

北部湾春季季风转换时期两潜标站余流分析

刘天然¹, 魏皓^{2,1}, 赵亮¹, 原野¹, 刘志宇¹

(1. 中国海洋大学教育部物理海洋重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300222)

摘要: 2007年春季季风转换期间, 在北部湾湾口两站利用潜标观测获得了80余天的流速剖面等资料序列。结合NASA喷气推进实验室物理海洋学数据分发存档中心提供的QuikSCAT海表面风场数据, 以及NOAA国家气候数据中心提供的海表面温度数据, 利用交叉谱分析方法对观测期间两站余流结构及其影响因子进行分析。结果表明: 1) 春季季风转换时期, 北部湾风场北分量具有周期为10d左右的震荡。风的输运造成密度场结构出现相应的震荡, 从而会引起密度流的变化。2) M4站余流主要由风场控制, 水体向北部湾内输运。3) M5站表底层余流差距较大, 整层余流均受到了风的直接影响, 而表层还受到了由风引起的密度流变化的影响, 因此风通过两种方式影响了M5站的余流。

关键词: 北部湾; 季风转换时期; 余流

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)03-0010-07

Analysis of residual current during spring monsoon transition in the Beibu Gulf

LIU Tian-ran¹, WEI Hao^{2,1}, ZHAO Liang¹, YUAN Ye¹, LIU Zhi-yu¹

(1. Key Lab of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Current profile data of about 80 days were obtained by the submersible buoy measurement at two stations at the mouth of the Beibu Gulf during the spring monsoon transition in 2007. Using cross spectrum analysis, the structure of residual currents and the factors that influence the structure are analyzed, with the addition of QuikSCAT sea-surface wind data obtained from NASA Jet Propulsion Laboratory Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, and sea-surface temperature data provided by NOAA National Climatic Data Center. The results are as follows. The northward component of the wind had oscillations with a period about 10 days during spring monsoon transition in the Beibu Gulf. The wind could generate the oscillation of the density field, which could lead to the variation of density current. The residual currents at Station M4 were mainly controlled by wind. Water at Station M4 was transported into the Beibu Gulf. The residual currents at Station M5 were very different between surface and bottom. The whole water column was affected directly by wind, while the surface layer was also affected by the variation of density current controlled by wind. So wind affected residual currents in two ways at Station M5.

Key words: Beibu Gulf; period of monsoon transition; residual current

北部湾位于我国南海西北部, 是一个半封闭的大海湾。东临我国的雷州半岛和海南岛, 北临我国广西壮族自治区, 西临越南, 南与南海相连。北部湾地处热带和亚热带, 光照充足, 雨量充沛, 热带气旋频繁。冬季受大陆冷空气的影响, 多东北风, 夏季

多西南风。随着沿岸工业的发展和人口的增加, 工业污水和生活废水的排放严重威胁着北部湾的渔业资源。研究北部湾流场及其季节变化, 有助于了解污染物的扩散路径, 从而对预防和治理污染起到指导作用。

收稿日期: 2008-11-26; 修订日期: 2009-02-23。孙淑杰编辑

基金项目: 国家908专项(908-01-ST09)

作者简介: 刘天然(1985—), 男, 山东省济南市人, 硕士研究生, 从事浅海动力学的研究。E-mail: ltrxy@163.com

北部湾流场的研究由来已久,中越合作北部湾海洋综合调查报告^[1]指出,夏季北部湾存在一个顺时针环流,而冬季则形成一个逆时针环流。袁叔尧等^[2]模拟了北部湾冬夏三维环流场,其结果支持传统观点。孙洪亮等^[3]基于二阶湍流闭合模型计算涡动黏性系数的 POM 三维水动力模式,诊断计算并获得了北部湾三维潮致-风生-热盐余流,结果表明风生流较强,占主要成分,其次是热盐余流和潮致余流,流场冬逆夏顺,与传统观点相符;而杨士瑛等^[4]利用漂流瓶观测发现北部湾夏季环流具有气旋式结构,即逆时针旋转的,与传统观点相反。夏华永等^[5]将 Casulli 差分格式引入三维物理海洋模型计算,模拟了北部湾风生流及密度流;其冬季环流场模拟结果与传统观点相符,而夏季西南季风导致顺时针环流,海水密度梯度则导致逆时针环流,并且密度流明显强于风生流,因此夏季仍为逆时针环流,与传统观点不同;他们还指出风造成的水体在湾顶的堆积会导致表层与底层余流流向具有较大差异,甚至相反。Wu 等^[6]利用数值模拟证明了夏季北部湾保持气旋式环流的原因是位势涡度通过琼州海峡向湾内输入造成的。另外, Ju 等^[7]利用船载 ADCP 对北部湾的斜压潮流的性质进行了研究,分析了其随水深的变化规律。

北部湾流场以往的观测与模拟^[2-7]大多是在冬季与夏季季风较稳定条件下进行的,而针对北部湾春、秋季季风转换时期的环流场特点的研究还不多见。本文通过分析春季北部湾湾口两测站锚系潜标多普勒流速剖面仪(ADCP)的观测资料,并结合 NASA 喷气推进实验室物理海洋学数据分发存档中心提供的 QuikSCAT 海表面风场数据以及 NOAA 国家气候数据中心提供的海表面温度数据,研究北部湾春季季风转换时期流场的特点及其影响因素。

1 数据获取

本课题组在北部湾湾口 M4 站(莺歌海以南, 108°39'E、18°20'N, 2007 年 2 月 28 日 11 时至 2007 年 5 月 21 日 11 时)、M5 站(三亚西南, 109°00'E、18°04'N, 2007 年 2 月 28 日 14 时至 2007 年 5 月 21 日 15 时)设置了座底锚系潜标,对流速和水位实施了持续 80 余天的潜标观测。M4 站与 M5 站的位置如图 1 所示。

600kHz RD-ADCP 采用“upward looking”的观测方式,层厚设置为 1m,声学换能器探头距底 1m。采样间隔设置为 10min,数据以地球坐标系的形式记

录下来。M4 站 ADCP 观测 1 个月后因不明原因质量较差,因此只对其第一个月(2007 年 2 月 28 日 12 时至 3 月 31 日 12 时)的数据进行分析。同时在潜标上布放了 RBR420TD 温深仪,10min 采样一次,记录潮位的变化。M4 站温深仪丢失,采用该站 ADCP 自带压力探头的记录分析潮位变化。观测期间 M4 站水深变化范围为 28.5—30.2m,平均 29m,去除表底盲区,有效观测范围为底上 3—27m(水下 2—26m);M5 站水深变化范围为 39.0—40.8m,平均 40m,有效观测范围为底上 3—36m(水下 4—37m)。

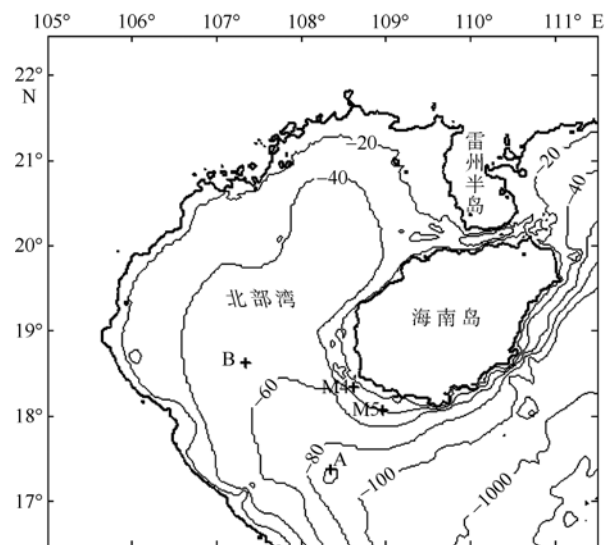


图 1 海底地形(等值线单位: m)与定点观测站位

Fig. 1 Topography (contour; units: m) and mooring stations

2 观测期间天气与水文概况

2.1 海面风场

中国近海及其邻近地区是季风盛行的地区之一。冬季,亚洲大陆处于蒙古高压控制之下,干冷空气沿蒙古高压的边缘自北向南,由大陆流向海洋,气流呈顺时针方向偏转,这种高压前缘的偏北风就成为亚洲东部的冬季风^[8]。夏季,亚洲大陆被热低压控制,中国近海处在亚洲热低压的南缘和东缘;同时,太平洋副热带高压西伸北进,在高、低压之间的偏南风,就构成了亚洲东部的夏季风^[9]。

朱伟军等^[10]的研究结果表明,低层南海季风明显存在 4 个阶段的季节循环,即冬季东北风盛行阶段、1 月底至 4 月中旬的东南风过渡阶段、夏季强盛的西南风阶段和 10 月初至 11 月初的另一东南风过渡阶段。

海表面风场采用 NASA 喷气推进实验室物理海

洋学数据分发存档中心提供的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 QuikSCAT 海表面风场数据。图 2 所示的 M4 与 M5 站海表面风矢量时间序列, 分别采用了距 M4 与 M5 站最近的 QuikSCAT 海表面风场格点处的时间序列。其中 M4 站 ($108^\circ 39'E$ 、 $18^\circ 20'N$) 采用 $108^\circ 45'E$ 、 $18^\circ 15'N$ 处格点的时间序列, M5 站 ($109^\circ 00'E$ 、 $18^\circ 04'N$) 采用 $109^\circ 00'E$ 、 $18^\circ 00'N$ 处格点的时间序列。虚框中是 ADCP 观测期间的海表面风矢量时间序列。

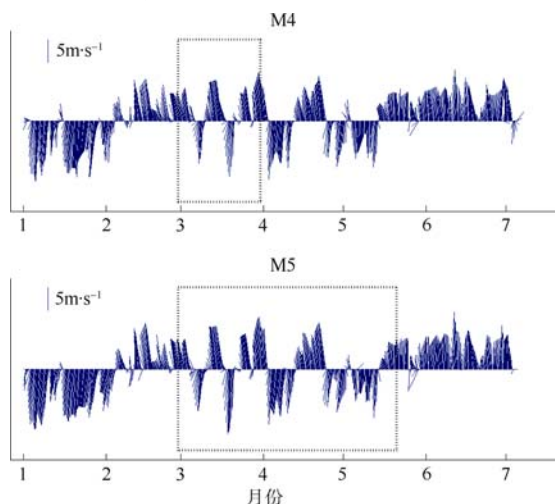


图 2 M4、M5 站 2007 年 1 月到 7 月风矢量(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 2 Wind vectors (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) from January to July 2007 at stations M4 and M5

图 2 反映出季风的转换过程。冬季以强劲北风为主, 而夏季则以南风为主。春季是季风的过渡时期, 北风分量变化较为剧烈, 并表现出一定的周期性。2 月 10 日之前表现为冬季风, 5 月 12 日之后表现为夏季风, 2 月 11 日至 5 月 11 日为冬夏季风过渡时期。其中, 2 月 11 日至 3 月 4 日、3 月 12 日至 3 月 18 日、3 月 23 日至 3 月 27 日、3 月 28 日至 4 月 2 日、4 月 12 日至 4 月 23 日、5 月 1 日至 5 月 3 日为南风, 其余时间为短暂的北风过程。5 月中旬之后, 夏季风盛行, 风向逐渐稳定。

南海表层流受制于风场变化, 属于风海流性质; 季风过渡季节流向不稳定^[11]。季风转换期, 南海海流主要受前季遗留下来的流况控制, 但随季风更替的进程, 流场迅速发生变化^[12]。因此季风转换会对北部湾流场产生影响, 形成冬夏流场过渡时期的振荡。

2.2 海表面温度

3 月 11 日至 16 日北部湾持续 5 天较强南风, 17 日南风减弱, 自 18 日开始刮起北风。图 3 所示为 3 月 15 日至 3 月 22 日北部湾海表面温度场。海表面

温度采用 NOAA 国家气候数据中心提供的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的海表面温度数据。

如图 3 所示, 北部湾海表面温度分布基本上呈现出南高北低的格局, 有一个由外海伸向湾内的暖水舌。北风作用下, 雷州半岛东侧冷水范围逐渐扩大, 向海南岛东侧延伸, 至 20 日该冷水将伸入北部湾的暖水舌切断, 海南岛南部海域逐渐出现了一个东北-西南走向的冷水带, 这可能是由于海南岛东北部海域冷水随风南下的结果。因此, 风场由南风转为北风使北部湾海表面温度场也出现了相应的变化。

春季北部湾由于沿岸浅海升温迅速, 在其北部海域形成一个闭合冷中心, 此时温度锋最强, 因而风应力不是形成温度锋的主导因素^[13]。Wang 等^[14]对南海北部海域温度锋进行了研究, 表明不同的海区温度锋的产生机制不同。王磊等^[15]对南海北部陆架海表层温度锋的研究表明, 东北风驱动闽浙沿岸冷水南下, 因此风的强弱会对温度锋的强度产生影响。Hu 等^[16]利用了一个三维数值模式对海南岛周围的潮汐锋进行了研究, 证明了季风、太阳辐射等在锋的季节变化中起到了重要作用。本次观测得出春季风场的变化可以造成北部湾湾口附近海表面温度场相应变化的结论, 这一特点会造成冷水带附近海域密度流随风场发生较大变化, 从而可能对北部湾余流场产生一定的影响。

3 余流分析

对 M4 站 2007 年 2 月 28 日 12 时至 3 月 31 日 12 时共 31 d 以及 M5 站 2007 年 3 月 2 日 0 时至 5 月 21 日 0 时共 80 d 的 ADCP 流速资料, 利用二阶 Butterworth 低通滤波器^[17]滤除周期小于 2 d 的信号后, 得到的余流包含风生余流、潮致余流及密度流等。

表 1、2 列出了 M4 与 M5 站余流东分量与北分量的均值、标准差、最小值、最大值以及余流流速大小和流向。由表可知, M4 站余流流速随水深增加逐渐减小, 流向顺时针旋转, 类似 Ekman 漂流; 整层平均流速约为 $3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为北偏东 19° 。M4 站受风的影响较大, 由于水深较浅, 其影响可以传至海底。水体输运方向大体与风向垂直, 具有 Ekman 漂流的特点。M4 站在春季冬夏季风转换时期水体向北部湾内输运。M5 站余流流速随水深增加逐渐减小, 流向逆时针旋转。在近底层(距底高度 5—6m)处流速略微增大, 流向与表层相反。

图 3 2007 年 3 月 15 日至 3 月 22 日北部湾海表面温度(阴影; 单位:)与海表面风矢量(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Fig. 3 Sea-surface temperature (shaded; units:) and sea-surface wind vectors (units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in the Beibu Gulf from March 15th 2007 to March 22nd 2007

表 1 M4 站余流统计资料

Tab. 1 Statistics of residual currents (units: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) at Station M4

水深 h/m	东分量				北分量				流速 \bar{S}_p	流向 $^\circ$
	均值 \bar{u}	标准差 σ_u	最小值 u_{\min}	最大值 u_{\max}	均值 \bar{v}	标准差 σ_v	最小值 v_{\min}	最大值 v_{\max}		
2	-3.0	2.6	-7.8	3.8	3.6	3.0	-3.7	7.7	4.7	320
7	-0.4	2.6	-7.0	5.1	2.6	2.6	-4.2	6.0	2.6	352
12	1.1	2.8	-6.6	6.0	2.5	2.5	-3.4	5.7	2.8	23
17	2.0	3.0	-6.1	6.1	2.4	2.4	-2.9	5.4	3.1	40
22	2.1	2.8	-4.9	6.2	2.3	2.2	-3.7	5.9	3.1	42
26	2.4	1.6	-0.3	5.4	2.5	1.6	-0.3	5.8	3.5	42

表 2 M5 站余流统计资料

Tab. 2 Statistics of residual currents (units: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) at Station M5

水深 h/m	东分量				北分量				流速 \bar{S}_p	流向 $^\circ$
	均值 \bar{u}	标准差 σ_u	最小值 u_{\min}	最大值 u_{\max}	均值 \bar{v}	标准差 σ_v	最小值 v_{\min}	最大值 v_{\max}		
4	-5.5	6.3	-15.7	10.2	-0.8	3.6	-9.5	10.4	5.5	261
8	-2.9	5.4	-13.9	11.8	-1.1	3.6	-9.1	9.4	3.1	250
13	-1.0	5.5	-12.5	11.7	-1.3	2.6	-6.2	7.4	1.6	218
18	0.5	5.3	-11.9	12.7	-1.2	2.0	-5.5	5.5	1.3	156
23	1.3	5.3	-11.7	13.0	-0.5	1.8	-4.2	3.8	1.4	110
28	1.4	5.0	-11.6	12.4	0.3	1.9	-3.6	4.7	1.4	76
33	1.8	4.0	-7.1	10.4	1.2	1.7	-2.2	5.5	2.2	56
37	0.5	3.1	-8.4	6.8	0.6	1.5	-3.7	3.8	0.7	42

4 讨论

4.1 风生余流

如图 4a、b 分别为观测期间 M4 站与 M5 站海表面风矢量与余流。由图 4a 可知, M4 站各层余流流速大小基本一致, 底层略小于表层。随水深增加余流流向顺时针旋转, 具有 Ekman 漂流的特点。风较强时余流加强, 风较弱时余流减弱, 风转换方向时余流也转换方向, 对风的响应非常迅速。图 4a 还表明, M4 站余流随时间的变化滞后于风的变化, 各层余流表现出随水深增加逐渐滞后的规律, 说明风变化的信号由表层逐渐传至底层, 风是 M4 站余流的主要影响因素。M4 站余流斜压性较小, 这是由于 M4 站水深较浅的缘故。

由图 4b 可知, M5 站余流具有较强的斜压性, 其中近表层与近底层的余流流速较大, 并出现方向相反的现象。近底层余流随时间的变化与风基本一致, 而近表层余流却出现与风向相反的现象, 形成逆风流。这说明 M5 站余流受到了风的影响, 而近表层余流还受到了其他因素的影响。

4.2 交叉谱分析

为了进一步分析 M5 站余流的影响因素, 计算 M5 站表底层余流与海表面风场等的交叉谱^[18]。其中表层采用水深约 8m 处的余流, 底层采用水深约 26m 处的余流。M5 站海表面风场采用 NASA 喷气推进实验室物理海洋学数据分发存档中心提供的

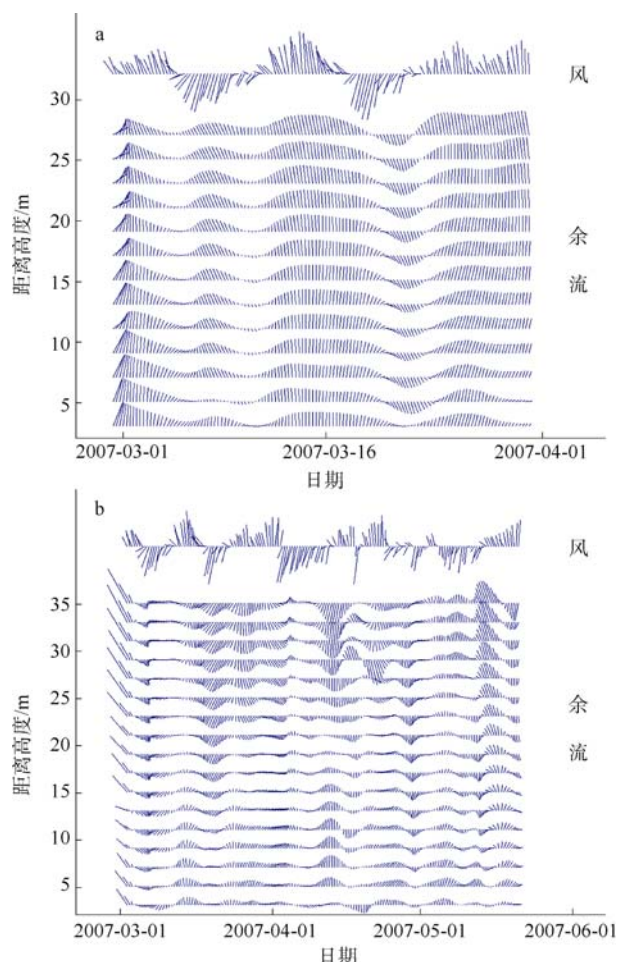


图 4 M4 站(a)和 M5 站(b)海表面风矢量与余流矢量

Fig. 4 Sea-surface wind vectors and residual current vectors at stations M4 (a) and M5 (b)

QuikSCAT 海表面风场 109°00'E、18°00'N 格点处的时间序列。

表 3 所示为 M5 站近底层余流北分量与海表面风北分量交叉谱的分析结果。通过 0.05 信度的 F 检验的临界值是 3.81, 因此周期为 10—13.3d、5.7d 和 3.3d 的振荡是显著的。其中 10d 与 13.3d 的振荡反映了季风过渡时期海表面风北分量的振荡对 M5 站近底层余流的作用。10d 和 13.3d 的振荡对应的协谱值分别是 0.141 和 0.101, 对应的落后长度谱值分别是 2.0d 和 0.3d, 表明 M5 站近底层余流的变化落后于海表面风的变化, 因此风是 M5 站近底层余流的主导因素。

表 3 M5 站近底层余流北分量与海表面风北分量交叉谱分析结果

Tab. 3 Cross spectrum analysis results between the northward component of near-bottom residual current at Station M5 and the northward component of sea-surface wind

周期/d	协谱	正交谱	落后长度谱/d	凝聚谱	F
	0.006	0.000	—	—	—
40.0	0.025	0.022	18.3	0.076	0.54
20.0	0.082	0.044	6.3	0.312	2.95
13.3	0.141	0.034	2.0	0.451	5.33
10.0	0.101	0.004	0.3	0.424	4.78
8.0	0.018	0.008	2.1	0.068	0.47
6.7	-0.013	0.019	-4.2	0.285	2.59
5.7	-0.022	0.007	-1.1	0.372	3.84
5.0	-0.018	0.000	-0.1	0.291	2.66
4.4	-0.002	-0.001	0.8	0.015	0.10
4.0	0.001	-0.001	-1.3	0.014	0.09
3.6	0.001	0.003	2.8	0.192	1.55
3.3	0.001	0.002	2.7	0.620	10.60
3.1	-0.001	0.000	-0.6	0.132	0.99
2.9	-0.002	-0.001	0.8	0.198	1.60
2.7	-0.001	0.000	0.8	0.055	0.38
2.0	0.000	0.000	1.9	0.023	0.16
1.0	0.000	0.000	-0.5	0.219	1.83
0.5	0.000	0.000	—	—	—

表 4 所示为 M5 站近表层余流北分量与海表面风北分量交叉谱的分析结果。通过 0.05 信度的 F 检验的临界值是 3.81, 因此仅有周期为 3.3d 的振荡是显著的, 其对应的落后长度谱值是 3.2d, 凝聚谱值是 0.557。说明 M5 站近表层余流对风场的响应规律反而不及近底层余流的明显。

2.2 节中曾猜想冷水带附近海域的密度流随风场发生较大变化, 从而可能对北部湾余流场产生一

定的影响。下文将利用交叉谱分析方法探讨风场变化间接产生的密度流对余流的影响。由于密度流难以直接观测, 取北部湾内两点的海表面温度差来间接地反映密度流。选用的 A(108°23'E, 18°23'N)、B(108°23'E, 18°38'N)两点位置在图 1 中标出。

表 4 M5 站近表层余流北分量与海表面风北分量交叉谱分析结果

Tab. 4 Cross spectrum analysis results between the northward component of near-surface residual current at Station M5 and the northward component of sea-surface wind

周期/d	协谱	正交谱	落后长度谱/d	凝聚谱	F
	-0.050	0.000	—	—	—
40.0	-0.075	0.028	-9.0	0.172	1.35
20.0	-0.017	-0.015	9.2	0.015	0.10
13.3	-0.001	0.009	-12.6	0.004	0.02
10.0	-0.019	0.034	-6.8	0.133	1.00
8.0	-0.015	-0.001	0.4	0.038	0.25
6.7	-0.010	-0.009	3.1	0.081	0.57
5.7	-0.006	-0.003	1.4	0.050	0.34
5.0	-0.003	-0.006	3.5	0.104	0.75
4.4	-0.002	-0.002	1.9	0.057	0.39
4.0	-0.001	0.001	-2.3	0.029	0.19
3.6	0.001	0.002	2.6	0.162	1.25
3.3	0.000	0.003	3.2	0.557	8.16
3.1	-0.001	0.001	-1.3	0.222	1.86
2.9	-0.002	0.000	-0.2	0.122	0.90
2.7	-0.000	0.000	-0.2	0.013	0.08
2.0	0.000	0.000	-0.9	0.031	0.21
1.0	0.000	0.000	-0.8	0.169	1.32
0.5	0.000	0.000	—	—	—

表 5 所示为 M5 站近表层余流北分量与 A、B 两点海表面温度差交叉谱的分析结果。通过 0.05 信度的 F 检验的临界值是 3.81, 因此周期为 40d 和 5d 的振荡是显著的, 其对应的落后长度谱值分别是 6.2 和 1.4d, 凝聚谱值分别是 0.731 和 0.537。出现周期为 40d 的振荡可能是由于观测期间北部湾海域逐渐升温造成的, 周期为 5d 的振荡表明密度流的确对 M5 站近表层余流造成了影响, 且响应时间大约是 1.4d。

综上所述, 海表面风通过两种方式控制了 M5 站的余流。一种是风应力的直接作用, 这与 M4 站相同; 另一种是间接作用, 由风的输运引起了水体密度的变化, 生成的密度流影响了 M5 站的表层余流。可见, 北部湾余流场在季风转换期间由变化的风场控制, 但在不同的地区响应的机制有差别。

表 5 M5 站近表层余流北分量与 A、B 两点海表面温度差的交叉谱分析结果

Tab. 5 Cross spectrum analysis results between the northward component of near-surface residual current at Station M5 and the difference of sea-surface temperature between points A and B (marked in Fig. 1)

周期/d	协谱	正交谱	落后长度谱/d	凝聚谱	F
	0.139	0.000	—	—	—
40.0	0.212	0.052	6.2	0.731	17.62
20.0	0.080	0.019	2.9	0.285	2.59
13.3	0.018	-0.022	-7.6	0.116	0.85
10.0	0.040	-0.018	-2.7	0.241	3.36
8.0	0.044	0.002	0.2	0.264	2.33
6.7	0.016	0.009	2.2	0.077	0.54
5.7	-0.006	-0.001	0.6	0.037	0.25
5.0	-0.011	-0.005	1.4	0.537	7.52
4.4	-0.004	-0.005	2.3	0.285	2.59
4.0	0.000	-0.005	-3.9	0.228	1.92
3.6	0.001	-0.002	-2.5	0.078	0.55
3.3	0.001	0.000	0.2	0.045	0.31
3.1	0.000	0.000	2.5	0.011	0.07
2.9	0.000	0.000	2.5	0.002	0.01
2.7	0.000	0.001	2.3	0.024	0.16
2.0	0.001	0.001	0.9	0.252	2.18
1.0	0.000	0.000	-0.2	-0.084	-0.43
0.5	0.000	0.000	—	—	—

5 结论

本文通过分析北部湾湾口 M4 与 M5 两测站

ADCP 约 80d 的流速剖面观测资料, 以及 RBR420TD 温深仪和 ADCP 自带压力探头得到的水位资料, 计算了两站潮汐调和常数和潮流椭圆要素。利用二阶 Butterworth 低通滤波器滤除高频信号后获得两站余流场剖面时间序列。结合 NASA 提供的 QuikSCAT 海表面风场和 NOAA 提供的海表面温度资料, 利用交叉谱分析方法对两站余流特点及影响因子进行分析, 得出如下结论。

1) 春季季风转换时期, 北部湾风场北分量具有周期为 10d 左右的震荡。风的输运造成密度场结构出现相应的震荡, 从而会引起密度流的变化。

2) M4 站余流主要由风场控制, 整层流场比较一致, 斜压性较小。水体在观测期间向北部湾内输运。

3) M5 站表底层余流差距较大, 斜压性较大。整层余流均受到了风的直接影响, 而表层还受到了由风引起的密度流变化的影响, 因此风通过两种方式影响了 M5 站的余流。

今后还有待于对整个北部湾水文要素的大面变化给出全面分析, 对影响 M5 站余流的其他因素进行研究, 以完整地揭示北部湾在春季冬夏季风转换时期余流的特点和与南海的水交换。另外, 还需要对北部湾其他地点进行类似的观测, 收集更多数据, 从而加深对北部湾季风转换时期环流场的认识。

参考文献

- [1] 中国大百科全书总编辑委员会大气、海洋、水文科学卷编辑委员会. 中国大百科全书(大气科学、海洋科学、水文科学)[M]. 北京:中国大百科全书出版社, 1987: 17-18.
- [2] 袁叔尧, 邓九仔. 北部湾环流数值研究[J]. 南海研究与开发, 1999, 2: 41-46.
- [3] 孙洪亮, 黄卫民, 赵俊生. 北部湾潮致、风生和热盐余流的三维数值计算[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(5): 561-568.
- [4] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 1-8.
- [5] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 11-23.
- [6] WU D, WANG Y, LIN X, et al. On the mechanism of the cyclonic circulation in the Gulf of Tonkin in the summer[J]. J Geophys Res, 2008, 113(C9): doi: 10.1029/2007JC004208.
- [7] CHEN J, WANG D, SHI P, et al. A survey of baroclinic tides in the Beibu Gulf in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 26(4): 7-19.
- [8] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 64-72.
- [9] 李克让. 中国近海及西北太平洋气候[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [10] 朱伟军, 孙照渤, 齐卫宁. 南海季风爆发及其环流特征[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(4): 440-446.
- [11] 俞慕耕, 刘金芳. 南海海流系统与环流形式[J]. 海洋预报, 1993, 10(2): 13-17.
- [12] 杨阳, 周伟东, 董丹鹏. 南海上层环流季节变化的诊断计算[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(4): 8-14.
- [13] 罗琳, 王东晓, 刘赞, 等. 北部湾温度锋的季节与年际变化[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(4): 60-67.
- [14] WANG D, LIU Y, QI Y, et al. Seasonal variability of thermal fronts in the northern South China Sea from satellite data[J]. Geophysical Research Letter, 2001, 28(20): 3963-3966.
- [15] 王磊, 王丽娅, 魏皓. 利用卫星遥感资料对南海北部陆架海洋表层温度锋的分析[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(3): 351-357.
- [16] HU J Y, KAWAMURA H, TANG D L. Tidal front around the Hainan Island, northwest of the South China Sea[J]. J Geophys Res, 2003, 108(C11): doi: 10.1029/2003JC001883..
- [17] BUTTERWORTH S. On the theory of filter amplifiers[J]. Experimental Wireless and the Wireless Engineer, 1930, 7: 536-541.
- [18] 黄嘉佑. 气象统计分析和预报[M]. 北京: 气象出版社, 2000.