

刘明洋,李崇银,谭言科,等,2017.黑潮延伸体区域海表温度锋的季节变化对北太平洋风暴轴的影响[J].气象,43(4):443-449.

黑潮延伸体区域海表温度锋的季节变化 对北太平洋风暴轴的影响^{* 1}

刘明洋¹ 李崇银^{1,2} 谭言科¹ 俞兆文¹

1 中国人民解放军理工大学气象海洋学院,南京 211101

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG),北京 100029

提 要: 利用 NOAA 最优插值逐日海表温度(SST)资料和 NCEP/NCAR 的逐日大气再分析资料,本文分析了黑潮延伸体区域海表温度锋的变化对北太平洋风暴轴的影响。结果表明,黑潮延伸体区域海表温度锋位置的季节变化很弱,而其强度的变化则非常显著,北太平洋风暴轴强度与海表温度锋强度具有一致的协同变化。冬季黑潮延伸体区域海表温度锋强度最强,增强了其上空大气的斜压性,从平均有效位能向涡动有效位能的斜压能量转换以及从涡动有效位能向涡动动能的斜压能量转换均在黑潮延伸体区域显著增加,斜压涡旋在此区域生成更加频繁,在随西风向下游运动过程中不断从背景平均流中获得能量,从而导致北太平洋风暴轴增强,且将其中心轴线固定在黑潮延伸体区域上空,而夏季黑潮延伸体区域海表温度锋强度非常弱,其上空大气斜压性减弱,从平均有效位能向涡动有效位能的斜压能量转换以及从涡动有效位能向涡动动能的斜压能量转换均显著减少,斜压涡旋在此区域生成减少,导致北太平洋风暴轴减弱,且中心移至太平洋中部,位置偏北。

关键词: 黑潮延伸体,海表温度锋,季节变化,北太平洋风暴轴

中图分类号: P47

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.006

Seasonal Variation of Kuroshio Extension SST Front and Its Influence on the Pacific Storm Track

LIU Mingyang¹ LI Chongyin^{1,2} TAN Yanke¹ YU Zhaowen¹

1 Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: By using NOAA daily optimum interpolation sea surface temperature (SST) data and NCEP/NCAR daily atmospheric reanalysis data, this paper analyzes the seasonal variation of Kuroshio Extension SST front and its influence on the Pacific storm track. The results show that the seasonal variation of the SST front position is weak, but its strength has significantly strong seasonal variation, and the strength of Pacific storm track has a coordinated change with the strength of SST front in Kuroshio Extension. The SST front is the strongest in winter, enhancing the baroclinicity of the atmosphere above it. The baroclinic energy conversions from mean available potential energy to eddy available potential energy and from eddy available potential energy to eddy kinetic energy are increased in the Kuroshio Extension region, where the baroclinic eddies are generated more frequently, absorbing energy from the background mean flow during the process of moving downward along with west wind, and, finally, strengthening the Pacific storm track and anchoring the central axis of the storm track above the Kuroshio Extension region. The SST front is

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB956203)及国家自然科学基金项目(41490642 和 41475070)共同资助

2016 年 9 月 8 日收稿; 2017 年 1 月 4 日收修定稿

第一作者:刘明洋,主要从事海气相互作用研究. Email:liumingyang0115@163.com

通信作者:李崇银,主要从事天气气候变化及动力学研究. Email:lcy@lasg.iap.ac.cn

very weak in summer, weakening the baroclinicity of the atmosphere above. The baroclinic energy conversions from mean available potential energy to eddy available potential energy and from eddy available potential energy to eddy kinetic energy are greatly reduced, and baroclinic eddies are generated less frequently, weakening the Pacific storm track, and making the strength center move to central Pacific, located northward.

Key words: Kuroshio Extension, SST front, seasonal variation, Pacific storm track

引 言

黑潮(Kuroshio)是沿着北太平洋西部边缘向北流动的一支强西边界海流,它具有高温、高盐、流量大、流速强、厚度大、流幅窄等特征(Nitani,1972;Su et al,1990;Bryden et al,1991)。黑潮的主干经吐噶喇海峡,进入太平洋后,沿日本列岛南部海区向东的海流被称为黑潮延伸体(Kuroshio Extension)(Qiu,2003)。在冬季,黑潮延伸体区域因温度比较高而释放巨大的热量加热大气,是全球气候系统热量经向输送的关键海区之一,在全球气候变化中起着非常重要的作用。黑潮延伸体是黑潮与亲潮相交汇的区域,高温的黑潮与低温的亲潮相汇形成明显的海洋温度锋区,海洋锋的作用使该区域成为中纬度海洋大气相互作用的关键区域(Barnett et al,1999;Wallace and Hobbs,2006)。

大气风暴轴一般是指大气中 2.5~6 d 瞬时扰动最活跃的区域(Blackman,1976;1977),代表了大气中天气尺度系统(风暴)的重要活动特征,风暴在大气系统中起到了重新分配热量和能量的作用,从而有利于维持大气中温度、能量、湿度以及其他基本因子的平衡(Held et al,1989);同时,风暴的活动也是中纬度地区海洋大气能量相互交换的一种重要途径。黑潮延伸体区域海洋锋区与北太平洋风暴轴在位置上有很好的对应关系(任雪娟等,2007),该区域是激发大气中天气尺度系统活动的重要区域。Hoskins and Valdes(1990)利用一个定长波模型证明了非绝热加热对维持中纬度西边界流上空的最大平均斜压性具有重要作用,它可以抵消增长性斜压涡旋对经向温度梯度和低层斜压性的减弱效应。Nakamura et al(2004)进一步提出一种可能的机制,认为穿越强 SST 梯度的不同感热加热增强了低层大气狭窄区域的斜压性并锚定了其上空的风暴轴。有学者利用区域大气数值模式研究指出风暴轴的强度和结构受中纬度地区增强的 SST 梯度影响很大,其所处纬度位置对海洋温度锋也很敏感

(Chen et al,2010;Ogawa et al,2012)。Joyce et al(2009)发现近表层的天气尺度扰动的年际变率与黑潮延伸体区域海表温度锋(定义为 200 m 深度 14℃ 等温线的第一主分量)弱的经向位移存在显著但并不完全一致的关系。冯劭华等(2015)发现黑潮延伸体区域中尺度涡活动强度和位置的变化对应着北太平洋风暴轴强度和位置的变化。O'Reilly and Czaja(2015)指出海表温度锋强度较强(弱)时,西太平洋区域北太平洋风暴轴增强(减弱),而东太平洋区域北太平洋风暴轴减弱(增强)。袁超和徐海明(2016)指出北太平洋风暴轴的强度和位置变化与北太平洋海温异常存在很好的相关性。

1 资料和方法

1.1 资料

海表温度数据来自美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的逐日最优插值 SST(optimum interpolation sea surface temperature, OISST)资料,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间段为 1981 年 9 月 1 日至 2015 年 2 月 28 日。

大气数据来自美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气科学研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的全球大气逐日再分析资料。本文主要使用 850 hPa 的经向风场、纬向风场和温度场等,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,时间段为 1981 年 9 月 1 日至 2015 年 2 月 28 日。

1.2 黑潮延伸体区域海表温度锋强度和位置的确定方法

为了与北侧的亲潮延伸体海表温度锋区别开来,将研究区域选在 $33^{\circ} \sim 39^{\circ} \text{N}$ 、 $140^{\circ} \sim 154^{\circ} \text{E}$,计算黑潮延伸体区域海表温度锋强度和位置指数的具体步骤为:

首先计算研究区域范围内的 SST 水平梯度 $|\nabla T|$

$$|\nabla T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

式中 T 为 SST。

然后,用研究区域内每一经度值上 SST 水平梯度最大值的点表征黑潮延伸体区域海表温度锋,用此 SST 水平梯度最大值来表征海表温度锋的强度,用 SST 水平梯度最大值所在纬度表征海表温度锋的位置。

1.3 北太平洋风暴轴的代表

位势高度方差、扰动动能和经向输送热通量这三个物理量的中心大小和位置均可以反映出风暴轴

的强弱和位置(傅刚等,2009),本文选用经向输送扰动热通量 $\overline{v'T'}$ (v 为经向风速, T 为大气温度) 表征北太平洋风暴轴,利用朱伟军和孙照渤(2000)介绍的 31 点带通滤波器从逐日资料 v 和 T 中提取出天气尺度(2.5~6 d) 振荡分量,计算得到经向输送扰动热通量 $\overline{v'T'}$ 。

2 黑潮延伸体区域海表温度锋季节变化对北太平洋风暴轴的影响

2.1 黑潮延伸体区域海表温度锋的季节变化

图 1a~1d 分别给出的是春季、夏季、秋季以及冬季黑潮延伸体区域 SST 水平梯度分布,图 1e~1h

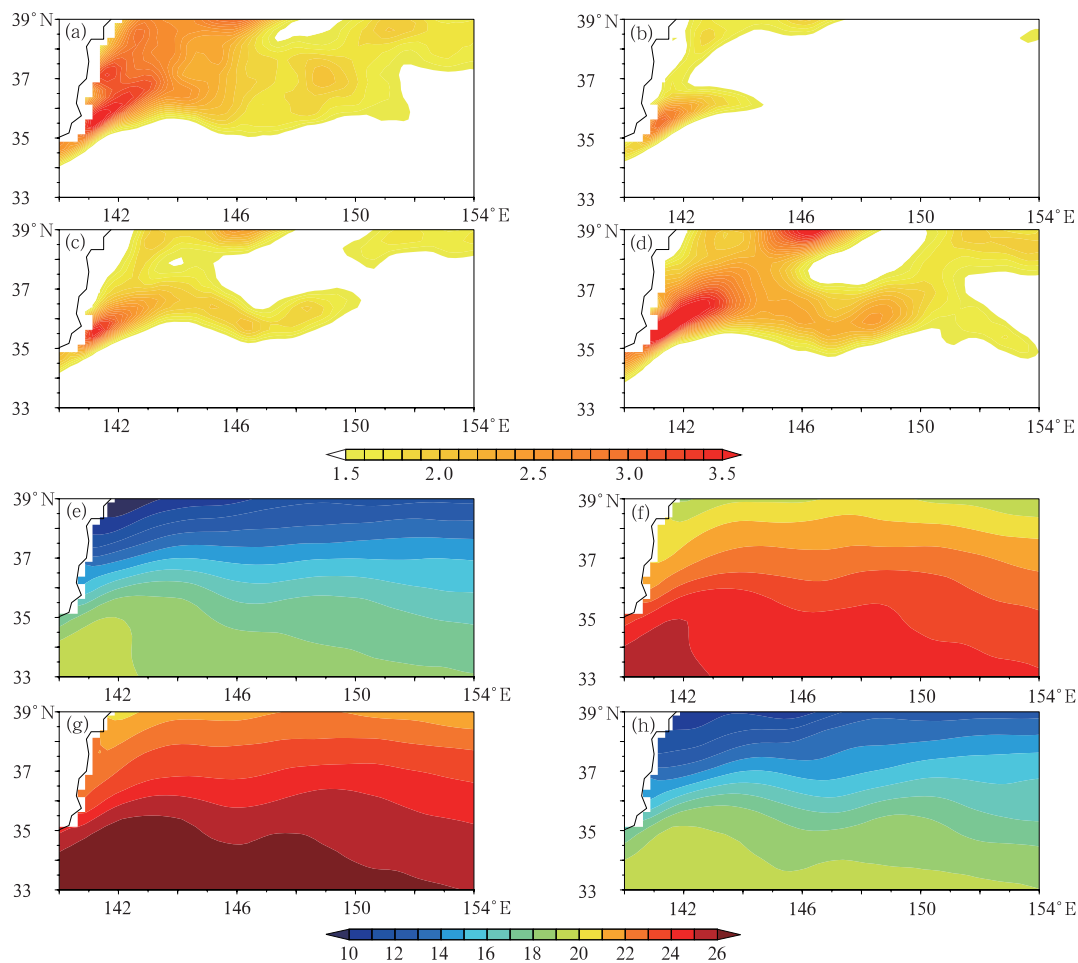


图 1 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)黑潮延伸体区域 SST 水平梯度分布[单位: $^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$], (e,f,g,h) 相应的 SST 分布

(春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月至次年 2 月)

Fig. 1 SST gradient in Kuroshio Extension region for spring (a), summer (b), autumn (c), winter (d) [unit: $^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$], (e,f,g,h) the corresponding SST

(spring: March—May, summer: June—August, autumn: September—November, winter: December—February)

给出的分别是相对应的 SST 分布,从图中可以看出,春季 SST 较低,但在黑潮延伸体区域北部边缘等温线较密集且平直,导致海表温度锋的强度较强,锋区南北跨度大,弯曲程度小,较为平直。夏季虽然 SST 较高,但等温线非常稀疏,海表温度锋仅在上游比较明显,而在下游由于南北海温差异不显著,因此海表温度锋几近消失。进入秋季, SST 达到最高,等温线逐渐变得密集且出现明显弯曲,海表温度锋的强度明显增强,且锋区南北较狭窄。冬季 SST 显著降低,但等温线却变得最为密集且出现非常显著的弯曲,海表温度锋的强度达到最强。

图 2a 和 2b 分别给出的是根据 1.2 节中介绍的方法确定的黑潮延伸体区域海表温度锋位置和强度的季节变化,与图 1a~1d 给出的不同季节的海表温度锋相比,可以看出本文使用的方法也能很好地反映海表温度锋的季节变化特征。从图 2a 中可以看出黑潮延伸体区域海表温度锋南、北位置的季节变化很弱,春季海表温度锋稍偏北,秋季和冬季居中,

夏季上游海表温度锋锋区位置偏南,而下游位置又偏北。相比较而言,图 2b 给出的黑潮延伸体区域海表温度锋强度的季节变化则非常显著,冬季最强,在 $141^{\circ}\sim 153^{\circ}\text{E}$ 范围内强度的平均值为 $3.45^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,其次为春季,强度的平均值为 $3.08^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$;其次为秋季,强度的平均值为 $2.71^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$;夏季最弱,强度的平均值为 $2.09^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 。

2.2 北太平洋风暴轴对黑潮延伸体区域海表温度锋季节变化的响应

图 3a~3d 分别给出的是春季、夏季、秋季以及冬季 850 hPa 北太平洋风暴轴的分布,图中风暴轴的形态与急流的分布非常相似。春季、秋季以及冬季风暴轴的强度中心位于上游,这是由于在黑潮延伸体区域海表温度锋区,较强的海温梯度维持了上空较强的大气斜压性,使得斜压涡旋在那里不断生成及活动,其天气尺度涡旋随风向下游运动,引起热

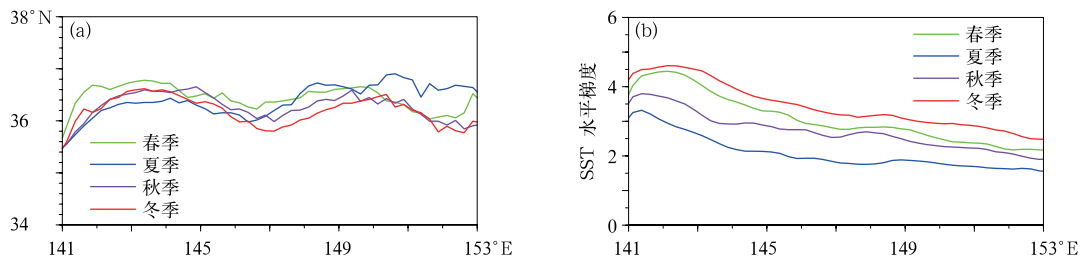


图 2 黑潮延伸体区域海表温度锋位置(a)和强度(b)[单位: $^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$]的季节变化
Fig. 2 Seasonal variation of SST front position (a), strength (b) [unit: $^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ km})^{-1}$]
in Kuroshio Extension region

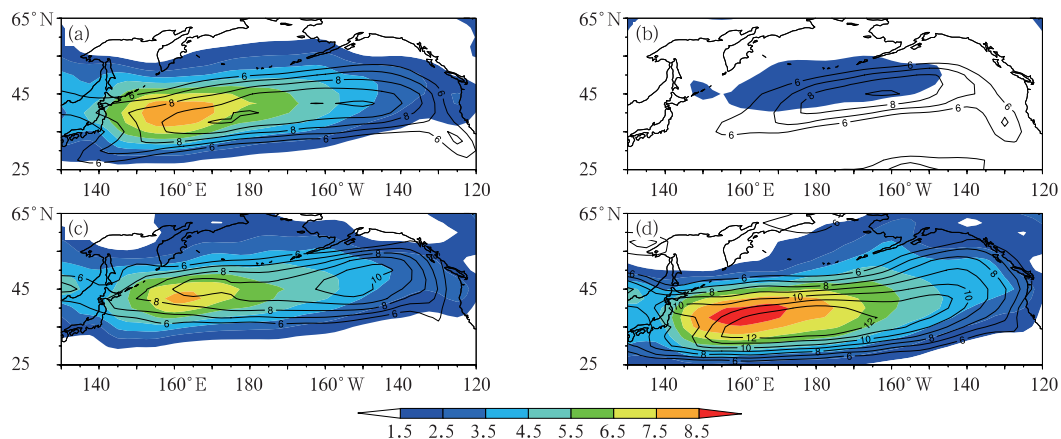


图 3 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d) 850 hPa $\overline{vT'}$ 的分布特征(填色,单位: $\text{mK}\cdot\text{s}^{-1}$)
(等值线为全风速的分布特征,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 3 The $\overline{vT'}$ (shading, unit: $\text{mK}\cdot\text{s}^{-1}$) and wind speed (contour, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
at 850 hPa for spring (a), summer (b), autumn (c), winter (d)

量的向极输送;同时,由于运动中的斜压涡旋强度不断减弱,风暴轴的强度中心位于上游,但由于夏季黑潮延伸体区域南北海温差异较小,海表温度锋强度非常弱,因此风暴轴的强度中心位于北太平洋中部地区。对不同季节的风暴轴进行对比可以发现,冬季北太平洋风暴轴位置偏南,强度最强,而夏季位置偏北,且强度最弱,春季和秋季为过渡阶段。对比图 2 给出的不同季节海表温度锋位置和强度的变化可以看出,北太平洋风暴轴强度与海表温度锋强度具有一致的协同变化,而由于海表温度锋位置的季节变化很弱,因此北太平洋风暴轴的变化主要是对海表温度锋强度季节变化的响应。

Hoskins and Valdes(1990)强调了大气斜压不稳定性增长率是斜压波(风暴轴)成长至关重要的因素,其为风暴轴的发展提供了斜压能量。本文计算了大气斜压不稳定性增长率

$$\sigma = 0.31f \left| \frac{\partial V}{\partial Z} \right| N^{-1} \quad (2)$$

式中, f 为科氏参数, V 为风速, N 为 Brunt Vaisala 频率(Lindzen and Farrell, 1980), 根据其大小来判断北太平洋风暴轴的发展。一般来说 σ 越大, 斜压性越强, 有利于风暴轴的发展, 反之亦然。

图 4a~4d 分别给出的是春季、夏季、秋季以及冬季 850 hPa 大气斜压不稳定性增长率的分布, 对比图 3 可以看出, 斜压不稳定性增长率与风暴轴的分布具有相当好的一致性。冬季海表温度锋强度最强, 使大气南北温度梯度增大, 增强了其上空大气的斜压性, 斜压涡旋活动更加频繁, 因此北太平洋风暴轴强度在西太平洋海域显著增强, 尤其是黑潮延伸体

区域, 且其中心轴线位置偏南; 而夏季海表温度锋非常弱, 黑潮延伸体区域的大气斜压性显著减弱, 导致斜压涡旋活动在此减弱, 而主要在太平洋中部海域生成, 北太平洋风暴轴强度中心移到太平洋中部区域, 且位置偏北。春季和秋季的大气斜压稳定率分布均表现为过渡阶段的特征。

此外, 考虑到影响涡旋利用时间平均流斜压性的效率不仅取决于大气斜压不稳定性增长率, 其影响因素还有很多(Chang, 2001), 因此诊断分析局地斜压能量转换 (baroclinic energy conversion, BCEC) 很有必要。参照 Cai et al(2007) 的研究, 从平均有效位能 (mean available potential energy, MAPE) 向涡动有效位能 (eddy available potential energy, EAPE) 的斜压能量转换为:

$$\text{BCEC1}(\text{MAPE} \rightarrow \text{EAPE}) = -C_1 \left(\frac{p_0}{p} \right)^{c_p} \left(-\frac{d\theta}{dp} \right)^{-1} (\overline{u'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} + \overline{v'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial y}) \quad (3)$$

从 EAPE 向涡动动能 (eddy kinetic energy, EKE) 的斜压能量转换为:

$$\text{BCEC2}(\text{EAPE} \rightarrow \text{EKE}) = -C_1 (\overline{\omega'T'}) \quad (4)$$

式中, $C_1 = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{c_p} \left(\frac{c_v}{g} \right) \left(\frac{R}{g} \right)$, $R, \omega, \theta, c_p, c_v$ 分别为干空气气体常数、垂直速度、位温、干空气的比定压热容(干空气的比定容热容)。MAPE, EAPE, EKE 这三个物理量在前人的研究中被广泛应用于风暴轴变率以及全球变暖变化方面的研究(Yin, 2005; Mizuta et al, 2011; Wu et al, 2011)。

图 5a~5d 分别给出的是春季、夏季、秋季以及冬季 850 hPa 斜压能量转换的分布, 冬季从平均有效

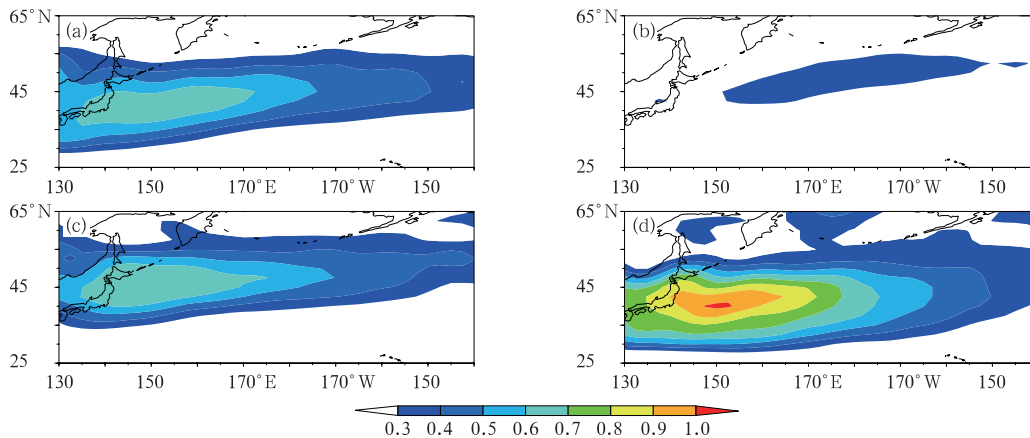


图 4 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d) 850 hPa 大气斜压不稳定性率场(单位: d^{-1})

Fig. 4 The baroclinic instability growth rate (unit: d^{-1}) at 850 hPa for spring (a), summer (b), autumn (c), winter (d)

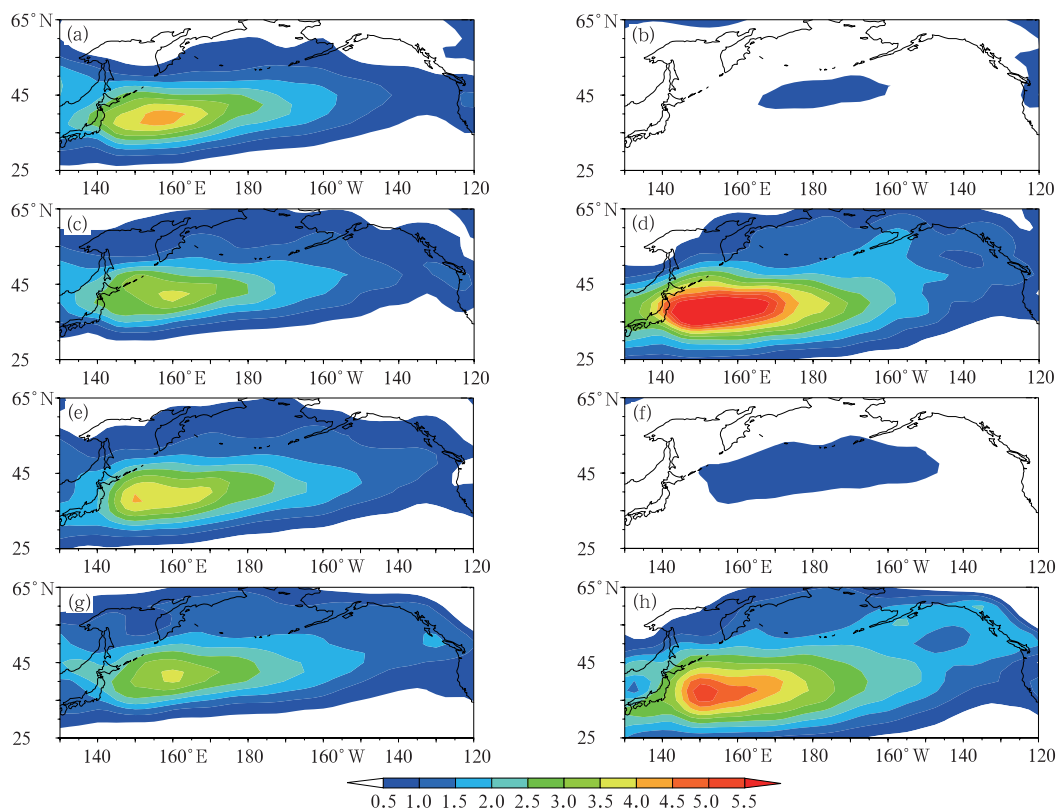


图 5 春季(a,e)、夏季(b,f)、秋季(c,g)、冬季(d,h) 850 hPa BCEC1 (MAPE→EAPE;a~d)和 BCEC2 (EAPE→EKE,e~h) (单位: $W \cdot m^{-2}$)

Fig. 5 The BCEC1 (MAPE→EAPE, a~d) and BCEC2 (EAPE→EKE, e~h) (unit: $W \cdot m^{-2}$) at 850 hPa for spring (a, e), summer (b, f), autumn (c, g), winter (d, h)

位能向涡动有效位能的斜压能量转换(BCEC1)以及从涡动有效位能向涡动动能(BCEC2)的斜压能量转换均在黑潮延伸体区域显著增强,而在夏季斜压能量转换则显著减弱,且中心移到太平洋中部,位置偏北。春季和秋季为过渡阶段,且春季的斜压能量转换在黑潮延伸体区域略强于秋季,这些都与图3给出的风暴轴的季节分布具有相当好的一致性。

3 结论与讨论

本文利用 NOAA 最优插值逐日 SST 数据分析了黑潮延伸体区域海表温度锋的季节变化,并分析了其对北太平洋风暴轴的影响,结合对大气斜压性不稳定增长率以及局地斜压能量转化的分析,得到主要结论如下:

黑潮延伸体区域海表温度锋南北位置的季节变化很弱,春季海表温度锋稍偏北,秋季和冬季居中,夏季上游海表温度锋锋区位置偏南,而下游位置又偏北,其强度的季节变化则非常显著,冬季最强,其

次为春季、秋季,夏季最弱。

黑潮延伸体区域海表温度锋的季节变化对北太平洋风暴轴具有显著的影响,且由于海表温度锋位置的季节变化很弱,北太平洋风暴轴的变化主要是对海表温度锋强度季节变化的响应。北太平洋风暴轴在冬季最强,其次为春季、秋季,夏季最弱,这种强度的季节变化与海表温度锋强度的季节变化是一致的。在冬季,北太平洋风暴轴位置偏南,而在夏季偏北,春季和秋季居中,这表明海表温度锋区强的海温水平梯度可以将大气中的风暴轴锚定在其上空。

冬季黑潮延伸体区域海表温度锋强度最强,增强了其上空大气的斜压性,从平均有效位能向涡动有效位能的斜压能量转换以及从涡动有效位能向涡动动能的斜压能量转换均在黑潮延伸体区域显著增强,斜压涡旋在此区域生成更加频繁,在随西风向下游运动过程中不断从背景平均流中获得能量,从而导致北太平洋风暴轴增强,且固定在黑潮延伸体区域上空,而夏季黑潮延伸体区域海表温度锋强度非常弱,其上空大气斜压性减弱,从平均有效位能向涡

动有效位能的斜压能量转换以及从涡动有效位能向涡动动能的斜压能量转换均显著减弱,斜压涡旋在此区域生成减少,导致北太平洋风暴轴减弱,且中心位于太平洋中部,位置偏北。

本文研究分析了黑潮延伸体区域海表温度锋的季节变化及其对北太平洋风暴轴的影响,并初步探讨了其可能的机制,由于中纬度海气相互作用的复杂性,其完整的物理机制还需要进一步的研究。

参考文献

- 傅刚,毕玮,郭敬天,2009. 北太平洋风暴轴的三维空间结构[J]. 气象学报, 67(2):189-200.
- 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.
- 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.
- 袁超,徐海明,2016. 春季北太平洋风暴轴的年际与年代际变化及其与太平洋海温异常的关系[J]. 气象学报, 74(6):860-875.
- 朱伟军,孙照渤,2000. 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.
- Barnett T P, Pierce D W, Saravanan R, et al, 1999. Origins of the mid-latitude Pacific decadal variability[J]. Geophys Res Lett, 26(10):1453-1456.
- Blackman M L, 1976. A climatological spectral study of the 500mb geopotential height of the Northern Hemisphere[J]. J Atmos Sci, 33(33):1607-1623.
- Blackman M L, 1977. An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation[J]. J Atmos Sci, 34(7):1040-1053.
- Bryden H L, Roemmich D H, Church J A, 1991. Ocean heat transport across 24°N in the Pacific[J]. Deep-Sea Res, 38(3):297-324.
- Cai M, Yang S, Dool H M V D, et al, 2007. Dynamical implications of the orientation of atmospheric eddies: a local energetics perspective[J]. Tellus, 59(1):127-140.
- Chang E K M, 2001. GCM and observational diagnoses of the seasonal and interannual variations of the Pacific storm track during the cool season[J]. J Atmos Sci, 58(13):1784-1800.
- Chen G, Plumb R A, Lu J, 2010. Sensitivities of zonal mean atmospheric circulation to SST warming in an aquaplanet model[J]. Geophys Res Lett, 37(12):245-269.
- Held I M, Lyons S W, Nigam S, 1989. Transients and the extratropical response to El Niño[J]. J Atmos Sci, 46(1):163-174.
- Hoskins B J, Valdes P J, 1990. On the existence of storm-tracks[J]. J Atmos Sci, 47(15):1854-1864.
- Joyce T M, Kwon Y O, Yu L, 2009. On the relationship between synoptic wintertime atmospheric variability and path shifts in the Gulf Stream and the Kuroshio Extension[J]. J Climate, 22(13):3177-3192.
- Lindzen R S, Farrell B F, 1980. A simple approximation result for the maximum growth rate of baroclinic instabilities[J]. J Atmos Sci, 37(7):1648-1654.
- Mizuta R, Matsueda M, Endo H, et al, 2011. Future change in extratropical cyclones associated with change in the upper troposphere[J]. J Climate, 24(24):6456-6470.
- Nakamura H, Sampe T, Tanimoto Y, et al, 2004. Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts[J]. Geophys Monogr AGU, 147:329-345.
- Nitani H, 1972. Beginning of the Kuroshio[C]//Stommel H, Yoshida K. Kuroshio, Physical Aspects of the Japan Current. Seattle: University of Washington Press, 129-164.
- Ogawa F, Nakamura H, Nishii K, et al, 2012. Dependence of the climatological axial latitudes of the tropospheric westerlies and storm tracks on the latitude of an extratropical oceanic front[J]. Geophys Res Lett, 39(5):578-594.
- O'Reilly C H, Czaja A, 2015. The response of the Pacific storm track and atmospheric circulation to Kuroshio Extension variability[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 141(686):52-66.
- 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.
- Su J, Guan B, Jiang J, 1990. The Kuroshio, part 1, physical features[J]. Oceanogr Mar Biol Annu Rev, 28:11-71.
- Wallace J M, Hobbs P V, 2006. Atmospheric science: An Introductory Survey[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 483.
- Wu Y, Ting M, Seager R, et al, 2011. Changes in storm tracks and energy transports in a warmer climate simulated by the GFDL CM2.1 model[J]. Climate Dyn, 37(1-2):53-72.
- Yin J H, 2005. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate[J]. Geophys Res Lett, 32(18):L18701.