

粤东至闽南沿岸海域夏季上升流的调查研究*

许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 邱云, 周喜武, 朱大勇

国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005

摘要: 利用 2001、2002、2006 和 2009 年夏季 6 个航次的温盐深(conductivity-temperature-depth, CTD)调查资料, 揭示粤东至闽南沿岸海域上升流空间结构和强度的年际差异; 并利用卫星遥感风场资料、海床基的海流和底层水温资料、广东南澳海洋站表层水温资料探讨海面风场、热带气旋对上升流的影响, 上升流强度的时空特征, 上升流的短期变化、生消过程及上升流的水体来源。结果表明, 粤东至闽南沿岸海域上升流的范围和强度存在年际差异。上升流涌升至表层只出现在 2009 年 7~8 月航次。闽粤交界区沿岸海域, 2006 年 7~8 月航次, 上升流范围较窄, 且偏东北; 2009 年 7~8 月航次, 范围较宽; 2001 年 7~8 月航次, 范围偏西南。粤东沿岸海域, 2006 年 7~8 月航次上升流涌升高度较低, 其他航次较高。研究海域 2002 年 7~8 月航次上升流强度较强, 其他航次较弱。热带气旋使得上升流区海水垂向混合强烈, 中下层冷水与表层暖水混合后迅速升温, 上升流被破坏。粤东沿岸海域上升流强度强于闽南沿岸, 出现时间也早于闽南沿岸。7 月初至 7 月中旬, 上升流开始形成, 但不稳定; 7 月中旬至 8 月上旬, 上升流处于强盛阶段; 8 月中旬至 9 月上旬, 上升流减弱; 9 月上旬至 9 月中旬, 上升流迅速消亡。粤东至闽南沿岸海域上升流的水体来源于粤东沿岸外海深层冷水。

关键词: 上升流; 粤东; 闽南; 年际差异; 短期变化; 生消过程

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2014)02-0001-09

Observational study on summertime upwelling in coastal seas between eastern Guangdong and southern Fujian

XU Jin-dian, CAI Shang-zhan, XUAN Li-li, QIU Yun, ZHOU Xi-wu, ZHU Da-yong

Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China

Abstract: Based on the summer cruise conductivity-temperature-depth (CTD) data in 2001, 2002, 2006, and 2009, this paper reveals the interannual variation of spatial structure and intensity of upwelling in eastern Guangdong and southern Fujian coastal seas. Using the QuikSCAT wind data, the current and bottom temperature data from seabed-based observations, and the sea surface temperature data at the ocean station of Nan'ao, we discuss the influence of sea surface wind and tropical cyclones on the upwelling, temporal and spatial characteristics and short-term variation of the upwelling, the evolution of the upwelling, and the source of the upwelling. We show that the range and intensity of the upwelling present an interannual variation in the coastal seas between eastern Guangdong and southern Fujian. The upwelled water only reached the surface in July–August 2009. In the border area of Guangdong and Fujian, the upwelling region was narrow, and was located mostly northeastward in July–August 2006; in contrast, it was wider in July–August 2009, and was located mostly southwestward in July–August 2001. In the eastern Guangdong coastal sea, the upwelled water reached 20 m in July–August 2006, deeper than in other years. The upwelling in the study area was stronger in July–August 2002 than on the other years. A strong vertical mixing within the upwelling area induced by a tropical cyclone warmed the middle- and bottom-layer waters rapidly, and finally led to the disruption of the upwelling. The coastal upwelling appeared earlier and was stronger in eastern Guangdong coast than in southern Fujian coast. During early and mid July, the upwelling started to appear but was not permanent. It was strengthened in

收稿日期: 2013-04-25; 修订日期: 2013-08-20。孙淑杰编辑

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2011012); 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421205); 福建省“908”专项(FJ908-04-06)

作者简介: 许金电(1963~), 男, 福建省晋江市人, 高级工程师, 主要从事热带边缘海海洋环境动力学研究。E-mail: xujindian@tiosoa.cn

*美国国家航空航天局(NASA)的喷气推进实验室(JPL)提供了 QuikSCAT 风场资料, 在此表示感谢。

mid July and early August, and became weaker from mid August to early September. Finally, it disappeared rapidly during early and mid September. The upwelled water in the coastal seas of eastern Guangdong and southern Fujian came from the lower-layer cold water in the open sea of the eastern Guangdong.

Key words: upwelling; eastern Guangdong; southern Fujian; interannual variation; short-term variation; evolution process

粤东至闽南沿岸海域位于南海东北部的陆架区。受东亚季风控制, 每年 10 月至翌年 3 月盛行东北季风, 6 月至 8 月盛行西南季风。受西南季风、海流的驱动以及地形的影响, 每年夏季粤东至闽南沿岸海域出现上升流现象, 但各年上升流范围和强度存在差异(Tang, et al, 2004; Hong, et al, 2009)。粤东至闽南沿岸海域是我国主要的上升流区之一, 该上升流也是我国近海环流系统的一个重要组成部分。尽管上升流流速比水平流速小几个量级, 但对局地的气候和渔业生产有着很大的影响(洪启明 等, 1991)。

已有不少学者对粤东至闽南沿岸海域上升流进行了研究。陈金泉等(1982)、于文泉(1987)、肖晖(1988)、韩舞鹰等(1988)、李立等(1989)、颜廷壮(1991)等学者曾指出粤东至闽南沿岸海域存在上升流现象并探讨了其成因, 认为西南季风是该上升流的主要驱动因素。21 世纪以来, 许金电等(2003)、吴日升等(2003)、Shang 等(2004)、庄伟等(2005)、Wang 等(2012)、经志友等(2008)、陈照章等(2008)、Gan 等(2009)、蔡尚湛等(2011)、Jing 等(2009)、Jing 等(2011)众多学者利用海洋水文调查资料、卫星遥感资料(SST 和风场)及数值模型研究了粤东至闽南沿岸海域的上升流, 指出西南季风的强弱是影响该上升流时空变化的重要因素。近年来, Shu 等(2011)、Wang 等(2013)、Luo 等(2012)、Geng 等(2012)学者利用数值模型对珠江口羽状流、南海西边界流等的研究中也涉及上升流。

尽管对粤东至闽南沿岸海域上升流已有不少研究和结论, 但都基于某一航次的海洋调查资料或卫星遥感资料, 对于该上升流的年际差异涉及较少, 对该上升流的产生、发展和消失过程也缺乏认知。

20 世纪 90 年代以前, 对粤东至闽南沿岸海域

上升流的调查与研究工作开展得比较少, 资料较为匮乏; 而且调查站点较稀疏, 调查范围较小。21 世纪以来, 对粤东至闽南沿岸海域的上升流开展了多个航次的调查, 主要有 2000 年 7~8 月、2001 年 7~8 月、2002 年 7~8 月、2005 年 7 月、2006 年 7~8 月、2007 年 7 月、2009 年 6 月、2009 年 7~8 月、2009 年 8~9 月等航次的调查。由于 2005 年 7 月和 2007 年 7 月航次的调查范围较小, 2000 年 7~8 月航次的测站空间分布不均匀, 因此本文选择其余 6 个航次的温盐深(CTD)调查结果进行分析研究, 以揭示粤东至闽南沿岸海域上升流范围和强度的年际差异; 并利用卫星遥感风场资料、海床基的海流和底层水温资料、广东南澳海洋站表层水温资料探讨海面风场、热带气旋对上升流的影响, 上升流强度的时空特征, 上升流的短期变化、生消过程及水体来源等。本文的研究海域范围为 $113^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 、 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 。海底地形和各航次调查范围见图 1, 各航次的调查时间和 CTD 测站个数见表 1。

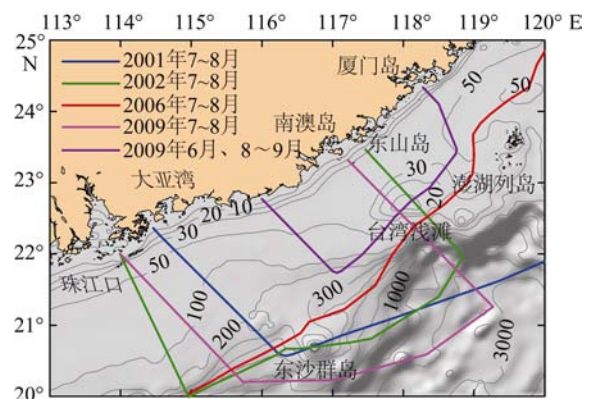


图 1 研究海域海底地形和各航次调查范围示意图

Fig. 1 Topography of the study area and the survey area of each cruise

表 1 位于本研究海域各航次的调查时间、CTD 测站个数和调查范围

Tab. 1 Survey time, CTD station numbers and survey area of each cruise used in this study

航次	位于本研究海域的调查时间	CTD 测站个数	调查范围
2001 年 7~8 月	8 月 6~15 日	69	覆盖粤东和闽南陆架和陆坡区海域
2002 年 7~8 月	7 月 22 日~8 月 2 日	95	覆盖粤东陆架和陆坡区海域
2006 年 7~8 月	8 月 1~15 日	300	覆盖粤东和闽南陆架区海域
2009 年 6 月	6 月 9~16 日	73	覆盖粤东的陆丰外海至闽南的厦门外海的陆架区海域
2009 年 7~8 月	7 月 27 日~8 月 16 日	32	覆盖粤东陆架和陆坡区海域
2009 年 8~9 月	8 月 27 日~9 月 9 日	73	与 2009 年 6 月航次的范围相同

1 粤东至闽南沿岸海域上升流范围的年际差异

由于上升流区表现为低温、高盐、高密度的特征, 且上升流区与上升流区以外的交界区等温线较密集、温度梯度较大, 因此从温度的平面分布图中选取交界区等温线最密集(梯度最大)处的一条等温线作为上升流区的轮廓线(边界线)。图 2 是 2002 年 7~8 月航次的 20m 层温度平面分布。由图可见, 温度为 24℃ 的等温线大体可代表 20m 层上升流区的边界线。为了探讨粤东至闽南沿岸海域上升流范围的年际差异, 本文按照上述方法绘制了各调查航次、各层次上升流区的边界线(图 3)。各航次、各层次的边界线(等温线)的温度值是不同的, 取该航次、该层次温度平面分布图中等温线最密集(梯度最大)处的

一条等温线作为边界线。

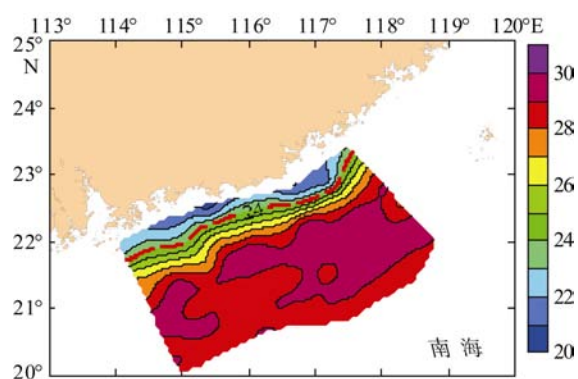


图 2 2002 年 7~8 月航次的 20m 层温度平面分布(单位: °C)
Fig. 2 Temperature distribution at 20 m in July–August 2002 (units: °C)

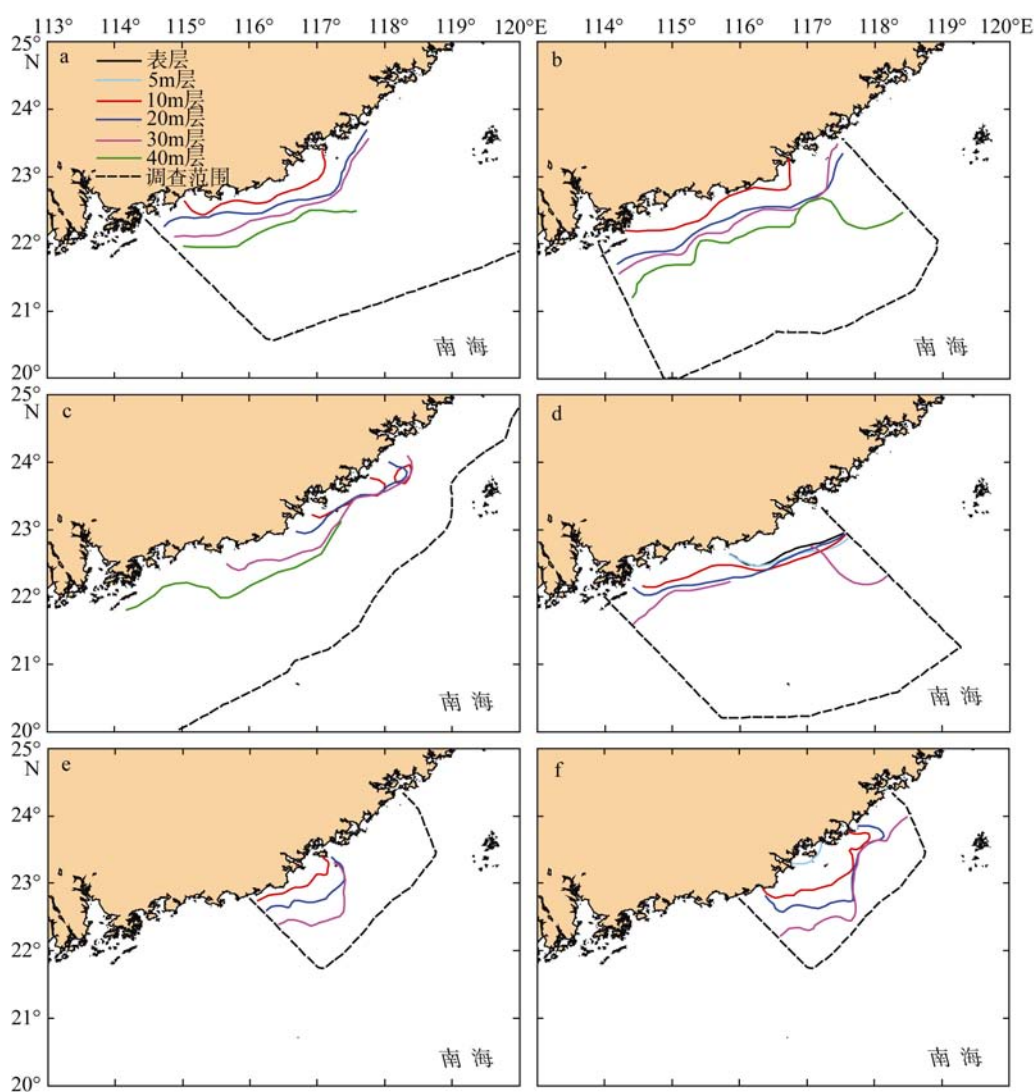


图 3 各航次、各层次上升流边界线

a. 2001 年 7~8 月航次; b. 2002 年 7~8 月航次; c. 2006 年 7~8 月航次; d. 2009 年 7~8 月航次; e. 2009 年 6 月航次; f. 2009 年 8~9 月航次

Fig. 3 Upwelling edges in different layers during each cruise. (a) July–August 2001; (b) July–August 2002; (c) July–August 2006; (d) July–August 2009; (e) June 2009; and (f) August–September 2009

由图3可见, 2001年7~8月航次, 上升流没有到达表层。10m层, 上升流出现在粤东的红海湾至南澳岛近岸海域。20m和30m层, 上升流向离岸扩展, 东北部可到达福建的东山岛外海。40m层, 上升流边界线的东北部转向台湾浅滩的南侧(图3a)。

2002年7~8月航次, 表层上升流不明显。10m层, 上升流范围较小, 只出现在粤东近岸海域。20m和30m层, 上升流边界线覆盖整个粤东沿岸海域, 且大体与岸线平行。40m层, 上升流区的东部到达台湾浅滩西南部海域(图3b)。

2006年7~8月航次, 表层上升流不明显。10m层上升流出现在漳浦外海和东山岛至汕头沿海一带, 且出现2个中心。20m层上升流的范围比10m层有所扩大。30m层, 上升流的范围沿海岸呈带状分布, 东北部可达厦门外海南侧, 西南部可扩展到陆丰外海。40m层, 上升流的范围向离岸扩展, 但只局限在粤东沿海。粤东沿岸上升流涌升高度由东北向西南递减(图3c)。

2009年7~8月, 上升流可爬升至表层, 但只出

现在陆丰至南澳岛近岸海域。10m和20m层, 上升流边界线大体与岸线平行, 可覆盖粤东近岸海域。30m层, 上升流边界线的西南部向离岸扩展, 而东部转向台湾浅滩南侧(图3d)。

2009年6月, 表层上升流不明显。10m层, 上升流仅出现在广东南澳岛至惠来的近岸海域。20m和30m层, 上升流边界线向离岸扩展(图3e)。

2009年8~9月, 表层上升流不明显。10m层, 上升流出现在广东惠来至福建东山岛的近岸海域。20m层, 上升流边界线向离岸有所扩展。30m层, 上升流范围离岸更远一些(图3f)。

由此可见, 上述6个航次的上升流范围存在年际差异(表2)。表层只出现在2009年7~8月航次, 其他航次不明显。闽粤交界区沿岸海域, 2006年7~8月航次, 上升流范围较窄, 且偏东北; 2009年7~8月航次, 范围较宽; 2001年7~8月航次, 范围偏西南。粤东沿岸海域, 2001年7~8月、2002年7~8月和2009年7~8月航次上升流涌升高度较高, 2006年7~8月航次较低。

表2 粤东至闽南沿岸海域上升流范围的年际差异

Tab. 2 Interannual difference of upwelling range in the coastal waters of eastern Guangdong and southern Fujian

航次	表层	闽粤交界区沿岸海域	粤东沿岸海域
2001年7~8月	没有出现	10m至30m层。40m层转向台湾浅滩的南侧	10m至40m层
2002年7~8月	不明显	10m至30m层。40m层转向台湾浅滩的南侧	10m至40m层
2006年7~8月	不明显	10m至30m层。范围较窄, 10m层出现2个中心	20m至40m层
2009年6月	不明显	10m至30m层。只出现在南澳岛以南近岸海域	空白
2009年7~8月	出现在陆丰至南澳岛近岸海域	表至20m层。范围较宽, 30m层转向台湾浅滩的南侧	10m至30m层
2009年8~9月	不明显	10m至30m层	空白

2 粤东至闽南沿岸海域上升流强度的年际差异

上述分析结果表明, 粤东至闽南沿岸海域上升流范围存在年际差异, 那么上升流的强度是否也存在年际差异? 为了探讨粤东至闽南沿岸海域上升流强度的年际差异, 本文统计了各个航次10m层、20m层和30m层上升流区平均水温、上升流区外平均水温, 可得到上升流区与上升流区外的平均温度差。显然, 温度差越大, 上升流越强。表3是2001年7~8月航次的统计值; 其他航次按照同样方法进行统计, 统计结果见表4。

由表4可见, 各航次3个层次的平均温度差2002年7~8月航次最大, 为6.06℃, 上升流强度较强; 2001年7~8月航次次之, 为5.44℃; 2009年7~8月航次为5.41℃; 2006年7~8月航次为5.08℃, 上升流强度较弱; 2009年8~9月为4.14℃; 2009年6月最

小, 为2.25℃, 上升流强度最弱。

表3 2001年7~8月航次各层次上升流区内外温度统计

Tab. 3 Statistics of temperature inside and outside the upwelling area in different layers in July–August 2001

层次	上升流区 平均温度/ °C	上升流区外 平均温度/ °C	温度差 /°C
10m层	23.28	29.11	5.83
20m层	22.78	28.22	5.44
30m层	22.43	27.49	5.06
平均值	22.83	28.27	5.44

表4 各航次各层次上升流区内外温度统计

Tab. 4 Statistics of temperature inside and outside the upwelling area during each cruise

航次	平均温度差/°C	航次	平均温度差/°C
2001年7~8月	5.44	2002年7~8月	6.06
2006年7~8月	5.08	2009年7~8月	5.41
2009年6月	2.25	2009年8~9月	4.14

3 讨论

3.1 海面风场对粤东至闽南沿岸海域上升流的影响

普遍认为粤东至闽南沿海海域的上升流是由西南季风引起的, 地形、河流、海流、潮汐等因素只是使得上升流的特征变得复杂一些(于文泉, 1987; 韩舞鹰 等, 1988)。为了探讨海面风场对粤东至闽南沿岸海域上升流的影响, 利用 2001 年、2002 年、2006 年和 2009 年 6~9 月研究海域内 A 点(图 4, 117°7'30"E、22°7'30"N)的 QuikSCAT 卫星遥感风速矢量时间序列进行分析(图 5)。图中的长方形为各航次的调查时间范围, 虚线为沿岸风分量(把风速矢量分解为沿岸风和向岸风, 沿岸与正北的夹角为 55°, 向岸与正北的夹角为-35°)。

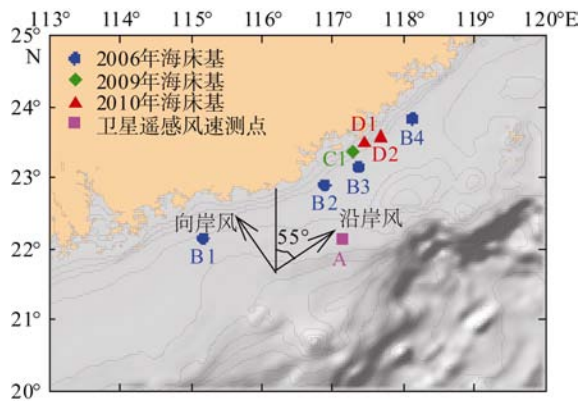


图 4 海床基和卫星遥感风速测站示意图

Fig. 4 Positions of mooring stations and satellite remote sensing wind field station

由图 5 可见, 2002 年 6 月和 7 月, 研究海域以西南风为主, 2002 年航次调查前的 12d 沿岸风分量为正值, 尤其是调查前的 5d 出现强劲的西南风。持续稳定的沿岸风可造成表层、次表层海水离岸输送, 有利于中下层海水沿地形爬升以及上升流的维持和发展。可见持续稳定的沿岸风可能是导致该航次上升流较强的原因。2001 年 7~8 月、2009 年 6 月、2009 年 7~8 月和 2009 年 8~9 月航次调查前和调查期间, 受热带气旋影响, 风向比较凌乱, 上升流较弱。2006 年航次调查前和调查期间, 热带气旋影响频繁, 风向变化很快, 更加凌乱, 上升流也较弱。由此可见, 海面风场的强度、风向和西南风的持续时间对上升流的影响显著。

3.2 粤东至闽南沿岸海域上升流强度的时空特征

为了阐明粤东至闽南沿岸海域上升流强度的时空特征, 本文利用 2006 年 4 个海床基的底层水温进行分析。图 6 是 2006 年 6 月 22 日至 8 月 31 日海床

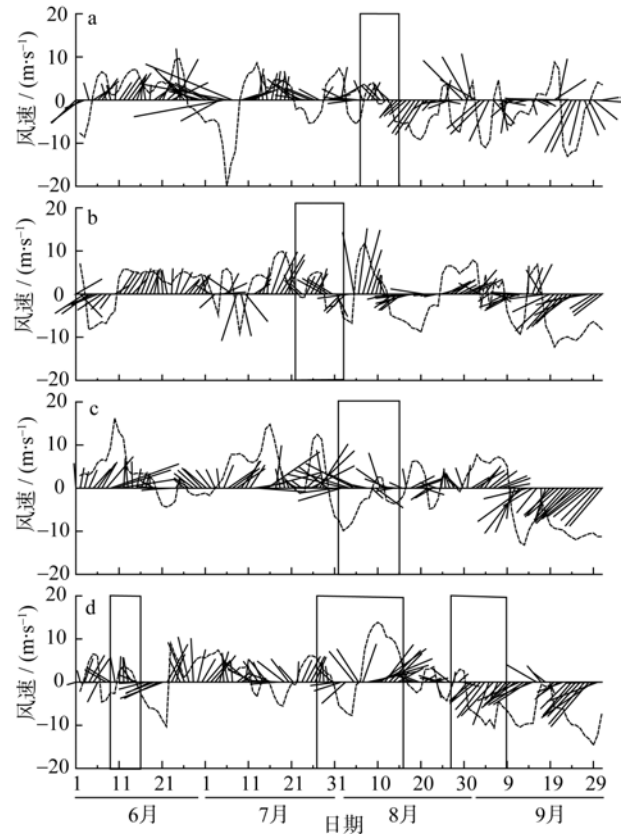


图 5 研究海域内 A 点各年 6~9 月的 QuikSCAT 风速矢量时间序列

a. 2001 年; b. 2002 年; c. 2006 年; d. 2009 年。虚线为沿岸风分量; 长方形为各航次的调查时间范围

Fig. 5 Time series of QuikSCAT wind field at location A from June to September. (a) 2001; (b) 2002; (c) 2006; and (d) 2009. The along-shore component of wind velocity is shown in dashed line. The time period for each cruise is indicated by a rectangle

基 B1、B2、B3、B4 站的底层日平均水温时间序列(海床基位置见图 4), B1 站至 B4 站的水深分别为 55.5m、32.7m、49.4m、42.6m。由图可见, 6 月 22 日至 7 月 7 日, B2 站的底层日平均水温较高, 且处于振荡状态, 说明上升流较弱, 且不稳定; 7 月 8 日至 8 月 13 日, 水温维持在一个较低的水平, 可见上升流处于强盛阶段, 而且比较稳定; 8 月 14 日至 8 月 31 日, 底层水温较高, 并出现短暂的降温, 说明上升流强度减弱, 间歇性地出现。

值得注意的是, B3 站和 B4 站底层日平均水温的变化与 B2 站不尽相同, 主要有 2 个方面。1) B3 站的水温变化滞后于 B2 站, B4 站滞后于 B3 站。通过对 B3 站与 B2 站的水温进行滞后相关分析(表 5)可知, 滞后时间为 3d 的相关系数最大, 达 0.815, 超过 95% 置信度水平(样本数为 65, 95% 置信度水平为 0.245), 可见 B3 站的水温变化滞后于 B2 站 3d。同

样 B4 站的水温变化滞后于 B3 站 6d, 相关系数为 0.799。2)最低水温由西南向东北逐渐升高。观测期间, B2 站日平均最低水温为 22.68℃, B3 站为 23.50℃, B4 站为 24.44℃; 而且 B2 站最浅, B4 站次之, B3 站最深。可见粤东至闽南沿岸海域的上升流强度由西南向东北逐渐减弱。B1 站观测时间较短, 7 月 22 日至 28 日, 水温逐渐下降; 7 月 29 日至 8 月 23 日, 水温振荡上升, 但上升幅度较小, 仅 1.27℃。而 B2 站、B3 站、B4 站的水温从最低处到 8 月中旬分别上升了 4.20℃、5.73℃、6.19℃, 可见 B1 站观测期间仍

然处于上升流的强盛阶段。

表 5 B2 站与 B3 站的水温滞后相关系数

Tab. 5 Lag correlation coefficients of time series data of temperature between locations B2 and B3

滞后时间 /d	0	1	2	3	4	5	6
相关系数	0.738	0.772	0.806	0.815	0.807	0.775	0.707

综上所述, 粤东至闽南沿岸海域上升流强度粤东沿岸强于闽南沿岸; 出现时间粤东沿岸早于闽南沿岸。

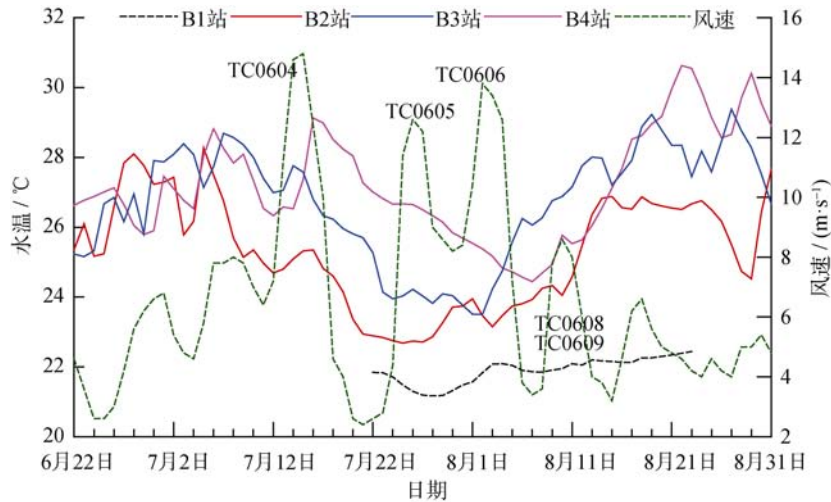


图 6 2006 年海床基 B1、B2、B3、B4 站的底层日平均水温和 A 点风速时间序列

Fig. 6 Time series of daily mean bottom temperature at locations B1, B2, B3, and B4, and wind velocity at location A in 2006

3.3 热带气旋对粤东至闽南沿岸海域上升流的影响

本文利用 2009 年海床基的底层水温资料分析热带气旋对粤东至闽南沿岸海域上升流的影响(表 6)。图 7 是 2009 年 5 月 27 日至 10 月 13 日海床基 C1 站的底层日平均水温时间序列(海床基位置见图 4), C1 站的水深为 33.7m。由图可见, 6 月 9 日至 7 月 18 日, 水温振荡下降, 上升流开始形成并逐渐加强。尽管受 0903 号强热带风暴“莲花(Linfa)”、0904 号热带风暴“浪卡(Nangka)”和 0905 号热带风暴“苏迪罗(Soudelor)”的影响, 但水温变化较小。7 月 19 日至 28 日, 受 0906 号台风“莫拉菲(Molave)”的影响, 水温迅速上升并维持高位振荡, 上升流被破坏。7 月 29 日至 8 月 7 日, 水温迅速下降并维持低位振荡, 上升流又形成(受 0907 强热带风暴“天鹅”影响较小)。8 月 8 日至 11 日, 受 0908 号台风“莫拉克(Morakot)”的影响, 水温又迅速上升, 上升流又被破坏。8 月 12 日至 9 月 2 日, 水温迅速下降并维持低位振荡, 上升流再次形成。9 月 3 日至 10 月 1 日, 受东北季风的影响(图 5), 水温迅速上升并达到最高, 上升流减弱并迅速消亡。

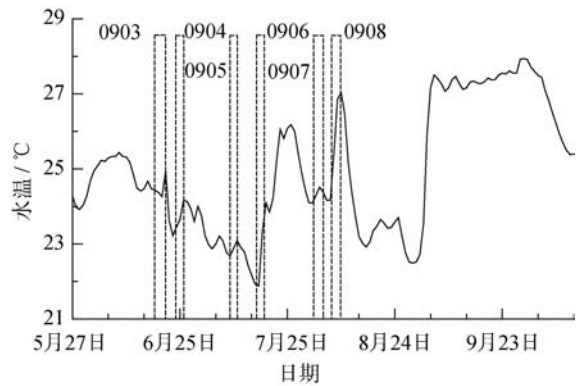


图 7 2009 年海床基 C1 站的底层日平均水温时间序列

长方形为热带气旋影响时间范围

Fig. 7 Time series of daily mean bottom temperature at location C1 in 2009. The influence of each tropical cyclone is shown by a rectangle of dashed lines

由此可见, 热带气旋影响粤东至闽南沿岸期间, 强劲的风速使得海水垂向混合强烈, 由上升流导致的中下层冷水与表层暖水混合迅速升温, 上升流被破坏。而且风向的快速变化也使得上升流减弱并被破坏。然而, 从表 6 可见, 热带气旋的强弱、移动路

径、大风半径等因素对上升流的影响存在差异。0906 号台风“莫拉菲”强度较强，距离 C1 站较近，且 C1 站位于台风路径的右侧，因此影响很大。0908 号台风“莫拉克”强度较强，虽然距离 C1 站较远，且 C1 站位于台风路径的左侧，但影响也较大。

2006 年 6 月至 8 月影响本研究海域的热带气旋主要有 5 个，分别为 0604 号强热带风暴“碧利斯

(Bilis)”、0605 号台风“格美(Kaemi)”、0606 号台风“派比安(Prapiroon)”和双台风 0608 号超强台风“桑美(Saomai)”、0609 号强热带风暴“宝霞(Bopha)”。影响时间分别为 7 月 12~16 日、7 月 23~27 日、8 月 1~5 日、8 月 8~12 日。但从图 6 可见，海床基的底层水温变化并不大。由此可见，测站离岸越远，热带气旋对底层水温的影响越小。

表 6 2009 年热带气旋及其对粤东至闽南沿岸海域上升流的影响

Tab. 6 Information of tropical cyclones and their influences on upwelling in the coastal waters of eastern Guangdong and southern Fujian in 2009

热带气旋名称	影响研究 海域日期	近中心最大 风速/(m·s ⁻¹)	台风中心与 C1 站 最近距离/km	影响 C1 站期 间的台风路径	C1 站位于台风 路径的左(右)侧	C1 站底层 水温升温/℃	影响上升 流情况
0903 号强热带风暴 “莲花(Linfu)”	6 月 19~22 日	30	116	南北向	左	0.69	不大
0904 号热带风暴 “浪卡(Nangka)”	6 月 25~27 日	20	293	北偏西	右	0.94	不大
0905 号热带风暴 “苏迪罗(Soudelor)”	7 月 10~12 日	18	430	东西向	右	0.41	小
0906 号台风 “莫拉菲(Molave)”	7 月 17~19 日	38	165	西偏北	右	4.17	被破坏
0907 强热带风暴 “天鹅(Goni)”	8 月 2~5 日	28	454	西北	右	0.42	小
0908 号台风 “莫拉克(Morakot)”	8 月 7~10 日	35	429	西北	左	2.86	被破坏

3.4 粤东至闽南沿岸海域上升流的短期变化

通过上述分析可知，热带气旋和西南季风的强弱是影响粤东至闽南沿岸海域上升流短期变化的主要因素。本文利用 2010 年海床基的底层水温阐述粤东至闽南沿岸海域上升流的短期变化。

图 8 是 2010 年 5 月 23 日至 9 月 4 日海床基 D1、D2 站的底层日平均水温时间序列(海床基位置见图 4)，D1 站的水深为 38.3m，D2 站的水深为 43.0m。由图可见，福建东山岛外海(D1、D2 站)出现 3 次显著的上升流事件。第一次上升流事件发生在 7 月 2 日至 19 日之间，水温降至 22.14℃(D1 站，以下同)，上升流已经形成；第二次发生在 7 月 20 日至 8 月 11 日之间，水温降至 21.20℃，上升流最强盛；第三次上升流事件发生在 8 月 15 日至 24 日之间，水温降至 21.74℃。往后上升流开始减弱。可见 2010 年夏季粤东至闽南沿岸海域上升流经历了“弱—较强—弱—最强—弱—较强—弱”的短期变化过程。对比 2006 年夏季海床基 B3 站的水温不难发现，2010 年海床基 D1 站的水温比 2006 年海床基 B3 站的水温低很多，6 月 22 日至 8 月 31 日海床基 D1 站的平均水温为 22.74℃，B3 站的平均水温为 26.69℃，C1 站比 B3 站低 3.95℃。可见 2010 年夏季粤东至闽南沿岸海域上升流较强。

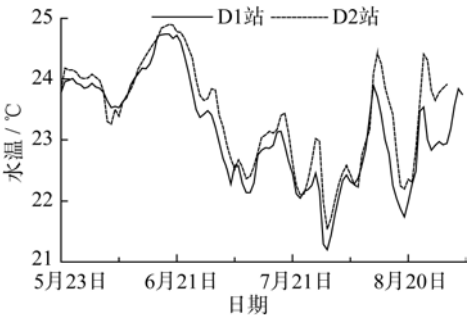


图 8 2010 年海床基 D1、D2 站的底层日平均水温时间序列
Fig. 8 Time series of daily mean bottom temperature at locations D1 and D2 in 2010

3.5 粤东至闽南沿岸海域上升流的生消过程

由于粤东至闽南近海海域长时间多层次的温度、盐度、海流等观测资料非常匮乏，导致对粤东至闽南沿岸海域上升流的生消过程还缺乏认知。Shang 等(2004)分析了 1998 年夏季该海域上升流强度的短期时空变化特征，指出该上升流的强度在 8 月初至 8 月中旬期间较大，但该结论只针对 1998 年夏季。本文利用广东南澳海洋站 2000 年至 2009 年共 10 年的 5 月 1 日至 10 月 31 日多年平均表层水温时间序列，探讨粤东至闽南沿岸海域上升流的生消过程(图 9)。

由图可见，5 月 1 日至 6 月底，水温振荡上升；7 月初至 7 月中旬，水温振荡下降，上升流开始形成，

但不稳定; 7月中旬至8月上旬, 水温较低, 上升流处于强盛阶段; 8月中旬至9月上旬, 水温维持在 26.2°C 上下小幅波动, 上升流较弱; 9月上旬至9月中旬, 水温迅速上升, 上升流迅速消亡; 9月下旬之后, 受冷空气的影响, 水温迅速下降。

尽管粤东至闽南沿岸海域上升流不一定能涌升至表层, 但通过垂向混合, 表层水温在一定程度上也能反映上升流的特征。从图3可知, 广东南澳岛附近海域是粤东至闽南沿岸海域上升流涌升高度较高的海域, 因此南澳海洋站西南季风期间表层水温的气候态特征大体可以代表粤东至闽南沿岸海域上升流的生消过程。

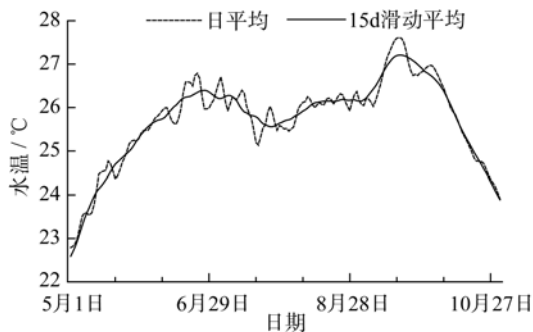


图9 南澳海洋站2000年至2009年的5月至10月共10年平均的日表层水温时间序列

Fig. 9 Ten-year (2000–2009) averaged daily surface temperature time series at the ocean observation station of Nan'ao from May to October

3.6 粤东至闽南沿岸海域上升流的水体来源

Gan等(2009)通过对实测资料以及模型结果的分析指出, 粤东至闽南近岸海域上升流受到地形的影响, 汕头沿岸海域上升流的水体来源于其西南面海域。

本文通过对B1站、B2站和B4站海床基夏季的各层海流观测数据进行调和得到各层余流(图10,

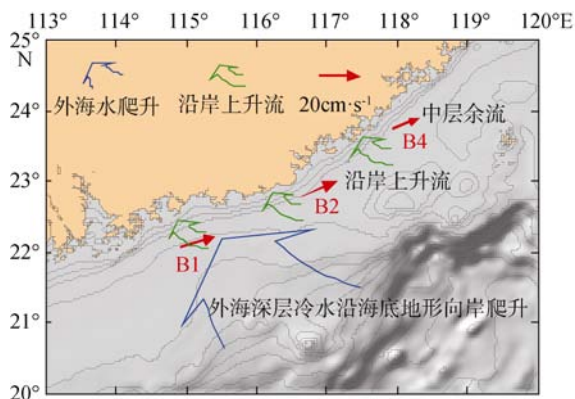


图10 粤东至闽南沿岸海域上升流的水体来源示意图

Fig. 10 Schematic showing the water source of upwelling in the coastal waters of eastern Guangdong and southern Fujian

只绘制中层余流)。结果表明, 3个站的各层余流流向都是东北向。由此可以推断, 粤东沿岸外海深层低温高盐水沿海底地形向岸爬升而形成的上升流水体被沿岸的东北向流带往台湾浅滩西北部水道, 受西南季风的驱动沿海底地形向岸爬升形成台湾浅滩西北部水道沿岸上升流。可见粤东至闽南沿岸海域上升流的水体来源于粤东沿岸外海深层冷水。

4 结语

1) 闽南与粤东沿岸海域的上升流范围存在年际差异, 上升流涌升至表层只出现在2009年7~8月航次, 其他航次不明显。闽粤交界区沿海岸域, 2006年7~8月航次, 上升流范围较窄, 且偏东北; 2009年7~8月航次, 范围较宽; 2001年7~8月航次, 范围偏西南。粤东沿岸海域, 2006年7~8月航次上升流涌升高度较低, 其他航次较高。2002年7~8月航次上升流强度较强, 其他航次较弱。

2) 海面风场的强度、风向和西南风的持续时间对上升流的影响显著, 持续稳定的沿岸风可能是导致上升流较强的原因。

3) 闽南至粤东沿岸海域上升流强度粤东沿岸强于闽南沿岸; 出现时间粤东沿岸早于闽南沿岸。

4) 热带气旋使得上升流区海水垂向混合强烈, 中下层冷水与表层暖水混合迅速升温, 上升流被破坏。风向的快速变化也使得上升流减弱并被破坏。热带气旋的强弱、移动路径、大风半径等因素对上升流的影响存在差异。测站离岸越远, 热带气旋对底层水温的影响越小。

5) 2010年夏季闽南至粤东沿岸海域上升流较强, 并经历了“弱—较强—弱—最强—弱—较强—弱”的短期变化过程。

6) 7月初至7月中旬, 闽南至粤东沿岸海域上升流开始形成, 但不稳定; 7月中旬至8月上旬, 上升流处于强盛阶段; 8月中旬至9月上旬, 上升流减弱; 9月上旬至9月中旬, 上升流迅速消亡。

7) 粤东沿岸外海深层低温高盐水沿海底地形向岸爬升而形成的上升流水体被沿岸的东北向流带往台湾浅滩西北部水道, 受西南季风的驱动沿海底地形向岸爬升, 形成台湾浅滩西北部水道沿岸上升流。可见粤东至闽南沿岸海域上升流的水体来源于粤东沿岸外海深层冷水。

参考文献

- 蔡尚湛, 吴日升, 许金电. 2011. 2006 年夏季粤东至闽南近岸海域上升流的特征[J]. 台湾海峡, 30(4): 489–497.
- 陈金泉, 付子琅, 李法西. 1982. 关于闽南-台湾浅滩渔场上升流的研究[J]. 台湾海峡, 1(2): 5–13.
- 陈照章, 胡建宇, 朱佳, 等. 2008. 2005 年 7 月台湾海峡西南部海域的上升流与冲淡水观测[J]. 热带海洋学报, 27(4): 19–22.
- 韩舞鹰, 马克美. 1988. 粤东沿岸上升流的研究[J]. 海洋学报, 10(1): 52–59.
- 洪启明, 李立. 1991. 粤东陆架区夏季的上升流[J]. 台湾海峡, 10(3): 271–277.
- 经志友, 齐义泉, 华祖林. 2008. 南海北部陆架区夏季上升流数值研究[J]. 热带海洋学报, 27(3): 1–8.
- 李立, 李达. 1989. 台湾浅滩西侧水道夏季的水文特征与上升流[J]. 台湾海峡, 8(4): 353–359.
- 吴日升, 李立. 2003. 南海上升流研究概述[J]. 台湾海峡, 22(2): 269–277.
- 肖晖. 1988. 台湾海峡西部沿岸上升流的研究[J]. 台湾海峡, 7(2): 135–142.
- 许金电, 郭小钢, 李立, 等. 2003. 2002 年夏季粤东外海的海洋状况[J]. 台湾海峡, 22(2): 218–228.
- 颜廷壮. 1991. 中国沿岸上升流成因类型的初步划分[J]. 海洋通报, 10(6): 1–6.
- 于文泉. 1987. 南海北部上升流的初步探讨[J]. 海洋科学, (6): 7–10.
- 庄伟, 王东晓, 吴日升, 等. 2005. 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, 29(3): 438–444.
- GAN JIANPING, CHEUNG A, GUO XIAOGANG, et al. 2009. Intensified upwelling over a widened shelf in the northeastern South China Sea[J]. J Geophys Res, 114: C09019.
- GENG BINGXU, LI SHIYU, WANG DONGXIAO, et al. 2012. Seasonal variability of surface phytoplankton in the Northern South China Sea: A one-dimensional coupled physical-biogeochemical modeling study[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 15(2): 144–151. doi: 10.1080/14634988.2012. 689600.
- HONG HUASHENG, ZHANG CAIYUN, SHANG SHAOLING, et al. 2009. Interannual variability of summer coastal upwelling in the Taiwan Strait[J]. Cont Shelf Res, 29: 479–484.
- JING ZHIYOU, QI YIQUAN, HUA ZULIN, et al. 2009. Numerical study on the summer upwelling system in the northern continental shelf of the South China Sea[J]. Cont Shelf Res, 29(2): 467–478.
- JING ZHIYOU, QI YIQUAN, DU YAN. 2011. Upwelling in the continental shelf of northern South China Sea associated with 1997–98 El Niño[J]. J Geophys Res, 116: C02033. doi: 10.1029/2010JC006598.
- LUO L, ZHOU W, WANG D. 2012. Responses of the river plume to the external forcing in Pearl River Estuary[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 15(1): 62–69. doi: 10.1080/14634988.2012.655549.
- SHANG SHAOLING, ZHANG CAIYUN, HONG HUASHENG, et al. 2004. Short-term variability of chlorophyll associated with upwelling events in the Taiwan Strait during the southwest monsoon of 1998[J]. Deep-Sea Res, 51: 1113–1127.
- SHU YEQIANG, WANG DONGXIAO, ZHU JIANG, et al. 2011. The 4-D structure of upwelling and Pearl River plume in the northern South China Sea during summer 2008 revealed by a data assimilation model[J]. Ocean Modelling, 36(3–4): 228–241. doi: 10.1016/j.ocemod.2011.01.002.
- TANG DANLING, KAWAMURA H, GUAN LEI. 2004. Long-time observation of annual variation of Taiwan Strait upwelling in summer season[J]. Adv Space Res, 33: 307–312.
- WANG DONGXIAO, ZHUANG WEI, XIE SHANGPING, et al. 2012. Coastal upwelling in summer 2000 in the northeastern South China Sea[J]. J Geophys Res, 117: C04009. doi: 10.1029/2011JC007465.
- WANG DONGXIAO, LIU QINYAN, XIE QIANG, et al. 2013. Progress of regional oceanography study associated with western boundary current in the South China Sea[J]. Chin Sci Bull, 58(11): 1205–1215. doi: 10.1007/s11434-012-5663-4.