

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.

冬季北太平洋风暴轴指数的评估及其改进

李莹^{1,2} 朱伟军¹ 魏建苏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 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

3 江苏省气象台, 南京 210008

摘 要 首先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, 然后利用 1958~2001 年 44 年冬季 ERA40 位势高度场资料重新评估了几种不同的风暴轴特征指数, 分析得到: 这些不同的定义方法在表征风暴轴强度变化方面具有一致性, 但在描述风暴轴的位置变动方面有较大差异。根据冬季北太平洋风暴轴主体的强度和位置变化特征, 提出了一组更为恰当的动态定量的表征方法, 即取北太平洋及其周边区域 (30°N~60°N, 120°E~120°W) 冬季 500 hPa 位势高度天气尺度滤波方差大于 20 dagpm² 的所有格点滤波方差的平均值, 以及满足上述条件所有格点的经度平均和纬度平均分别作为冬季北太平洋风暴轴的强度指数 (NII)、经度指数 (NXI) 和纬度指数 (NYD)。通过比较分析, 证明了新定义的指数更能反映风暴轴实际的变动特征。继而利用新指数分析了冬季北太平洋风暴轴的强度和位置的长期变化, 得到以下结论: 44 年中, 冬季北太平洋风暴轴的强度微弱增加, 且在 1970 年代中期以前北太平洋风暴轴的强度和位置的年代际变化关系复杂; 1970 年代中期以后北太平洋风暴轴的强度和位置的年代际变化具有准协同一致性, 表现为偏弱期位置偏西偏南, 偏强期位置偏东偏北。而且, 这种长期变化与太平洋海气系统成员的低频变化有相关性, 其变化成因是复杂的。

关键词 风暴轴 指数 评估

文章编号 1006-9895 (2010) 05-1001-10

中图分类号 P434

文献标识码 A

Reappraisal and Improvement of Winter Storm Track Indices in the North Pacific

LI Ying^{1,2}, ZHU Weijun¹, and WEI Jiansu³

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

2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008

Abstract Various methods defining the storm track as well as its intensity and location are reviewed and summarized, and each index is reappraised using 44-year (1958–2001) ERA40 geopotential height data in winter. It has been found all these indices are consistent in describing the intensity of storm track, but they are quite different in describing the position. According to the main features of storm track over the North Pacific in winter, using 500-hPa synoptic-scale geopotential height data over the North Pacific and its surrounding areas (30°N–60°N, 120°E–

收稿日期 2009-09-03, 2009-12-11 收修定稿

资助项目 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 CX07B_046z

作者简介 李莹, 女, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事大气环流异常及短期气候预测研究。E-mail: liying2005y@nuist.edu.cn

120°W), a method which better defines the storm track indices is proposed, that is, the values at the grid points with variance greater than 20 dagpm² are averaged as the winter North Pacific storm track intensity index (NII), the average of the longitudes at the grid points is defined as the longitude index (NXI), and the average of the latitudes is defined as the latitude index (NYI). It is proved that the newly defined indices can better reflect the variation of the storm track in this study. It has also revealed that during the period of 1958/1959–2001/2002, the storm track over the North Pacific was slightly strengthened and tended to move southward and westward. The relationship between the strength and location was complicated before the mid-1970s, and it became quasi-consistent after the mid-1970s, with the location northward and eastward in the strong storm track stage, and vice versa. Moreover, such a long-term variation is related to the low-frequency variability of the Pacific sea-air systems, and the causes are sophisticated.

Key words storm track, index, reappraisal

1 引言

大气环流的变化在中纬度地区表现为显著的瞬变扰动,与逐日天气系统的生消与演变相联系。Blackmon (1976) 早在 1970 年代就通过滤波资料发现了这一特点,并将横亘于北半球两大洋上的瞬变方差局地极大值区域定义为风暴轴。从此,揭开了以纬向非对称观点研究大气环流异常变化的序幕。如何定量描述风暴轴的强度和变率一直是风暴轴研究中的重要问题。鉴于风暴轴时空变率的复杂性,用简单的指数去描述如此庞大系统的时空变率是极其困难的,因而也存在着许多不同的观点。

按照流体力学的基本观点,可以将风暴轴的定义方法分作两类:一类是从拉格朗日观点着眼 (Hodges, 1994),通过直接追踪气旋/反气旋的移动来确定其位置和强度,借助气旋/反气旋个例的生消与演变来研究风暴轴的变化;另一类是从欧拉观点着眼 (Blackmon, 1976),利用对流层不同层次、不同变量的天气尺度滤波方差或均方差来研究局地风暴轴的变化。两种方法都能较好地表征风暴轴,各有所长。

(1) 拉格朗日观点能够将气旋和反气旋分别开来作为研究对象。可以利用平均海平面气压 (Hanson et al., 2004) 来定义气旋/反气旋,也可以采用位势高度 (Blender et al., 1997)、涡度 (Hoskins and Hodge, 2002) 等其他变量。但用平均海平面气压和位势高度定义气旋/反气旋时,将会受到大尺度背景环流的影响,不易捕捉到移动较为迅速的系统;而用涡度定义虽然可以很好地避免上述问题,却又包含了许多不必要的噪音 (Sinclair, 1997)。追踪路径的方法也各有差异 (König

et al., 1994; Hoskins and Hodge, 2002): 一般用最低/高中心气压值、单个气旋/反气旋持续的天数、移动速率、加深率等作为描述风暴轴频率变化的依据,以不同时段在不同格点上气旋/反气旋生成或消亡的平均次数以及不同过程中最低/高压出现的平均次数来表征风暴轴的分布,用单位时间 (月、季、年等) 内某个区域内出现的风暴平均次数来研究风暴轴随时间的演变 (Löptien and Ruprecht, 2005; Isabel, 2006)。

(2) 欧拉观点则是以各种变量天气尺度 (2.5~6 天) 滤波方差或者均方差作为风暴轴的表征,这些变量可以是位势高度 (Blackmon, 1976)、也可以是经向风速 (Chang and Fu, 2002) 等其他变量。由于风暴轴具有三维结构特征,它自海平面一直延伸至对流层顶,所以采用不同高度的变量都可以很好地表征风暴轴。滤波的方法也有很多,有 Butterworth 带通滤波器 (Murakami, 1979)、31 点带通滤波器 (孙照渤, 1992)、Blackmon 带通滤波器 (Blackmon, 1976)、7 点简易高通滤波器 (Trenberth, 1986) 等,都能起到较好的滤波效果。一般用所选区域天气尺度滤波方差的最高值或固定区域天气尺度滤波方差的平均值表征风暴轴的强度,用所选区域天气尺度滤波方差的最高值所在经纬度表征风暴轴的位置变化,或者直接利用 EOF 分解的前几对模态来解释风暴轴的时空变化 (Lau, 1988; 胡增臻和黄荣辉, 1997; Chang and Fu, 2002)。

相比较而言,对于研究中纬度天气尺度瞬变扰动的问题,欧拉方法更为简洁和实用。该方法不用考虑由于不同的追踪方法 (König et al., 1994; Hoskins and Hodge, 2002) 和不同的空间分辨率 (Blender and Schubert, 2000) 所可能造成的结果

上的差异。可以直接从格点资料出发,运用滤波方法,取天气尺度的滤波方差或均方差表征风暴轴的分布与变率,图像上较为直观,且计算简便,易于统计诊断研究。目前,以欧拉方法为基础表征风暴轴的变化的指数很多,一般利用滤波方差研究风暴轴强度和位置主要采用选取中心点表征、区域平均或是经验正交展开(EOF)方法。邓兴秀和孙照渤(1994)利用风暴轴中心强度及所在位置变化来定义风暴轴的强度和位置指数,研究了北太平洋风暴轴的季节变化,夏季偏弱偏北而冬季偏强偏南。胡增臻和黄荣辉(1997)运用相同的表征方法通过风场资料研究了1980~1989年10个冬季的北太平洋风暴轴的活动,结果表明,风暴轴存在清楚的年际变化,且有线性偏强、偏东、偏北的长期趋势以及2~4年的周期振荡存在。朱伟军等(2000)换用位势高度场资料运用相同方法也得到了类似的结论。本文称此种方法得到的强度指数、经度指数、纬度指数分别为CII、CXI、CYI。也可以采用固定区域的平均值来度量风暴轴的强度,何冬燕和朱伟军(2007)利用该种定义方法分析了1月份风暴轴区域($35^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$)的500 hPa位势高度滤波方差的变化(简称SI)。丁叶风等(2006)采用风暴轴中心以及其四周共9个点的强度平均值来定义风暴轴的强度指数并研究了它们的长期变化,分析得到:1985年前后,风暴轴在整个对流层都发生了年代际尺度上由弱变强的跃变,且夏季趋势强于冬季,由该方法得到的风暴轴强度指数简称为C9I。除此之外,EOF方法也广为被用来表征风暴轴的时空耦合变化:Lau(1988)采用EOF方法研究了北半球19个冬季风暴轴变化与月平均环流变化之间的统计相关关系,指出风暴轴变化的主要模态与同期北半球低频环流变化中的遥相关型相联系。Zhu et al.(2001)运用同样的方法,利用NCEP/NCAR再分析资料对17个冬季风暴轴的变化异常作了诊断分析,指出北太平洋风暴轴的年际变化主要有两个模态,一个是风暴轴在其气候平均位置附近强弱变化的单极子型,另一个是风暴轴在其中东部地区南北位移和强弱变化的偶极子型,分别与PNA(Pacific/North American)和WP(West Pacific)遥相关型相联系。任雪娟等(2007)利用更长时间序列的ECMWF再分析资料也得到了以上结论。Chang and Fu(2002)利用EOF方法对

51年的NCEP/NCAR的300 hPa经向风场进行诊断分析,指出冬季风暴轴存在年代际变化,在1972/1973年间由弱逐渐变强,这种变化与环流的低频变率(如PDO、AO)存在着一定程度的联系,但去除这些低频变率的影响后风暴轴的年代际变化依然存在。综合上述研究成果,将冬季北太平洋风暴轴做EOF分解后第一模态对应的时间系数称为E1I,表征风暴轴的强度变化;第二模态对应的时间系数称为E2I,表征风暴轴的经向位置变化。

以上方法都可以表征风暴轴强度和位置,同时也存在着一定的问题。图1给出的是1958/1959~2001/2002年44年冬季北太平洋500 hPa位势高度天气尺度滤波方差分布。计算数据取自欧洲中期天气预报中心ERA40数据集的位势高度场资料,文中若无特别说明,所用资料均取自ERA40;计算天气尺度滤波方差的滤波器采用孙照渤(1992)介绍的31点带通滤波器,详细计算方法见朱伟军等(2000)。如图1所示,风暴轴表征的天气尺度瞬变涡动主要集中于北太平洋上空的纬向区域,东西横跨近100个经度,南北也有数十度的纬宽,分布形态不规则。仅仅拿风暴轴中心或其周围为数不多的格点的平均值来表征整个北太平洋区域瞬变涡动的变化缺乏足够的代表性。而且,邓兴秀和孙照渤(1994)提出:在有些年份,北太平洋风暴轴会出现断裂现象,同时存在两个中心。如果仅仅用单个中心点作为风暴轴的表征,就无法清楚刻画风暴轴主体的强度和移动特征。另一方面,由各年风暴轴中心位置的分布频率情况(图2)可知,冬季北太平洋风暴轴的中心虽然位于 40°N 气候平均位置附近,但也存在着较大的年际变动,不同年份的中心点中最东位置与最西位置相差80个经度,最北位置与最南位置也有20个纬度的差异。如果仅仅拿一个固定区域的滤波方差来表征风暴轴,划定范围的不同对结果有一定影响,对风暴轴的移动性也有欠考虑。再者,若采用EOF方法来表征风暴轴,虽然可以描述风暴轴的时空共变特征,但将风暴轴的强度和位置变化放在一起考虑的同时,若在较长时间尺度里强度和位置并不是一一对应变化的情况下,难以真实反映风暴轴的长期变化。而且采用EOF方法时,即使取前几个模态也只能表示风暴轴主体的部分信息。因此,有必要综合考虑以上因素,重新建立合适的特征量来描述风暴轴的强度

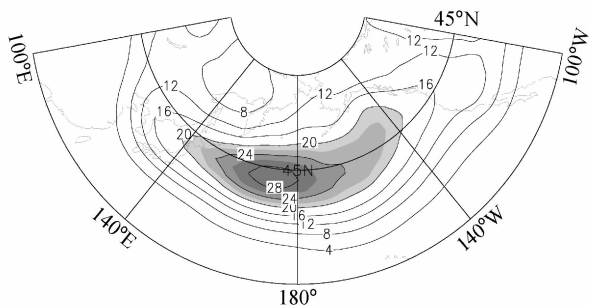


图 1 44 年 (1958/1959~2001/2002) 冬季平均的北太平洋 500 hPa 天气尺度位势高度滤波方差分布 (阴影 ≥ 20 dagpm²)

Fig. 1 44-year (1958/1959 - 2001/2002) winter mean 500 hPa synoptic-scale geopotential height variance over the North Pacific. Shading: ≥ 20 dagpm²

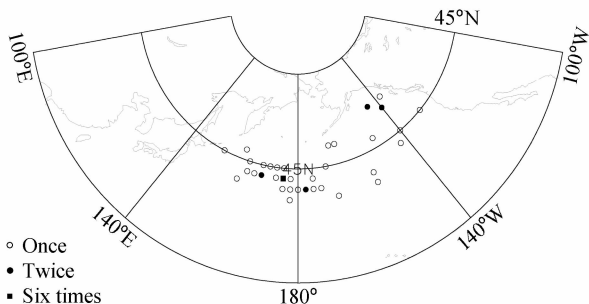


图 2 44 年 (1958/1959~2001/2002) 冬季的 500 hPa 天气尺度位势高度滤波方差最强值频率分布图。空心圆: 1 次; 实心圆: 2 次; 方块: 6 次

Fig. 2 The frequency distribution of the centers of 500-hPa synoptic-scale geopotential height variance over the the North Pacific in 44 years (1958/1959 - 2001/2002)

和位置变化。

由于再分析资料中位势高度场的资料质量较高,按照波动学的观点,等压面上位势高度的变化与地面的气旋/反气旋相对应,有较为清楚的物理意义,且一般认为处于对流层中层的 500 hPa 可以代表整个对流层的平均状况。基于以上考虑,本文在评估前人工作的基础上,结合风暴轴自身变化特点,利用 500 hPa 位势高度天气尺度滤波方差重新定义一个描述风暴轴变率的动态指数,并试图解释这些风暴轴指数之间不一致的原因,从而为进一步分析和讨论风暴轴在不同时间尺度下强度和位置的变化特征提供一个更为合理的依据。

2 风暴轴指数的提出

2.1 各种风暴轴指数的评估

考虑到风暴轴的平均强度和移动特征,取北太

平洋及其周边区域 (30°N~60°N, 120°E~120°W) 冬季 500 hPa 位势高度天气尺度滤波方差大于 20 dagpm² 的所有格点滤波方差的平均值、满足上述条件所有格点的平均经度和平均纬度作为冬季北太平洋风暴轴的强度指数 (NII)、经度指数 (NXI) 和纬度指数 (NYI)。为了分析几种不同风暴轴指数的异同,以下将同时用不同指数 (NII/CII/SI/C9I/E1I、NXI/CXI 和 NYI/CYI/E2I) 分别讨论风暴轴强度和经纬位置的年际、年代际变化以及长期趋势,以期考察它们表征冬季北太平洋风暴轴特征及其变化的能力。

在表征强度方面,五种指数 (NII、CII、C9I、E1I、SI) 是一致的,只在个别年份偏强或偏弱的程度有所差异 (图 3 中仅给出 NII 和 CII)。以上风暴轴强度指数相互之间的相关系数见表 1,除了 C9I 与其它指数相关系数相对略低外,其余指数间的相关系数均高达 0.9 左右,说明以上几种强度指数都可以很好地描述风暴轴的强度变化,但就定义出发点而言, NII 更为合理。

表 1 表征风暴轴强度变化的不同指数之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between various storm track intensity indices

	NII	CII	SI	E1I
C9I	0.43	0.51	0.48	0.46
E1I	0.92	0.92	0.99	
SI	0.89	0.87		
CII	0.94			

图 3 给出的是 44 年 (1958/1959~2001/2002) 冬季北太平洋风暴轴指数的时间演变曲线,平滑曲线为各个指数经过谐波分析后的前五波合成,周期大于 8.8 年,表征其年代际的变化。在表征位置变化方面,两套指数 (NXI/NYI 和 CXI/CYI) 存在较大差异,不仅表现在指数的正负值上,也表现在振幅上。NXI、CXI 表征风暴轴的东西移动,在 44 年中有 12 年表现出偏东、偏西的不一致,分别是 1960/1961、1963/1964、1964/1965、1969/1970、1975/1976、1976/1977、1978/1979、1987/1988、1989/1990、1997/1998、2000/2001、2001/2002 年冬季。NYI、CYI 表征的是风暴轴的南北移动,在 44 年中有 10 年表现出偏南、偏北的不一致,分别是 1958/1959、1963/1964、1964/1965、1966/

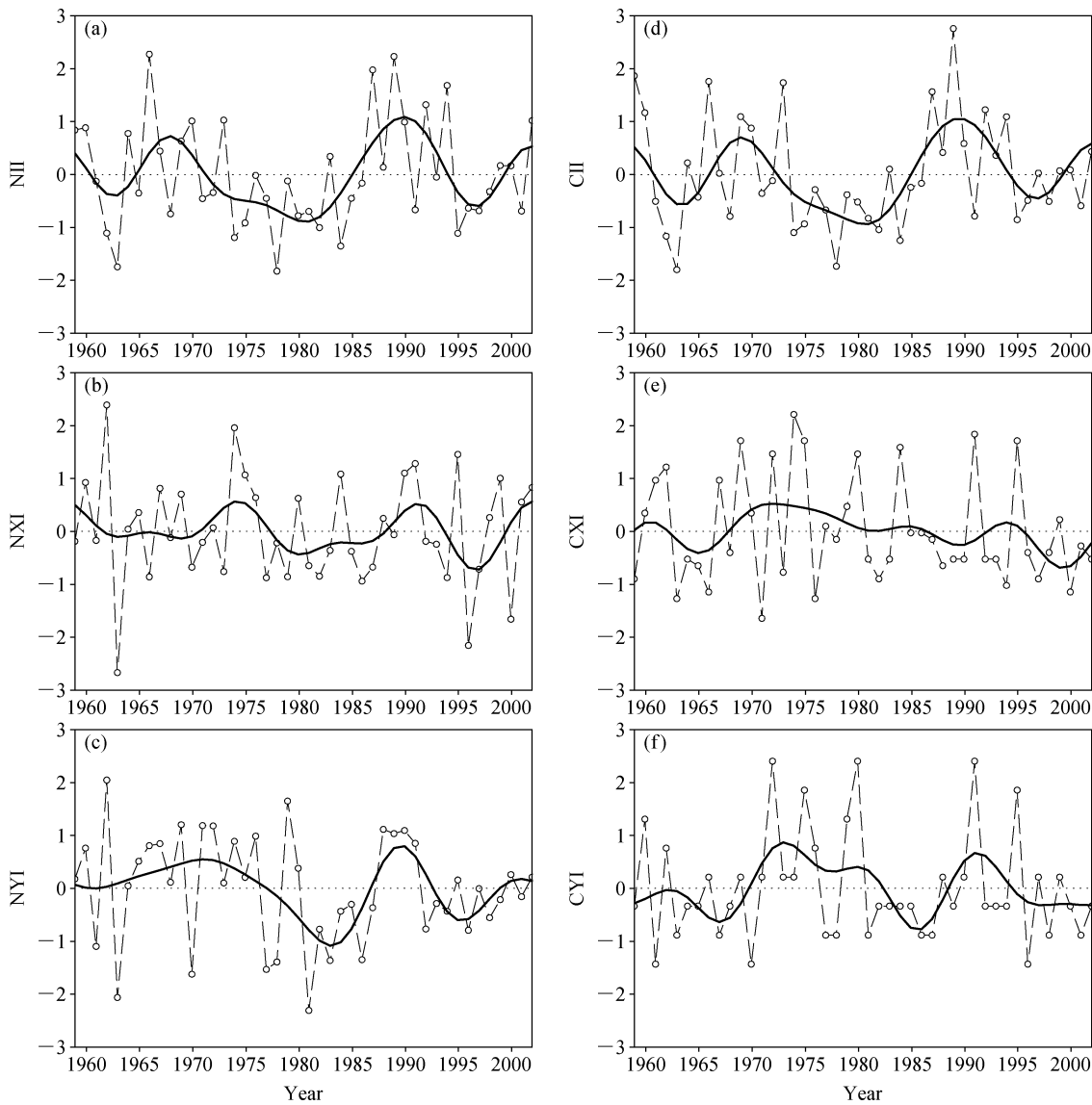


图3 44年(1958/1959~2001/2002)冬季北太平洋风暴轴指数的时间演变曲线(虚线): (a) NII; (b) NXI; (c) NYI; (d) CII; (e) CXI; (f) CYI。粗实线为各自曲线的年代际分量,点线为零线

Fig. 3 Time series of 44-year (1958/1959 – 2001/2002) storm track indices over the North Pacific during winter (dashed lines): (a) New intensity index (NII); (b) new longitude index (NXI); (c) new latitude index (NYI); (d) center intensity index (CII); (e) center longitude index (CXI); (f) center latitude index (CYI). The thick solid line stands for the interdecadal component of each index

1967、1967/1968、1988/1989、1996/1997、1998/1999、1999/2000、2001/2002年冬季。NXI和CXI以及NYI和CYI之间的相关系数分别是0.62和0.61,可以通过显著性水平为0.01的 t 检验,但较之前两组指数中强度指数间的相关系数小,对于描述同一事物的客观量来说,以上两种不同指数定义方法在描述风暴轴的移动特征上存在着不一致。E2I也可以表征风暴轴的经向位置变化,它与NYI和CYI的相关系数分别为0.81和0.56。EOF方

法与新提出的定义方法在描述风暴轴主体强度和位置的南北变化上具有一致性。

表2给出各个指数谐波分析后年际分量(周期小于8.8年)和年代际分量(周期大于8.8年)各占的百分比率以及长期趋势的情况。为简单起见,文中取趋势系数为样本序列(样本数为 n)与自然数序列(1~ n)的相关系数。由表2可知,表示风暴轴强度的五个指数的年际与年代际分量的比都约为2:1,且均没有通过显著性水平为0.05的 F 检

验,无论是年际分量、还是年代际分量都占到了一定的比重,由此说明风暴轴强度的年际和年代际变化都不可忽视。趋势系数均为正值,冬季北太平洋风暴轴有增强的趋势存在,但趋势非常微弱。表 2 中,描述风暴轴位置变化的两组指数年际、年代际分量之间存在较大差异,新定义的指数的年代际分量较大,趋势系数均为负值,定性分析得到:冬季北太平洋风暴轴有西移、南压的倾向存在,但趋势都不明显。无论是风暴轴的强度还是位置,在近 44 年中都没有显著的长期变化趋势。

表 2 风暴轴强度、位置指数的年际分量、年代际分量百分比及趋势系数

Table 2 Interannual and interdecadal components of various storm track indices and their trend coefficients

	年际百分率	年代际百分率	趋势系数
NII	68.1%	31.9%	0.03
CII	66.7%	33.3%	0.01
C9I	63.2%	36.8%	0.05
E1I	67.6%	32.4%	0.10
SI	65.7%	34.3%	0.14
NXI	88.4%	11.6%	-0.05
CXI	90.4%*	9.6%	-0.12
NYI	77.1%	22.9%	-0.13
CYI	80.3%	19.7%	-0.05
E2I	76.1%	23.9%	-0.24

注: * 表示通过显著性水平为 0.05 的 F 检验。

2.2 风暴轴指数差异成因分析

上一节的分析指出,新定义的指数(下面统称 NI)和“中心强度法”定义的指数(下面统称 CI)在表征风暴轴位置上存在着差异。通过逐年北太平洋天气尺度滤波方差分布图对比发现,造成这些差异的主要原因在于气候平均下斜压性较弱的风暴轴出口区(东太平洋区域)天气尺度滤波方差的异常变化。已有的研究指出(Zhu et al., 2001),对于风暴轴这样具有海盆尺度的系统而言,在北太平洋西部会由于强的西边界暖流(黑潮)作用而维持强的斜压性,可以看作是斜压波的播种区,使得风暴轴在大洋西部建立。而赤道中东太平洋区域的海表温度异常(SSTA)会对风暴轴的中、东部地区的强弱变化和位置的南北移动有重要贡献:当赤道中、东太平洋区域正 SSTA 时,使得原本天气尺度扰动较弱的北太平洋风暴轴的中、东端天气尺度扰动增

强,北太平洋风暴轴向东南方向伸展;而当赤道中、东太平洋区域负 SSTA 时,情况相反。风暴轴在其东、西两端的维持机制有所不同,一方面会由于西边界暖流的作用在大洋西部维持,另一方面当赤道中、东太平洋区域的 SSTA 发生异常的时候,又会向东南(北)伸展,这样两方面的作用可能会使风暴轴发生断裂形成双中心,更有些异常年份会使得风暴轴中心完全移至大洋的东部。当风暴轴出现双中心的情况下,只用单个中心来表征风暴轴的整体变化就不具代表性了,而新定义的指数表征的是北太平洋区域上空 500 hPa 位势高度天气尺度瞬变涡动的动态变化,此时就会显现出明显的优势。

下面,取风暴轴双中心个例进行分析。选取 1964/1965 年冬季的风暴轴进行分析,该年赤道中东太平洋区域 SSTA 为负值,是 La Niña 年(龚道溢和王绍武, 1999)。如图 3 所示:在 1964/1965 年冬季,以风暴轴中心点定义的指数(CII、CXI、CYI)表明较气候平均而言,该年冬季北太平洋风暴轴强度偏弱、位置偏西南;而新定义的风暴轴指数(NII、NXI、NYI)表明该年冬季北太平洋风暴轴同样偏弱,但位置较常年偏东北。图 4 给出 1964/1965 年冬季北太平洋天气尺度滤波方差分布(图 4a)和距平图(图 4b),以及该年冬季北半球气旋路径合成分布图(图 4c)。图 4a 中,1964/1965 年冬季北太平洋风暴轴有明显的双中心结构,分别位于日期变更线两侧,一个在风暴轴气候平均位置,而另一个则偏于东北太平洋区域。图 4b 中,北太平洋多数区域为负距平,说明该年风暴轴是偏弱的,两个强度指数在表征风暴轴强度变化上具有一致性;图中存在两个正距平区域,分别位于东北太平洋和风暴轴中心的气候平均位置附近,且前一个正距平区域比后一个异常值大且异常范围也大,表示该年冬季风暴轴较常年整体向东北移动。由此说明,两组指数都可以较好地表征风暴轴的强度变化,但在风暴轴位置变化的表征上 NI 优于 CI。图 4c 还给出了 1964/1965 年冬季的气旋移动路径的分布,该年冬季气旋的移动路径在北半球的确集中于大西洋和太平洋两大洋上,而且在太平洋地区存在着两个气旋活动相对频繁和集中的区域,分别位于日期变更线的东西两侧,位置与图 4a 的大值区相对应。以上说明天气尺度滤波方法表征的风暴轴不仅可以描述天气尺度瞬变涡动的空间分布,也可

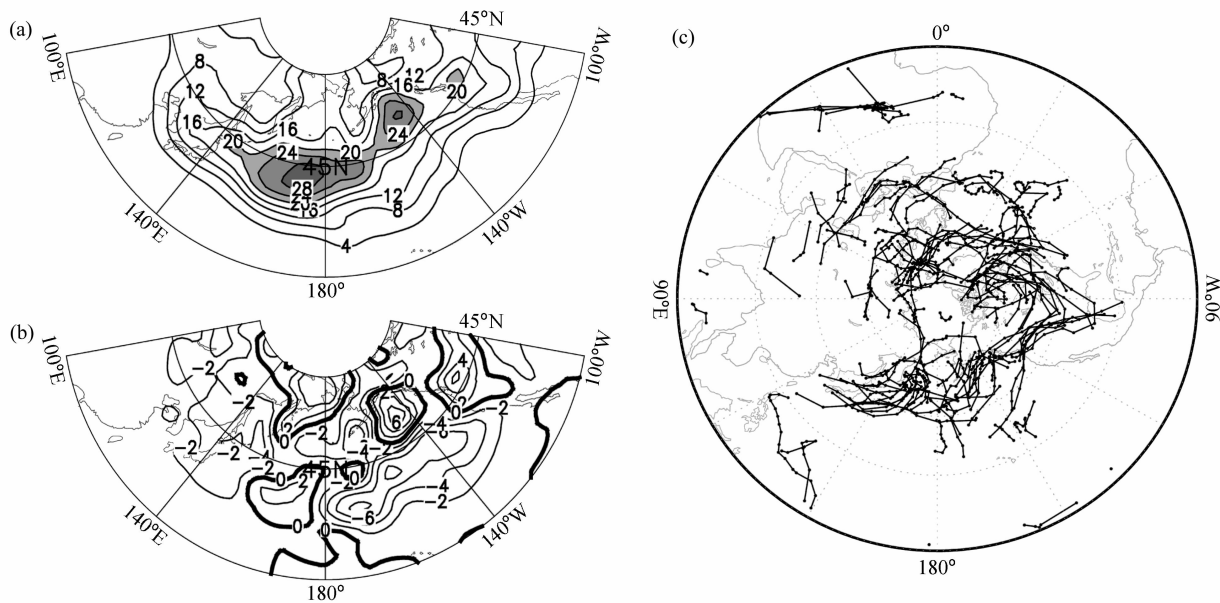


图 4 1964/1965 冬季平均的 500 hPa 天气尺度位势高度滤波方差的 (a) 平均分布和 (b) 距平分布 (单位: dagpm^2) 以及 (c) 气旋移动路径^①
Fig. 4 (a) Average and (b) departures of the 500-hPa synoptic-scale geopotential height variance (units: dagpm^2) and (c) storm tracks during the winter of 1964/1965

以间接描述气旋移动路径的分布情况, 欧拉方法和拉格朗日方法在描述风暴轴的时空变化特征上具有一致性。此外, 对于天气尺度涡动较弱的太平洋东部地区, 在 1964/1965 年冬季也存在着气旋路径相对较为集中的现象, 如果将北太平风暴轴作为一个整体来考虑, 风暴轴在该年的确有向太平洋的东北部地区伸展的现象, 而 NI 的优点就恰恰在此, 刻画出了以往指数所描述不出的风暴轴移动的细节问题。

总的来说, 在表征风暴轴强度变化上各个指数都具有较好的代表性, 且描述趋于一致; 但就表征风暴轴的位置而言, 在长期趋势的描述上, CI 和 NI 有一致性, 均表现出风暴轴有不显著的西移南压变化趋势, 但 NI 更能真实反映冬季北太平洋风暴轴的整体变化特征, 特别是在描述风暴轴移动的细节问题上相对合理。与 CI 相比, NI 反映出冬季北太平洋风暴轴不仅在强度上存在年代际变化, 在位置变动上的年代际变化也不容忽视。

3 新定义指数揭示的北太平洋风暴轴变化特征及其与同期大气环流、海温的关系

3.1 冬季北太平洋风暴轴变化特征

已有研究表明 (Zhang et al., 1997), 在 1970

年代中纬度海气系统发生了一次年代际尺度上的调整。风暴轴作为中纬度海气系统的成员之一, 针对其年代际变化的特点也有不同认识。Chang and Fu (2002) 指出北太平洋风暴轴存在着年代际变化, 且在 1972/1973 年间由弱逐渐变强。丁叶风等 (2006) 认为, 北太平洋风暴轴在 1985 年前后在对流层上下一致发生了年代际的跃变。为了认识风暴轴的强度和位置的长期演变, 有必要结合新定义的指数作进一步细致的分析。图 3a~c 给出冬季北太平洋风暴轴强度指数、经度指数和纬度指数随时间的变化曲线, 平滑曲线表示各指数的周期大于 8.8 年的年代际分量。

图 3a 反映的是冬季北太平洋风暴轴强度指数 44 年随时间的变化。由新定义指数的振幅来看, 风暴轴的强度存在很大的年际差异, 其年代际分量曲线表现出冬季北太平洋风暴轴的强度在 1970 年代之前由弱变强, 有准 10 年的振荡存在, 自 1970 年代初至 1980 年代一直较气候平均强度偏低, 可以看作是冬季北太平洋风暴轴强度变化的位相调整阶段, 在 1985 年前后, 冬季北太平洋风暴轴由偏弱转为偏强, 此后是一个周期为准 10 年的振荡循环。表 1 中冬季北太平洋风暴轴强度指数的趋势系

① 热带外气旋路径图集数据取自美国国家航空航天局 (NOAA)。

数为 0.03, 反映出 44 年间风暴轴的强度增强但趋势不显著。

图 3b 和图 3c 表示冬季北太平洋风暴轴的经度指数和纬度指数 44 年随时间的变化, 反映风暴轴 44 年间的位置变动特征。由 NXI 和 NYI 可知, 冬季北太平洋风暴轴的位置存在较大的年际变动。特别在 1961/1962 年和 1962/1963 年冬季之间, 即使在强度上两年都表现为较常年偏弱, 但在 1961/1962 年冬季北太平洋风暴轴位置偏东北, 而在 1962/1963 年冬季北太平洋风暴轴位置偏西南。在年际变率上, 风暴轴的经向和纬向变化具有准协同一致性: 在 44 年 (1958/1959~2001/2002) 间有 32 年位置偏东偏北 (16 年) 或偏西偏南 (16 年), 风暴轴以西北—东南向为轴线进行东北、西南两侧的振荡。冬季北太平洋风暴轴在东西方向上的年代际变化表现为: 1970 年代以前变化振幅较小, 1970 年代以后有振幅较大的振荡存在, 1970 年代中期以前位置偏东, 1970 年代中期之后的一个年代位置偏西, 此后进入一个周期为准 10 年的振荡循环。冬季北太平洋风暴轴在南北方向上的年代际变化表现为: 以 1970 年代中期为界, 此前冬季北太平洋风暴轴位置偏北, 此后为一个周期为准 10 年的振荡循环。

将 NII、NXI 和 NYI 的年代际分量变化比较可见: 1970 年代中期以前 3 个指数之间的关系较为复杂; 1970 年代中期以后 3 个指数呈同位相变化, 亦即冬季北太平洋风暴轴偏强期位置偏东偏北, 偏弱期位置偏西偏南。

3.2 冬季北太平洋风暴轴的变化与同期大气环流、海温的关系

由前文分析可得, 冬季北太平洋风暴轴存在着年际和年代际变化。这种变化的原因是什么? 是否与同期的大气环流异常和海温的变化存在联系? 基于以上问题, 从新定义的风暴轴指数和太平洋年代际涛动 (PDO, Pacific Decadal Oscillation)^①、北极涛动 (AO, Arctic Oscillation)^②、El Niño 指数 (简称

Niño3.4)^③、黑潮区海温指数 (简称 KSST)^④、PNA 指数和 WP 指数^⑤ 几个能够代表太平洋海气系统及其异常指数的相关系数出发做进一步分析。

表 3 给出的是 NII、NXI、NYI 和上述六个指数间的相关系数。由表 3 可得, 在年际尺度上, 风暴轴的强度变化与局地黑潮区域的海温异常联系紧密, Niño3.4 区的海温强迫同样不容忽视; 在大气中则表现为与 WP 型相联系, 这与 Zhu et al. (2001) 的研究结论是一致的。风暴轴纬向位置的年际变化与大气低频变化的遥相关型 (PNA 和 WP) 存在联系。与风暴轴经向变化相关系数最高的是 PNA, 达到 -0.73, 当 PNA 处于正 (负) 异常时, 风暴轴主体位置偏南 (北)。PDO 与表征风暴轴位置变化的指数 (NXI 和 NYI) 间均存在相关, 当 PDO 处于正 (负) 位相时, 风暴轴主体位置偏西 (东) 偏南 (北)。而 AO 在年际尺度上与风暴轴的异常变化关系不明显。

表 3 表征大气、海洋各种指数与风暴轴强度、位置指数间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between storm track indices and various atmospheric/oceanic indices

指数	NII	NXI	NYI
PDO	0.11	-0.32**	-0.63***
AO	0.17	0.24	0.18
Niño3.4	0.27*	-0.08	-0.24
KSST	0.35**	0.12	0.17
PNA	-0.12	-0.26*	-0.73***
WP	-0.33**	-0.30**	-0.21

注: *, **, ***: 通过显著性水平为 0.1、0.05、0.01 的 *t* 检验。

在年代际尺度上, 以上指数各自年代际分量间的相关系数均较原始序列的高, 但都不能通过严格的显著性水平检验 (表略), 这进一步说明风暴轴的年代际变化可能是多种因子共同作用的结果。选取相关系数较高的两组指数, 将 NYI 和 PDO 指数以及 PNA 指数分别成对给出 (图 5), 图 5 中粗的平滑

① PDO 指数取自 <http://www.atmos.washington.edu>。
② AO 指数取自 <http://www.jisao.washington.edu>。
③ El Niño 指数取 Niño3.4 区 (5°S~5°N, 160°E~90°W) 的海温异常的区域平均。
④ KSST 指数取 (15.5°N~35.5°N, 120.5°E~140.5°E)、(20.5°N~35.5°N, 140.5°E~175.5°E) 海温的区域平均, 该区域海温与冬季风暴轴的异常变化有紧密联系 (Zhu et al., 2001)。
⑤ PNA 和 WP 指数根据 Wallance and Gutzler (1981) 的定义得到。

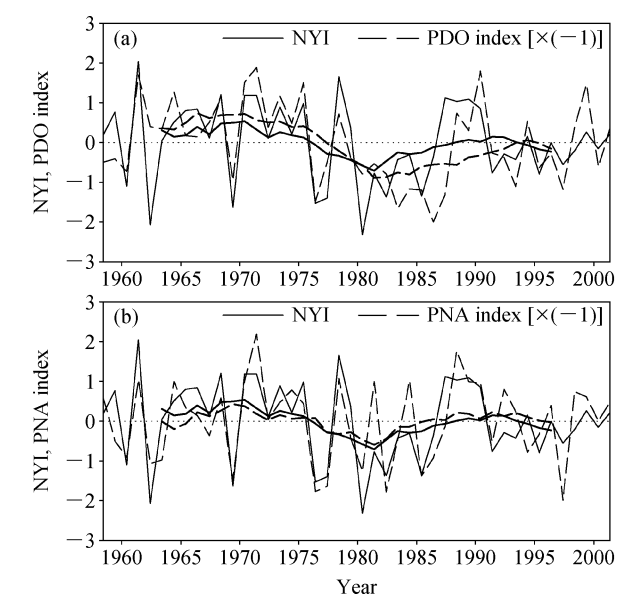


图 5 (a) NYI (细实线) 与 PDO 指数 (细虚线) 的时间演变曲线以及 NYI (粗实线) 与 PDO 指数 (粗虚线) 的 11 点滑动平均曲线; (b) NYI (细实线) 与 PNA 指数 (细虚线) 的时间演变曲线以及 NYI (粗实线) 与 PNA 指数 (粗虚线) 的 11 点滑动平均曲线。点线代表零线

Fig. 5 (a) Time series of NYI (thin solid line) and PDO index (thin dashed line) and their 11-year running means (thick solid/dashed lines); (b) time series of NYI (thin solid line) and PNA index (thin dashed line) and their 11-year running means (thick solid/dashed lines)

曲线为相应各条指数的 11 年滑动平均, 为了方便比较, PDO 指数和 PNA 指数均乘以 -1 。如图 5 所示, 在年代际尺度上, 风暴轴经向位置的变化与 PNA 和 PDO 的位相转换基本一致, 转换的时间均在 1970 年代中期左右。进一步分析其可能影响过程是: 1970 年代中期以前, PDO 处于负位相, 北太平洋中部的海温异常偏高, 而热带中东太平洋和北美西岸的海温异常偏低, 如此的海温异常分布激发 PNA 的负异常响应, 继而引起风场的调整, 大气的斜压性偏北, 使得风暴轴主体位置偏北; 1970 年代中期以后, 情况相反 (图略)。

4 结论

本文主要利用 ERA40 资料对风暴轴指数的多种定义方法进行了评估和比较, 并根据风暴轴的自身特点提出了一种更为恰当的动态定量表征方法。得到以下结论:

(1) 在定义风暴轴指数时, 不仅考虑了风暴轴

的气候平均强度, 也考虑了风暴轴的年际位置变化, 利用格点资料, 取强度超过特定阈值的各点平均强度以及所在经、纬度的平均作为风暴轴强度、位置的表征。新定义的风暴轴指数 (NI) 不仅取法简单、物理意义明确, 又不失代表性。

(2) NI 在描述风暴轴的强度变率方面, 与其它指数是一致的; 在描述风暴轴位置变率方面, 由于 NI 表征的是整个太平洋区域上空 500 hPa 天气尺度位势涡动的动态变化, 比仅用位势瞬变涡动中心作为整个风暴轴表征的 CI 在描述风暴轴位置变化上更具有代表性, 可以更为真实地反映风暴轴主体的变化特征。

(3) 44 年里, 冬季北太平洋风暴轴的强度增加, 整体位置有较不明显的西移和南压的趋势存在。在年代际时间尺度上, 冬季北太平洋风暴轴的强度与位置的变动关系有年代际差异: 在 1970 年代中期以前, 位置与强度之间的关系较为复杂; 在 1970 年代中期以后, 冬季北太平洋风暴轴偏弱期位置偏西偏南, 而偏强期位置偏东偏北。

(4) 描述海气系统变化的 PDO、Niño3.4 区的海温、黑潮区海温、PNA 和 WP 遥相关型与冬季北太平洋风暴轴的变化联系紧密。在年代际尺度上, 风暴轴异常变化的成因复杂。风暴轴经向位置的年代际变化与 PNA 和 PDO 的位相转换基本一致, 它们可能是风暴轴经向年代际异常变化的重要影响因子。

应当指出, 鉴于风暴轴存在显著的季节变化特征, 本文定义的风暴轴指数仅仅是基于冬季北太平洋风暴轴所提出的。在研究其它季节或者其他区域的天气尺度瞬变涡动问题时, 表征风暴轴主体范围的特征线应根据不同具体情况再做选取, 该方法的普适性有待进一步验证。

致谢 感谢审稿专家对本文提出的诸多有益建议!

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.

Blender R, Fraedrich K, Lunkeit F. 1997. Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 123: 727–741.

Blender R, Schubert M. 2000. Cyclone tracking in different spatial and temporal resolutions [J]. Mon. Wea. Rev., 128: 377–384.

- Chang E K M, Fu Y. 2002. Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity [J]. *J. Climate*, 15: 642–658.
- 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.
- 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): 237–243. 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): 237–243.
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 近百年全球温度变化中的 ENSO 分量 [J]. *地球科学进展*, 14 (5): 518–523. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1999. The influence of ENSO on global temperature during the last 100 years [J]. *Advance in Earth Science (in Chinese)*, 14 (5): 518–523.
- Hanson C E, Palutikof J P, Davies T D. 2004. Objective cyclone climatologies of the North Atlantic—A comparison between the ECMWF and NCEP/NCAR reanalyses [J]. *Climate Dyn.*, 22: 757–769.
- Hodges K I. 1994. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 2573–2586.
- Hoskins B J, Hodge K I. 2002. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (1): 1041–1061.
- 何冬燕, 朱伟军. 2007. 冬季鄂霍次克海海冰对北太平洋风暴轴年际变化的影响 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (1): 43–50. He Dongyan, Zhu Weijun. 2007. Influence on northern Pacific storm track of Okhotsk sea ice during winter [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 30 (1): 43–50.
- 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): 513–521.
- Isabel F T. 2006. Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: A comparison between ERA40 and NCEP/NCAR reanalyses [J]. *Climate Dyn.*, 26: 127–143.
- König W, Sausen R, Sielmann F. 1994. Objective identification of cyclones in GCM simulations [J]. *J. Climate*, 6: 2217–2231.
- 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.
- Lóptien U, Ruprecht E. 2005. Effect of synoptic systems on the variability of the North Atlantic Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133: 2894–2904.
- Murakami M. 1979. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 107: 994–1013.
- 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 Journal of Geophysics (in Chinese)*, 50 (1): 92–100.
- Sinclair M R. 1997. Objective identification of cyclones and their circulation, intensity and climatology [J]. *Weather and Forecasting*, 12: 595–612.
- 孙照渤. 1992. 热带外地区大气中 40~60 天振荡的统计特征 [M] // 长期天气预报论文集. 北京: 海洋出版社, 29–35. Sun Zhaobo. 1992. The statistics character of 40–60 day oscillation in atmosphere over extra-tropical area [M] // *The Collected Papers of Long-Range Forecast (in Chinese)*. Beijing: Chinese Ocean Press, 29–35.
- Trenberth K E. 1986. An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen-Palm flux diagnostics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43 (10): 2070–2087.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 784–812.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. *J. Climate*, 10: 1004–1020.
- 朱伟军, 孙照渤, 闵锦忠, 等. 2000. 冬季赤道中东太平洋区域海表温度异常对北太平洋风暴轴年际变化的影响 [J]. *热带气象学报*, 16 (1): 91–96. Zhu Weijun, Sun Zhaobo, Min Jinzhong, et al. 2000. Influence on northern Pacific storm track of equatorial central and eastern Pacific SSTA during winter [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 16 (1): 91–96.
- Zhu Weijun, Sun Zhaobo, Zhou Bing. 2001. The impact of Pacific SSTA on the interannual variability of northern Pacific storm track during winter [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (5): 1029–1042.