

冯劭华, 罗德海, 钟霖浩. 2015. 黑潮延伸体中尺度涡年代际变化与北太平洋风暴轴变化之间的关系 [J]. 大气科学, 39 (5): 861–874. Feng Shaohua, Luo Dehai, Zhong Linhao. 2015. The relationship between mesoscale eddies in the Kuroshio Extension region and storm tracks in the North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 861–874, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14142.

# 黑潮延伸体中尺度涡年代际变化与北太平洋 风暴轴变化之间的关系

冯劭华<sup>1, 3</sup> 罗德海<sup>2</sup> 钟霖浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国海洋大学, 青岛 266100

<sup>2</sup> 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

<sup>3</sup> 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266100

**摘 要** 利用 18 年带通滤波的卫星高度计资料, 通过引入黑潮延伸体中尺度涡能量 (EKE) 的面积指数, 分析了黑潮延伸体中尺度涡 EKE 的强度和位置的年代际变化特征, 并使用回归分析等方法分析了它们与北太平洋风暴轴之间的关系。结果表明, 黑潮延伸体中尺度涡增强与北太平洋风暴轴的增强相对应, 而 EKE 位置偏北 (南) 时对应的北太平洋风暴轴也偏北 (南), 同时当 EKE 的位置偏东 (偏西) 时北太平洋风暴轴则西退 (东移)。此外, 北太平洋风暴轴的变化对黑潮延伸体也可能有一定的反馈作用, 黑潮延伸体中尺度涡 EKE 强度的变化与北太平洋风暴轴 EOF 第一和第三个模态 (第二个模态) 回归的海表面高度距平模态有明显的 3~4 年滞后的正 (负) 相关, 而黑潮延伸体中尺度涡 EKE 位置的变化则相反。这种滞后相关可能是通过北太平洋风暴轴驱动的遥相关型环流改变海表面风应力旋度并强迫出的海表面高度距平的西传导致的。

**关键词** 黑潮延伸体 中尺度涡 风暴轴 相关性

文章编号 1006-9895(2015)05-0861-14

中图分类号 P433.2 P47

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14142

## The Relationship between Mesoscale Eddies in the Kuroshio Extension Region and Storm Tracks in the North Pacific

FENG Shaohua<sup>1, 3</sup>, LUO Dehai<sup>2</sup>, and ZHONG Linhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ocean University of China, Qingdao 266100

<sup>2</sup> Key Laboratory of Regional Climate–Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

<sup>3</sup> Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266100

**Abstract** Using 18 years of Band-pass filtered sea surface height (SSH) data from satellite altimeters, the relationship between the mesoscale eddy kinetic energy (EKE) in the Kuroshio Extension (KE) region and North Pacific atmospheric storm track is investigated by introducing the EKE area index and using regression analysis. A stronger North Pacific storm track was found to be associated with intensified Kuroshio Extension mesoscale eddy activity. The North Pacific storm track shifts northward (southward) as the maximum EKE core in the KE region shifted to the north (south). However, the variation between the EKE and North Pacific storm track is reversed in the zonal position. Moreover, a lead–lag correlation between the EKE and North Pacific storm track variations exists. The strength of the EKE exhibits a 3–4 year lag positive (negative) correlation with the EOF1 and EOF3 (EOF2) of the North Pacific storm track, while the

收稿日期 2014-03-10; 网络预出版日期 2014-10-17

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2011CB403500、2013CB956203, 国家自然科学基金项目 41490642, 海洋公益性行业科研专项 NO. 201005019

作者简介 冯劭华, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事海洋环流和海洋动力学的研究。E-mail: ouc\_fsh@163.com

opposite is true for the position of the EKE. This can arise from the westward propagation of sea surface height anomalies, driven by Atmospheric Teleconnection Patterns associated with the North Pacific storm track.

**Keyword** Kuroshio Extension, Mesoscale eddy, Storm track, Correlation

## 1 引言

黑潮是由北太平洋风应力旋度驱动的一支强西边界海流,它具有高盐、高温、高流量等特征。黑潮延伸体是黑潮与亲潮交汇的区域,高温的黑潮与低温的亲潮相汇形成明显的海洋温度锋区, Qiu and Chen (2013) 对北太平洋海表面高度场求均方根得到的结果显示黑潮延伸体区域为海表面均方根大值区,也就是说该区域海洋流动变化频率较大,海洋中的中尺度涡能量活动十分活跃。Qiu and Chen (2005) 利用卫星高度计资料探讨了黑潮延伸体强度及其中尺度涡的变化,指出黑潮延伸体的强度及中尺度涡强度具有显著的年代际振荡。同时,黑潮延伸体海区海气相互作用十分显著,马静等 (2014) 通过个例分析发现黑潮延伸体区域中尺度海洋涡旋能够影响大气瞬变扰动,大气瞬变扰动强度在暖(冷)涡下游上空出现极大(小)值,该影响不仅表现在海洋大气边界层,在自由大气中低层也有较为清晰的反映,进一步表明黑潮延伸体区域是激发大气中天气尺度系统活动的中心区域。风暴轴一般是指大气中 2.5~7 天瞬时扰动最活跃的区域,大气中天气尺度系统的活动也是海洋和大气之间能量相互交换的一种重要途径。可见,作为反映大气中的天气尺度系统活动的北太平洋风暴轴与黑潮及其延伸体之间可能存在着一定的联系。

Nakamura et al. (2004) 研究发现,穿越黑潮延伸体区域的海洋大气的热量交换会在大气底层产生差异,从而维持大气的斜压性,有利于风暴轴的发展, Nakamura et al. (2008) 通过模式的研究进一步表明北太平洋风暴轴的活动会产生涡度的通量,使中纬度西风急流的强度发生改变,从而影响黑潮延伸体位置的变化。此外,国内学者对北太平洋风暴轴与黑潮的关系也有很多研究,例如,马静和徐海明 (2012) 的研究表明春季黑潮延伸体北侧海洋锋区南北位移与 6 月东亚高空急流、太平洋区域风暴轴的南北位置具有很好的对应关系,朱伟军等 (1999, 2000a) 的分析揭示冬季北太平洋风暴轴的强度和位置具有明显的年际振荡,这与黑潮海温异常激发的 500 hPa 高度层西太平洋(WP)遥相关型有密切相关性。任雪娟等 (2007) 的研究表明风

暴轴正交经验分解(EOF)的时间系数与阿留申低压指数、太平洋北美型遥相关(PNA)指数、WP 指数,以及与黑潮海温指数之间具有显著的相关性,再次证实了在北太平洋中纬度地区存在着 SST(海表面温度)异常、风暴轴异常和大气平均流异常三者间的耦合相互作用。Qiu (2002, 2003) 研究了黑潮延伸体变化对海气相互作用的贡献,指出黑潮延伸体系统大尺度的变化会影响到海表面的热平衡,通过水平的地转热对流在冬季产生异常的 SST,这为海气热交换提供了条件。此外,大尺度的气候态的变化如太平洋年代际振荡(PDO; Mantua et al., 1997) 经常被用来解释东北太平洋海表面高度、温度的波动,最近, Di Lorenzo et al. (2008) 定义了一个新的海洋气候模态——北太平洋涡旋振荡(NPGO),其不仅能很好地反映风应力和海表面盐度异常的变化,而且与东北太平洋中生物变量的变化相关性很好。Qiu and Chen (2010) 对黑潮延伸体与 PDO 和 NPGO 指数的相关性也做了大量研究,结果发现 PDO 和 NPGO 的位相转换与黑潮延伸体强度和位置的移动有很好的相关性,这主要是由 PDO 和 NPGO 驱动的北太平洋东部海表面高度(SSH)距平场西传引起的。Qiu and Chen (2006) 进一步利用由风应力旋度驱动的 1.5 层约化重力模式,通过加入观测的原始风场和由 SST 变化引起的异常风场实验,探索了海气耦合作用对黑潮延伸体急流及中尺度涡的重要作用,证明黑潮延伸体中尺度涡旋与太平洋中部风应力旋度的变化有关。风应力旋度驱动的 SSH 正(负)距平信号西传并增强(减弱)黑潮延伸体急流强度,这种变化会使其处于稳定(不稳定)模态,在不稳定模态下容易激发扰动而使中尺度涡活动增强。

从前人的研究可以发现,北太平洋风暴轴与黑潮延伸体之间的确具有一定的联系,但前人的研究主要集中在黑潮延伸体的强度如何影响北太平洋风暴轴的变化,也较多地研究了北太平洋风暴轴与遥相关型以及海表面温度之间的关系,但是黑潮延伸体中尺度涡的变化到底与北太平洋风暴轴之间到底存在什么样的关系并不清楚。很多研究表明北大西洋和北太平洋风暴轴的变化可以激发大气的遥相关模态如北大西洋涛动(NAO)、北极涛动

(AO)、太平洋—北美型 (PNA) 以及北太平洋涛动 (NPO) 等 (Vallis et al., 2004; Choi et al., 2010; Franzke et al., 2011)。Chhak et al. (2009) 的研究则揭示 PDO 和 NPGO 等北太平洋上的主要海洋模态的形成与中纬度大气遥相关型有着密切的关系, PDO 模态对应于阿留申低压 (AL) 异常的强迫, NPGO 模态则对应于大气中 NPO 异常的强迫, 而 Qiu et al. (2002, 2003, 2006) 的研究证实黑潮及其延伸体的变化也与大尺度风应力旋度的强迫有密切的联系, 由此, 我们猜测大气风暴轴的变化可能会通过驱动不同的大气遥相关型, 并强迫出海表面的风应力旋度的异常, 从而引起海洋环流的变化最终影响到黑潮延伸体。因此, 本文将着重研究黑潮延伸体中尺度涡强度和位置在年代际尺度上的变化与北太平洋风暴轴变化之间的关系以及北太平洋风暴轴的变化对黑潮延伸体中尺度涡的反馈作用。这有助于我们进一步了解黑潮延伸体区域附近海气相互作用的机制和特征。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料介绍

本文使用的资料为: NCEP (National Centers for Environmental Prediction) /NCAR (National Center for Atmospheric Research) 高度场、风场及海平面气压场 (SLP) 的逐日再分析资料 ( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ) 和来自美国马里兰大学开发的 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 逐月海表面风应力资料 ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ), 以及由法国 AVSIO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic) 数据中心提供的逐日卫星高度计海表面高度 SSH 及其异常 SSHA (海表面高度异常) 资料 ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ), 时段为 1993~2010 年共 18 年, 由于 SODA 资料只有 2007 年以前的, SODA 资料使用 1993~2007 年共 15 年。本文使用去掉气候态的月平均数据来进行研究, 从而去掉了季节的信号, 来研究各个变量全年的变化特征。

### 2.2 方法介绍

海洋中尺度涡一般是指空间尺度在几十到几百公里、时间尺度在几天到几月的闭合涡旋, 其时间尺度的标准从小于 40 天到 300 天不等, 甚至更短 (Sharma et al., 1999; Ebuchi and Hanawa, 2000; Chelton et al., 2011), 为了描述黑潮延伸体中尺度涡的能量 (EKE) 变化, 本文使用滤波 300 天以下的

AVSIO SSHA 资料 (Qiu and Chen, 2005)。利用地转关系  $u' = -(g/f)(\partial h'/\partial y)$  和  $v' = (g/f)(\partial h'/\partial x)$  计算异常的海流流速 (其中,  $h'$  为海表面高度异常,  $g$  为重力加速度,  $f$  为科氏参数), 我们定义黑潮延伸体 EKE 为  $EKE = (u'^2 + v'^2)/2$ , 以此来表征黑潮延伸体中尺度涡的活动状态。图 1 为多年平均的黑潮延伸体 EKE 空间分布型。可以看出, 在气候意义上黑潮延伸体 EKE 呈现一个东西向的, 形成一个类似大气风暴轴的分布, 也可以定义为黑潮延伸体风暴轴 (Kuroshio Extension storm track)。然而, 对于不同的年份 EKE 的大值区表现为比较凌乱的分布。为了刻画黑潮延伸体中尺度涡的能量变化, 我们引入一个能够较好地描述中尺度涡 EKE 的强度和位置变化的方法——面积指数。例如可以定义图 1 中虚线框区域 ( $32^\circ\text{N} \sim 38^\circ\text{N}$ ,  $141^\circ\text{E} \sim 165^\circ\text{E}$ ) 内中 EKE 大于 0.02 的所有点的平均值来定义黑潮延伸体 EKE 的强度, 而区域内符合条件的点加权平均可以定义黑潮延伸体 EKE 的位置, 加权平均的公式为  $I_x = \sum_{i=1}^{nx} w_i \cdot x_i / \sum_{i=1}^{nx} w_i$ ;  $I_y = \sum_{i=1}^{ny} w_i \cdot y_i / \sum_{i=1}^{ny} w_i$ , 其中,  $I_x$  和  $I_y$  为最终确定的表示经向和纬向位置的坐标;  $x_i$  表示各点经向位置的坐标;  $y_i$  为纬向位置的坐标;  $w_i$  为权重系数, 即  $x_i$  或  $y_i$  坐标点对应的 EKE 的值。

对于大气风暴轴, 可以有多种方法来定义风暴轴, 如根据天气尺度的经向和纬向风定义的动能, 以及天气尺度波的经向热量输送 (Hoskins and Valdes, 2002)。在本文中, 我们的主要目的是探讨海洋—大气之间的关系, 而两者之间通常通过风应力的异常和热量的传递实现相互作用, 已有的观测和模式结果表明, 黑潮延伸体海洋峰对大气的影 响不仅存在于海洋—大气边界层, 而且可以体现在对流层低层 (Tokinaga et al., 2009), 而大气中低层的海表面风应力的变化通常也是驱动海表面高度异常的原因之一。因此, 我们采用低层 850 hPa 风暴轴的定义方法: 滤波 2.5~7 d 的经向风场  $v'$  和温度场  $T'$  的乘积  $\overline{v'T'}$  进行定义, 以此来了解黑潮延伸体与大气风暴轴之间到底存在什么关系。李莹等 (2010) 对风暴轴的定义及其强度和位置表征方法进行了归纳总结, 指出 EOF 分析可以比较好的反映北太平洋风暴轴的变化主要特征, 因此, 我们以对北太平洋风暴轴进行 EOF 分析的前三模态时间系数作为其指数。此外, Simmons and Hoskins (1978)

提出天气尺度涡动可以用发展中的斜压波生命史来解释, Hoskins and Valdes (1990) 强调了大气斜压不稳定性增长率  $\sigma_{BI} = 0.31f \left| \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right| N^{-1}$  (其中  $f$  为科氏参数,  $\bar{v}$  为平均风速,  $N$  为 Brunt-Vaisala 频率) 是斜压波 (风暴轴) 成长的至关重要的因素。因此, 本文利用斜压不稳定性率  $\sigma_{BI}$  的大小来判断风暴轴的发展。一般来说  $\sigma_{BI}$  越大, 斜压性越强, 有利于风暴轴的发展, 反之亦然。

为了了解黑潮延伸体 EKE 的年代际变化和北太平洋风暴轴之间的关系, 本文使用回归分析法和相关性分析法进行研究。

### 3 结果与分析

#### 3.1 黑潮延伸体中尺度涡的年代际变化特征

按照所给资料和方法, 我们首先计算了黑潮延伸 EKE 的气候态, 如图 1 所示。从图中可以看出, 黑潮延伸体 EKE 最强中心集中在  $32^{\circ}\text{N} \sim 38^{\circ}\text{N}$  的区域, 利用面积指数的定义可以得出黑潮延伸体 EKE 的强度、南北和东西位置随时间的变化, 如图 2 所示, 其中图 2a 表示强度的变化, 正 (负) 值表示 EKE 强 (弱)。图 2b 为南北位置的变化, 正值为偏北, 而负值为偏南。图 2c 为东西位置的变化, 正值为偏东, 而负值为偏西。从强度和位置指数可以看出, 1993~1994 年及 2000~2004 年 EKE 强度减弱并向北和东向飘移, 反之 1995~1999 年及 2005 年以后 EKE 增强并向南和西向移动, 直到 2010 年再次出现反相变化的趋势。总体来讲 EKE 的强度和位置都具有 10 年左右的年代际振荡信号。EKE 面积指数所得到的结果与 EKE 区域平均强度的变化基本一致 (图略), 因此 EKE 面积指数可以较好地描述黑潮延伸体 EKE 的变化特征。另外 EKE 的

强度与南北位置指数的相关系数达到  $-0.47$ , 与东西位置指数相关系数为  $-0.55$ , 通过了 95% 的信度检验, 说明其强度与位移之间呈反相关, 即随着黑潮延伸 EKE 的增强, 其位置向南和西移动, EKE 减弱时则相反。

#### 3.2 北太平洋风暴轴的变化特征

Wettstein and Wallace (2010) 通过对 300 hPa 月均的风暴轴进行 EOF 分析, 结果发现北太平洋风暴轴主要表现为强度的变化和南北位置的变化, 这些变化同时也伴随着纬向风 (北太平洋中纬度西风急流) 的异常。本文对北太平洋 ( $0^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{W}$ ) 850 hPa 的风暴轴进行去气候态的处理, 从而去除了风暴轴的季节信号, 并对风暴轴的距平数据进行了 EOF 分解, 得到了北太平洋风暴轴 EOF 前三个空间模态和时间系数, 结果如图 3 至图 5 所示。图 3、图 4、图 5 分别为风暴轴的第一模态 (EOF1)、第二模态 (EOF2) 和第三模态 (EOF3) 及对应的标准化的时间系数 PC1、PC2 和 PC3。前三模态方差贡献率分别为 19.9%, 9.1% 和 7.5%。EOF1 模态表现为一个中心, 中心位置位于 ( $40^{\circ}\text{N}$ ,  $160^{\circ}\text{E}$ ) 左右, 与气候态的风暴轴中心位置基本吻合, 这个 EOF1 可以表征风暴轴强度的变化; EOF2 模态表现为位置的南北变化, 它的正值表现为风暴轴中心向北移动。同样, EOF3 模态表现为位置东西向的变化, 它的正值表现为风暴轴向东的移动。对比图 1 中黑潮延伸体 EKE 的分布, 850 hPa 的北太平洋风暴轴正好位于黑潮延伸体 EKE 活动区上空偏北的位置,  $35^{\circ}\text{N}$  左右是黑潮延伸体中尺度涡活动 (EKE) 的最强的海区, 而大气风暴轴轴线的入口至中心段正好跨越这一区域, 表明大气中的天气尺度扰动与黑潮延伸体在地域上具有依存关系。

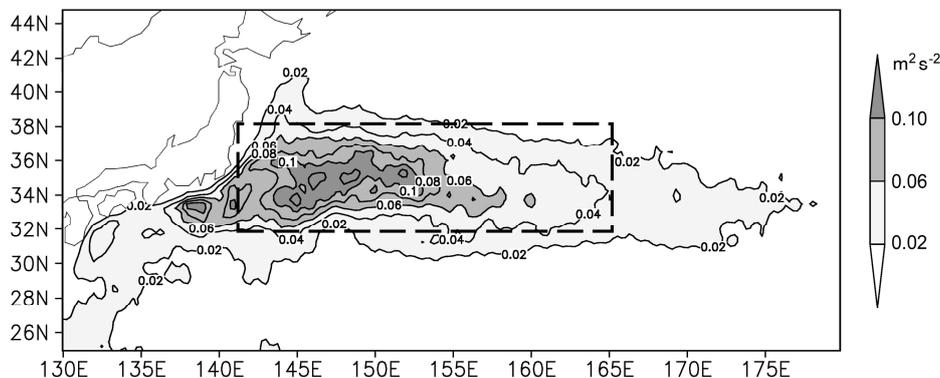


图 1 1993~2010 年黑潮延伸体 EKE 的气候平均态

Fig. 1 Climate mean of Kuroshio Extension EKE (Eddy Kinetic Energy) from 1993 to 2010

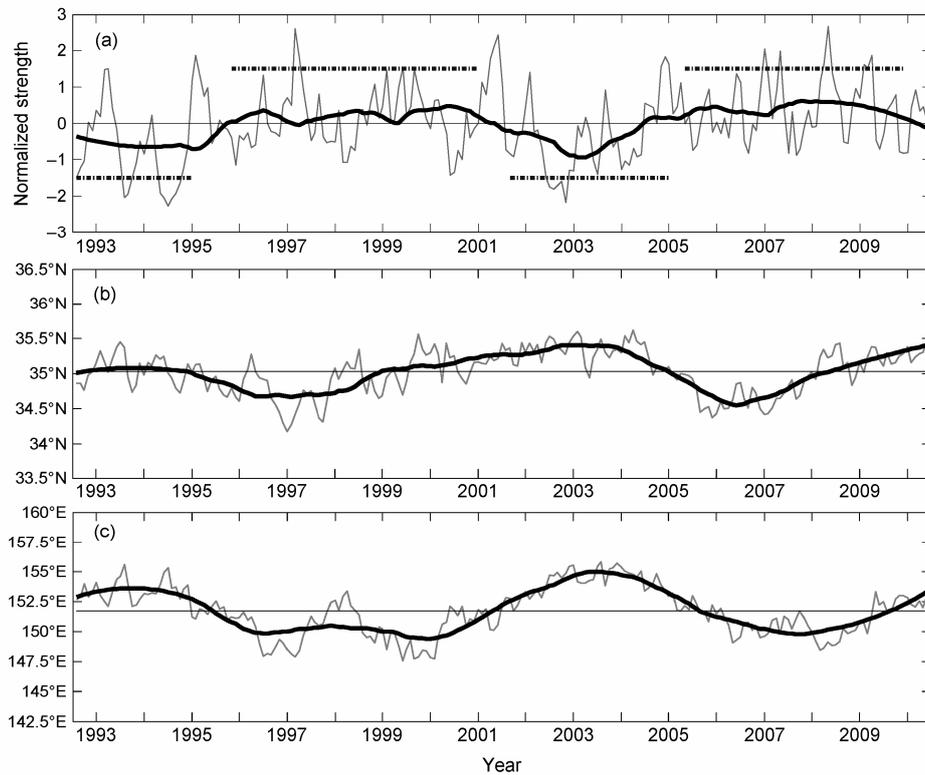


图2 1993~2010年黑潮延伸体EKE各参数的时间序列：(a)强度的标准化；(b)南北位置；(c)东西位置变化。黑色粗实线为11个月滑动平均的结果  
 Fig. 2 Normalized time series of Kuroshio Extension EKE from 1993 to 2010: (a) Strength, (b) latitudinal position, (c) longitudinal position. Black thick lines are for 11-month moving averages

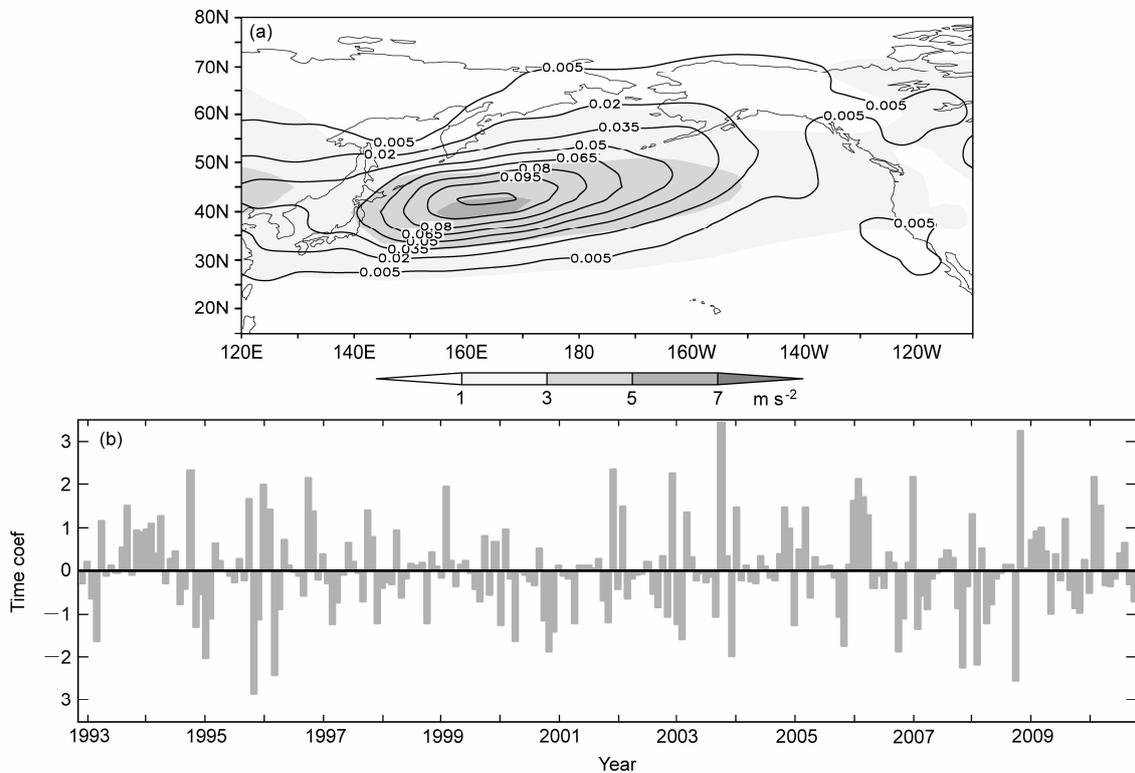


图3 北太平洋风暴轴距平 EOF 分析的第一模态 EOF1 (a) 空间分布[阴影部分表示气候态的风暴轴 (单位:  $m^2 s^{-2}$ ) 分布]及其 (b) 标准化时间系数 (PC1) for the first EOF mode (EOF1) of the North Pacific storm track anomalies

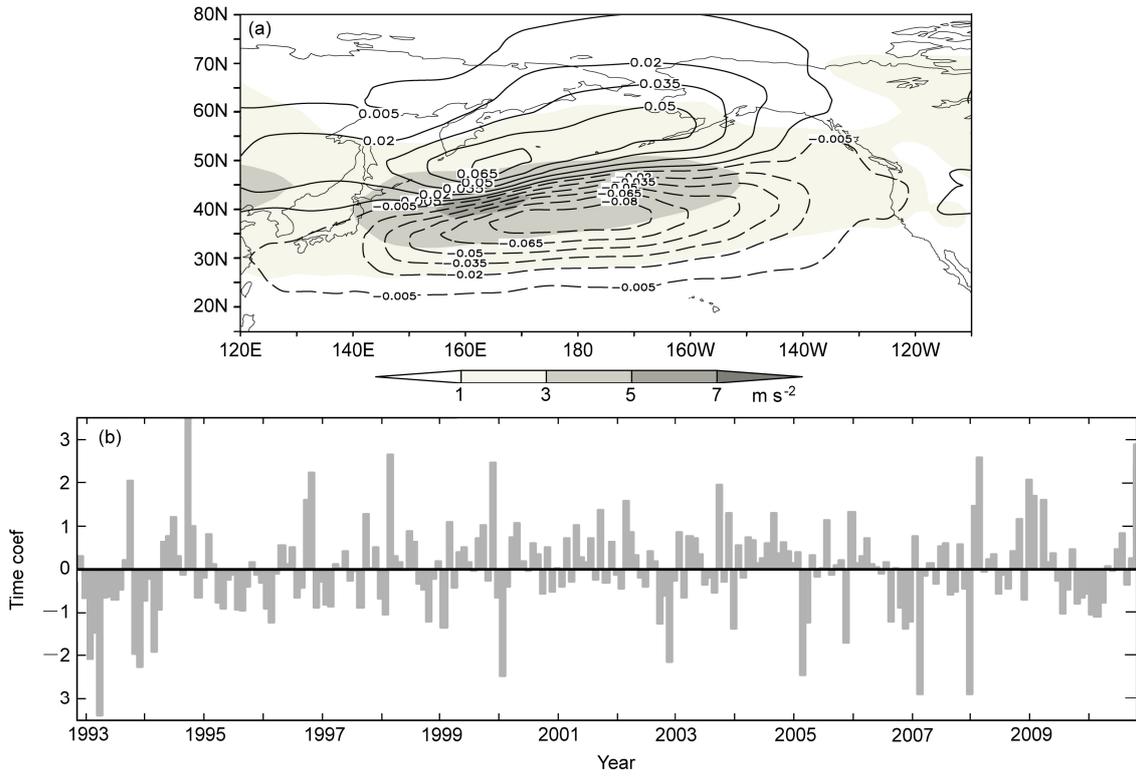


图 4 同图 3, 但为第二模态 EOF2  
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the second EOF mode (EOF2)

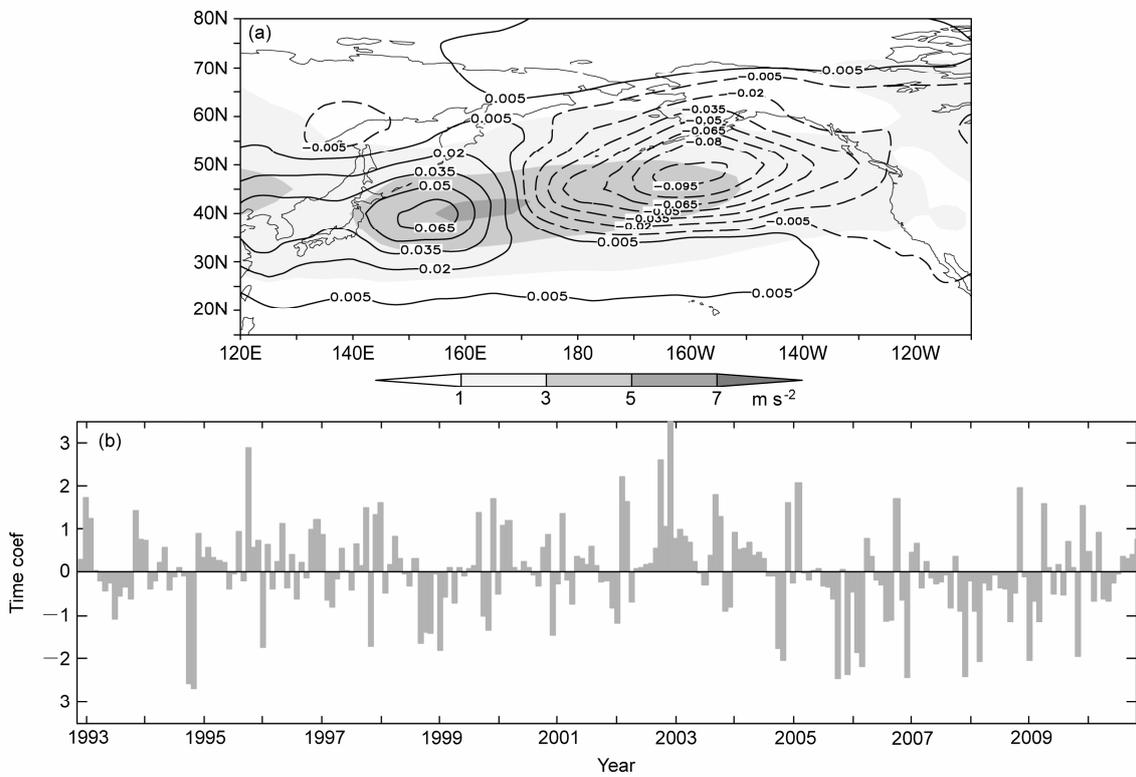


图 5 同图 3, 但为第三模态 EOF3  
Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the third EOF mode (EOF3)

### 3.3 黑潮延伸体中尺度涡与北太平洋风暴轴的关系

从前文的分析可以看出，黑潮延伸体中尺度涡和北太平洋风暴轴在强度、南北位置、东西位置上分别存在较为明显的年代际和年际振荡信号，而在空间位置上又具有一定依存性。为了探究两者之间的关系，本文分别从黑潮延伸体 EKE 指数和北太平洋风暴轴 EOF 指数出发，利用回归分析和相关性方法探究两者之间的相互关系。

#### 3.3.1 黑潮延伸体中尺度涡对北太平洋风暴轴的可能影响

Nakamura et al. (2004) 的研究发现，海洋锋与中纬度西风急流以及风暴轴三者之间存在着一定的相关性，穿越海洋锋区的海洋大气的热量交换会在大气底层产生差异，这种差异可以维持大气的斜压性，使中纬度西风急流加强，从而有利于风暴轴的发展。此外，Wettstein and Wallace (2010) 的研究也表明西风急流与风暴轴之间存在相互作用，由此可见，西风急流和大气斜压不稳定率在大气风暴轴变化中起重要作用。本节将着重讨论黑潮延伸体中尺度涡与西风急流、大气斜压不稳定率以及风暴轴在强度和位置上的关系。

图 6 到图 8 给出了根据黑潮延伸体 EKE 强度和位置指数回归的 850 hPa 西风急流、大气斜压不稳定率及北太平洋风暴轴的空间分布。可以看出，西风急流、大气斜压不稳定率和风暴轴的气候平均位置基本一致。急流带分布在  $30^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$  之间，其轴位于  $42^{\circ}\text{N}$  左右并呈东北—西南向倾斜状，最强中心在太平洋中部地区（图 6a），相应的，该纬度带内大气斜压不稳定率也较强，但在西太平洋急流的入口处达到最大值（图 6b），风暴轴位置与急流基本一致（图 6c）。

从图 6 回归场可以看出，当黑潮延伸体 EKE 增强时，急流表现为沿着急流轴整体增强的趋势，且急流轴的南侧增强最显著。回归的大气斜压不稳定率（图 6b）和大气风暴轴（图 6c）也有同样的整体增强特征。可见，黑潮延伸体 EKE 强度的增强与西风急流和大气斜压不稳定率的增强有着同期伴随关系，强的斜压不稳定率有利于风暴轴的发展，这与 Nakamura et al. (2004) 的研究结果一致。同样的，将三者回归到黑潮延伸体 EKE 南北位置的指数上可以得到它们的回归场，如图 7 所示。从图 7 中可以明显地发现，当黑潮延伸体 EKE 偏北

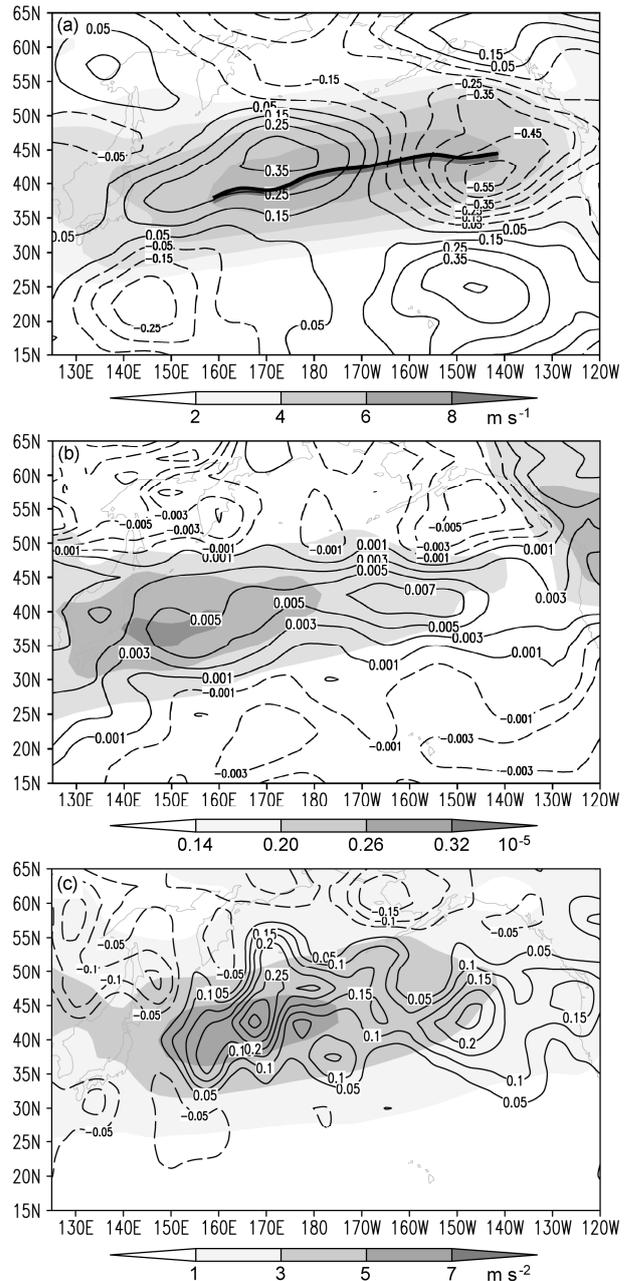


图 6 黑潮延伸体 EKE 强度指数回归的 850 hPa (a) 急流场、(b) 大气斜压不稳定率场以及 (c) 大气风暴轴场。图中阴影部分为各变量的气候平均态，(a) 中黑色粗实线为急流轴所在位置

Fig. 6 (a) The atmospheric jet, (b) atmospheric baroclinic instability rate, and (c) the North Pacific storm track at 850 hPa regressed on Kuroshio Extension EKE strength index. Shadow area in diagram is for the climate mean of each variable. The black line in (a) is for the location of jet axis

时，在北太平洋中纬度地区急流的回归场表现为北正南负的偶极子结构（图 7a），在这种情况下，北太平洋急流可以北移。而大气斜压不稳定率（图 7b）和大气风暴轴（图 7c）的回归场也存在类似的特征，

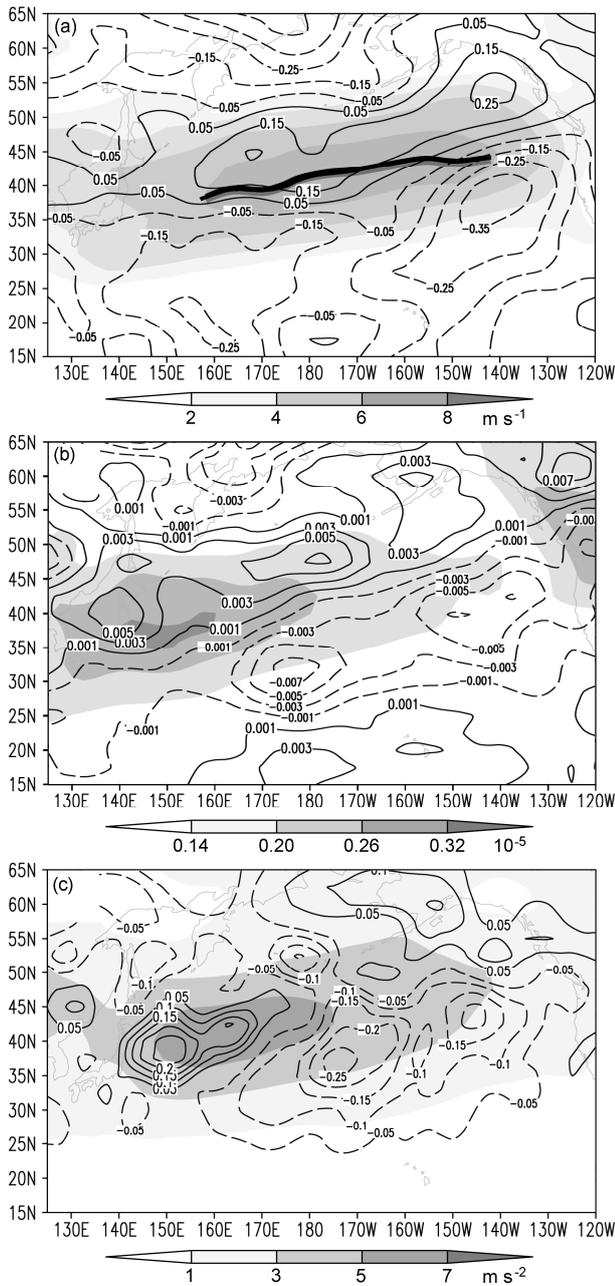


图7 同图6, 但为黑潮延伸体 EKE 南北位置指数  
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for Kuroshio Extension EKE latitudinal position index

但大气风暴轴南北偶极子在急流上游表现较为明显。说明当黑潮延伸体 EKE 偏北时, 在北太平洋急流轴向北漂移的同时, 大气斜压不稳定率高值区也随之北移, 进而导致大气风暴轴向北偏移。对于这种情况北太平洋风暴轴在急流上游北移较为明显。从黑潮延伸体 EKE 东西位置指数的回归场来看, 黑潮延伸体 EKE 偏东时北太平洋急流反而西退 (图 8a), 大气斜压不稳定率的高值区除了上游

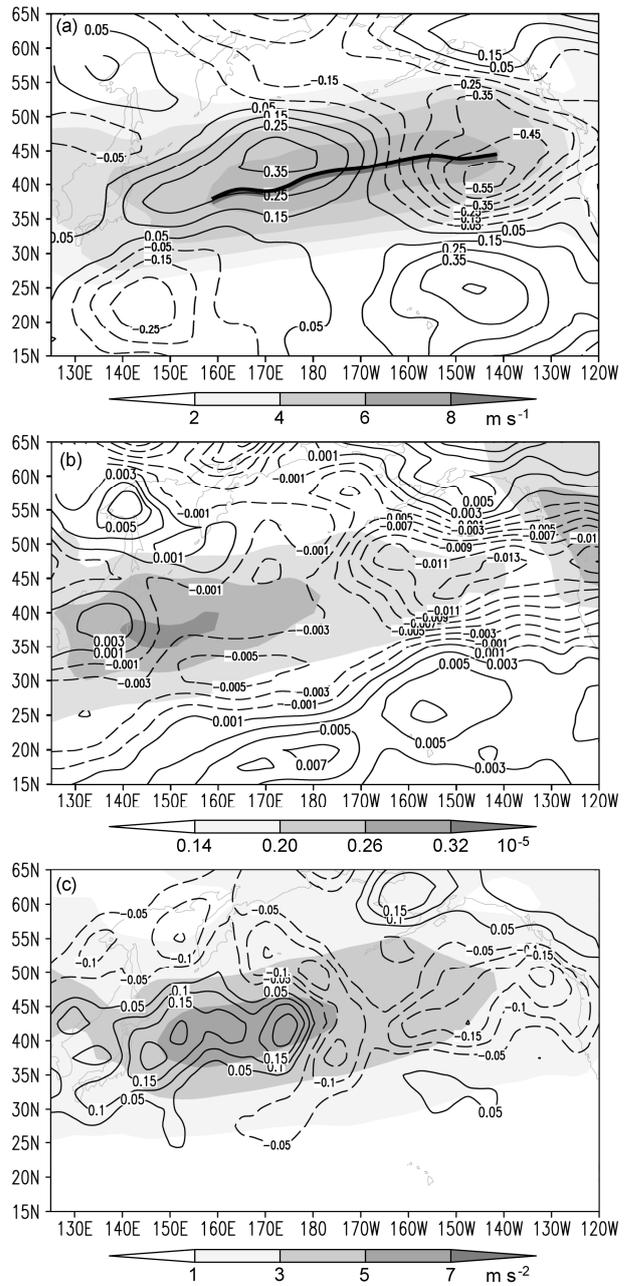


图8 同图6, 但为黑潮延伸体 EKE 东西位置指数  
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for Kuroshio Extension EKE longitudinal position index

靠近日本东岸附近增强外, 下游区域明显减弱 (图 8b), 对应的北太平洋风暴轴呈西部增强东部减弱的形态, 而黑潮延伸体 EKE 偏西时则相反 (图 8c)。黑潮延伸体 EKE 偏东时北太平洋风暴轴反而西退主要原因可能与黑潮延伸体 EKE 的强度有关, 由于黑潮延伸体 EKE 偏东时其强度较弱, 而偏西时较强, 从而当其偏东时会使北太平洋急流减弱并西退, 斜压不稳定区域及大气风暴轴也随之向西偏

移，而当其偏西时则相反。

### 3.3.2 北太平洋风暴轴变化对黑潮延伸体 EKE 的反馈作用

从上一节的分析可见黑潮延伸体的中尺度涡与北太平洋风暴轴在强度和位置上有很好的对应关系，而通过对北太平洋风暴轴的 EOF 分析可知，其变化以强度、南北和东西位置的振荡为主，那么大气风暴轴的这种强度和位置的变化是否会对黑潮延伸体中尺度涡有反馈作用呢？现有的研究已经发现在黑潮延伸体区域中尺度涡的活动与海表面风速大小呈正相关 (Chelton et al., 2001)，此外，Qiu and Chen (2005) 的研究也表明中东太平洋的海表面高度异常信号会通过罗斯贝波西传而影响黑潮延伸体的强度，进而导致黑潮延伸体中尺度涡的变化。很多研究已表明北大西洋和北太平洋风暴轴的变化可以激发大气的遥相关模态如北大西洋涛动 (NAO)、北极涛动 (AO)、太平洋—北美型

(PNA) 以及北太平洋涛动 (NPO) 等 (Vallis et al., 2004; Choi et al., 2010; Franzke et al., 2011)。在本文中我们并不研究北太平洋风暴轴激发遥相关模态的机理，而仅猜想北太平洋风暴轴有可能通过其驱动的大气遥相关型来影响黑潮延伸体中尺度涡的变化。由此，本文分别将大气 300 hPa 高度场、海表面压力场 (SLP)、海表面风场及海表面高度场回归到北太平洋风暴轴 EOF 的前三模态 (PC1、PC2、PC3) 上，并计算回归的时间系数与黑潮延伸体 EKE 指数的相关系数，进而揭示北太平洋风暴轴对黑潮延伸体中尺度涡的反馈作用。

图 9 到图 11 为北太平洋风暴轴不同模态回归的 300 hPa 高度、海表面压力 (SLP)、海表面风应力及海表面高度的空间型。图 9 为回归到北太平洋风暴轴 PC1 上的结果。从图中可以看出，当北太平洋风暴轴增强时，300 hPa 高度的回归场 (图 9a) 表现为偏东型的 NPO 正位相结构且向西北—东南

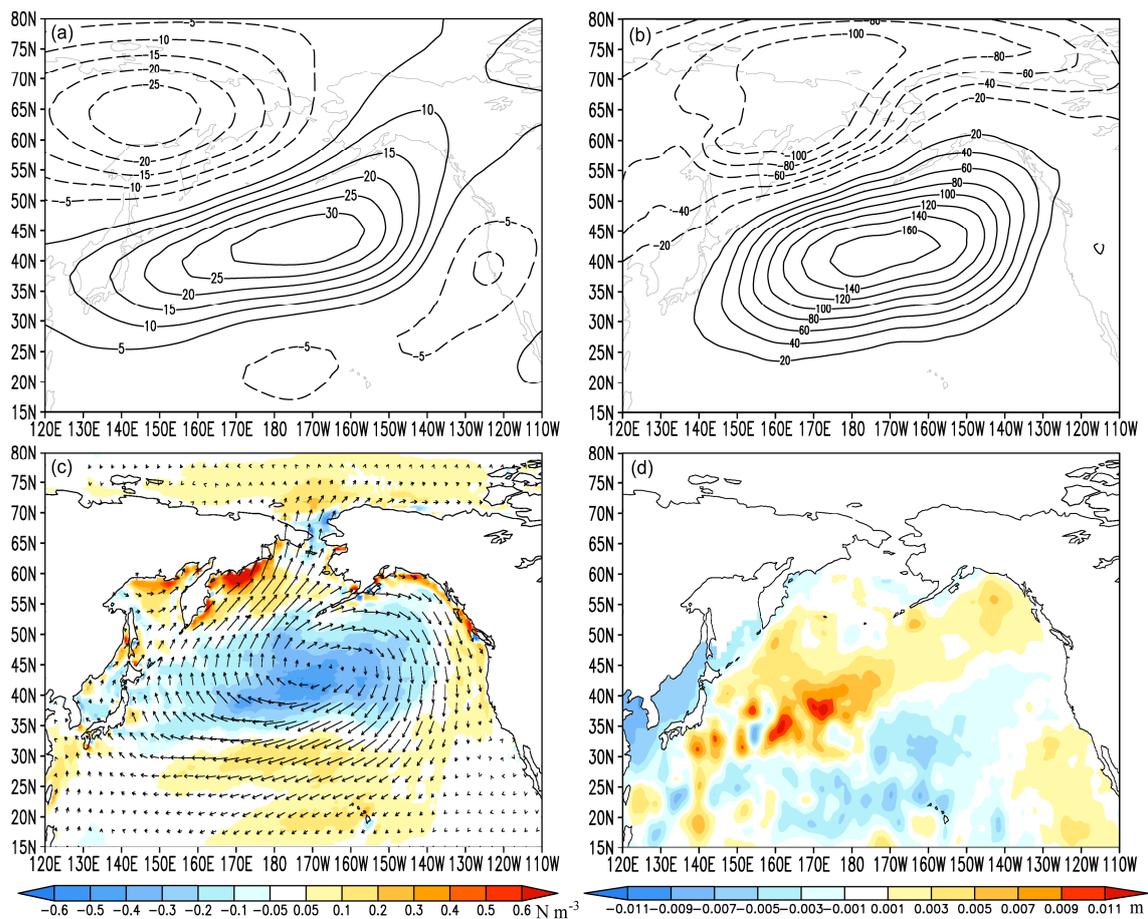


图 9 由北太平洋风暴轴第一模态 PC1 回归的各要素场的空间分布：(a) 300 hPa 高度 (单位：gpm)、(b) 海平面气压 (SLP; 单位：hPa)、(c) 海表面风应力 (矢量; 单位： $\text{N m}^{-3}$ ) 及其旋度 (填色; 单位： $\text{N m}^{-3}$ )、(d) 海表面高度 (单位：m)

Fig. 9 Spatial patterns of (a) the geopotential height (units: gpm) at 300 hPa, (b) sea level pressure (SLP; units: hPa), (c) sea level wind stress (vector; units:  $\text{N m}^{-3}$ ) and its curl (colored area; units:  $\text{N m}^{-3}$ ), (d) sea surface height (units: m) regressed on the North Pacific storm track PC1

方向倾斜，在北太平洋中纬度上空表现为高度场正距平，而从 SLP 的回归场（图 9b）来看，北太平洋中纬度地区则对应一个反气旋环流从而产生一个反气旋式的风应力强迫。在高压中心（SLP 正距平中心）北侧会形成西风异常而在南侧则会形成东风异常，如图 9c 所示。对于这种情况，北太平洋海表面风应力会在 35°N 以北产生反气旋强迫而在其南侧产生气旋式强迫。相应的风应力旋度则表现为以 35°N 为界的北负南正的偶极子型，其最强中心位于太平洋中部。由风应力旋度驱动的海平面上升或下沉的现象通常称之为 Ekman 抽吸，由于 Ekman 抽吸的作用，海表面风应力旋度正距平会驱动出海表面负距平高度，因此对应的海表面高度的回归场表现为北正南负的偶极子结构（图 9d）。也就是说，大气风暴轴增强时会驱动出的偏东的北太平洋涛动（NPO）正位相型，通过相应的 SLP 和海表面风应力旋度的异常，使得北太平洋海表面高度出现北正南负的偶极子型，这种偶极子结构与气候态海表

面高度的叠加，有可能使得黑潮延伸体海表面高度的经向梯度减弱，从而黑潮延伸体流速减弱，而中尺度涡增强。因此北太平洋风暴轴的强度（EOF1）与黑潮延伸体中尺度涡强度之间可能存在正反馈。而当大气风暴轴减弱时则相反。

图 10 与图 9 类似，但为回归到大气风暴轴 EOF2 的结果。可以看出，当大气风暴轴偏北时，300 hPa 高度和 SLP 的回归场都表现为在北太平洋上空海盆状的正距平（图 10a、b），海表面风应力旋度和 SSHA 则与 PDO 负位相对应的海表面风应力旋度和 SSHA 相似（图 10c、d），即在太平洋中东部海表面风应力旋度减弱而海表面高度增强。同样的，图 11 为回归至大气风暴轴 EOF3 的结果。其结果显示，当大气风暴轴偏西时，300 hPa 高度和 SLP 的回归场则表现 NPO 负位相型，相应的在北太平洋东部驱动出海表面风应力旋度正距平、海表面高度负距平，这样的分布型与 NPGO 正位相所对应的海表面风应力旋度和海表面高度距平场是一

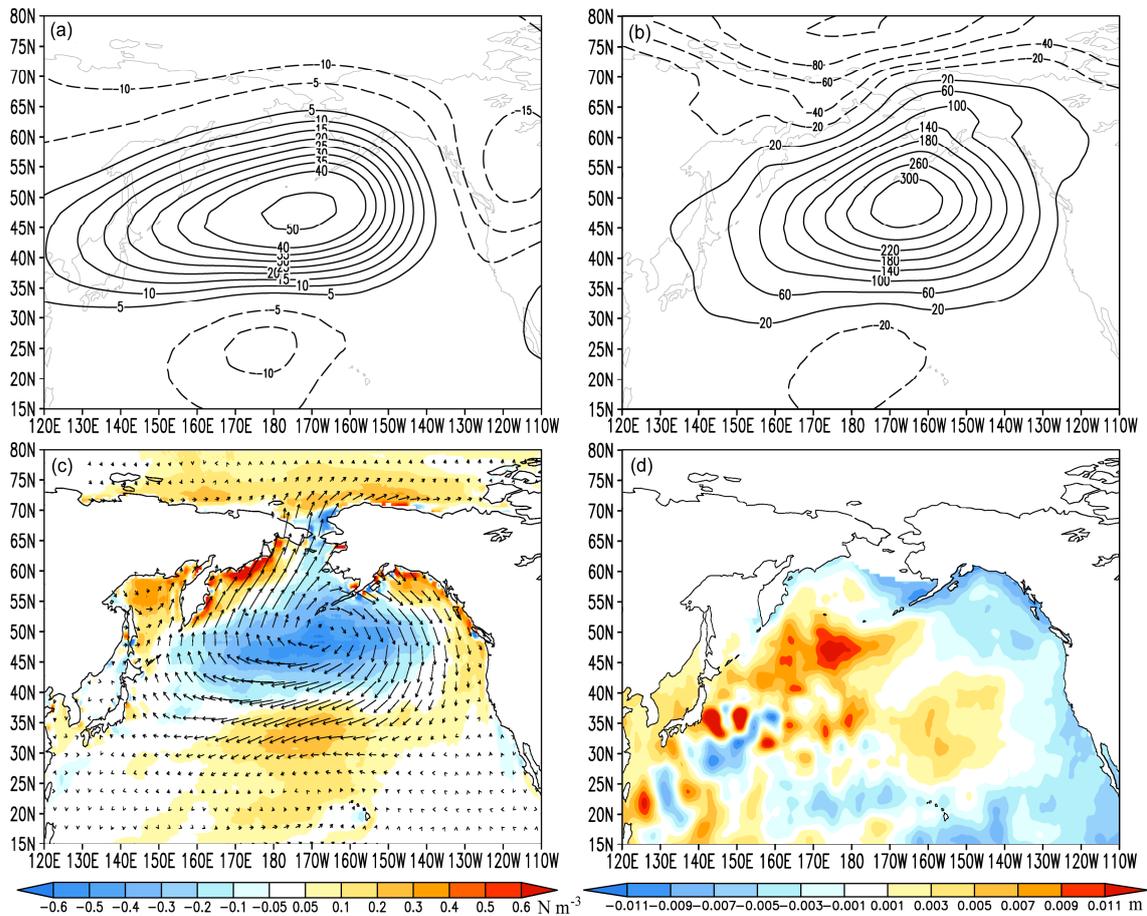


图 10 同图 9，但为 PC2

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for PC2

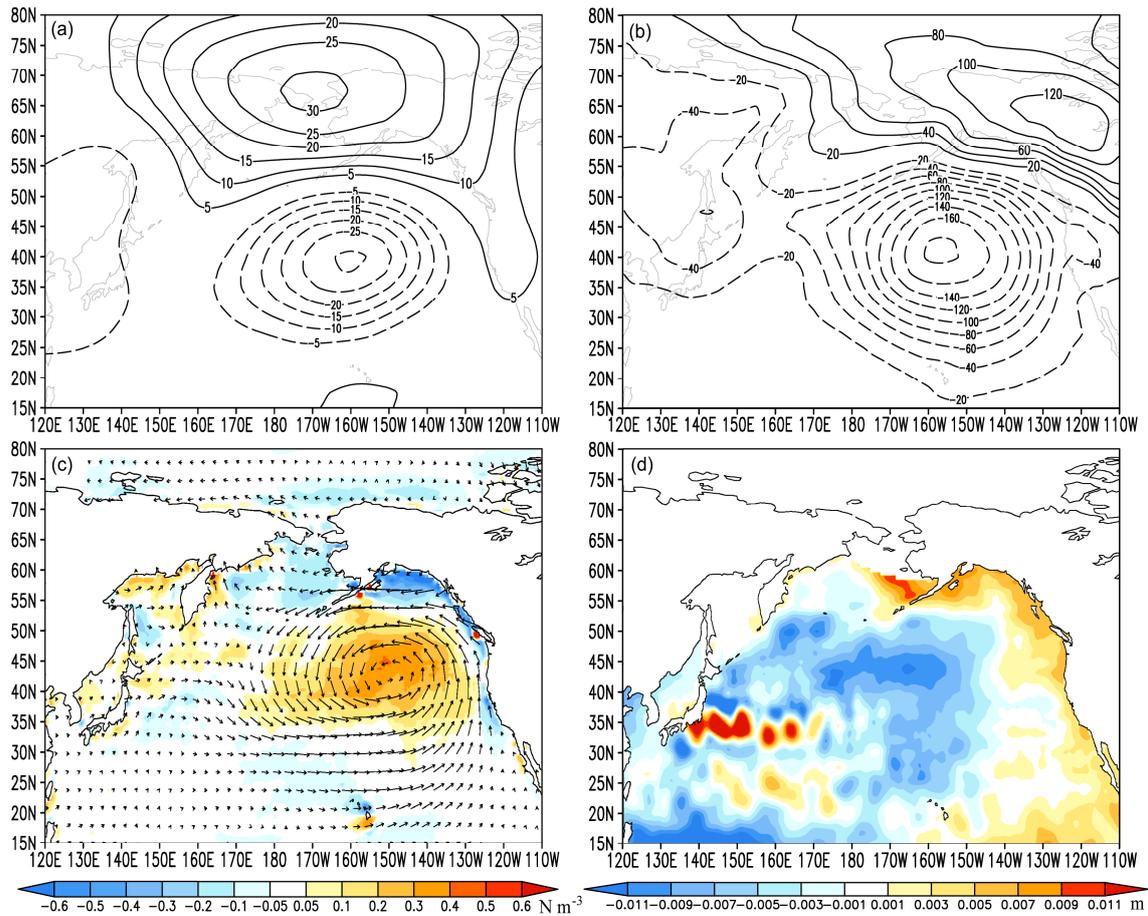


图 11 同图 9, 但为 PC3

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for PC3

致的。这种在中东太平洋区域整个海盆式的海表面高度距平随罗斯贝波向西传播的过程中, 受高低纬度不同传播速度的影响, 在纬向上, 距平信号到达黑潮延伸体区域的前后顺序的差异同样会改变其海表面高度的经向梯度, 进而可能导致黑潮延伸体急流和中尺度涡的变化。

从回归结果可见, 北太平洋风暴轴不同模态驱动出的大气遥相关型、海表面风应力和海表面高度距平场是不相同的。为了证实我们的猜测, 我们以风暴轴各模态 (PC1、PC2、PC3) 回归的海表面高度场 (图 9d、图 10d、图 11d、) 为标准, 分别计算了三者与 1993~2010 年月均的 SSHA 场之间的相关系数, 标准化后得到图 12a-c, 我们称之为北太平洋风暴轴各模态 (PC1、PC2、PC3) 回归的标准化时间系数。从图中可以看到, 回归的时间系数也具有明显的年代际振荡信号, 因而进一步计算了其黑潮延伸体 EKE 指数的同期及滞后相关系数, 如图 13 所示。

从图 13 中可以看出, 当黑潮延伸体 EKE 强度滞后 PC1、PC3 回归系数 3 年半左右, 它们达到最大的正相关, 且它们的相关系数分别为 0.25 和 0.29 (图 13a<sub>1</sub>、a<sub>3</sub>), 而当黑潮延伸体 EKE 强度滞后 PC2 回归系数 3 年 7 个月时则达到最大的负相关, 其相关系数为 -0.27 (图 13a<sub>2</sub>)。当黑潮延伸体 EKE 南北位置指数滞后 PC1、PC3 回归系数 3~4 年达到最大的负相关, 相关系数分别为 -0.52 和 -0.58 (图 13b<sub>1</sub>、b<sub>3</sub>), 而当滞后 PC2 回归系数 2 年时则达到最大的正相关, 相关系数为 0.56 (图 13b<sub>2</sub>)。同时我们还计算了黑潮延伸体 EKE 东西位置指数与北太平洋风暴轴各模态回归 (PC1、PC2、PC3) 的时间系数的相关关系。当黑潮延伸体 EKE 东西位置指数滞后 PC1、PC3 的回归系数 3~4 年时则达到最大的负相关, 且它们的相关系数分别为 -0.58 和 -0.65 (图 13c<sub>1</sub>、c<sub>3</sub>), 而滞后 PC2 的回归系数 3 年 4 个月时则达到最大的正相关, 其相关系数为 0.74 (图 13c<sub>2</sub>)。

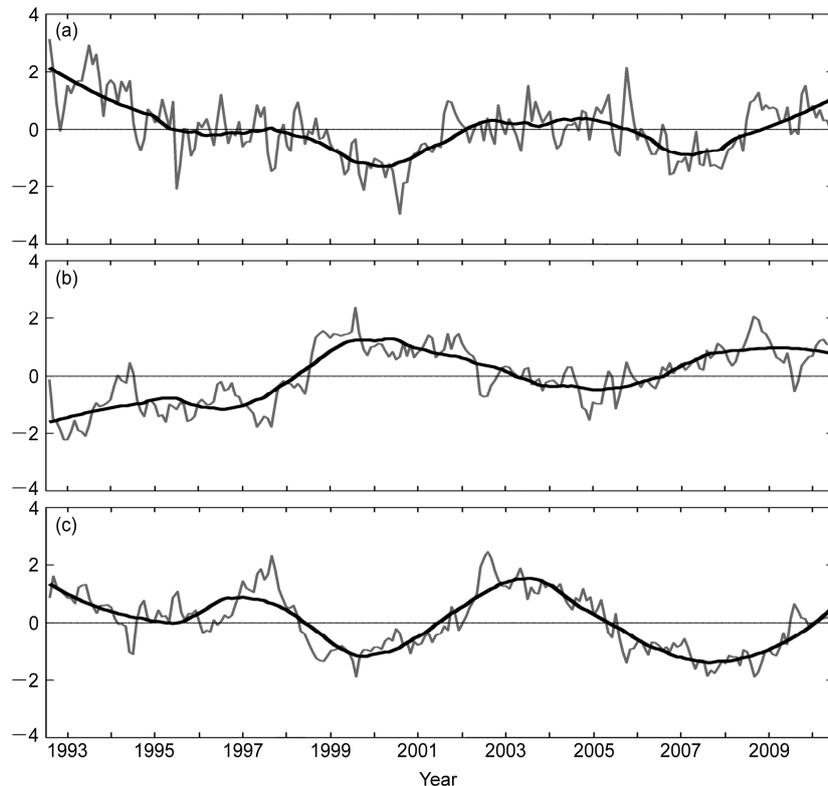


图 12 北太平洋风暴轴回归的标准化时间系数: (a) PC1; (b) PC2; (c) PC3

Fig. 12 Normalized time series for the regressions of North Pacific storm track: (a) PC1, (b) PC2, (c) PC3

由此可见, 黑潮延伸体 EKE 强度与北太平洋风暴轴强度和东西位置可能存在 3~4 年的滞后的正相关, 而黑潮延伸体 EKE 南北和东西位置与北太平洋风暴轴强度和东西位置可能存在 3~4 年的滞后的负相关, 即北太平洋风暴轴增强或向西偏移 3~4 年后黑潮延伸体中尺度涡可能有增强且向南和向西方向移动的趋势。这可能是由于北太平洋风暴轴驱动出的海表面高度异常 (SSHA) 向西传播造成的。图 9d 中 PC1 驱动的 SSHA 在太平洋中东部以 35°N 为界呈北正南负的偶极子型, 其分界线与黑潮延伸体急流轴相吻合, 因此, 当 SSHA 向西传播到黑潮延伸体区域时, 黑潮延伸体急流轴北部 SSH 增强而南部减弱, 使得该区域 SSH 南北梯度减弱, 从而可以导致黑潮延伸体急流的强度减弱, 对应的 EKE 随之增强。从前文分析已知 EKE 增强时其位置会向南向西移动, 故其位置偏南偏西。而图 11d 中 PC3 驱动的 SSHA 在太平洋中东部表现为整个海盆的负距平, 由于罗斯贝波的传播速度低纬度地区快于高纬度地区, 因此在黑潮延伸体急流轴的南部 SSH 负距平信号可以较快地传播到黑潮延伸体区域导致该地区 SSH 南北梯度减弱, 从而可能使

黑潮延伸体急流减弱并南移和西退, 这时黑潮延伸体的 EKE 增强且向南和向西移动, 反之亦然。而黑潮延伸体指数滞后于 PC2 回归指数的相关性的结果与前两者相反, 即北太平洋风暴轴偏北 3 年左右后黑潮延伸体 EKE 强度减弱, 位置北向东方向移动。这也可能是由于图 10d 中回归的 SSHA 在太平洋中东部区域呈海盆状正距平的缘故, 这种异常信号向西传播的过程中, 南部正距平的 SSHA 信号先期到达黑潮延伸体区域导致 SSH 南北梯度增强, 从而使黑潮延伸体增强, 相应的 EKE 减弱且向北向东移动的趋势。当北太平洋风暴轴偏南的时候则相反。

## 4 结论

本文通过引入“黑潮延伸体中尺度涡能量面积指数”并使用 EOF 分解的方法分析了黑潮延伸体中尺度涡和北太平洋风暴轴的强度和位置的变化特征, 并利用回归分析和相关性分析研究了两者之间的相互关系。得到以下的主要结论:

(1) 新定义的黑潮延伸体中尺度涡能量面积指数可以很好地反映的黑潮延伸体中尺度涡的强度和位置的年代际振荡特征。

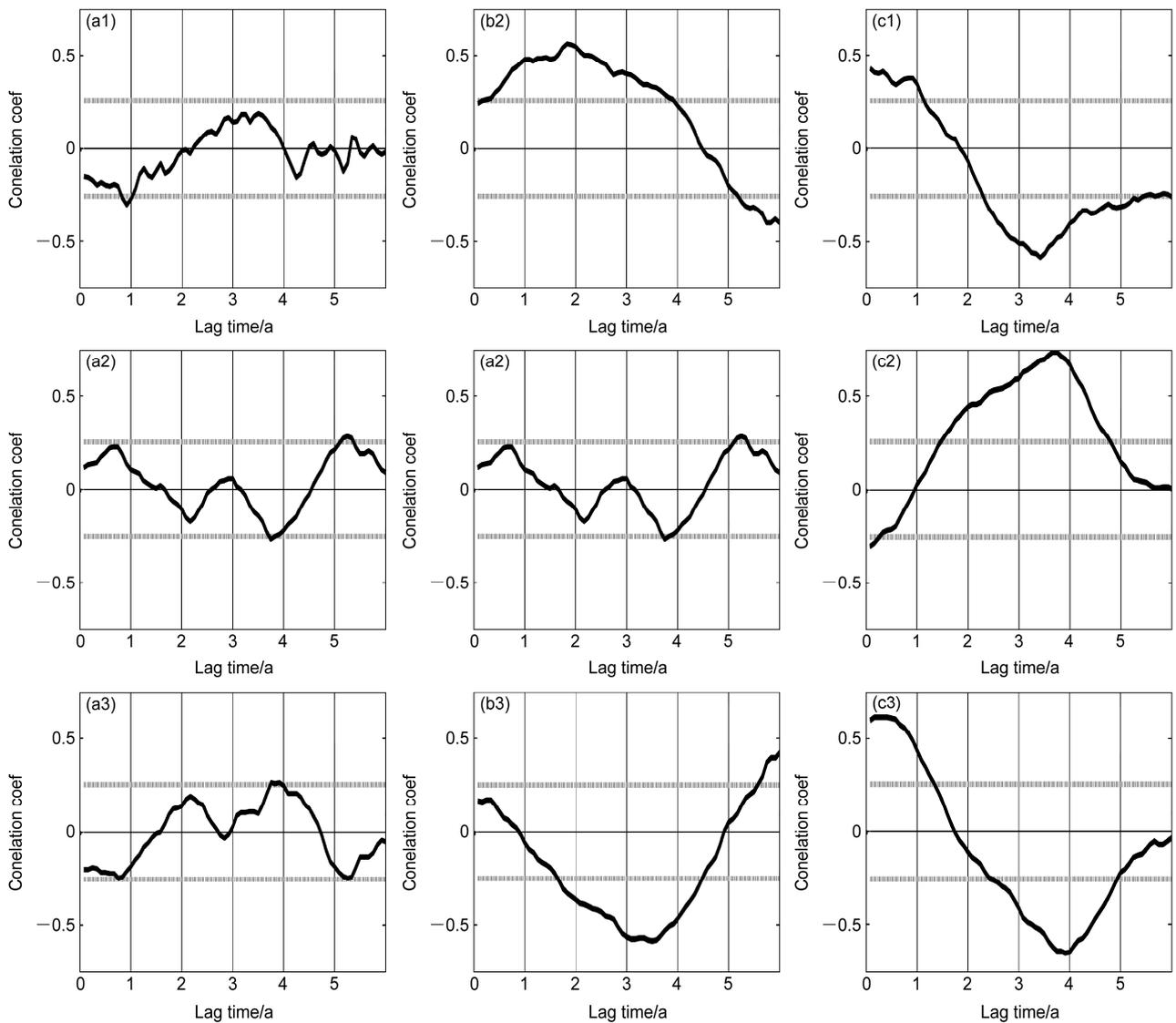


图 13 黑潮延伸体 EKE 指数与大气风暴轴 (a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>、c<sub>1</sub>) PC1、(a<sub>2</sub>、b<sub>2</sub>、c<sub>2</sub>) PC2、(a<sub>3</sub>、b<sub>3</sub>、c<sub>3</sub>) PC3 回归时间系数的同期及滞后相关性。横坐标为滞后时间, 单位为 a; 水平粗虚线为 95% 信度值

Fig. 13 Lag correlation (a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>、c<sub>1</sub>) PC1, (a<sub>2</sub>、b<sub>2</sub>、c<sub>2</sub>) PC2, (a<sub>3</sub>、b<sub>3</sub>、c<sub>3</sub>) PC3 between the Kuroshio Extension EKE index and the regressive time coefficients of North Pacific storm track. The abscissa is for the lag time (units: a), the thick broken line is the 95% confidence level

(2) 黑潮延伸体 EKE 增强时北太平洋急流和斜压不稳定率增强, 有利于大气风暴轴强度的加强, 当黑潮延伸体 EKE 位置偏北(南)时则大气风暴轴偏北(南), 但当黑潮延伸体 EKE 位置偏东(西)时则北太平洋风暴轴西退(东移)。

(3) 北太平洋风暴轴的变化对黑潮延伸体也具有一定的反馈作用, 黑潮延伸体 EKE 的变化与北太平洋风暴轴前三个 EOF 模态回归的时间系数之间存在明显的滞后关系, 滞后时间为 3~4 年。两者的相关性主要由北太平洋风暴轴驱动出的大气遥相关型所引起的海表面高度距平的西移导致的。

需要指出的本文只是尝试性地研究了黑潮延伸体 EKE 与北太平洋风暴轴相互之间的相互关系, 其物理机制仍需要进一步的探讨。

**致谢** 在本文的研究过程中, 吴立新院士、裘波教授、刘秦玉教授和两位审稿人提出了许多宝贵的意见, 使作者受益匪浅, 在此表示由衷地感谢。

## 参考文献 (References)

- Chelton D B, Esbensen S K, Schlax M G, et al. 2001. Observations of coupling between surface wind stress and sea surface temperature in the eastern tropical Pacific [J]. *J. Climate*, 14 (7): 1479–1498.
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. 2011. Global observations of

- nonlinear mesoscale eddies [J]. *Progress in Oceanography*, 91 (2): 167–216.
- Choi D H, Kug J S, Kwon W T, et al. 2010. Arctic Oscillation responses to greenhouse warming and role of synoptic eddy feedback [J]. *J. Geophys. Res.*, 115, D17103, doi:10.1029/2010JD014160.
- Chhak K C, Di Lorenzo E, Schneider N, et al. 2009. Forcing of low-frequency ocean variability in the Northeast Pacific [J]. *J. Climate*, 22 (5): 1125–1276.
- Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb K M, et al. 2008. North Pacific gyre oscillation links ocean climate and ecosystem change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08607, doi:10.1029/2007GL032838.
- Franzke C, Feldstein S B, Lee S. 2011. Synoptic analysis of the Pacific–North American teleconnection pattern [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (655): 329–346.
- Ebuchi N, Hanawa K. 2000. Mesoscale eddies observed by TOLEX-ADCP and TOPEX/POSEIDON altimeter in the Kuroshio recirculation region south of Japan [J]. *J. Oceanogr.*, 56 (1): 43–57.
- Hoskins B J, Valdes P J. 1990. On the existence of storm-tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (15): 1854–1864.
- Hoskins B J, Hodges K I. 2002. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm track [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (6): 1041–1061.
- 李莹, 朱伟军, 魏建苏. 2010. 冬季北太平洋风暴轴指数的评估及其改进 [J]. *大气科学*, 34 (5): 1001–1010. Li Ying, Zhu Weijun, Wei Jiansu. 2010. Reappraisal and improvement of winter storm track indices in North Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (5): 1001–1010.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 78 (6): 1069–1079.
- 马静, 徐海明. 2012. 春季黑潮延伸体海洋锋区经向位移与东亚大气环流的关系 [J]. *气象科学*, 32 (4): 375–384. Ma Jing, Xu Haiming. 2012. The relationship between meridional displacement of the oceanic front in Kuroshio Extension during spring and atmospheric circulation in East Asia [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 375–384.
- 马静, 徐海明, 董昌明. 2014. 大气对黑潮延伸区中尺度海洋涡旋的响应——冬季暖、冷涡个例分析 [J]. *大气科学*, 38 (3): 438–452. Ma Jing, Xu Haiming, Dong Changming. 2014. Atmospheric response to mesoscale ocean eddies over Kuroshio Extension: Case analyses of warm and cold eddies in winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (3): 438–452.
- Nakamura H, Sampe T, Tanimoto Y, et al. 2004. Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts [C]// Wang C, Xie S P, Carton J A. *Earth's Climate: The Ocean–Atmosphere Interaction*. Amer. Geophys. Union, Geophys. Monogr., 147: 329–346.
- Nakamura H, Sampe T, Goto A, et al. 2008. On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L15709, doi:10.1029/2008GL034010.
- Qiu B. 2002. The Kuroshio Extension system: Its large-scale variability and role in the midlatitude ocean–atmosphere interaction [J]. *J. Oceanogr.*, 58 (1): 57–75.
- Qiu B. 2003. Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: Responses and potential feedback [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 33 (12): 2465–2482.
- Qiu B, Chen S M. 2005. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal timescales [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 35 (11): 2090–2103.
- Qiu B, Chen S M. 2006. Decadal variability in the formation of the North Pacific Subtropical Mode Water: Oceanic versus atmospheric control [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 36 (7): 1365–1380.
- Qiu B, Chen S M. 2010. Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio Extension system [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57: 1098–1110.
- Qiu B, Chen S M. 2013. Concurrent decadal mesoscale eddy modulations in the western North Pacific subtropical gyre [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 43 (2): 344–358.
- 任雪娟, 杨修群, 韩博, 等. 2007. 北太平洋风暴轴的变异特征及其与中纬度海气耦合关系分析 [J]. *地球物理学报*, 50 (1): 92–100. Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Han Bo, et al. 2007. Storm track variations in the North Pacific in winter season and the coupled pattern with the midlatitude atmosphere–ocean system [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 50 (1): 92–100.
- Sharma R, Gopalan A K S, Ali M M. 1999. Interannual variation of eddy kinetic energy from TOPEX altimeter observations [J]. *Marine Geodesy*, 22 (4): 239–248.
- Simmons A J, Hoskins B J. 1978. The life cycles of some nonlinear baroclinic waves [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35 (3): 441–432.
- Tokenaga H, Tanimoto Y, Xie S P, et al. 2009. Ocean frontal effects on the vertical development of clouds over the western North Pacific: In situ and satellite observations [J]. *J. Climate*, 22 (16): 4241–4260.
- Vallis G K, Gerber E P, Kushner P J, et al. 2004. A mechanism and simple dynamical model of the North Atlantic oscillation and annular modes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (3): 264–280.
- Wettstein J J, Wallace J M. 2010. Observed patterns of month-to-month storm track variability and their relationship to the background flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67 (5): 1420–1437.
- 朱伟军, 孙照渤, 彭加毅. 1999. 冬季太平洋 SST 异常对风暴轴和急流的影响 [J]. *南京气象学院报*, 22 (4): 575–581. Zhu Weijun, Sun Zhaobo, Peng Jiayi. 1999. Effects of winter Pacific SSTA on the storm track and jet stream [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 22 (4): 575–581.
- 朱伟军, 孙照渤. 2000a. 冬季北太平洋风暴轴的年际变化及其与 500 hPa 高度以及热带和北太平洋海温的联系 [J]. *气象学报*, 58 (3): 309–320. Zhu Weijun, Sun Zhaobo. 2000a. Interannual variability of northern winter Pacific storm track and its association with 500-hPa height and tropical and northern Pacific sea surface temperature [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58 (3): 309–320.
- 朱伟军, 孙照渤. 2000b. 冬季黑潮区域海温异常对北太平洋风暴轴的影响 [J]. *应用气象学报*, 11 (2): 145–153. Zhu W J, Sun Z B. 2000b. Impacts of Kuroshio SSTA on storm track over North Pacific in winter [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 11 (2): 145–153.