

黑潮延伸体区海平面异常和中尺度涡的时空特征分析

潘丰¹, 张有广², 林明森²

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘 要:利用 1993—2010 年间的卫星高度计资料,用 EOF 方法及小波分析研究了黑潮延伸体区域的海平面异常和中尺度涡的时空变化特征。研究结果表明:海平面 EOF 第一模态是季节模态,与该海域风应力旋度第一模态类似,相关系数达 0.65。EOF 第二模态主要反映了黑潮南部次级环流的变化情况,显著性周期是 8—10 年。通过相关分析发现黑潮延伸体南部次级环流的年代际变化与 PDO 有关,同时它又与风应力旋度第二模态有关;该海域的海面高度受到北太平洋东部 SSH 信号西传的影响,信号的传播需要大约 3—4 年时间。EOF 第三模态是黑潮弯曲模态。日本南部的气旋涡和反气旋涡可以表征黑潮弯曲的形成,而且弯曲强度和涡的持续时间、强度和位置有关。

关键词:黑潮延伸体;海平面异常;中尺度涡;风应力旋度;次级环流

中图分类号:P731 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0239(2012)05-0029-10

1 引言

黑潮是沿着北太平洋西部边缘向北流动的一支强西边界海流,它具有高盐、高温、流量大、流速强、厚度大、流幅窄等特征。黑潮主干经吐噶喇海峡,进入太平洋,然后沿日本列岛流向东北,在 35°N 附近分为两支:主干转向东流直到 160°E,称为黑潮延伸体;一支在 40°N 附近与来自高纬的亲潮汇合一起转向东流汇入黑潮延伸体,一起横过太平洋。

黑潮出现变异特征并不是孤立的,它与全球海洋变化有关,特别是与 PDO 及 ENSO 的发生有密切联系。另外,黑潮本身的变化也是个大尺度效应,黑潮不同区域上的变化是相互联系的^[1]。近年来海洋学者对黑潮延伸体,黑潮弯曲现象以及 ENSO 等其他海洋现象之间的关系进行了大量的研究。张永垂等^[2]利用 15 年(1993—2007 年)月平均的海平面高度异常(SSHA)资料,分析了 SSHA 在北太平洋的分布和变化趋势。结果表明,北太平洋年际时间尺度 SSHA 变化的大值区在黑潮延伸区和

西太平洋暖池区。高理等^[3]利用 12 年卫星高度计数据分析得出了黑潮延伸体的海平面异常和海表面温度异常的低频分量与 Nino3 指数具有较高的相关性。Mizuno^[4]对 1976—1979 年期间黑潮的研究得出黑潮大弯曲幅度与黑潮延伸体中尺度变化有正的相关性。通过实际观测数据的分析来检验, Yasuda 和 Hanawa^[5]发现黑潮延伸体在 1980 年增强,比洋盆尺度的表面风应力增强落后 4—5 年。Miller^[6]和 Deser^[7]把这 4—5 年的延后归因于斜压 Rossby 波从它们激发的北太平洋东部区域传播到太平洋洋盆的西边界所需要的海洋调整时间。Deser 进一步指出黑潮延伸体的增强被限制在相对窄的 30°—38°N 区域。他们对这个被限制响应的解释是增强的洋盆风应力增加了副热带和副极地次级环流中的 Sverdrup 流,这反过来又增加了西边界流的输运,以及随后的他们下游的延伸体。

本文利用 18 年的卫星高度计资料分析 1993 年—2010 年间日本以南及黑潮延伸体区海平面变化的时空特征,结合同期的风应力资料以及 PDO 指数的变化分析黑潮海平面,黑潮南部次级环流和黑潮大弯曲现象的时空变化特征。

收稿日期: 2011-11-11

作者简介: 潘丰(1985-),男,硕士研究生,主要从事高度计应用于中尺度涡和海平面变化的研究。E-mail:panfeng291@126.com

2 数据和分析方法

2.1 数据来源

本文利用的高度计资料是法国国家空间研究中心(CNES)的卫星海洋存档数据中心(AVISO)提供的SSHA资料,该资料融合了T/P及其后继卫星Janson1和ERS-1/2的观测数据,并进行了仪器误差、环境干扰、海况误差、潮汐干扰和反变气压计影响等因素的校正^[8]。该资料的空间为 $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ 的墨卡托投影网格,数据的时间间隔为7 d。风应力资料采用的是NCEP的再分析资料中的月平均的经向风应力和纬向风应力数据。

2.2 主要分析方法

2.2.1 EOF分析

经验正交函数(EOF)分析方法是分析大气、海洋等物理过程的有用方法。它通过线性正交变换对海洋要素场进行压缩,提取运动变化的主成分,也就是把多空间点的时间序列数组分解成一系列相互独立的经验正交模态,并将这些模态按照对波动总能量贡献的大小(方差贡献率)进行排序。每个EOF模态可由一个时间系数曲线和一个空间分布矩阵来描述^[9]。在本文中,海面上每个空间点,某时刻的SSHA值就等于所在点的空间分布值与该时刻的时间系数的乘积。

2.2.1 小波分析

与Fourier变换相比,小波变换是时间和频率的局部化分析,它通过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化,最终达到高频处时间细分,低频处频率细分,能自动适应时频信号分析的要求,从而可聚焦到信号的任意细节,解决了Fourier变换的困难问题。本文中用到的小波是Morlet小波,其小波函数是

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (1)$$

小波变换的公式是

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\psi}^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n\delta t} \quad (2)$$

$$\text{式中 } \hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N}, \quad \omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t} : k \leq \frac{N}{2} \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t} : k > \frac{N}{2} \end{cases}$$

经过小波变换可以得到时间-频率-能量的三维

分布图,可以分析时间序列不同频率上的能量分布,也可以分析不同频率能量的在时间上的突变。

3 结果分析

3.1 海平面异常EOF分析

由于主要是研究黑潮的季节变化和年际变化,所以对数据进行了低通滤波,滤去了60天以下的高频分量。对18年的高度计资料经过EOF分解,得到了日本以南及黑潮延伸体区SSHA变化的空间分布和时间系数曲线。分解得到的前三个典型场对原始场的方差贡献率达46.9%(见表1),基本代表了原始场的主要特征。同时,为了对获取的时间系数曲线的周期和能量进行分析,对EOF分解得到的每个时间曲线进行了小波变换分析。

表1 5个典型场的贡献率

模态	贡献率/%	累计贡献率/%
1	24.9	24.9
2	12.2	37.1
3	9.8	46.9
4	5.7	52.6
5	4.0	56.6

图1a和图1b分别是EOF分解得到的第一模态的空间分布图和时间系数曲线,图1c是其时间系数的小波分析谱。第一模态的解释方差是24.9%,其空间分布的主要特征是整个日本以南及黑潮延伸体区的SSHA呈纬向的带状分布,存在一个正的大值中心,位于($33^\circ\text{--}35^\circ\text{N}$, $144^\circ\text{--}146^\circ\text{E}$),而在中心往北大约(36°N , 147°E)的位置是一个较弱的负值中心,整个海区除了负值中心外基本均为正值,反映了整个海区海面高度随季节的同步涨落。这些结果都与文献[2]的结果相同。再看其时间系数曲线主要呈季节变化,存在年变化周期,但也受到年际变化的影响。小波分析的结果显示第一模态的显著周期和第一峰值都在图1a周期。结合空间分布和时间曲线以及小波分析的结果,每年的海平面低值区出现在春季,高值区出现在秋季,这与南海海平面异常的季节变化特征相似^[2,9-12]。

另外,从小波分析图1c上可以看出,第二峰值的周期约为6—8年,但并未通过显著性检验,表明第一模态主要是季节模态,同时受到了年际信号的影响。从图1b的低通滤波得到的6年以上

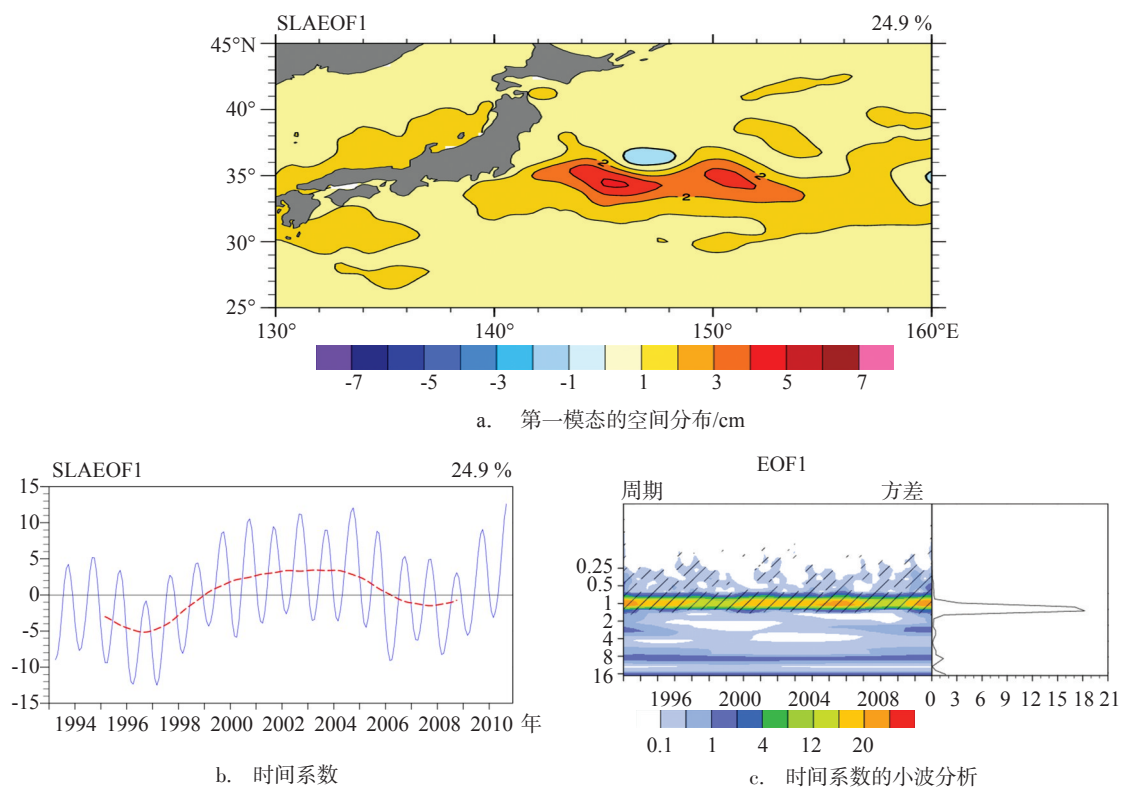


图1 海平面异常EOF1

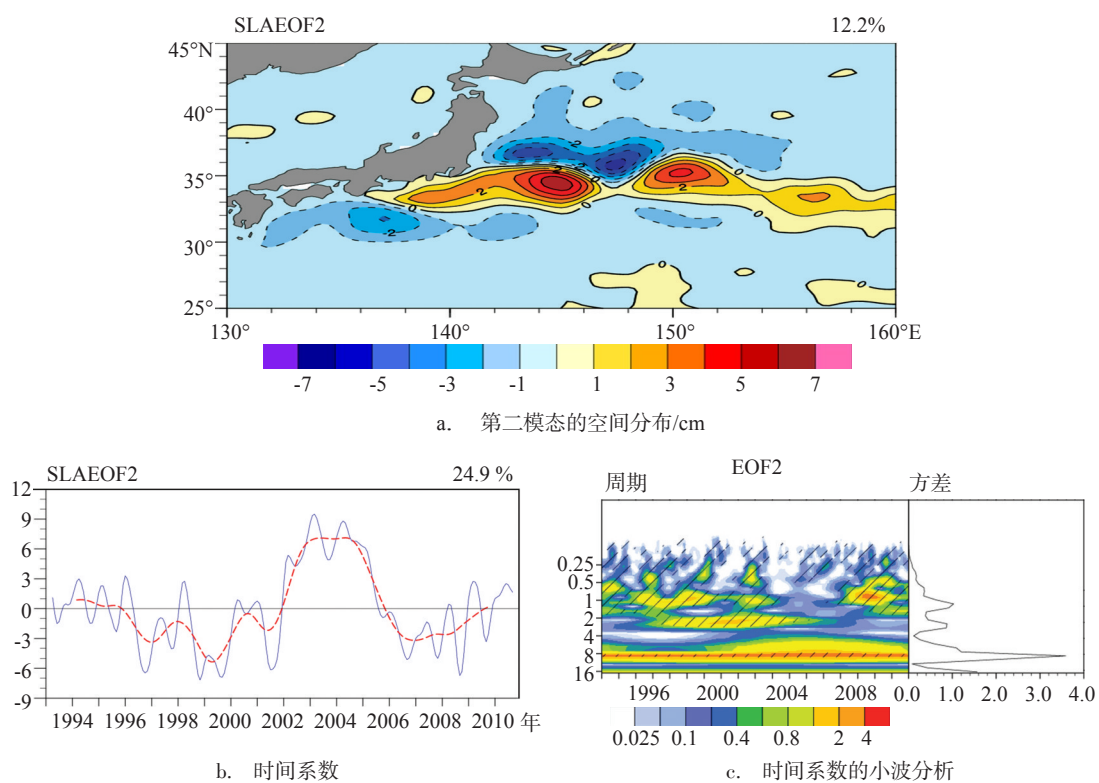


图2 海平面异常EOF2

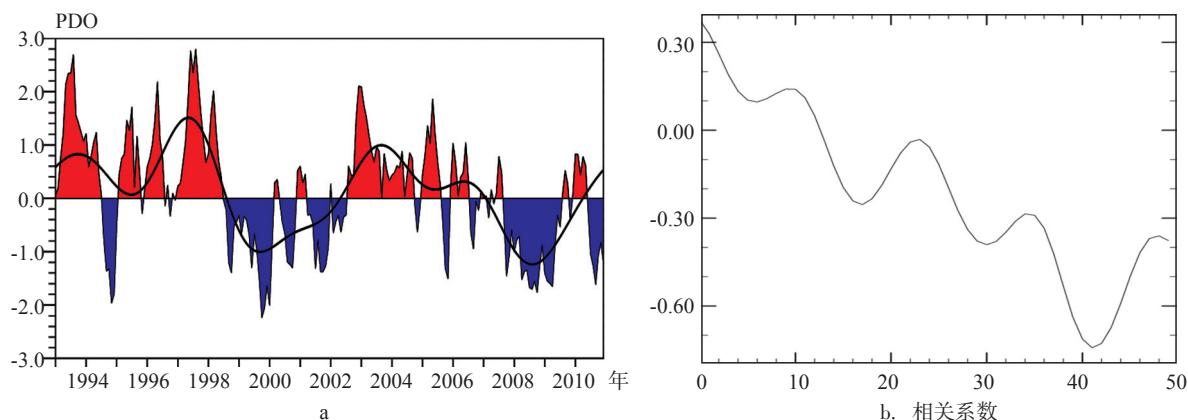


图3 PDO时间曲线(a)及其与第二模态时间系数的相关分析图(b)

的分量可以看出EOF1的时间曲线整体呈上升趋势,结合空间分布的正相位可以得出海平面异常整体呈上升趋势,最低值出现在1996和1997年,1998年后持续上升,2006年后下降,而在2008年后又持续上升,在2010年底出现最高值。这和Qiu^[13]对黑潮延伸体区的海平面高度异常的分析结果基本吻合。

影响海平面变化的因素主要包括海水体积的变化(温盐变化引起的比容海平面变化、蒸发降水引起的净体积变化等),海水质量变化(冰融化等),动力学因素(局地风应力Ekman抽吸、Rossby波传播等)等。而引起季节变化的主要是比容海平面变化和风应力旋度的季节变化。在3.2节中将要讨论风应力旋度与海平面季节变化的关系。

EOF第二模态的空间分布和时间系数曲线,以及相应的小波分析谱见图2,它包含海面高度异常总能量的12.2%。第二模态的空间分布的主要特征是日本本州岛以东海域(32°—38°N, 140°—154°E)存在正负相间的“三核结构”^[2],这几个涡旋的尺度较大,在5—6个经度左右,而且有8—10年的变化周期(见图2c)。Qiu^[14]指出该区域(32°—34°N, 143°—146°E)经常存在一个较大的反气旋式次级环流,并通过模式^[15]得到它的周期约在10年左右。因此第二模态主要是反映了黑潮延伸体南部的次级环流的变化。

根据Imawaki^[16]等利用T/P资料计算了日本以南黑潮和黑潮再循环流的流量,提出了在跨黑潮的海平面高度差与锚定浮标观测的流之间有极高

的相关,也就是说可以用黑潮两侧的高度差 δh 来代表黑潮的相对流量。因此第二模态同时也反映了当黑潮延伸体南侧的反气旋式次级环流的强度加强时,黑潮延伸体区域的流量增强,而当次级环流减弱时,黑潮延伸体区域的流量减弱。

由于第二模态的显著周期中有8—10的成分,所以有必要考察太平洋十年涛动(PDO)指数和第二模态的时间曲线之间的关系。计算得到的相关系数结果显示,海平面第二模态滞后PDO达到41个月时,二者的相关系数最大值为-0.73。这表明黑潮延伸体区南侧的次级环流的变化与PDO变化呈负相关。副热带环流北部(40°N, 170°W)是PDO的振荡中心之一,这一区域的海气相互作用极为明显。许多文献^[15, 17-18]指出这一中心附近也是大尺度的海面风应力旋度强迫最大的区域。因此风应力可能是产生调节延伸体南部次级环流强度信号的一个原因。在3.2节中将进一步研究风应力旋度与次级环流的关系。

EOF3模态的方差贡献率是9.8%,它的空间分布和时间曲线见图4。EOF3的空间分布的显著特征是日本以南大约(32°—33°N, 138°—140°E)出现的正值区,和它附近的(30°N, 136°E)一个相对较弱的负值区,另外在黑潮延伸体区域出现数个正负相间的高异常值区,其中最明显的是(35°N, 144°E)和(33.5°N, 144°E)的两个正负相对的区域。该模态的分析结果与潘家玮等^[1]利用Geosat数据EOF分解的第一模态类似。

图4c对EOF3时间系数的小波分析显示,第三

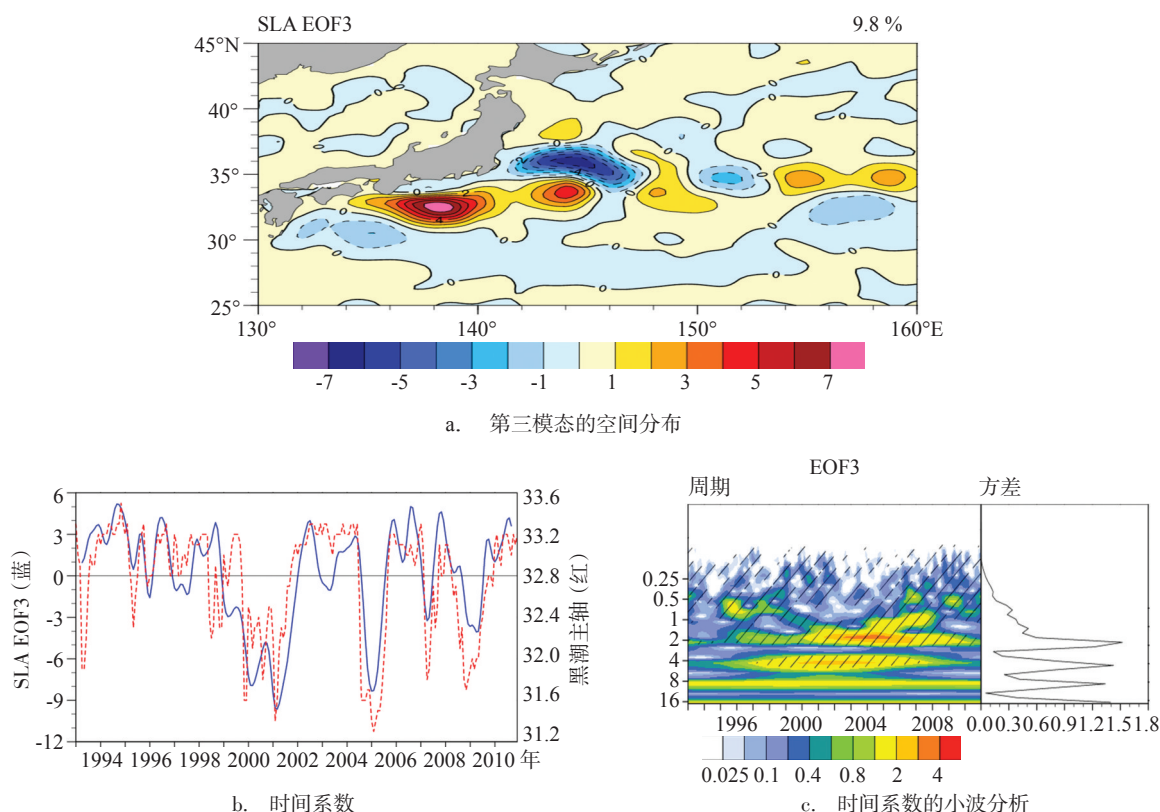


图4 海平面异常EOF3

模态的显著周期是2—4年,过去的研究结果^[19]指出黑潮的大弯曲具有准3.5年及7—9年的振荡周期。根据日本气象厅的报告数据得到的黑潮主轴变化(见图4b红色虚线),可以看出1993年,2000—2001年,2004—2005年,2007年及2009年黑潮主轴都发生了较大的弯曲,这与EOF3的时间曲线正好吻合。从图5a可以看出EOF3与黑潮主轴位置变化存在正相关,正相关系数最大达到了

0.664。因此EOF3可以表征黑潮主轴在日本南部弯曲的出现和结束。

为了进一步验证EOF3模态对黑潮弯曲模态的指示性,对海平面异常场沿138°E得到时间-纬度剖面(见图5b)的分析发现气旋涡在32°N以南出现时,图4b的黑潮主轴发生弯曲,并且气旋涡的强度越大,位置越靠南则黑潮弯曲的程度越大。这表明日本南部的一对气旋和反气旋涡可以表征黑

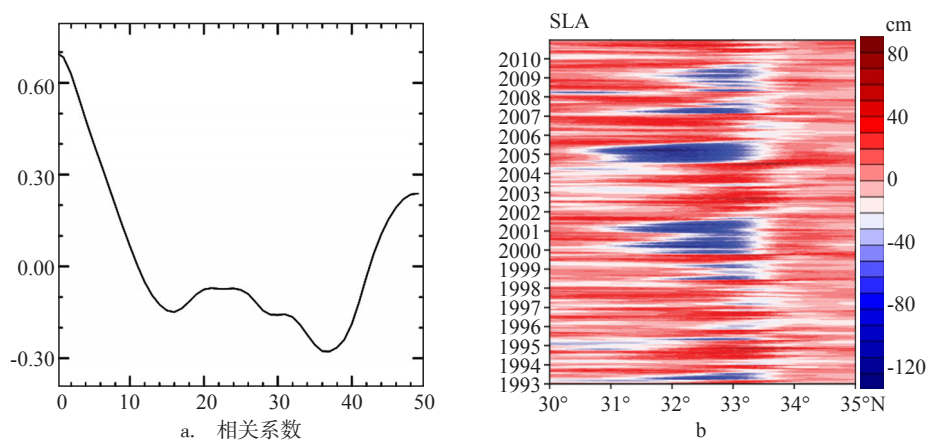


图5 EOF3与黑潮主轴的相关分析图(a)和SLA沿138°E的时间-纬度剖面图(b)

潮弯曲模态的形成。这和孙湘平^[20]等人根据水文观测资料得到的结果相同。当弯曲发生时,也就是当EOF3的时间系数是负值时,日本南部的正值区出现的是气旋涡,负值区出现的是反气旋涡,黑潮处于弯曲模态;而当时间系数处于正值时,弯曲结束。

根据 Imawaki^[16]的结论, EOF3 中延伸体区域的两个正负值中心反映了在黑潮发生弯曲时,延伸体区域的流速变化。因为SLA负值区在正值区以南,所以黑潮大弯曲成长的时候,延伸体内弯曲增加,流速较弱;而当黑潮大弯曲消失时,延伸体的弯曲减弱,流速增强。

3.2 风对海平面异常的影响

在对海平面异常的 EOF 第一模态的时间曲线分析中我们发现海平面的季节变化特征与南海海平面的季节变化类似,而南海的海平面与季风有着很大关系;第二模态中的低频信号是从 170°W 产生的 SSH 信号西传所致,而与北太平洋十年涛动(PDO)有关的北太平洋表面风应力变化的活动中心在大约 160°W ^[15]。因此有必要研究风场对黑潮

延伸体区的海平面异常的季节和年代际变化的影响。

图6和图7分别是根据NCEP提供的月均风应力数据求得的北太平洋风应力旋度异常的 EOF 第一模态和第二模态。其中第一模态是典型的季节模态,占总方差的49%。第一模态的空间分布呈现出明显的纬向分布特征,中纬度海域为负位相,低纬度海域为正位相。比较图6a和图1a后发现风应力旋度第一模态的空间分布和海平面异常第一模态的空间分布基本成负相关性。再观察二者的时间系数曲线(见图6b),发现二者的季节变化周期相似。计算得到二者的相关系数表明当风应力旋度提前海平面3个月时,二者的相关系数最大为0.65(见图6c)。因此整个北太平洋风应力的季节变化对黑潮延伸体区域海平面的季节变化有重要影响。风场通过 Rossby 波的西传对海平面的季节变化产生影响,负的风应力旋度引起垂直向下的 Ekman 抽吸,从而引起海水辐聚,导致了海面高度上升;相反地,正的风应力旋度引起垂直向上的 Ekman 抽吸,引起海水的辐散,从而导致

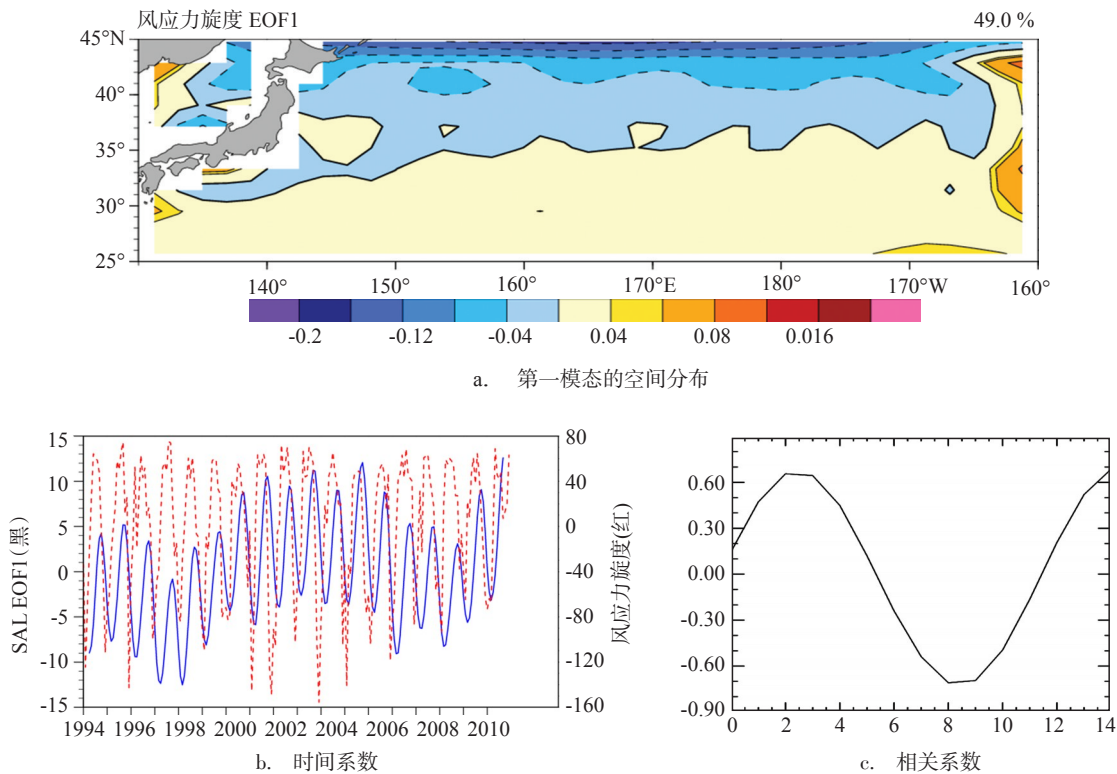


图6 风应力旋度 EOF1

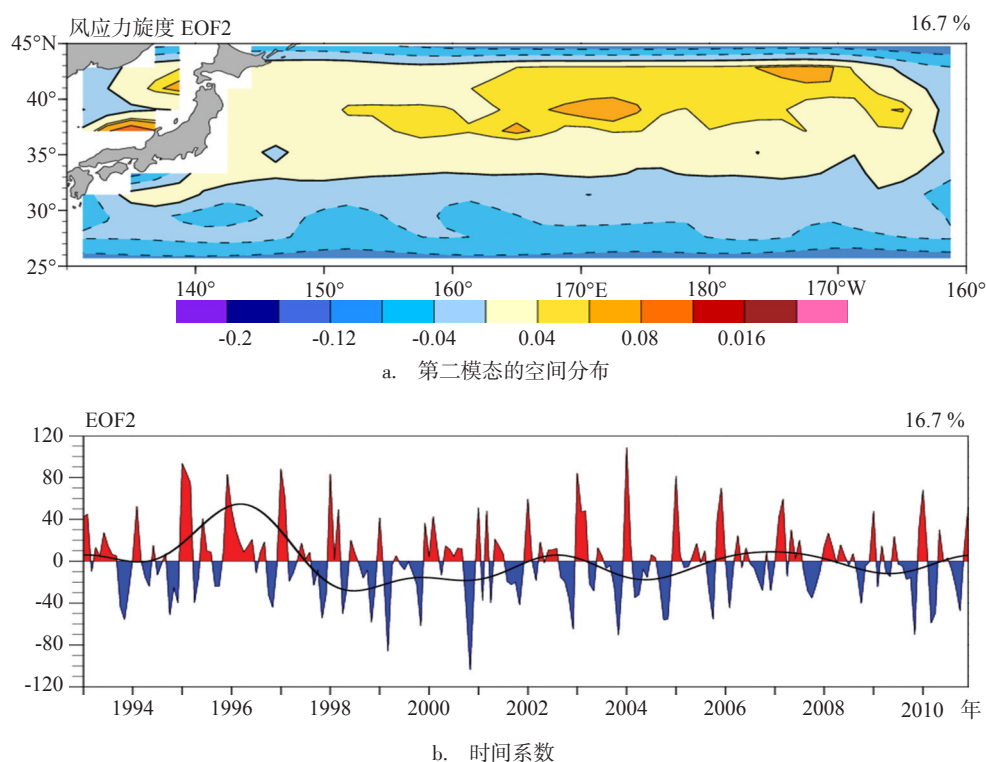


图7 风应力旋度EOF2

海面高度下降。

在分析海面高度异常第二模态的时候我们发现次级环流强度的变化具有8—10年的周期,并且和PDO的周期具有相关性。为了进一步研究引起次级环流强度变化的可能原因,以下对风应力旋度场进行分析。图7是风应力旋度的第二模态。从图7a的空间分布中可以明显地看出,正值中心位于 160°E — 160°W 的区域,这也就是Miller^[17], Deser^[18]和Qiu^[15]等人在研究中指出的北太平洋东部表面风应力强迫幅度最大的地方。从图7b的风应力旋度异常的低频分量(黑色实线)可以明显地看出在1997年底和2007年异常从正相位切换到负相位,而在2002年初从负相位切换到正相位,这与图3a中的PDO相位切换的时间基本吻合。这就表明了风应力旋度第二模态与PDO有关。

因为北太平洋表面风应力场变化的中心在 170°W 附近,所以为了研究风应力旋度强迫与黑潮延伸体区域海面高度变化的关系,我们沿着黑潮延伸体主轴南侧的 32° — 34°N 和北侧的 37° — 38°N 得到海平面异常关于时间-经度的剖面图。从图8能发现这两个纬度带的信号虽然在传播过程中

幅度有变化,但是在纬度带西侧的大部分年际SSH信号都能追溯到 170°W 附近,也即海面风应力强迫最大的地方。注意到在洋盆东部,这两个纬度带受风应力强迫的SSH异常基本上正负符号相同。比如, 170°W 附近,在1998—1999年间两个纬度带的SSH异常都从负变为正,而在2003—2004年又从正变为负。北太平洋东部的SSH变换是对局地风应力旋度场的直接响应(见图8),正的风应力旋度异常引起海平面下降,负的风应力旋度异常引起海平面上升。但是在洋盆西部SSH信号不再有相同的符号,这可能是由于斜压罗斯贝波在两个纬度带所具有的不同的传播速度造成的。比较图8a和图8b不难发现黑潮延伸体南侧和北侧的SSH信号传播速度有明显差异,南侧的速度比北侧的更快。当风应力旋度异常切换后,在 170°W 产生的与之前相反的SSH信号以不同速度在南北两侧传播;由于南侧的信号传播的更快,所以在西边界追上了之前的北侧传播的切换前信号,这样使得穿过延伸体的 δh 产生较大的变化。这可能是次级环流强度变化影响黑潮流量变化的一个原因。

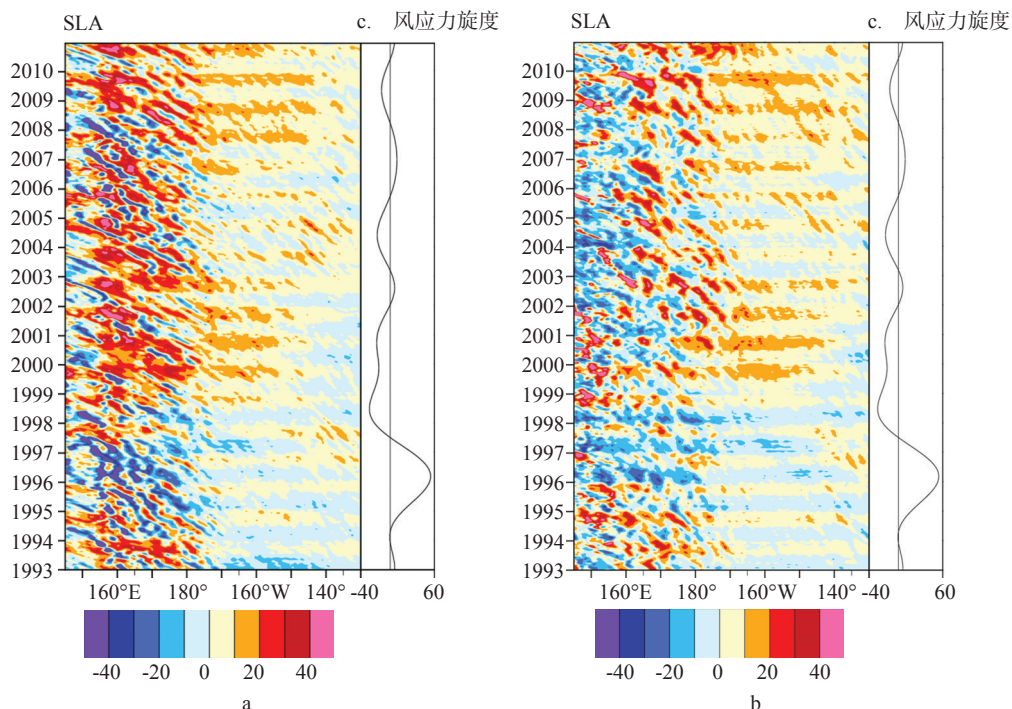


图8 SLA沿32°—33°N(a)和38°—39°N(b)的时间-经度剖面图
及风应力旋度第二模态的低频分量(c)

结合对次级环流区域SSH信号传播的分析,以及引言中提到的Miller和Deser等人提出的斜压罗斯贝波从北太平洋东部传播到西边界流的时间,我们不难得出以下结论:(1)黑潮延伸体南部次级环流的8—10年的年代际变化与PDO有关,同时它又与风应力旋度第二模态有关;(2)该海域的海面高度受到北太平洋东部SSH信号西传的影响,信号的传播需要大约3—4年时间,这是斜压Rossby波从它们激发的北太平洋东部区域传播到太平洋洋盆的西边界所需要的海洋调整时间;(3)SSH信号向西传播的速度在黑潮两侧有很大不同,南侧的速度比北侧更快,这引起穿过黑潮的 δh 年际变化。

4 结论

根据对日本以南及黑潮延伸体区域的18年高度计资料的EOF分析,并结合NCEP的风应力资料以及PDO数据,我们研究了西北太平洋的黑潮及延伸体区域海面高度的空间分布和时间变化。通过EOF分析并结合小波变换谱我们发现:

(1) 日本以南及黑潮延伸体区域的海平面异

常整体呈上升趋势,EOF第一模态是季节模态,空间分布的主要特征是整個日本以南及黑潮延伸体区的SSHA呈纬向的带状分布,存在一个负的大值中心。小波谱显示的显著性周期是1年,春季海平面异常值较低,秋季海平面异常值较高,与南海类似;

(2) EOF第二模态主要反映了黑潮南部次级环流的变化情况。第二模态的空间分布的主要特征是日本本州岛以东海域存在正负相间的“三核结构”。小波谱显示次级环流的最显著性周期是8—10年,与PDO的振荡周期较为接近。利用沿32.4°N和38.1°N的SLA时间-经度剖面研究黑潮延伸体南北两侧涡的传播后发现,SSH信号来自于北太平洋东部日界线到170°W产生的海面高度异常的西传,这表明次级环流的强度变化和PDO可能有关;

(3) EOF第三模态是黑潮弯曲模态。这一模态的空间分布的特征是日本南部区域出现的一对较大的气旋涡和反气旋涡,小波谱的结果显示显著性周期是2年和4—5年,这与水文观测资料得到的黑潮大弯曲振荡周期接近。通过与日本气象

厅的黑潮主轴位置数据比较后发现,第三模态的气旋涡和反气旋涡可以表征黑潮弯曲的形成,而且弯曲强度和气旋、反气旋涡的持续时间,强度,位置有关。黑潮大弯曲成长的时候,延伸体内的弯曲增加,流速较弱;而当黑潮大弯曲消失时,延伸体的弯曲减弱,流速增强。

为了研究风场与海平面异常的关系,尤其是风场与黑潮南部次级环流的变化关系,我们对北太平洋海区的风应力旋度场也进行了EOF分析。EOF分析的第一模态呈现出与海平面异常类似的空间分布和时间周期,与延伸体区域海平面异常EOF 1的相关系数在高度场滞后风应力场3个月时达到最大的0.82。这表明整个北太平洋风应力的季节变化对黑潮延伸体区域海平面的季节变化有重要影响。

风应力旋度的第二模态与PDO有关。通过分析风应力旋度第二模态的时间曲线和海平面异常第二模态时间曲线以及PDO指数的关系我们发现黑潮延伸体南部次级环流的年代际变化与PDO有关,同时它又与风应力旋度第二模态有关;该海域的海面高度受到北太平洋东部SSH信号西传的影响,信号的传播需要大约3年半到4年时间。黑潮延伸体南侧和北侧的SSH信号传播速度有明显差异,南侧的速度比北侧的更快,这样使得穿过延伸体的 δh 产生较大的变化。这可能是次级环流强度变化影响黑潮流量变化的一个原因。

由于本文并未对黑潮流量与次级环流的变化进行深入讨论,因此黑潮弯曲与次级环流是否有关,以及黑潮延伸体区域流量的年代际变化还需要通过进一步的研究来回答这些问题。

参考文献:

- [1] 潘家玮,袁业立,郑全安.用Geosat高度计数据观测黑潮流系的低频变化Ⅱ季节及年际变化分析[J].海洋学报(中文版),1997,19(04):51-62.
- [2] 张永垂,张立凤.北太平洋海表面高度的年际变化及其机制[J].地球物理学报,2010,53(02):247-255.
- [3] 高理,刘玉光,荣增瑞.黑潮延伸区的海平面异常和中尺度涡的统计分析[J].海洋湖沼通报,2007,(01):14-23.
- [4] Mizuno K,White W B. Annual and interannual variability in the Kuroshio Current System[J]. Journal of physical oceanography, 1983,13(10):1847-1867.
- [5] Yasuda T, Hanawa K. Decadal changes in the mode waters in the midlatitude North Pacific[J]. Journal of physical oceanography, 1997, 27(6): 858-870.
- [6] Miller A J, Cayan D R, White W B. A westward-intensified decadal change in the North Pacific thermocline and gyre-scale circulation[J]. Journal of Climate, 1998, 11(31): 12-27.
- [7] Deser C, Alexander M A, Timlin M S. Evidence for a wind-driven intensification of the Kuroshio Current Extension from the 1970s to the 1980s[J]. Journal of Climate, 1999, 12(6): 1697-1706.
- [8] Ducet N, Le Traon P, Reverdin G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and-2[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C8): 19,477-19,498.
- [9] 李燕初,李立,靖春生,等.南海东北部海域海面高度的时空变化特征[J].科学通报,2004,(07):702-709.
- [10] 李立,吴日升,郭小钢.南海的季节环流——TOPEX/POSEIDON卫星测高应用研究[J].海洋学报(中文版),2000,(06):13-26.
- [11] 徐珊珊,左军成,陈美香.1993—2006年北太平洋海平面变化特征及影响因素[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2010,(09):24-32.
- [12] 王静,齐义泉,施平,等.基于TOPEX/Poseidon资料的南海海面高度场的时空特征分析[J].热带海洋学报,2003,(04):26-33.
- [13] Qiu B. The Kuroshio Extension System: Its Large-Scale Variability and Role in the Midlatitude Ocean-Atmosphere Interaction [J]. Journal of oceanography, 2002, 58 (1): 57-75.
- [14] Qiu B, Kally K, JOYCE T. Mean flow and variability in the Kuroshio Extension from Geosat altimetry data[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(C10): 18491-18507.
- [15] Qiu B. Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: Responses and potential feedback[J]. Journal of physical oceanography, 2003, 33(12): 2465-2482.
- [16] Imawaki S, Uchida H, Ichikawa H, et al. Satellite altimeter monitoring the Kuroshio transport south of Japan[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(1): 17-20.
- [17] Miller A J, Cayan D R, Barnett T P, et al. Interdecadal variability of the Pacific Ocean: Model response to observed heat flux and wind stress anomalies[J]. Climate Dynamics, 1994, 9(6): 287-302.
- [18] Deser C, Blackmon M L. On the relationship between tropical and North Pacific sea surface temperature variations[J]. Journal of Climate, 1995, 8(6): 1677-1680.
- [19] Nitani H. Variation of the Kuroshio south of Japan[J]. Journal of oceanography, 1975, 31(4): 154-173.
- [20] 孙湘平.黑潮第六次大弯曲[J].黄渤海海洋,1989,7(4):1-10.

Spatial and temporal variability of the sea level anomalies and mesoscale eddies in the region of the Kuroshio Extension

PAN Feng¹, ZHANG You-Guang², LIN Ming-Sen²

(1.National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2.National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081 China)

Abstract: Based on the satellite altimeter data from 1993 to 2010, the temporal and spatial variations of the sea level anomalies and mesoscale eddies in the region of the Kuroshio Extension has been studied by EOF and wavelet spectrums analysis. The result of EOF analysis is as following: the first EOF mode of the sea level is a seasonal mode, which indicates that it tends to increase in the total region. Compared to the first EOF mode of the wind stress curl, it is found that the spatial and temporal variability is similar, and the correlation is high. It can be concluded that the wind stress plays a key role in the seasonal variations of the sea level in the Kuroshio Extension. The second EOF mode of the SLA shows the variation of the southern sub-circulation gyre, whose significant cycle is 8-10 years. It is suggested that the decadal variation of the southern sub-circulation gyre is associated with the PDO. It is also found that the decadal modulation needs 4 years oceanic adjustment time for the baroclinic Rossby waves propagating from the eastern North Pacific to the Kuroshio. The third EOF mode of the SLA reveals the meandering state of the Kuroshio. The cyclonic and anti-cyclonic eddies in the south of Japan can characterize the formation of the meandering state of the Kuroshio, and the strength of the meandering state is related to the duration time, intensity and locations of the eddies.

Key words: Kuroshio Extension; sea level anomaly; mesoscale eddy; wind stress curl; sub-circulation gyre