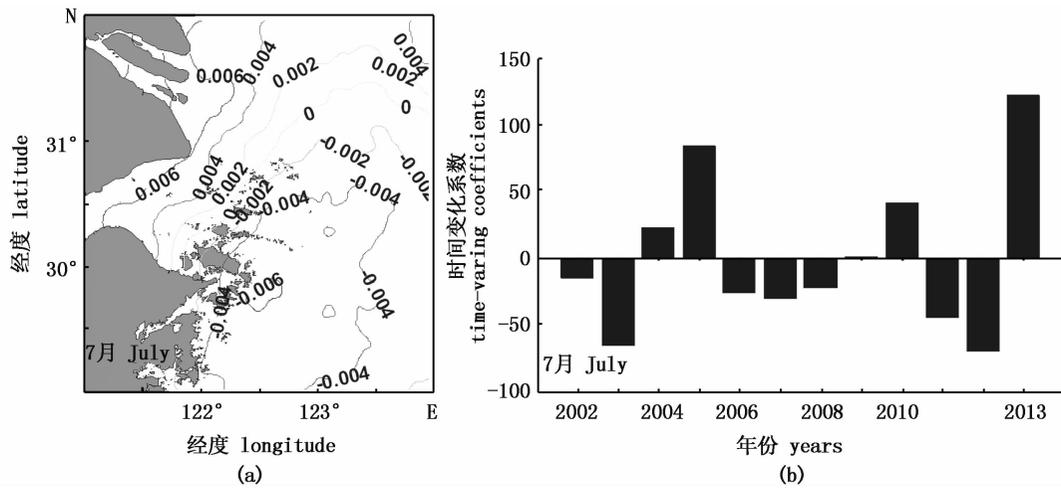


图4 7月 EOF 第二模态空间分布(a)和时间系数(b)

Fig.4 (a) The spatial distributions and (b) time-varying coefficients of the second mode of EOF in July

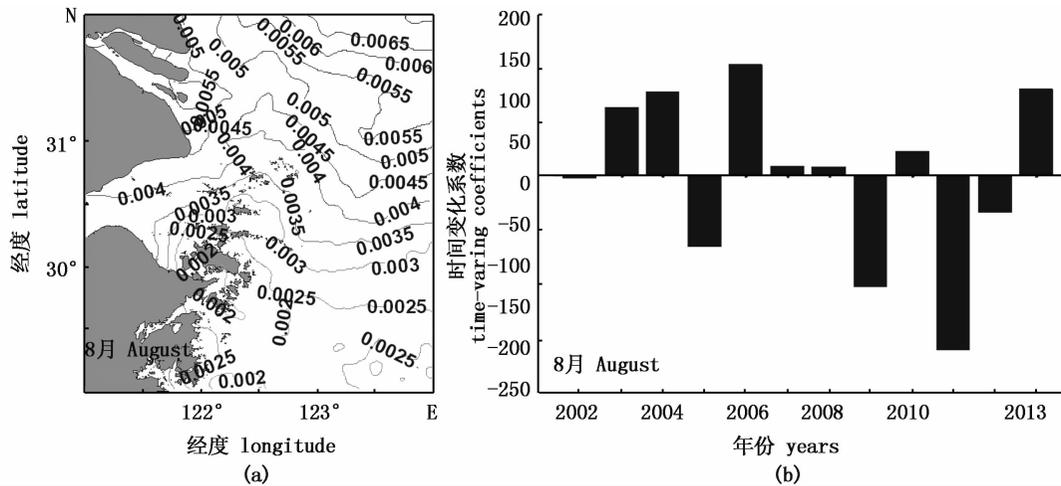


图5 8月 EOF 第一模态空间分布(a)和时间系数(b)

Fig.5 (a) The spatial distributions and (b) time-varying coefficients of the first mode of EOF in August

由图6(a)可以看出,第二模态的 SST 变化趋势在空间上呈现西北部海域为负值,东南部海域为正值的反相分布特征,说明这两个区域具有相反的变化趋势,但是变率为0的等值线相对7月份向北偏移,上升流中心区 SST 变率并不显著。由图6(b)可以看出,8月份 SST 随时间不断变化,但是变化周期不是十分明显。

综合7月和8月的 SST 异常分析可知,舟山海域夏季上升流不仅有长周期的年际变化,而且也随月份有短期变化。由于7月主要盛行西南风,8月则以东南风为主,因此, SST 变率分布和大小都有所不同。

2.3 风速风向对上升流的影响

为检验夏季风对舟山海域上升流的影响,将

两个数据集12年的风场数据进行平均,选取舟山海域7、8月份的多年月平均资料对上升流的风生机制进行研究。

图7给出了7、8月份2002-2013年的多年月平均风场。由图7(a)可得,7月份31°N以北沿岸海域受东南风控制,以南基本受西南风控制,因此上升流区基本受西南季风的控制;图7(b)则显示,8月份整个海域基本受到东南风或者东风控制。

由于舟山海域处于东亚季风带,舟山海域夏季主要盛行偏南风,而西南风更有利于舟山海域上升流的形成,风沿岸吹产生风生上升流,这里,通过经向风、纬向风来探讨风场和上升流关系^[10]。所取上升流区范围为29.5°N-30.5°N,

122°E - 123°E ,图 8 - 11 给出了上升流区的 SST 和经向风以及其距平的分布。其中经向风为正

值时,表示南风,负值时表示北风;纬向风为正值时,表示西风,负值时表示东风。

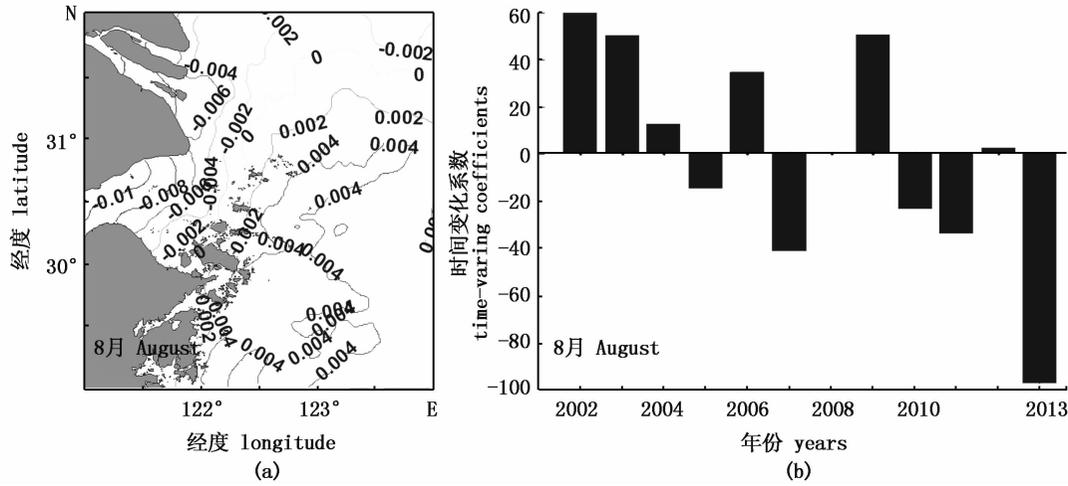


图 6 8 月 EOF 第二模态空间分布 (a) 和时间系数 (b)

Fig. 6 (a) The spatial distributions and (b) time-varying coefficients of the second mode of EOF in August

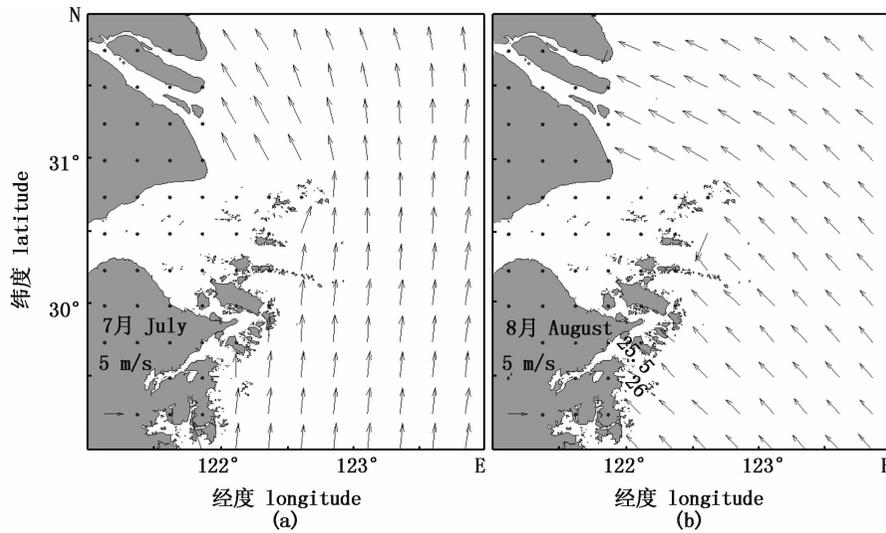


图 7 2002 - 2013 年 7、8 月多年月平均风场 (m/s) 分布

Fig. 7 The distribution of monthly averaged wind field (m/s) in July and August from 2002 to 2013

由图 8 可以看出,2002 年到 2013 年间,7 月上升流区 SST 平均在 25 °C 左右,2011 年最低,温度为 24.59 °C,2012 年最高,为 26.44 °C。7 月份经向风为南风,平均风速约为 7 m/s,最小值出现在 2002 年,为 5.27 m/s,最大值出现在 2013 年,为 8.27 m/s。很明显,2002 - 2013 年间,海表温度与经向风大致成反比关系,即,经向风速增大,海表温度降低,由此引起的上升流运动较为明显,反之则相反。两者之间的反相关系由图 9 也

可以看出,经向风距平与 SST 距平呈明显的负相关关系,并且随时间呈 2 ~ 3 年的周期性变化。其中,2012 年 SST 与风场负相关程度最为显著。7 月份纬向风基本是以西风为主,只有 2002、2006 和 2008 年是东风风向。7 月份纬向风绝对值平均在 1 m/s 左右,要比经向风小很多,2003 年最高为 2.57 m/s,2010 年最低,只有 0.17 m/s。由图 9 可知,纬向风距平和海表面温度距平也有着一定的负相关关系,西风风速越大,SST 越低。由

此可得,西风与低 SST 有关,而且强度越大,SST 越低。

综合 7 月份经向风、纬向风与月平均 SST 的关系分析可得,西南风与 SST 低值有密切关联,其强度越大,上升流越强盛,而且风场和 SST 的变化都有显著的年际变化,变化周期约为 2~3 年。

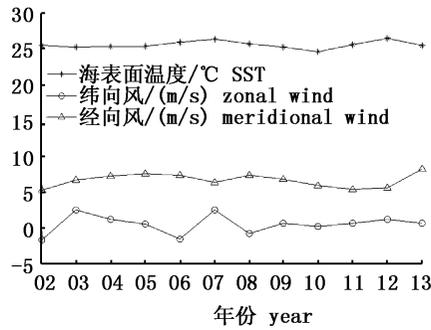


图 8 2002 - 2013 年 7 月月平均 SST、经向风 v 和纬向风 u 的分布

Fig. 8 The distribution of monthly averaged SST、meridional wind component v and zonal wind component u in July from 2002 to 2013

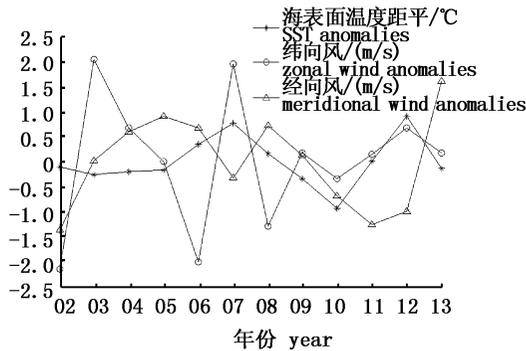


图 9 2002 - 2013 年 7 月月平均 SST 距平、经向风 v 和纬向风 u 距平的分布

Fig. 9 The anomalies distribution of monthly averaged SST and meridional wind component v and zonal wind component u in July from 2002 to 2013

由图 10 可知,8 月份,从 2002 年到 2013 年期间,SST 基本维持在 27 °C 左右,2011 年最低,温度为 26.1 °C,2006 年最高,为 27.66 °C,而 2006 年对应的经向风大小几乎为零,2004 年,经向风达到最小值 -1.79 m/s,表明这两年风场几乎为东风所控制。经向风的最大值出现在 2007 年,为 6.88m/s。由图 11 可以看出,8 月份 SST

变化并不显著,虽然 2004 年和 2006 年有明显的负距平,但由于这两年上升流区受到东风控制,风向岸吹,并不利于上升流的发展,所以,SST 变化不大。经向风距平和纬向风距平在 2002 - 2013 年间有着显著的周期性波动,两者变化趋势大体一致,但 8 月份偏东风较强,SST 和经向风的负相关关系虽然仍存在,但是负相关程度比 7 月份要小一些,这是由于 7 月份的西南风向 8 月份的东南风或东风转变的缘故。

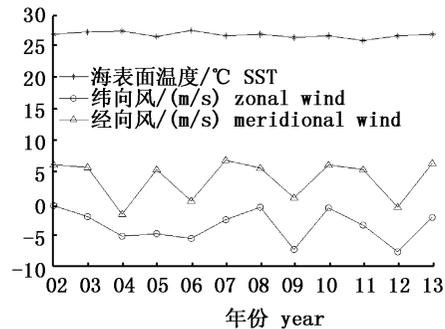


图 10 2002 - 2013 年 8 月月平均 SST、经向风 v 和纬向风 u 的分布

Fig. 10 The distribution of monthly average SST and meridional wind component v and zonal wind component u in August from 2002 to 2013

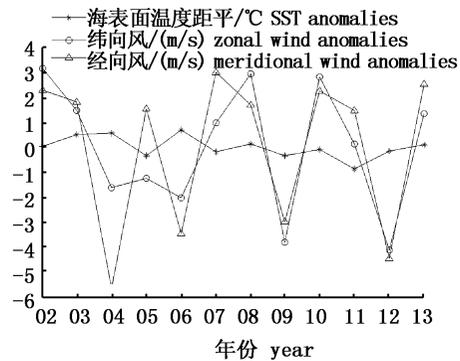


图 11 2002 - 2013 年 8 月月平均 SST 距平、经向风 v 和纬向风 u 距平的分布

Fig. 11 The anomalies distribution of monthly averaged SST and meridional wind component v in and zonal wind component u August from 2002 to 2013

为进一步分析风场的作用,本文以 Ekman 输运理论定量计算经向风引起的上升流的贡献。

假设稳定风场以 y 方向作用引起 Ekman 体积输运,海水运动方程可以简化为:

$$f_u = \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial z} \tau_y \quad (5)$$

其中,科氏参数 $f = 2\Omega \sin\theta$, Ω 为地球自转角速度, θ 为研究海域纬度, ρ_w 是海水密度; τ_y 是 y 方向的风应力分量, $\tau_y = \rho_a C_D U_{10}^2$; ρ_a 为海平面上的空气密度,取作 1 kg/m^3 , C_D 是拖曳系数,取为 2.5×10^{-3} , U_{10} 为海面 10 m 高度处的风速。

稳定风场作用海域的水深为 D , 沿风区作用的空间尺度为 Y , 上升流发生的离岸海域尺度为 X , 风场引起的 Ekman 体积输运 q 可以表示为自海底至海面的积分:

$$q = Y \int_0^D u dz = \frac{Y}{f} \times \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (6)$$

这种风场作用下,在离岸 X 的范围内, Ekman 体积输运引起的上升流速度:

$$W = \frac{q}{X \cdot Y} = \frac{1}{f} \times \frac{\tau_y}{X} \quad (7)$$

根据图 1 卫星资料显示上升流发生的空间范围,取 $X = 50 \text{ km}$, 研究海域纬度在 30° N , 从 2002 - 2013 年计算的夏季平均经向风速, 7 月份和 8 月份沿岸风速分别为 6.6 m/s 和 4.7 m/s , 依据(7)计算得到的上升流速度值分别是 $3.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 和 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 7 月份风生上升流的大小是 8 月的一倍以上。舟山海域水深在 20 到 60 m, 由西北向东南递增, 夏季温跃层达 50 m^[19], 50 m 处深层低温海水以 7 月份风生上升流速度上升到海面需要的时间在 19 d 左右, 这对 8 月的海表异常低温具有显著贡献, 而在不同年份盛行的南风发生更早, 就会引起更强的低温^[20]。

3 结论

舟山海域上升流的形成与发展受海水层化、潮汐、地形、台湾暖流及风场等多种因素的影响, 而风场对上升流的作用又受到天气和气候条件的影响, 具有一定的季节和年际变化特征。本文主要利用 2002 - 2013 年 6 - 9 月的卫星海表温度及风场数据分析了该海域夏季上升流的时空分布特征, 并初步探讨了风对上升流的作用, 结论如下:

(1) 舟山海域低温海水的时空分布及其变化反映了本海域上升流的变化。根据多年月平均 6 - 9 月的 SST 气候态卫星图像显示, 舟山近海海域夏季(7、8 月)存在强盛而稳定的上升流现象。

(2) 海表温度异常的 EOF 分析结果显示, 7 月份前两个模态方差贡献率分别为 71.66%、16.55%, 8 月份前两个模态方差贡献率分别为 87.03% 和 7.30%, 并均通过了显著性检验。7、8 月第二模态 SST 异常空间分布呈东北反相分布, 同期东海北部近海以东南风居多, 东海南部盛行西南风, 因此, 第二模态 SST 异常空间分布与风场呈一致趋势。

(3) 相关分析表明, 风场与舟山海域夏季上升流时空变化具有密切关系, 且经向(南风)风速是形成舟山海域上升流的有效风速。7 月份主要受西南风的控制, 上升流区 SST 变率达到最大, 西风和南风与 SST 呈显著负相关关系, 并随时间有 2 ~ 3 年的变化周期。8 月份风向逐步转为东南风或东风, 经向风速也有所下降, SST 变率相对 7 月份减小, 风向风速随时间呈波动变化, 但是周期并不明显。7 月平均经向风速比 8 月大 2 m/s 左右, 风生上升流大小是 8 月份的两倍。

文中采用卫星微波遥感资料, 分析具有短周期和长周期变化特点的风生上升流时空特征, 有利于提高多云海域的 SST 和海面风场数据质量。但本文重点讨论了风对上升流年际变化的作用, 风场的季节变化对于上升流的影响, 仍有待于进一步研究。且由于舟山海域水文环境的复杂性, 该海域的低温与海水温度的垂直结构密切相关, 因此, 需要综合现场观测、卫星遥感和数值模型等多种手段, 进一步探究影响舟山海域上升流形成的潮汐、地形等多种因素的相互作用。

参考文献:

- [1] 曹欣中. 浙江近海上升流季过程的初步研究[J]. 水产学报, 1986, 10(1): 51 - 69.
CAO X Z. Preliminary study on the seasonal process of the coastal upwelling off Zhejiang in the East Sea, China [J]. Journal of Fisheries of China, 1986, 10(1): 51 - 69.
- [2] 吴日升, 李立. 南海上升流研究概述[J]. 台湾海峡, 2003, 22(2): 269 - 277.
WU R S, LI L. Summarization of study on upwelling system in the South China Sea [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22(2): 269 - 277.
- [3] 毛汉礼, 任允武, 孙国栋. 南黄海和东海北部 ($28^\circ \sim 37^\circ \text{ N}$) 夏季的水文特征以及海水类型的初步分析[J]. 海洋科学集刊, 1965, 1: 23 - 77.
MAO H L, REN Y W, SUN G D. Preliminary analysis of hydrological characteristics and types of sea in north of the southern Yellow sea and the East China Sea ($28^\circ - 37^\circ \text{ N}$) in

- summer [J]. *Bulletin of Marine Science*, 1965, 1: 23 - 77.
- [4] 许建平, 曹欣中, 潘玉球. 浙江近海存在沿岸上升流的证据[J]. *海洋湖沼通报*, 1983(4): 17 - 25.
XU J P, CAO X Z, PAN Y Q. Evidence for the coastal upwelling off Zhejiang [J], *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1983(4): 17 - 25.
- [5] 赵保仁. 长江口外的上升流现象[J]. *海洋学报*, 1993, 15(2): 108 - 114.
ZHAO B R. Upwelling phenomenon Yangtze River estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(2): 108 - 114.
- [6] 胡敦欣, 吕良洪, 熊庆成, 等. 关于浙江沿岸上升流的研究[J]. *科学通报*, 1980(3): 131 - 133.
HU D X, LV L H, XIONG Q C, et al. Research of upwelling in Zhejiang coast [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980(3): 131 - 133.
- [7] 颜廷壮. 浙江和琼东沿岸上升流的成因分析[J]. *海洋学报*, 1992, 14(3): 12 - 18.
YAN T Z. Analysis of the causes upwelling of Zhejiang and Joan east coast [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(3): 12 - 18.
- [8] 胡明娜, 赵朝方. 舟山及邻近海域上升流长周期的遥感观测与分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(s): 235 - 240.
HU M N, ZHAO C F. Long-time observation of upwelling in the Zhoushan islands and adjacent seas during the summer season [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(s): 235 - 240.
- [9] 胡明娜, 赵朝方. 浙江近海夏季上升流的遥感观测与分析[J]. *遥感学报*, 2008, 12(2): 297 - 304.
HU M N, ZHAO C F. Upwelling in Zhejiang coastal areas during summer detected by satellite observations [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 297 - 304.
- [10] 曹公平, 宋金宝, 樊伟. 2007年长江口邻近海域夏季上升流演变机制研究[J]. *海洋科学*, 2013, 37(1): 102 - 112.
CAO G P, SONG J B, FAN W. Mechanism of upwelling evolvement in the Yangtze River estuary adjacent waters in summer, 2007 [J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(1): 102 - 112.
- [11] CHEN C, BEARDSLEY R, LIMEBURNER R. A numerical study of stratified tidal rectification over finite-amplitude banks, part I: Georges bank [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1995, 25: 2090 - 2110.
- [12] 黄祖珂, 俞光耀, 罗义勇, 等. 东海沿岸潮致上升流的数值模拟[J]. *青岛海洋大学学报*, 1996, 26(4): 405 - 412.
HUANG Z K, YU G Y, LUO Y Y, et al. Numerical modelling of tide induced upwelling in coastal areas of the East China Sea [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1996, 26(4): 405 - 412.
- [13] 罗义勇. 东海沿岸上升流的数值计算[J]. *海洋湖沼通报*, 1998(3): 1 - 6.
LUO Y Y. Numerical modelling of upwelling in coastal areas of the East China Sea [J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1998(3): 1 - 6.
- [14] 吕新刚, 乔方利, 夏长水, 等. 长江口外及浙江沿岸夏季上升流的潮生机制[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(1): 133 - 144.
LV X G, QIAO F L, XIA C S, et al. Tidally induced upwelling off Yangtze river estuary and in Zhejiang coastal waters in summer [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(3): 462 - 473.
- [15] 翁学传, 王从敏. 关于台湾暖流水的研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 1989, 19(1): 159 - 168.
WENG X C, WANG C M. A study on Taiwan warm current water [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1989, 19(1): 159 - 168.
- [16] 翁学传, 王从敏. 台湾暖流水的研究[J]. *海洋科学*, 1985, 9(1): 7 - 10.
WENG X C, WANG C M. A study on Taiwan warm current water [J]. *Marine Sciences*, 1985, 9(1): 7 - 10.
- [17] BALDACCI A, CORSINI G, GRASSO R, et al. A study of the Alboran sea mesoscale system by means of empirical orthogonal function decomposition of satellite data [J]. *Journal of Marine Systems*, 2001, 29(1/4): 293 - 311.
- [18] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699 - 706.
- [19] 侯伟芬, 俞成根, 陈小庆. 舟山渔场的水温分布特征分析[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2013, 26(3): 31 - 34.
HOU W F, YU C G, CHEN X Q. Temperature distribution in Zhoushan fishing ground [J]. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2013, 26(3): 31 - 34.
- [20] 倪婷婷, 管卫兵, 曹振轶, 等. 浙江沿岸春季上升流的数值研究[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(2): 1 - 13.
NI T T, GUAN W B, CAO Z T, et al. Numerical study on the upwelling of Zhejiang coast in spring [J], *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(2): 1 - 13.

Study on the temporal and spatial characteristics of Zhoushan coastal upwelling and relationship with wind field in Summer period

HE Qingqing^{1,2}, ZHANG Chunling^{1,2}, GAO Guoping^{1,2}, WEI Yongliang^{1,2}, AN Baichao^{1,2}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the monthly Satellite remote sensing Sea Surface Temperature (SST) from 2002 to 2013, Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis was accomplished to analyze the temporal and spatial characteristics of upwelling over Zhoushan Coastal region. The effect of wind on upwelling was analyzed by using sea surface wind field data. The result showed that first two modal variance contribution rates are 71.66% and 16.55% in July, 87.03% and 7.3% in August respectively, all of which pass the North test. The Zhoushan coastal upwelling displayed inter-annual variability and had a negative relationship to the meridional wind. The prevailing southeast wind in summer was conducive to development of the upwelling. According to the calculation of Ekman Volume transport, the order of mean velocity of upwelling in Zhoushan coastal region are respectively 3.0×10^{-5} m/s and 1.5×10^{-5} m/s in July and August. The upwelling in August was significantly weaker than in July, which was relevant with a significant low SST anomaly observed in August.

Key words: Zhoushan coastal upwelling; sea surface temperature(SST); wind forcing; empirical orthogonal function(EOF); ekman transport