

黄海暖流的路径及机制研究

赵胜^{1,2}, 于非³, 刁新源³, 司广成³

(1. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 利用 NASA/AVHRR 反演的每日海表面温度资料, 法国航天局 AVISO 发布的海表面高度资料, 中国气象科学数据共享服务网成山头台站的日均风场资料, 首先对黄海海表面温度分布进行了分析, 揭示了表征黄海暖流的暖水舌存在两个分支。然后对 1981 年 10 月~2010 年 5 月这两个分支发生情况进行了统计, 得出两个分支并不是个别年份所特有的, 而是具有一定的普遍性。最后通过相关性分析, 并结合黄海不同区域海表面高度的相对变化, 认为西北向分支、北向分支, 是通过风生增减水引起海表面高度局部差异来提供驱动力的, 具有补偿性质。

关键词: 黄海暖流分支; 海表面温度; 海表面高度; 风场; 补偿

中图分类号: P731.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2011)11-0073-08

黄海为一半封闭的陆架浅海, 东、西分别有朝鲜半岛和山东半岛围绕, 北接渤海, 南邻东海。水深由西北向东南逐渐变深, 在 $34^{\circ} \sim 38^{\circ}\text{N}$, $124^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$ 有一东南西北走向的黄海槽, 水深在 70~100 m 之间。黄海西侧是比较广阔的浅滩地形, 东侧是陡峭的斜坡^[1]。由于受西伯利亚和极地冷空气的影响, 黄海区域在冬半年盛行偏北风。黄海存在一支从济州岛西南部进入, 具有高温高盐特性, 对黄海的水体交换和海区环境有着重要影响的海水运动, 这就是黄海暖流。鉴于黄海暖流的重要性, 国内外海洋学者对它做了大量的研究工作。对于黄海暖流的路径, 在 20 世纪 30 年代, 宇田道隆^[2]基于水文观测和漂流瓶运移轨迹资料, 编绘了渤、黄、东海, 日本海及黑潮流域的海流分布与环流模式, 显示黄海暖流是从济州岛西南海域对马暖流分离出来并沿黄海槽北上。毛汉礼等^[3]以高温高盐水舌作为黄海暖流运行方向的指标, 认为其主轴大致位于 123°E 附近的黄海槽西侧。20 世纪 80 年代以后, 随着海洋调查的发展及数值模式的应用, 又有新的发现, 乐肯堂^[4]利用中美联合调查资料分析得出黄海暖流进入南黄海后呈现出双峰特征, 在大约 34°N 附近, 表层黄海暖流可能分为两支, 一支大约沿黄海槽位置北上, 另一只折向西北, 然后沿 $123^{\circ}30'\text{E}$ 向北运行。郭炳火^[5]指出, 冬季黄海暖流的流轴并非沿黄海深槽北上, 而是偏西到 50 m 等深线, 地形较陡的位置北上。汤毓祥^[6-7]同时指出, 黄海暖流的路径并不是固定不变的, 而

是有明显的年际变化, 有的年份路径偏于槽的西侧, 有的年份则沿槽北上。于非等^[8]利用 2006/2007 冬季航次所获得的南黄海温盐资料及锚系测流资料研究发现, 有一高温高盐水舌沿西北方向向山东半岛发展, 并且在黄海槽西侧底层存在一支稳定的北向流。鲍献文^[9]等利用 POM 模式得出黄海暖流的路径大致由济州岛西南沿黄海槽向西北流入黄海中部, 在 $34^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 暖流转向北, 并沿 50 m 等深线继续北上。对于黄海暖流的性质, Hsueh^[10]认为秋、冬两季在黄海内部的北向流是对北向风所建立起来的压强梯度的响应, 臧家业等^[11]认为黄海暖流是一支与北向季风强弱有密切关系的补偿流, Lie^[12]等指出黄海暖流不是一支持续稳定的流, 而是由在冬季强北风驱动下存在的间歇补偿性质的流, 朱耀华等^[13]用三维正压模式研究表明, 在冬季北风的作用下, 黄海下层海流与上层海流具有相反的流向, 下层成偏北向流动表明黄海暖流属“补偿流”的特性。王辉武等^[14]在研究黄海暖流的年际变化时认为黄海暖流的强弱存在 3~7 a 年际变化周期, 并与冬季经向风有较好的响应关系, 其多年平均的流轴在 123°E 左右, 且存

收稿日期: 2011-03-07; 修回日期: 2011-07-28

基金项目: 我国近海物理海洋与海洋气象研究(908-01-BC12); 中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-BR-215); 国家自然科学基金项目(40776019)

作者简介: 赵胜(1985-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事物理海洋学研究, 电话: 15908944933, E-mail: lcdx200420105067@163.com

在 3~6 a 的变化周期, 明显受冬季纬向风的影响。

1 资料概述

本文利用美国 NASA 极轨卫星中的高级甚高分辨率辐射计(AVHRR)反演的全球海表面温度数据, 时间间隔为 1 d, 空间分辨率为 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$, 对其进行 7 d 时间间隔的平均, 主要分析了 2009 年 10 月~2010 年 5 月黄海暖水舌的路径变化。并对黄海暖水舌进入黄海后的路径进行了划分, 在 $34^\circ \sim 36^\circ\text{N}$ 的 黄海范围内, 以 122.5°E 经线为分界, 在 122.5°E 以西指向西北方向的暖水定义为黄海暖流的西北向分支, 处于 122.5°E 以东向北延伸的暖水定义为北向分支。风场资料是由中国气象科学数据共享服务网提供的成山头台站日平均风场资料, 时间范围为 2009 年 8 月~2010 年 5 月。卫星高度计数据是法国空间局 AVISO 提供, 融合了 TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Envisat 等多颗卫星观测, 已网格化的海表面高度资料, 数据的时间间隔为 7 d, 空间分辨率为 $(1/4^\circ) \times (1/4^\circ)$, 时间范围为 2009 年 8 月 5 日~2010 年 3

月 31 日, 该数据进行了包括仪器误差、环境干扰、海波影响、潮汐影响等因素的校正。

2 2009 年 10 月~2010 年 5 月海表面温度分析

以海表面温度(SST)为指标的黄海暖流水与黄海暖流在位置上是有区别的^[13], 但海洋学者研究表明用暖流水作为黄海暖流运行路径的一个定性指标具有一定的合理性^[8,11,15-16]。鉴于此, 下面用 NASA 的 AVHRR 反演的每日海表面温度, 并做 7 d 时间间隔的平均, 来分析黄海暖流的路径。

图 1 a 展示了 2009 年 10 月 15~21 日海表面温度的平均情况, 这时可看到在黄海槽附近有一暖水舌, 说明黄海暖流已经开始出现, 由于其温度与局地海水的温度相差不大, 并不能确定这时黄海暖流的范围, 随着局地海水的降温和黄海暖流的发展, 其流路也逐渐清晰, 到了 11 月上旬, 可清晰地看到两个分支, 一支沿西北方向向近岸发展(西北向分支), 一支沿 124.5°E 黄海槽附近向北发展(北向分支)。

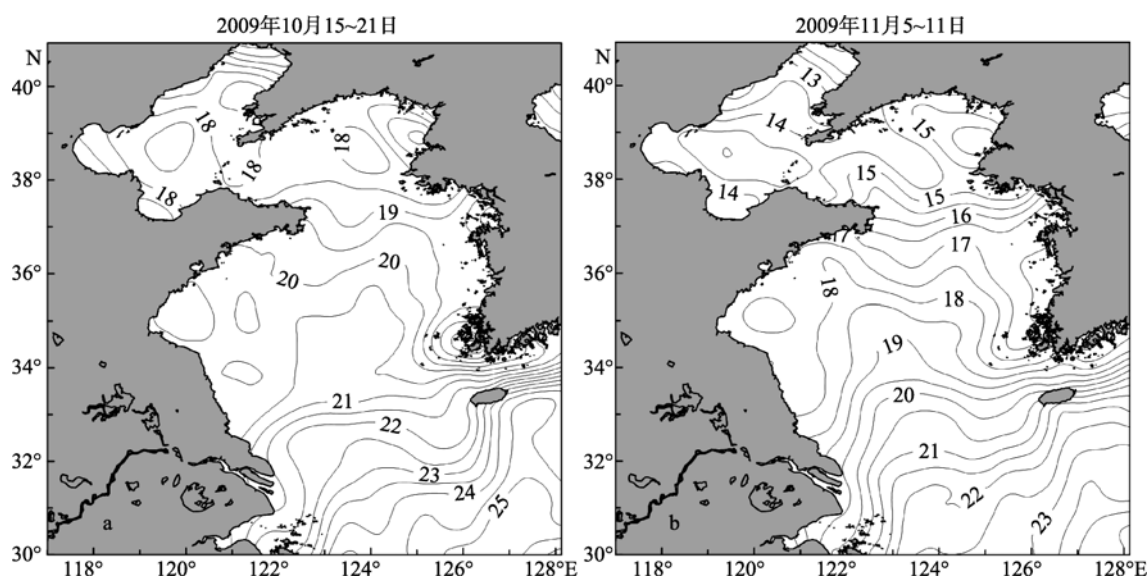


图 1 2009 年 10 月 15~21 日, 11 月 5~11 日 SST 分布图

Fig. 1 Spatial distributions of SST during Oct.15~21, 2009 and Nov.05~11, 2009

随着偏北风增强和海水继续降温, 黄海暖流北向分支继续向北发展, 大约沿 124.5°E 经线进入北黄海, 西北向分支流路更加清晰, 其前锋可到达沿岸水域(图 2 a)。北向分支路径逐步向西移动, 直到 12 月 17~23 日, 如图 2 b 所示, 北向分支开始沿黄海槽西侧北上。同时, 在山东半岛东北侧, 明显已有渤海沿岸冷水存在的迹象。

由图 3 a 可见, 到 1 月 7~13 日, 黄海暖流进入黄海以后, 先向西北方向延伸, 在 $(123^\circ\text{E}, 34.5^\circ\text{N})$ 附近分为西北向和北向两个分支, 而西北向分支主轴向南发生了偏移, 而且势力有所变弱, 北向分支向东偏北向发展, 大约沿黄海槽西侧 50~70 m 等深线流动, 而且其势力可以到达渤海, 这时的北向分支已经发展成熟, 其强盛状态可一直持续到 1 月底 2 月初, 如图 3 b 所示。

在这期间西北向分支逐渐减弱, 而且黄海沿岸冷水在整个 1 月份都在向南发展, 在沿岸可到达 32°N, 然后

向东南延伸。朝鲜沿岸冷水也在逐步发展, 其影响范围可沿朝鲜半岛西侧沿岸到 36°N 左右。

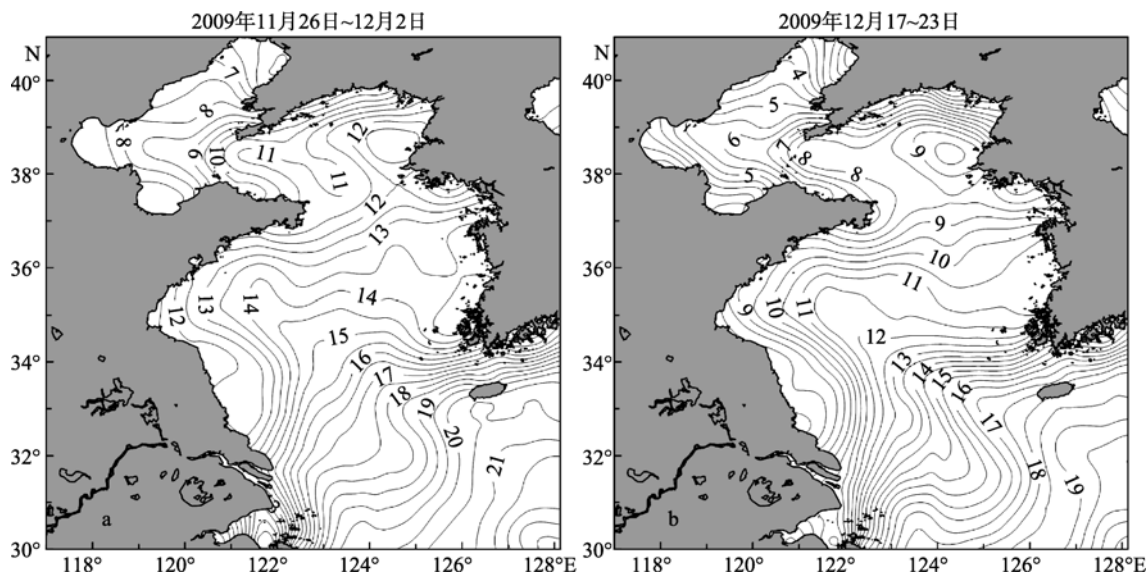


图 2 2009 年 11 月 26 日~12 月 2 日, 12 月 17~23 日 SST 分布图

Fig.2 Spatial distributions of SST during Nov.26~Dec.02, 2009 and Dec.17~23, 2009

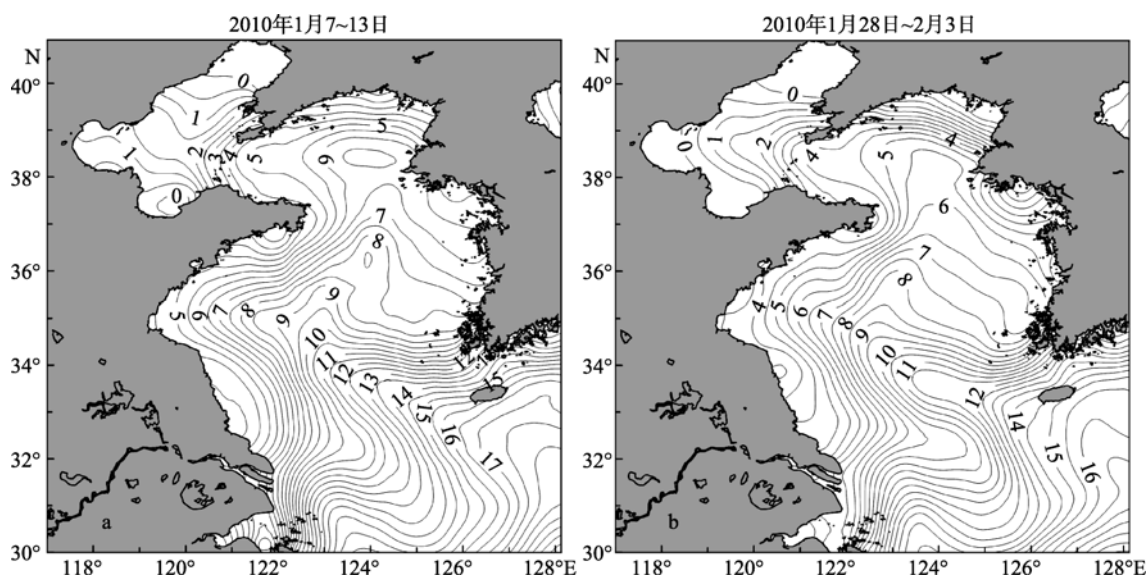


图 3 2010 年 1 月 7~13 日, 1 月 28~2 月 3 日 SST 分布图

Fig. 3 Spatial distributions of SST during Jan.07~13, 2010 and Jan.28~Feb.03, 2010

如图 4 显示, 到了 2 月份中下旬, 海表面温度继续降低, 西北向和北向分支基本还保持着 1 月份的基本的路径模式, 但其强度有微小的削弱。3 月初, 海水开始吸热升温, 黄海暖流进一步被削弱, 西北向分支削弱更加明显, 北向分支也只能到达渤海海峡附近, 而且主轴开始逐渐东移。

此后, 黄海暖流的两个分支快速消退。如图 5a 所

示, 到 4 月份中下旬, 暖水舌基本退缩到 38°N 以南范围内, 其中西北向分支基本已经消亡, 北向分支沿黄海槽西侧北上, 相比强盛时期主轴位置明显东移。此时还有比较突出的特点是, 在(36°N, 122°E)、(36.5°N, 125.5°E)和(38.5°N, 124°E)出现等温线封闭的冷水块。到 5 月中旬, 如图 5 b 所示, 黄海暖流在黄海的活动基本已经消失, 此时的等温线已开始出现东西向分布特征。

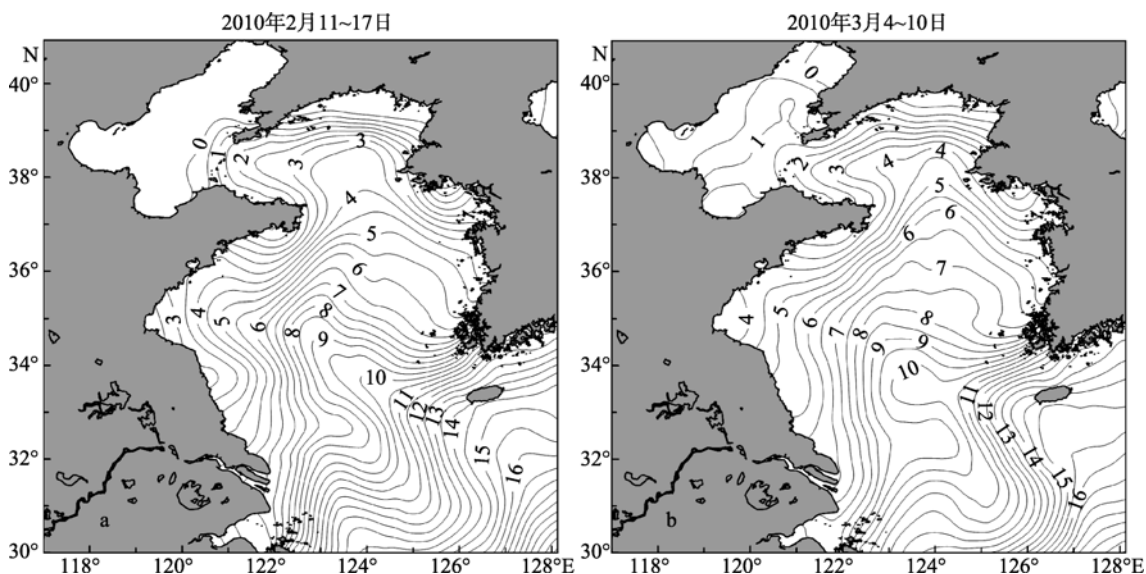


图4 2010年2月11~17日,3月4~10日 SST 分布图
Fig. 4 Spatial distributions of SST during Feb.11~17, 2010 and Mar.04~10, 2010

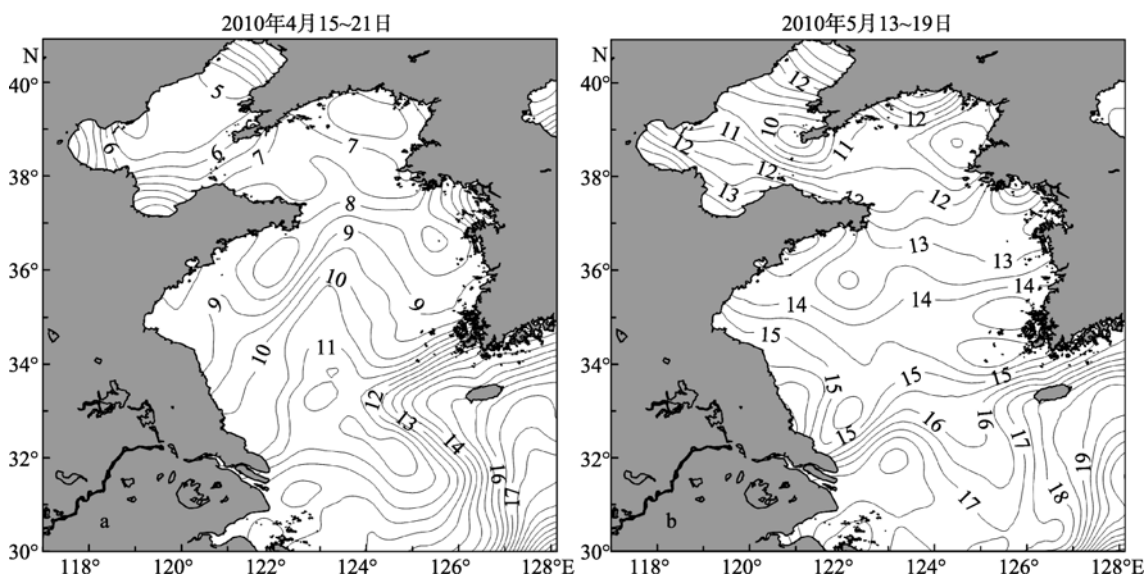


图5 2010年4月15~21日,5月13~19日 SST 分布图
Fig. 5 Spatial distributions of SST during Apr.15~21, 2010 and May.13~19, 2010

3 1981年10月~2010年5月黄海暖流分支统计

因为以上只是2009年10月~2010年5月期间黄海暖流分支路径的描述,而对于这两个分支的存在性和并存性,及这种情况是否只是该段时间内的个例,还存有疑问,为此通过对1981年10月~2010年5月共29a的海表面温度所反映的黄海暖流的路径进行了统计,结果见表1。

由表1的统计数据可以看出,西北向分支在11月到次年的3月一直存在,而且在统计过程中发现西北向分支大都在10月份下旬形成,且势力强盛,其前锋可以到达沿岸水域,这种情况大都可持续到次年的1月中下旬,然后暖水舌主轴开始慢慢向南退缩,其方向也由西北开始向西偏转,势力逐步减弱,到3月下旬开始消亡,4月暖水舌存在的概率也只有27.6%,5月全部消亡。北向分支,大部分形成于10月底~11月初,其路径多沿黄海槽或黄海槽东侧向

北发展,而且多局限于南黄海范围内,然后其路径逐渐西移,12月中旬~1月初北向分支可沿黄海槽西侧北上,1月中旬~2月底是其强盛时期,然后慢慢向南退缩,到4月初活动范围基本只在南黄海内,随着北向分支势力的减弱,其主轴也慢慢东移,4月中旬以后,开始变得不稳定,常见的有下面几种情况,第一,在124.5°E,34.5°E左右衍生出暖水舌,可能向东北方向发展,也可能沿黄海槽向北发展;第二,在朝鲜半岛西南端海表面温度锋处衍生出沿岸北上的暖水舌,以上情况也可能交替出现,在4月底5月初消亡。

表1 黄海暖流各分支在1981年10月~2010年5月共29a间出现次数的统计

Tab. 1 The statistics of the Yellow Sea Warm Current branches occurring from October, 1981 to May, 2010

月份	黄海暖流各分支出现次数	
	西北向分支	北向分支
10	26	22
11	29	29
12	29	29
1	29	28
2	29	29
3	29	28
4	8	28
5	0	16

4 相关性分析及不同区块海表面高度变化对比

为了进一步探讨形成黄海暖流分支的机制,将黄海分为3个区块,分布如图6所示。黄海3个区块对应的海表面高度变化如图7所示。为了更好地表示不同区块海表面高度的相对变化,将B区块的海表面高度分别与A、C区块的海表面高度做差,结果如图8所示。然后分析了成山头台站所测风的经向分量分别与A、B、C区块的海表面高度的时间演变过程,如图9所示,并做了相关性分析,同时也分析了A、B、C三区块的海表面高度与海表面温度的时间演变过程,如图10所示,同样进行了相关性分析。

从图7中可以看到,大约在9月底10月初,3个区块的海表面高度开始下降。对比区块B与沿岸区块A海表面高度可以看到(见图8a),在10月之前,区块A的海表面高度比区块B要高,从10月份初开始区块A处的海表面高度快速下降,并开始低于外

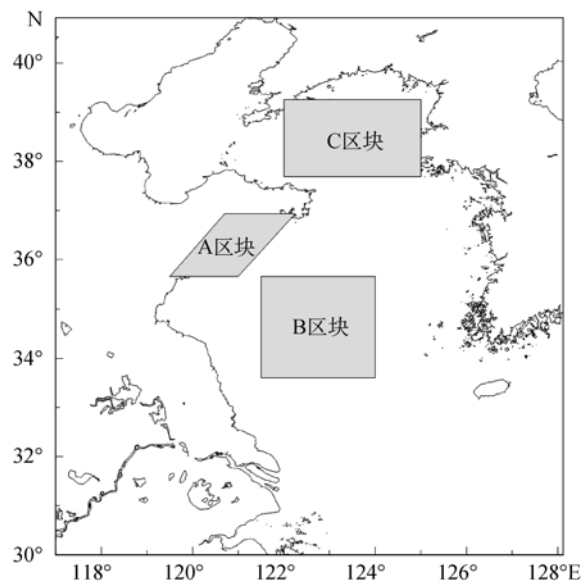


图6 黄海3个区块分布

Fig. 6 Three domains in the Yellow Sea

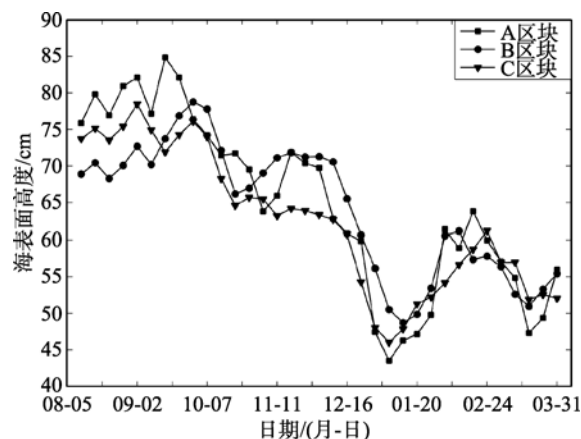


图7 黄海3个区块的海表面高度变化

Fig. 7 Sea surface height variation in each domain of the Yellow Sea

海区块B的海表面高度,在2月中旬~3月中旬之间, A区块的海表面高度高于B区块,3月下旬海表面高度B区块大于A区块。对比区块B与区块C海表面高度(见图8b),在9月中旬之前,C区块的海表面高度比B要高,除了2月底到3月初外,此后到次年3月底,B区块处的海表面高度一直比C区块的高。

如图9所示,在置信度水平超过99%的情况下,A、B、C区块海表面高度滞后成山头台站经向风天数分别为:28,49,28d,相关系数分别为:0.8724,0.8504,0.8709。

如图10所示,在置信度水平超过99%的情况下,A、B、C区块海表面温度滞后海表面高度天数分别

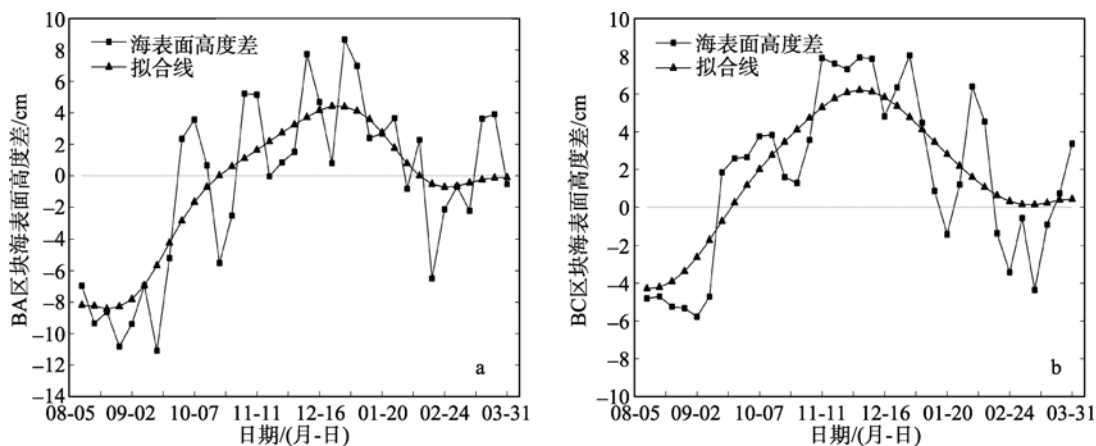


图 8 BA 区块、BC 区块海表面高度差

Fig. 8 SSH distinction of domain B and A and SSH distinction of domain B and C

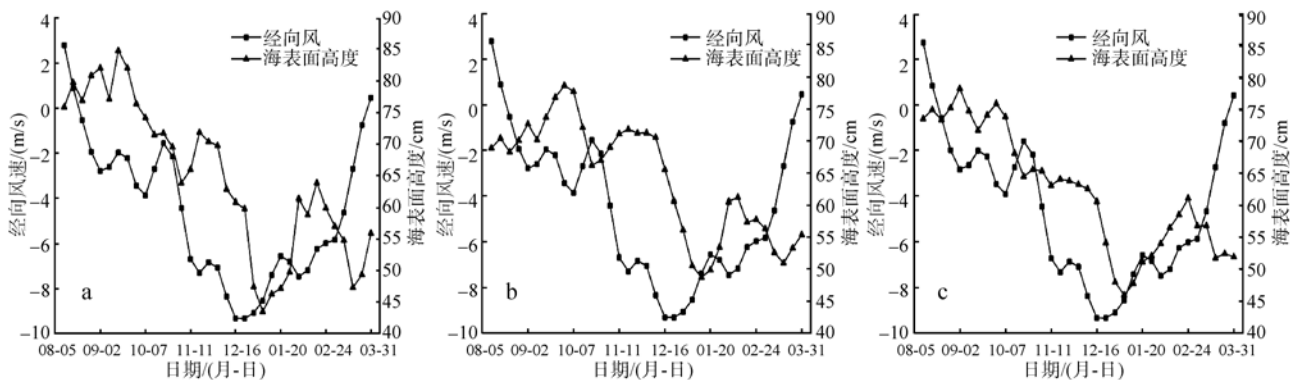


图 9 成山头台站经向风与 A 区块、B 区块、C 区块海表面高度的时间变化

Fig. 9 Time series of meridional winds at ChengShanTou station and SSH in domain A, B and C

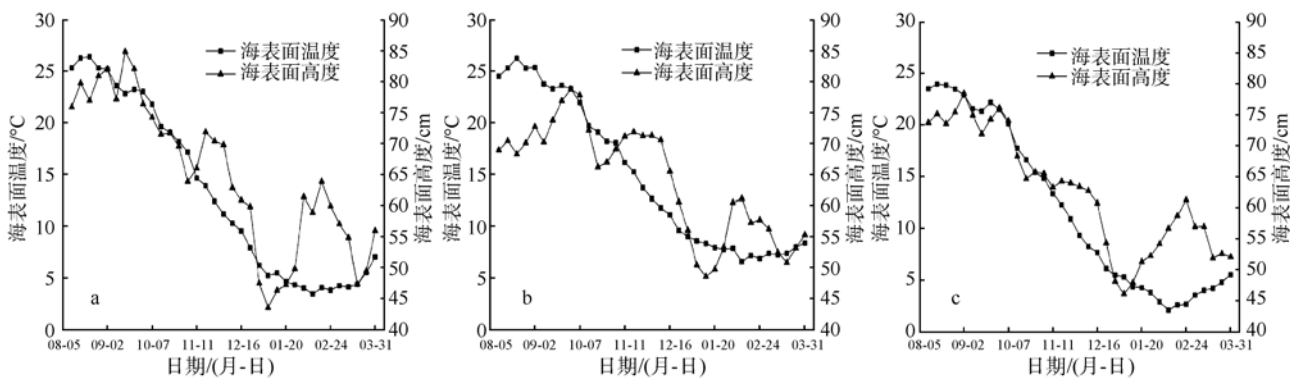


图 10 A 区块、B 区块、C 区块海表面高度与海表面温度的时间变化

Fig. 10 Time series of SST and SSH in domain A, B and C

为: 3, 2, 2 d, 相关系数分别为 0.8903, 0.8166, 0.9190。

由以上各区块的海表面高度对比和相关性分析, 再结合期间海表面温度变化, 可以得到, 8 月中旬黄海开始出现偏北向风, 大约在 9 月底 10 月初, 黄海的海表面高度开始下降, 这为济州岛西南的暖流水进入黄海提供了驱动力, 黄海暖流大致沿深槽西侧

地形坡度较大的位置进入黄海。由于局地风引起的增减水作用, 形成不同区域的海表面高度差, 进而引起进入黄海的暖流水路径发生了变化。对于西北向分支, 在 8 月中旬成山头台站所测得的已经是偏北向风, 而且经向风速较小, 相邻沿岸海域的海表面高度在 9 月中旬开始下降, 并在 10 月初开始低于

B 区块的海表面高度, 这与西北向分支形成过程有很好的一致性, 在 2 月中旬~3 月中旬之间, 出现 A 区块的海表面高度高于 B 区块的情况, 可能与所选区块的位置及西北向分支主轴摆动有关。对于北向分支, B 区块在 10 月初海表面高度开始下降, C 区块大约在 9 月中旬海表面高度开始下降。10 月上旬, 黄海暖流开始入侵黄海, 9 月中旬 B 区块海表面高度已经开始高于 C 区块海表面高度, 根据相关性分析, 这个海表面高度差是由偏北风引起的, 这为黄海暖流进一步向北发展提供了驱动力, 同时由于 B, C 两区块空间距离较远, 大约需要 1 个月的时间, 暖水才能发展到 C 区块所在的区域。对于黄海暖流的主轴的摆动, 这可能是由于经向风的变化所造成的。

5 结论

2009 年 10 月初, 黄海开始有暖流水入侵的迹象, 其后黄海暖流出现了两个分支, 其中西北向分支是一支向近岸发展沿西北方向的暖流水, 10 月份就已经存在, 并逐步发展, 到 1 月底开始慢慢向东南消退, 大约在 3 月底 4 月初消亡, 期间由于黄海沿岸冷水及西北向分支自身势力的减弱, 其暖水舌主轴慢慢南退缩; 北向分支, 初期大约沿 124.5° 经线向北流动, 而且其暖流水可进入北黄海, 然后逐渐西移, 在 12 月中下旬, 成为一支在 $123^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N}$ 附近衍生出来, 沿 50~70 m 等深线北上的暖流水, 随后逐步加强稳定, 1, 2 月是其强盛期, 直到 2 月下旬开始减弱, 其主轴也开始逐渐东移, 到 5 月中上旬消失。

由对 1981 年 10 月~2010 年 5 月共 29 a 的海表面温度的统计结果来看, 黄海暖流两个分支的存在并不是个别年份的特例, 而是具有普遍性。西北向分支, 在所统计的时间里发生率有 100%, 而且 10 月份就已经存在, 势力强盛, 随着时间的发展, 慢慢向东南衰退, 并且其主轴也逐步向南偏移, 大部分约在 3 月底消亡。北向分支, 10 月份就已经发生, 概率可达 75.86%, 而且大都沿黄海槽或黄海槽东侧北上, 到了 11 月份发生率可达 100%, 暖流水主轴也慢慢向西偏移, 1, 2 月份是其强盛期, 大都沿黄海槽西侧北上, 随后主轴东移, 大部分在 4 月底 5 月初消亡。

通过对成山头台站经向风、黄海各区块海表面高度和海表面温度的相关性分析, 还有对黄海各区块相对海表面高度的对比可以看出, 在 2009 年 10 月~2010 年 5 月, 北向季风造成黄海北部和山东半岛南岸沿岸水域海表面高度的下降, 从而形成由南向北

下倾的海平面高度梯度, 这为黄海暖流进入黄海后形成西北分支和北向分支提供了驱动力, 具有补偿性质。

参考文献:

- [1] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 5-6.
- [2] Uda M. Results of simultaneous oceanographical investigations in Japan Sea and its adjacent waters during October and November 1936[J]. J Imp Fish Exp St, 1936: 91-151.
- [3] 毛汉礼, 任允斌, 孙国栋. 南黄海和东海北部夏季水文特征以及海水类型(水系)的初步分析[C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(第一集). 北京: 科学出版社, 1965: 78-125.
- [4] 乐肯堂, 毛汉礼. 南黄海冬季温盐结构及其流系[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(6): 505-515.
- [5] 郭炳火. 黄海物理海洋学的主要特征[J]. 黄渤海海洋, 1993, 11(3): 7-18.
- [6] 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰, 等. 初春南黄海水文特征及环流状况的分析[J]. 海洋学报, 1999, 21(5): 1-11.
- [7] 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰, 等. 南黄海环流的若干特征[J]. 海洋学报, 2000, 22(1): 1-16.
- [8] Yu Fei, Zhang Zhixin, Diao Xinyuan, et al. Observational evidence of the Yellow Sea warm current[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(3): 677-683.
- [9] 鲍献文, 苏洁, 郭心顺, 等. 黄、渤海热结构及环流季节变化的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(4): 513-522.
- [10] Hsueh Y. Recent current observations in the eastern Yellow Sea[J]. J Geophys Res, 1988, 93: 6875-6884.
- [11] 臧家业, 汤毓祥, 邹娥梅, 等. 黄海环流的分析[J]. 科学通报, 2001, 46(增): 7-15.
- [12] Lie H J. On the Huanghai (Yellow) Sea circulation: A review by current measurements[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 18(3): 355-374.
- [13] 朱耀华, 方国洪. 陆架和浅海环流的一个三维正压模式及其在渤、黄、东海的应用[J]. 海洋学报, 1994, 16(6): 11-26.

- [14] 王辉武, 于非, 吕连港. 冬季黄海暖流区的空间变化和年际变化特征[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 140-148.
- [15] 汤毓祥, 邹娥梅, LIE Heung-Jae. 冬至初春黄海暖流的路径和起源[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 1-12.
- [16] 鲍献文, 万修全, 高郭平, 等. 渤、黄、东海 AVHRR 海表温度场的变化特征. 海洋学报, 2002, 24(5): 125-133.

The path and mechanism of the Yellow Sea Warm Current

ZHAO Sheng^{1,2}, YU Fei³, DIAO Xin-yuan³, SI Guang-cheng³

(1. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 3. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Mar., 7, 2011

Key words: the Yellow Sea Warm Current branches; sea surface temperature; sea surface height; wind; compensation

Abstract: Based the daily sea surface temperature data (SST) of NASA/AVHRR, sea surface height (SSH) data from AVISO, and the wind data of Chengshantou station from China Meteorological Data Sharing Service System, we identified two warm water tongue branches appear when the Yellow Sea Warm Current (YSWC) intruded into the Yellow Sea according to the analysis of SST distribution. Furthermore, the statistical results revealed that these two branches were present from 1981 to 2010, but not a temporal phenomenon. The correlation analysis and the variation of local SSH of the Yellow Sea indicate the Yellow Sea Warm Current northwest and north branch which are driven by relative local SSH change caused by regional wind.

(本文编辑: 刘珊珊)