

南黄海涡动能及其谱特征的季节性变化

张菀伦^{1,2}, 刘志亮¹, 王世红^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点开放实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为进一步了解南黄海涡动能的季节变化特点, 本文利用气候态月平均数据分析了南黄海涡动场的季节性变化规律, 并通过计算动能通量谱探讨了相关的变化机制。结果显示, 南黄海涡动能在季节性变化尺度上存在双峰结构, 9月和1月各存在一个峰值, 9月峰值较大, 1月峰值较小。而且, 上半年南黄海存在的涡主要为经向伸长, 下半年主要为纬向伸长。动能通量谱的计算结果显示, 9月存在的涡动能峰值主要是斜压不稳定过程直接作用的结果, 而1月的峰值主要与涡涡相互作用相关。本文从一个新的角度(涡动能)对南黄海进行了探究, 有利于加深人们对该海域海水动力机制的认识。

关键词: 南黄海; 涡动能; 动能通量谱

中图分类号: P733.1 文献标识码: A

DOI: 10.11759/hyxx20160318002

文章编号: 1000-3096(2017)03-0130-08

南黄海由山东半岛、苏北平原和朝鲜半岛所包围, 是以山东半岛的成山头与朝鲜半岛的长山串连线为北界, 以长江口至济州岛连线为南界的半封闭海域, 总面积 30 多万平方公里, 平均水深 46 m。黄海环流主要受大气变动产生的风应力、潮余流、海面热交换、周边河流的淡水输入以及海区南部开边界等条件的影响^[1-2]。南黄海紧连我国大陆, 并且沿海分布有很多我国重要的渔场、生态资源丰富, 因此南黄海的水文状况对我国沿海生态环境及经济发展有重大影响。南黄海环流存在明显的季节性变化, 冬、夏季环流的基本形态有很大差别。冬季环流基本上是由南黄海中部北上的黄海暖流与其两侧向南的沿岸流所组成, 黄海暖流及其余脉分别与东西沿岸流之间形成反气旋和气旋式环流^[3-4]。而黄海夏季环流一般认为是以热盐环流为主要成分。每当夏季来临, 逐渐产生与黄海底层冷水团相适应的黄海夏季环流, 其水平环流主要表现为上层气旋式边缘环流^[5-12]。一般认为, 该水平环流在靠近我国大陆一侧大约沿 40~50 m 等深线向南流动。而在 40 m 以浅海域, 刘志亮等^[13]认为存在风驱的北向流, 并且该观点已基本被接受^[14]。南黄海环流的季节变化, 必然与该海域不同运动尺度间能量的传输过程密切相关。本文的目的是对南黄海涡动能的季节变化特征进行分析, 并讨论相关的变化机制。

1 研究区域及数据来源

为减小边界以及周边淡水输入的影响, 并包含

沿 40~50 m 等深线热盐环流及南黄海涡场的主要信号, 本文所选择的研究区域为 33.5~35.7°N, 121.5°~124.1°E 的范围(图 1 黑框中所标出的区域)。

由于近海捕捞作业等因素的影响, 使得近海海流的直接观测很困难, 长时间的连续观测资料更是稀少, 因此对近海环流的研究常常采用模式数据。为研究南黄海涡场的季节性变化及不同尺度涡之间的能量运输, 本文流场和温度场数据采用的是区域海洋模式 ROMS(Regional Ocean Modeling System)^[15]输出的在东中国海气候态模拟的结果(模式模拟区域如图 1)。该模式以大气风场(QuikSCAT 风应力)和热通量(COADS 热通量)为主要外强迫场, 考虑 M2、S2、O1、K1 等 10 个影响黄海环流的主要分潮, 采用美国海军 1/12°太平洋海盆模拟结果为边界条件进行气候态模拟。模式水平分辨率为 1/12°, 垂直方向分为 26 层。

图 2a、图 2b 分别为夏季垂向平均的黄海环流模拟结果和刘志亮等^[13]利用夏季 ADP 实测资料给出的南黄

收稿日期: 2016-03-18; 修回日期: 2017-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(41276026); 中国科学院战略先导专项(XDA11020301)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41276026; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA11020301]

作者简介: 张菀伦(1990-), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 从事中国近海环流研究, 电话: 13730920942, E-mail: wanlunzh@126.com; 刘志亮(1977-), 通信作者, 男, 山东潍坊人, 副研究员, 从事中国近海环流研究, 电话: 0532-82898840, E-mail: zhlliu@qdio.ac.cn

海环流模式概念图。两图对比可以看出模拟结果与刘志亮等^[13]的结果比较吻合,说明模拟结果较为可信。

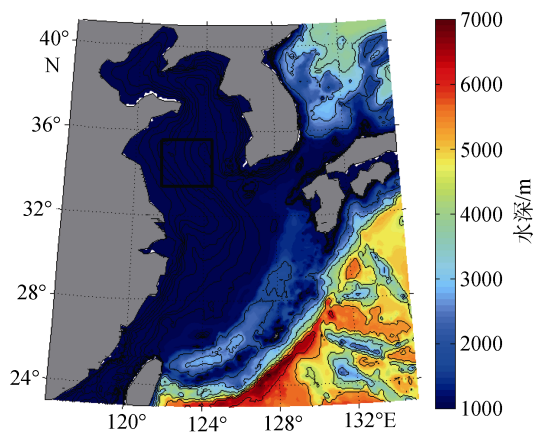


图1 模式模拟区域(水深数据来自于ETOPO5)

Fig. 1 Model domain (topography data derived from ETOPO5)

2 南黄海涡动能季节性变化

为研究南黄海涡动能季节性变化的特点,我们首先对整个研究区域的涡动能 E (Eddy Kinetic Energy, EKE) 进行平均。涡动能由纬向速度 u 和经向速度 v 计算得出:

$$E = (u'^2 + v'^2) / 2 \quad (1)$$

其中 $u' = u - \bar{u}$, $v' = v - \bar{v}$, \bar{u} 和 \bar{v} 分别是纬向速度 u 和经向速度 v 的年平均值。

图3绘制的是区域平均的涡动能的时间序列,从图中可以看出全年涡动能呈现一个双峰值的结构,峰值分别出现在冬季和夏季,最大峰值出现在9月,约为 $1.34 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}^2$,次峰值出现在1月;最低值出现在5月,约为 $1.34 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}^2$,最大值与最小值几乎相差一个量级,差值大约为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}^2$ 。

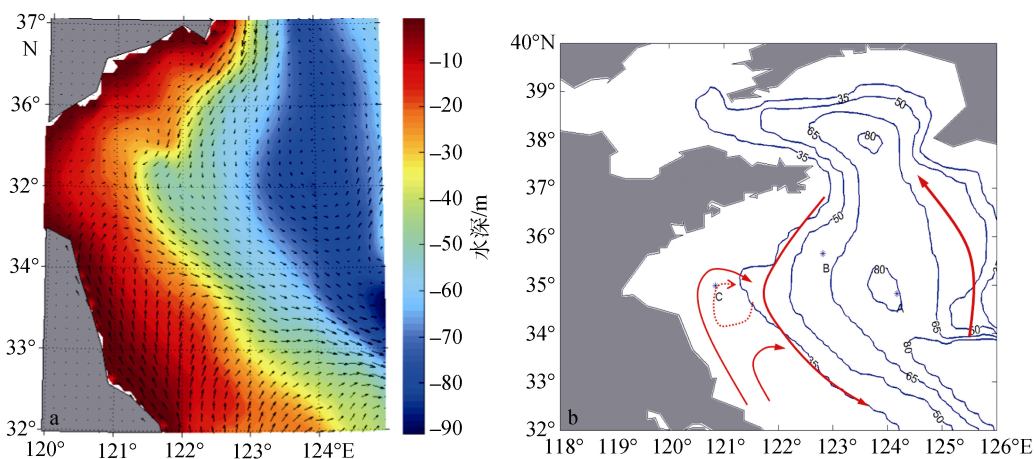


图2 夏季垂向平均的南黄海环流模拟结果(a)以及环流模式概念图(b^[13])

Fig. 2 Vertically averaged current in summer (a) and the conceptual current model (b^[13])

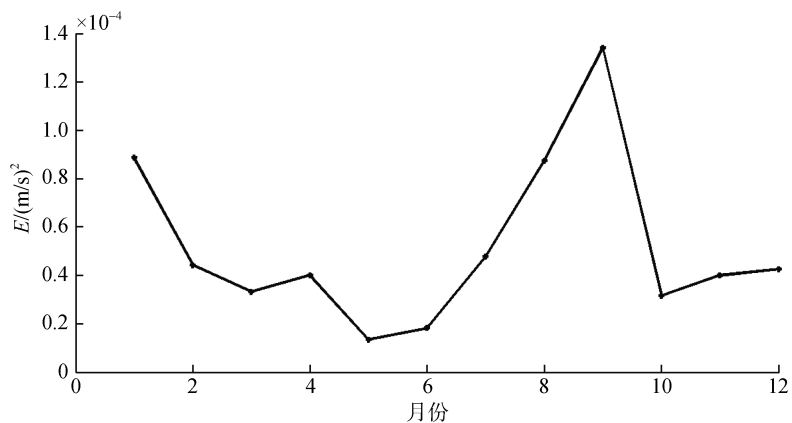


图3 EKE 的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of EKE

为了更好地研究南黄海涡动能在不同方向上的分布特征,我们计算了该区域气候态月平均的 EKE 能量谱密度 $\bar{E}(k_x, k_y, t)$ (图 4), 其中 k_x 是纬向波数, k_y 是经向波数, t 是月份。

图 4 显示了 1 月~6 月(除 3 月外)涡信号在 k_y 上

比在 k_x 上有更大的能量水平, 表明这段期间涡更多的是经向伸长。然而, 7 月~12 月涡信号在 k_x 上有较大的能量水平, 表明这段期间涡更多的是纬向伸长。从整个 $\bar{E}(k_x, k_y, t)$ 的量值上来看, 在 9 月和 1 月涡动能有较高水平, 这与图 3 相符。

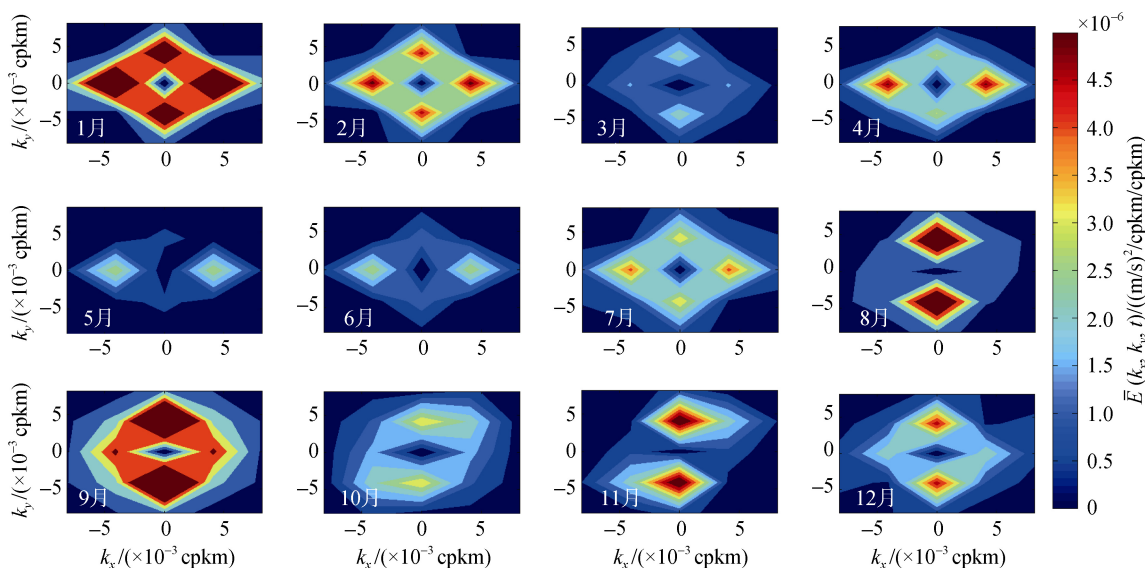


图 4 月平均 EKE 能量谱密度

Fig. 4 Monthly EKE power spectral density

为观察不同方向上涡动能所占总涡动能的比例, 本文利用 Qiu^[16]定义的两类涡动能, 计算了经向伸长的涡动能 $E_m(k_x > k_y)$ 和纬向伸长的涡动能 $E_z(k_x < k_y)$, 如公式(2)和公式(3)所示, $\Delta k = 1 / N \Delta x$ cpkm (cycles per kilometer), Δx 为网格间距, N 是每个方向上的格点数 (本文中 $N=32$)。水平波数矢量 $(k_x, k_y) = 2\pi(m / L_x, n / L_y)$, $m, n \in [-32, 32]$ 。

$$E_z = \sum_{k_y > k_x} \bar{E}(k_x, k_y, t) \Delta k^2 \quad (2)$$

$$E_m = \sum_{k_x > k_y} \bar{E}(k_x, k_y, t) \Delta k^2 \quad (3)$$

图 5 绘制了纬向伸长的涡动能和经向伸长的涡动能之差与总涡动能的比值 $(E_z - E_m) / E$, 表示的是纬向伸长或经向伸长涡动能所占总涡动能的比例。

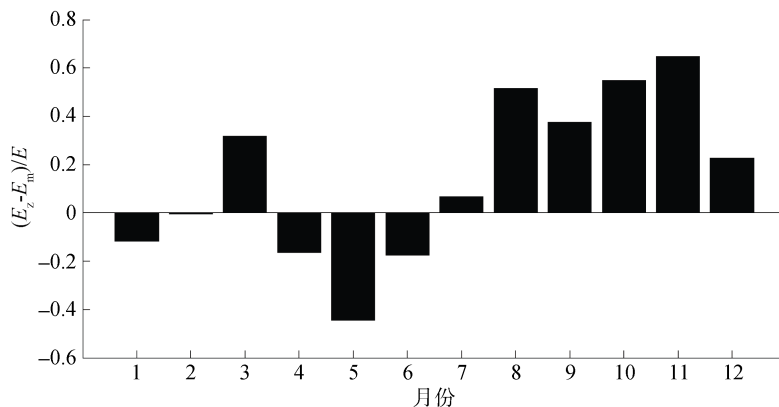


图 5 纬向伸长或经向伸长涡动能所占全部涡动能的比例

Fig. 5 Measure of proportion of zonally elongated EKE vs. meridionally elongated EKE

如果 $(E_z - E_m)/E > 0$ ，则表示该阶段涡动能更多的是纬向分布，反之则更多的是经向分布。经向伸长的涡主要为刚产生的涡，纬向伸长的涡主要是经过了非线性涡涡相互作用调制后的涡^[16]。

从图 5 上来看，1月~6月(除3月外) $(E_z - E_m)/E < 0$ ，上半年涡动能更多的是经向分布，并在5月达到该期间的最大值，之后开始减小，并在6月之后情况开始翻转；7月~12月 $(E_z - E_m)/E > 0$ ，更多的涡出现在 k_y 上，说明下半年涡动能更多的是纬向分布，并在11月达到该段时间的最大值。但是，3月份的情况比较例外，我们目前还不能解释它的原因。

在接下来两个部分，本文将探讨涡动能的这种特性分别与斜压不稳定和涡涡相互作用(不同尺度涡动之间能量的传输)之间的关系。

3 涡动发展与斜压不稳定

为了探讨南黄海 EKE 存在双峰结构的机制，本部分分析了南黄海斜压结构(与斜压不稳定过程相关)与 EKE 的变化关系。图 6 和图 7 分别是利用 ROMS 模式气候态月平均数据绘制的本文研究区域在 35°N 处全年温度剖面图和平均经向流的速度剖面图。二者在夏季与冬季存在着明显不同的结构特征：夏季

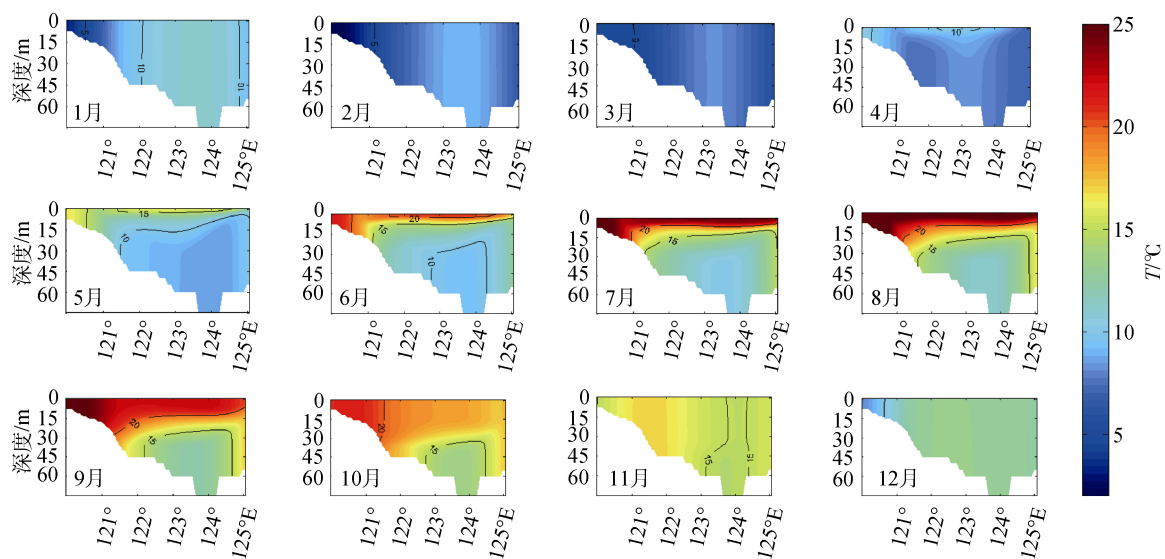


图 6 35°N 气候态月平均温度剖面图
Fig. 6 The section of temperature at 35°N

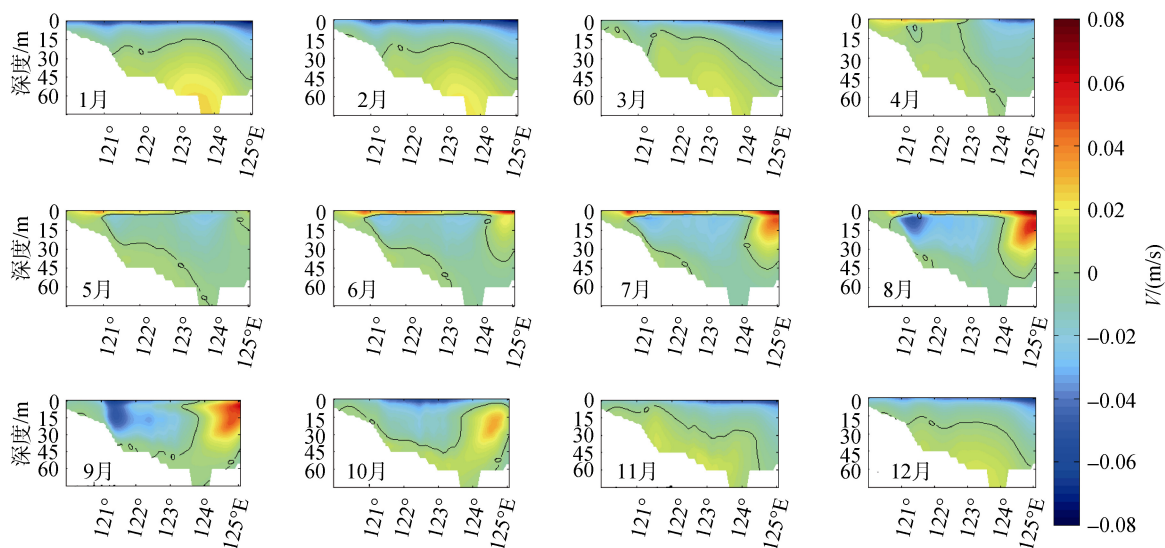


图 7 35°N 气候态月平均经向流速剖面图
Fig. 7 The section of averaged meridional velocity at 35°N

温度存在显著的季节性温跃层, 深度在 10 m 左右, 7 月、8 月温跃层最强, 并且在温跃层上方存在只有在夏季出现的北向流, 温跃层下方受南黄海冷水团环流左支的影响出现南向流; 而在冬季, 由于本文研究海区深度较浅并且受强劲的西北风影响, 整个深度上温度混合均匀, 并且几乎全部为南向流。此时, 斜压结构很弱, 很难为涡动场直接提供能量。

为了分析斜压不稳定过程对 EKE 的影响, 本文

选取 2 m 处和 10 m 处的流场数据计算了研究区域的速度垂向切变(图 8 实线所示), 图 8 中虚线为上文提到的本文研究区域的气候态月平均 EKE 的时间序列。从图中可以看出二者变化趋势几乎一致。与 EKE 类似, 垂向切变也存在双谱峰结构, 7 月存在较大的谱峰, 1 月存在较小的谱峰, 4 月和 11 月分别存在一个极小值, 但垂向切变的季节变化领先了 EKE 大约 2 个月。

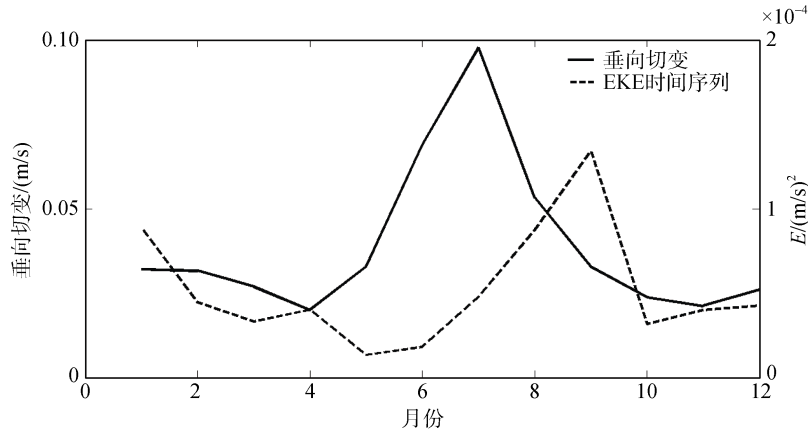


图 8 2 m 与 10 m 深度处速度垂向切变和 EKE 时间序列

Fig. 8 The meridional velocity shear between depths of 2 m and 10 m and EKE time series

由图 8 可看出, 南黄海 EKE 的变化受斜压不稳定过程的影响较为显著, 特别是在夏季: 当 3 月~7 月垂向切变增强时, 涡动能从 5 月~9 月也逐渐增加, 而且这时经向伸长的涡比较多(图 5); 当 8 月~11 月垂向切变减小时, EKE 在 2 个月后才开始减小, 此时纬向伸长的涡比较多。所以, 我们认为, 夏季存在的 EKE 谱峰主要是由于夏季较强的斜压不稳定过程直接导致的。

4 不同尺度过程的相互作用

4.1 谱演化方程

因为冬季南黄海几乎没有斜压结构, 所以 1 月份存在的谱峰应该与斜压不稳定过程无关。为了探讨 1 月 EKE 谱峰的产生机制, 本部分我们通过计算动能通量谱^[17-19]分析涡涡相互作用(不同尺度涡之间的能量传输过程)对 EKE 变化的影响。

计算方法如下, 考虑旋转地球上笛卡尔坐标系下水平动量方程, 并对其做离散傅里叶变换后整理得到谱密度的发展方程:

$$\frac{\partial \bar{E}(k_x, k_y, t)}{\partial t} = T(k_x, k_y, t) + P(k_x, k_y, t) - D(k_x, k_y, t) \quad (4)$$

其中谱密度:

$$\bar{E}(k_x, k_y, t) = (\hat{u}'\hat{u}'^* + \hat{v}'\hat{v}'^*) / 2\Delta k^2 \quad (5)$$

上式中 $\hat{u}', \hat{u}'^*, \hat{v}', \hat{v}'^*$ 的上标 \wedge 表示离散的傅里叶变换, 星号标志代表共轭负数, 上角标 $'$ 表示速度 u, v 分别与平均速度 \bar{u}, \bar{v} 的差值。

强迫项 $P(k_x, k_y, t)$ 由涡伸展项引起并且包括了平均有效位能到涡动能的转化率。此外无 f 项, 因为科氏力垂直于速度。另外, 耗散项 $D(k_x, k_y, t)$ 产生于摩擦项。 $T(k_x, k_y, t)$ 为谱动能通量的辐合辐散项, 来源于非线性平流项:

$$T(k_x, k_y, t) = -\Re[\hat{u}'^* \overbrace{(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y})} + \hat{v}'^* \overbrace{(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y})}] / \Delta k^2 \quad (6)$$

从物理上来说 $T(k_x, k_y, t)$ 代表了由涡涡相互作用引起的涡动能在不同空间尺度上的传输。为了获得动能通量谱 Π , 我们定义各向同性波数 $K = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$ 。将所有 $(k_x^2 + k_y^2) > K^2$ 的 (k_x, k_y) 上的能量谱相加, 我们获得波数 K' 上的动能通量谱:

$$\Pi(K', t) = \sum_{K'^2 < k_x^2 + k_y^2} T(k_x, k_y, t) \Delta k^2 \quad (7)$$

$E(k_x, k_y, t)$ 的长期平均达到统计稳定状态, 所以有如下近似平衡项:

$$-\bar{T}(k_x, k_y, t) \approx \bar{P}(k_x, k_y, t) - \bar{D}(k_x, k_y, t) \quad (8)$$

则有:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial K} = -\bar{T}(K) \approx \bar{P}(K) - \bar{D}(K) \quad (9)$$

上横线表示长期平均。

方程(7)和(9)为解释通量谱提供了重要依据。根据方程(7), 正向(负向)通量表示动能从小(大)波数向大(小)波数传输, 也就是正向(反向)串级。另外根据方程(9), 通量谱的斜率为正(负), 则强迫项 $\bar{P}(k)$ 强(弱)于耗散项 $\bar{D}(k)$, 表示长期平均在该尺度上的一个能量源(汇)。可以假设耗散项 $\bar{D}(k_x, k_y, t)$ 主要发生在高波数 $K^2 = k_x^2 + k_y^2$ 处, 在低波数时涡动能的谱运输主要和强迫项 $\bar{P}(k_x, k_y, t)$ 相平衡。

4.2 计算结果

由以上计算方法可以得出不同尺度的涡动之间的能量传输情况。图 9 给出了本文计算的南黄海区

域的动能通量谱。图中可以看出几乎每个月份都在空间尺度为 128.9~154.2 km(即波数 $K=6.485 \times 10^{-3} \sim 7.758 \times 10^{-3}$ cpkm)范围内存在一个零点, 也就是说在此零点处相对应波数的涡动处于一个相对稳定的状态, 既不向大尺度传输能量也不向小尺度传输能量。除了 10 月和 11 月, 全年在空间尺度为 122.1 km ($K=8.19 \times 10^{-3}$ cpkm)处存在一个很大的负值, 即存在一个反向能量串级。也就是说, 在这些月份中波数小于零点波数时, 存在正的能量串级, 即波的能量由大尺度向小尺度传输; 波数大于零点波数时, 则存在负的能量串级即波的能量由小尺度向大尺度传输, 在零点波数处达到一个相对平衡。然而在 10 月和 11 月则相反, 小于零点波数时, 为负的能量串级, 即波的能量由较大尺度继续向更大尺度传输; 而波数大于零点波数时, 则存在正的能量串级即波的能量由小尺度向更小的尺度传输, 我们认为这是一个不稳定的状态。以 12 月、1 月、2 月为主的冬季反向能量串级幅度较大, 1 月最大值达到 $-5.82 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$; 而在 7 月、8 月、9 月为主的夏季则与冬季相比反向能量串级幅度较小; 在春季则为过渡阶段。

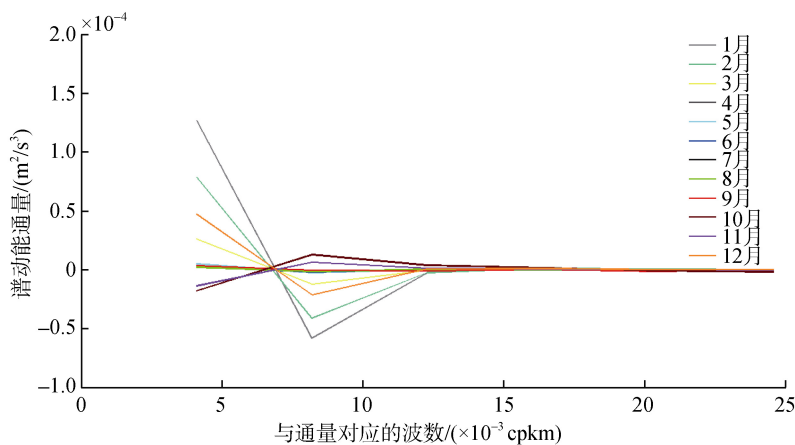


图 9 动能通量谱的季节变化

Fig. 9 Seasonal variations of the spectral kinetic energy flux

图 10 所示是谱能量传输项 $T(k_x, k_y, t)$ 作为经向和纬向波数的函数气候态月平均的图像。与图 9 相对应在状态相对稳定的月份中(1 月~9 月、12 月), $K(k_x, k_y)$ 较小时, $T(k_x, k_y, t)$ 主要为正值(即能量的汇), 在 $K(k_x, k_y)$ 较大时, $T(k_x, k_y, t)$ 主要为负值(即能量的源), 表明能量的传输是在较大尺度接收能量, 在较小尺度向外传输能量, 能量更多的是由小尺度

向大尺度传输; 在状态不稳定的月份(10 月、11 月)中则情况相反, 也证明了在 10 月、11 月能量的传输是一个比较不稳定的过程。并且从数量值上来看与图 9 所示特征相一致, 从全年来说在冬季能量传输较大, 1 月达到最大值, 春季为过渡阶段能量传输逐渐减小, 而在夏季能量的传输相对较弱, 秋季则为一个不稳定的状态。

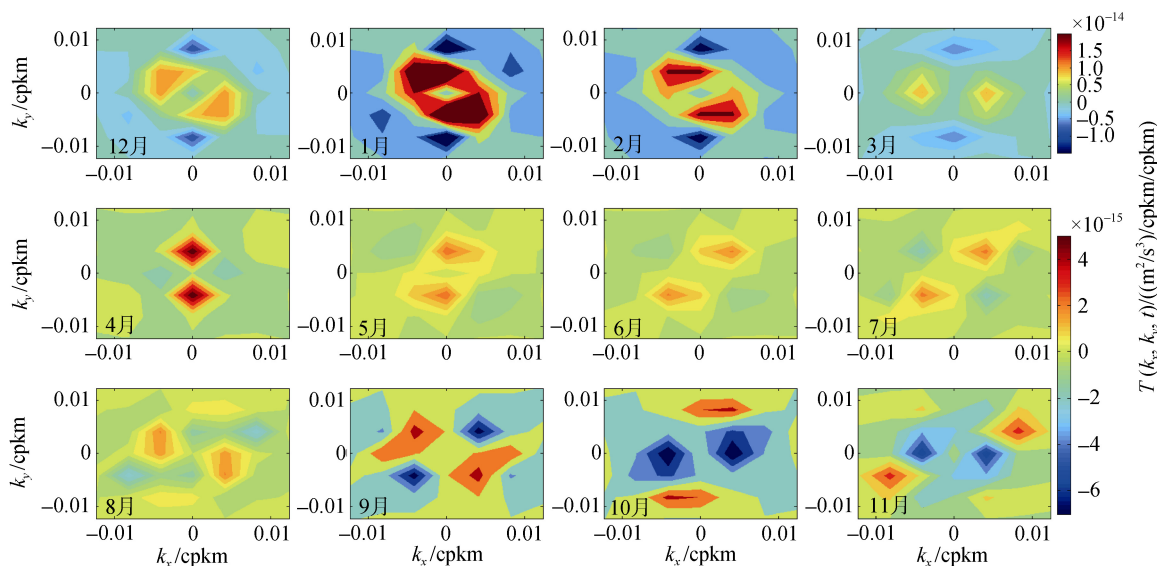


图 10 谱能量传输 $T(k_x, k_y, t)$

Fig.10 Spectral energy transfer $T(k_x, k_y, t)$

图 9 和图 10 都显示, 冬季涡涡之间能量传输比较活跃, 而夏季涡涡之间能量传输很弱, 这说明冬季涡涡相互作用比较强, 而夏季比较弱。结合图 8 我们认为, 与 9 月 EKE 的谱峰的产生机制不同, 1 月 EKE 谱峰的存在主要是涡涡相互作用的结果。

5 总结与讨论

本文采用区域海洋模式 ROMS 气候态月平均的数据, 研究了南黄海 EKE 的季节性变化并基于动能通量谱探讨了相关变化机制, 得出以下主要结论:

1) 南黄海涡动能的季节性变化呈现双峰值的特征, 最大峰值出现在夏末的 9 月, 较小峰值出现在 1 月, 春季和秋季的量值较低;

2) 南黄海 EKE 的变化受斜压不稳定过程的影响较为显著, 特别是在夏季: 当 3 月~7 月垂向切变增强时, 涡动能从 5 月~9 月也逐渐增加, 而且这时经向伸长的涡比较多; 当 8 月~11 月垂向切变减小时, EKE 在 2 个月后才开始减小, 此时纬向伸长的涡比较多。所以, 我们认为, 夏季存在的 EKE 谱峰主要是由于夏季较强的斜压不稳定过程直接导致的;

3) 冬季 EKE 的变化主要与涡涡相互作用过程相关, 此时不同尺度涡之间的能量传输比较活跃。

参考文献:

[1] 郭炳火. 黄海物理海洋学的主要特征[J]. 海洋科学进展, 1993(3): 7-18.

Guo Binghuo. Major features of the physical oceanography in the Yellow Sea[J]. Advances in Marine Science, 1993(3): 7-18.

[2] 徐丹亚, 赵保仁. 青岛—石岛近海反气旋中尺度涡旋存在证据及数值模拟[J]. 海洋学报, 1999, 21(2): 18-26.

Xu Danya, Zhao Baoren. A numerical study on the mesoscale anticyclonic eddy in Qingdao-Shidao offshore in winter[J]. Acta Oceanologica Sinica(Chinese Version), 1998, 21(2): 64-67.

[3] 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.

Tang Yuxiang, Zou Emei, Lie Heung-Jae, et al. Some features of circulation in the southern Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica(Chinese Version), 2000, 22(1): 1-16.

[4] 刘兴泉. 黄海冬季环流的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1996, 5: 546-555.

Liu Xingquan. Numerical simulation of the Yellow Sea wintertime circulation[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica[J].1996, 5: 546-555.

[5] 管秉贤. 黄海冷水团的水温变化以及环流特征的初步分析[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(4): 225-284.

Guan Bingxian. A preliminary study of the temperature variations and the characteristics of the circulation of the cold water mass of the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(4): 225-284.

[6] 袁业立. 黄海冷水团环流——1.冷水团中心部分的热结构和环流特征[J].海洋与湖沼, 1979, 10(3): 187-199.

Yuan Yehli. A preliminary study on the circulation related of the cold water-mass of the Yellow Sea . The thermal structure and the characteristics of the circulation in the central part of the[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1979, 10(3): 187-199.

- [7] Hu D, Cui M, Yongxiang L I, et al. On the Yellow Sea cold water mass-related circulation[J]. *The Yellow Sea*, 1991, 4: 79-88.
- [8] 缪经榜, 陆架上热生涡旋的线性模型[J]. *力学学报*, 1989, 3: 257-265.
Miao Jingbang. A linear model for the thermal eddy on the continental shelf[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1989, 3: 257-265.
- [9] 李惠卿, 袁业立. 黄海冷水团热结构及其环流解析研究[J]. *海洋与湖沼*, 1992, 1: 7-13.
Li Huiqing, Yuan Yeli. Theoretical study on the thermal structure and circulation pattern related to cold water-mass of Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 1: 7-13.
- [10] 苏纪兰, 黄大吉. 黄海冷水团的环流结构[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 1-7.
Su Jilan, Huang Daji. On the current field associated with the Yellow Sea cold water mass[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 1-7.
- [11] Xu Dongfeng, Yuan Yaochu, Liu Yuan. The baroclinic circulation structure of Yellow Sea Cold Water Mass[J]. *Science in China (Science D: Earth Sciences)*, 2003, 46(2): 117-126.
- [12] 张启龙, 杨玉玲, 程明华. 南黄海春季温、盐结构特征分析[J]. *海洋科学*, 1994, 6: 50-55.
Zhang Qilong, Yang Yuling, Cheng Minghua. An analysis of characteristics of thermohaline structures in the south Yellow Sea in spring[J]. *Marine Sciences*, 1994, 6: 50-55.
- [13] 刘志亮, 胡敦欣. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 1-7.
Liu Zhiliang, Hu Dunxin. Preliminary study on the Huanghai Sea coastal current and its relationship with local wind in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(2): 1-7.
- [14] 韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨, 等. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质运输的影响[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 145-156.
Wei Qingsheng, Yu Zhigang, Ran Xiangbin, et al. Characteristics of the western coastal current of the Yellow Sea and its impacts on material transportation[J]. *Advances In Earth Science*, 2011, 26(2): 145-156.
- [15] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9(4): 347-404.
- [16] Qiu B, Scott R B, Chen S, et al. Length scales of eddy generation and nonlinear evolution of the seasonally modulated south Pacific subtropical countercurrent[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(7): 1515-1528.
- [17] Frisch U. Turbulence. The legacy of A. N. Kolmogorov.[J]. *Physics Today*, 1995, 49(11): 521-523.
- [18] Scott R B, Wang F. Direct evidence of an oceanic inverse kinetic energy cascade from satellite altimetry[J]. *Jphys.oceanogr*, 2005, 35(9): 1650-1666.
- [19] Wang S, Liu Z, Pang C. Geographical distribution and anisotropy of the inverse kinetic energy cascade, and its role in the eddy equilibrium processes[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2015, 120(7): 4891-4906.

Seasonal variations of eddy kinetic energy and its spectral characteristics in the southern Yellow Sea

ZHANG Wan-lun^{1, 2}, LIU Zhi-liang¹, WANG Shi-hong^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Received: Mar.18, 2016

Key words: southern Yellow Sea; eddy kinetic energy; spectral kinetic energy flux

Abstract: Seasonal variations of the eddy kinetic energy (EKE) and its related mechanisms were analyzed in the southern Yellow Sea based on a climatological model output. We found that EKE had a double-peak structure on seasonal scales in this region, with a stronger peak appearing in September and a weaker peak in January. Furthermore, the eddies were found to be more meridionally elongated in the first half of the year, whereas they were zonally elongated in the second half of the year. The spectral characteristics of EKE showed that the EKE peak in September was mainly due to baroclinic instabilities in summer while that in January was possibly due to eddy-eddy interactions. Thus, we discussed the seasonal variations of EKE in the southern Yellow Sea, which provides an understanding of the dynamic mechanisms in this area.

(本文编辑: 李晓燕)