

朱伟军, 袁凯, 陈懿妮. 2013. 北太平洋东部风暴轴的时空演变特征 [J]. 大气科学, 37 (1): 65–80, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11245. Zhu Weijun, Yuan Kai, Chen Yini. 2013. Spatial and temporal variations in the eastern North Pacific storm track [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 65–80.

北太平洋东部风暴轴的时空演变特征

朱伟军¹ 袁凯^{1,2} 陈懿妮^{1,3}

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 湖北省武汉市气象局, 武汉 430040

3 浙江省气象局, 杭州 310002

摘 要 本文利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 逐日再分析资料 (ERA-40), 以 500 hPa 位势高度滤波方差为代表, 对 1957 年 12 月~2001 年 11 月期间 44 年 528 个月北太平洋区域 (30°N~60°N, 120°E~120°W) 月平均风暴轴的多中心数目和最强中心位置进行了客观统计, 在此基础上, 对北太平洋区域进行了分区, 通过对比各区域风暴轴的时间演变和结构变化, 重点揭示了北太平洋东部地区风暴轴的时空演变特征。主要结论如下: (1) 逐月来看, 北太平洋风暴轴“多中心”现象普遍存在, 概率高达 94.7%, 最典型的分布呈 2~3 个中心分布; 从季节上来看, 春季是“多中心”现象最容易出现的季节, 秋季和冬季相对较少, 而 4 个及以上的“多中心”现象则更容易出现在夏季。(2) 若把最强中心出现在 160°W 以东地区的北太平洋风暴轴定义为东部型风暴轴, 那么从月份上来看, 7 月相对最容易出现东部型风暴轴, 1 月和 2 月最难; 从季节上来看, 夏季相对最容易出现东部型风暴轴, 冬季最难; 总的来看, 出现东部型风暴轴的频数大约占总频数的三分之一。(3) 从垂直结构上看, 在北太平洋 160°W 以东地区, 风暴轴的强度可以最强, 但与斜压性密切联系的涡动向极和向上热量通量的最大值却并不是最强。(4) 经验正交函数分解 (EOF) 分析的结果表明, 在不同季节、不同区域以及是否单独考虑东部型风暴轴的情况下, 风暴轴的变化虽然表现出了一定的差异, 但都反映出在北太平洋东部区域风暴轴的变化特征有其独特特点, 如在该区域风暴轴的主要变化模态并不一定时时与其他区域的主要变化模态一一对应。北太平洋东部区域风暴轴变化的原因和机制值得进一步深入探讨。

关键词 “多中心”现象 东部型风暴轴 经验正交函数分解 (EOF)

文章编号 1006-9895(2013)01-0065-16

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11245

Spatial and Temporal Variations in the Eastern North Pacific Storm Track

ZHU Weijun¹, YUAN Kai^{1,2}, and CHEN Yini^{1,3}

1 Key Laboratory of Meteorological Disasters of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Wuhan Meteorological Service, Wuhan 430040

3 Zhejiang Meteorological Service, Hangzhou 310002

Abstract On the basis of daily reanalysis data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasting (ERA-40), the filtered 500-hPa geopotential height variance between 2.5 and 6 days is first used for a statistical analysis of the number of maxima centers and the position of the strongest center for 528 monthly mean storm tracks over the North Pacific ocean (30°N–60°N, 120°E–120°W) from December 1957 to November 2001. Then, after a comparison

收稿日期 2011-12-20, 2012-06-02 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41075070, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD

作者简介 朱伟军, 男, 1969 年出生, 教授, 主要从事大气环流异常及短期气候预测研究。E-mail: weijun@nuist.edu.cn

with other subregions, the temporal and spatial variation in the eastern part of the North Pacific storm track is revealed. The results are summarized as follows: (1) As viewed from month to month, a polycentric distribution, most typically with two or three centers, is common, with a probability as high as 94.7% over the entire Pacific storm track. This distribution appeared most often in spring and least often in autumn and winter, whereas a polycentric distribution with four or more centers appeared most often in summer. (2) The eastern pattern storm track, which is defined as having the strongest center located east of 160°W, generally with a 33% probability, appeared most often in summer, especially in July, and least often in winter, especially in January and February. (3) In terms of the vertical structure, the track intensity can be strongest over the eastern part of the North Pacific storm track, but not the baroclinic transport of energy poleward and upward by transient eddies. (4) The empirical orthogonal function (EOF) result shows that some differences do exist under different conditions when seasonal, regional, and track type effects are considered, but a few unique features still appear in the variation in the eastern part of the North Pacific storm track, e.g., the major EOF modes are not always in a one-to-one correspondence with their counterparts over the entire North Pacific storm track. These results suggest that the mechanism of the variation in the eastern Pacific storm track is worthy of further investigation.

Keywords Polycentric phenomenon, Eastern-pattern storm track, Empirical orthogonal function (EOF)

1 引言

北半球天气尺度(2.5~6 d)带通瞬变扰动方差的极大值集中分布在两个纬向拉长的区域,位置与地面气旋/反气旋活动路径一致,这就是北半球中纬度太平洋和大西洋上空著名的两大风暴轴。由于风暴轴对应着强烈的热量输送、动量输送和水汽输送,因而对北半球大气环流的维持和全球天气气候异常具有十分重要的作用(Held et al., 1989)。

风暴轴最早由 Blackmon (1976) 发现,随后大量的观测分析研究(如 Lau, 1978, 1979, 1988; Trenberth, 1981; Blackmon, et al., 1984a, 1984b; Hoskins and Valdes, 1990; 朱伟军和孙照渤, 2000),揭示了风暴轴的许多气候平均特征:(1) 冬季,北半球天气尺度的涡动活动被组织成两大风暴轴,分别位于中纬度的太平洋和大西洋上;(2) 若以 500 hPa 天气尺度涡动的位势高度方差极值中心来表征风暴轴的强度和位置,则就冬季平均而言,在太平洋区域,最强中心位于(42.5°N, 175°E)附近,强度达 40 dagpm²左右,而在大西洋区域,风暴轴更强,中心强度可达 56 dagpm²左右,位于(45°N, 50°W)附近;(3) 在风暴轴区域,天气尺度涡动的位势高度方差和扰动动能的最大值、涡动西风动量通量的最强辐合以及涡动对位涡的最大经向输送,都出现在对流层上部 300 hPa 层附近,而涡动向极和向上的热量通量最大值,则位于对流层低层 850 hPa 层附近。

此外,傅刚等(2009)发现,在北太平洋和北大西洋的对流层低层,还分别存在“副热带风暴轴”和“副极地风暴轴”这种双风暴轴现象;风暴

轴不仅北半球有,在南半球也存在,而且在南半球,由于中纬度海陆差异较小,风暴轴有其独特的特点(Trenberth, 1984; Nakamura and Shimpo, 2004)。

多年来,更多的关注点是风暴轴的变率问题,现已逐渐成为研究热点。人们从月、季、年、年代等不同尺度上,考察了风暴轴的这种短期气候异常(如 Lau, 1988; 邓兴秀和孙照渤, 1994; 胡增臻和黄荣辉, 1997; 朱伟军和孙照渤, 2000; Norris, 2000; Chang, 2001; Chang and Fu, 2002, 2003; Nakamura et al., 2002; Compo and Sardeshmukh, 2004; 丁叶风等, 2006; 任雪娟和张耀存, 2007; 韩博等, 2007; Wettstein and Wallace, 2010; 朱伟军和李莹, 2010),主要研究成果可以简要概括如下:(1) 北半球风暴轴存在显著的月际和季节变化,一般而言,风暴轴在冬季月份最强,位置偏南,在夏季月份最弱,位置偏北,而春、秋两季为过渡时期;(2) 风暴轴还存在显著的年际变化和年代际变化,如北太平洋风暴轴在 20 世纪 80 年代中期,存在由偏弱转为偏强的年代际位相转换;(3) EOF 等分析结果显示:在月以上各种时间尺度上,北太平洋风暴轴的这种短期气候异常,具有相似的空间变化特征,主要有两种变化模态:第一模态是风暴轴在其气候平均位置增强或减弱的主体一致变化型,第二模态是风暴轴特别是其中东部在气候平均位置南北两侧振荡的经向异常型。

但是,以上研究基本上把整个北太平洋区域作为研究对象,而李莹等(2010)最近研究发现,从纬向结构上看,北太平洋风暴轴不仅存在“多中心”现象(傅刚等, 2009),而且最强中心还经常出现在 160°W 以东地区。目前,对这种在北太平洋

东部出现风暴轴最强中心的现象本身及其原因，认识都还非常有限，而风暴轴东部的异常，不仅可以引起附近阿留申低压和阻塞形势的异常（陆日宇，2001；Huang et al., 2002；刁一娜等，2004；Nakamura and Wallace, 1990），而且对整个北半球大气环流和我国天气气候的异常，具有重要影响。因此，本文将重点探讨北太平洋东部地区风暴轴的时空演变究竟有何独特特征。

2 资料与方法

文中所用资料取自欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的再分析资料集（ERA-40）（<http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/index.html> [2008-09-04]）：逐日的位势高度场（ z ）、风场（ u 、 v 、 w ）、温度场（ T ）资料，水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，覆盖时段为 1957 年 9 月~2002 年 8 月。

本文首先采用 31 点对称数字滤波器（李莹和朱伟军，2009），从逐日原始资料直接滤波出 2.5~6 d 的瞬变涡动，然后每月为一段，对每一段各自计算其方差，得到每月的月平均带通滤波方差（以下简称滤波方差）。其后所用的经验正交函数（EOF）分解、回归分析以及显著性检验等方法，原理可参见 Storch and Zwiers（1999），不在此赘述。

此外，本文冬、春、夏、秋四季分别包含 12~2 月、3~5 月、6~8 月和 9~11 月。

3 多中心现象与东部型风暴轴的统计特征

傅刚等（2009）研究北太平风暴轴三维结构时，发现无论冬夏季，位势高度方差、扰动动能、向极的热量输送在各个层次都存在“多中心”现象，且这种“多中心”现象在夏季更加明显，但其多中心仅为图中直观观察，没有进行客观统计。下面，我们以 500 hPa 位势高度滤波方差场作为代表，对 1957 年 12 月~2001 年 11 月期间 44 年 528 个月北太平洋区域（ $30^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$ ， $120^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{W}$ ）月平均风暴轴的多中心数目以及最强中心位置进行客观统计。其中，每月月平均风暴轴的多中心数目和最强中心位置的定义为：该区域每月滤波方差最大值中心所在的经纬度即为该月风暴轴最强中心的位置；而该区域每月滤波方差次大值达到当月最强中心值的三分之一以上，且有独立的闭合中心，则记为该区域该月风暴轴存在一个次大值中心，多中心

数目即为次大值中心累计数目加上 1（最强中心）。

3.1 多中心现象的统计结果

表 1 给出了 1957 年 12 月~2001 年 11 月期间 44 年 528 个月北太平洋区域（ $30^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$ ， $120^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{W}$ ）月平均风暴轴的多中心数目的统计结果。由表 1 可以看出，在总数 528 个月中，有 500 个月出现两个及两个以上的中心，其中出现 2~3 个中心的月数有 312 个，这表明，“多中心”现象确实普遍存在，概率高达 94.7%，而且最典型的分布形势就是存在 2~3 个中心。从季节来看，春季是最容易出现“多中心”现象的季节，秋季和冬季相对较少，而 4 个及 4 个以上的“多中心”现象则更容易出现在夏季。进一步分析表明，每月的多中心数还存在着强烈的年际变化，但除个别月份外，其长期变化趋势并不显著（图略）。

表 1 1957 年 12 月~2001 年 11 月北太平洋区域（ $30^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$ ， $120^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{W}$ ）500 hPa 位势高度滤波方差多中心数目逐月统计结果

Table 1 The statistics result of numbers for maxima of 500-hPa geopotential height variance over the North Pacific Ocean ($30^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$ ， $120^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{W}$) through Dec 1957 to Nov 2001

	中心数=1 的月数	中心数=2 的月数	中心数=3 的月数	中心数 ≥ 4 的月数	合计
12 月	3	16	14	11	44
1 月	1	11	10	22	44
2 月	1	12	17	14	44
3 月	3	8	18	15	44
4 月	0	6	23	15	44
5 月	0	7	18	19	44
6 月	2	9	11	22	44
7 月	2	8	12	22	44
8 月	6	11	15	12	44
9 月	3	14	15	12	44
10 月	3	11	17	13	44
11 月	4	13	16	11	44
合计	28	126	186	188	528

3.2 东部型风暴轴的统计结果

图 1 为 1957 年 12 月~2001 年 11 月北太平洋 500 hPa 位势高度滤波方差最强中心的逐月位置。根据风暴轴最强中心的落点位置，我们还从东西方向上，将北太平洋地区分为西部（ $120^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{E}$ ）、中部（ $160^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{W}$ ）和东部（ $160^\circ\text{W} \sim 120^\circ\text{W}$ ）三个区域，分别统计了风暴轴最强中心落在这三个

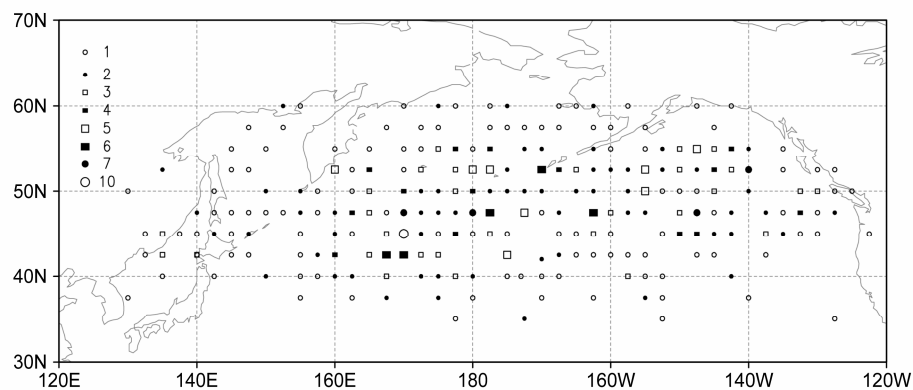


图1 1957年12月~2001年11月北太平洋500 hPa位势高度滤波方差最强中心的逐月位置图(图中不同符号代表出现的次数)

Fig. 1 The monthly position of maximum value of 500-hPa geopotential height variance over the North Pacific Ocean through Dec 1957 to Nov 2001 (Different marks represent occurrence times)

区域的月数(表2)。如图1和表2显示,虽然,风暴轴最强中心的气候平均位置位于日界线以西附近(朱伟军和李莹,2010),但在总数528个月中,有63个月位于西部(120°E~160°E),295个月位于中部(160°E~160°W),即只有358个月(约68%)位于160°W以西,其余170个月(约32%)则位于160°W以东,东西振荡十分显著,这一比率与李莹等(2010)对44年冬季平均的统计结果基本一致;同时,最强中心偏西时,平均位置偏南,最强中心偏东时,平均位置偏北,南北振荡也十分明显。

表2 1957年12月~2001年11月北太平洋区域(30°N~60°N, 120°E~120°W) 500 hPa位势高度滤波方差最强中心位置逐月统计结果

Table 2 The statistics result of position for maximum value of 500-hPa geopotential height variance over the North Pacific Ocean (30°N~60°N, 120°E~120°W) through Dec 1957 to Nov 2001

	位于 120°E~ 160°E 的月数	位于 160°E~ 160°W 的月数	位于 160°W~ 120°W 的月数	合计
12月	6	27	11	44
1月	9	25	10	44
2月	7	27	10	44
3月	6	26	12	44
4月	2	26	16	44
5月	1	24	19	44
6月	5	25	14	44
7月	4	19	21	44
8月	6	22	17	44
9月	3	28	13	44
10月	7	23	14	44
11月	7	23	14	44
合计	63	295	170	528

本文把最强中心出现在160°W以东地区时的整个风暴轴分布结构定义为东部型风暴轴,此时整个太平洋风暴轴(120°E~120°W)呈东强西弱分布。由表2显示,从月份上来看,7月相对最容易出现东部型风暴轴(21/44),1月和2月最难(10/44);从季节上来看,夏季相对最容易出现东部型风暴轴(52/132),冬季最难(31/132)。进一步考察发现(图略),当风暴轴最强中心位于160°W以东时,由于西边的强度一般也不弱,甚至相当,因而多出现“多中心”现象;同时,东部型风暴轴出现的频次及其强度还存在着显著的年际变化。

4 风暴轴的垂直结构

根据上节中表2的统计结果,在1957年12月~2001年11月的44年里,冬季和夏季总共分别有31和52个月出现东部型风暴轴。本节我们将分别对这31和52个月求平均,用以代表冬、夏两季的气候平均状况,并同样从东西方向上,将北太平洋地区分为西部(120°E~160°E)、中部(160°E~160°W)和东部(160°W~120°W)三个区域,重点考察东部型风暴轴所对应的各瞬变量在冬、夏两季和不同区域平均时的纬向—垂直结构。图2~6分别给出了冬夏两季以上三个区域平均的东部型风暴轴所对应的天气尺度位势高度方差 $\overline{z'^2}$ 、扰动动能 $(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/2$ 、动量输送 $\overline{u'v'}$ 、向极热量输送 $\overline{v'T'}$ 和向上热量输送 $\overline{\omega'T'}$ 的纬向—垂直分布。值得注意的是,与以往研究的不同之处在于(如Lau, 1978, 1979; Trenberth, 1981; Blackmon, et al., 1984a, 1984b; Hoskins and Valdes, 1990),这里我们单独挑出了东部型风暴轴来求季节平均,当然为

了对比,我们也计算了不单独挑出东部型风暴轴来求季节平均(132个月)的结果,但限于篇幅和不重复以往研究之虑,在此从略。

通过对比发现,是否单独挑出东部型风暴轴来求季节平均的纬向—垂直结构特征是有些异同的。其中,相似点为:天气尺度涡动的位势高度方差(图2)、扰动动能(图3)的最大值以及涡动西风动量通量的最强辐合(图4)都出现在对流层上部300~200 hPa层附近,而涡动向极(图5)和向上(图6)的热量通量最大值则位于对流层低层850~700 hPa层附近;并且,在北太平洋中、西部(图2~6中的a、d和b、e),上述量位置偏南,而在北太平洋东部(图2~6中的c、f),上述量位置偏北;在冬季(图2~6中的a~c),上述量位置偏南,而在夏季(图2~6中的d~f),上述量位置偏北。

不同点为:无论冬夏,东部型风暴轴所揭示的天气尺度涡动的位势高度方差(图2)和扰动动能(图3)的最大值在北太平洋东部地区最强,而涡动西风动量通量的最强辐合(图4)以及涡动向极(图5)和向上(图6)的热量通量最大值则在北太平洋中部地区最强,但不单独挑出东部型风暴轴

来求季节平均的结果显示,这些量的最大值都是一致对应在北太平洋中部地区最强。

研究表明(如 Lau, 1978, 1979; Hoskins and Valdes, 1990; Chang et al., 2002),斜压性的强弱对风暴轴的维持和发展起到了至关重要的作用,如果不单独挑出东部型风暴轴来求季节平均的话,那么在北太平洋中部地区,由于斜压性最强,因而与斜压性密切联系的涡动向极和向上热量通量最强,进而风暴轴的强度也最强;而在北太平洋160°W以东地区,由于斜压性较弱,一般认为是风暴轴衰亡的地区,因而涡动向极和向上热量通量也较弱,进而强度也较弱(图略)。现在,东部型风暴轴的结果显示,在北太平洋160°W以东地区,风暴轴的强度(天气尺度位势高度方差和扰动动能)可以最强,但与斜压性密切联系的涡动向极和向上热量通量的最大值却并不是最强,因此,是何原因可以导致该地区出现风暴轴最强中心或东部型风暴轴,机理有待进一步诊断研究。

5 风暴轴的 EOF 分析特征

目前,利用经验正交函数(EOF)分解方法来

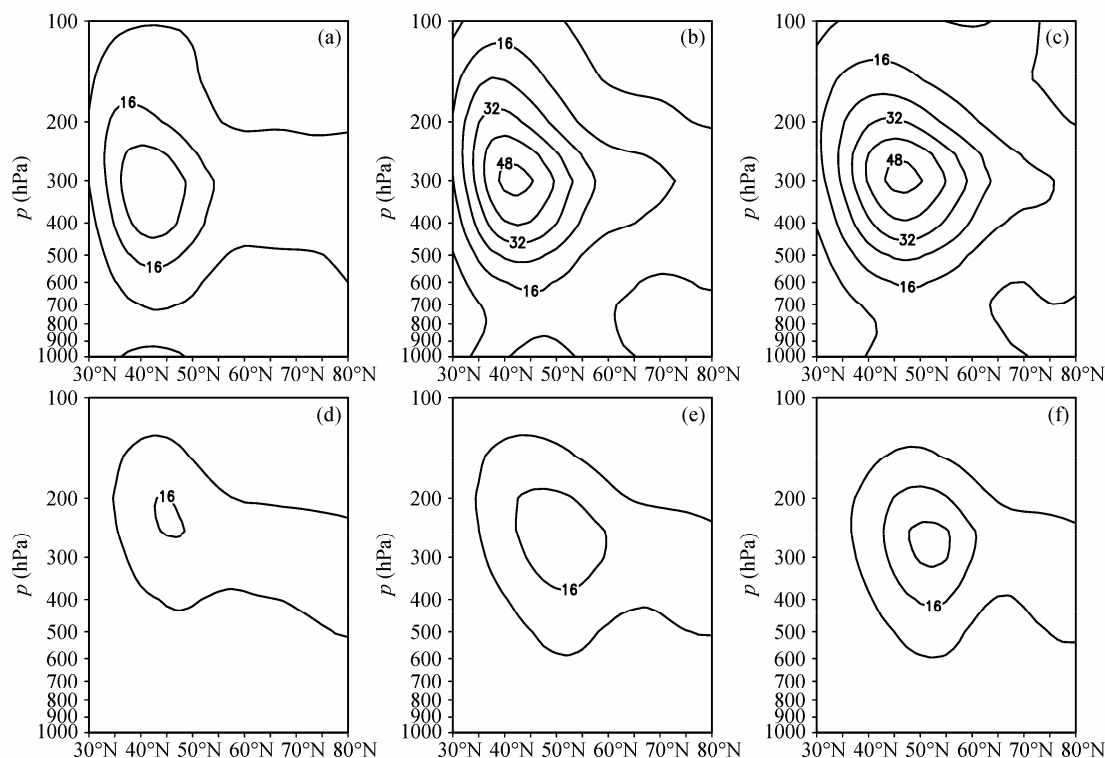
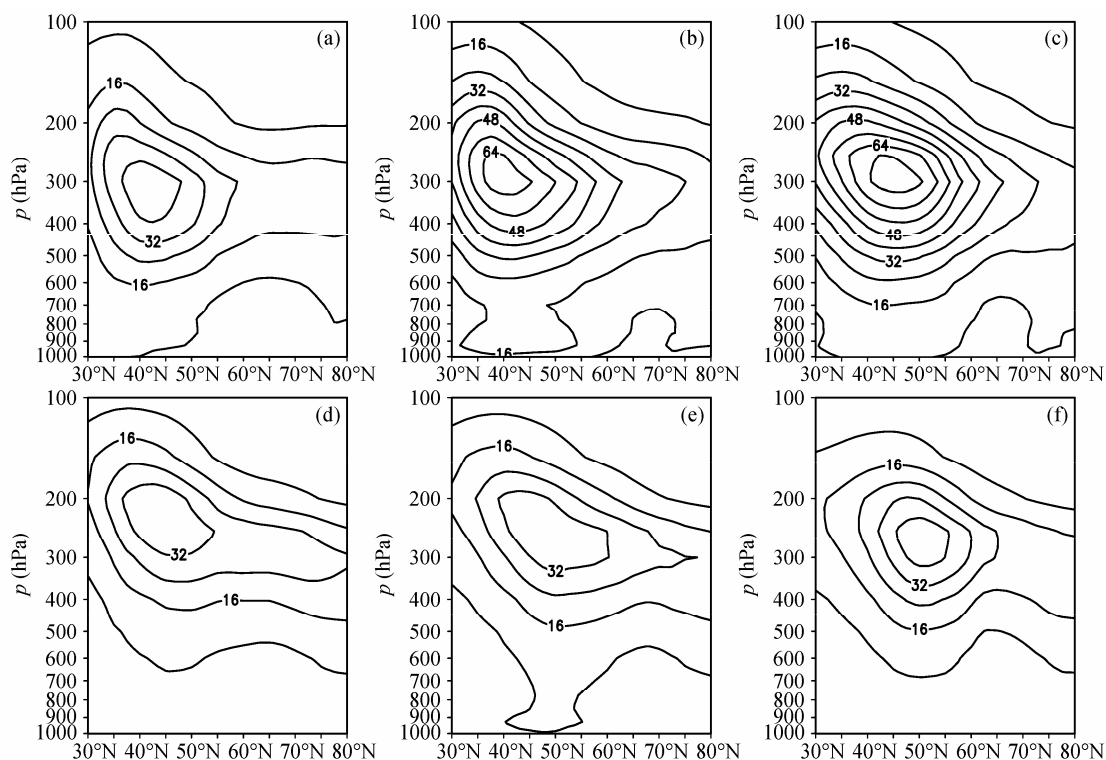
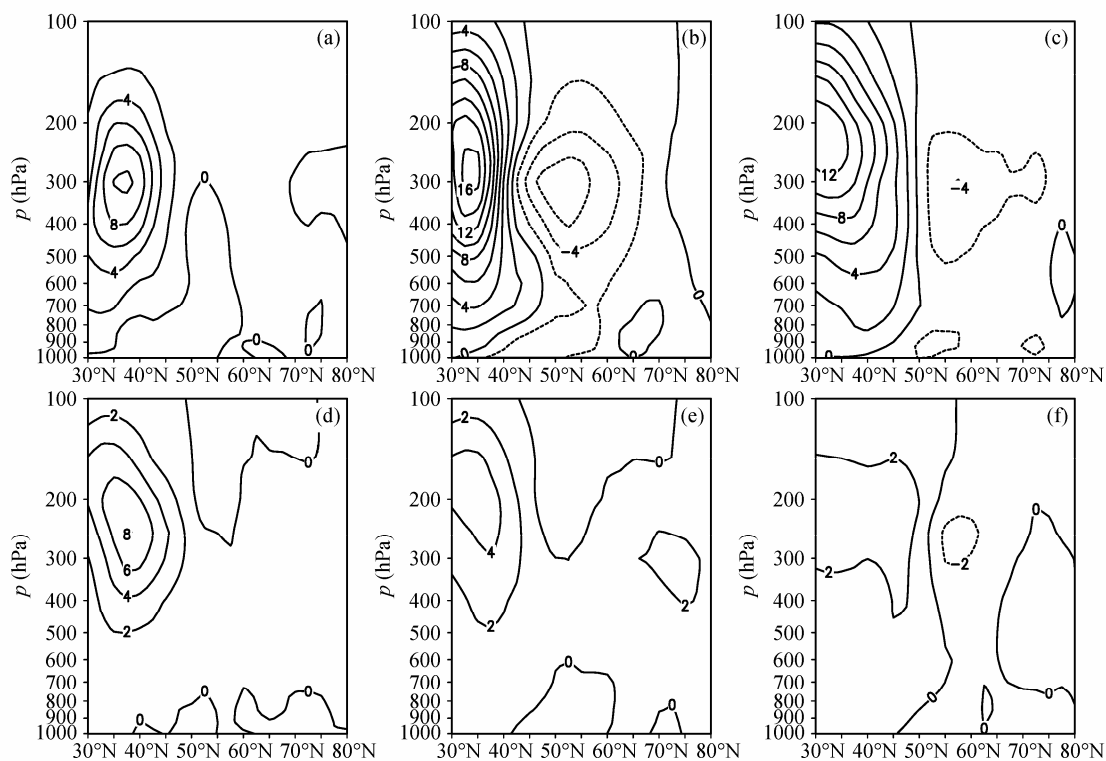


图2 1957~2001年气候平均的北太平洋西部(a、d)、中部(b、e)以及东部(c、f)区域平均的天气尺度位势高度滤波方差的纬度—高度剖面图:(a~c)冬季;(d~f)夏季。等值线间隔:8.0 dagpm²

Fig. 2 Pressure-latitude cross sections of climatologically and regionally mean synoptic geopotential height variance over (a, d) western, (b, e) central, and (c, f) eastern North Pacific storm track during 1957–2001: (a–c) Winter; (d–f) summer. Contour interval: 8.0 dagpm²

图3 同图2, 但为扰动动能, 等值线间隔: $8.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ Fig. 3 Same as Fig. 2, but for disturbed kinetic energy at contour interval of $8.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 图4 同图2, 但为动量输送, 等值线间隔: $2.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ Fig. 4 Same as Fig. 2, but for momentum transport at contour interval of $2.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$

研究风暴轴之变化的研究虽然已有很多 (如 Lau, 1988; 朱伟军和孙照渤, 2000; Wettstein and Wallace,

2010; 朱伟军和李莹, 2010), 但基本上都是针对整体的风暴轴来进行的。而由第3节的讨论结果显

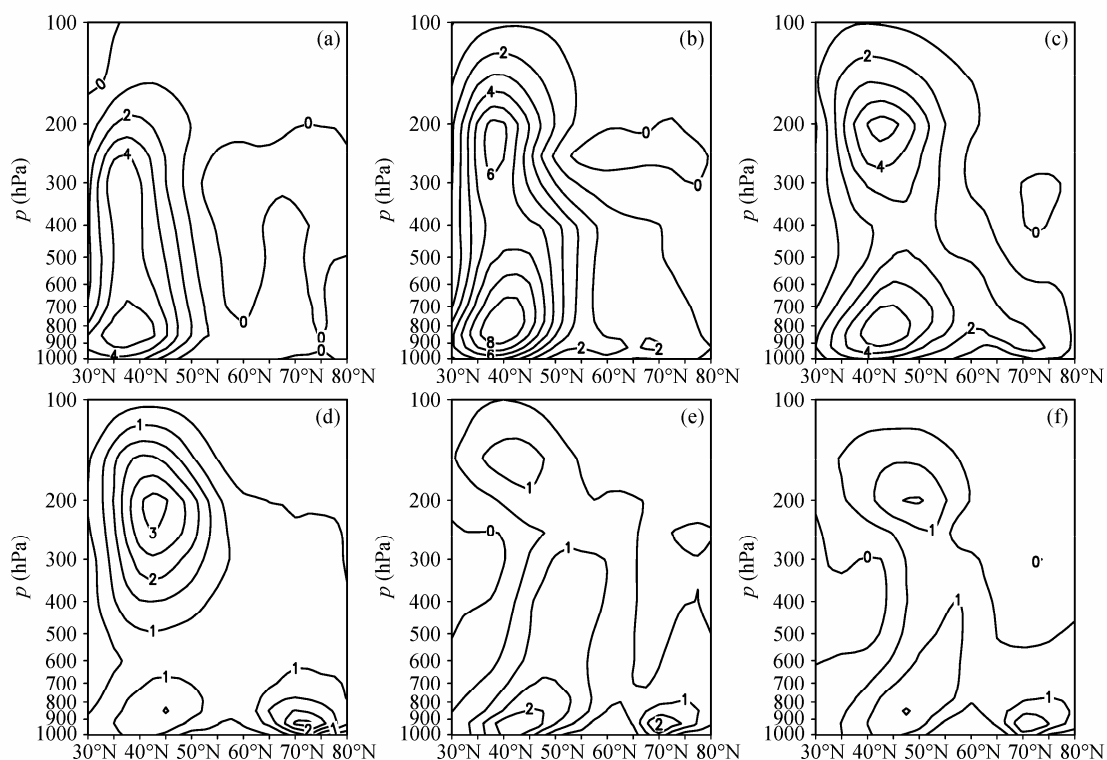


图5 同图2, 但为向极热量输送, 等值线间隔: 1.0 (a-c) 和 0.5 (d-f) K m s^{-1}

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for meridional heat transport at contour intervals of (a-c) 1.0 and (d-f) 0.5 K m s^{-1}

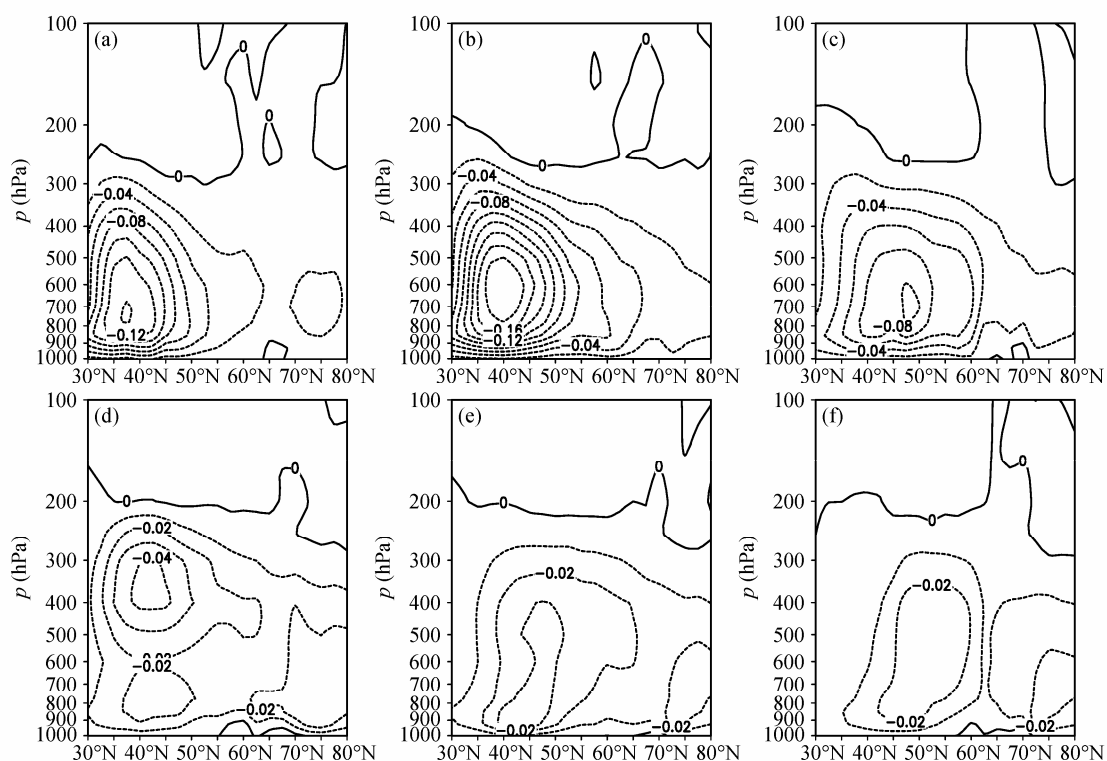


图6 同图2, 但为向上热量输送, 等值线间隔: 0.02 (a-c) 和 0.01 (d-f) K Pa s^{-1}

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for vertical heat transport at contour intervals of (a-c) 0.02 and (d-f) 0.01 K Pa s^{-1}

示, 北太平洋风暴轴在水平结构上是有差异的, 特别是在其东部区域, 风暴轴有 1/3 概率可以出现最

强中心, 因此, 能否可以通过对比不同区域的 EOF 结果来揭示一些新的事实正是本节讨论的目的。

下面,我们以 500 hPa 位势高度滤波方差场作为代表来对北太平洋风暴轴进行 EOF 分析。考虑到风暴轴的东西摆动和季节南北跳跃以及对比需要,本文 EOF 分解的区域为:北太平洋地区西部(30°N~60°N, 120°E~160°E)、中部(30°N~60°N, 160°E~160°W)、东部(30°N~60°N, 160°W~120°W)和整体(30°N~60°N, 120°E~120°W)四个区域;时间为:1957 年 12 月~2001 年 11 月 44 年的冬季(132 个月)和夏季(132 个月),此时没有单独强调东部型风暴轴;1957 年 12 月~2001 年 11 月 44 年里出现东部型风暴轴的冬季(31 个月)和夏季(52 个月),此时仅单独强调了东部型风暴轴。

表 3 和表 4 分别给出了冬季和夏季 EOF 分解的前三个模态的解释方差,因为前两个模态已解释了大部分的方差,所以后文的讨论仅限于前两个模态。图 7~9(图 10~12)则给出了冬季(夏季) EOF 结果的前两个模态分布及其对应的时间系数以及回归结果,图中阴影区分别对应了各自时间段气候平均的风暴轴位置。

表 3 冬季北太平洋各区域风暴轴 EOF 展开的前三个模态的解释方差(其中括号内外的数据分别对应于有无单独强调东部型风暴轴的结果)

Table 3 Explained variance of the first three EOF modes over different areas of the North Pacific storm track during winter (Values in/out of the brackets indicate the situation with/without only considering of the eastern type of storm tracks)

	西部	中部	东部	整体
第一模态	48.7%(44%)	47.8%(42.1%)	35.1%(36.9%)	30.4%(33.3%)
第二模态	16.5%(21.3%)	20.1%(23.5%)	21%(25.5%)	14.6%(17.3%)
第三模态	8.9%(9.2%)	8.3%(7.9%)	12%(10%)	10.2%(11.7%)

5.1 冬季状况

下面先来考察冬季状况(图 7、8)。在没有单独强调东部型风暴轴的情况下,EOF 结果的第一模态反映出北太平洋风暴轴在西部(图 7a1)、中部(图 7a2)和整体(图 7a4)三个区域的空间变化分布几乎一致,即在各自的气候平均位置处一致增强或减弱;而在东部区域,第一模态则表现为风暴轴在气候平均位置南北相反的偶极子变化型(图 7a3)。与此相反,EOF 结果的第二模态虽也反映出风暴轴在西部(图 8a1)、中部(图 8a2)和整体(图 8a4)三个区域的空间变化分布几乎一致,但却是在气候

平均位置南北的反位相变化;而在东部区域,第二模态则表现为风暴轴在气候平均位置处(略偏南)一致增强或减弱(图 8a3)。

表 4 夏季北太平洋各区域风暴轴 EOF 展开的前三个模态的解释方差(其中括号内外的数据分别对应于有无单独强调东部型风暴轴的结果)

Table 4 Explained variance of the first three EOF modes over different areas of the North Pacific storm track during summer (Values in/out of the brackets indicate the situation with/without only considering of the eastern type of storm tracks)

	西部	中部	东部	整体
第一模态	37.5%(38.2%)	37%(46.4%)	33.6%(44.5%)	22.3%(37.9%)
第二模态	11.9%(15.1%)	18.3%(17.5%)	13.7%(16.7%)	16.9%(13%)
第三模态	10%(9.9%)	9.1%(7.8%)	12.6%(8.7%)	7.2%(6.7%)

而在仅单独强调东部型风暴轴的情况下,与没有单独强调东部型风暴轴的情况相比,就北太平洋西部、中部和整体三个区域来讲,两者 EOF 分析的结果非常相似,即第一模态反映了风暴轴在各自气候平均位置附近一致增强或减弱的变化(图 7b1、b2、b4),第二模态反映了风暴轴在气候平均位置南北的反位相变化(图 8b1、b2、b4),只是单独考虑东部型风暴轴与否,风暴轴的气候平均位置也有相应的变化而已;而对北太平洋东部区域而言,两者 EOF 分析的结果有所不同,在仅单独强调东部型风暴轴的情况下,第一模态(图 7b3)和第二模(图 8b3)都表现为风暴轴在气候平均位置南北相反的偶极子变化型,但此时第一模态似乎更突出了风暴轴在气候平均位置北面的变化幅度,第二模态则更突出了风暴轴在气候平均位置南面的变化幅度。

图 9 为冬季北太平洋东部区域 EOF 结果的前两个模态所对应的时间系数分别回归到 500 hPa 位势高度滤波方差场的结果。通过对比图 7、图 8 和图 9 可以发现,在冬季,无论单独强调东部型风暴轴与否,北太平洋东部区域 EOF 结果第一模态时间系数的回归分布(图 9a、c)都与相应北太平洋整体区域 EOF 结果的第二模态分布(图 8a4、b4)非常相似,而北太平洋东部区域 EOF 结果第二模态时间系数的回归分布(图 9b、d)则都与相应北太平洋整体区域 EOF 结果的第一模态分布非常相似(图 7a4、b4)。

5.2 夏季状况

下面再来考察夏季状况(图 10、11)。在没有

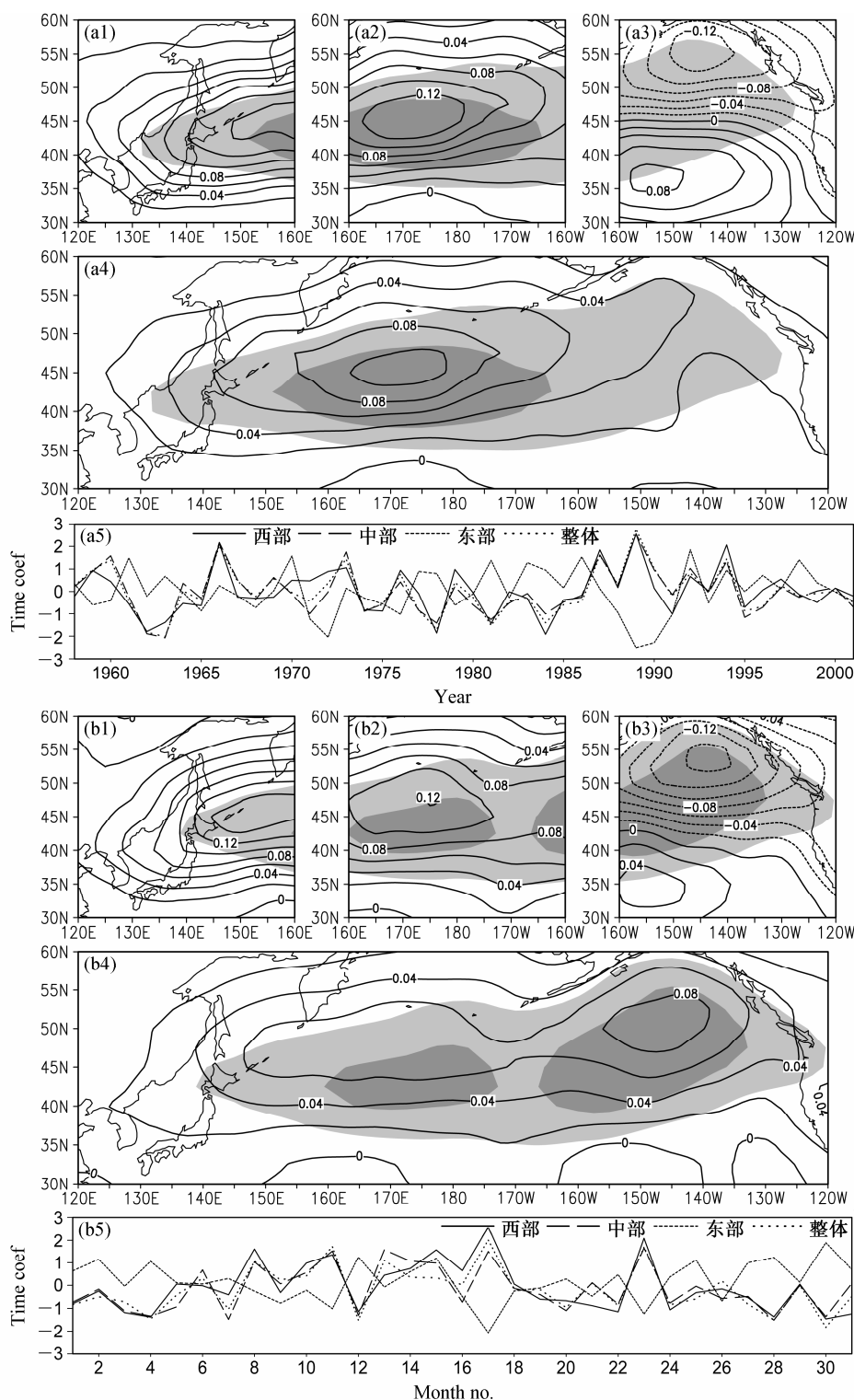


图 7 冬季北太平洋 (a1、b1) 西部、(a2、b2) 中部、(a3、b3) 东部和 (a4、b4) 整体区域 500 hPa 位势高度滤波方差 EOF 展开结果的第一模态及其 (a5、b5) 时间系数: (a1、a2、a3、a4、a5) 无仅单独强调东部型风暴轴; (b1、b2、b3、b4、b5) 仅单独强调东部型风暴轴。阴影区为各区域相应时段气候平均的风暴轴位置, 浅色 (深色) 阴影表示风暴轴强度 > 18 (24) dagpm^2

Fig. 7 The first EOF modes of 500-hPa geopotential height variance over (a1, b1) western, (a2, b2) central, (a3, b3) eastern, and (a4, b4) entire storm track during winter, and (a5, b5) their time coefficients: (a1, a2, a3, a4, a5) Without only considering of the eastern type of storm tracks; (b1, b2, b3, b4, b5) only considering of the eastern type of storm tracks. Shaded area refers to as the climatologically mean position of the relative storm track, with light (dark) shaded areas showing the track intensity larger than 18 (24) dagpm^2

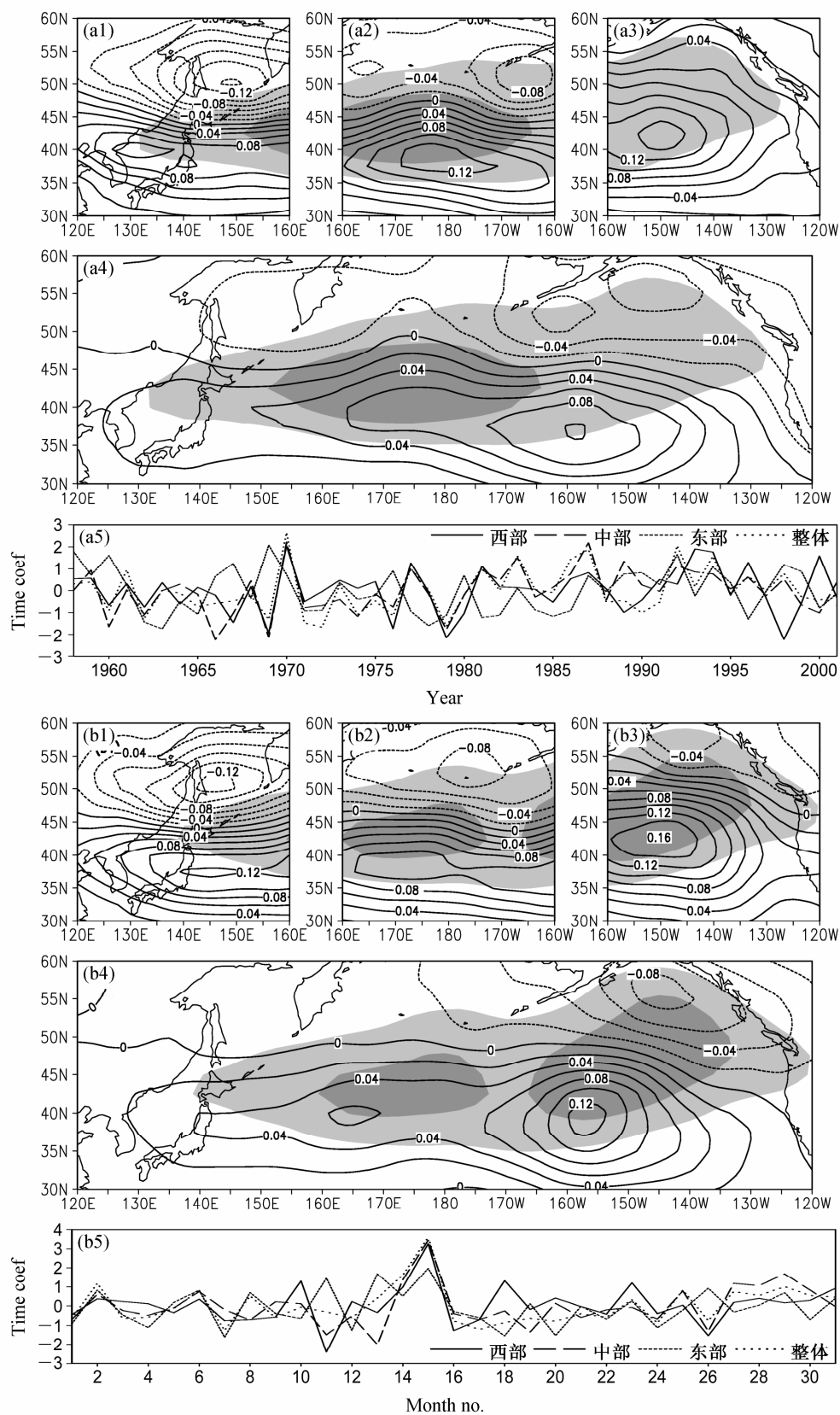


图 8 同图 7, 但为冬季第二模态及其时间系数

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the second modes and their time coefficients during winter

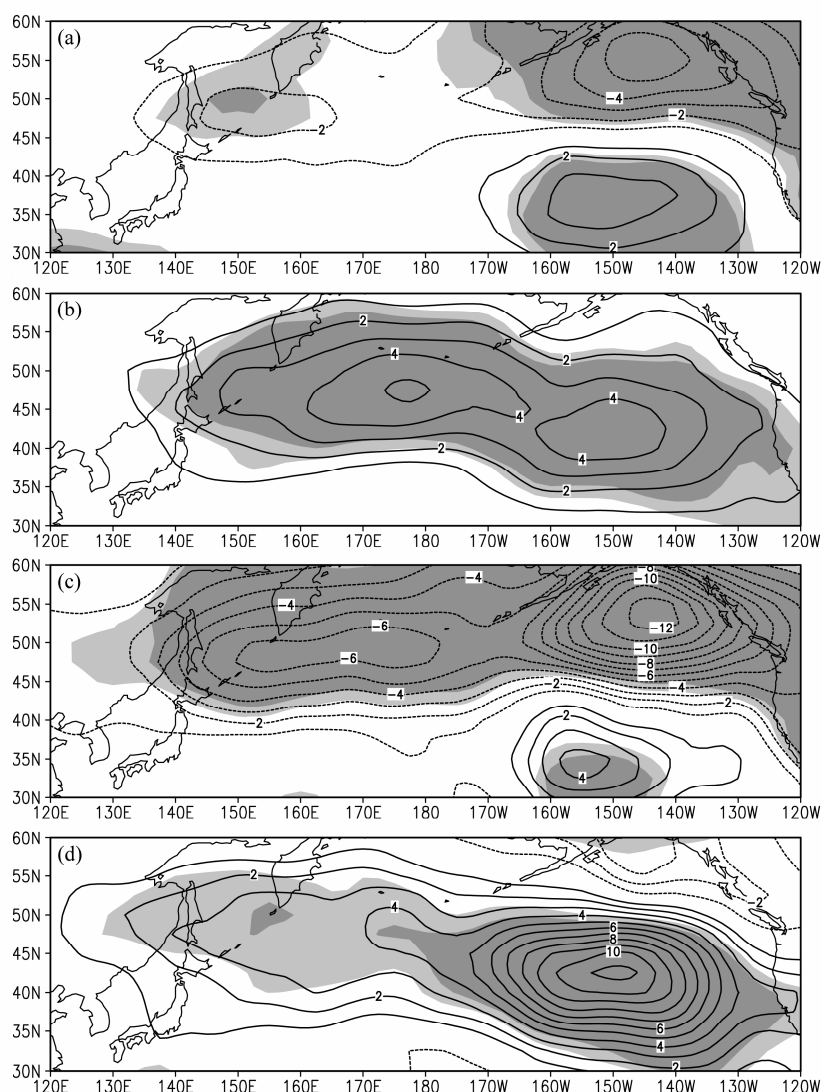


图9 冬季北太平洋东部区域 EOF 结果的第一模态 (a、c) 和第二模态 (b、d) 时间系数回归的 500 hPa 位势高度滤波方差的空间分布。(a、b) 无仅单独强调东部型风暴轴; (c、d) 仅单独强调东部型风暴轴。等值线间隔: 1.0 dagpm^2 ; 浅色(深色)阴影表示通过 95%(99%) 的显著性检验
Fig. 9 Regressions of the time coefficients of the first (a, c) and second (b, d) EOF modes for the eastern Pacific area on the synoptic 500-hPa geopotential height variance during winter (contour interval: 1.0 dagpm^2): (a, b) Without only considering of the eastern type of storm tracks; (c, d) only considering of the eastern type of storm tracks. Light (dark) shading shows correlation values with confidence level larger than 95% (99%)

单独强调东部型风暴轴的情况下, 与冬季情况不同的是, 夏季 EOF 结果的第一模态虽也反映出北太平洋风暴轴在西部(图 10a1)、中部(图 10a2)和整体(图 10a4)三个区域的空间变化分布几乎一致, 但此时反映的是风暴轴在气候平均位置偏西北和偏东南方向的反位相变化, 并且似乎更突出了风暴轴在气候平均位置偏西北方向的变化幅度; 而在东部区域, 第一模态则表现为风暴轴在气候平均位置处(略偏南)一致增强或减弱(图 10a3)。与此相反, EOF 结果的第二模态虽也反映出风暴轴在西部(图 11a1)、中部(图 11a2)和整体(图 11a4)三

个区域的空间变化分布几乎一致, 即在气候平均位置偏西北和偏东南方向的反位相变化, 但此时却似乎更突出了风暴轴在气候平均位置偏东南方向的变化幅度; 而在东部区域, 第二模态则表现为风暴轴在气候平均位置南北的反位相变化(略呈西北—东南向)(图 11a3)。

而在仅单独强调东部型风暴轴的情况下, 夏季北太平洋西部、中部、东部和整体四个区域的 EOF 分析结果非常一致, 即第一模态反映了风暴轴在各自气候平均位置处一致增强或减弱的变化(图 10b1、b2、b3、b4), 第二模态则反映了风暴轴在

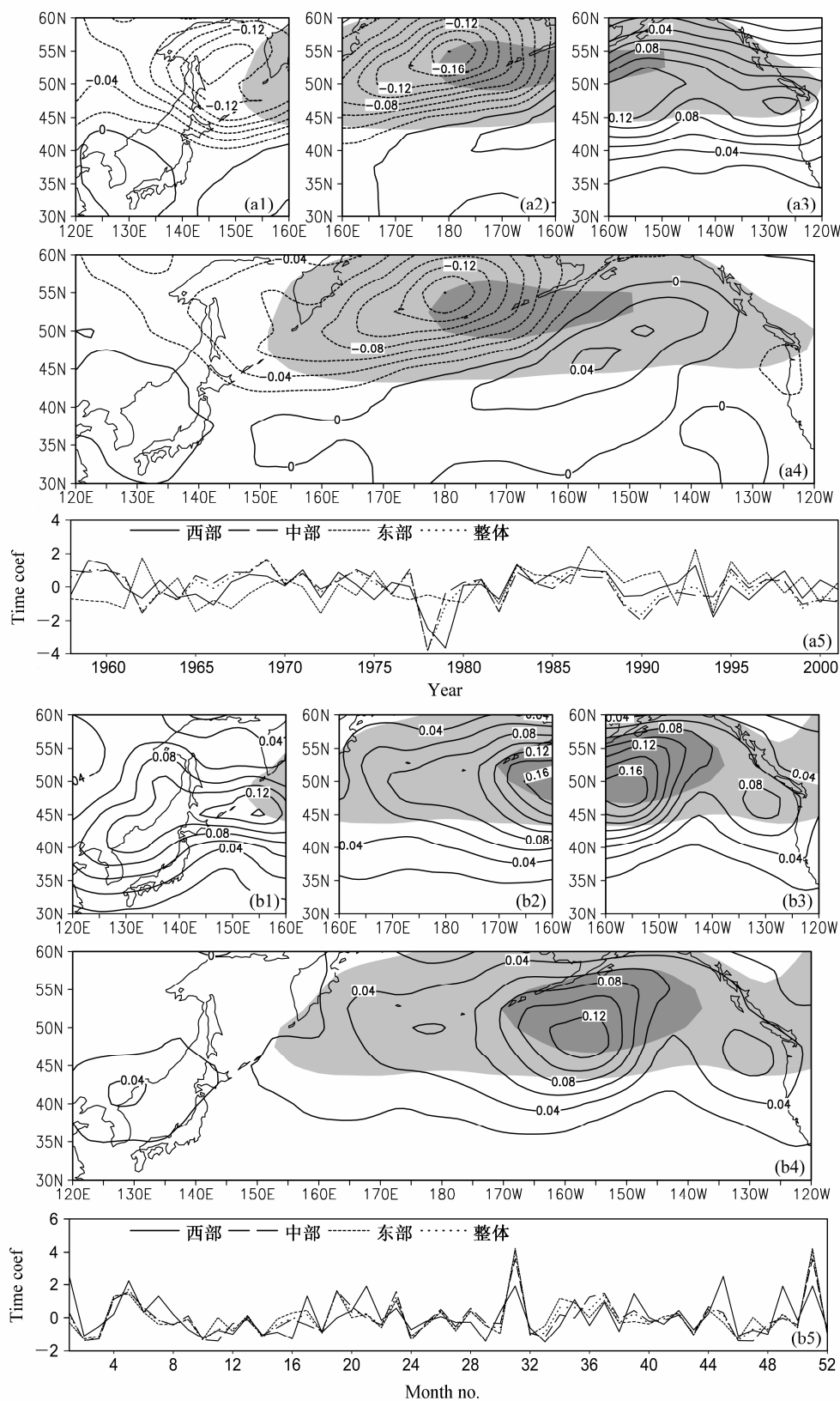


图 10 同图 7, 但为夏季第一模态及其时间系数, 图中浅色 (深色) 阴影表示风暴轴强度 > 6 (10) dagpm²

Fig. 10 Same as Fig. 7, but for the first modes and their time coefficients during summer with light (dark) shaded areas showing the track intensity larger than 6 (10) dagpm²

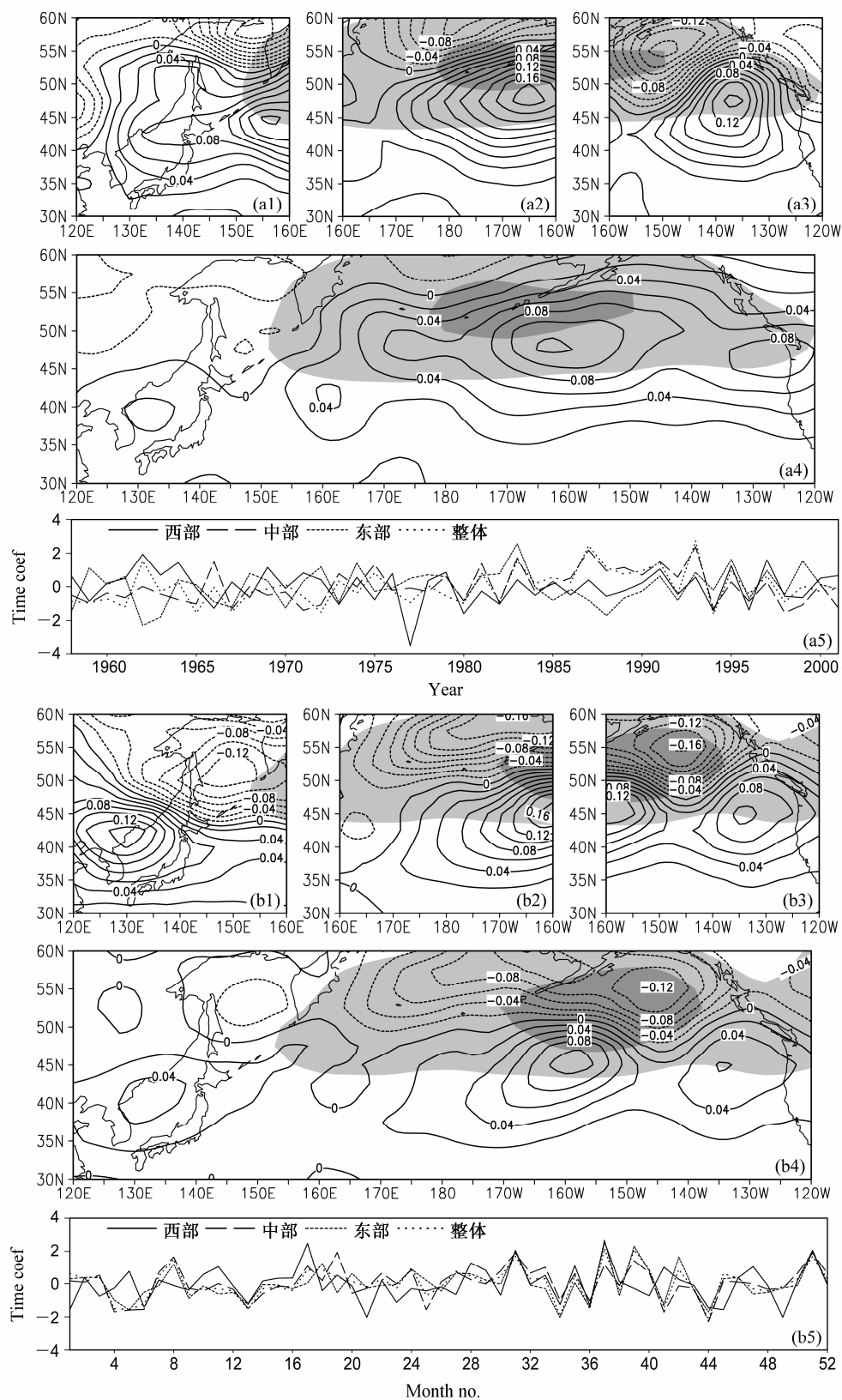


图 11 同图 10, 但为夏季第二模态及其时间系数

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for the second modes and their time coefficients during summer

气候平均位置南北的反位相变化(图 11b1、b2、b3、b4)。

图 12 为夏季北太平洋东部区域 EOF 结果的前两个模态所对应的时间系数分别回归到 500 hPa 位势高度滤波方差场的结果。通过对比图 10、图 11 和图 12 可以发现,与冬季情况相似,夏季在没有单独强调东部型风暴轴的情况下,北太平洋东部区域 EOF 结果第一模态时间系数的回归分布(图 12a)也与相应北太平洋整体区域 EOF 结果的第二模态分布(图 11a4)非常相似,而北太平洋东部区域 EOF 结果第二模态时间系数的回归分布(图 12b)则与相应北太平洋整体区域 EOF 结果的第一模态分布非常相似(图 10a4)。而在单独强调东部型风暴轴的情况下,夏季不再出现模态交叉对应,即北太平洋东部区域 EOF 结果第一模态时间系数的回

归分布(图 12c)与相应北太平洋整体区域 EOF 结果的第一模态分布(图 10b4)非常相似,而北太平洋东部区域 EOF 结果第二模态时间系数的回归分布(图 12d)则与相应北太平洋整体区域 EOF 结果的第二模态分布非常相似(图 11b4)。

以上结果表明,在不同季节、不同区域以及是否单独考虑东部型风暴轴的情况下,北太平洋风暴轴的 EOF 分析结果虽然表现出了一定的差异,但都反映出在北太平洋东部区域风暴轴的变化特征有一些独特特点,如在该区域风暴轴的主要变化模态并不一定时时与其他区域的主要变化模态一一对应。因此,是什么原因导致北太平洋东部区域风暴轴的独特变化?是内部因素(如 Lau, 1978, 1979; Hoskins and Valdes, 1990; Chang et al., 2002; 等)还是外强迫因素(如朱伟军和孙照渤, 2000; 朱伟

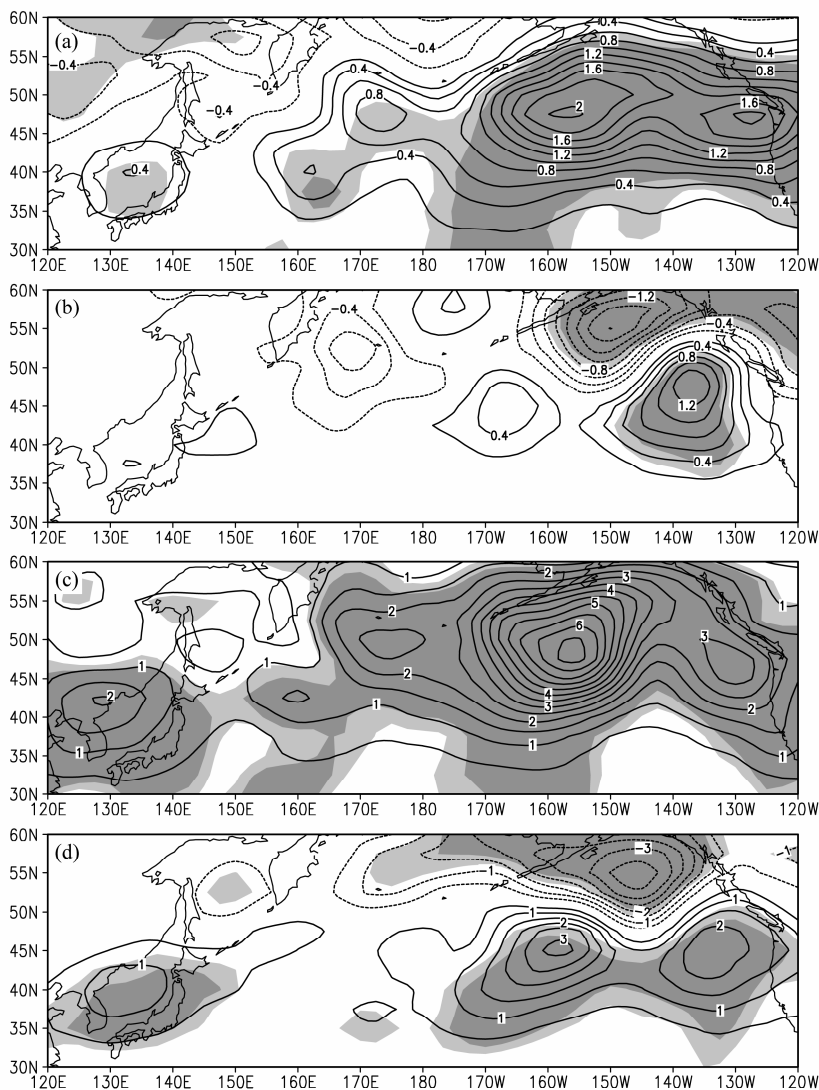


图 12 同图 9, 但为夏季。等值线间隔: (a、b) 0.2 dagpm², (c、d) 0.5 dagpm²

Fig. 12 Same as Fig. 9, but for summer with contour intervals of (a, b) 0.2 and (c, d) 0.5 dagpm²

军和李莹, 2010; 等)? 目前尚不十分清楚, 值得在以后的研究中深入探讨。

6 结论

本文利用 ECMWF 逐日再分析资料(ERA-40), 以 500 hPa 位势高度滤波方差为代表, 对 1957 年 12 月~2001 年 11 月期间 44 年 528 个月北太平洋区域 ($30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 月平均风暴轴的多中心数目和最强中心位置进行了客观统计, 在此基础上, 对北太平洋区域进行了分区, 通过对比各区域风暴轴的时间演变和结构变化, 重点揭示了北太平洋东部地区风暴轴的时空演变特征。主要结论如下:

(1) 逐月来看, 北太平洋风暴轴“多中心”现象普遍存在, 概率高达 94.7%, 最典型的分布呈 2~3 个中心分布。从季节上来看, 春季是“多中心”现象最容易出现季节, 秋季和冬季相对较少, 而 4 个及以上的“多中心”现象则更容易出现在夏季。

(2) 若把最强中心出现在 160°W 以东地区的北太平洋风暴轴定义为东部型风暴轴, 那么从月份上来看, 7 月相对最容易出现东部型风暴轴, 1 月和 2 月最难; 从季节上来看, 夏季相对最容易出现东部型风暴轴, 冬季最难; 总的来看, 出现东部型风暴轴的频数大约占总频数的三分之一。

(3) 按照本文的分区, 从垂直结构上看, 东部型风暴轴的结果显示, 在北太平洋 160°W 以东地区, 风暴轴的强度(天气尺度位势高度方差和扰动动能)可以最强, 但与斜压性密切联系的涡动向极和向上热量通量的最大值却并不是最强。

(4) EOF 分析的结果表明, 在不同季节、不同区域以及是否单独考虑东部型风暴轴的情况下, 风暴轴的变化虽然表现出了一定的差异, 但都反映出在北太平洋东部区域风暴轴的变化特征有其独特特点。具体来讲, 冬季: 在北太平洋风暴轴东部区域, 在没有单独强调东部型风暴轴的情况下, 第一模态表现为风暴轴在气候平均位置南北相反的偶极子变化型, 第二模态表现为风暴轴在气候平均位置处(略偏南)一致增强或减弱, 而在仅单独强调东部型风暴轴的情况下, 第一模态和第二模态都表现为风暴轴在气候平均位置南北相反的偶极子变化型, 但此时第一模态似乎更突出了在气候平均位置北面的变化幅度, 第二模态则更突出了在气候平均位置南面的变化幅度; 与此相反, 无论有无单独

强调东部型风暴轴, 此时在北太平洋风暴轴西部、中部和整体三个区域, 第一模态都一致表现为风暴轴在各自气候平均位置处一致增强或减弱, 第二模态都表现为风暴轴在各自气候平均位置南北的反位相变化。夏季: 在北太平洋风暴轴东部区域, 无论有无单独强调东部型风暴轴, 第一模态都表现为风暴轴在气候平均位置处(略偏南)一致增强或减弱, 第二模态都表现为风暴轴在气候平均位置南北的反位相变化(略呈西北—东南向); 而此时在北太平洋风暴轴西部、中部和整体三个区域, 在仅单独强调东部型风暴轴的情况下, 其 EOF 分析结果与东部区域一致, 而在没有单独强调东部型风暴轴的情况下, 第一模态和第二模态都反映的是风暴轴在气候平均位置偏西北和偏东南方向的反位相变化, 但此时第一模态似乎更突出了在气候平均位置偏西北方向的变化幅度, 而第二模态则似乎更突出了在气候平均位置偏东南方向的变化幅度。

值得指出的是, 本文虽揭示了北太平洋东部风暴轴许多独特的时空演变特征, 但对其成因和机理并没有太多涉及, 这有待于下一步进行深入研究。

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 (8): 1607–1623.
- Blackmon M L, Lee Y H, Wallace J M. 1984a. Horizontal structure of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41 (6): 961–979.
- Blackmon M L, Lee Y H, Wallace J M, et al. 1984b. Time variation of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales as deduced from lag-correlation statistics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41 (6): 981–991.
- 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.
- Chang E K M, Fu Y F. 2002. Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity [J]. *J. Climate*, 15 (6): 642–658.
- Chang E K M, Fu Y F. 2003. Using mean flow change as a proxy to infer interdecadal storm track variability [J]. *J. Climate*, 16 (13): 2178–2196.
- Chang E K M, Lee S, Swanson K L. 2002. Storm track dynamics [J]. *J. Climate*, 15 (16): 2163–2183.
- Compo G P, Sardeshmukh P D. 2004. Storm track predictability on seasonal and decadal scales [J]. *J. Climate*, 17 (19): 3701–3720.
- 邓兴秀, 孙照渤. 1994. 北半球风暴轴的时间演变特征 [J]. *南京气象学院学报*, 17 (2): 165–170. Deng Xingxiu, Sun Zhaobo. 1994. Characteristics of temporal evolution of northern storm tracks [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 17 (2): 165–170.

- 刁一娜, 李建平, 罗德海. 2004. 阻塞流场与瞬变涡动相互作用的动力学研究 [J]. 大气科学, 28 (6): 901–924. Diao Yina, Li Jianping, Luo Dehai. 2004. A dynamic study of the interaction between transient eddies and blocking [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 901–924.
- 丁叶风, 任雪娟, 韩博. 2006. 北太平洋风暴轴的气候特征及其变化的初步研究 [J]. 气象科学, 26 (3): 237–242. Ding Yefeng, Ren Xuejuan, Han Bo. 2006. Primary analysis of the climatic characteristics and variability of the North Pacific storm track [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 26 (3): 237–242.
- 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. Fu Gang, Bi Wei, Guo Jingtian. 2009. Three-dimensional structure of storm track over the North Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (2): 189–200.
- 韩博, 任雪娟, 杨修群. 2007. 北太平洋风暴轴异常变化特征及其与纬向风场的关系研究 [J]. 气象科学, 27 (3): 237–245. Han Bo, Ren Xuejuan, Yang Xiuqun. 2007. Analysis of the North Pacific storm track anomaly and the relationship with zonal wind [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (3): 237–245.
- Held I M, Lyons S W, Nigam S. 1989. Transients and the extratropical response to EL Niño [J]. J. Atmos. Sci., 46: 163–174.
- Hoskins B J, Valdes P J. 1990. On the existence of storm-tracks [J]. J. Atmos. Sci., 47 (15): 1854–1864.
- 胡增臻, 黄荣辉. 1997. 冬季热带西太平洋对流活动异常的年际变化及其对北太平洋风暴轴的影响 [J]. 大气科学, 21 (5): 513–522. Hu Zengzhen, Huang Ronghui. 1997. The interannual variation of the convective activity in the tropical West Pacific in winter and its effect on the storm track in the North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (5): 513–522.
- Huang F, Zhou F X, Qian X D. 2002. Interannual and decadal variability of the North Pacific blocking and its relationship to SST, teleconnection and storm tracks [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (5): 807–820.
- 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 (10): 1900–1923.
- Lau N C. 1979. The structure and energetics of transient disturbances in the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. J. Atmos. Sci., 36 (6): 982–995.
- Lau N C. 1988. Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern [J]. J. Atmos. Sci., 45 (19): 2718–2743.
- 李莹, 朱伟军. 2009. 不同数字滤波方法在风暴轴研究中的性能比较 [J]. 大气科学学报, 32 (4): 565–573. Li Ying, Zhu Weijun. 2009. Performance of different digital filters in storm track study [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 565–573.
- 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 the North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 1001–1010.
- 陆日宇. 2001. 夏季东北亚阻塞形势维持时的天气尺度波 [J]. 大气科学, 25 (3): 289–302. Lu Riyu. 2001. Eddies during the blocking maintenance over the northeastern Asia in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 25 (3): 289–302.
- Nakamura H, Wallace J M. 1990. Observed changes in baroclinic wave activity during the life cycles of low-frequency circulation anomalies [J]. J. Atmos. Sci., 47 (9): 1100–1116.
- Nakamura H, Izumi T, Sampe T. 2002. Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon [J]. J. Climate, 15 (14): 1855–1874.
- Nakamura H, Shompo A. 2004. Seasonal variations in the Southern Hemisphere storm tracks and jet streams as revealed in a reanalysis dataset [J]. J. Climate, 17: 1828–1844.
- Norris J R. 2000. Interannual and interdecadal variability in the storm track, cloudiness, and sea surface temperature over the summertime North Pacific [J]. J. Climate, 13 (2): 422–430.
- 任雪娟, 张耀存. 2007. 冬季 200 hPa 西太平洋急流异常与海表加热和大气瞬变扰动的关系探讨 [J]. 气象学报, 65 (4): 550–560. Ren Xuejuan, Zhang Yaocun. 2007. Association of winter western Pacific jet stream anomalies at 200 hPa with ocean surface heating and atmospheric transient eddies [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (4): 550–560.
- Storch H V, Zwiers F W. 1999. Statistical Analysis in Climate Research [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 484pp.
- Trenberth K E. 1981. Observed Southern Hemisphere eddy statistics at 500 mb: Frequency and spatial dependence [J]. J. Atmos. Sci., 38 (12): 2585–2605.
- Trenberth K E. 1984. Interannual variability of the Southern Hemisphere circulation: Representativeness of the year of the global weather experiment [J]. Mon. Wea. Rev., 43 (1): 108–123.
- 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. 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. 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 (3): 309–320.
- 朱伟军, 李莹. 2010. 冬季北太平洋风暴轴的年代际变化特征及其可能影响机制 [J]. 气象学报, 68 (4): 477–486. Zhu Weijun, Li Ying. 2010. Inter-decadal variation characteristics of winter North Pacific storm tracks and its possible influencing mechanism [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (4): 477–486.