



台湾海峡南部浅滩以西表层流场的季节与年际变化

朱大勇*, 李立, 郭小钢

国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005

* 联系人, E-mail: zhudy@tiosoa.cn

2012-12-11 收稿, 2013-04-08 接受, 2013-06-09 网络版发表

国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项(海三科 2009066, 海三科 2009009)、国家自然科学基金(40906052)和海洋公益性行业科研专项(200905001-7)资助

摘要 利用 2006 年 1 月~2009 年 4 月间的高频地波雷达观测分析了台湾海峡南部浅滩以西区域表层海流的季节与年际变化特征. 结果表明, 台湾浅滩西侧水道的表层海流主要由明显的季节波动分量和相对稳定的北向常流两部分组成. 受季风的影响, 表层顺岸流速的周年变化与风速之间存在明显的线性关系. 在季节信号的背后则存在一支大约 10 cm/s 量级的稳定的北向常流. 观测还表明, 研究海域表层海流有明显的年际差异, 2007/2008 年冬季表层南向流明显比其他年份增强. 锚系海床基 ADCP 海流剖面观测亦表明该年冬季台湾海峡西侧顺岸流与 2006/2007 年冬季不同, 北向流明显减弱, 各观测水层多为南向流, 年际差异贯穿整个水柱. 同期的水文观测表明闽浙沿岸水的大规模南侵是造成上述年际差异的直接原因. 2007/2008 年 La Niña 事件导致东亚冬季风增强应是造成研究海域冬季流场异常的主因.

关键词

台湾海峡
地波雷达
表层海流
季节变化
年际变化

高频地波雷达基于电磁波的 Bragg 散射和多普勒频移原理探测表层海流^[1]. 历经数十年的发展, 因其全天候、长时间的连续观测能力已成为近岸海洋环境监测与动力学研究的重要手段^[2,3]. “863 福建示范区”使用武汉大学 OSMAR 地波雷达^[4]于 2005 年 6 月在福建南部东山、龙海两地建站, 系统已连续运行 6 年, 海流数据质量得到了分析^[5]和验证^[6], 海流误差达到国际同类设备水平, 观测结果并已用于台湾海峡环流研究^[7]. 2006 年该地波雷达系统一周年的连续观测表明台湾海峡南部表层海流有着显著的周年变化. 通过对风与海流的月平均顺岸分量间关系及 ADCP 锚系海流剖面观测结果的分析, 证实台湾海峡西侧终年存在一支北向海流. 但在 10 m 以浅层次因季风作用海流方向随季节交替而变, 在夏季受北向流控制, 冬季则受南下的浙闽沿岸流支配^[8,9], 但中下层依然向北流动^[7].

台湾海峡是沟通南海和东海的通道, 是受东亚

季风影响显著的海域之一, 经多年的研究, 人们对海峡流场的季节性变化已有充分的认识^[10,11]. 而台湾海峡地形导致的“狭管效应”使得季风增强, 表现为气候事件信号的“放大”^[12]. Kuo 等人^[13]利用主成分分析的方法研究了 ENSO 事件中台湾海峡风场的差异, 发现在 1997/1998 年 El Niño 事件中的东北季风要弱于常年, 而卫星遥感观测则表明此时台湾海峡表层海温偏高, 认为风场的变化可能改变了区域流场进而导致海峡水温的上升. Wu 等人^[14]的数值模型结果显示 2002 年冬季受厄尔尼诺事件影响而东北季风的强度偏弱, 浙闽沿岸水向南入侵势头减弱, 造成了冬季台湾海峡增温变暖; 相反, 2000 年冬季 La Niña 事件期间, 东北季风加强, 浙闽沿岸水的强度增强, 减弱或者抑制了向北的暖水使得海峡水温下降^[14].

关于 ENSO 对台湾海峡影响的报道中有一些生物地球化学研究^[15], 例如有学者认为 2008 年 La Niña 事件阻止了春季黑潮水进入台湾海峡^[16]. 2008 年冬

引用格式: 朱大勇, 李立, 郭小钢. 台湾海峡南部浅滩以西表层流场的季节与年际变化. 科学通报, 2013, 58: 2737-2744

英文版见: Zhu D Y, Li L, Guo X G. Seasonal and interannual variations of surface current in the southern Taiwan Strait to the west of Taiwan Shoals. Chin Sci Bull, 2013, 58: 4171-4178, doi: 10.1007/s11434-013-5907-y

季异常偏冷造成了台湾海峡澎湖水域的渔业资源受到损失^[17,18].

总而言之,以往研究表明台湾海峡流场对气候事件造成的风场改变有显著响应,年际差异较为明显.然而,这一结果仍有待长期海流观测的证明.本文利用设置于福建南部的地波雷达系统长达 3 年 4 个月的连续观测,辅以锚系海床基 ADCP 的观测结果,分析台湾海峡西侧海流的年际变化及其对 ENSO 的响应.

1 数据

观测系统由两台 OSMAR 地波雷达组成,分别置于龙海和东山(图 1)^[5]. 本文所引用的表层海流资料的起止时间为 2006 年 1 月初至 2009 年 4 月底,系“863 福建示范区”提供,数据采样间隔为 10 min,空间分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$. 图 1 给出了 2008 年该数据集有效率 10% 以上的格点的空间分布,可见在东山与龙海之间两雷达扇区的公共覆盖区域中部采样率较高,周围逐渐降低. 为便于与先前工作对比,采用

与文献[7]相同的龙海外东南 135° 方位断面,以 2008 年全年数据有效率大于 40% 为限确定了断面的两端,设置了 30 个等间隔区段;对断面上各个格点的海流数据按月进行质量控制,剔除任一流速分量距平大于 3 倍标准偏差的采样;对质控后月样本数大于 1000 的断面格点作矢量平均,得到逐月平均流矢,并求得其顺岸(指向 45° 方位为正)和垂岸分量(指向 135° 方位为正). 从中选取了数据有效率大于 75% 的 A, B, C 三点(坐标分别为: $118.14^\circ\text{E}, 23.94^\circ\text{N}$; $118.32^\circ\text{E}, 23.76^\circ\text{N}$; $118.53^\circ\text{E}, 23.55^\circ\text{N}$)供进一步分析(图 1).

同期 QuikSCAT 风场 L3 级逐日数据(范围为图 1 中黑线虚线内海域)下载自 NASA 辖下 JPL 的 PO.DAAC. 对逐日风场资料进行空间和时间平均,得到逐月的平均风矢和逐月距平(相对平均周年变化之差值)风矢,并分解为与海流坐标一致的平均风速和逐月距平风速的顺岸、垂岸分量.

文中并引用了我们投放于海峡西侧沿岸由北向南的 B6, B1, B3, B2 4 个海床基 ADCP 测站的海流剖面数据(如图 1 五角星所示). 其中 B6 站的观测时段从

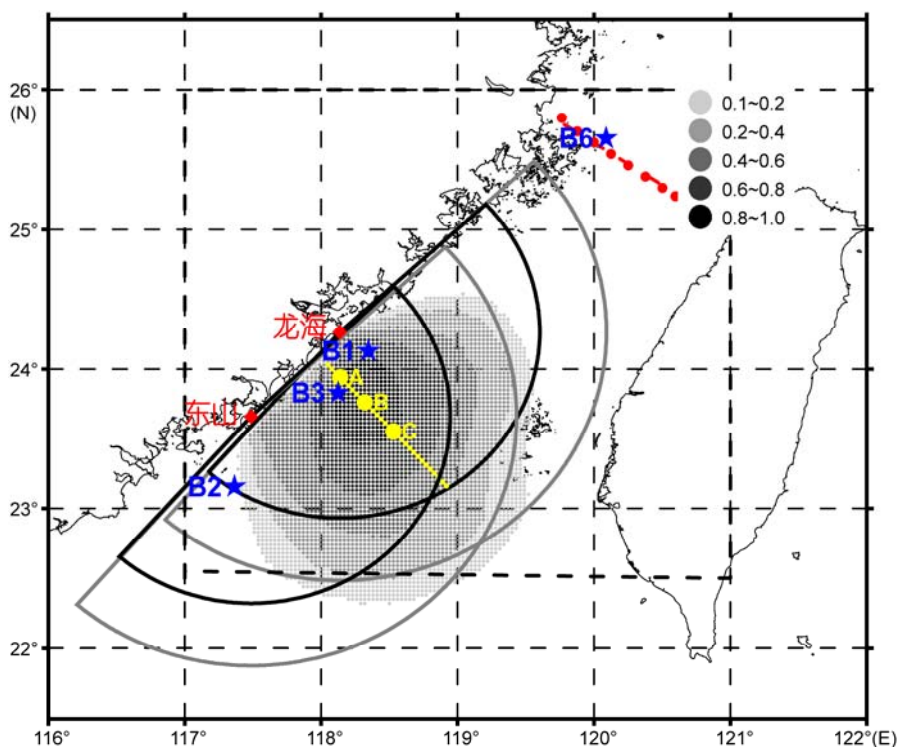


图 1 2008 年地波雷达格点数据有效率的空間分布

红菱形点为东山与龙海雷达站,灰线为 200 km 标称扇区,黑线为 150 km 有效扇区,黄色虚线和圆圈分别为龙海外垂岸断面以及 A, B, C, 3 点; B6, B1, B3, B2 为海床基 ADCP 测站,红色虚线和圆圈为 CTD 站断面和站点,黑色虚线为 QuikSCAT 风场资料范围

2007 年 12 月 1 日至 2008 年 3 月 31 日, B1 的观测时段从 2007 年 11 月 30 日至 2008 年 2 月 22 日, B3 站的观测时段从 2007 年 11 月 1 日至 2008 年 2 月 22 日, B2 的观测时段从 2007 年 12 月 11 日至 2008 年 3 月 26 日. 为对比年际差异并引用了 B6 站从 2007 年 2 月 5 日至 3 月 30 日的观测资料. 对各个锚系各层次的海流序列均如前进行质量控制、逐月平均和矢量分解.

2 结果与分析

2.1 表层流速时空变化

图 2 给出了 2006 年 1 月至 2009 年 4 月间龙海断面月平均流速顺岸与垂岸分量的时空演进图, 空白区域系有效采样不足所致. 从图 2 可以看出, 2007 年与 2008 年表层海流具有与 2006 年相似的周年变化特征^[7], 冬季的西南向顺岸流以及夏季的东北向流, 春季的较长过渡期与秋季流向的快速转变在图 2 中均有明显体现; 夏季垂岸分量流速虽然较小, 但各年夏季均与 2006 年类似, 可见表层海流的离岸趋势. 细致的对比还可以发现在不同年份间的明显差异, 2007 年夏季北向的顺岸分量偏弱, 而 2007/2008 冬季南向的顺岸分量偏强, 与 2006 和 2008 年同期有显著差别.

南向顺岸流的极值出现在 2007 年 11 月, 最大月平流速达 37.7 cm/s, 位于离岸大约 40 km 处. 除此之外, 离岸分量也可观察到一些年际差异, 2006 和 2007 年其年极值均出现在 7 月, 离岸流速约 10.0 cm/s, 而 2008 年则出现在 5 月, 近岸处离岸分量高达 14.0 cm/s.

2.2 顺岸风速与顺岸流速的关系

图 3 给出了 A~C 3 点 2006~2008 年各月月平均流速顺岸分量与顺岸风速的相关关系. 与此前对 2006 年观测结果的分析^[7]一致, 各点顺岸风与表层顺岸流均呈线性关系(表 1), 表明观测海域近表层流的季节变化主要受季风控制; 顺岸流速与顺岸风速的线性回归曲线纵轴上的截距均为正值, 表明台湾海峡西侧在海流的季节波动确实叠加于一支与终年存在的北向常流之上^[7]. 而由各格点的拟合曲线还可以看出回归曲线的截距随离岸距离的增加而逐渐增大, 表明北向常流在近岸流速较缓, 在水道中部较强. 由表 1 还可看出, 北向流的流速也存在明显的年际差异. 2006 年各格点的北向流流速在 8~12 cm/s 左右; 2007 年在 4~8 cm/s 之间, 约为 2006 年流速的 2/3; 2008 年则在 11~18 cm/s 之间, 大致是 2006 年的 1.5 倍. 总体来说, 2006 年的北向流强度近乎平均态, 2007 年偏弱,

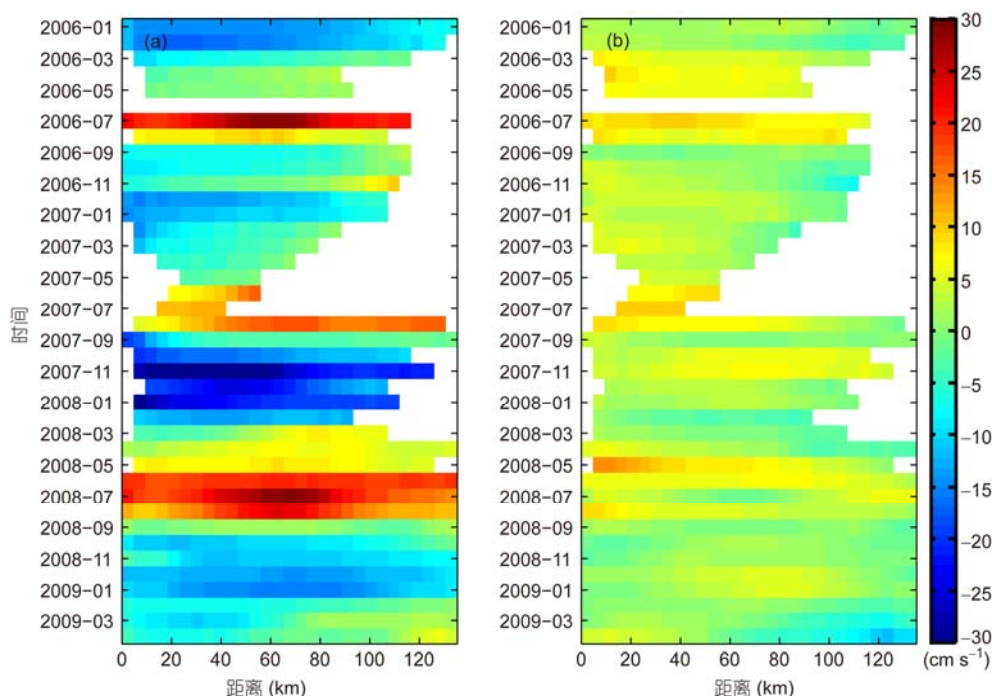


图 2 龙海外断面表层海流顺岸分量(a)和垂岸分量(b)时空演进(2006 年 1 月至 2009 年 4 月)

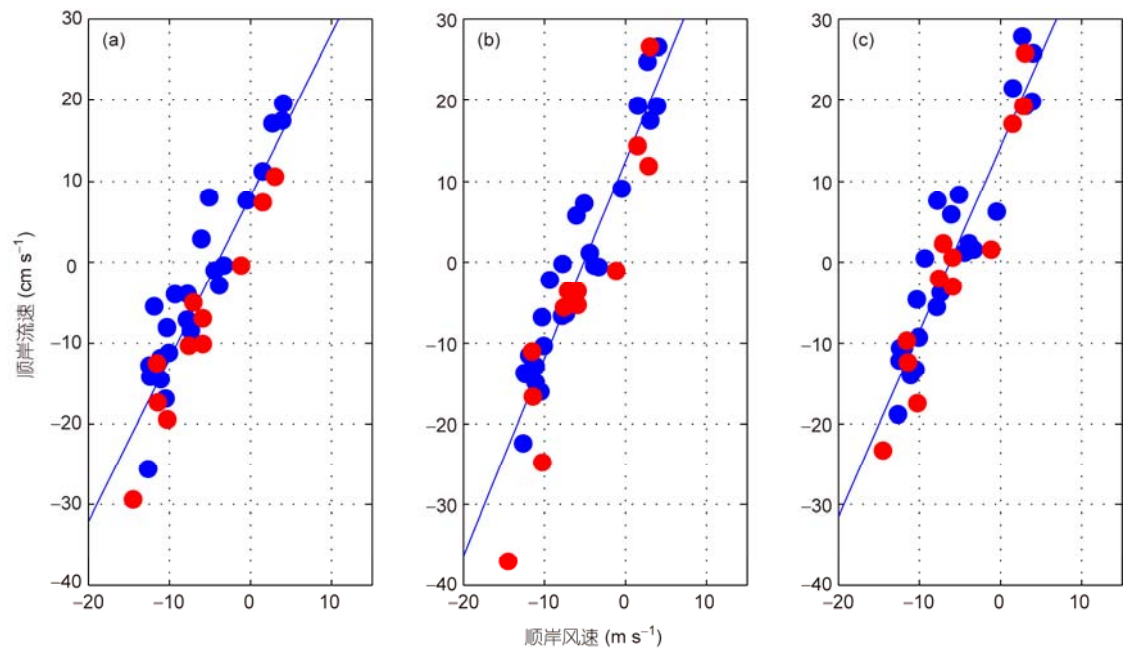


图 3 A(a), B(b), C(c) 3 格点月平均流顺岸分量与顺岸风速的相关关系
红色代表 2007 年测值

表 1 不同年份各格点顺岸风速与顺岸流速线性回归系数一览表^{a)}

年份	A 点			B 点			C 点		
	k	y_0	R^2	k	y_0	R^2	k	y_0	R^2
2006	1.98	8.5	0.90	2.26	12.0	0.88	2.01	11.6	0.85
2007	2.02	4.7	0.85	2.32	7.2	0.85	1.87	7.9	0.86
2008	2.02	11.1	0.85	2.44	15.4	0.94	2.44	17.2	0.90
全部	2.01	8.2	0.85	2.44	12.5	0.86	2.29	14.2	0.88

a) k , 斜率; y_0 , y 轴截距; R^2 , 决定系数; 全部为 2006~2008 年共计 36 个月, 决定系数均超过 99.9%置信度

2008 年超强. 从图 3 不难看出年际差异在冬季表现的尤其明显, 2007 年冬季实测最大月均南向流速达 37 cm/s, 2006 和 2008 年则分别只有 17 和 26 cm/s.

2.3 海流顺岸分量的剖面特征

连续 3 年多的雷达表层海流的观测揭示了 2007/2008 年冬季流场和往年的差异, 说明台湾海峡环流存在显著的年际变化. 有证据表明, 这种差异不仅限于表层, 而且贯通整个水柱.

图 4(a)~(d)给出 2007 年 12 月至 2008 年 2 月 B6, B1, B3, B2 四个海床基 ADCP 月平均海流顺岸分量剖面的变化, 各子图中的灰色区域代表偏北向流. 2007/2008 年冬季各海床基月平均流基本为南向流, 流速随观测深度增加而减弱. 仅海峡南部 B3 站(东山外)2007 年 12 月和 2008 年 2 月在 20 m 层以下, 以及

B2 站(汕头外)2007 年 12 月在 30 m 层以下观测到北向顺岸流. B3 的流速约 5 cm/s, B2 则不到 2 cm/s, 海峡西侧沿岸中下层没有出现一致的北向流动.

为比较年际差异, 图 4(e)给出 2007 年 2~3 月期间 B6 站的顺岸流剖面. 图 4(e)较明显的灰色区域表明 2007 年 2~3 月在 10~15 m 以浅深度为南向流, 而 15~20 m 以深则为北向流, 流速大约为 10 cm/s 左右, 与文献[8]相近. 该流速值是 2007/2008 年冬季的 2 倍左右, 与地波雷达观测所得到北向常流的差别比例一致. 显而易见, 台湾海峡西侧 2007/2008 年冬季的海流与 2006/2007 年冬季存在明显差异, 2007/2008 年间受上层强化的南向流的压制, 北向常流弱于往年.

2.4 水文特征年际差异分析

整体而言, 海峡西侧的海流可大抵归结为量级

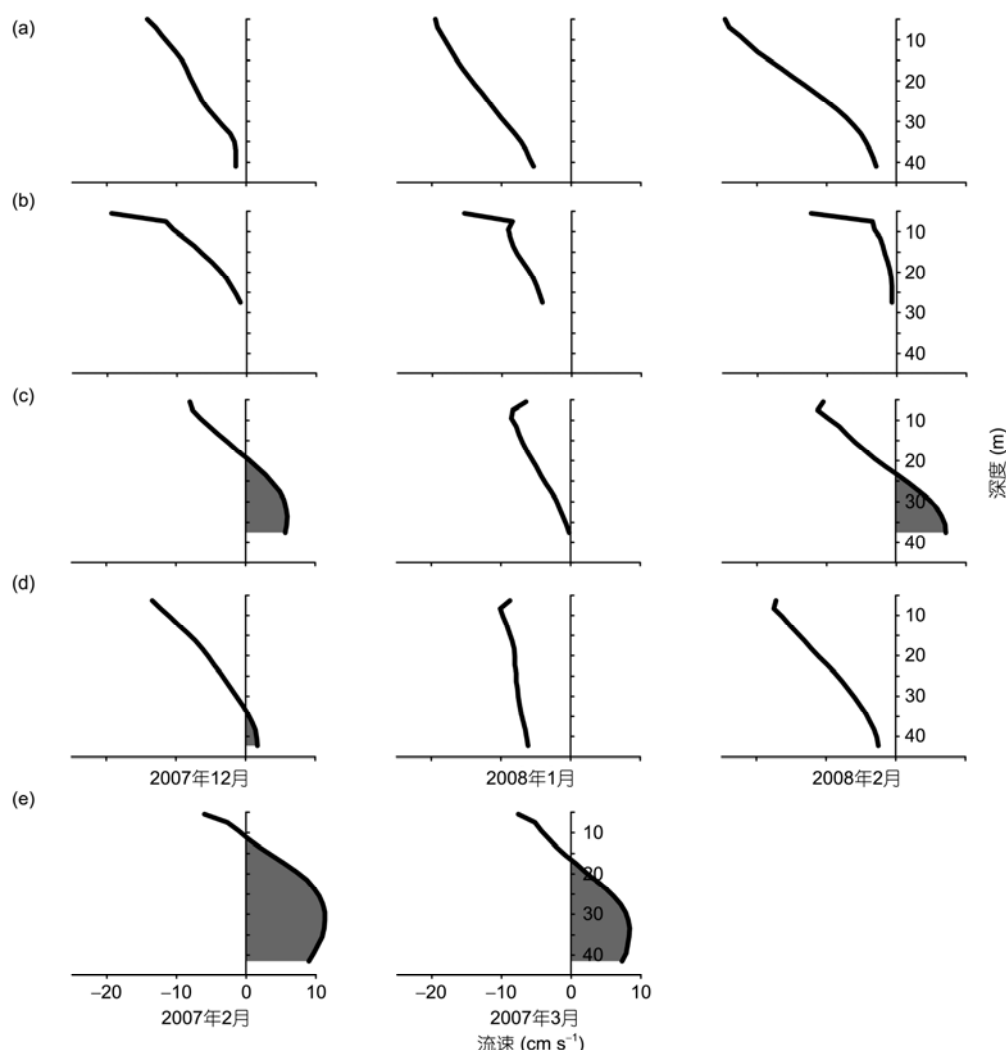


图 4 各海床基测站月平均顺岸流速剖面对比

(a) B6; (b) B1; (c) B3; (d) B2, 2007 年 12 月至 2008 年 2 月; (e) B6, 2007 年 2~3 月

约 10 cm/s 的北向常流和变化中的季节性风生沿岸流的叠加。然而，风的影响不仅限于近表层，而且可及整个水柱，这种变化也反映在海峡水体的层化状态上面，图 5 所示为 B6 附近(图 1 中虚线)CTD 断面在 2006/2007 年冬季(2007 年 1 月 6 日观测)与 2007/2008 年冬季(2007 年 12 月 12 日观测)的温度、盐度和密度分布。

2006/2007 年冬季断面的温度(图 5(a))主要是上下层的均匀分布，随着断面延伸而温度逐渐增加，在近岸存在着大约 13 左右的冷水核；2007/2008 年冬季断面的温度分布(图 5(b))主要为上层由相对下层和断面外缘明显偏冷，温度为 18 以下的海水所占据。盐度、密度具有与温度相类似的分布特征，2006/2007 年冬季的盐度(图 5(c))基本为垂向一致的分布特征，

2007/2008 年冬季(图 5(d))则在近岸区域由低于 31‰ 的海水控制，盐度跃层比较明显。总体来讲，2007/2008 年冬季的层化要比较明显，随着断面的延伸，温度、盐度和密度均逐渐增大。

从断面分布可以看出，2006/2007 年冬季的浙闽沿岸冷涌入有限，只局限在岸边区域，混合作用强于入侵冷水的平流效应，形成垂向均匀的水平分层特征。2007/2008 年冬季整个峡区几乎均呈垂向层化状态，在 30 m 层附近有跃层出现。32‰等盐线向东扩展到离岸 90 km 处，说明有大量低盐水从北面涌入至台湾海峡，沿岸冷低盐水扩展区域远大于 2006/2007 年冬季(离岸 50 km)。由于密度差异造成的浮力作用强于当地的混合作用，因而形成了垂向的层化分布特征。

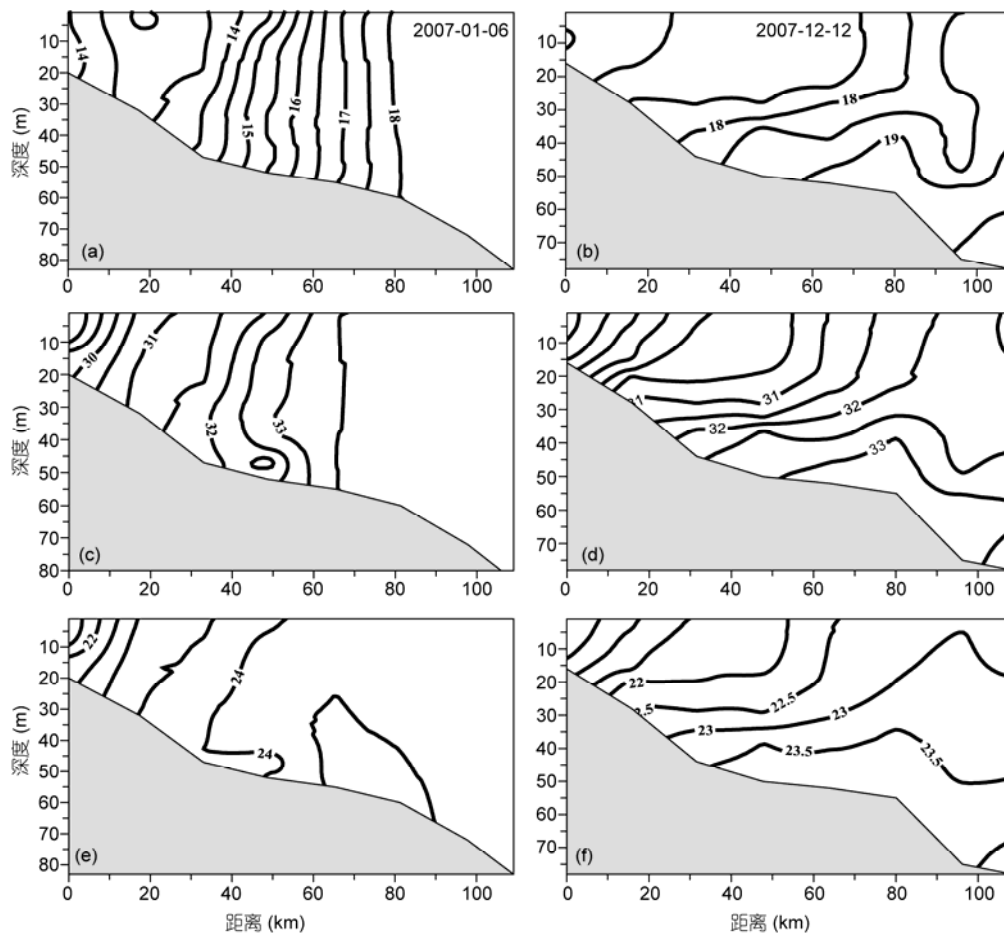


图 5 B6 站附近垂岸 CTD 断面 2006/2007 冬季((a), (c), (e))与 2007/2008((b), (d), (f))冬季温度、盐度、密度分布对比
(a), (b)为温度($^{\circ}\text{C}$); (c), (d)为盐度(‰); (e), (f)为密度(kg m^{-3})

以上分析说明 2007/2008 年冬季浙闽沿岸水要比 2006/2007 年冬季更强盛, 证实峡区海流确有明显的年际变化. 而且, 这种变化不仅局限于海峡西侧, 可能波及整个海峡. 值得注意的是, 尽管观测显示 2007/2008 年冬季南向顺岸流明显偏强, 北向流减弱, 而且波及整个水柱, 水文分布(特别在下层)并没有显示与之相应的斜压结构. 由此推测, 此刻峡区明显增强的南向流可能含有相当的正压成分或非地转分量, 从而波及底层.

2.5 2007/2008 年冬季 La Niña 事件的影响

NOAA 气候预测中心的分析表明 2007/2008 年冬季正值 La Niña 事件期间(www.cpc.ncep.noaa.gov), 东北季风在 La Niña 事件期间会有明显的增强^[14,16]. 由于海峡上层环流主要受季风控制, 上述 2007/2008 年冬季海峡西侧顺岸流和水文分布与往年同期的显

著差异应与 La Niña 事件期间台湾海峡风场的改变有关.

图 6(a)和(b)分别为地波雷达观测时段海峡 QuikSCAT 风场月平均顺岸分量及距平的时间序列, 表 2 给出了风场顺岸分量距平值. 可以看出台湾海峡风场的周年变化特征十分显著, 夏季 6~8 月为西南风, 顺岸风速一般不足 5 m/s, 冬季 11 月至翌年 2 月为东北风, 顺岸风速大约 10 m/s, 冬季东北季风明显强于夏季西南季风. 图 6(b)显示海峡的冬季风存在明显的年际变化, 其中 2007/2008 年冬季东北季风的负异常尤其显著, 与前后两年同期差异明显. 2007 年 11 月的冬季风场极强, 平均顺岸风速接近 14.0 m/s, 比 2006 和 2008 年同期分别高出 2.4 和 4.7 m/s, 2008 年 1, 2 月份顺岸风速也有类似的特征.

图 3 顺岸风速与顺岸流速的线性关系以及 2007/2008 年冬季季风的增强表明, La Niña 事件期间持续长

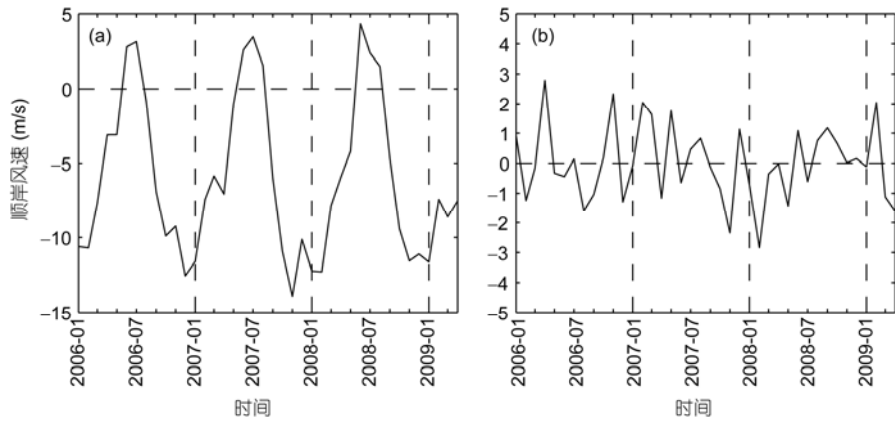


图 6 研究区域逐月平均风场的顺岸分量(a)与顺岸分量距平(b)的变化(m/s)

表 2 研究区域 2006 年 1 月至 2009 年 4 月风场顺岸分量距平值(m/s)

年份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2006	0.91	-1.24	-0.16	2.79	-0.33	-0.44	0.14	-1.59	-1.04	0.18	2.33	-1.29
2007	-0.08	2.04	1.64	-1.16	1.76	-0.64	0.47	0.83	-0.14	-0.85	-2.35	1.13
2008	-0.72	-2.84	-0.36	-0.02	-1.43	1.09	-0.61	0.76	1.18	0.67	0.02	0.16
2009	-0.12	2.04	-1.12	-1.61	-	-	-	-	-	-	-	-

时间的东北季风应是同期台湾海峡西侧的南向流增强的主要原因. 以表 2 中的 2008 年 2 月顺岸距平风速为例, 根据表 1 中顺岸风速和流速的线性关系, 持续较强的北风造成的月均南向流强于往年同期大约 5~7 cm/s, 因此大大削弱了向北的流动. 这一结论支持 Wu 等人^[14]关于台湾海峡对 ENSO 事件响应的模型研究结果, 台湾海峡流场的改变是由局地风场的改变所引起, 同时也是局部海域对大尺度气候事件如 ENSO 的响应. 这种变化还可能进一步导致台湾海峡生源要素的变化, 影响海峡生态^[15,16], 甚至造成生态灾难^[17,18].

3 总结

本文利用福建境内 OSMAR 地波雷达系统连续

40 个月的观测分析了台湾海峡南部浅滩以西海域表层海流的周年变化以及年际差异.

受季风的季节交替变化影响, 表层海流的周年变化显著, 顺岸的流速分量与风速分量的变化存在明显的线性关系, 在季节信号的背后存在一支大约 10 cm/s 量级的北向常流.

2006~2009 年的观测表明冬季(11 月至翌年 2 月)表层海流的年际差异明显, 2007/2008 年冬季南向顺岸分量明显强于其他年份. 海峡西侧沿岸的锚系海流剖面观测亦显示类似结果. 同期的水文观测表明闽浙沿岸水的大规模南侵是造成上述年际差异的直接原因, 其影响可波及整个水柱, 导致北向常流的变化.

2007/2008 年 La Niña 事件导致东亚冬季风的增强是造成研究海域流场年际变化的主要原因.

参考文献

1 Barrick D E, Evans M W, Weber B L. Ocean surface currents mapped by radar. Science, 1977, 198: 138-144

2 Paduan J D, Rosenfeld L K. Remotely sensed surface currents in Monterey Bay from shore based HF radar (CODAR). J Geophys Res, 1996, 101: 20669-20686

3 Bjorkstedt E, Roughgarden J. Larval transport and coastal upwelling: An application of HF radar in ecological research. Oceanography, 1997, 10: 64-67

4 吴雄斌, 杨绍麟, 程丰, 等. 高频地波雷达东海海洋表面矢量流探测试验. 地球物理学报, 2003, 46: 340-346

5 朱大勇, 邵浩, 李炎, 等. OSMAR 高频地波雷达福建示范系统径向流数据质量分析. 台湾海峡, 2007, 26: 7-15

- 6 朱大勇. 高频地波雷达在近海的应用——以台湾海峡为例. 博士学位论文. 厦门: 厦门大学, 2008
- 7 朱大勇, 李立, 李炎, 等. 台湾海峡西南部表层海流季节变化的地波雷达观测. 科学通报, 2008, 53: 1339–1344
- 8 Ninno H, Emery K O. Sediments of shallow portions of East China Sea and South China Sea. *Geol Soc Amer Bull*, 1961, 72: 731–762
- 9 Nitani H. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K, eds. *Kuroshio, Its Physical Aspects*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972. 129–163
- 10 Jan S, Wang J, Chern C S, et al. Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait. *J Mar Syst*, 2002, 35: 249–268
- 11 Hu J Y, Kawamura H, Li C Y, et al. Review on the current and seawater volume transport through the Taiwan Strait. *J Oceanogr*, 2010, 66: 591–610
- 12 陈剑桥. 2008 年冬季台湾海峡及其邻近海域 QuikSCAT 卫星遥感风场的检验及应用分析. 台湾海峡, 2011, 30: 158–164
- 13 Kuo N J, Ho C R. ENSO effect on the sea surface wind and sea surface temperature in the Taiwan Strait. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L13309, doi: 10.1029/2004GL020303
- 14 Wu C R, Chao S Y, Chun C. Transient, seasonal and interannual variability of the Taiwan Strait current. *J Oceanogr*, 2007, 63: 821–833
- 15 Shang S L, Zhang C Y, Hong H S, et al. Hydrographic and biological changes in the Taiwan Strait during the 1997–1998 El Niño winter. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L11601, doi: 10.1029/2005 GL022578
- 16 Chen C T A, Jan S, Huang T H, et al. Spring of no Kuroshio intrusion in the southern Taiwan Strait. *J Geophys Res*, 2010, 115: C08011, doi: 10.1029/2009JC005804
- 17 Hsieh H J, Chen C A. Tropical fishes killed by the cold. *Coral Reefs*, 2008, 27: 599
- 18 Liao E H, Jiang Y W, Li L, et al. The cause of the 2008 cold disaster in the Taiwan Strait. *Ocean Model*, 2013, 62: 1–10, doi: 10.1016/j.ocemod.2012.11.004