

# 渤海海峡水交换多时间尺度变化特征研究\*

冀承振<sup>1,2</sup> 黎舸<sup>1,2</sup> 于博<sup>1,2</sup> 董琳<sup>1,2</sup> 刘清容<sup>1,2①</sup>

(1. 国家海洋局北海预报中心 青岛 266061; 2. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室 青岛 266061)

**摘要** 基于长时间的 FRA-JCOPE 数据, 本文着重对渤海海峡水交换的多时间尺度变化特征进行了分析。通过分析认为, 渤海海峡水交换具有明显的季节(360 天和 180 天周期)、季节内(120 天周期)和年际变化特征, 且空间分布呈现较为明显的“南出北进”特点。360 天季节变化特征表现为夏强冬弱, 局地风场、海峡两侧海表高度梯度、陆地径流的季节变化对其具有重要影响; 180 天周期的季节变化和 120 天周期季节内变化信号与局地风场关系不大, 主要受到海峡两侧海表高度梯度的调制。同时, 渤海海峡水交换受 1997—1998 年 ENSO 影响较为显著: 正常年份时, 渤海海峡水交换流入、流出量基本相当, 但当 1997—1998 年 ENSO 显著年份时, 流出量略大于流入量, 这是由于黄渤海环流增强, 进而导致渤海海峡水交换增强造成的。

**关键词** 水交换; 季节内变化; 季节变化; 年际变化; 渤海海峡

**中图分类号** P731 **doi:** 10.11693/hyhz20180400079

渤海海峡是我国第二大海峡, 北起辽东半岛南端的老铁山角, 南至山东半岛北端的蓬莱角, 宽度约 106km, 是连接我国渤海与黄海的唯一通道。渤海海峡有大小水道十余条, 水交换情况复杂, 渤海海峡水交换在一定程度上会影响渤海环流, 同时渤海环流也在一定程度反调制渤海海峡水交换。

一直以来, 关于渤海环流状况的大量观测与研究表明, 渤海环流具有明显的三维结构(Zhao *et al.*, 1993; 黄大吉等, 1996), 潮流余流、风生、热盐环流以及径流等是影响渤海环流的四大主导因素(王强, 2004)。相对的, 人们对渤海海峡水交换特征研究较少, 且争议较多。Guan(1994)、Cheng 等(2004)等认为渤海海峡环流有北进南出的特点; 魏泽勋等(2003)利用 POM 模式研究指出渤海海峡夏季的水交换总体也表现为北进南出, 主要由密度流引起; 王桂芝等(2002)根据渤海潮流、环流和悬沙浓度特征, 认为黄海水由渤海海峡北部输入渤海, 在渤海循环后, 又经由渤海海峡南部返回黄海; 袁柱翰(1997)也认为渤海海峡交换有北进南出的特点, 89%的交换量发生在老铁山水

道; 张志欣等(2010)利用 1932—2005 年的海洋综合调查资料以及渤海常规断面等海洋盐度资料分析指出冬季渤海海峡呈现显著“北进南出”水交换态势, 夏季渤海海峡定常流方式的水交换特征不明显。同时也有一些不同的看法, 如魏皓等(2001)通过模拟指出, 渤海环流冬强夏弱, 但其夏季环流模拟结果在渤海海峡处并不表现为北进南出, 在表层甚至表现为南进北出; 林霄沛等(2002)采用 ROMS 模式重点分析渤海海峡温度结构和水交换, 发现渤海海峡水交换有明显的季节特征。

针对渤海海峡处北进南出的流场特点, 其解释也不一致。赵保仁等(1998)指出, 这是由冬季季风与北深、南浅的地形共同作用的结果; 黄大吉等(1998)指出, 潮、风和温盐对渤海夏季环流贡献均很大, 渤海海峡处的水交换以密度流为主, 此外, 大风天气过程(万修全等, 2015)、黄海暖流的强弱(曲立新, 2014)也会对渤海海峡水交换产生影响。

以上研究对渤海海峡水交换空间分布特征进行了详细阐述, 但对其时间变化特征研究却较少。渤海

\*国家重点研发计划项目, 2016YFC1402000 号; 国家自然科学基金项目, U1706216 号; 海洋公益性行业科研专项项目, 2013418031 号。冀承振, 硕士, E-mail: jichengzhen@126.com

通信作者: 刘清容, 高级工程师, E-mail: liuqr2002@163.com

收稿日期: 2018-04-04, 收修改稿日期: 2018-07-13

海峡水体交换, 是调节渤海内部环流, 影响渤海水体循环周期及渤海碳循环的关键因子, 对于深入研究渤海区海洋动力过程及渤海区海洋地质、化学及生物研究具有重要意义。本文基于长时间的 FRA-JCOPE 数据, 着重讨论渤海海峡水交换的季节、季节内以及年际变化特征。

## 1 数据介绍

本文利用 FRA-JCOPE 数据(数据集下载地址: <http://apdrc.soest.hawaii.edu/las/v6/constrain?var=2164>), 对渤海海峡水交换多时间尺度变化特征进行了初步探究。FRA-JCOPE 数据是基于 POM 模式, 同化了沿轨海表面高度异常数据(沿轨海表面高度异常数据采用 1992 年 12 月到 2002 年 1 月的 TOPEX/Poseidon 和 ERS-1 卫星数据及 2002 年 1 月到 2008 年 1 月的 Jason-1 and Geosat Follow-On 卫星数据), 海表面温度数据(海表面温度数据采用的是 Advanced Very High Resolution Radiometer/Multi-Channel Sea Surface Temperature 产品数据), 垂向温盐剖面数据(垂向温盐剖面数据由 Global Temperature-Salinity Profile Program 提供)等模拟得到的。POM 模式使用了单向离线嵌套的方法, 由风应力和热盐通量进行驱动, Miyazawa 等(2009)给出了该套数据集模拟用到的风场、热盐通量场的详细配置情况, 以及该数据集的模拟性能评估。

本文选取了 1992 年 1 月 1 日到 2006 年 1 月 1 日时间跨度的数据, 包括水平流速、海表高度数据。空间分辨率为  $1/12^\circ$ , 时间分辨率为 1d, 水平流速垂向选取 0m、5m、10m 及 50m 四个深度, 为了研究方便, 对流速进行坐标转换和垂向线性插值, 本文选取蓬莱到老铁山东角的连线作为渤海海峡断面(BS 断面, 图 1), 通过计算, 该断面与正东方向的夹角  $\alpha$  为  $76.4^\circ$ , 通过坐标变换, 将水平流速转换为垂直于断面方向的流速  $u_T$  和沿断面方向的流速  $u_L$  (在此规定垂直于断面指向渤海的方向为正, 沿断面方向流速指向老铁山方向为正), 即:

$$\begin{cases} u_T = -u \cdot \sin \alpha + v \cos \alpha \\ u_L = u \cdot \cos \alpha + v \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

这样, 通过坐标变化就得到了垂直于断面和沿断面方向的流速。同时, 选取渤海海峡两侧海表面高度, 对其进行区域平均后, 得到海峡两侧海表高度梯度的时间序列; 本文对海面风场数据也进行了分析, 海面风场数据来自于美国国家环境预报中心和国家

大气研究中心的 NCEP-NCAR 再分析日平均数据, 空间分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 其时间跨度同流速数据, 选取黄渤海(经度  $117^\circ$ — $124^\circ$ E, 纬度  $36^\circ$ — $41^\circ$ N)范围的风场数据, 进行同流速方法的坐标转换, 然后进行逐日全场平均, 得到垂直于渤海海峡断面的平均风场(以下称为局地风场)的时间序列。

同时本文对渤海海峡流量和净流量作了定义, 将某时刻  $t$  在 BS 断面  $x$  截面处, 渤海海峡流量定义为:

$$\text{Trans}(y, t) = \iint_{\Sigma} u_T(x, y, z, t) dx dz \quad (2)$$

式中,  $u_T$  为垂直于 BS 断面的流速。渤海海峡净流量定义为:

$$T = \text{Trans}_{in} + \text{Trans}_{out}, \quad (3)$$

其中,  $\text{Trans}_{in}$  代表从黄海通过渤海海峡进入渤海的流量,  $\text{Trans}_{out}$  代表渤海流出到黄海的流量。

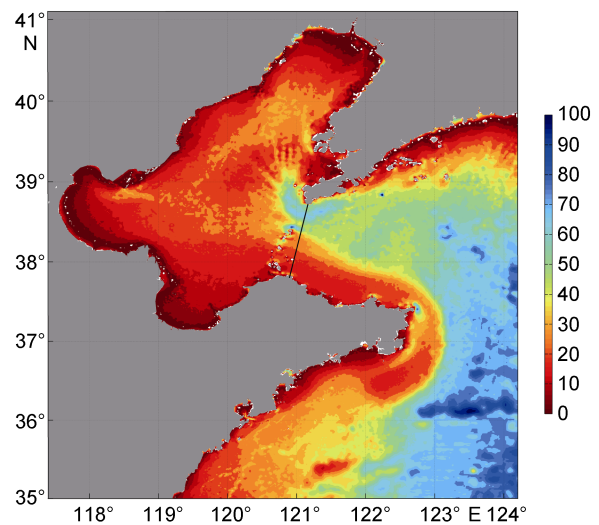


图 1 BS 断面(黑色实线)图示, 底图颜色代表水深(单位: m)  
Fig.1 The section of the Bohai Strait (the black dash line) and the depth (contour)

## 2 结果与分析

### 2.1 流量时间序列及气候态平均

图 2 给出了渤海海峡流入量、流出量及净流量的时间序列, 红色实线为 30 天滑动平均后的结果。对流入而言, 夏季的流入量要明显大于冬季, 多年平均流入量达  $4.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 与林霄沛等(2002)模拟结果基本一致; 对流出而言, 夏季的流出也要比冬季更加活跃, 多年平均流出量达  $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 略大于流入量。流出和流入的时间变化特征决定了净流量的变化特

征, 多年平均来看, 净流以流出为主, 平均净流量为  $7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这是由于渤海属于内海, 海水流出只有渤海海峡一个通道, 但其流入除了渤海海峡处黄海水

入侵外, 还有黄河、海河等陆地径流的注入, 据统计, 黄河、海河等河流年平均径流量总共约为  $4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ , 这与渤海海峡多年平均净流量值基本吻合。

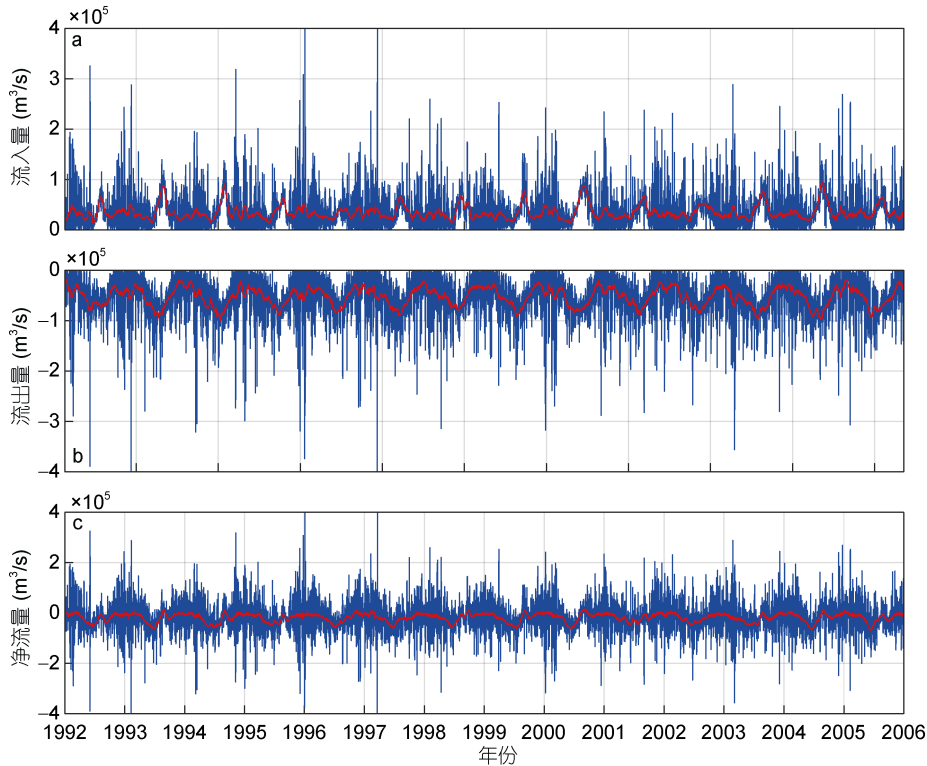


图2 渤海海峡流入量(a)、流出量(b)与净流量(c)的时间变化序列(蓝线), 红线为30天滑动平均后的结果

Fig.2 The time series (blue line) of the inflow (a), outflow (b), and net flow (c) of the Bohai Strait. Red lines indicate 30-day smoothed time series

从BS断面气候态平均的结果来看(图3, 横坐标表示以蓬莱为原点, BS断面上的点到蓬莱的距离), 渤海海峡水流量大体呈现“北进南出, 上强下弱”的态势。入流区主要集中在距离90—100km, 水深5—40m(图3)的范围内, 即老铁山水道以北的区域, 局地入流量最大达到  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 出流区则覆盖了整个渤海海峡表层区域, 其中在渤海海峡北侧仅存在表层5m范围内, 在渤海海峡南侧, 出流区则一直从表层延伸到底层, 局地出流量最大达到  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。从强度来看, 由于表、中层流速远远大于底层流速, 因此底层流量相对于表层要弱很多。

## 2.2 季节内变化特征

图4a给出了渤海海峡净流量的功率谱分析结果。从中可以看出, 渤海海峡净流量变化存在三个比较明显的变化信号, 分别为120d周期的季节内变化信号, 以及360d和180d周期的季节变化信号。有研

究指出, 局地风场(万修全等, 2015)以及热盐效应(林霄沛等, 2002)等是控制海峡水体交换的关键因子。图4b和4c给出了局地风场以及海峡两侧海表高度梯度的功率谱分析。对于120d季节内变化信号而言, 通过对比发现, 海峡两侧海表高度梯度同样具有120d变化周期, 而局地风场不具有, 由此可以认为渤海海峡120d周期变化信号主要受到海峡两侧海表高度梯度120d变化的影响, 与局地风场的相关性不大。

## 2.3 季节变化特征

由图4a可以看出渤海海峡流量具有明显的360d和180d季节变化特征, 其中360d变化周期除了受冬季黄渤海盛行的西北风的调制外, 还受到海峡两侧海表高度梯度的影响, 当然, 陆地径流的季节变化对其也有重要影响。对180d的季节内变化信号而言, 通过对比局地风场和海峡两侧海面高度梯度的功率谱, 可以看出海峡两侧海面高度梯度也都具有180d的周

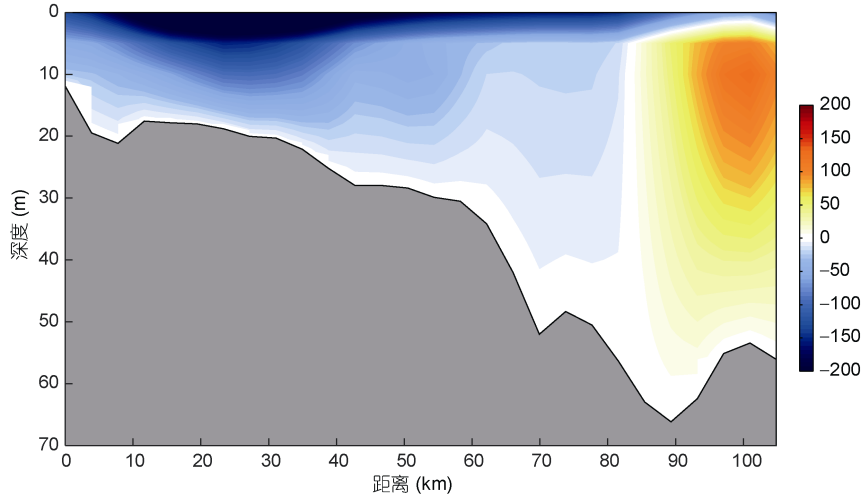


图 3 BS 断面流量(单位:  $m^3/s$ )气候态平均

Fig.3 The climate-averaged results of the flux (unit:  $m^3/s$ ) across the Bohai Strait (as shown in the black line in Fig.1), the positive means flowing to Bohai from the Yellow sea and the negative is contrary  
注: 正值代表由从黄海流入渤海, 负值代表从渤海流出到黄海

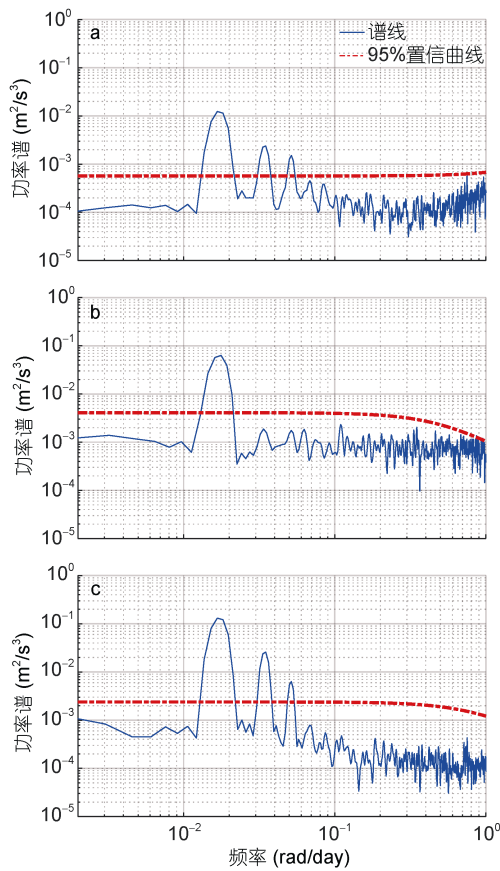


图 4 渤海海峡净流量(a)、局地风场(b)以及海峡两侧海面高度梯度(c)的功率谱分析

Fig.4 The spectrum of the net flow flux (a), the local wind (b) and the difference of sea surface height on both sides of the strait

注: 子图 a 中过置信曲线的三个峰值从左到右分别对应 360 天、180 天和 120 天周期

期信号, 而局地风场不具有。王彩霞等(2016)也指出黄渤海海域的风场时间分布上西北风具有准 1 年的显著周期, 东北风具有准半年的显著周期, 这与本文风场(垂直于渤海海峡断面的风场)的功率谱结果一致, 通过对比可以认为渤海海峡净流量 180d 周期的季节内变化信号主要受到海峡两侧海面高度梯度的调制, 与局地风场相关性不大。

图 5 给出了渤海海峡流入量、流出量和净流量气候态平均的季节变化, 从图中可以看出, 渤海海峡净流呈现出“夏强冬弱”的变化特征, 且无论在哪个季节, 流出量始终要大于流入量。水流出在夏季(7—8 月份)达到最大值, 接近  $8.0 \times 10^4 m^3/s$ , 最小值出现在冬季(12 月份), 为  $3.3 \times 10^4 m^3/s$ ; 水流入在 8 月份达到峰值, 为  $6.4 \times 10^4 m^3/s$ , 最小值出现在 6 月份, 为  $2.1 \times 10^4 m^3/s$ ; 净流常年表现出为流出, 峰值出现在夏季(6 月份), 达到  $5.0 \times 10^4 m^3/s$ , 最小值出现在冬季(1 月份), 为  $3 \times 10^3 m^3/s$ 。

从渤海海峡断面流量的季节变化(图 6)来看, 冬季渤海海峡水交换呈现北进南出型, 但出流区和入流区都强度都较弱。出流区主要集中在山东半岛沿岸区域, 随着时间的推移, 出流区在表层有逐渐向北扩展的趋势; 入流区则主要集中在北部的老铁山水道附近。到了春季, 已不是单纯的南出北进的格局, 随着时间的推移, 出流区在表层进一步向北扩展, 其厚度也在不断的增加, 至五月份完全占领近表层区域, 此时的入流区逐步萎缩, 最后仅在老铁山水道以北区域存在。夏季渤海海峡水交换达到最活跃的状态。

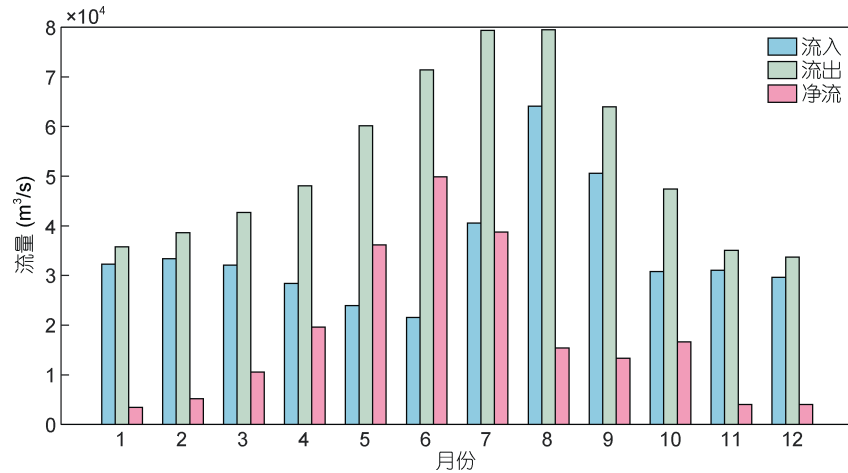


图5 渤海海峡流入量、流出量和净流量气候态平均的季节变化图

Fig.5 The climate-mean seasonal variation of the inflow, outflow and net flow in the Bohai Strait

6 月份海峡的水交换近表层以深, 几乎全为出流, 到 7 月份海峡北部出流区消失。7 月份后, 海峡北部从表层到底层都是入流区, 入流核心出现在 50m 层以上, 底层的入流比较弱, 海峡南部的强出流区依然强盛。到了秋季, 9 月份南出北进的态势依然强盛, 进入 10 月份后, 强度均有所下降, 且在表层出流区逐渐向

南移动, 到 11 月份, 强度进一步降低, 底层水交换近乎消失, 仅在上层保存有微弱的出流区和入流区。

#### 2.4 年际变化特征

图 7 给出了 1992—2006 年渤海海峡流量的月平均变化图。流入量的变化大致分为三个阶段, 1992—1998 年流入量处于较低较稳定水平, 约为  $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

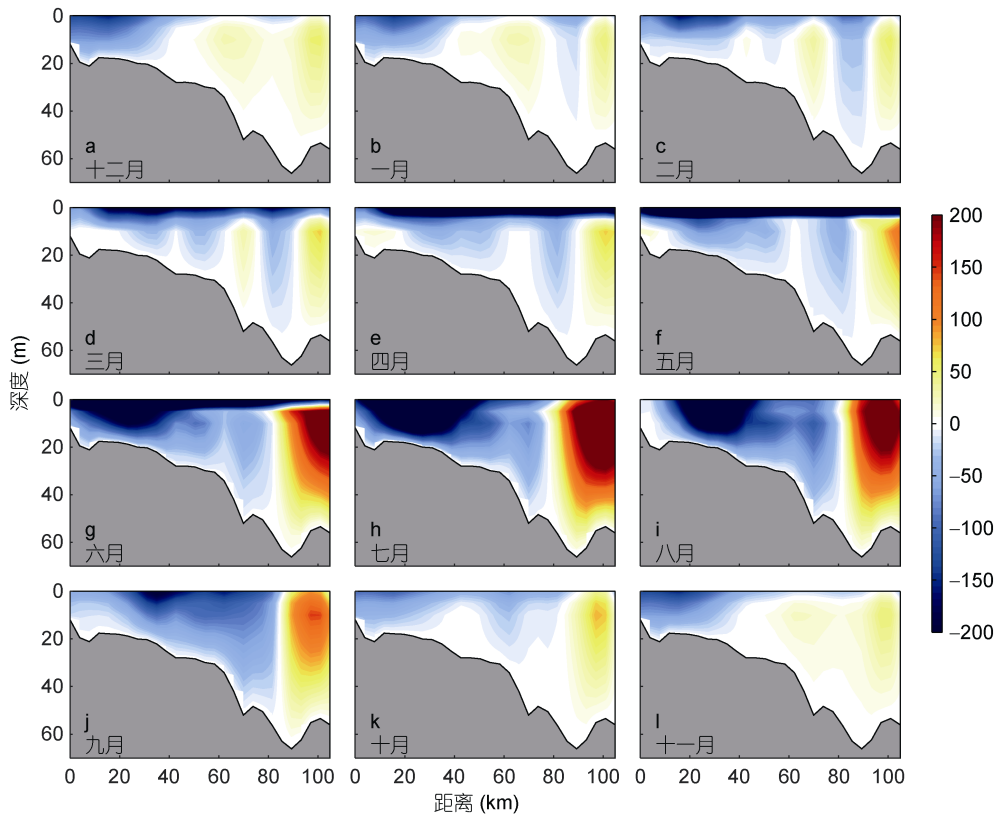


图6 BS 断面流量(单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ )季节变化图

Fig.6 The seasonal variations of the flux (unit:  $\text{m}^3/\text{s}$ ) across the Bohai Strait (as shown in the black line in Fig.1)

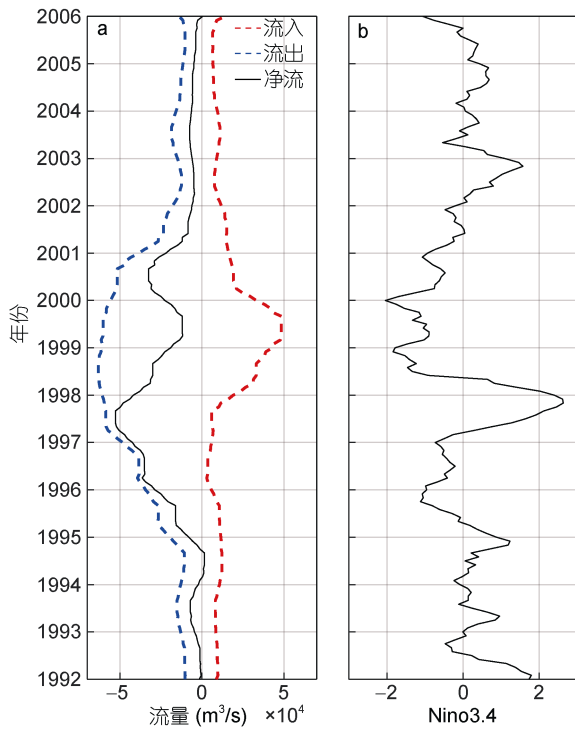


图 7 1992—2006 年渤海海峡净流量月平均变化(a)与 Nino3.4 变化图(b)

Fig. 7 (a) Monthly-mean variation of the inflow, outflow, and net flow in the Bohai Strait from 1992—2006; (b) the plot of Nino 3.4

在 1998—2000 年出现一个峰值, 最大值达到  $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 随后在 2001—2006 年又恢复到 1992—1998 年的水平; 相对应的, 流出量的变化也分为三个阶段, 1992—1995 年流出量处于较低较稳定水平, 约为  $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1995—2002 年流出量有所增加, 在 1999 年时达到极值, 约为  $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 随后恢复到 1992—1995 年的水平。

渤海海峡水交换的年际变化与黄渤海环流的年际变化密不可分。图 8 给出了 1997—2000 年黄渤海环流图, 流速进行了深度平均。在海峡的北部区域(即老铁山水道以北)一直有一支从黄海流入渤海的海流, 在 1999—2000 年时流速达到最大值, 与流入量达到最大值相吻合; 在海峡中部及南部海域, 海水从渤海流入黄海, 与其他年份相比, 在 1997—2000 年流速相对较大, 决定了其流出量比其他年份要大许多。这大多是由于 1997—1998 年的 ENSO 事件使黄渤海环流增强, 进而导致了渤海海峡水交换的增强。

### 3 结论

基于长时间的 FRA-JCOPE 数据, 本文研究了渤海海峡水交换多时间尺度变化特征。结果表明, 渤海海峡水交换具有明显的季节(360 天和 180 天周期)、

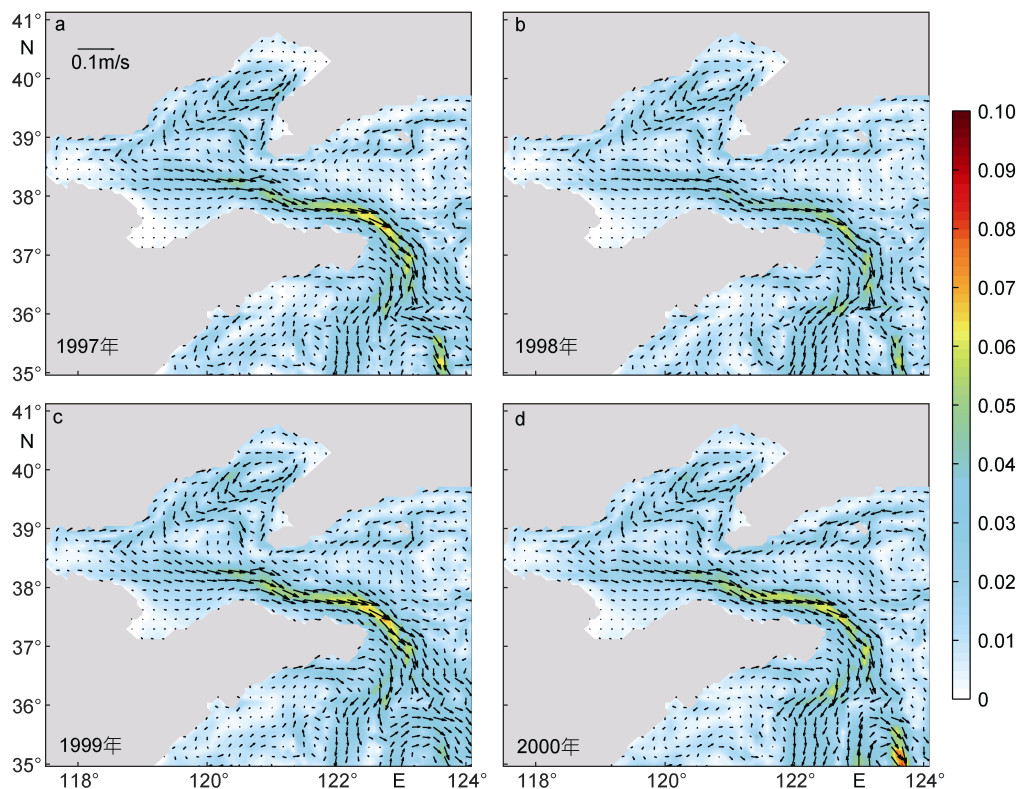


图 8 1997—2000 年黄渤海环流图(流速进行深度平均, 单位: m/s)

Fig. 8 The depth-mean circulation in the Bohai and North Yellow sea from 1997 to 2000

季节内(120 天周期)和年际变化特征,且空间分布呈现较为明显的“南出北进”特点。从海峡流量多年平均来看,流出量达  $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 流入量为  $4.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 净流以流出为主,主要受到黄河等陆地径流的流入影响。从功率谱的分析可以看出,海峡流量有明显的 360 天和 180 天季节变化周期,及 120 天的季节内变化周期;360 天季节变化特征表现为夏强冬弱,局地风场、海峡两侧海表高度梯度、陆地径流的季节变化对其具有重要影响;180 天周期的季节变化信号和 120 天季节内变化信号则主要受到海峡两侧海表高度梯度的调制,与局地风场关系不大。同时,渤海海峡水交换受 1997—1998 年 ENSO 影响较为显著,正常年份时,渤海海峡水交换流入流出量基本相当,但当 1997—1998 年 ENSO 显著年份时,黄渤海环流增强,进而导致了渤海海峡水交换增强。

### 参 考 文 献

- 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
- 王强, 2004. 渤海环流的季节变化及浮游生态动力学模拟. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 21—32
- 王桂芝, 高抒, 2002. 黄渤海水体交换、悬沙特征及其对渤海海峡沉积的影响. 海洋通报, 21(1): 43—48
- 王彩霞, 黄纯玺, 侯天宇, 2016. 黄渤海海域风场时空特征分析. 地球, (3): 420—421
- 曲立新, 2014. 黄渤海环流对冬季大风过程的响应机制研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 67—83
- 张志欣, 乔方利, 郭景松等, 2010. 渤海南部沿岸水运移及黄海水体交换的季节变化. 海洋科学进展, 28(2): 142—148
- 林霄沛, 吴德星, 鲍献文等, 2002. 渤海海峡断面温度结构及流量的季节变化. 青岛海洋大学学报, 32(3): 355—360
- 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
- 袁柱瀚, 1997. 渤海海峡水交换的研究. 青岛: 青岛海洋大学硕士学位论文, 22—26
- 黄大吉, 苏纪兰, 张立人, 1998. 渤海冬夏季环流的数值研究. 空气动力学学报, 16(1): 115—121
- 黄大吉, 陈宗镛, 苏纪兰, 1996. 三维陆架海模式在渤海中的应用: I. 潮流、风生环流及其相互作用. 海洋学报, 18(5): 1—13
- 魏皓, 武建平, Pohlmann T, 2001. 渤海环流与输运季节变化的数值模拟(英文). 黄渤海海洋, 19(2): 1—9
- 魏泽勋, 李春雁, 方国洪等, 2003. 渤海夏季环流和渤海海峡水体输运的数值诊断研究. 海洋科学进展, 21(4): 454—464
- Cheng P, Gao S, Bokuniewicz H, 2004. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis. Estuarine, Coastal and shelf Science, 60(2): 203—212
- Guan B X, 1994. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas. In: Zhou D, Liang Y B, Zeng C K eds. Oceanology of China Seas. Dordrecht: Springer, 17—26
- Miyazawa Y, Zhang R C, Guo X Y *et al*, 2009. Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. Journal of Oceanography, 65: 737—756
- Zhao J P, Shi M C, 1993. Numerical modelling of three-dimension characteristics of wind-driven current in the Bohai Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 11(1): 70—79

## THE MULTI-TIME SCALE VARIATIONS OF WATER EXCHANGE ACROSS THE BOHAI STRAIT

JI Cheng-Zhen<sup>1,2</sup>, LI Ge<sup>1,2</sup>, YU Bo<sup>1,2</sup>, DONG Lin<sup>1,2</sup>, LIU Qing-Rong<sup>1,2</sup>

(1. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, China)

**Abstract** Based on the long-term FRA-JCOPE data, we studied the multi-time scale variations of water exchange across the Bohai Strait. Results revealed distinct characteristics of seasonal (360 and 180d), intraseasonal (120d), and interannual variations of the water exchange. The water flows into the Bohai Sea via the northern Bohai Strait and flows out via the southern Bohai Strait. The water exchange is strong in summer and weak in winter. Seasonal variations of local wind, sea surface height on both side of the strait, and the in-bay rivers are the main factors on the water exchange. The periods of 180 d and 120d are controlled by the sea surface height change. Meanwhile, the 1997—1998 ENSO event considerable enhanced the circulation between the Bohai Sea and the Yellow Sea, and so did the water exchange.

**Key words** water exchange; intraseasonal variation; seasonal variation; interannual variation; the Bohai Strait