

黑潮延伸体时变正压动力过程和动能串级研究

赵裕慧^{1,2,3}, 徐永生^{1,2,3}, 黄超^{1,2}, 于乐江⁴

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋环境与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国极地研究中心, 上海 201209)

摘要: 本文基于坐底式逆向回声仪(current and pressure recording inverted echo sounder, CPIES)实测海底压强和海底流速数据对黑潮延伸体时变正压动力过程和动能串级进行研究。先对 CPIES 数据进行去噪、网格化、调平等预处理, 获得黑潮延伸体正压动力高度网格和海底流速网格, 后进一步计算得到正压动力高度分布图、正压涡动能分布图以及正压动能通量谱。结果表明: 1) 在无外力作用时, 正压动力高度起伏会使海水从动力高的地方向低的地方流入从而产生较高的涡动能, 而一旦有外力强迫, 海水有从动力高度低的地方向高的地方流入的可能, 从而使得正压动力高度不断增加涡动能增强; 2) 通过分析9个月长时间平均正压动能通量谱, 验证了地转湍流理论中的正压反向动能串级; 3) 对黑潮延伸体月平均正压动能通量作谱分析发现, 涡动能的大小会影响动能通量幅值变化, 当涡动能升高, 动能通量谱振幅变大, 正向/反向动能串级增强, 反之亦然。此外, 正压动能串级随着时间变化, 表现为2004年6月至8月反向动能串级尺度向小尺度移动并且强度增强; 2004年9月反向动能串级突然减弱, 2004年9月至11月出现了与2004年6月至8月相似的反向动能串级变化过程; 2004年12月至2005年1月, 正向动能串级尺度向小尺度移动并且强度减弱。

关键词: 黑潮延伸体; 正压动能串级; 正压动力高度; 正压涡动能; 动能通量谱

中图分类号: P733.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)2-0001-09

DOI: 10.11759/hyxx20211130002

黑潮延伸体动力过程复杂, 有丰富的海洋多尺度动力过程^[1-2]。但是长期以来, 缺乏黑潮延伸体的观测数据, 限制了我们对其过程的深入认识^[3]。直到 KESS(Kuroshio extension system study)项目的展开为我们提供了长期连续观测的高分辨率黑潮延伸体观测数据。KESS 是第一次大量部署坐底式逆向回声仪(current and pressure recording inverted echo sounder, CPIES)的试验, 其独特之处在于, 这些仪器部署在接近极限的水深(5 300~6 400 m), 并且该阵列的中心位于是涡动能最高的区域^[4-6]。

Kolmogorov 在 1941 年提出 Kolmogorov 尺度分布理论^[7-8], 为湍流的研究奠定了理论基础。在此基础上, Frisch 提出关于能量通量的计算^[9]成为能量串级研究的开始。能量串级表征能量在不同空间尺度上的传递特征^[10]。能量从大尺度向小尺度传递称为正向能量串级, 反之称为反向能量串级。在经典地转湍流理论预测中^[11-12], 海洋能量集中在第一斜压模式, 其正向传递的能量收敛到变形半径尺度附近经正压化过程向下传递到正压模式。与斜压不同的是, 几乎所有

的正压能量经反向串级传递给大尺度^[11-12]。

之前对海洋能量串级的研究大都是理论预测, 直到卫星高度计的出现, 为研究海洋动能串级提供了大面积长时间的实测数据。2005 年 Scott 等使用卫星高度计数据计算了南太平洋的动能通量谱, 发现在中高纬度南大洋存在显著的反向动能串级^[13]。王世红等使用卫星高度计数据研究了反向动能串级的全球分布特征^[10]。值得一提的是高度计在热带和近岸地区外主要反应第一斜压模的特征^[14]。Li 等通过分析同化卫星高度计观测的 ECCO2(Estimating the Circulation and Climate of the Ocean, Phase II)模式数据, 研究了正斜压反向动能串级的空间分布特征以及两者之间的联系^[15]。其对于正压动能串级的研究使用的是模式

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2022-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41906027); NSFC-山东省联合基金项目(U1406401)

[Foundation: Natural Science Foundation, No. 41906027; NSFC-Shandong Province Joint Fund, No. U1406401]

作者简介: 赵裕慧(1996—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向: 物理海洋学, E-mail: 1433828224@qq.com

数据,而非真实观测的海洋正压数据存在一定的误差。目前对海洋动能串级的研究,一方面由于缺乏真实的海洋正压观测数据,对正压动能串级的研究还不够深入;另一方面,其主要集中在动能串级长时间平均态的研究上,对随时间变化的动能串级没有细致的探索。

本文以黑潮延伸体为研究区,利用长时间连续的 CPIES 观测数据,来探索随时间变化的正压动力过程和动能串级,有助于认识海洋动力机制以及能量平衡。

1 数据

1.1 数据来源

CPIES 是一种锚系于海底的海洋观测仪器,可测海底压力和海底流速^[16]。2004—2006 年,美国三个机构(罗德岛大学、伍兹霍尔海洋研究所和夏威夷大学)的研究人员将 46 个 CPIES 仪器部署在黑潮地区,如图 1 黑色三角所示。

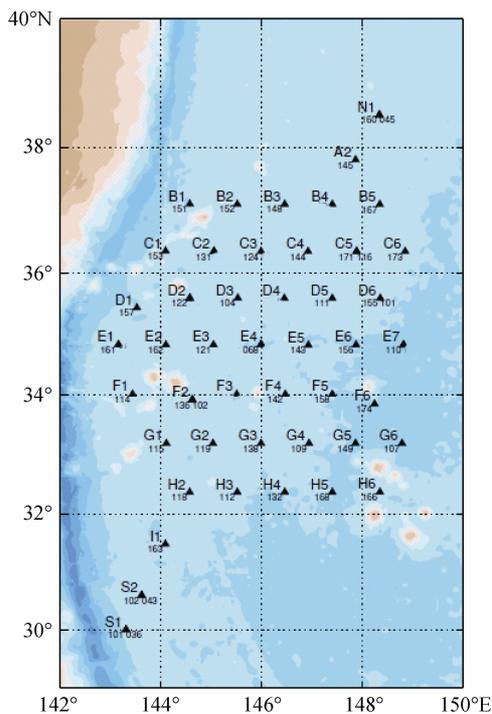


图 1 CPIES 仪器布放位置图

Fig. 1 CPIES instrument layout diagram

注:黑色三角表示坐底式逆向回声仪(CPIES)的布放点位,图片来源于数据下载网站: http://www.po.gso.uri.edu/dynamics/KESS/CPIES_data.html

我们收集到 CPIES 仪器测得的 2004 年 6 月 1 日到 2005 年 2 月 28 日以 1 h 为间隔的海底压强和海底

流速数据。

1.2 数据预处理

1.2.1 去噪声

对每个站点的时序海底压强数据进行去异常值处理,然后对其进行平均得到平均压强值。将每个站点的时序海底压强数据减去各自的平均压强值得到海底高度变化序列。对海底高度变化序列进行 72 h 低通滤波处理后进行日平均,得到时间分辨率为天的海底高度变化序列。

对每个站点的时序海底流速数据进行去异常值处理,然后对其进行 72 h 的低通滤波,之后进行日平均。得到时间分辨率为 1 d 的海底流速数据,包括经向速度和纬向速度。

1.2.2 网格化

站点的分布是不均匀的,为了得到均匀分布的格点数据,将同一天的全部站点数据作以经纬度为格点方向的三次方程内插。得到 2004 年 6 月 1 日—2005 年 2 月 28 日期间,空间间隔为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的每天的海底高度变化网格和海底流速网格^[6]。

1.2.3 调平

调平(leveling)是指将所有的测量值放在同一重力势面上^[17]。假设海底压强是处于地转和静水平衡下。并且海洋底部热风切变较弱,因此在 CPIES 仪器阵列深度范围内,海底流速不随深度改变。根据平均海底流速计算得出的海底高度会体现出不同仪器放置深度的差异,将其加到海底高度变化上就能将海底高度变化调平。一旦被调平,压力梯度便可以计算绝对地转流^[6,17],也就得到了正压动力高度。其具体实现方法如下:

先根据平均流速计算流函数 ψ :

$$d\psi = \bar{v}dx - \bar{u}dy, \quad (1)$$

其中 \bar{v} 和 \bar{u} 分别代表经向和纬向的时间平均流速。

根据流函数计算得到重力等位面 H :

$$H = \frac{f\psi}{g}, \quad (2)$$

其中 f 为科氏参数, g 是重力加速度。

最后将重力势面 H 减去每天的海底高度变化得到以日为间隔的正压动力高度。

2 方法

2.1 涡动能

观测表明,海洋中 90% 的动能以中尺度涡形式

存在, 它们的水平尺度从几十到几百公里不等, 普遍存在于绝大部分海域^[18]。海洋中的动能串级离不开涡动能在不同尺度之间的流通^[19]。欧拉框架下的涡动能(eddy kinetic energy, EKE, 以 E_{KE} 表示)常被用作海洋中尺度涡动能的表征指标:

$$E_{KE} = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2), \quad (3)$$

其中 u' 和 v' 表示纬向速度和经向速度与对应时间平均值的差值。

2.2 动能通量谱

海洋动能串级是抽象的难以捕捉的。为了研究动能串级, 我们需要借助动能通量谱来分析。其推导过程及物理意义^[19]如下:

笛卡尔坐标系下的水平动量方程可以表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_{rx}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} + f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_{ry}, \quad (5)$$

其中 $i=1, 2$ 代表 x, y 方向; p 是压强, ρ 是密度; F_{rx} 和 F_{ry} 是摩擦耗散项; u, v 分别表示纬向和经向的地转速度, 其由动力高度(H_{SS})在地转平衡的条件下求出:

$$\begin{cases} u = -\frac{g}{f} \frac{\partial H_{SS}}{\partial y} \\ v = \frac{g}{f} \frac{\partial H_{SS}}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

将方程(4)和(5)进行离散傅里叶变换, 得到波数空间的水平动量方程:

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial t} + u_i \frac{\partial \hat{u}}{\partial x_i} - f \hat{v} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \hat{F}_{rx}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + u_i \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_i} + f \hat{u} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + \hat{F}_{ry}, \quad (8)$$

其中

$$u(x, y) = \sum_{K_x, K_y} \hat{u} \exp i(k_x x + k_y y),$$

$$v(x, y) = \sum_{K_x, K_y} \hat{v} \exp i(k_x x + k_y y),$$

其中 $\hat{\cdot}$ 表示傅里叶变换, $k = (k_x, k_y) = (m, n) \times 2\pi/L$; $m, n \in Z$ 。

进一步将(7)和(8)式分别乘以复共轭 \hat{u}^* 和 \hat{v}^* , 并将两式相加, 可得动能密度谱 $E(k_x, k_y, t)$ 随时间的演变公式:

$$E_{kt} = \frac{\partial E(k_x, k_y, t)}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial E(k_x, k_y, t)}{\partial t} = T(k_x, k_y, t) + P(k_x, k_y, t) - D(k_x, k_y, t), \quad (10)$$

其中, 谱能量转移:

$$T(k_x, k_y, t) = -\text{Re} \left[\hat{u}^* u_i \frac{\partial \hat{u}}{\partial x_i} + \hat{v}^* u_i \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_i} \right] / \Delta k^2, \quad (11)$$

$\Delta k = 1/N\Delta x$, 来源于离散傅里叶变换。其中 N 为 x 方向的格点数, Δx 为格点距离。

对于(10)式, $P(k_x, k_y, t)$ 为强迫项来源于动量方程中的涡伸展项, 并包含有效位能(available potential energy, APE)向涡动能的转化过程。 $D(k_x, k_y, t)$ 为耗散项, 由动量方程中的摩擦项导出。 $T(k_x, k_y, t)$ 为能量传输项, 来源于动量方程中的水平非线性平流项, 它表征涡动能在不同空间尺度上的传输。

值得一提的是, 对于长时间平均, $\overline{E_{kt}}$ 远小于 $\overline{T(k_x, k_y, t)}$ 。通过计算一个月的平均, 对比两者发现 $\overline{E_{kt}}$ 比 $\overline{T(k_x, k_y, t)}$ 小一个量级。因此对于长时间平均, 可以将 $\overline{E_{kt}}$ 视作 0 项, 因此得到下式:

$$-\overline{T(k_x, k_y)} \approx \overline{P(k_x, k_y)} - \overline{D(k_x, k_y)}, \quad (12)$$

其中 $\bar{\cdot}$ 表示 x 的时间平均。

为得到动能通量谱的表达式, 我们引入总波数 $K = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$ 。将空间波数大于 K' (即 $k_x^2 + k_y^2 > K'^2$) 的所有 $T(k_x, k_y, t)$ 累加求和, 可得到波数 K' 上的动能通量谱:

$$\Pi(K', t) = \sum_{k_x^2 + k_y^2 > K'^2} T(k_x, k_y, t) \Delta k^2. \quad (13)$$

将(12)和(13)两式合并可得:

$$\frac{\partial \overline{\Pi}_K}{\partial K} = -\overline{T(K)} \approx \overline{P(K)} - \overline{D(K)}. \quad (14)$$

根据公式(13)可以得出, $\overline{\Pi}_K$ 为正(负)值表示大于波数 K' 的通量是收敛的(发散的), 那么小波数的通量是发散的(收敛的)。波数和尺度是倒数的关系, 因此 $\overline{\Pi}_K$ 为正(负)值表示大(小)尺度动能向小(大)尺度传递, 即存在正(反)向动能级串。从公式(14), 可以看出通量谱的斜率为正(负)时, 强迫项 $\overline{P(K)}$ 高(低)于耗散项 $\overline{D(K)}$, 表征在长期平均状态下这些尺度上是动能的源(汇)。那么最大正斜率对应尺度向其他尺度传输了相对最多的涡动能, 同样最小负斜率对应尺度收到了其他尺度传输来的最多涡动能。

3 结果与分析

3.1 正压动力高度

为了研究正压动力高度随时间的变化, 通过计算 2004 年 6 月至 2005 年 2 月的每个月的平均正压动力高度, 如图 2 所示:

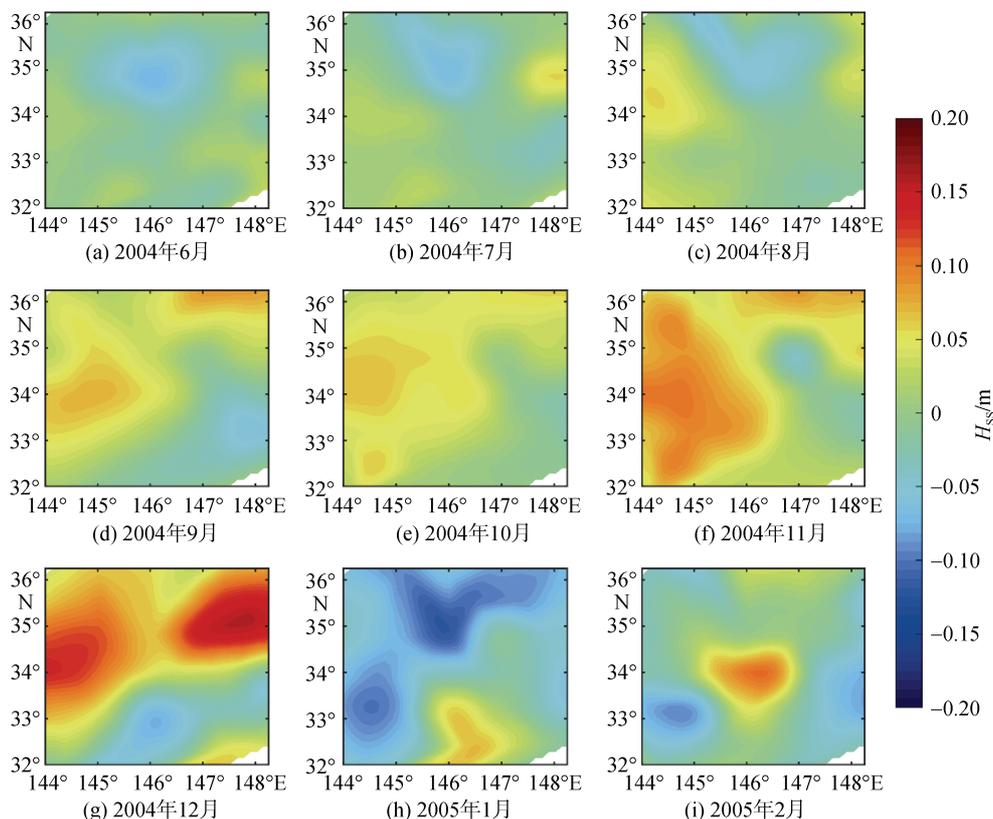


图 2 黑潮延伸体正压动力高度月变化图

Fig. 2 Monthly barotropic dynamic height variation diagram of the Kuroshio extension

从图 2 中可对黑潮延伸体正压的动力高度变化有一定的认识: 2004 年 6 月至 8 月正压动力高度起伏不大。在(35°N, 146°E)周围正压动力高度存在低值区, 随着时间慢慢减弱。从 2004 年 9 月至 11 月正压动力高度大面积上逐渐升高, 尤其在 2004 年 11 月区域西侧正压动力高度较高。在 2004 年 12 月, 区域内北部的大部分区域内出现两处正压动力高度极高值区, 在区域南部有一小部分正压动力高度较低。2005 年 1 月出现了与 2004 年 12 月两极反转的现象, 区域大部分正压动力高度较低只有在南部出现了一小部分区域的较高值区。到了 2005 年 2 月, 正压动力高度大面积的极值区域开始消退, 在以(33°N, 144.5°E)和(34°N, 146°E)为中心的地方分别出现了 111 km 左右和 200 km 左右的低值区和高值区。

3.2 正压涡动能

为了探究黑潮延伸体正压涡动能变化, 运用海底流速数据先将每天的纬向和经向流速 u 和 v 分别减去各自 9 个月平均的平均流速 \bar{u} 和 \bar{v} 后得到 u' 和 v' , 然后计算得到每天的涡动能。将 2004 年 6 月至 2005 年 2 月期间每个月的涡动能作平均, 获得平均正压涡

动能, 如图 3 所示。

从图 3 中可以看到, 从 2004 年 6 月至 10 月没有出现大范围较强的涡动能。直到 2004 年 11 月海区东北部涡动能开始增强, 与 2004 年 11 月的正压动力高度相对应。涡动能出现的位置在动力高度较高和较低的交界处(35°N, 145.5°E), 以及正压动力高度 -0.05 m 所出现的位置。根据海底流速的大小和流向, 可以判断海水从正压动力高度较高处向较低处流动。

2004 年 12 月涡动能在以(34.8°N, 147°E)为中心周围 111 km 左右出现极大值区。对应于图 2(g)中正压动力高度极高的位置。在区域南部中心也有个小范围的涡动能高值区, 其对应于图 2(g)中正压动力高度较低的区域。区域东部和南部都有海流进入。综合分析结果表明, 区域东南部有外力强迫, 使区域内大面积的海水抬升。2005 年 1 月(见图 2 和图 3), 正压动力高度在(35°N, 144°E)超过周围, 海流流向区域东南和东北部。海流分为两支是因为受到(33°N, 144°E)处较高动力高度的影响改变了流动方向。2005 年 1 月海底动力高度大面积降低。原因是海水大面积的抬升之后受黏性和重力作开始产生向下运

动, 之后与周围产生高度差。海流的出现与海水的高度差密切相关。2005 年 2 月(见图 2 和图 3), 海流以 (34°N, 146°E) 为中心、半径 111 km 左右

高值区, 流向周围动力高度的较低地方, 动力高值区的外围涡动能较高。另外, 以 (33°N, 144.5°E) 为中心的动力高度低值区, 有海流流入, 涡动能高。

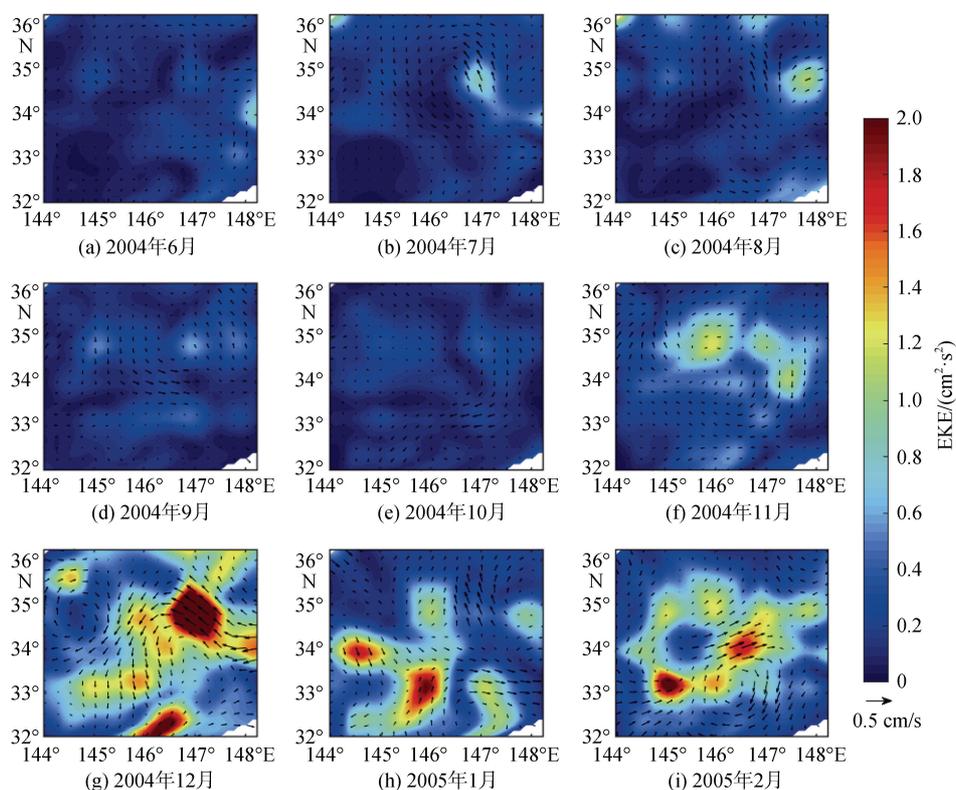


图 3 黑潮延伸体正压涡动能(附海底流速)月变化图

Fig. 3 Monthly variation of the barotropic vortex kinetic energy (with ocean floor velocity) of the Kuroshio extension

综合分析结果显示, 正压动力高度起伏会影响涡动能的大小和分布。在无外力作用时海水沿动力高度由高向低的方向流动, 产生涡动能; 一旦有外力强迫, 海水可能有从动力高度较低处流向较高处, 使得海水动力高度增加、涡动能增强。

3.3 正压动能通量谱

使用快速傅里叶变换(FFT)算法, 并在以 (34.14°N, 146.03°E) 为中心, 空间分辨率 0.125°×0.125°的 32×32 的网格数据上展开。计算之前对正压动力高度数据进行去线性处理, 并应用 16×16 的汉宁窗来减少频谱泄漏现象。最后将求得的 2004 年 6 月到 2005 年 2 月每天的动能通量谱进行平均, 得到 9 个月的平均正压动能通量谱, 结果如图 4 所示。

结合公式(13), 动能通量谱中动能通量为负值表示存在反向动能串级。动能通量谱中最小值的绝对值为反向动能串级的振幅, 表征反向传递动能的强弱。反向动能串级有三个代表性的特征尺度分别对应图 4 中红色虚线所在的反向动能开始的尺度(注

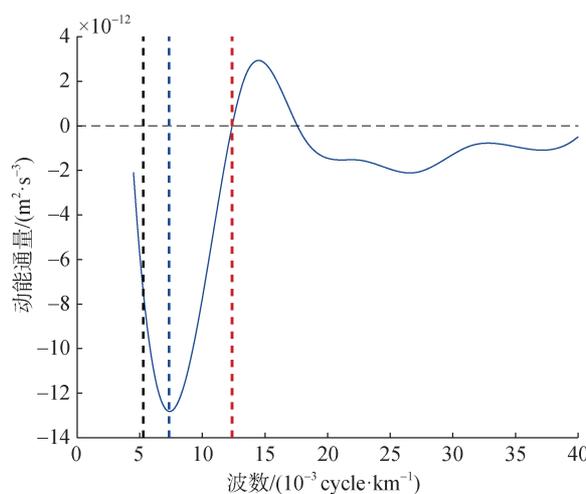


图 4 黑潮延伸体 2004 年 6 月—2005 年 2 月 9 月间平均正压动能通量谱

Fig. 4 Nine-month mean barotropic kinetic energy flux spectrum of the Kuroshio extension

注: 图中黑色虚线表示捕捉尺度, 蓝色虚线表示振幅尺度, 红色虚线表示注入尺度, 虚线辅助线为动能通量为 0 的参考线

入尺度), 蓝色虚线所在的反向动能串级振幅对应尺度(振幅尺度)和黑色虚线所在的反向动能串级被捕捉的尺度(捕捉尺度)。通过分析公式(14), $\overline{\pi}_K$ 的斜率为正表示能量的源, 理论上最大正斜率所在尺度, 在长期平均条件下提供较多的涡动能表示能量注入尺度。但是, 由于数据的空间分辨率有限, 不能很好的体现空间域中小尺度所在的斜率变化, 将零点穿过尺度近似定义为能量注入尺度^[13]。反向传递的动能在某个特征尺度上被“捕捉”, 没有继续向大尺度传递, 这个特征尺度被称为捕捉尺度。 $\overline{\pi}_K$ 的斜率为负表示能量的汇, 负斜率最大对应的尺度应为捕捉尺度, 因为在此尺度上接收到了较多的涡动能。但是, 在实际计算中由于在大的尺度上数据较少, 因此以 50%能量被耗散的尺度作为捕捉尺度更加符合实际情况。

从图 4 中, 基于前人对动能通量谱的分析方法^[13]可以得出以下结论: 图中蓝色虚线为振幅所在尺度, 尺度大小是 136.4 km。在此尺度两边是正负不同的

斜率, 大于此尺度上斜率为负, 在这些尺度上接收到动能; 小于此尺度上斜率为正, 在这些尺度上向外传输动能。黑色虚线所在尺度为 189.3 km, 是反向传递的动能被捕捉的尺度。红色虚线表示动能通量穿过零点的位置, 波数为 K_f , 尺度为 80.9 km, 在小于(大于) K_f 的波数上动能通量为负值, 说明在大尺度(小尺度)上有能量流入(流出)。而且波数为 K_f 时斜率为正, 暗示在这个波数附近有能量源, 有更多的能量流入大尺度, 存在反向动能串级。本次实验用实测海洋正压数据, 计算验证了地转湍流理论中的正压反向动能串级^[16-17]。

通过对图 4 中长时间平均动能串级的分析, 对黑潮延伸体正压动能传递有了一定的认识。但是长时间平均容易忽略一些细节, 为了研究黑潮延伸体正压动能串级随时间的变化, 我们分别计算了 2004 年 6 月到 2005 年 2 月每个月的月平均动能通量谱(计算过程参照图 4), 如图 5 所示。

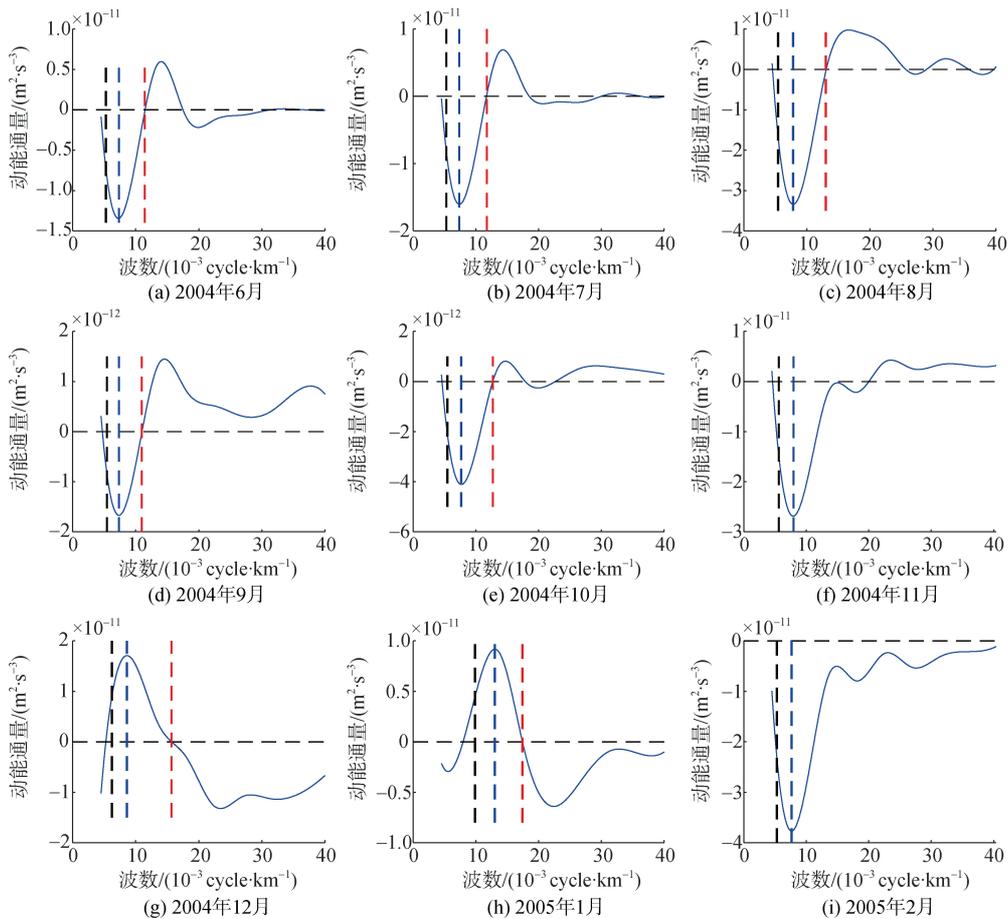


图 5 黑潮延伸体月平均正压动能通量谱

Fig. 5 Monthly mean barotropic kinetic energy flux spectra of the Kuroshio extension

注: 图中黑色虚线表示捕捉尺度, 蓝色虚线表示振幅尺度, 红色虚线表示注入尺度, 虚线参考线为动能通量为 0 的参考线

图 5 显示不同时间黑色虚线、蓝色虚线和红色虚线所对应的尺度不相同, 将其随时间的变化进行对比, 如图 5 所示。经研究发现, 涡动能和动能通量谱的幅值具有强相关关系^[10, 15]。图 6 显示了涡动能和动能通量幅值随时间的变化。

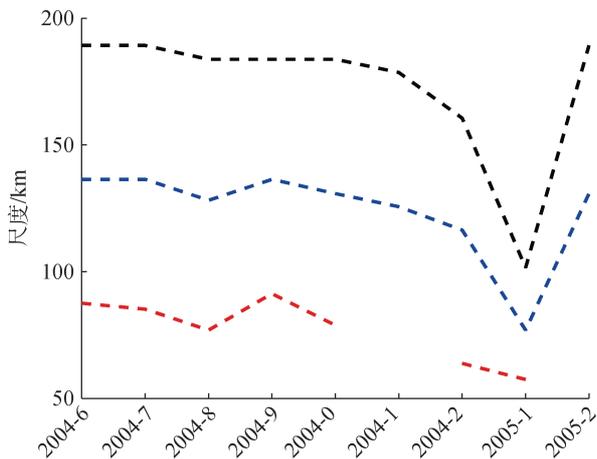


图 6 对应图 5 三个颜色虚线所在尺度的月变化

Fig. 6 Monthly change corresponding to the scale of the three colored dotted lines in Fig. 5

注: 图中黑色虚线表示捕捉尺度, 蓝色虚线表示振幅尺度, 红色虚线表示注入尺度

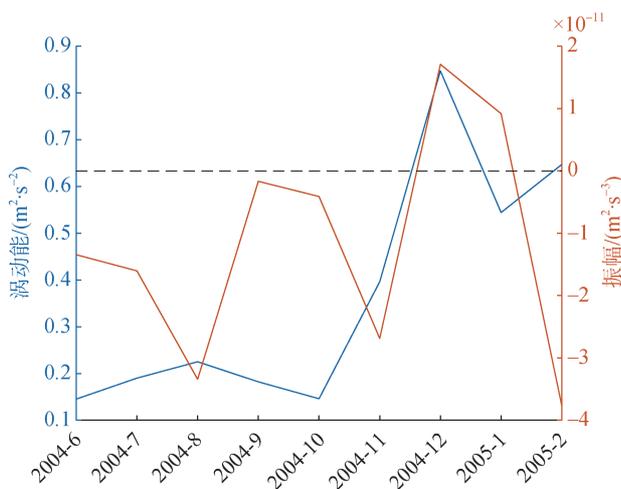


图 7 涡动能和动能通量振幅月平均值

Fig. 7 Monthly average vortex kinetic energy and kinetic energy flux amplitude

注: 图中橘色实线为振幅, 蓝色实线为涡动能, 虚线辅助线表示幅值为 0 的参考线

从图 6 中我们可以看到, 不同颜色虚线随时间的变化趋势基本保持一致。2004 年 6 月到 8 月, 红色虚线所在尺度从 80 km 减小为 70 km, 蓝色虚线负值幅值所在尺度从 136.4 km 减小为 128.2 km。与此同时图

7 显示, 有所增加, 涡动能开始在不同尺度上传递, 振幅不断增大, 反向动能串级增强。可见反向动能串级尺度向小尺度移动, 并且反向动能串级增强。另外, 图 6 中 2004 年 8 月黑色虚线所在尺度是 183.8 km, 说明在此尺度上反向传递的动能被捕捉。到了 2004 年 9 月振幅减小, 反向动能串级减弱。2004 年 9 月到 11 月出现和 2004 年 6 月到 8 月相似的尺度和幅值变化过程。不同的是, 图 7 中 2004 年 9 月到 11 月涡动能先减小再增大。虽变化过程相似, 但 2004 年 9 月振幅减小, 表明涡动能减小对反向动能串级有一定的减弱作用, 之后涡动能上升使反向动能串级增强。

2004 年 12 月至 2005 年 1 月(图 7)涡动能极高但逐渐降低, 对应动能通量谱中动能通量为正。与之前出现的反向动能串级不同, 蓝色虚线(图 5)为振幅所在尺度, 小于(大于)此尺度上斜率为负(正)值在这些尺度上接收(传输)能量。黑色虚线所在尺度是正向传递的动能最大传输尺度。红色虚线是动能通量为 0 值的位置, 大于(小于)此尺度上动能通量为正(负)值, 说明大(小)尺度上有能量流出(流入), 其所在尺度斜率为负值, 说明在此尺度附近有能量汇, 大尺度上有能量流出存在正向动能串级。而从图 6 对应的尺度来看 2004 年 12 月到 2005 年 1 月红、蓝、黑色所对应的虚线均急剧减小: 黑色虚线尺度从 160.6 km 减小到 101.5 km, 蓝色虚线尺度从 116.4 km 减小到 77 km, 红色虚线尺度从 63.8 km 减小到 57.5 km。综合分析可以得出, 正向动能串级尺度向小尺度移动, 并且正向动能串级减弱。2005 年 2 月, 图 5 中显示动能通量均小于 0, 这可能是因为数据分辨率不够, 因此无法得到有效结论。

从以上分析我们可以得出以下结论: 涡动能的大小会影响动能通量幅值变化, 涡动能升高幅值正值(负值)变大(变小), 正向(反向)动能串级增强, 反之亦然; 黑潮延伸体动能串级会随着时间变化, 2004 年 6 月到 8 月反向动能串级向小尺度偏移并且增强; 2004 年 9 月反向动能串级减弱, 2004 年 9 月到 11 月出现了反向动能串级变化过程, 与 2004 年 6 月到 8 月相似; 2004 年 12 月到 2005 年 1 月, 正向动能串级向小尺度偏移并且减弱。

4 总结

使用实测的海洋正压的长时间观测数据, 研究黑潮延伸体正压动力过程和动能串级。通过正压动力高度和正压涡动能月平均分布图对黑潮延伸体正压动力变化过程有了一定的认识 and 了解。结果表明:

无外力作用时,正压动力高度起伏会使海水从动力高的地方向低的地方流入,产生涡动能;有外力强迫时,海水可能从动力高度低的地方流入高的地方,使海水动力高度增加、涡动能增强。为了探究黑潮延伸体涡动能在不同尺度上的传递过程,计算了正压动能通量谱。利用9个月长时间平均的正压动能通量谱,验证了地转湍流理论中的正压反向动能串级^[16-17]。此外,对月平均正压动能通量谱进行分析发现:涡动能的大小会影响动能通量谱的振幅,涡动能升高振幅变大,正向/反向动能串级增强,反之亦然。黑潮延伸体动能串级随着时间变化,从2004年6月至8月反向动能串级尺度向小尺度移动并且强度增强;2004年9月反向动能串级忽而减弱,2004年9月至11月出现了与2004年6月至8月相似的反向动能串级过程;而2004年12月至2005年1月,正向动能串级尺度向小尺度移动并且强度减弱。

参考文献:

- [1] FERRARI R, WUNSCH C. Ocean circulation kinetic energy: Reservoirs, sources, and sinks[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2009, 41(1): 253-282.
- [2] KWON Y O, ALEXANDER M A, BOND N A, et al. Role of the Gulf Stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere-ocean interaction: A review[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(12): 3249-3281.
- [3] 陈朝晖, 林霄沛, 马昕, 等. 西北太平洋黑潮延伸体观测回顾和展望[J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 13-22.
CHEN Zhaohui, LIN Xiaopei, MA Xin, et al. Review and prospect of kuroshio extension observations in northwest Pacific[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 13-22.
- [4] 经志友. 海洋次中尺度动力过程与能量串级研究获新进展[J]. *高科技与产业化*, 2021, 27(1): 79.
JING Zhiyou. New progress in ocean submesoscale dynamic process and energy cascade research[J]. *High-tech and Industrialization*, 2021, 27(1): 79.
- [5] DONOHUE K A, WATTS D R, TRACEY K L, et al. Mapping circulation in the Kuroshio Extension with an array of current and pressure recording inverted echo sounders[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(3): 507-527.
- [6] WATTS D R, QIAN X, TRACEY K L. Mapping abyssal current and pressure fields under the meandering Gulf Stream[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(6): 1052-1067.
- [7] KOLMOGOROV A N. Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1991, 434(1890): 15-17.
- [8] KOLMOGOROV A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers[J]. *Cr Acad. Sci. URSS*, 1941, 30: 301-305.
- [9] FRISCH U. *Turbulence: the legacy of A.N. Kolmogorov*[M]. England: Cambridge University Press, 1995.
- [10] 王世红. 反向动能级串的全球分布特征, 各向异性特征及其在涡平衡过程中的作用[D]. 青岛: 中国科学院大学(海洋研究所), 2016.
WANG Shihong. Global Distribution characteristics of Reverse kinetic energy cascade, anisotropy characteristics and its role in vortex equilibrium process [D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2016.
- [11] FU L L, FLIERL G R. Nonlinear energy and enstrophy transfers in a realistically stratified ocean[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1980, 4(4): 219-246.
- [12] RHINES P B. The dynamics of unsteady currents[J]. *The Sea*, 1977, 6: 189-318.
- [13] SCOTT R B, WANG F. Direct evidence of an oceanic inverse kinetic energy cascade from satellite altimetry[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(9): 1650-1666.
- [14] WUNSCH C. The vertical partition of oceanic horizontal kinetic energy[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, 27(8): 1770-1794.
- [15] LI H J, XU Y S. Barotropic and baroclinic inverse kinetic energy cascade in the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51(3): 809-824.
- [16] 赵瑞祥, 朱小华. 倒置式回声仪的研究进展[J]. *海洋技术*, 2015, 34(3): 54-58.
ZHAO Rixiang, ZHU Xiaohua. Research progress of inverted echolometer[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(3): 54-58.
- [17] TEAGUE W J, TRACEY K L, WATTS D R, et al. Observed deep circulation in the Ulleung Basin[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(11/13): 1802-1826.
- [18] STAMMER D. Global characteristics of ocean variability estimated from regional TOPEX/POSEIDON altimeter measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, 27(8): 1743-1769.
- [19] QIU B, SCOTT R B, CHEN S. 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.
- [20] SALMON R. Two-layer quasi-geostrophic turbulence in a simple special case[J]. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 1978, 10(1): 25-52.
- [21] SALMON R. Baroclinic instability and geostrophic turbulence[J]. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dy-*

- namics, 1980, 15(1): 167-211.
- [22] SCOTT R B, ARBIC B K. Spectral energy fluxes in geostrophic turbulence: Implications for ocean energetics[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(3): 673-688.
- [23] 任强, 于非, 南峰, 等. 逆式回声测量仪在全球海洋中应用及前景展望[J]. *海洋科学*, 2020, 44(7): 171-178.
REN Qiang, YU Fei, NAN Feng, et al. Application and prospect of inverse echolometer in global ocean[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(7): 171-178.
- [24] 钱思佳, 于方杰, 陈戈. 黑潮延伸体区域 50~100 km 涡旋分布特征[J]. *海洋科学*, 2021, 45(11): 10-19.
QIAN Sijia, YU Fangjie, CHEN Ge. Distribution characteristics of 50 ~ 100 km vortices in Kuroshio extension[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(11): 10-19.
- [25] 向荣, 曹奇原, 阎军. 古黑潮演化研究评述[J]. *海洋科学*, 2000, 24(7): 34-37.
XIANG Rong, CAO Qiyuan, YAN Jun. Review on the evolution of the Kuroshio[J]. *Marine Sciences*, 2000, 24(7): 34-37.

Investigating the time-varying barotropic dynamic process and kinetic cascade of the Kuroshio extension

ZHAO Yu-hui^{1, 2, 3}, XU Yong-sheng^{1, 2, 3}, HUANG Chao^{1, 2}, YU Le-jiang⁴

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Fluctuation, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Polar Research Institute of China, Shanghai 201209, China)

Received: Nov. 30, 2021

Key words: Kuroshio extension; barotropic kinetic energy cascade; barotropic dynamic height; barotropic vortex; kinetic energy flux spectrum

Abstract: In this study, the time-varying barotropic dynamic process and kinetic energy cascade of the Kuroshio extension body were investigated according to the measured seabed pressure and seabed velocity data of bottom-seated reverse echocardiography (CPIES). First, the CPIES data were pre-processed using denoising, gridding, and leveling to obtain the barotropic dynamic height grid and the bottom velocity grid of the Kuroshio extension body. Subsequently, the barotropic dynamic height distribution map, the barotropic vortex kinetic energy distribution map, and the barotropic kinetic energy flux spectrum were calculated. The results revealed that: 1) in the absence of an external force, dynamic height fluctuation of the positive pressure will cause the water to flow from high-power to low-power regions, resulting in the generation of higher eddy kinetic energy. In the presence of an external force, the water flows from the low-power region to the high-power region, increasing the barotropic dynamic height and the eddy kinetic energy. 2) Through analysis of the average barotropic kinetic energy flux spectrum over a long period of nine months, the barotropic reverse kinetic energy cascade in the geostrophic turbulence theory was verified. 3) The spectral analysis of the monthly average barotropic kinetic energy flux of the Kuroshio extension showed that the magnitude of the vortex kinetic energy will affect the variation in the kinetic energy flux amplitude. With increasing vortex kinetic energy, the amplitude of the kinetic energy flux spectrum increases, and the forward/reverse kinetic energy cascade increases, and vice versa. Furthermore, the cascade of barotropic kinetic energy changes with time. From June to August 2004, the cascade scale of reverse kinetic energy reduced, and its strength increased over time. In September 2004, the intensity of the cascade of reverse kinetic energy suddenly weakened, and from September to November 2004, a cascade change process of reverse kinetic energy was similar to that from June to August 2004. Lastly, from December 2004 to January 2005, the forward kinetic energy shifted from the cascade scale to a small scale, and its intensity weakened.

(本文编辑: 丛培秀)