

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.03.016

长江口外近岸环流对厄尔尼诺事件的响应

张雯燕¹, 张长宽¹, 龚政^{1,2}, 谭伟¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 建立了东中国海环流大模型,在此基础上建立包含长江口、杭州湾及邻近海域在内的区域环流模型,较准确地刻画东中国海外海流系和沿岸流系,以及长江口外精细的流系结构。选择典型厄尔尼诺年,模拟长江口外近岸环流的异常变化,探讨长江口外近岸环流与厄尔尼诺事件的响应关系。研究表明:长江口外近岸环流与厄尔尼诺事件存在强烈的响应关系,冬季厄尔尼诺现象发生时长江口及邻近海域的环流明显减弱;台湾暖流受厄尔尼诺事件影响程度显著,流速减小、流幅变窄,台湾暖流对长江口外近岸环流的影响也因此减弱。

关键词: 厄尔尼诺; ENSO; 东中国海; 长江口; 近岸环流; 台湾暖流

中图分类号: P714⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2014)03-0267-06

Anomaly response to El Niño events of nearshore circulation off Yangtze Estuary

ZHANG Wenyan¹, ZHANG Changkuan¹, GONG Zheng^{1,2}, TAN Wei¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, an East China Sea circulation model was built. Based on this, a small-scale circulation model including the domain of the Yangtze Estuary, Hangzhou Bay, and adjacent water areas was built. With this model, the oceanic current system and coastal current system of the East China Sea, and the flow structure off the Yangtze Estuary were accurately simulated. In order to study the anomalies, typical El Niño years were chosen to analyze the response relationship between the nearshore circulation off the Yangtze Estuary and El Niño events. The results show that there was a significantly responsive relationship between the nearshore circulation off the Yangtze Estuary and El Niño events. In the winter, the circulation at the Yangtze Estuary and adjacent water areas weakened significantly when the El Niño phenomenon occurred. The Taiwan warm current was greatly affected, with decreased flow velocity and narrowed flow amplitude, which weakened the impact of the Taiwan warm current on the nearshore circulation off the Yangtze Estuary.

Key words: El Niño; ENSO; East China Sea; Yangtze Estuary; nearshore circulation; Taiwan warm current

ENSO 是厄尔尼诺(El Niño)与南方涛动的合称,El Niño 与拉尼娜(La Niña)分别对应 ENSO 循环过程中冷、暖相位。ENSO 是目前已经确认的真实的全球尺度振荡,也是迄今为止人类所观测到的全球大气和海洋相互耦合的最强信号之一。它来自于热带强烈的海气作用,其振荡特征主要与热带和赤道海洋波动传播的特征时间有关。ENSO 期间,热带东、西太平洋的水位和表面水温异常是其重要特征。海洋和大气相互作用的复杂性和两者之间的相互制约,使 ENSO 现象具有 2~7 年显著的周期^[1-2]。发生在热带区域的 ENSO 现象对气候的影响范围是全球性的,并进一步影响区域海洋的气候年际变化。

收稿日期: 2013-07-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB429001);教育部新世纪优秀人才计划(NCET-12-0841)

作者简介: 张雯燕(1988—),女,江苏东台人,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: zhangwenyan1018@163.com

海洋在人类发展中占据重要地位,近海海洋系统对全球变化的响应特别重要,是 21 世纪的重点发展方向,未来 20 年海洋研究将成为气候研究的主要内容^[3-4]。我国位于太平洋的西北部,赤道太平洋海域发生的 ENSO 现象将不可避免地对我国海洋生态和环境产生影响。研究表明,ENSO 期间,我国沿岸水位、海平面、海面温度、海洋气旋、海洋锋、黑潮、赤潮等都会发生变化^[5]。

目前,我国海洋环流与气候相互作用的研究多侧重于南海。南海是地球上为数不多的半封闭深水海盆之一,受东亚季风影响显著。研究表明,南海环流场的异常与 ENSO 的调制作用有关,风应力可能是控制其年际变化的主要因素^[6-9]。El Niño 出现前后,东海的环流形态有些不同,1997—1998 年 El Niño 至 La Niña 期间东海黑潮的变异,可能与 El Niño 向 La Niña 现象的转变有关^[10]。东海近岸区域,在 El Niño 年的夏季海洋环境相对更有利于赤潮的发生。近岸海域渔获量变化和夏季表层盐度变异等,都与 El Niño 现象存在一定的关系^[11-12]。长江口处于东中国海大陆架区域,受东中国海环流尤其是台湾暖流的影响显著。陈美榕等^[13]研究表明:长江口海域海表温度与 El Niño 事件具有相一致的 2~7 年的变化周期。ENSO 现象通过特殊的过程对长江口外海域造成了一定的影响。因此,研究长江口外近岸环流对 El Niño 事件的响应,具有重要的理论意义和实用价值。目前,长江口等近岸环流与 El Niño 事件的响应关系尚有待进一步认识。

笔者采用嵌套模拟技术,首先建立东中国海环流大模型,在此基础上建立包含长江口、杭州湾及邻近海域在内的区域环流模型。选择典型 El Niño 年来探讨长江口外近岸环流的异常变化,研究长江口邻近海域环流对 El Niño 事件的响应关系。

1 东中国海环流模型

采用海洋环流模式(parallel ocean program,简称 POP 模式),建立了东中国海环流大模型。POP 模式是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室基于 Bryan、Cox、Semtner 和 Chervin 模型开发的全球海洋环流数值模式。模式采用了基于流体静力平衡和 Boussinesq 近似的三维原始动力学方程,目前已广泛应用于海洋研究和气候预测。大模型模拟区域包含整个东中国海,跨度为 24 °N ~41°N、117 °E ~131°E,水深资料来源于海图。模型水平分辨率为 1/12°×1/12°,垂向分为 23 层。采用 Richardson 垂直混合参数化方法计算垂直湍混合系数,采用 Laplacian 参数化方法计算水平扩散系数和水平黏性系数。本模型较好地模拟了黑潮、台湾暖流、对马暖流和沿岸流系,与近年的观测数据^[14-15]和其他数模结果^[16]相比较,分析结果比较一致。

2 长江口外近岸环流模型

采用 POM 模式建立了长江口外近岸环流模型。POM 是基于三维原始动力学方程的海洋模式,由 Blumberg 和 Mellor 建立^[17],经不断完善,目前已被各国学者广泛应用于河口、海岸和海洋等方面的研究。国内不少学者基于 POM 模式研究了长江口海域环流,均取得了较好的成果。POM 模式的基本特点是采用 σ 坐标实现垂向相对分层,水平向采用 C 网格数值离散;嵌套了 Mellor-Yamada 二阶湍流封闭模型计算垂向混合系数;计算过程中采取模式分裂技术求解,增加了计算稳定性,提高了计算效率。模型区域包括长江口、杭州湾以及邻近海域,具体为 120. 26°E ~124. 5°E、29. 5°N ~33°N,采用 500 m×500 m 网格离散。长江口附近地形采用实测资料,局部地形采用海图水深。

笔者首先进行潮流场模拟,并采用 2006 年 8 月实测潮位和流速资料对模型中的相关参数进行率定和验证。图 1 给出了 2006 年 8 月长江口外涨落急流场。涨潮时,东中国海潮波由(东)南向西北传入,涨潮流由(东)南方向涌入长江口和杭州湾;在长江口以北,东中国海前进潮波与受山东半岛反射形成的旋转潮波相遇,形成以江苏中部弶港为顶点的辐聚状潮流场。落潮时,长江口和杭州湾水域形成东(南)方向的落潮流;在长江口以北,则形成以弶港为顶点的辐散状的潮流场。模拟得到的潮流场基本特征与前人成果是吻合的^[18]。限于篇幅,仅给出大潮期小洋口港以东 S1 测站和吕四港外 S2 测站的潮位、流速和流向验证结果(图 2),测站位置见图 1。由图 2 可见,长江口及邻近海域为半日潮,S1 测站为回转式潮流,S2 测站为往复式潮流;模拟的潮位过程与实测值吻合较好;模拟的流速及流向过程与实测值相比,在相位上比较一致,涨急流速略偏小。

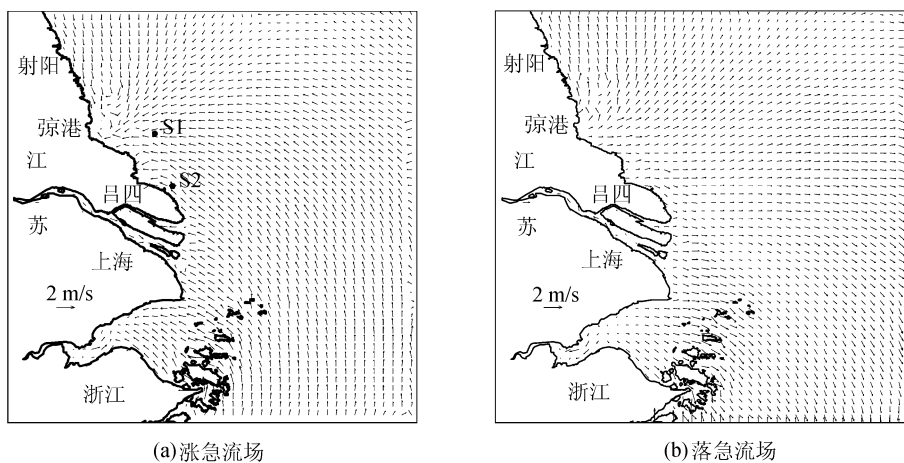


图 1 2006 年 8 月大潮期涨急流场和落急流场

Fig. 1 Flood flow field and ebb flow field during spring tide in August 2006

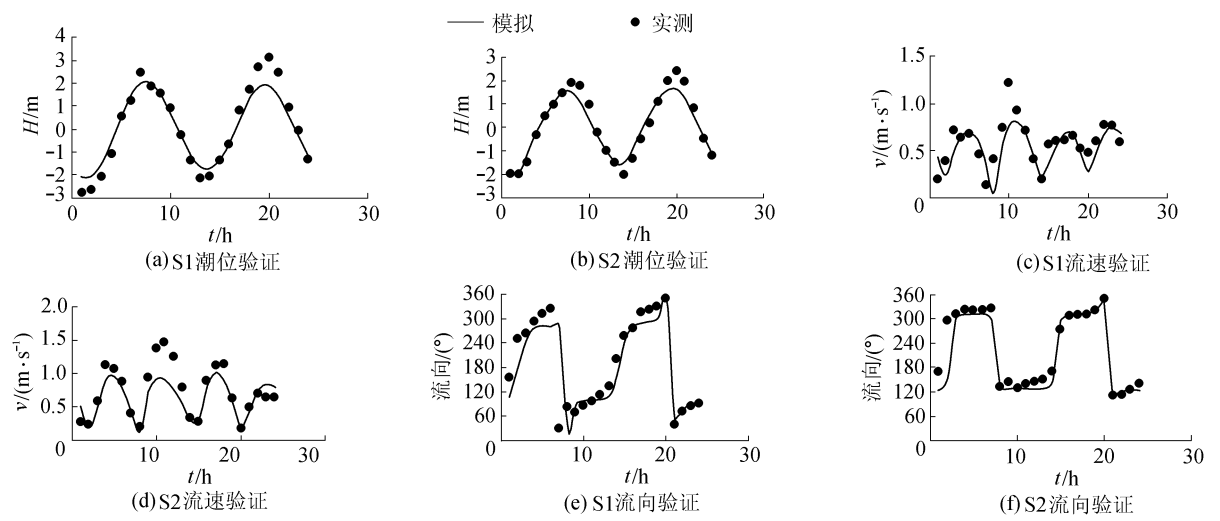


图 2 S1 测站和 S2 测站大潮潮位、流速、流向验证

Fig. 2 Validation of tide level, flow velocity, and current direction at S1 and S2 stations during spring tide

3 区域环流模型及数值试验设计

3.1 主要参数

经模型率定和验证,长江口及邻近海域环流模型的外模态时间步长取 3 s,内模态时间步长取 30 s;粗糙高度 Z_0 取 0.01。

3.2 边界条件和研究时段选取

长江口外近岸环流模型中,在研究长江口邻近海域环流对 El Niño 事件的响应关系时,长江口及杭州湾上游边界未考虑径流的影响,开边界由东中国海环流模型提供。东中国海环流模型在台湾海峡、台湾海峡以东的黑潮区、大隅-土噶喇海峡、对马海峡设立 4 条开边界,开边界条件取自 HYCOM 全球模拟的环流场结果 (www.hycom.org),表面风应力强迫场由 COADS 提供,温、盐初始场由 Levitus (2005) 气候态资料提供。

根据赤道太平洋 ENSO 事件时间表 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>),21 世纪以来,El Niño 事件发生时间包括 2002—2003 年、2004 年、2006 年、2009—2010 年。其采用 MEI 指数 (multivariate ENSO index, 多变量 ENSO 指数) 来表征 ENSO 的变化情况,MEI 正事件表征 El Niño 事件,MEI 负事件表征 La Niña 事件。其中 2002—2003 年 El Niño 事件从 2002 年 5 月延续到 2003 年 3 月,持续时间 11 个月,MEI 指数最大达 1.5,显然为较强的暖事件。笔者对 2002—2003 年的环流场进行模拟,风和海表温度强迫得到稳定的东中国海环流场后嵌套对长江口及邻近海域环流进行模拟,选取未受 El Niño 影响的 2002 年 2 月和受 El Niño 影响较显著的 2003 年 2 月的月平均环流场进行分析。

4 结果与分析

4.1 东中国海环流场

图3给出了2002年2月东中国海表层月平均环流场。东中国环流场主要由外海流系和沿岸流系构成。黑潮从台湾海峡东侧北进,沿着东海陆坡向东北方向流动。黑潮前进过程中,主干方向转向东,从土噶喇海峡流出,其路径、流速、流幅都比较稳定,流速一般都能达到0.5 m/s。在对马海峡附近,黑潮的小分支与陆架混合水等“多源”汇集形成对马暖流,从对马海峡流入日本海。黄海中部,有股向西北的流动(黄海暖流),2月份表层的黄海暖流不太显著,流速较小。台湾海峡西侧,台湾暖流沿闽浙沿岸一路北进,后部分分流加入到黑潮中,其北向分量可以影响到长江口和杭州湾附近。台湾暖流流速较黑潮小,最大为0.3 m/s,并在向北流动过程中不断减弱。在2月份的环流场中,浙江沿岸向南流动的沿岸流比较显著;朝鲜西岸沿岸流最强,其向南流动。笔者建立的东中国海环流模型,比较准确地刻画了东中国海环流场形态,与林葵等^[14]、于非等^[15]、吴宝勤等^[16]、李徽翡等^[19]的结论基本一致。

4.2 长江口外近岸环流

图4为2002年2月长江口外垂向平均环流场。在长江口及邻近海域,外海流系主要受到北上的台湾暖流影响。在杭州湾外海区域,向北流动的即是台湾暖流靠近外海的分支,其流幅较宽,流速值较大,达到0.1 m/s量级。台湾暖流在浙江沿岸向北流动,在舟山群岛附近流向转东汇入东海,其小分支能达到长江口附近,然后往东南方向流动。转向后的台湾暖流汇入向北流动的对马暖流,共同构成了黄海暖流并向北流动。长江口和杭州湾附近环流较小。受冬季偏北风影响,长江口区域通常会形成沿岸的风生流。从图4中可以看到模拟的长江口北侧比较微弱的向南流动的苏北沿岸流。

4.3 El Niño 发生时长江口外环流场的变化

为研究长江口及邻近海域环流对El Niño事件的响应情况,对比分析了受El Niño事件影响较显著的2003年2月和未受其影响的2002年2月的月平均环流场。图5为2003年2月长江口外垂向平均环流场分布。

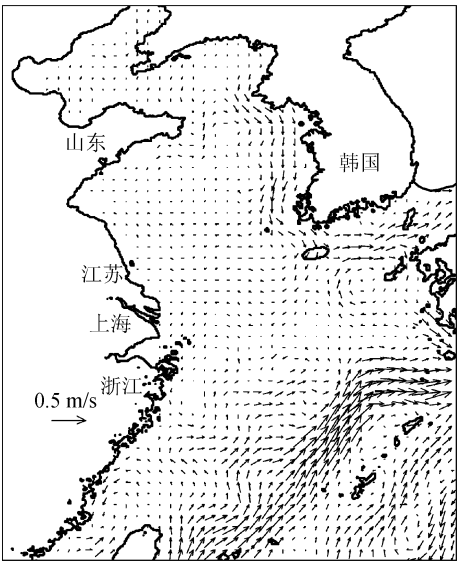


图3 2002年2月东中国海表层月平均环流分布
Fig. 3 Distribution of monthly average surface circulation in East China Sea in February 2002

与林葵等^[14]、于非等^[15]、吴宝勤等^[16]、李徽翡等^[19]的结论基本一致。

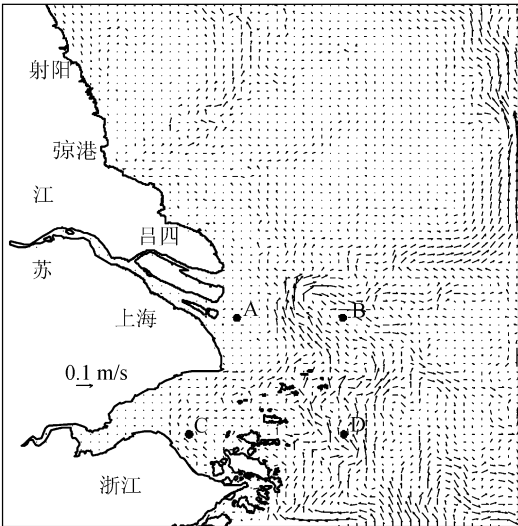


图4 2002年2月长江口外垂向平均环流场
Fig. 4 Depth-averaged circulation off Yangtze Estuary in February 2002

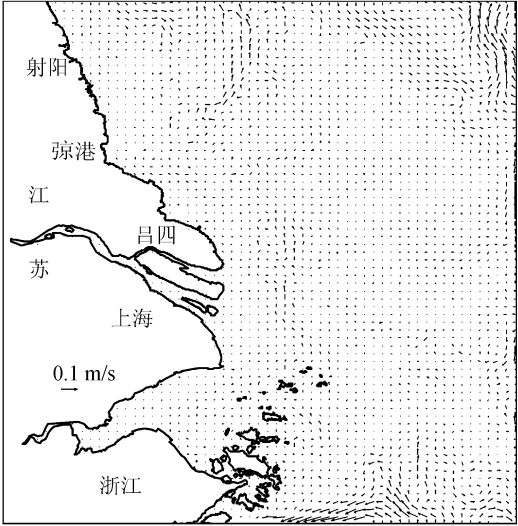


图5 2003年2月长江口外垂向平均环流场分布
Fig. 5 Depth-averaged circulation off Yangtze Estuary in February 2003

图 5 与图 4 相比,研究区域主要流系没有发生变化,局部流向有所改变;2003 年 2 月的环流强度明显弱于 2002 年 2 月;台湾暖流明显减弱,流幅变短,流速变小。2003 年 2 月,台湾暖流在进入杭州湾外侧后立即转向东,流速较小,流幅宽度只有 2002 年同期的 1/2;2002 年 2 月台湾暖流控制了整个杭州湾区域,其向北的分支甚至能达到长江口附近。2002 年 2 月环流场中所看到的微弱的沿岸流,在 2003 年 2 月已消失。由于 2003 年 2 月正处于 ENSO 事件的暖期,El Niño 现象正在发生和发展,其导致了长江口外近岸环流场发生显著的变化。

为定量分析环流受 El Niño 事件的影响程度,在小模型区域中设置 4 个观测点来分析环流强度的变化情况。A 点在长江口口门附近,C 点在杭州湾附近,B、D 两点均处于靠近外海的区域,如图 4 所示。表 1 为 2002 年 2 月和 2003 年 2 月 4 个观测点的环流强度对比情况。总体而言,2003 年 2 月 4 个观测点的速度都明显弱于 2002 年 2 月,即冬季 El Niño 现象的发生使长江口外环流场减弱。台湾暖流是影响区域环流的重要因素,2002 年 2 月位于杭州湾外海的 D 点流速达到 3.54 cm/s,其北进过程中流速减弱,达到观测点 B 时的流速为 1.21 cm/s。长江口内观测点 A 处受台湾暖流的影响较小。

长江口及其邻近海域处于东中国海环流场的大背景之中,台湾暖流是东中国海环流中的重要部分,不难解释长江口外环流场在 El Niño 期间发生的异常。许多学者的研究也表明,东中国环流场与 El Niño 事件有一定的响应关系。El Niño 事件对东海及邻近海区影响明显,El Niño 现象进入盛期时黑潮流量剧减,对马暖流及其他东中国海环流的组成部分也是如此^[20]。在 El Niño 现象出现前后,东海环流流态有些异常,黑潮的异常现象可能与 El Niño 和 La Niña 现象的过渡有关^[10]。总之,El Niño 事件通过大气桥的作用或某些特殊的作用方式使长江口及邻近海域环流场发生了异常。冬季 El Niño 的作用使台湾暖流减弱,长江口外近岸环流强度整体减弱,但对长江口海域的影响范围较小。近海环流的变化与污染物输运、赤潮灾害、海洋生态环境等关系密切,长江口及邻近海域环流的异常应当引起各方面的关注。

5 结 语

- a. 通过东中国海环流大模型、长江口及邻近海域环流模型嵌套技术,较准确地刻画了东中国海外海流系和沿岸流系,以及长江口外精细的流系结构。长江口及邻近海域环流场处于东中国海背景环流场中,受台湾暖流影响显著。
- b. 通过对受 El Niño 影响显著与否的环流场模拟比较,发现长江口及邻近海域环流与 El Niño 事件存在强烈的响应关系。冬季 El Niño 现象发生时,长江口及邻近海域的环流明显减弱;台湾暖流受影响程度显著,流速减小、流幅变窄,台湾暖流对长江口外环流的影响因此减弱。长江口及邻近海域环流的异常应当引起各方面的关注。
- c. 本文未考虑潮混合和斜压作用,可能对研究结果有些影响,将在以后的研究中进一步改善。此外,为了更准确地把握中国近海海洋环流与气候的响应关系,需要开展长序列、大尺度的环流数值模拟。

参考文献:

[1] 陈奕德, 张韧, 蒋国荣. 近年来国内 ENSO 研究概述[J]. 热带气象学报, 2005, 21(6): 634-641. (CHEN Yide, ZHANG Ren, JIANG Guorong. Summary of Chinese research on ENSO in recent years [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005, 21(6): 634-641. (in Chinese))

[2] 许武成, 马劲松, 王文. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述[J]. 气象科学, 2005, 25(2): 212-220. (XU Wucheng, MA Jingsong, WANG Wen. A review of studies on the influence of ENSO events on the climate in China [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005, 25(2): 212-220. (in Chinese))

[3] 苏纪兰, 李炎, 王启. 我国 21 世纪初海洋科学研究中的若干重要问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 658-663. (SU Jilan, LI Yan, WANG Qi. Some important research topics for China in ocean sciences in the early 21st century[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(5): 658-663. (in Chinese))

- [4] 苏纪兰. 21 世纪初我国海洋科学的展望[J]. 海洋学研究, 2006, 24(1): 1-5. (SU Jilan. Principal goals for ocean research in China in the early 21st century [J]. Journal of Marine Sciences, 2006, 24(1): 1-5. (in Chinese))
- [5] 柯东胜. ENSO 对我国海洋环境的若干影响[J]. 海洋预报, 1994, 11(3): 32-37. (KE Dongsheng. The influence of ENSO on the marine environment of our country [J]. Marine Forecasts, 1994, 11(3): 32-37. (in Chinese))
- [6] CHAO S Y, SHAW P T, WU S Y. El Niño modulation of the South China Sea circulation[J]. Progress in Oceanography, 1996, 38(1): 51-93.
- [7] WU C R, SHAW P T, CHAO S Y. Seasonal and interannual variations in the velocity field of the South China Sea[J]. Journal of Oceanography, 1998, 54: 361-372.
- [8] 王卫强, 王东晓, 施平. 南海大尺度动力场年循环和年际变化[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 61-68. (WANG Weiqiang, WANG Dongxiao, SHI Ping. Annual and interannual variations of large-scale dynamic in South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2001, 20(1): 61-68. (in Chinese))
- [9] 鲍颖, 兰健, 王毅. 南海在 1997/1998 年 El Niño 事件后的异常变化[J]. 地球科学进展. 2008, 23(10): 1027-1036. (BAO Ying, LAN Jian, WANG Yi. The anomaly response to the 1997/1998 El Niño event in South China Sea [J]. Advance in Earth Sciences, 2008, 23(10): 1027-1036. (in Chinese))
- [10] 袁耀初, 刘勇刚, 苏纪兰. 1997—1998 年 El Niño 至 La Niña 期间东海黑潮的变异[J]. 地球物理学报, 2001, 44(2): 199-209. (YUAN Yaochu, LIU Yonggang, SU Jilan. Variability of the kuroshio in the East China Sea during El Niño to La Niña phenomenon of 1997 and 1998 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(2): 199-209. (in Chinese))
- [11] 何发祥. 厄尔尼诺现象和闽浙沿岸夏季表层盐度值的变异[J]. 海洋湖沼通报, 1988(2): 9-15. (HE Faxiang, El Niño phenomenon and variation of surface salinity in summer along Min-Zhe Coast [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1988(2): 9-15. (in Chinese))
- [12] 洪华生, 何发祥, 杨圣云. 厄尔尼诺现象和浙江近海鲈鲶鱼渔获量变化关系: 长江口 ENSO 渔场学问题之二[J]. 海洋湖沼通报, 1997(4): 8-15. (HONG Huasheng, HE Faxiang, YANG Shengyun. El Niño phenomenon and variation of catch of scomber japonicas and decapterus maruadsi in offshore waters of Zhejiang Province: the second part of research on the Yangtze Estuary ENSO fishery [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1997(4): 8-15. (in Chinese))
- [13] 陈美榕, 石少华, 沈红梅. 长江口海域海水表层温度与厄尔尼诺事件的关系[J]. 海洋预报, 2005, 22(1): 80-85. (CHEN Meirong, SHI Shaohua, SHEN Hongmei. The relation between SST in Yangtze River Estuary and El Niño event [J]. Marine Forecast, 2005, 22(1): 80-85. (in Chinese))
- [14] 林葵, 汤毓祥, 郭炳火. 黄海、东海表、上层实测流分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(2): 9-19. (LIN Kui, TANG Yuxiang, GUO Binghuo. An analysis on observational surface and upper layer current in the Huanghai Sea and the East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(2): 9-19. (in Chinese))
- [15] 于非, 臧家业, 郭炳火, 等. 黑潮水入侵东海陆架及陆架环流的若干现象[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 21-28. (YU Fei, ZANG Jiaye, GUO Binghuo, et al. Some phenomena of the Kuroshio intrusion into shelf area and the shelf circulation of the East China Sea [J]. Advances in Marine Science, 2002, 20(3): 21-28. (in Chinese))
- [16] 吴宝勤, 王丹, 陈标, 等. 渤海、黄海、东海冬季环流的数值模拟[J]. 海洋测绘, 2007, 27(5): 74-77. (WU Baoqin, WANG Dan, CHEN Biao, et al. Numerical model of the winter circulation in Bohai, Yellow Sea and East China Sea [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(5): 74-77. (in Chinese))
- [17] MELLOR G L. Users guide for a three dimensional, primitive equation, numerical ocean model[R]. Princeton: Princeton University, 2004.
- [18] 张东生, 张君伦, 张长宽, 等. 潮流塑造-风暴破坏-潮流恢复: 试释黄海海底辐射沙脊群形成演变的动力机制[J]. 中国科学: D 辑, 1988, 28(5): 394-402. (ZHANG Dongsheng, ZHANG Junlun, ZHANG Changkuan, et al. Tidal current work-surge destruction-tidal current restoration: a preliminary study on the dynamic mechanism of the development of the radical submarine sand ridges of the South Yellow Sea [J]. Science in China: Series D, 1988, 28(5): 394-402. (in Chinese))
- [19] 李徽翡, 赵保仁. 渤、黄、东海夏季环流的数值模拟[J]. 海洋科学, 2001, 25(1): 28-32. (LI Huifei, ZHAO Baoren. Numerical model of the circulation of the Bohai Sea, Yellow Sea and Eastern China Sea [J]. Marine Sciences, 2001, 25(1): 28-32. (in Chinese))
- [20] 何发祥, 洪华生. 厄尔尼诺现象与东海黑潮区及其邻近海域水文结构和环流的变异: 东海黑潮区及其邻近海区 ENSO 渔场学问题之一[J]. 海洋湖沼通报, 1999(4): 16-24. (HE Faxiang, HONG Huasheng. Variation of hydrologic structure and circulation in relation to ENSO events in the Kuroshio area in the East China Sea and its adjacent seas [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1999(4): 16-24. (in Chinese))