

# 渤海冬季风生环流的年际变化特征及机制分析\*

马伟伟<sup>1</sup> 万修全<sup>1,2</sup> 万凯<sup>3</sup>

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院海洋系 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛 266100;  
3. 国家海洋局北海海洋工程勘察研究院 青岛 266033)

**摘要** 为探究渤海冬季风生环流的年际变化及机制,在近 35 年 NCEP CFSR 大气强迫下,利用 ROMS 海洋模式对渤海冬季流场进行了高分辨率的数值模拟。模式结果基本重现了已知的渤海冬季风生环流的主要特征。渤海冬季深度平均流场的 EOF 结果显示:首先,第一模态中风向的改变引起了一个环绕整个渤海的环流结构变化;其次,第二模态反映了渤海冬季环流存在的线性增强趋势与风场增强有关,尤其在 1995 年之后。从模式结果中发现,风场对渤海冬季流场存在的年际变化起到重要作用,风向的偏转对环流年际特征的影响强于风速变化。

**关键词** 渤海; 风生环流; 冬季; ROMS; 数值模拟; 年际变化

**中图分类号** P731 **doi:** 10.11693/hyh20150100009

渤海是半封闭的内陆浅海,包括辽东湾、渤海湾和莱州湾三个海湾,中部存在一浅滩地形,仅在东部通过渤海海峡与黄海相连,平均水深约 18m。根据大量观测结果(沈鸿书等,1964;赵保仁等,1995),目前普遍认为渤海冬季环流受局地偏北风作用,主要由风生海流组成。基本流型可简单概括为:在渤海海峡北进南出,进入渤海的海水通过渤海中部到达渤海西岸后分为南北两支,一支向北沿辽东湾西岸进入辽东湾顶后沿东岸流出;一支流入渤海湾后南下经黄河三角洲进入莱州湾,最终由渤海海峡南部流出渤海,形成了一个逆时针流环(曹振东等,2011)。

近年来,随着海洋数值模式的发展,许多学者对渤海冬季风生环流进行了大量细致的数值模拟研究工作,结果比较分散。例如,万修全(2003)的数值结果显示冬季渤海中部以及辽东湾环流沿顺时针,渤海湾以及莱州湾基本沿逆时针方向;Wei 等(2001)数值模拟结果却发现在冬季渤海中央海区存在一个大的逆时针流环;赵保仁等(1998)的结果显示渤海湾内的冬季环流是北部为顺时针、南部为逆时针的双环结构;王辉等(1994)的结果显示在辽东湾南部冬季存在一个弱的逆时针环流,而曹振东等(2011)和毕聪聪

(2013)却发现冬季该处是一个弱的顺时针环流结构。可见不同数值模拟结果对于渤海冬季环流结构特征的刻画尚不一致。究其原因,除了与海面风应力涡度收支平衡和海底地形约束作用等机制有关外(冯士筭等,1992;赵保仁等,1998;曹振东等,2011;Wang *et al.*, 2014),也不排除与数值模式所用海面风场的质量和时段选取不同导致的年际变化有关(万修全,2003;乔璐璐,2008)。

到目前为止,关于渤海冬季环流的年际和年代际变化的研究很少。以上介绍的研究工作多限于给定温盐场下的诊断性数值模拟,模型所采用的风应力或风场都为月平均或者特定期观测资料的整合平均,尽管此研究方法也能整体上模拟出渤海冬季环流的基本特点,但大气观测时段不同可能导致了模拟结果的差异,无法进一步研究渤海冬季环流的年际变化特征等。另外,时空分辨率更高的风场资料的出现,使一些天气尺度的高频信号得以保留,比如渤海冬季频繁出现的可持续数天的大风事件等。观测证实一场典型的冬季大风过程可以使渤海水位骤降 1m 以上,数值模式结果也显示高频大风过程对渤海环流和水交换的贡献作用不容忽视(Zhao *et al.*, 2011; 万

\*国家自然科学基金项目,41276013 号,41576004 号,U1406401 号;教育部留学回国人员科研启动基金,教外司留[2012]1707 号;2012 年度教育部新世纪优秀人才支持计划,NCET-12-0502 号。马伟伟,博士,E-mail: skyseaweiwei@163.com

收稿日期: 2015-01-12, 收修改稿日期: 2015-06-21

修全等, 2015; Wan *et al*, 2015)。因此, 本文数值模拟中采用目前最新的高时空分辨率大气同化资料, 有助于深入探究渤海冬季风生环流的年际变化特征和规律。

本文利用一个广泛使用的区域海洋模式 ROMS (Regional Ocean Modeling System), 以 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)提供的日平均风场再分析资料作为驱动, 对渤海风生环流进行了数值模拟分析。CFSR 风场具有足够的时空分辨率, 并且在渤海地区数据质量较好(王国松等, 2014)。本文重点讨论了渤海冬季风生环流的基本特征和年际变化规律, 并对其机制进行了初步探讨。

## 1 研究方法

本文采用的 ROMS 模式是一个基于三维非线性斜压原始方程组发展起来的区域海洋模型, 模拟海区为  $19.1^{\circ}$ — $41.3^{\circ}$ N、 $117.2^{\circ}$ — $132.8^{\circ}$ E 覆盖的东中国海及邻近太平洋海域, 如图 1 插图所示。水平方向上采用正交经纬网格, 网格数为  $520 \times 740$ , 分辨率约 3km, 垂向采用地形跟随的 S 坐标, 共分 33 层, 最小水深设为 5m, 最大水深设为 5500m。地形主要采用 ETOPO2 数据, 在渤海湾区域过渡为较真实的高分辨率观测地形资料(Lin *et al*, 2006)。垂向混合采用 Mellor-Yamada 2.5 方案, 大气强迫采用 Bulk Formula 方案, 从长期的温度模拟结构来看 ROMS 模式在该大气强迫场驱动下模拟的温度偏差(drift)较小, 因此未采用 SST 松弛逼近方法; 模式上边界条件采用空间分辨率约为  $0.3^{\circ}$ 的 NCEP CFSR 的日平均资料作为大气驱动场, 包括长短波辐射、风场、降水、气压, 以及海面 10m 高度的风场、气温、相对湿度。内模时间步长设为 120s, 外模步长 6s。侧开边界条件采用 SODA 高分辨率同化资料的气候态平均场。由于模式中未加入河流径流, 为保证河口盐度的正常, 计算过程中进行了表层盐度的修正; 另外, 为了便于研究和区分渤海冬季风生环流的基本特征和年际变化规律, 模式中未加入潮汐与海浪过程。模式经过 NCEP 气候平均态强迫场模拟 10 多年达到稳定状态, 然后使用 1979 年至 2013 年连续 35 年的日平均再分析资料驱动模式对渤海环流进行数值模拟。下文将该数值模拟实验称为控制实验, 并且选取 12 月、1 月和 2 月代表冬季, 例如 1990 年冬季平均即为 1989 年 12 月、1990 年 1 月和 2 月的算术平均值。

由于模式模拟时间较长, 为避免开边界条件误差的影响, 模式选取的模拟区域较大, 以使开边界位置尽量远离研究海域(图 1)。其次, 虽然渤海温度在冬季垂向接近一致, 水平梯度也较小, 但是本文分析的渤海冬季风生环流仍包含较弱的密度流, 毕聪聪等(2015)对渤海盐度统计资料的诊断结果亦证明了密度流在冬季对总环流的贡献较小。

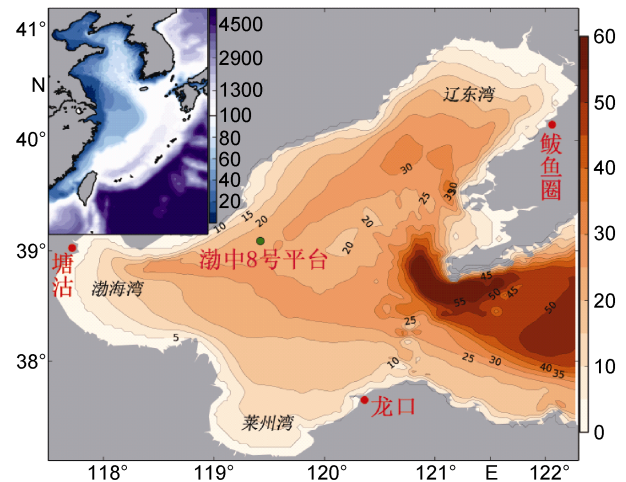


图 1 模拟区域及渤海水深

Fig.1 Model simulated region and the water depth of Bohai Sea  
左上插图为模式模拟区域, 填色均为水深, 单位: m

## 2 模式结果

### 2.1 水位

图 2a 和图 2b 分别是 1992 年和 2005 年冬季渤海龙口站(图 1)实测资料经调和与分析得到的余水位(王悦, 2009; 马倩, 2014)和控制实验模拟的日平均水位时间序列对比。该观测站两个时间段的水位序列全年相关系数均超过 0.7, 在冬季的相关系数更是接近 0.9, 表明模式模拟的水位与实测数据吻合较好; 从图上可以清楚看到渤海每年冬季都存在多次水位短时间快速下降、恢复过程, 变化幅度最大超过 1m(图 2b)。这些水位快速下降与强迫风场中的高频天气过程有直接的关系, 通过对渤海一次典型大风过程下渤海水位和环流的分析, 万修全等(2015)认为冬季频发的大风过程对渤海环流以及水交换能力有显著影响。其次, 渤海夏季水位变化的幅度明显小于冬季, 这与渤海夏季风场较弱有关。

图 2c 给出 1980 年至 2008 年冬季渤海内龙口、塘沽和鲅鱼圈三个站点(图 1)的余水位观测(王悦, 2009; 马倩, 2014)与对应时段模拟结果的相关系数曲线, 从长期的模拟结果来看, 模拟与观测结果也较相

符。如图 2c 所示, 上述三个站位冬季观测水位与模拟水位的相关系数基本都在 0.8 左右。塘沽、龙口附近模拟水位更接近观测值; 而在鲅鱼圈站相关系数则低一些, 且变化幅度较大, 在 1989 年相关系数甚至降低到 0.5 以下, 这除了与部分年份观测资料不连续有关外, 还可能与鲅鱼圈地处渤海北部冬季易受

海冰影响有关(陆钦年, 1993; 杨国金, 1999), 本研究模式设置中暂未包含海冰。总体而言, 对比分析说明本文所建立的模式对渤海水位的长期模拟刻画较准确; 尤其在冬季, 受强风控制, 因为渤海的流场与水位变化较为一致(万修全等, 2015), 所以模式对于冬季渤海风生流场的模拟应该也是较为准确可信的。

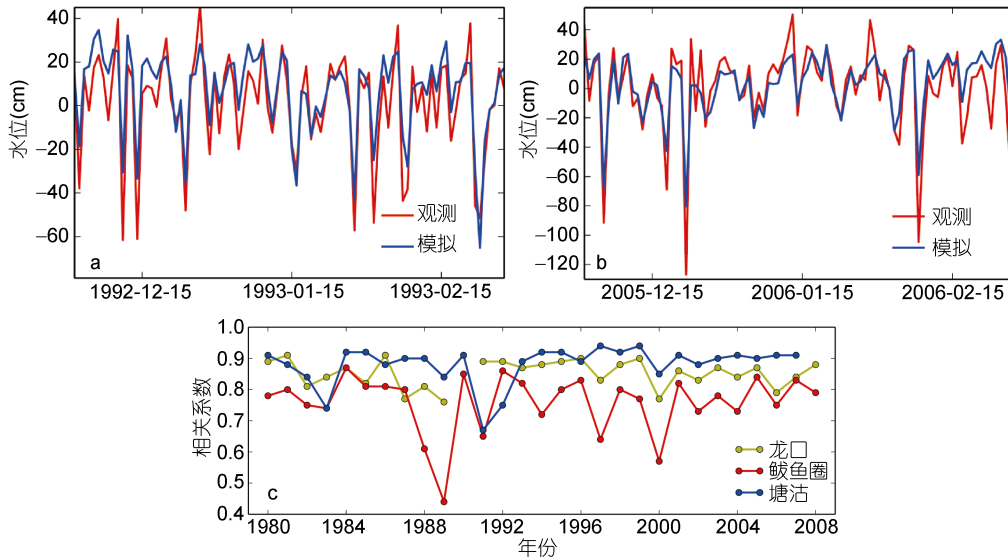


图 2 观测余水位与模拟水位及相关系数

Fig.2 The time series of observed and simulated sea surface height and the correlation coefficients

a: 龙口站 1992 年; b: 龙口站 2005 年; c: 龙口站、鲅鱼圈站和塘沽站冬季观测、模拟水位相关系数; 观测与模拟水位序列均取日平均数据。其中龙口站 1990 年观测数据缺失, 2008 年以后三站位的观测资料不足, 因此没有对比

## 2.2 海流

图 3 给出了根据 1986 年冬季渤中 8 号平台 (119.42°E, 39.09°N) 观测资料计算的余流与模式模拟结果的对比。首先从图 3b 来看, 模拟流速的大小以及变化与观测结果比较接近, 特别是强流速时段; 其次, 从图 3a 的余流矢量对比可以看出模拟结果在方向上也与观测接近一致, 而且在余流较强时(一般对应大风过程)模拟结果明显更接近实测。例如, 图 3c 给出 1986 年 12 月 18 日一次典型大风过程下余流的深度分布对比, 从上层到下层, 流的大小、方向均非常接近。虽然模拟结果在一些时刻偏差较大, 但是总体上可以认为模拟结果准确。

## 2.3 渤海 SST

图 4 给出了冬季多年平均 SST 的控制实验模拟结果与 AVHRR 卫星观测数据对比。在量值与分布特征上, 模拟结果与卫星资料较为接近: 渤海海峡附近 SST 温度最高, 达到 5°C 左右; 入侵的黄海水在通过渤海海峡后由于浅滩地形的影响主要向西延伸, 到

西岸分为两支, 一支进入渤海湾, 另一支沿岸向北延伸; 另有一支受老铁山水道深水地形作用形成向北的高温水舌, 但是影响范围并不能深入到辽东湾内。这种 SST 的分布与冬季大风过程下渤海海水的流出与补偿有很大关系(万修全等, 2015)。另外, 渤海平均 SST 存在长期升高趋势, 控制实验模拟结果显示, 1979—2005 年期间整个渤海平均 SST 变化率为 0.012°C/年, 这与方国洪等(2002)利用沿岸台站观测数据得到的 0.015°C/年的温度变化结果非常接近。因此总体上本研究对渤海温度模拟的结果是可信的, 在缺乏长期观测数据的情况下使用该数值模拟结果来分析渤海冬季环流的变化特征是合适的。

## 3 结果与讨论

### 3.1 渤海多年冬季平均风生环流的基本特征

风应力是渤海冬季环流形成、维持和变化的主要影响因子(赵保仁等, 1998; Fang *et al.*, 2000)。在冬季渤海偏北季风加强, 寒潮大风等天气过程较多, 海水

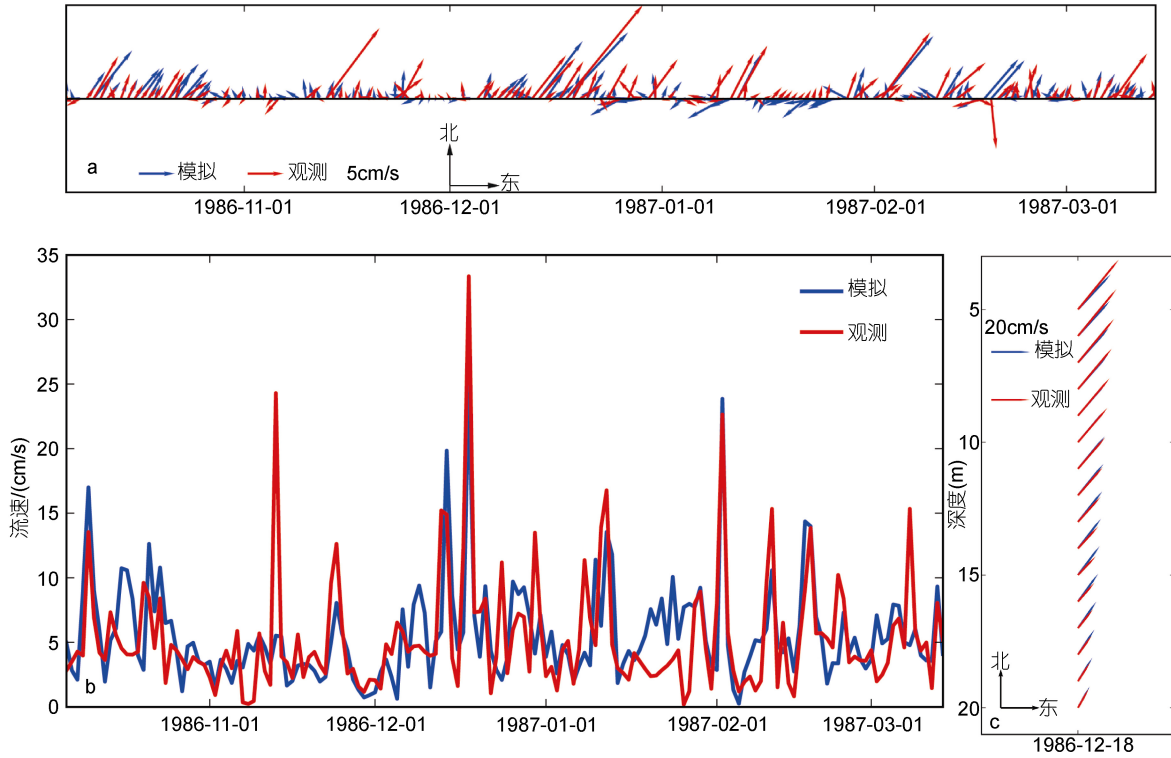


图 3 渤中 8 号平台模拟与观测余流对比

Fig.3 Comparison of observed and simulated current at platform "Bozhong 8"

a: 5m 流矢量对比; b: 5m 流速对比; c: 一次典型大风过程垂向流结构对比; 图中模拟、观测数据均取日平均

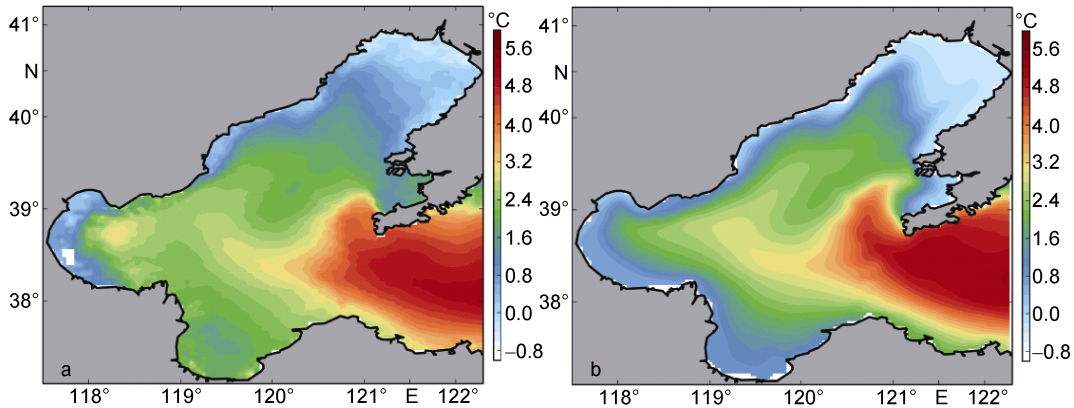


图 4 渤海冬季多年平均 SST 分布

Fig.4 SST distribution in Bohai Sea in winter

a: AVHRR 卫星观测; b: 控制实验结果。时间范围为 1985—2002 年

垂向混合充分, 渤海温度达到最低并且上下较一致。

图 5 是控制实验模拟的 35 年冬季平均(1979—2013)的渤海表层、20m 层、底层和深度平均的环流分布, 表层与下层流场明显不同, 这种垂向的三维结构在前人早期的模拟结果中亦有体现(黄大吉等, 1996)。图 5a 表明冬季渤海表层海水主要沿西北-东南向流出渤海, 流线分布较平滑, 没有明显的涡旋, 渤

海东部的流速略强于西部的, 这种结构与渤海冬季盛行的偏北季风有直接关系。图 5b 显示 20m 层环流主要体现为补偿流的特点, 经渤海海峡北部进入的北黄海海水向西首先遇到渤海中部的浅滩地形阻挡, 一部分向北流入辽东湾, 其余大部分沿浅滩南缘的深槽继续向西流动, 至渤海湾口东北受岸界地形影响分为两支, 一支向北进入辽东湾, 一支向西进入渤

海湾。图 5c 显示的底层环流在渤海中部与图 5b 很相似; 不同的是, 在辽东湾顶存在一个顺时针涡旋; 在渤海湾存在一个北部为顺时针、南部为逆时针的双环结构, 但是北部的顺时针涡旋很弱; 莱州湾海水主要以沿岸流的形式经渤海海峡南部流出渤海, 流动较弱。

从图 5d 可以看出, 控制实验下渤海冬季的深度平均流场由多个涡旋组成: 在辽东湾顶存在的顺时针涡旋是由于冬季偏北季风将湾内的海水向南推动, 相应地西岸海水沿西岸北上补充所形成, 近岸流速较强, 可达到 5cm/s; 渤海湾南部和莱州湾的流场则主要表现为大的气旋式环流, 并且近岸一侧流速较

强, 可达到 5cm/s, 形成一支明显的沿岸流; 在渤海湾北部存在一个弱的小范围的顺时针涡旋。渤海海峡处的流动为北进南出, 北部的流幅较窄, 部分进入渤海的海水会在海峡西侧折向南汇入莱州湾沿岸出流进而从渤海海峡南部流出渤海, 其它部分海水继续经中部浅滩南侧向西入侵到渤海湾。

这些结果基本体现了从实测资料中分析得到的渤海冬季环流的主要特征。我们知道渤海冬季的流场结构与冬季盛行风场的结构关系密切, 因此, 模式所用的风场质量将对渤海冬季环流的模拟结果有重要影响, 也与渤海冬季风生环流的年际变化模拟结果息息相关。

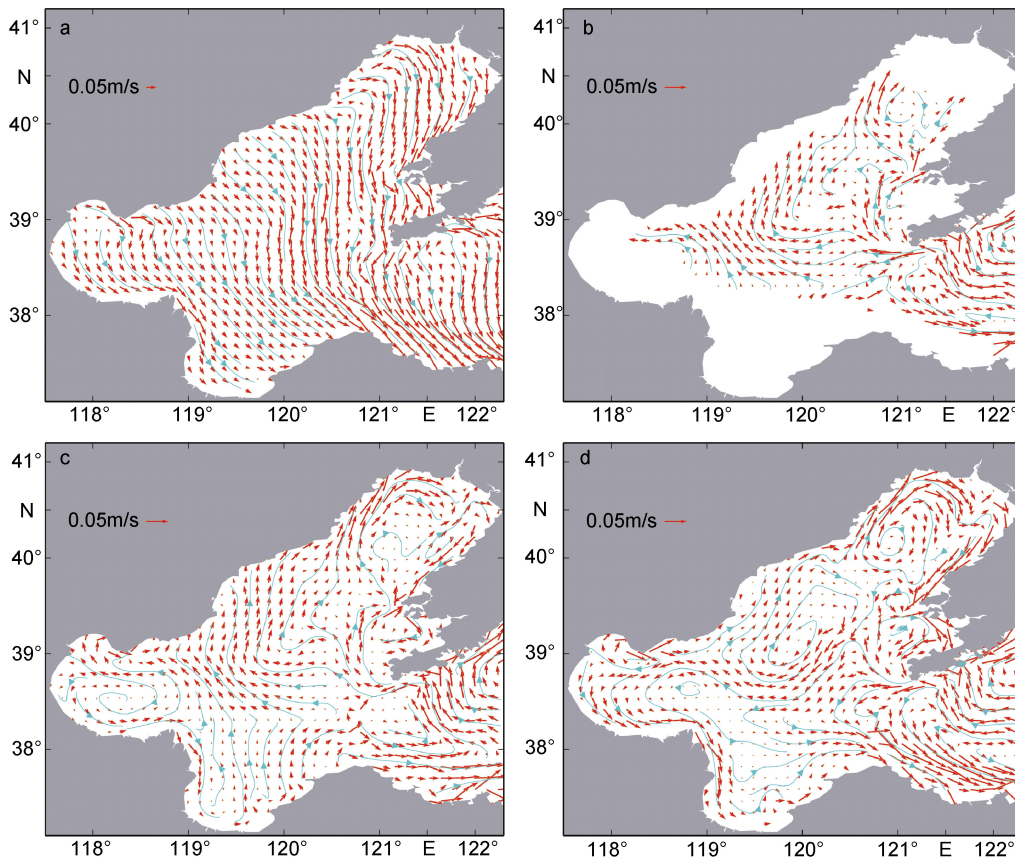


图 5 控制实验 1979—2013 年冬季渤海平均流场

Fig.5 The simulated current of Bohai Sea from 1979 to 2013

a: 表层; b: 20m 层; c: 底层; d: 深度平均; 红色箭头表示流速矢量, 蓝色曲线代表流线

### 3.2 渤海冬季风生环流的年际变化及影响因素

关于渤海冬季平均风生环流特征的研究已有不少, 但是对于其年际变化特征和机制的研究比较有限。在这一节我们将利用经验正交分解(EOF)方法讨论渤海冬季深度平均环流的年际变化特征。

图 6a 和图 6b 分别是渤海 35 年冬季深度平均环

流经过 EOF 分解后得到的第一模态和第二模态的分布, 图 6c 和图 6d 中的红色曲线分别对应上述第一模态和第二模态的时间序列, 黑色曲线则是模式驱动场中渤海区域风应力方向和强度的冬季平均值(风应力强度定义为渤海海面每点风应力大小的区域平均值; 风应力偏角定义为渤海海面每点风应力方向弧

度值的区域平均)。为了方便,上述曲线均已相对各自标准方差作了归一化处理。

从图 6a 可以看出,渤海冬季深度平均流场的 EOF 第一模态主要表现为一个绕渤海中央的逆时针流动,流速约为 2cm/s,其方差贡献为 37.8%;而第二模态(图 6b)则表现为两个环流结构,一个为局限在辽东湾内的顺时针涡旋,另一个为沿渤海湾和莱州湾沿岸的逆时针流动,流速约为 1cm/s,方差贡献为 19.8%。第一模态的时间序列(图 6c 的红线)存在明显的年际变化特征,变化幅度可以达到序列方差的 2 倍多,与平均流的大小相当。总体而言,模式模拟的渤海冬季深度平均风生环流在大部分年份变化平缓,而 1982 年、1987 年、1998 年和 2003 年的时间序列值较大,渤海湾和莱州湾的逆时针环流较平均态强;1989 年、2002 年和 2013 年的时间序列为负值,第一模态的环流为顺时针,秦皇岛外海向北的流动强于其多年平均值,对照该具体年份的冬季平均流场,渤海中央在这三年冬季表现为很强的顺时针环流,渤海湾和莱州湾的逆时针环流则非常弱。究其原因,我们发现这一时间序列与渤海冬季盛行风场的平均风向变化具有一致性,如图 6c 中的黑线所示,两者极

值分布和变化趋势非常一致。渤海冬季盛行的偏北风空间分布比较均匀,35 年(1979—2013)平均风向为 275°(东偏南 85°),标准方差为 10°。从图 6c 看,当渤海盛行冬季风较多年平均风向偏东的时候,有利于渤海冬季深度平均环流 EOF 第一模态中逆时针环流的发展,而当其西偏的时候,则会促进第一模态中顺时针环流的发展,从而影响渤海整体环流态势。

图 6d 中的红线是对应渤海冬季深度平均环流 EOF 第二模态的时间序列。从图上可以明显发现该序列存在以下特点:首先,存在明显的线性趋势,与渤海冬季平均风强度的增强趋势一致(图 6d 中的黑线);其次,从 1981 年到 1994 年的 14 年间该序列值基本表现为负位相,变化的幅度也较小,而 1995 年以后序列以正位相为主,且变化幅度增加显著,这同样与渤海冬季平均风强度的变化特点相吻合,说明渤海冬季环流 EOF 第二模态与风应力强度的变化密切相关。

总之,数值模拟结果显示渤海冬季深度平均风生环流的年际变化显著,其变化特征与驱动风场的风向和强度年际变化相一致,风向偏转导致的年际变化更甚于风强度的作用,这说明驱动风场在某一方面分量的变化可能主导了渤海风生环流的年际变

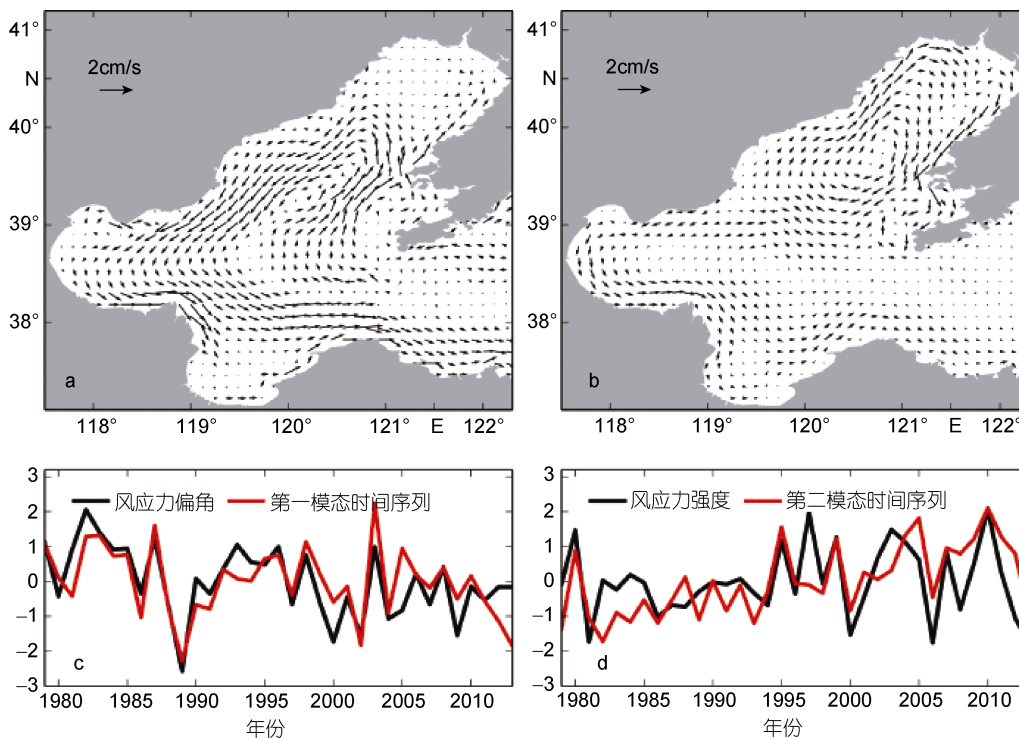


图 6 渤海冬季深度平均环流的经验正交分解(EOF)分析

Fig.6 EOF analysis on vertical averaged current of Bohai Sea in winter

a: EOF 第一模态,贡献率 37.8%; b: EOF 第二模态,贡献率 19.2%; c: 第一模态时间序列(红)及渤海冬季风应力平均方向变化(黑); d: 第二模态时间序列(红)及渤海冬季风应力平均强度变化(黑)。时间序列、风应力方向变化以及风应力强度均作归一化处理

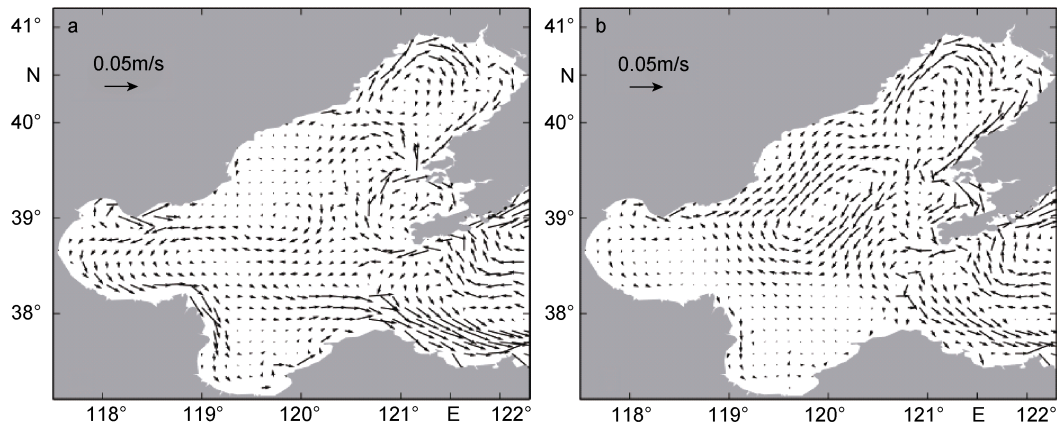


图 7 渤海冬季深度平均流

Fig.7 The ensemble mean of vertical averaged current of Bohai Sea in winter

a: 对应图 6c 中的 EOF 第一模态时间序列大于 1 的年份集合; b: 对应图 6c 中 EOF 第一模态时间序列小于 -1 的年份集合

化特征,这与以往的研究结果不同。因此选取不同时间段的风场数据作为驱动,模拟得到的渤海冬季环流特征有时并不能反映其全貌,例如,分别选取图 6c 中 EOF 第一模态时间序列大于 1 和小于 1 的对应年份得到渤海冬季深度平均环流的集合平均(图 7),与图 5d 对比可以发现,除了在辽东湾顶部和渤海海峡附近环流结果与多年平均结果相似之外,渤海其它环流特征都有改变,例如图 7a 中以东偏为主的风向变化主要对应了渤海湾和莱州湾的逆时针环流结构,沿秦皇岛外海北上的流动几近消失,中部的环流也较弱;而以西偏为主的风向变化(图 7b)对应了渤海中部较强的顺时针环流结构,此时渤海湾和莱州湾的逆时针结构基本消失。

#### 4 结论

本文利用最新的 NCEP CFSR 日平均再分析资料驱动高分辨率网格的 ROMS 区域海洋模式,对渤海环流进行了近 35 年的数值模拟,重点对渤海冬季风生环流的年际变化特征进行了研究,并初步探讨了其年际变化的来源和机制。主要结论如下:

(1) 模拟结果基本重现了已知的渤海冬季风生环流的主要特征,包括在辽东湾的顺时针环流,渤海湾南部和莱州湾的气旋式环流,以及渤海海峡北进南出的流动特点等。

(2) 对渤海冬季深度平均风生环流的 EOF 结果显示,其第一模态主要表现为一个环绕渤海中央的环流结构,第二模态为两个较弱的环流结构,一个与在辽东湾内顺时针环流有关,另一个为沿渤海湾和莱州湾沿岸的逆时针环流有关;两者的方差贡献总

计为 57.6%。

(3) 渤海冬季风生环流不但存在明显的年际变化特征,而且与渤海冬季风场的风向和强度的年际变化一致。首先,风场平均风向略偏东利于增强渤海中部逆时针的流动;其次,渤海冬季风生环流存在的线性增强趋势与风场强度增强有关;第三,从 1995 年以后,渤海冬季风生环流的年际变化幅度较之前明显增大。

通过以上研究结果,我们对渤海冬季风生环流的年际变化特征和机制有了初步的了解,并讨论了造成不同模拟结果的可能原因。研究仍然存在一些需要改进和探讨的地方,例如,缺少潮汐、沿岸径流和海冰数据等影响因素是否会对模式结果有影响,有待今后深入研究。

#### 参 考 文 献

- 万修全, 2003. 渤海冬夏季环流特征及变异的初步研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 52—56
- 万修全, 马 倩, 马伟伟, 2015. 冬季高频大风过程对渤海冬季环流和水交换影响的数值模拟. 中国海洋大学学报, 45(4): 1—8
- 马 倩, 2014. 大风作用下渤海环流和水交换的数值模拟研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 24—25
- 王 悦, 2009. 东中国海物理环境长期变化的数值模拟研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 21—30
- 王 辉, 王为民, 1994. 渤海冬季三维环流数值模拟. 青岛海洋大学学报, 24(4): 463—470
- 王国松, 高山红, 吴彬贵等, 2014. 我国近海风能资源分布特征分析. 海洋科学进展, 32(1): 21—29
- 方国洪, 王 凯, 郭丰义等, 2002. 近 30 年渤海水文和气象状况的长期变化及其相互关系. 海洋与湖沼, 33(5): 515—525
- 冯士筌, 孙文心, 1992. 物理海洋数值计算. 郑州: 河南科学

- 技术出版社, 543—601
- 毕聪聪, 2013. 渤海环流季节变化及机制分析研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 41—42
- 毕聪聪, 鲍献文, 万凯, 2015. 渤海盐度年代际变异对环流结构的影响. 中国海洋大学学报, 45(1): 1—8
- 乔璐璐, 2008. 冬季大风事件下渤海环流及泥沙输运过程研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 55—57
- 杨国金, 1999. 渤海海冰特征. 海洋预报, 16(3): 10—20
- 沈鸿书, 毛汉礼, 1964. 渤海及北黄海西部的基本水文特征. 海洋科学集刊, (增刊): 1—10
- 陆钦年, 1993. 我国渤海海域的海冰灾害及其防御对策. 自然灾害学报, 2(4): 53—59
- 赵保仁, 庄国文, 曹德明等, 1995. 渤海环流、潮余流及其对沉积物分布的影响. 海洋与湖沼, 26(5): 466—473
- 赵保仁, 曹德明, 1998. 渤海冬季环流形成机制动力学分析及数值研究. 海洋与湖沼, 29(1): 86—96
- 黄大吉, 陈宗镛, 苏纪兰, 1996. 三维陆架海模式在渤海中的应用. 潮流、风生环流及其相互作用. 海洋学报, 18(5): 1—13
- 曹振东, 娄安刚, 2011. 基于 FVCOM 的渤海冬季三维风生环流数值模拟. 中国海洋大学学报, 41(增刊): 374—378
- Fang Y, Fang G H, Zhang Q H, 2000. Numerical simulation and dynamic study of the wintertime circulation of the Bohai Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 18(1): 1—9
- Lin X P, Xie S P, Chen X P *et al*, 2006. A well-mixed warm water column in the central Bohai Sea in summer: Effects of tidal and surface wave mixing. Journal of Geophysical Research, 111(C11): C11017
- Wan K, Bao X W, Wang Y *et al*, 2015. Barotropic current fluctuations coupled with sea level drawdown in Yellow and Bohai Seas. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 33(1): 272—281, <http://dx.doi.org/10.1007/s00343-015-4056-3>
- Wang D S, Liu Q, Lv X Q, 2014. A study on bottom friction coefficient in the Bohai, Yellow, and East China Sea. Mathematical Problems in Engineering, 2014: 432529, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/432529>
- Wei H, Wu J P, Pohlmann T, 2001. A simulation on the seasonal variation of the circulation and transport in the Bohai Sea. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 19(2): 129—136
- Zhao P, Jiang W S, 2011. A numerical study of storm surges caused by cold-air outbreaks in the Bohai Sea. Natural Hazards, 59(1): 1—15

## INTERANNUAL VARIATION AND FORMATION OF WIND-DRIVEN CURRENTS OF BOHAI SEA IN WINTER

MA Wei-Wei<sup>1</sup>, WAN Xiu-Quan<sup>1,2</sup>, WAN Kai<sup>3</sup>

(1. Department of oceanography, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography MOE China, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. North China Sea Marine Engineering Prospecting Institute, North China Sea Branch of State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China)

**Abstract** Based on the high-resolution ROMS (Regional Ocean Modeling System) model with daily wind-forcing data provided by NCEP CFSR, we conducted a numerical simulation on 35-year-long wind-driven circulation in winter in Bohai Sea, North China. Empirical Orthogonal Function (EOF) decomposition was applied to the vertical averaged currents. The results indicate that the change in wind forcing plays a major role in the interannual variation of the winter circulation system. Firstly, change in wind direction is significantly related with the 1st EOF mode and has an impact on the cyclonic structure of currents in the central Bohai Sea. Secondly, the increase of wind strength is related with the 2st EOF mode and may result in an increasing trend of currents of Bohai Sea in winter, especially from 1995. Therefore, change in wind direction affects more the interannual variation of wind-driven current than change in wind strength does.

**Key words** Bohai Sea; wind-driven current; winter; ROMS; numerical simulation; interannual variation