

闽浙沿岸上升流及其季节变化的数值研究

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 ECOMSED, 同时考虑地形、边界流(台湾暖流、黑潮和长江冲淡水)、热通量及 QuikSCAT 风场等动力因子, 对闽浙沿岸上升流及其季节变化进行了数值研究. 结果表明, 闽浙沿岸一年四季均有上升流存在, 且上升流中心及上升流强度有明显的季节变化特征. 其中, 浙江沿岸舟山群岛和渔山列岛附近、福建沿岸海坛岛和马祖列岛附近四季均存在较强的上升流中心, 上升流强度季节变化特征是“冬弱夏强”. 冬季上升流强度为 10^{-3} cm/s 量级, 沿岸平均上升流速约为 0.3×10^{-3} cm/s; 夏季最大上升流速可达 0.8×10^{-2} cm/s, 沿岸平均上升流速约为 0.4×10^{-2} cm/s.

关键词:东中国海; 闽浙沿岸; 上升流; QuikSCAT 风场; 数值研究

中图分类号: P731.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2007)04-0464-07

闽浙沿岸存在的上升流现象已有大量的研究报道^[1-14]. 早期人们^[1-3, 9-12]主要依赖对温盐资料和少数实测资料的分析, 直观地揭示闽浙沿岸存在的上升流现象, 从整体上认识闽浙沿岸上升流现象及其结构. 其中: 潘玉球等^[1]根据调查资料对浙江沿岸上升流区的锋面结构及其变化进行了详细分析; 丁宗信^[2]通过对水文资料和风场资料的分析, 研究了夏季风场对沿岸上升流强弱的短周期变化所起的作用; 许建平^[3]对冬季浙江近海上升流区水文结构进行了初步分析. 由于观测资料的不连续性以及上升流结构受众多因子的相互作用影响, 仅通过对资料的分析还很难对某些动力机制进行较全面的解释. 20 世纪 80 年代以来, 海洋数值模式在闽浙沿岸环流及上升流特征研究中得到了广泛应用. 其中: 刘先炳等^[4]构造了一个二维数值模式, 并利用该模式对浙江沿岸上升流和沿岸锋面进行了数值研究; 黄祖珂等^[5]利用三维非线性理论模式^[15-16]对浙江沿岸海域进行了潮致上升流的数值模拟; 罗义勇^[6]运用 Backhaus 三维非线性模型, 同时考虑潮、风和台湾暖流的作用, 揭示了夏季闽浙沿岸的上升流现象; 王辉^[7-8]基于一种三维空间弱非线性斜压模式, 计算了闽浙沿岸一带上升流的位置和强度特征等.

关于闽浙沿岸上升流的成因, 主要有以下几点: (a) 沿岸风生上升流; (b) 底坡对黑潮余脉向岸分量的抬升; (c) 底边界对台湾暖流的摩擦作用; (d) 潮汐非线性效应等. 通常认为风、地形和台湾暖流对闽浙沿岸上升流的形成有着重要的影响.

东海拥有广阔的浅海陆架区(图 1), 平均水深为 72 m, 风场对该区域环流的调整起着重要作用, 特别是在夏季层化明显、风力减弱的情况下, 非定常风场对沿岸流有着重要的影响^[17]. 以往研究对东中国海环流及闽浙沿岸上升流季节变化的数值模拟并不多见, 且多是采用冬、夏季典型月份的风场强迫, 很少利用时空分辨率较高的风场驱动来模拟东中国海环流及闽浙沿岸上升流的特征. 基于以上考虑, 本文以三维斜压非线性海洋模式为基础, 采用 QuikSCAT 卫星散射计 2000 年 1 月 1 日~2004 年 12 月 31 日高分辨率风场数据、海面净热通量以及真实海底地形, 同时考虑台湾暖流、黑潮、长江冲淡水等动力因子, 分析闽浙沿岸上升流现象的季节变化及可能的形成机制.

收稿日期: 2006-07-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(kzcx2-yw-201); 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资助项目(2005406811); 国家自然科学基金资助项目(50679019; 50609001); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2000004); 江苏省社会发展科技计划资助项目(BS2006095)

作者简介: 经志友(1979—), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 主要从事近海环境及水动力学研究.

1 物理模式及计算方案

1.1 物理模式

本文所采用的模式为 ECOMSED^[18-19]. 该模式水平方向采用正交曲线网格,垂直方向采用 σ 坐标系. 计算过程中,垂向涡动黏滞系数和热力垂向涡动扩散系数由改进后的 Mellor 和 Yamada 2.5 阶湍流闭合模型计算得到,湍流黏滞扩散系数由 Smagorinsky's 公式^[20]计算得到.

1.2 模式参数和资料

模式计算区域选为 117°00'E ~ 131°00'E, 24°00'N ~ 41°00'N (包括整个东海、黄海和渤海). 水平分辨率为 10' × 10'; 垂直方向分 25 层,斜压时间步长取为 20 min, 正压时间步长取为 30 s. 模式采用美国国家地球物理数据中心的 etopo5 地形资料(图 1),同时考虑风场、热通量和边界流(台湾暖流、黑潮和长江冲淡水)作用. 风场采用 IFREMER 提供的每天 1 次的 QuikSCAT 卫星散射计风场资料,时间从 2000 年 1 月 1 日 ~ 2004 年 12 月 31 日,空间分辨率为 0.5° × 0.5°; NOAA 提供了模式所需的初始温盐数据; SOC 提供了热通量数据; 开边界设置在台湾海峡、台湾以东海区、大隅—吐噶喇海峡、对马海峡以及长江口(图 1 中箭头所示). 基于以往观测和研究结果得到的各开边界流量见表 1^[21-22]. 计算过程中所有月平均数据均线性插值到每一模式天上.

表 1 主要开边界的各月流量

Table 1 Monthly discharge through main open boundaries

万 m³/s

月份	开边界					月份	开边界				
	长江口	台湾海峡	台湾以东	大隅—吐噶喇	对马海峡		长江口	台湾海峡	台湾以东	大隅—吐噶喇	对马海峡
1	1.1	50.0	2200	-2024	-227.1	7	5.2	230.0	2350	-2253	-332
2	1.2	50.0	2200	-2062	-189.2	8	4.4	240.6	2800	-2674	-371
3	1.7	150.3	2250	-2227	-175.0	9	3.9	240.1	2800	-2659	-385
4	2.5	150.0	2300	-2263	-189.5	10	3.3	150.7	2200	-1983	-371
5	3.3	220.7	2400	-2396	-228.0	11	2.2	50.8	2100	-1820	-333
6	4.0	230.0	2350	-2304	-280.0	12	1.3	50.7	2200	-1972	-280

1.3 计算方案

首先以 1 月气候态温盐和 NECP 1 月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场,从静止状态开始积分,积分时间为 1a,得到 1 月份的诊断流场,作为进一步积分的初始场,然后在此基础上,采用 2000 年 1 月 1 日 ~ 2004 年 12 月 31 日每天 1 次的 QuikSCAT 风场,结合插值到每一模式天的海面净热通量,采用预报模式进行预报计算,模式在周期性外强迫下进行 4 次循环以求达到稳定. 结果显示,从第 3 次循环开始,能量已呈稳定的周期性变化,本文取各月 5 a 平均数据来进行分析.

2 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、台湾暖流、对马暖流、东海沿岸流等东中国海主要流系及其季节变化特征,与观测结果和传统认识基本一致^[23],同时也较好地揭示了闽浙沿岸上升流现象及其季节变化特征. 图 2 为

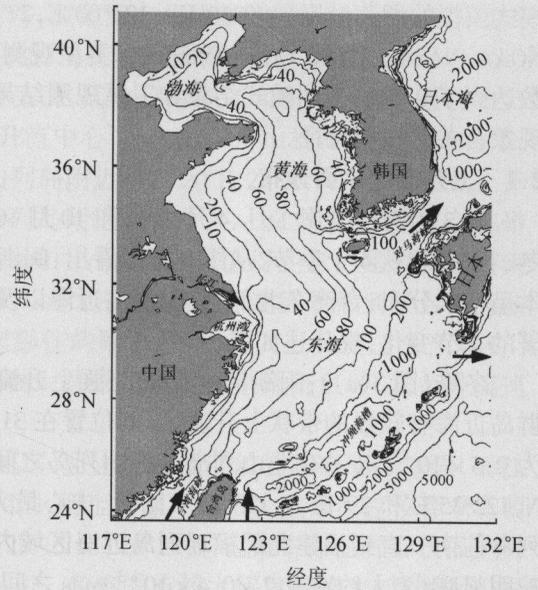


图 1 东中国海海底地形及开边界位置(水深单位:m)

Fig.1 Topography of East China Sea and open boundary locations(unit of water depth:m)

基于以往观测和研究结果得到的各开边界流量见表 1^[21-22]. 计算过程中所有月平均数据均线性插值到每一模式天上.

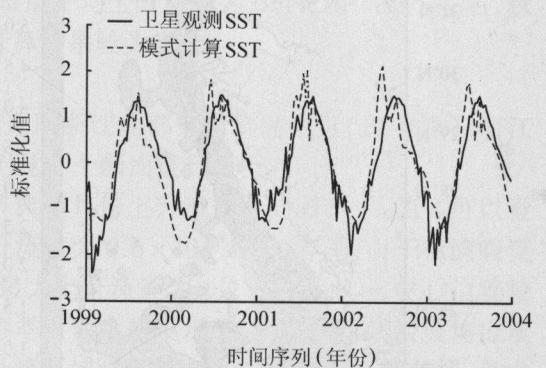


图 2 闽浙沿岸模式模拟的 SST 和 pathfinder SST 时间序列的比较
Fig.2 Comparison of time series of simulated SST with pathfinder SST along Fujian and Zhejiang coast

模式模拟的浙江沿岸(120°30'E ~ 124°00'E, 27°30'N ~ 31°00'N)海表温度 SST(sea surface temperature)与美国 NOAA/NASA AVHRR Ocean Pathfinder 卫星观测的 1 次/(8d)的 SST 时间序列图. 计算结果表明, 二者的相关系数达到了 0.861, 说明模式结果和卫星观测结果有较好的一致性. 限于篇幅, 本文仅分析与浙闽沿岸上升流现象有关的一些特征.

2.1 上升流速平面分布

图 3 为闽浙沿岸 1 月、4 月、7 月和 10 月 10 m 层垂向流速平面分布, 本文以 1 月、4 月、7 月和 10 月代表冬、春、夏和秋 4 个季节. 从图 3 可以看出: 闽浙沿岸及其近海一年四季都存在上升流现象, 近岸上升流区基本呈带状分布; 台湾东北部、舟山群岛近海以及海坛岛附近都有较强的上升流中心存在, 且上升流速有着显著的季节变化. 现分述如下.

冬季(图 3(a)): 闽浙沿岸 10 m 层强上升流区主要位于舟山群岛和渔山列岛近海. 其中: 杭州湾外至舟山群岛近海有较强的带状上升流区, 其位置在 31°00'N ~ 29°45'N, 122°30'E ~ 123°15'E 之间, 中心最大上升流速为 $0.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$; 在韭山列岛至渔山列岛之间近海区域, 有 2 个较强的上升流中心, 中心位置大约在 29°25'N, 122°35'E 和 29°10'N, 123°15'E 附近, 中心最大上升流速也都达到了 $0.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$. 另外, 从浙江中部渔山列岛往南一直到福建北部福瑶列岛近海区域内(29°00'N ~ 26°30'N)出现呈带状分布的上升流区域, 但上升流速明显减小, 大约在 $0.2 \sim 0.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 之间. 在闽中沿岸海区, 马祖列岛以南至南日群岛近海区域(26°15'N ~ 24°45'N)也存在着带状分布的上升流区域, 平均上升流速为 $0.25 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 左右. 另外, 海坛岛附近也有

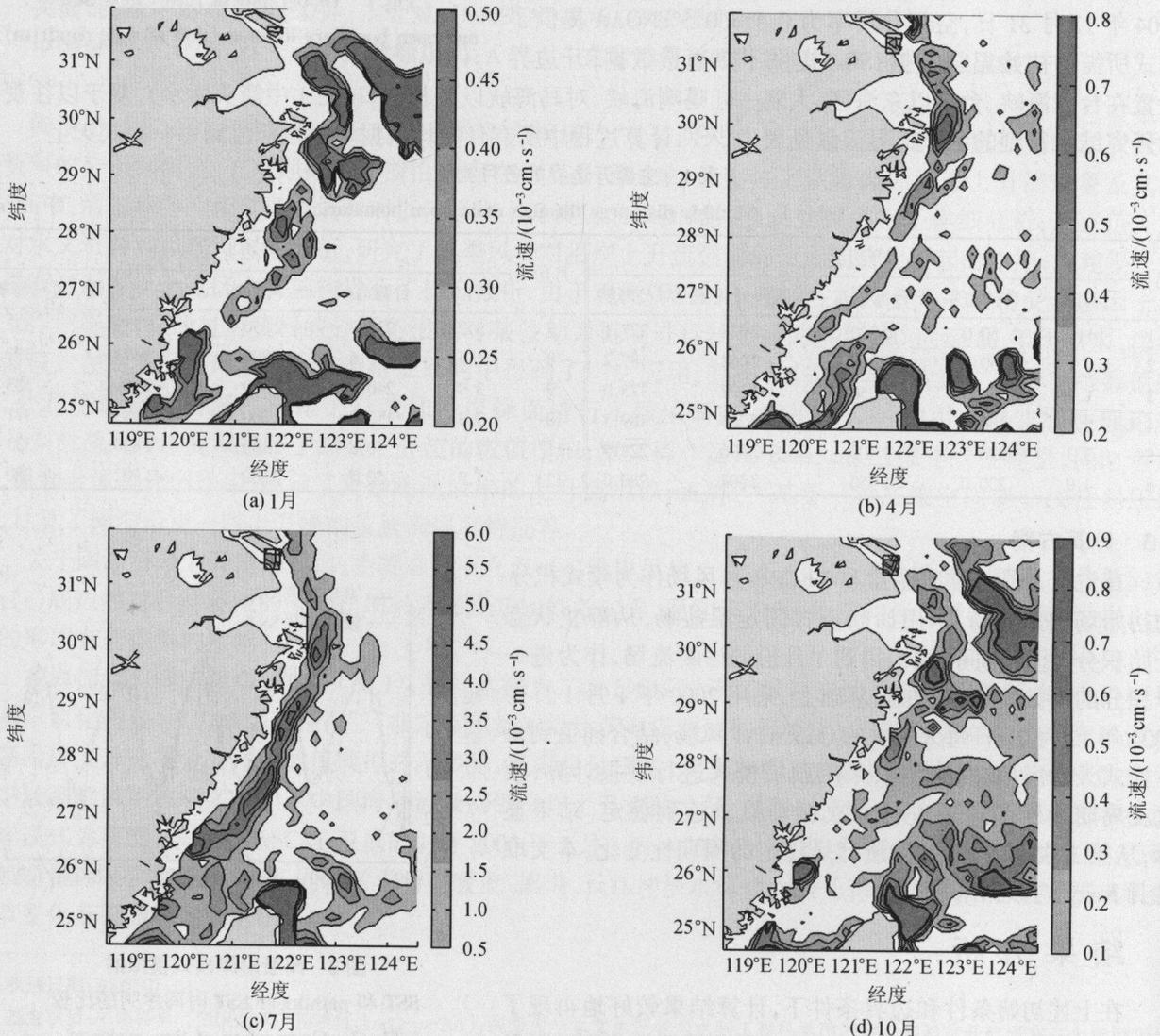


图 3 闽浙沿岸 10 m 层垂向流速平面分布

Fig. 3 Plane distribution of upwelling velocity along Fujian and Zhejiang coast at layer 10 m

较强上升流区存在,中心最大上升流速达 $0.5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$. 除此之外,在台湾东北部彭佳屿附近海域(中心最大上升流速为 $4.5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)、冲绳海槽坡折处($124^{\circ}00'E, 25^{\circ}50'N$ 附近)均有较大区域的强上升流区.

春季(图 3(b)):舟山群岛至渔山列岛附近仍有较强的上升流区,其中舟山群岛和韭山列岛附近强上升流区较冬季有所西移靠岸,同时外海上升流区明显减少. 2 个上升流中心,一个位于舟山群岛附近($122^{\circ}45'E, 30^{\circ}00'N$),中心最大上升流速为 $0.8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$;另一个位于渔山列岛附近($122^{\circ}20'E, 28^{\circ}50'N$),中心最大上升流速为 $0.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$. 浙江南部洞头列岛往南至福建北部马祖列岛附近($27^{\circ}50'N \sim 26^{\circ}15'N$)春季也存在带状分布的上升流区,不过上升流速较浙江北部要小,在 $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 之间. 值得注意的是,在春季,闽中沿岸并未出现较强的上升流中心,近岸上升流速仅为 $0.1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 左右,强上升流区外移到了台湾海峡东北部,最大上升流速达到了 $0.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$. 另外,台湾东北部彭佳屿附近(中心最大上升流速为 $8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)、冲绳海槽坡折处仍存在强上升流区. 同时,浙江外海也存在一些中小尺度的上升流区域,其上升流速相对于春季有所减小,一般在 $0.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 左右.

夏季(图 3(c)):闽浙沿岸普遍存在着呈带状分布的强上升流区,且上升流强度较春季有明显增强. 浙江近海舟山群岛附近仍然集中着强上升流区,其位置与春季基本相同,但上升流中心最大上升流速较春季有明显增大,达到了 $5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$. 在渔山列岛往南至台州列岛附近($29^{\circ}15'N \sim 28^{\circ}15'N$)也集中存在着带状强上升流区域,其位置与春季基本相似,中心最大上升流速为 $6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$,较春季有较大幅度的增大. 夏季闽中沿岸也普遍存在上升流现象,但上升流强度明显小于浙江沿岸,但较春季有显著增强,上升流中心主要集中在马祖列岛和海坛岛附近,中心最大上升流速在 $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 之间. 另外,台湾东北部彭佳屿附近仍存在着强上升流区,其中心上升流速达到了 $10 \times 10^{-3} \text{cm/s}$. 值得注意的是,在闽中沿岸海坛岛以南海域,虽然存在多个上升流中心,但上升流区并未像浙江沿岸呈带状分布,而是以较小的上升流区和下降流区交替出现(为突出显示上升流区,图 3 只画出了上升流速的平面分布).

秋季(图 3(d)):闽浙沿岸上升流区域较夏季有明显减小,且强度明显下降,其分布特征与冬季有些相似,说明秋季已有向冬季过渡的迹象. 但与冬、夏季不同的是,在离岸稍远的闽浙外海,秋季普遍存在着不同程度的上升流区和下降流区交替出现的现象,上升流速在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 之间. 这可能是处于转换期的风场和台湾暖流共同作用的结果. 浙江沿岸强上升流区主要集中在舟山群岛至渔山列岛附近,上升流中心 $122^{\circ}3'E, 29^{\circ}30'N$ 和 $123^{\circ}15'E, 29^{\circ}05'N$ 的最大上升流速都在 $0.9 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 左右,上升流区域和最大上升流速均较夏季有明显减小. 福建沿岸的强上升流区主要在白犬列岛附近海域,上升流中心位于 $120^{\circ}15'E, 26^{\circ}00'N$ 附近,较夏季有所南移,和冬季基本相似;中心最大上升流速为 $0.9 \times 10^{-3} \text{cm/s}$,较夏季有明显减小但较冬季稍大. 另外,台湾东北部彭佳屿附近仍集中存在着强上升流区.

从以上分析可以看出:闽浙沿岸一年四季均存在上升流现象,较强的上升流区域主要分布在离岸 1 ~ 1.5 个经、纬度范围内. 浙江沿岸舟山群岛、渔山列岛附近一年四季都有较强的上升流中心存在;福建中北部马祖列岛和海坛岛附近除春季强上升流中心不明显外,其他季节均存在较强的上升流中心. 上升流强度的季节变化也很显著. 总体看来,闽浙沿岸夏季上升流强度较大,10 m 层平均上升流速为 $0.4 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 左右,秋冬季较小,为 $0.3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 左右. 这一结果与胡敦欣等^[24]的计算结果较为吻合.

2.2 上升流速断面分布

为进一步分析闽浙沿岸上升流的垂向分布状况,本文分别选取浙江北部舟山群岛附近($29^{\circ}45'N$)、浙江南部洞头列岛附近($27^{\circ}45'N$)和福建中部马祖列岛附近($25^{\circ}55'N$)这 3 个断面进行分析.

图 4 给出了浙江北部舟山群岛附近($29^{\circ}45'N$)断面 4 个季节典型月份上升流速垂向分布. 从图 4 可以看出:该断面冬季上升流中心主要位于 10 ~ 20 m 层,中心最大上升流速为 $0.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$;春季,由于台湾暖流有所增强,且北向风有所减弱,上升流速较冬季明显增大,中心最大上升流速为 $1.2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$,中心位置较冬季有所下移,出现在 20 m 层和 30 m 层;夏季,上升流强度较春季有较大幅度增强,50 m 深以浅沿坡均出现较强上升流区域,最大上升流速达到了 $6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$;秋季,上升流区域强度较 7 月又有较大幅度减弱,最大上升流速减为 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$.

图 5 给出了浙江南部洞头列岛附近($27^{\circ}45'N$)断面 4 个季节典型月份上升流速垂向分布. 从图 5 可以看出:该断面冬季强上升流区主要分布在 $122^{\circ}25'E$ 以西,上升流中心主要是在 20 m 以深 40 m 以浅位置,中心最大上升流速为 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 左右;春季,上升流范围较冬季有所减小,中心位置也有所上移,位于 10 m 以深 30 m 以浅,中心最大上升流速为 $0.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$;夏季,无论上升流区域还是上升流强度都较 4 月有所增大,

122°45'E 以西沿坡均有上升流存在,强上升流区主要在 10~30m 层之间,中心最大上升流速达到了 8×10^{-3} cm/s;秋季,上升流速较 7 月有较大幅度减小,同时上升流中心也有所东移,强上升流区出现在 122°20'E ~ 122°35'E,20m 以深 50m 以浅位置,中心最大上升流速为 0.5×10^{-3} cm/s.

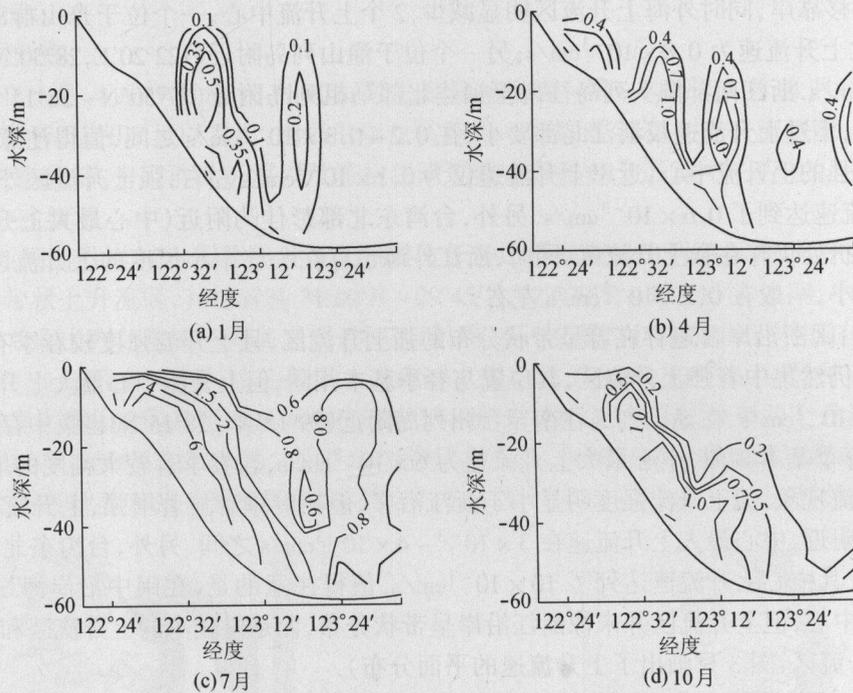


图 4 29°45'N 断面上升流速分布 (单位: 10^{-3} cm/s)

Fig.4 Distribution of upwelling velocity along section 29°45'N (unit: 10^{-3} cm/s)

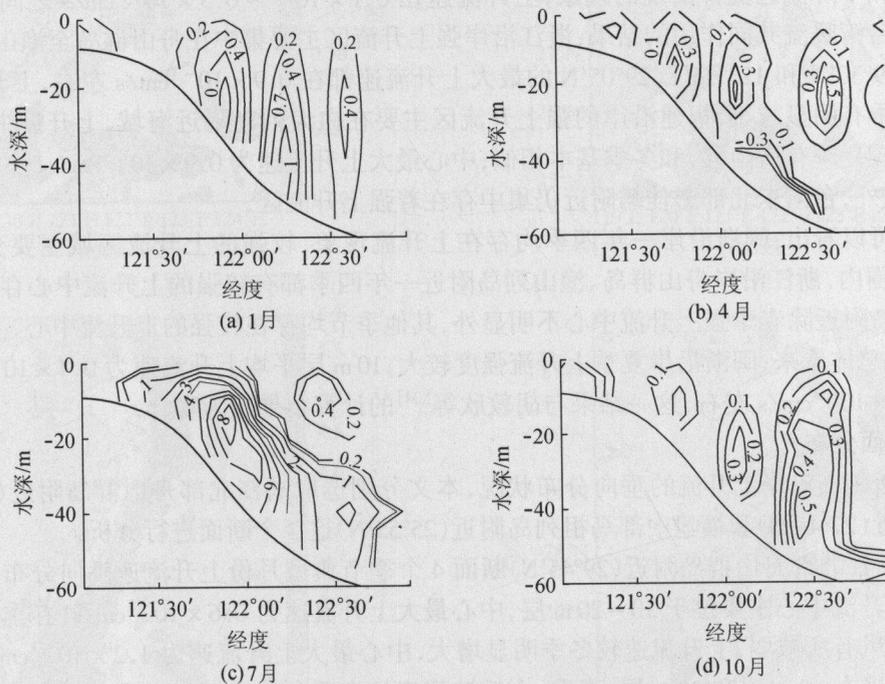


图 5 27°45'N 断面上升流速分布 (单位: 10^{-3} cm/s)

Fig.5 Distribution of upwelling velocity along section 27°45'N (unit: 10^{-3} cm/s)

图 6 给出了福建中部马祖列岛附近(25°55'N)断面 4 个季节典型月份上升流速垂向分布图.从图 6 可以看出:该断面冬季强上升流区主要分布在 120°25'E 以西,上升流中心主要是在离岸较近的 10m 以深 20m 以浅位置,中心最大上升流速为 0.7×10^{-3} cm/s 左右;春季,上升流区域有所增大,且向东有所偏移;上升流中心位于 20m 层,中心最大上升流速为 0.8×10^{-3} cm/s;夏季,强上升流区主要存在于 20m 层以深 40m 层以浅

位置,上升流中心较春季有所东移,但强度明显加大,最大上升流速达到了 $8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$;秋季,沿岸和近海不同深度都有上升流区域存在,上升流强度较夏季有所减弱,2个较为显著的上升流中心分别位于 $120^{\circ}10'E$, 20 m层和 $121^{\circ}05'E$, 50 m层,中心最大上升流速为 $1.4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 和 $1.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$.

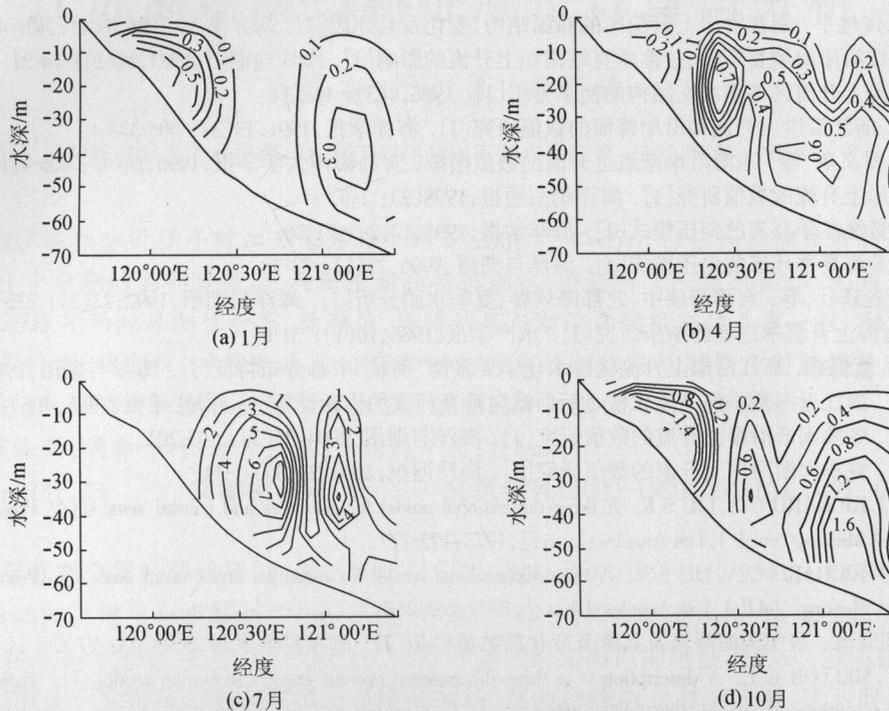


图6 $25^{\circ}55'N$ 断面上升流速分布(单位: 10^{-3}cm/s)

Fig.6 Distribution of upwelling velocity along section $25^{\circ}55'N$ (unit: 10^{-3}cm/s)

从以上分析可以看出:冬季,由于台湾暖流强度较弱且偏北风对闽浙沿岸上升流的形成产生不利影响,上升流强度普遍较弱,但上升流依然存在.可见,冬季上升流主要是由于台湾暖流在向北输送过程中受到海底地形的抬升和摩擦作用而形成的.春季,在台湾暖流有所增强且北向风减弱的情况下,上升流强度较冬季有所增强.夏季,台湾暖流强度进一步增强且夏季偏南风对上升流的产生有积极作用,上升流强度也出现了一年中的最大值;秋季,台湾暖流有所减弱且处于季风转换期,风对沿岸上升流的贡献有所减小,上升流强度较夏季有明显减小.笔者认为:沿岸向北输送的台湾暖流是闽浙沿岸上升流形成的主要动力因子;风虽然并不是闽浙沿岸上升流产生的决定性因素,但对各季节上升流区域的分布,尤其是近岸有着非常重要的影响.

3 结 论

本文利用三维斜压非线性模式 ECOMSED 的模拟结果,探讨了闽浙沿岸上升流现象及其季节变化特征.分析结果表明:闽浙沿岸一年四季均存在上升流现象,且上升流中心及上升流强度有明显的季节变化特征.其中:浙江沿岸舟山群岛和渔山列岛附近,福建沿岸海坛岛和马祖列岛附近一年四季均有较强的上升流中心存在,上升流强度季节变化表现出“冬弱夏强”,冬季沿岸上升流强度量级为 10^{-3}cm/s ,平均上升流速为 $0.3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 左右;夏季最大上升流速可达 $0.8 \times 10^{-2} \text{cm/s}$,平均上升流速为 $0.4 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 左右.浙江沿岸强上升流区主要分布在离岸较近的 10~40 m 层,福建沿岸强上升流区主要分布在 50 m 以浅位置.台湾东北部彭佳屿附近上升流速较大,冬季最大上升流速为 $4.5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$,夏季最大上升流速达到了 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$.

关于闽浙沿岸上升流的形成机制,笔者对其进行了敏感性试验.结果表明:(a)台湾暖流在向北输送的过程中由于沿途水深变浅,受到海底地形的抬升和摩擦作用,海水逆坡爬升;(b)夏季,闽浙沿岸盛行偏南风,在偏南风的作用下上层海水的离岸输送,引起沿岸上升流;(c)冬季,闽浙沿岸盛行偏北风,沿岸冷水在偏北风的作用下往南运动,而台湾暖流继续北上,沿岸水与台湾暖流的密度差异而导致混合形成上升流;(d)台湾东北部彭佳屿附近强上升流区的形成,主要是由于黑潮从台湾东部进入东海,在触及东海陆坡后受地形诱导和海底摩擦作用,海水沿坡爬升而形成.

在本文研究中,IFREMER 提供了 QuikSCAT 风场资料,NOAA 提供了温盐资料,SOC 提供了热通量资料,

在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 潘玉球,徐端蓉,许建平. 浙江沿岸上升流区的锋面结构、变化及其原因[J]. 海洋学报,1985,7(4): 401-411.
- [2] 丁宗信. 风对浙江沿岸海域夏季温、盐度垂直结构和上升流的影响[J]. 海洋与湖沼,1983,14(1): 14-21.
- [3] 许建平. 浙江近海上升流区冬季水文结构的初步分析[J]. 1986,4(3): 18-23.
- [4] 刘先炳,苏纪兰. 浙江沿岸上升流和沿岸锋面的数值研究[J]. 海洋学报,1991,13(3): 305-314
- [5] 黄祖珂,俞光耀,罗义勇,等. 东海沿岸潮致上升流的数值模拟. 青岛海洋大学学报,1996,26(4): 405-411.
- [6] 罗义勇. 东海沿岸上升流的数值研究[J]. 海洋湖沼通报,1998(3): 1-6.
- [7] 王辉. 东海和南黄海冬季环流的斜压模式[J]. 海洋学报,1995,17(2): 21-26.
- [8] 王辉. 东海和南黄海夏季环流的斜压模式[J]. 海洋与湖沼,1996,27(1): 73-78.
- [9] 翁学转,张启龙,延廷壮,等. 台湾海峡中、北部海域春、夏季水团分析[J]. 海洋与湖沼,1992,23(3): 235-243.
- [10] 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.
- [11] 樊安德,王玉衡,董恒霖. 浙江沿岸上升流区海水化学要素德“羽状”中心分布特征[J]. 海洋与湖沼,1987,18(1): 86-94.
- [12] 曹欣中,朱廷璋. 浙江近海夏季涌升流区核心断面横向垂直环流的诊断计算[J]. 海洋通报,1985,4(5): 1-5.
- [13] 潘玉萍,沙文钰. 冬季闽浙沿岸上升流的数值研究[J]. 海洋与湖沼,2004,35(3): 193-201.
- [14] 潘玉萍,沙文钰. 夏季闽浙沿岸上升流的数值研究[J]. 海洋通报,2004,23(3): 1-11.
- [15] LEENDERTSE J J, RICHARD C A, LIU S K. A three-dimensional model for estuaries and coastal seas[C]// Proceedings of the Rand Corporation Annual Meeting (Vol I). Los Angeles: [s. n.], 1973: 172-177.
- [16] LEENDERTSE J J, RICHARD C A, LIU S K. A three-dimensional model for estuaries and coastal seas[J]. Proceedings of the Rand Corporation annual Meeting (Vol II). Los Angeles: [s. n.], 1973: 263-266.
- [17] 白学志,王凡,胡敦欣. 东中国海环流及其季节变化的数值模拟[J]. 海洋科学集刊,2003,45: 77-85.
- [18] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model[J]. Three-dimensional Coast Models, American Geophysical Union, 1987 (4): 1-16.
- [19] BLUMBERG A F. An estuarine and coast ocean version of POM[C]//Proceedings of the Princeton Ocean Model Users Meeting. Princeton: Princeton University, 1996: 78-82.
- [20] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91: 99-164.
- [21] 赵保仁,方国洪. 东海主要水道的流量估算[J]. 海洋学报,1991,13(5): 479-489.
- [22] LEE H J, CHAO S Y. A climatological description of circulation in and around the East China Sea[J]. Deep-Sea Research II, 2003 (50): 1065-1084.
- [23] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报,2001,23(4): 1-16.
- [24] 胡敦欣,吕良熊,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.

Numerical study on upwelling and its seasonal variation along Fujian and Zhejiang coast

JING Zhi-you^{1,2}, QI Yi-quang², 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: A 3D baroclinic nonlinear numerical model ECOMSED was used to simulate the upwelling and its seasonal variation, with some dynamic factors, such as the real topography, boundary current (Taiwan warm current, Kuroshio and Changjiang outflow), heat flux, and QuikSCAT wind field, taken into account. The result shows that upwelling occurs along Fujian and Zhejiang coast throughout the whole year, and its center and strength change evidently in different seasons, with the strong upwelling centers occurring near Zhoushan islands and Yushan chain islands along Zhejiang coast and Haitan island and Mazu chain islands along Fujian coast. Moreover, the upwelling is relatively weak in winter and strong in summer. The intensity of upwelling is about 10^{-3} cm/s and the average upwelling speed along the coast is about 0.3×10^{-3} cm/s in winter, while the maximum upwelling speed could reach 0.8×10^{-2} cm/s and the average upwelling speed is about 0.4×10^{-2} cm/s in summer.

Key words: East China Sea; Fujian and Zhejiang coast; upwelling; QuikSCAT wind field; numerical study