

刘丽, 谭言科, 夏淋淋. 2018. 北太平洋冬季天气尺度涡旋的机理分析 [J]. 大气科学, 42 (5): 977–986. Liu Li, Tan Yanke, Xia Linlin. 2018. The possible physical mechanism for the synoptic-scale eddy over the North Pacific in winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (5): 977–986, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17133.

北太平洋冬季天气尺度涡旋的机理分析

刘丽¹ 谭言科² 夏淋淋³

1 中国人民解放军 65022 部队, 沈阳 110151

2 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438

3 中国人民解放军军事科学院, 北京 100091

摘 要 利用 1981~2013 年 NOAA (美国国家大气海洋管理局) 海温资料和 NCEP (美国环境预报中心) 大气再分析资料, 采用经验正交函数 (EOF) 分解方法对 850 hPa 瞬变高度场进行分解发现: 850 hPa 瞬变高度场经验正交函数分解的前两模态表征同一发展型波动的传播特征, 该波动在日本以西形成然后向东发展, 沿东偏北移动, 在日界线附近发展达到最强, 之后迅速向东北衰弱直至消亡, 本文将其定义为西部型天气尺度涡旋 (WSE)。合成分析表明, 西部型天气尺度涡旋的强弱变化与北太平洋大范围的海温、副极地海洋锋异常存在密切联系, 当西部型天气尺度涡旋活动偏强时, 北太平洋北部和中部的海温显著偏冷, 副热带地区海温显著偏暖, 副极地海洋锋大大增强。同时, 西部型天气尺度涡旋的强度与大气环流异常存在明显的协同变化, 表现为西部型天气尺度涡旋偏强对应于阿留申低压增强且位置偏东, 中纬度上空纬向西风增强。海洋和大气环流的这种变化增强了西北太平洋上空大气的斜压性, 使得有效位能向扰动动能的转换增加, 从而有利于西部型天气尺度涡旋的发展。

关键词 天气尺度涡旋 海洋锋 大气环流 协同变化

文章编号 1006-9895(2018)05-0977-10

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17133

The Possible Physical Mechanism for the Synoptic-Scale Eddy over the North Pacific in Winter

LIU Li¹, TAN Yanke², and XIA Linlin³

1 No. 65022 of PLA China, Shenyang 110151

2 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

3 Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100091

Abstract Based on NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sea surface temperature (SST) dataset and NCEP (National Center for Environmental Prediction) reanalysis dataset during 1981–2013, the synoptic-scale transient geopotential height at 850 hPa is decomposed by using EOF (empirical orthogonal function). The results show that the first two leading EOF modes represent the propagation characteristics of the same developing synoptic-scale eddy. The synoptic-scale eddy forms to the west of Japan and develops while it moves along the northeast path. It reaches the strongest near the dateline and then weakens rapidly along its northeastward moving and eventually disappears. This eddy is defined as WSE (western synoptic-scale eddy) in the present study. The composite results show that the intensity of the

收稿日期 2017-03-13; 网络预出版日期 2018-01-17

作者简介 刘丽, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: lilynuist@163.com

通讯作者 谭言科, E-mail: tanyanke@fudan.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41475070、41490640

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475070, 41490640)

WSE is closely linked with the SST and subpolar oceanic front anomalies in the North Pacific. When the WSE is strong, the SST is significantly colder in the northern and central North Pacific and warmer in the subtropical zone, and the subpolar oceanic front is robust. At the same time, the variation of the WSE is significantly coordinated with the atmospheric circulation anomaly. Corresponding to the strong WSE, the Aleutian-Low strengthens and shifts eastward, and the zonal westerly wind in the mid-latitude zone enhances. The above variations of oceanic and atmospheric circulations increase the atmospheric baroclinicity over the northwestern Pacific, leading to enhanced conversion from available potential energy to perturbation kinetic energy that is favorable for the WSE development.

Keywords Synoptic-scale eddy, Oceanic front, Atmospheric circulation, Coordinated variation

1 引言

自风暴轴被发现以来,关于风暴轴和天气尺度涡旋的研究就成为了三维瞬变波动力学研究的一个重要分支。Blackmon (1976) 提出风暴轴是 2.5~6 d 天气尺度瞬变扰动最强烈的地区,并且与气旋和反气旋移动路径紧密联系,具有重要的天气学意义和气候学意义 (Blackmon et al., 1977)。冬季北太平洋最强的两支风暴轴分别存在于北太平洋和北大西洋上空,这两支风暴轴被认为是北半球天气尺度涡旋活动最强的区域,位置与急流轴和强斜压区有很好的对应关系。平均而言,北太平洋上空的强风暴轴区位于急流出口的东北侧,并且位于斜压性极值中心的北侧 (Hoskins and Valdes, 1990)。值得注意的是,北太平洋风暴轴东、西两端结构明显不同,其西侧为强斜压区,东侧则相当于相当正压结构 (Lau, 1978, 1979),因此,分类研究北太平洋东、西两侧的天气尺度涡旋很有必要。

海洋锋区作为海表面温度经向梯度的大值区,是北半球中纬度海洋影响上空大气的显著区域。近年来,随着观测手段的不断进步,与强海流相联系的海洋锋区附近的海气相互作用特征正受到越来越多的人关注 (徐蜜蜜等, 2012)。过去的研究表明,海洋锋至少可以通过两种机制影响边界层大气,即 Wallace et al. (1989) 和 Hayes et al. (1989) 提出的近表面动量垂直混合机制以及 Lindzen and Nigam (1987) 提出的海平面气压调整机制,这两种机制均被大量观测事实和模式研究所证实。也有学者认为,在海洋锋区影响大气边界层的过程中,这两种机制可能都在起作用,但对不同海域的相对贡献有差异 (Xu et al., 2010)。近期的研究也发现,海洋锋对大气的影响不仅仅局限于边界层区域,它还能引起整个对流层大气的调整 (Kobashi et al., 2008; Minobe et al., 2008; 徐蜜蜜等, 2012)。

风暴轴作为天气尺度涡旋统计特征的表现形

式,关于海洋锋区海温异常对风暴轴影响的研究越来越得到人们的重视。朱伟军和孙照渤 (2000) 指出北太平洋冬季风暴轴中心强度及位置年际差异显著,而风暴轴年际变化的成因则可能与热带海温异常导致的热带、副热带温度梯度变化所引起的斜压性变异有关。任雪娟等 (2007a, 2007b) 研究发现东亚沿海至中纬度北太平洋海流区海表面温度 (SST) 异常时对应的海气异常型会导致风暴轴的空间分布发生显著变化。顾沛澍等 (2013) 从风暴轴的强度出发讨论了冬季北太平洋风暴轴的时空演变特征,并探讨了风暴轴活动强弱与东亚—北太平洋大气环流的关系。夏淋淋等 (2016) 通过对风暴轴的分类探讨了北太平洋海温异常对风暴轴空间分布的影响。

以上研究表明,北太平洋海洋锋区海温异常会影响风暴轴的空间形态,考虑到风暴轴和天气尺度涡旋的关系,那么北太平洋海洋锋区的海温异常也必然会影响到天气尺度涡旋发生发展。王丽颖等 (2016) 通过区域大气模式研究了副热带海洋锋的强度变化对中纬度大气场的影响,尤其是对流层中高层高频和低频涡旋扰动活动的异常。Jiang and Tan (2015) 利用 MEOF 分解 250 hPa 扰动经向风,得到了两种天气尺度涡旋在对流层高层的空间模态。然而,目前为止从逐日资料出发探讨海洋锋区海温对对流层中低层天气尺度涡旋影响的研究还较少。因此,本文通过对 1982~2013 年冬季 850 hPa 扰动位势高度进行 EOF 分解,定义了西部型天气尺度涡旋,并利用其强度指数分析与西部型天气尺度涡旋异常有关的海气变化。

2 资料和方法

2.1 观测资料

(1) 美国国家大气海洋管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 简称 NOAA) 提供的逐日 SST 高时空分辨率数据,水平分辨率为 0.25°

$\times 0.25^\circ$ ，时间从 1981 年 12 月 1 日至 2013 年 2 月 28 日。

(2) 美国环境预报中心 (National Center for Environmental Prediction, 简称 NCEP) 和美国国家能源部的能源研究超级计算中心 (National Energy Research Supercomputing Center of the Department of Energy, 简称 NERSC DOE) 联合发布的全球大气再分析资料, 包括多层高度场、温度场、水平风场、气压场等一系列大气要素变量, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 选用时段与 SST 一致。同时, 本文还使用了高斯分布 (T62L28) 的感热和潜热通量 (向上为正), 选用时段与 SST 一致。

文中所定义的冬季为当年的 12 月至次年 1 月、2 月的平均, 例如 1981 年冬季则表示是 1981 年 12 月、1982 年 1 月和 2 月的平均, 其中 2 月仅取前 28 天。

2.2 海洋锋区的定义及其分析方法

图 1a 所示为冬季北太平洋海表温度经向梯度的气候态分布。从冬季气候态分布来看, 海表面温度经向梯度的大值区主要位于中纬度地区两条带状的海洋锋区范围内, 分别是位于 28°N 左右的副热带海洋锋区和位于 40°N 左右的副极地海洋锋区。两个海洋锋区都横跨了整个太平洋, 呈现出经向宽纬向窄的特征。其中, 副热带海洋锋区最大值在太平洋中部, 而副极地海洋锋区的最大值在日本以东日界线以西海域, 并且其强度远远大于副热带海洋锋区强度。

图 1b 中的黑色实线是将冬季气候平均态的海表温度梯度在 $140^\circ\text{E} \sim 140^\circ\text{W}$ 进行纬向平均得到的海表温度梯度随纬度的变化曲线。从图中可以看到, 海表温度梯度自低纬向高纬增强, 在 28°N 附近达到第一个极大值, 随后略有减弱, 于 33°N 附近再次增强, 并在 40°N 左右达到最大值, 且后者的强度约为前者的两倍, 再之后迅速减弱。这两个海表温度梯度极大值的纬度分别对应了副热带海洋锋区和副极地海洋锋区的中心位置。

2.3 天气尺度涡旋强度指数定义及其分析方法

考虑到天气尺度涡旋在时间尺度上小于一周, 因此首先从逐日资料中减去气候平均值, 然后用去除气候平均值的数据进行 31 点滤波, 滤出 $2.5 \sim 6$ d 的分量, 以此表示天气尺度涡旋。在本文中, 先用 31 点滤波器 (韦晋和朱伟军, 2006) 对冬季北太平洋 850 hPa 的位势高度场进行滤波, 得

到天气尺度波动, 然后采用 EOF 分解方法, 对瞬变场进行分解, 得到其前两个模态 (图 2)。前两个模态的累积方差贡献为 22.7%。分析图 2 可以发现, 前两个模态的空间分布都表现为明显的波动特征, 在太平洋上都表现为西南—东北走向的负—正—负的波列结构。就波动的正值中心而言, 第一模态的正值中心位于日界线附近, 纬度在 45°N 左右。第二模态 (图 2b) 的大值区也位于中纬度北太平洋洋面上, 最大值位于 (40°N , 165°E) 附近。比较图 2a 和图 2b 可以发现, 两者描述的是同一类波动, 只是由于 EOF 分解的模态具有两两正交的特征, 因此二者存在 $\pi/2$ 位相差。通过对第一模态和第二模态的时间系数做超前滞后相关表明, 第二模态超前第一模态 1 天时, 相关系数为 0.83, 达到最大正相关, 而滞后 1 天时相关系数为 -0.84, 达到最大负相关, 这表明第二模态超前于第一模态 1 天。结合两者的空间分布可以发现, EOF 分解得到的前两模态反映的是同一发展型波动的不同位相, 该波动平均周期为 4 天, 在日本以西形成然后向东发展, 沿东偏北方向移动, 在日界线附近发展达到最强, 之后迅速向东北衰弱直至消亡, 这与 Xia et al. (2016) 的研究结果一致。因为该波动主要在日界线以西发展, 因而后文称其为西部型天气尺度涡旋 (WSE), 简称西部型。

为了更好的量化描述天气尺度涡旋的强弱特征, 我们定义一个天气尺度涡旋强度指数, 在本文中也称作 PC 指数。我们将 850 hPa 瞬变场 EOF 分解前两个模态的标准化时间系数分别记作 PC1 和 PC2, 由于两个模态反映的是同一发展型波动, 因此定义 PC 指数为 $PC = \sqrt{PC1^2 + PC2^2}$ 。利用定义的 PC 指数可以量化表征冬季北太平洋天气尺度涡旋随时间变化的强弱特征。

为了探究冬季北太平洋海洋锋区与其上空天气尺度涡旋及大气环流的关系, 挑选标准化 $PC > 2$ 的样本作为西部型天气尺度涡旋偏强日 (114 样本量), $PC < -1.5$ 的样本作为西部型天气尺度涡旋偏弱日 (87 样本量)。将西部型天气尺度涡旋偏强、偏弱日的海洋和大气异常场分别进行合成, 研究与西部型天气尺度涡旋强度变化有关的海洋和大气异常信号。

图 3 给出了冬季天气尺度扰动动能在西部型天气尺度涡旋偏强和偏弱时的垂直分布, 从图中可以看出, 天气尺度扰动动能在中纬度地区对流层高层

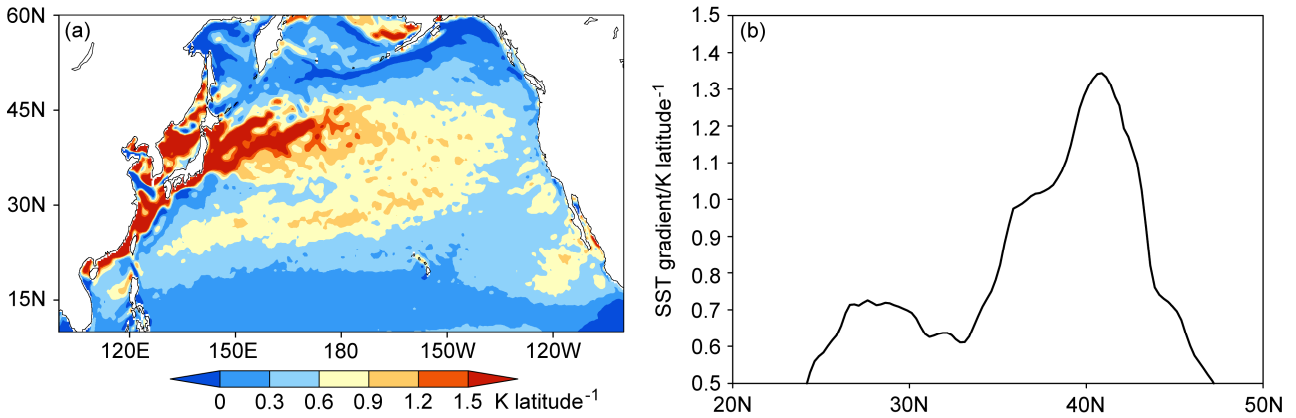


图1 1981~2012年冬季北太平洋 (a) 海表温度经向梯度的气候平均态和 (b) 140°E~140°W 纬向平均的海表温度经向梯度 (单位: K latitude⁻¹) 气候平均态分布
 Fig. 1 The climatology of (a) meridional SST gradient and (b) zonal mean meridional SST gradient (units: K latitude⁻¹) from 140°E to 140°W in the winter during 1981–2012

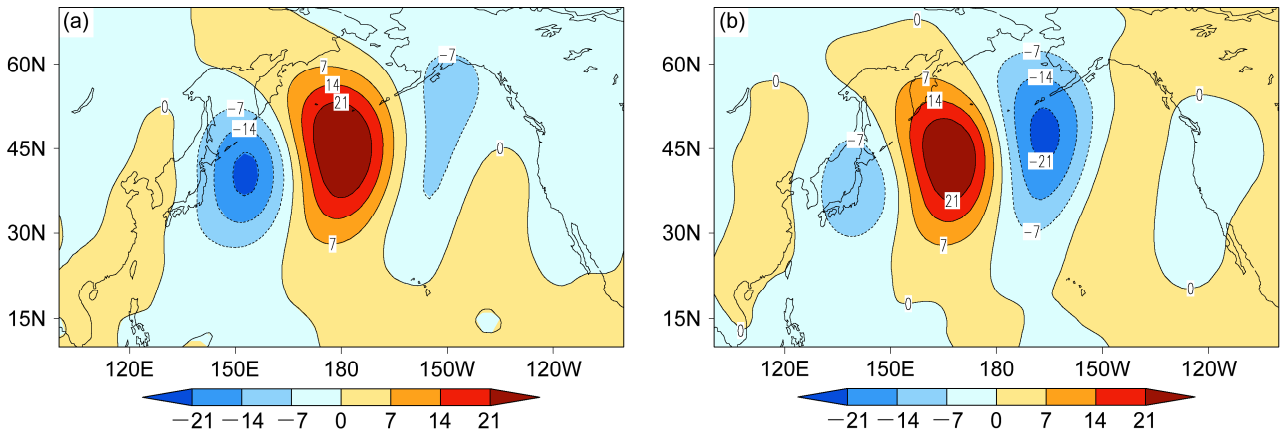


图2 北太平洋 (10°N~70°N, 100°E~100°W) 冬季 850 hPa 位势高度瞬变场 EOF 分解前两个模态: (a) 第一模态; (b) 第二模态
 Fig. 2 The first two leading EOF modes of the transient geopotential height at 850 hPa over the North Pacific (10°N–70°N, 100°E–100°W) during the wintertime: (a) The first mode; (b) the second mode

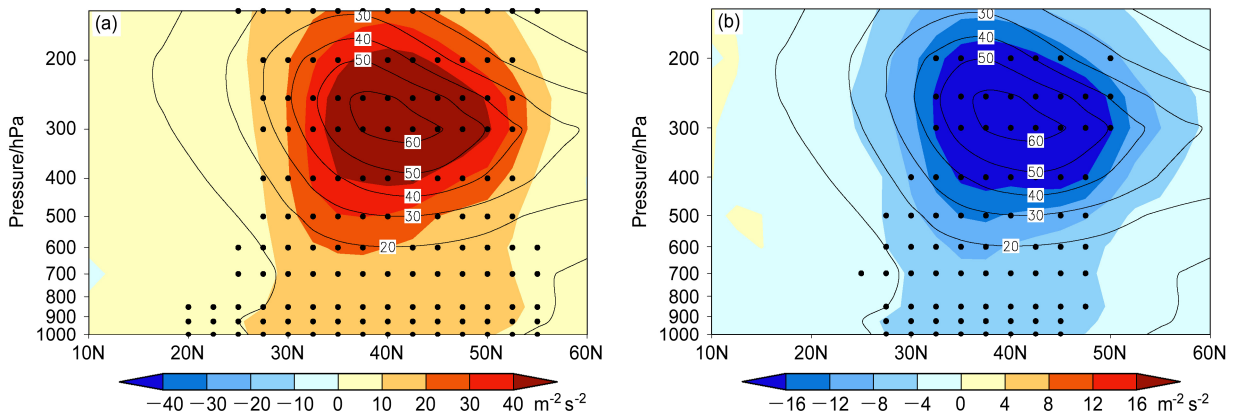


图3 北太平洋冬季 (a) 强、(b) 弱西部型天气尺度涡旋时, 140°E~160°W 纬向平均的扰动动能异常 (彩色阴影, 单位: m² s⁻²) 分布。等值线表示天气尺度扰动动能气候平均场, 打点区域表示通过 95% 信度水平的统计检验
 Fig. 3 Zonal mean synoptic-scale eddy kinetic energy anomalies (color shadings, units: m² s⁻²) from 140°E to 160°W in winter over the North Pacific during (a) strong and (b) weak WSEs (western synoptic-scale eddies). Contours indicate the climatological distribution of synoptic-scale eddy kinetic energy, the dotted areas represent values exceeding the 95% confidence level

300 hPa 达到最强。当西部型天气尺度涡旋偏强时，天气尺度扰动动能在中纬度地区整层均显著增强，尤其是在对流层中高层，其中异常中心位于气候态天气尺度扰动动能的最大值中心附近。反之，当西部型天气尺度涡旋偏弱时，天气尺度扰动动能在中纬度地区也显著减弱。扰动动能的垂直分布进一步证明用传播模态的时间系数挑选强弱样本能很好地表示西部型天气尺度涡旋的强弱。

3 影响西部型天气尺度涡旋强度变化的海气异常特征

3.1 SST 和 SST 经向梯度异常

海洋作为影响大气运动最重要的强迫源，其热力作用非常重要。因此，我们首先计算了西部型天气尺度涡旋偏强和偏弱日合成的 SST 及其梯度（因为表征大气梯度的 NCEP 资料分辨率为 2.5° ，为了与大气梯度相对应计算 SST 梯度时选取差分间隔 2.5° 的中央差）差值场（图 4）。从图 4a 中可以看出，当西部型天气尺度涡旋偏强时，副热带地区和北美西部沿岸海域的 SST 偏暖，北太平洋北部和中部的 SST 偏冷。而从相应的海表温度梯度差值分布（图 4b）可以看到，北太平洋副极地海洋锋区海表温度梯度显著加强，尤其是在日界线以西。海表温度和海表温度梯度的这种异常分布表明，西部型天气尺度涡旋的强度变化与北太平洋 SST 和副极地海洋锋异常存在密切的联系，主要表现为当西部型天气尺度涡旋偏强时，对应北太平洋北部和中部的 SST 偏冷，副热带地区的 SST 偏暖，副极地海洋锋显著增强。

3.2 感热和潜热通量异常

感热和潜热是在海—气热交换的过程中海洋影响大气的主要途径，海表温度和海洋锋异常必然会导致海—气之间的热通量异常。图 5 给出了冬季北太平洋在西部型天气尺度涡旋偏强和偏弱时感热和潜热通量合成的差值分布。从图 5 中可以看到，就气候平均而言，西北太平洋冬季海洋锋区是海气感热通量和潜热通量大值区。当西部型天气尺度涡旋偏强时，潜热通量（图 5a）异常在日本南部和东部为显著正值区，往东到日界线附近为弱的负值区，日界线东侧又存在一个弱的正值区和负值区，呈类似波状分布结构，并且波长与天气尺度涡旋类似。从图 5b 中可以看到感热通量异常的分布与潜热通量大体一致，只是其异常的强度要弱于潜热通

量异常的强度。

3.3 大气温度梯度异常

大气经向温度梯度是表征大气斜压性的一个重要指标，对天气尺度涡旋的发生发展有直接的影响。图 6 给出了西部型天气尺度涡旋对应的 850 hPa 气温梯度以及气温梯度在垂直经圈剖面上的差值分布。从图 6b 可以看到，冬季气候态的温度梯度在垂直方向上表现为上下层相反的结构，中纬度地区 200 hPa 以上的温度梯度为负，200 hPa 以下温度梯度为正，最大正值中心位于 300~700 hPa 之间。当西部型天气尺度涡旋偏强时，垂直方向上大气温度梯度异常表现为向北倾斜，在 40°N 附近的对流层中高层和 50°N 附近的对流层低层均存在异常大值区。在对流层低层（图 6a），大气温度梯度在西北太平洋显著增强，表明该地区能够为西部型天气尺度涡旋的发展提供充足的斜压能量。

3.4 海平面气压和位势高度异常

为了进一步探讨西部型天气尺度涡旋与大气环流场的相关关系，图 7 给出了冬季北太平洋在强、弱西部型天气尺度涡旋时海平面气压（SLP）、850 hPa、500 hPa 和 250 hPa 位势高度的差值分布。由图 7 可见，在中纬度北太平洋上空，冬季位势高度气候态表现为低层是闭合的低压中心，即阿留申低压，到了高空则对应于东亚大槽。当西部型天气尺度涡旋偏强时，海平面气压和整层位势高度均表现为在北太平洋北部是显著的负异常，该区域位于阿留申低压中心略偏东，而在副热带地区为显著的正异常。结合图 4a 的海表温度差值场和图 7 可以发现，当西部型天气尺度涡旋发展时，北太平洋 SST 为负异常，冷异常的洋面上空对应海表面气压场的低压异常，即阿留申低压强度增强。

3.5 水平风场异常

由于水平风场对于扰动动能的传播非常重要，因此接下来我们分析了表面水平风场在西部型天气尺度涡旋偏强和偏弱下的差异，结果如图 8 所示。从图中可以看出，冬季平均的表面纬向风（图 8a）在北太平洋沿纬度呈负—正—负的结构，西风的大值区位于 $30^\circ\text{N}\sim 45^\circ\text{N}$ ，表面经向风（图 8b）在北太平洋中部和东北部为大范围的正值区，其余地区为负值区。因此，在气候平均态下日界线 160°E 以东的中纬度地区以西南风为主，日界线 160°E 以西的中纬度地区以西北风为主。在冬季，当西部型天气尺度涡旋偏强时，表面纬向风的空间分布主要

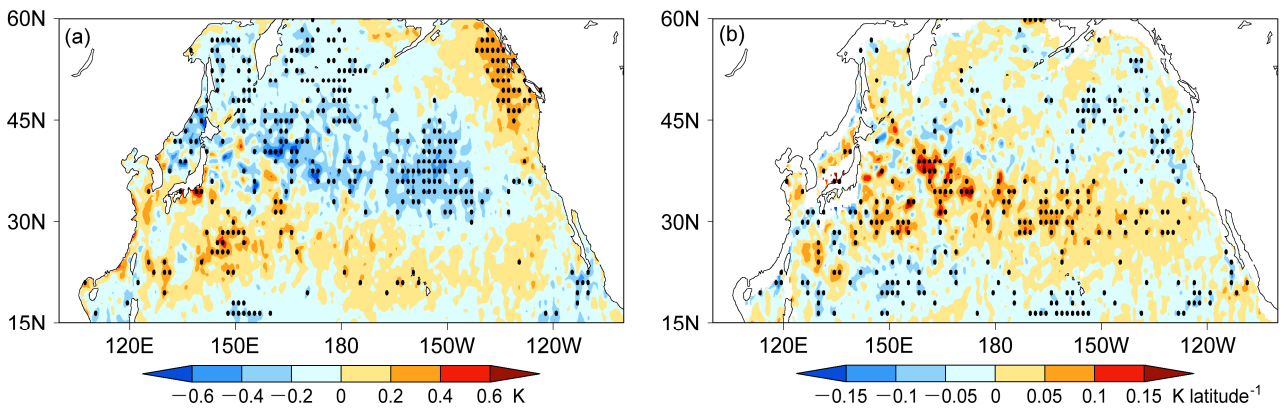


图 4 1981~2012 年冬季 (a) 海表温度 (单位: K) 和 (b) 海表温度梯度 (单位: $K \text{ latitude}^{-1}$) 在强、弱西部型天气尺度涡旋时的差值分布。打点区域表示通过 95% 信度水平的统计检验

Fig. 4 Differences in (a) SST (units: K) and (b) SST gradient (units: $K \text{ latitude}^{-1}$) between strong and weak WSEs in the winter during 1981–2012. The dotted areas indicates values exceeding the 95% confidence level

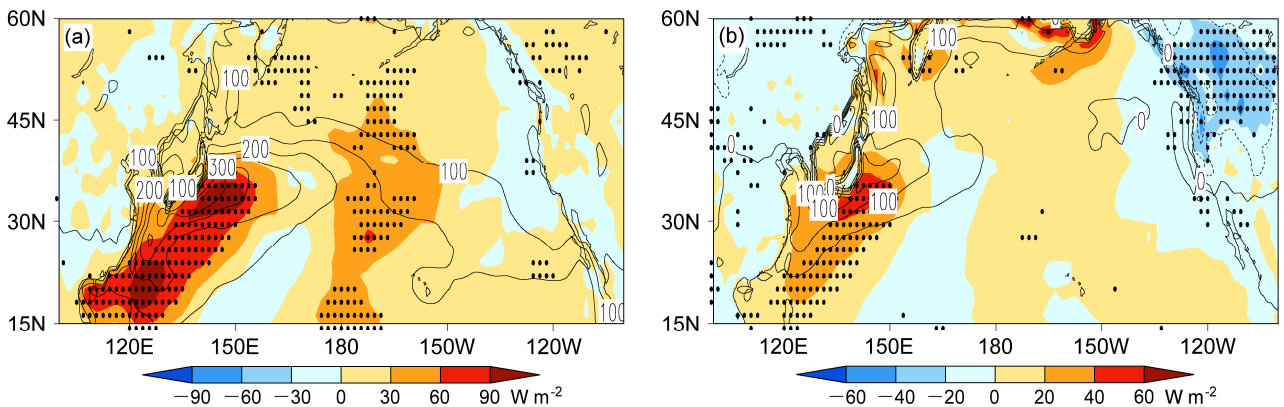


图 5 1981~2012 年冬季 (a) 潜热通量和 (b) 感热通量在强、弱西部型天气尺度涡旋时的差值分布 (彩色阴影, 单位: $W \text{ m}^{-2}$)。等值线表示气候平均场, 打点区域表示通过 95% 信度水平的统计检验

Fig. 5 Differences (color shadings, units: $W \text{ m}^{-2}$) in (a) the latent heat fluxes and (b) the sensible heat fluxes between strong and weak WSEs in the winter during 1981–2012. Contours indicate the climatological distributions of the latent and sensible heat fluxes, the dotted areas indicate values exceeding the 95% confidence level

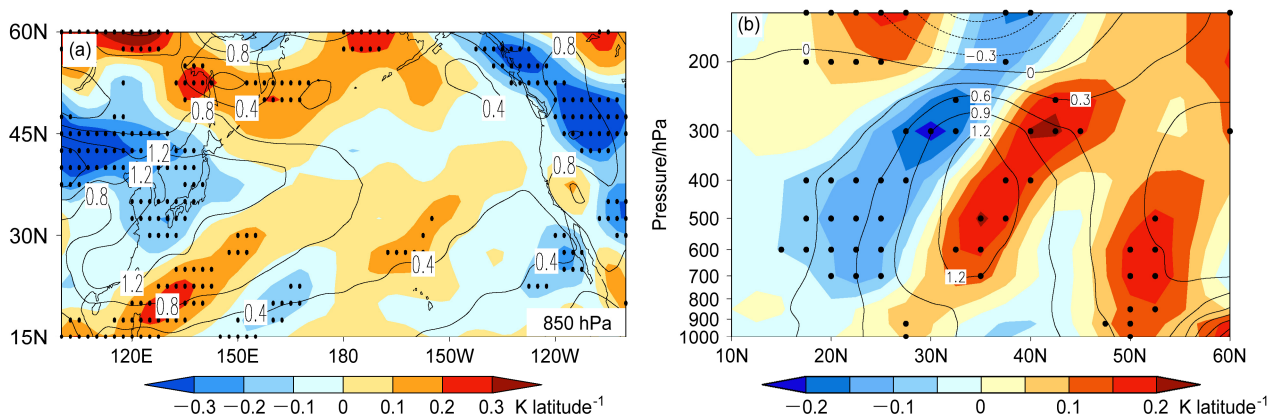


图 6 1981~2012 年冬季 (a) 850 hPa 和 (b) 140°E~160°W 纬向平均大气温度梯度 (彩色阴影, 单位: $K \text{ latitude}^{-1}$) 在强、弱西部型天气尺度涡旋时的差值分布。等值线表示气候平均态, 打点区域表示通过 95% 信度水平的统计检验

Fig. 6 Differences (color shadings, units: $K \text{ latitude}^{-1}$) (a) at 850 hPa and (b) 140°E–160°W zonal mean air temperature gradient between strong and weak WSEs in the winter during 1981–2012. Contours indicate the climatological values, the dotted areas indicate values exceeding the 95% confidence level

表现为中纬度地区显著正异常，即西风偏强，副热带地区显著负异常，即东风偏强。这与图 7 的海平面气压场异常相对应，由于阿留申低压和副热带高压的增强，根据风压定律易得中纬度两者之间的纬向风增强。经向南风异常主要出现在中纬度南北风的交界处（160°E）和北美西海岸沿岸，这就造成了西部型天

气尺度涡旋在对流层低层沿东偏北方向传播。

3.6 斜压性异常

涡旋最大增长率 (σ_{BI}) 是衡量大气线性斜压不稳定的一个有效指标，它作为大气斜压性指数，可以定量表征大气斜压不稳定性。根据 Lindzen and Farrell (1980) 的研究， σ_{BI} 定义为

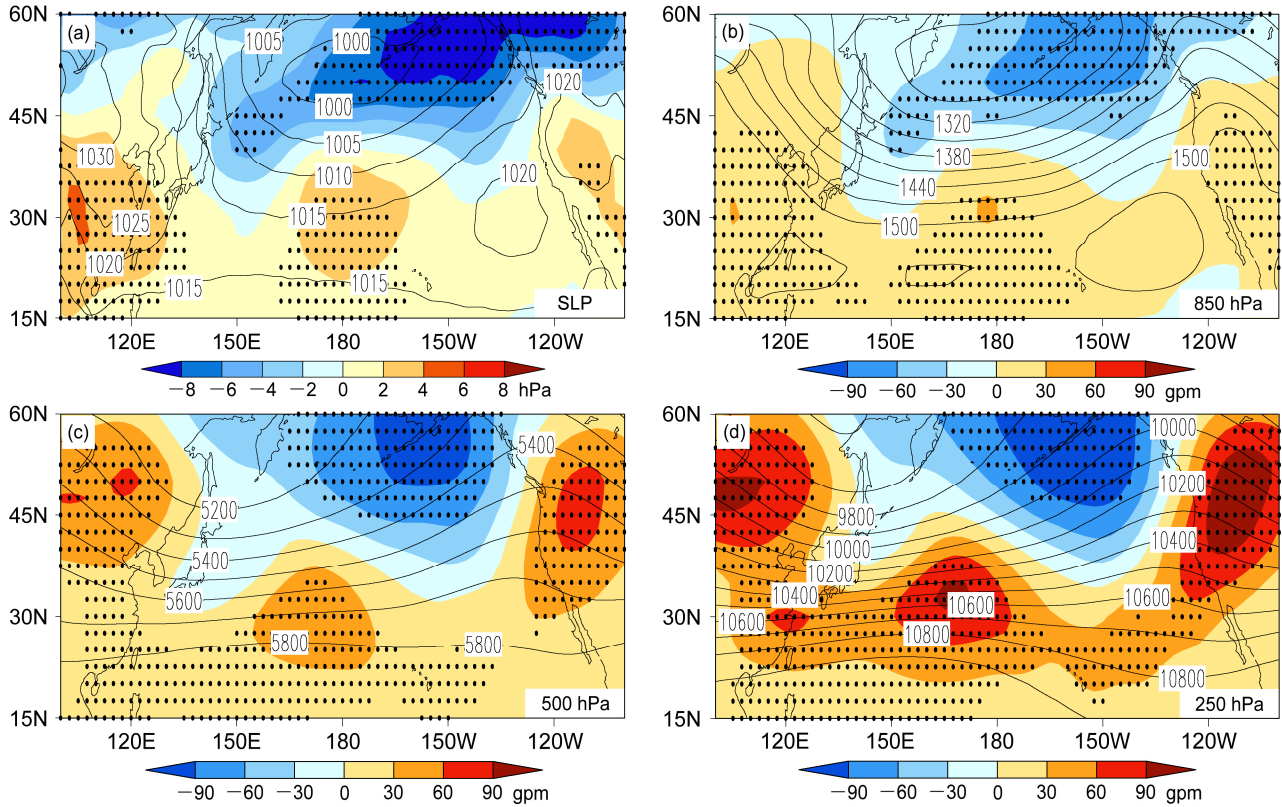


图 7 1981~2012 年冬季 (a) 海平面气压 (单位: hPa)、(b) 850 hPa、(c) 500 hPa 和 (d) 250 hPa 位势高度 (单位: gpm) 在强、弱西部型天气尺度涡旋时的差值分布 (彩色阴影)。等值线表示气候平均态, 打点区域表示通过 95% 信度水平的统计检验

Fig. 7 Differences (color shadings) in (a) SLP (units: hPa), (b) 850-hPa, (c) 500-hPa, and (d) 250-hPa geopotential height (units: gpm) between strong and weak WSEs in the winter during 1981–2012. Contours indicate the climatological values, the dotted areas indicate values exceeding the 95% confidence level

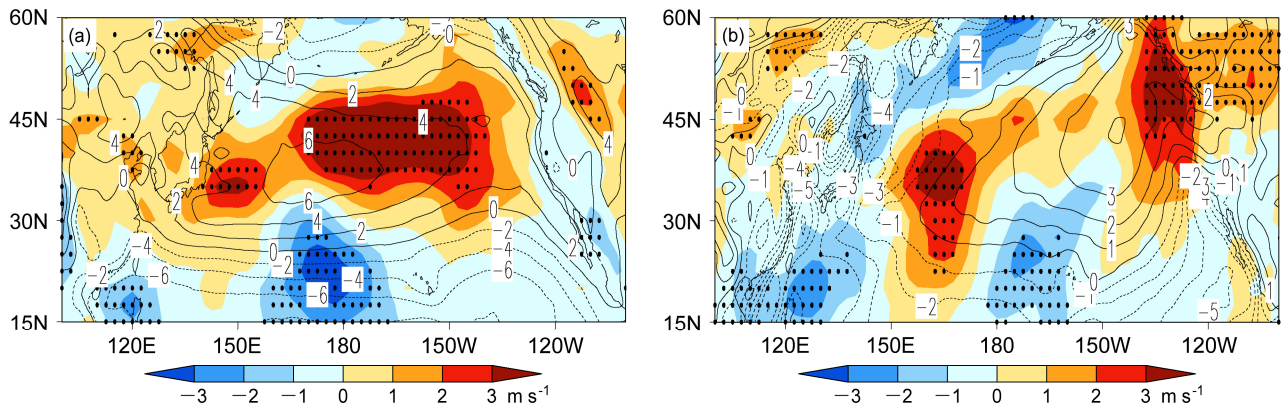


图 8 1981~2012 年冬季表面 (a) 纬向风和 (b) 经向风在强、弱西部型天气尺度涡旋时的差值分布 (彩色阴影, 单位: m s^{-1})。等值线表示气候平均态, 打点区域表示通过 95% 信度水平的统计检验

Fig. 8 Differences (color shadings, units: m s^{-1}) of surface (a) zonal wind and (b) meridional wind between strong and weak WSEs in the winter during 1981–2012. Contours indicate climatological values, the dotted areas indicate values exceeding the 95% confidence level

$$\sigma_{\text{BI}} = 0.31 \frac{f}{N} \left| \frac{\partial V}{\partial Z} \right|, \quad (1)$$

其中, f 为地转参数, N 为静力稳定度, V 为水平风速, Z 为位势高度。由 σ_{BI} 计算公式可知, 其值的大小主要与大气的静力稳定度和垂直风切变有关。

图 9 分别给出了斜压性指数在 850 hPa 和 500 hPa 的冬季平均态及其在强、弱西部型天气尺度涡旋时的差值分布。从图中可以看到, 就冬季平均态而言, 大气斜压不稳定度在中纬度西北太平洋地区最大, 这与图 8a 平均纬向风的空间分布是一致的, 即平均的斜压性指数大值区主要位于平均纬向风大值区附近。当西部型天气涡旋偏强时, 对流层中层和低层的斜压性分布存在差异。在低层, 除日本附近海域和北太平洋东南部地区, 其余北太平洋地区的斜压性均偏强, 与纬向风异常偏强的区域相对应。而在 500 hPa, 斜压性异常分布约以 30°N 为界, 在气候态大值中心的北侧斜压性偏强, 其南侧斜压性偏弱, 呈西南—东北走向。与 850 hPa 的差值分布相比, 500 hPa 的斜压性正异常区更偏北, 这与图 6b 中气温梯度异常在垂直方向上随高度向北倾斜是一致的。这里需要指出的是, 气温梯度是从热力方面描述了大气的斜压性, 而斜压性指数是从水平风场的垂直切变, 即动力方面描述了大气的斜压性, 实质上两者是一致的。

3.7 动能产生项 $-\mathbf{v}' \cdot \nabla \phi'$ 异常

单位质量空气微团的动能方程为

$$\frac{dK}{dt} = -\mathbf{V} \cdot \nabla \phi + \mathbf{V} \cdot \mathbf{F}, \quad (2)$$

其中, 动能 $K = \mathbf{V}^2/2$, \mathbf{V} 为水平风矢量, $\phi = gz$ 为等压面的重力位势, \mathbf{F} 为摩擦力。上式表明, 单位质量空气微团动能随时间的变化率, 决定于水平气压梯度力所作的功率, 以及克服摩擦所消耗的功率。因此, 大气运动动能的来源是水平气压梯度力作功, 即 $-\mathbf{V} \cdot \nabla \phi$, 同理, 天气尺度涡旋的扰动动能来源则是 $-\mathbf{v}' \cdot \nabla \phi'$, \mathbf{v}' 和 ϕ' 分别是滤波后的水平风速矢量和重力位势。该项在全球积分中与涡动位能和涡动动能之间的转换率 $-\omega' \alpha'$ (也称斜压转换项, ω' 和 α' 分别为扰动垂直速度和比容的扰动部分) 相等, 而在非全球积分中, 两者 $\nabla \mathbf{v}' \cdot \phi'$, 但该项为小项, 因而可以忽略 (Peixoto and Oort, 1995)。我们分别计算了 850 hPa 和 500 hPa 的斜压转换项 $-\omega' \alpha'$ 和动能产生项 $-\mathbf{v}' \cdot \nabla \phi'$, 二者在空间分布上是完全一致的, 因此本文直接将 $-\mathbf{v}' \cdot \nabla \phi'$ 作为动能

产生项来分析。

图 10 给出了西部型天气尺度涡旋动能产生项 $-\mathbf{v}' \cdot \nabla \phi'$ 在对流层中低层的空间分布。从图中可以看出, 当西部型天气尺度涡旋偏强时, 无论是 850 hPa 还是 500 hPa, 西部型天气尺度涡旋动能的异常大值区都出现在其冬季平均态大值区附近。在 850 hPa, 天气尺度扰动动能主要产生于西北太平洋, 这就表明了西部型天气尺度涡旋正是从这里得到大量扰动动能而迅速发展起来的。同理, 由于 500 hPa 风暴轴比 850 hPa 风暴轴偏南, 因而其天气尺度涡旋的动能产生区域也较之偏南。

4 结论与讨论

本文利用 31 点滤波资料做 EOF 分解, 定义了西部型天气尺度涡旋和其指数, 并挑选了西部型天气尺度涡旋偏强和偏弱日, 利用合成分析给出了西部型天气尺度涡旋异常对应的中纬度海气异常场, 包括海表温度、海表温度梯度、气温梯度、感热通量、潜热通量、海平面气压、位势高度、水平风场和大气斜压性等, 初步得到以下结论:

(1) 850 hPa 瞬变高度场做 EOF 分解的前两模态表征同一发展型波动的传播特征, 将其定义为西部型天气尺度涡旋。该波动平均周期为 4 d, 在日本以西形成然后向东发展, 沿东偏北移动, 在日界线附近发展达到最强, 之后迅速向东北衰弱直至消亡。

(2) 西部型天气尺度涡旋的强度变化与北太平洋大范围海表温度变化和副极地海洋锋异常存在密切联系。当北太平洋北部和中部海表温度偏冷, 副热带地区海表温度偏暖时, 造成副极地海洋锋增强, 从而使得其上空的大气斜压性增强, 西部型天气尺度涡旋活动偏强。

(3) 西部型天气尺度涡旋的强度变化与大气环流异常存在明显的协同变化。主要表现为当西部型天气尺度涡旋偏强时, 阿留申低压增强且位置偏东, 中纬度上空纬向西风增强, 西北太平洋天气尺度扰动动能大大增加。

本文通过对西部型天气尺度涡旋强度变化时对应的海洋和大气环流进行分析, 得到了与西部型天气尺度涡旋强度协同变化的一系列海气变化规律。本文主要着眼于中纬度的海洋和大气变化, 热带海气异常没有讨论。但考虑到热带海表温度异常对北太平洋大气运动的影响很大, 研究热带海表

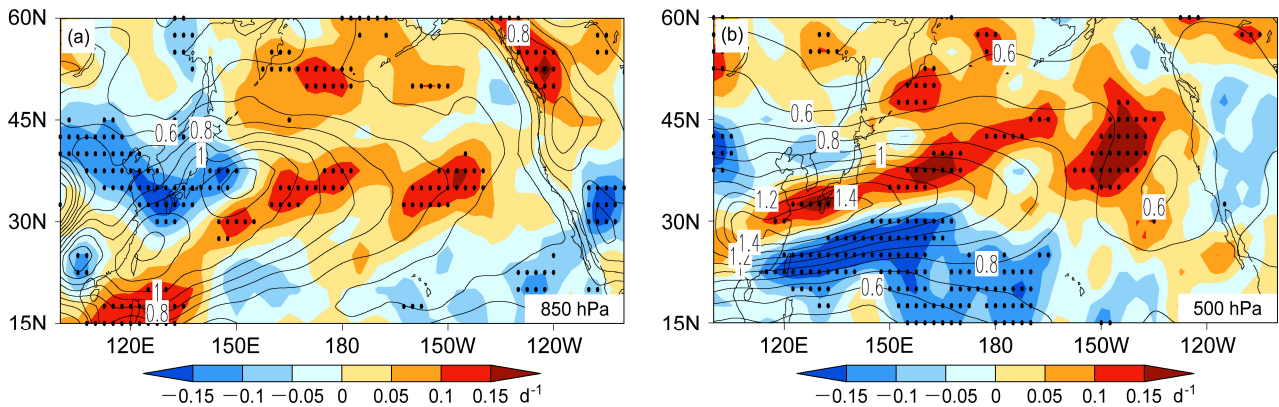


图9 1981~2012年冬季(a)850 hPa和(b)500 hPa斜压性指数在强、弱西部型天气尺度涡旋时的差值分布(彩色阴影,单位: d^{-1})。等值线表示气候平均态,打点区域表示通过95%信度水平的统计检验

Fig. 9 Differences (color shadings, units: d^{-1}) of (a) 850-hPa and (b) 500-hPa baroclinic index between strong and weak WSEs in the winter during 1981–2012. Contours indicate climatological values, the dotted areas indicate values exceeding the 95% confidence level

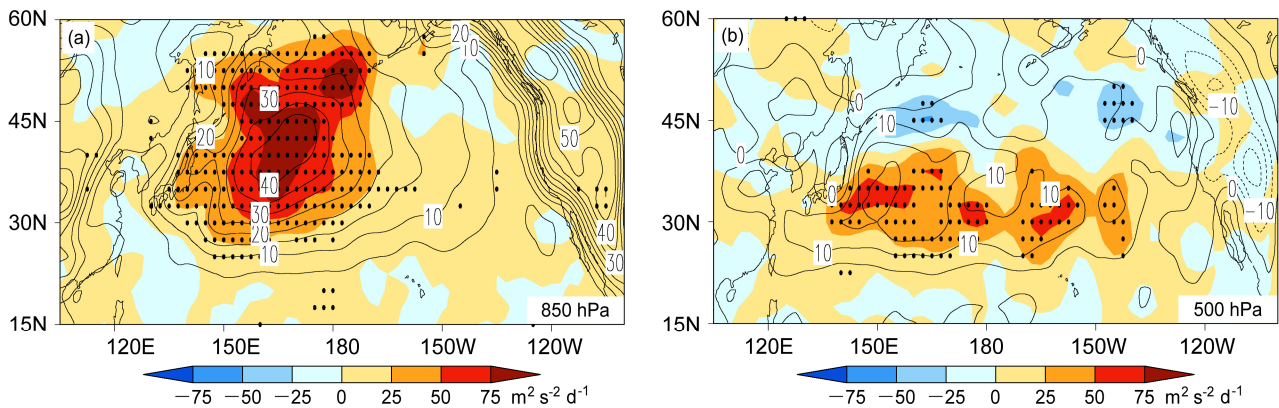


图10 1981~2012年冬季(a)850 hPa和(b)500 hPa天气尺度扰动动能产生项 $-\mathbf{v}' \cdot \nabla \phi'$ 在强、弱西部型天气尺度涡旋时的差值分布(彩色阴影,单位: $m^2 s^{-2} d^{-1}$)。等值线表示气候平均态,打点区域表示通过95%信度水平的统计检验

Fig. 10 Differences (color shadings, units: $m^2 s^{-2} d^{-1}$) of (a) 850-hPa and (b) 500-hPa synoptic-scale perturbation kinetic energy generation term $-\mathbf{v}' \cdot \nabla \phi'$ between strong and weak WSEs in the winter during 1981–2012. Contours indicate climatological values, the dotted areas indicate values exceeding the 95% confidence level

温度对天气尺度涡旋的影响也很有意义。同时针对与西部型天气尺度涡旋强度变化有关的大气—海洋之间相互作用的因果关系,以及中纬度海洋锋区具体可能通过哪些过程来影响天气尺度涡旋,这些问题在后续的工作中将会进一步讨论。

参考文献 (References)

Blackmon M L. 1976. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33: 1607–1623, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<1607:ACSSOT>2.0.CO;2.
 Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. 1977. An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34: 1040–1053, doi:10.1175/1520-0469(1977)034<1040:AOSOTN>2.0.CO;2.
 顾沛澍, 朱伟军, 刘鸣彦, 等. 2013. 冬季北太平洋风暴轴异常及其与东

亚大气环流的关系 [J]. *气象科学*, 33: 610–618. Gu Peishu, Zhu Weijun, Liu Mingyan, et al. 2013. Storm track anomaly over the North Pacific in winter and its relation with atmospheric circulation over East Asia [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 33: 610–618, doi:10.3969/2012jms.0175.
 Hayes S P, Mephaden M J, Wallace J M. 1989. The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Weekly to monthly variability [J]. *J. Climate*, 2: 1500–1506, doi:10.1175/1520-0442(1989)002<1500:TIOSSST>2.0.CO;2.
 Hoskins B J, Valdes P J. 1990. On the existence of storm-tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 1854–1864, doi:10.1175/1520-0469(1990)047<1854:OTEOST>2.0.CO;2.
 Jiang Y X, Tan B K. 2015. Two modes and their seasonal and interannual variation of the baroclinic waves/storm tracks over the wintertime North Pacific [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32: 1244–1254, doi:10.1007/s00376-015-4251-3.

- Kobashi F, Xie S P, Iwasaka N, et al. 2008. Deep atmospheric response to the North Pacific oceanic subtropical front in spring [J]. *J. Climate*, 21: 5960–5975, doi:10.1175/2008JCLI2311.1.
- Lau N C. 1978. On the three-dimensional structure of the observed transient eddy statistics of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35: 1900–1923, doi:10.1175/1520-0469(1978)035<1900:OTTDSO>2.0.CO;2.
- Lau N C. 1979. The structure and energetics of transient disturbances in the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36: 982–995, doi:10.1175/1520-0469(1979)036<0982:TSAEOT>2.0.CO;2.
- Lindzen, R S, Farrell B. 1980. A simple approximate result for the maximum growth rate of baroclinic instabilities [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37: 1648–1654, doi:10.1175/1520-0469(1980)037<1648:ASARFT>2.0.CO;2.
- Lindzen R S, Nigam S. 1987. On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 2418–2436, doi:10.1175/1520-0469(1987)044<2418:OTROSS>2.0.CO;2.
- Minobe S, Kuwano-Yoshida A, Komori N, et al. 2008. Influence of the gulf stream on the troposphere [J]. *Nature*, 452: 206–209, doi:10.1038/nature06690.
- Peixoto J P, Oort A H. 1995. 气候物理学 [M]. 吴国雄, 刘辉, 等, 译. 北京: 气象出版社, 296pp. Peixoto J P, Oort A H. 1995. *Physics of Climate* (in Chinese) [M]. Wu Guoxiong, Liu Hui, et al, Trans. Beijing: China Meteorological Press. 296pp.
- 任雪娟, 杨修群, 韩博. 2007a. 北太平洋冬季海—气耦合的主模态及其与瞬变扰动异常的联系 [J]. *气象学报*, 65: 52–62. Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Han Bo. 2007a. Leading coupled modes between the atmosphere and ocean in the North Pacific in winter and their association with the transient eddy anomalies [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65: 52–62, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.01.005.
- 任雪娟, 杨修群, 韩博, 等. 2007b. 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: 92–100. Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Han Bo, et al. 2007b. Storm track variations in the North Pacific in winter season and the coupled pattern with the midlatitude atmosphere–ocean system [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50: 92–100, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2007.01.012.
- Wallace J M, Mitchell T P, Deser C. 1989. The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Seasonal and interannual variability [J]. *J. Climate*, 2: 1492–1499, doi:10.1175/1520-0442(1989)002<1492:TIOSSST>2.0.CO;2.
- 王丽颖, 胡海波, 杨修群, 等. 2016. 伴随冬季北太平洋副热带海洋锋强度变化的大气扰动异常及对中纬度大气平均场的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 46: 1658–1674. Wang Liying, Hu Haibo, Yang Xiuqun, et al. 2016. Atmospheric eddy anomalies associated with the wintertime North Pacific subtropical front strength and their influences on the seasonal-mean atmosphere [J]. *Science China: Earth Sciences*, 59: 2022–2036, doi:10.1007/s11430-016-5331-7.
- 韦晋, 朱伟军. 2006. 天气尺度瞬变波滤波方案比较分析 [J]. *南京气象学院学报*, 29: 549–554. Wei Jin, Zhu Weijun. 2006. Comparison of two filtering ways for synoptic scale transient waves [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 29: 549–554, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.04.017.
- 夏淋淋, 谭言科, 尹锡帆, 等. 2016. 基于中心轴线的北太平洋冬季风暴轴分类及其机理研究 [J]. *大气科学*, 40: 1284–1296. Xia Linlin, Tan Yanke, Yin Xifan, et al. 2016. Classification, based on the central axis, of storm tracks in the North Pacific in the winter season, and the possible underlying physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40: 1284–1296, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15115.
- Xia L L, Tan Y K, Li C Y, et al. 2016. The classification of synoptic-scale eddies at 850 hPa over the North Pacific in wintertime [J]. *Advances in Meteorology*, 2016: 4797103, doi:10.1155/2016/4797103.
- Xu H M, Tokinaga H, Xie S P. 2010. Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004–05 [J]. *J. Climate*, 23: 4704–4715, doi:10.1175/2010JCLI3267.1.
- 徐蜜蜜, 徐海明, 朱素行, 等. 2012. 我国东部海洋温度锋区对大气的强迫作用——季节变化 [J]. *大气科学*, 36: 590–606. Xu Mimi, Xu Haiming, Zhu Suxing, et al. 2012. Ocean-to-atmosphere forcing in the vicinity of the sea surface temperature front in the East China Sea—Seasonal variations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36: 590–606, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11113.
- 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: 309–320. Zhu Weijun, Sun Zhaobo. 2000. 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: 309–320, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.03.006.