

张颖娴, 丁一汇, 李巧萍. 2012. 北半球温带气旋活动和风暴路径的年代际变化 [J]. 大气科学, 36 (5): 912–928, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11158. Zhang Yingxian, Ding Yihui, Li Qiaoping. 2012. Interdecadal variations of extratropical cyclone activities and storm tracks in the Northern Hemisphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 912–928.

北半球温带气旋活动和风暴路径的年代际变化

张颖娴^{1,2,3} 丁一汇³ 李巧萍³

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

3 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 基于欧洲中心再分析数据 ERA40 的海平面气压场和高度场, 本文分别采用拉格朗日和欧拉方法研究分析了 1958~2001 年北半球的不同季节温带气旋活动和风暴路径的年代际变化, 以及可能的原因。以客观判定和追踪温带气旋为基础的拉格朗日方法得到了北半球的两个温带气旋主要活动中心, 即北太平洋地区和北大西洋/北美地区, 同时以 500 hPa 位势高度天气尺度滤波方差为基础的欧拉方法得到了同主要气旋活动中心相吻合的两条风暴轴。研究表明, 44 年中北大西洋/北美地区温带气旋活动北移加强, 以春季最为显著。风暴轴也同样存在着向极移动并加强的特征, 并且温带气旋和风暴路径两者移动趋势的相关性很高。作为一个典型地区, 北大西洋/北美地区的气旋活动体现了风暴路径的北移, 以及温带地区向极地的扩展。但有意思的是北太平洋的情况完全不同, 即北太平洋地区的温带气旋活动和风暴轴向低纬度偏移并加强, 以春季的南移趋势最为显著。对于此结论, 两种方法也有很高的统计相关性。虽然大量研究表明北半球整体上呈现出风暴路径北移的变化特征, 但对于具体地区情况有明显差异。另外, 400 hPa 最大 Eady 增长率和气旋活动频率的经验正交展开函数 (EOF) 第一模态的空间分布和时间序列非常相似, 北太平洋地区和北大西洋地区风暴路径相反的变化趋势很可能同其大气斜压性的同位相的变化有着密切的关系。这也从另一个方面支持了本文对温带气旋和风暴路径年代际变化的分析。

关键词 温带气旋 客观判定和追踪方法 风暴轴 最大 Eady 增长率

文章编号 1006-9895(2012)05-0912-17

中图分类号 P447

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11158

Interdecadal Variations of Extratropical Cyclone Activities and Storm Tracks in the Northern Hemisphere

ZHANG Yingxian^{1,2,3}, DING Yihui³, and LI Qiaoping³

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Interdecadal variations of extratropical cyclone activities and storm tracks in different seasons for the years of 1958–2001 in the Northern Hemisphere, as well as the possible reasons, are analyzed by applying the Lagrange and Euler methods to the sea-level pressure and height fields from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis data ERA40. With the Lagrange method based on detecting and tracking extratropical cyclones, two main cyclone activity centers are got, i.e., the North Pacific and the North Atlantic/North America. At the same time, with the Euler method based on the synoptic scale variance for 500 hPa geopotential height, two storm tracks are obtained, which

收稿日期 2011-09-07, 2012-04-01 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB950404、2010CB428606, 国家科技支撑计划课题 2009BAC51B01

作者简介 张颖娴, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化及温带气旋方面的研究。E-mail: zhangyingxian0829@163.com

are in accordance with two main cyclone activity centers. The result shows that extratropical cyclones in the region of the North Atlantic/North America in the 44 years moved northward and intensified, especially in spring. Also, there was a feature with a poleward shift and increasing strength for the storm track. High correlation was observed between the movements of extratropical cyclones and the storm track. The North Atlantic/North America is a typical region, where cyclone activities reflected the northward movement of the storm track and the poleward expansion of temperate zone. However, it is interesting to find that the situation in the North Pacific is just the opposite, i.e., extratropical cyclones and the storm track migrated to the lower latitudes with enhanced intensity, especially in spring. For this conclusion, two methods are also statistically correlated. The storm track over the whole Northern Hemisphere had a poleward shift by some studies, but obvious differences were found in specific areas. Besides, the space distributions and time series of the first empirical orthogonal function (EOF) mode of the maximum Eady growth rate and cyclone activity frequency are similar. There may be a close relationship between the opposite trends of storm tracks in the North Pacific and the North Atlantic and the same phase variations of atmospheric baroclinity. This also can, on the other hand, support the analysis of interdecadal variations about extratropical cyclones and storm paths in this paper.

Key words extratropical cyclones, objective detecting and tracking method, storm tracks, maximum Eady growth rate

1 引言

长期以来, 科学家们研究发现移动的天气尺度的低压和高压系统构成了中高纬度地区大部分的日常天气变化。这些天气系统通过传输热量, 动能和水汽在大气环流中起着重要的作用, 其位置和强度是科学家们了解天气气候变化的一个重要课题。通常来说我们将更易产生瞬变天气现象或风暴(如气旋)的地区称为风暴路径或风暴轴。对于风暴路径的研究, 主要有两个基本方法, 一种方法是通过识别并追踪单个天气系统(如气旋), 从而统计其强度、发生频率或路径密度的分布来表征风暴轴的位置和强度, 即拉格朗日方法(Hoskins and Hodges, 2002); 另一种方法是基于不同大气层的局地天气尺度相关频带的滤波方差, 即欧拉方法(Blackmon, 1976; Blackmon et al., 1977)。虽然两种方法殊途同归, 但各有优缺点。

带通滤波方法的优点在于它可以研究各大气层的情况, 提供给我们风暴路径的三维结构。这种方法避免了由于追踪方法或数据空间分辨率不同所造成的结果上的差异(Blender and Schubert, 2000), 并且可以直接从格点资料出发, 图像上较为直观, 计算简便, 易于统计诊断研究(李莹等, 2010)。然而, 这种欧拉方法很难告诉我们构成风暴路径的天气系统的类型以及大部分的风暴特性。另外一种拉格朗日方法被称为特征追踪分析方法, 现在的特征追踪分析方法不再是人工分析天气图, 而是基于计算机的自动化的更客观的数值算法(Murray and Simmonds, 1991a, 1991b; Lefevre and Nielsen-Gammon, 1995; Sinclair, 1994; Blender et al., 1997;

Serreze et al., 1997; Hodges, 1994, 1995, 1996)。这种客观的判定和追踪方法可以为我们提供天气系统自身的一些补充信息, 并且允许我们根据不同的风暴类型来研究风暴活动, 其中通过客观判定和追踪温带气旋更常被用于风暴强度及风暴路径的研究中(Lambert, 1988; Alpert et al., 1990; Serreze, 1995)。

20世纪80年代中期以来, 科学家主要用海平面气压场(Lionello et al., 2002; Mendes et al., 2009)、位势高度场(Haak and Ulbrich, 1996; Blender et al., 1997)和对流层低层的涡度场(Sinclair, 1994; Hodges, 1996)来客观判定和追踪温带气旋。研究发现特征追踪分析方法也有不足的地方, 例如海平面气压场常受到诸如冰岛低压等大空间尺度系统的影响, 并且快速移动的弱系统也会被副热带急流等强的背景气流所掩盖, 直至其强烈发展时才能够被客观判定和追踪到, 因此基于海平面气压场所客观判定和追踪的温带气旋更倾向于移动较慢的大尺度低压系统(Hoskins and Hodges, 2002)。基于高度场来判定和追踪温带气旋同样会有这些问题, 因为它也受到大空间尺度系统的控制。相比海平面气压场和高度场来说, 涡度场是最不受大尺度系统影响的, 因为涡度更侧重于小尺度低压涡旋系统, 这些系统常会出现在气旋生命期的早期阶段。但是高分辨率的涡度场又包含较多的噪声, 诸如锋面等结构可能被分解(Hoskins and Hodges, 2002), 因此采用涡度来追踪温带气旋时, 常常需要做许多平滑和降低分辨率的工作。

近几十年来, 不少研究都表明北半球风暴路径存在北移的变化趋势。其中, McCabe et al. (2001)

认为1950年代末以后北半球冬季(11~3月)气旋频数在高纬度增加,而在中纬度明显减少,这意味着风暴路径有向极偏移的趋势,而全球变暖很可能是造成温带气旋频数和强度变化的主要原因。Yin (2005)用15个耦合气候模式集合的结果计算得到至21世纪末风暴路径仍继续向极地偏移,并伴随着热带对流层顶的抬高,对流层温度的升高和中纬度斜压区向高层扩展。基于以上的分析可以看到,风暴路径向极地偏移是半球甚至是全球的整体趋势,但具体地区,不同季节是否具备这一变化特征还有待具体分析。因此,本文将利用海平面气压场和高度场的再分析数据,尝试分别采用拉格朗日和欧拉方法研究不同季节北半球两大洋地区(北太平洋和北大西洋)温带气旋活动和风暴路径的位置和强度的年代际变化,以及两种方法的相关性,重点分析两大风暴路径是否都具有同整个北半球一致或相似的变化特征,并初步探讨风暴路径位置和强度变化的可能原因。

2 数据和方法

2.1 数据

本研究基于欧洲中期预报中心(ECMWF)1958~2001年的间隔6小时的再分析海平面气压场数据和高度场数据(ERA40, $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 水平分辨率)。

2.2 风暴轴的定义

研究者通常采用位势高度(Blackmon, 1976; 朱伟军等, 2000; 朱伟军和孙照渤, 2001; 朱伟军和李莹, 2010)或经向风速(Chang and Fu, 2002)等变量的天气尺度(2.5~6天)滤波方差或者均方差来表征风暴轴,其中常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,用天气尺度滤波方差的最高值的经纬度来表征风暴轴的位置。另外,胡增臻和黄荣辉(1997)直接利用各变量经验正交展开函数(EOF)的前几对模态来解释风暴轴的时空变化。李莹等(2010)根据北太平洋风暴主体的强度和位置变化,提出了一组更为恰当的动态定量的表征方法,即取500 hPa高度场天气尺度滤波方差大于一定阈值的所有格点滤波方差的平均值以及满足条件所有格点的纬度平均作为北太平风暴轴的强度指数和纬度指数。本文将采用这种描述风暴轴位置和强度的方法,并把它同样地应用在北太平洋地区和北大西洋/北美地区以及四个不同的季节。图1表

明北半球500 hPa高度场天气尺度滤波方差的大小随季节而变,夏季的天气尺度滤波方差要远远小于其他三个季节,冬季的天气尺度滤波方差最大。因此,我们这里确定四季500 hPa高度场天气尺度滤波方差的阈值分别为18 dagpm²(春季, 3~5月)、8 dagpm²(夏季, 6~8月)、20 dagpm²(秋季, 9~11月)和20 dagpm²(冬季, 12~2月),四个季节的风暴轴即图1中的点区。

2.3 温带气旋的客观判定和追踪方法

本研究基于海平面气压场的局地最小值来客观判定和追踪温带气旋,方法在本质上以Murray and Simmonds (1991a, 1991b)和Pinto et al. (2005)的客观方法为基础,即将局地气压最小值作为闭合温带气旋的中心,并结合局地引导气流和气旋自身移动外推来追踪每次的温带气旋过程。具体描述就是,首先确定气压拉普拉斯最大值的所在位置,然后在其周围搜索可能存在的气压局地最小值为闭合的温带气旋的中心。设定高度和强度阈值,剔除不满足条件的气旋系统。温带气旋的追踪主要是结合其自身移动外推和引导气流对其移动的影响来估计气旋的移动路径(Simmonds et al., 1999),然后在估计的气旋移动位置周围搜索与其相关最大的真实存在的气旋作为气旋移动的真实路径,这里我们选取的权重系数体现了气旋自身移动外推对其真实移动路径的影响大于引导气流的影响。若搜索不到真实存在的气旋系统则该系统消亡,所有未被追踪的客观存在的气旋系统都定义为新生成的气旋。以上追踪的气旋过程包括所有生命期的气旋过程,本研究只讨论生命期至少1天的气旋活动,这样的考虑在一定程度上排除了陆地上局地的季节性热低压(Wang et al., 2009)。

为了更简单,这里只判定和追踪了闭合的温带气旋系统,没有考虑开放的气旋系统,并且为了最大限度地排除热带气旋和局地热低压,增加了一些限定和剔除工作。在追踪气旋的过程中,存在很小部分向西移动超过5°经度的虚假的气旋过程。锋面气旋的移动均沿着对流层(500 hPa或700 hPa)气流的方向移动(朱乾根等, 2000),而对流层的气流基本上都是偏西气流,因此我们剔除了向西移动超过5°经度的气旋过程。另外,本研究将追踪的气旋过程分为非移动性气旋(气旋生命期内移动的距离在5°经度以内)和移动性气旋(非移动性气旋之外

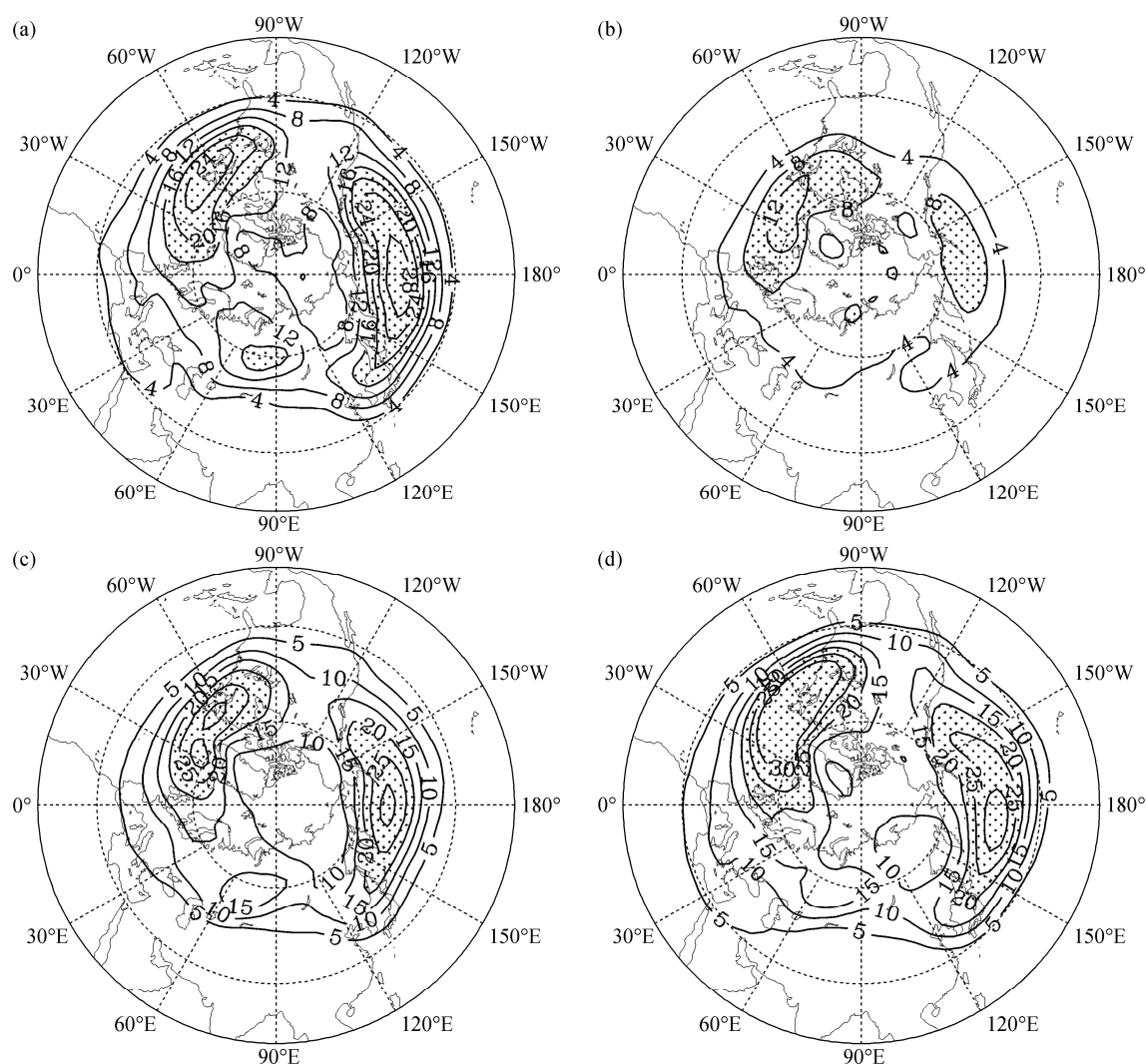


图1 1958~2001年北半球春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)平均500 hPa位势高度天气尺度滤波方差(单位: dagpm²)。点区的值大于18 dagpm²(春)、8 dagpm²(夏)、20 dagpm²(秋、冬)

Fig.1 The mean of synoptic scale variance for 500-hPa geopotential height in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter (units: dagpm²) in the Northern Hemisphere for the years of 1958–2001. Dots represent values above 18 dagpm² (spring), 8 dagpm² (summer), and 20 dagpm² (autumn, winter)

的气旋过程)。这里我们剔除非移动性气旋过程, 这样的设定也可在一定程度上排除陆地上移动甚慢的热低压系统。关于客观判定和追踪温带气旋的方法论探讨和客观方法的检验可参考 Zhang et al. (2012) 中的详细描述。Zhang et al. (2012) 利用此客观方法研究分析了东亚地区温带气旋的气候学特征(生成, 消亡, 强度和移动), 采用聚类分析方法获得了影响东亚地区的4条主要气旋活动路径, 并对比研究了东亚地区和北美地区爆发性温带气旋的差异。

本文这里将研究温带气旋活动和风暴轴的相关性, 因此除了第2.2部分中定义的风暴轴的强度指数和纬度指数外, 还需要对应地定义温带气旋活动

频率, 气旋强度指数和气旋活动的纬度指数。这里我们定义2.5°经度×2.5°纬度网格范围内气旋活动的数目为气旋的活动频率。由于气压的拉普拉斯值可以近似地看作是准地转涡度 ξ ($\xi = 1/\rho f \cdot \nabla^2 p$), 因此我们将气旋中心4°纬度范围内气压拉普拉斯的平均值作为一个判定气旋强弱的标准, 气旋的强度指数就定义为气旋活动频率大于2的所有格点的气压拉普拉斯的平均值。同样, 气旋活动的纬度指数定义为气旋活动频率大于2的所有格点所在纬度的平均值。

图2为44年平均四季气旋活动频率的空间分布。我们可以看到无论在哪个季节, 北半球都有2个气旋的主活动中心和2个次活动中心。主活动中

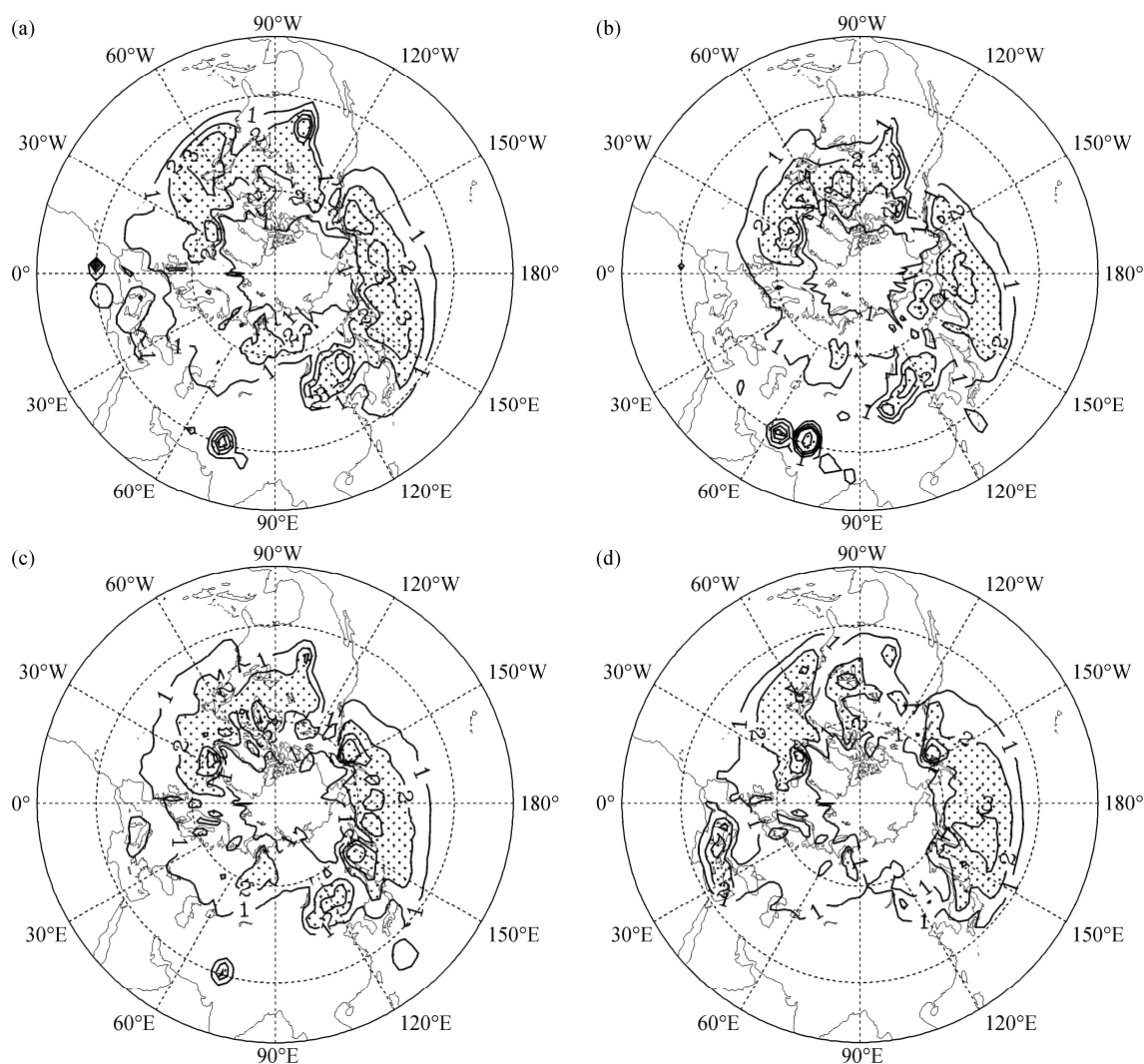


图2 1958~2001年北半球春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)平均气旋活动频率(每个季节 2.5° 经度 $\times 2.5^{\circ}$ 纬度区域内的气旋个数)。点区的频率大于2

Fig.2 The mean of cyclone activity frequency in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter (cyclone number in 2.5° longitudes $\times 2.5^{\circ}$ latitudes area for each season) in the Northern Hemisphere for the years of 1958–2001. Dots represent values above 2

心分别位于北太平洋地区和北大西洋/北美地区,次活动中心则在东亚地区和地中海地区。其中东亚温带气旋主要在西伯利亚、蒙古以及我国东北地区活动最为频繁。气旋活动的季节差异主要是在落基山下游地区和2个次活动中心,例如冬季落基山下游地区和蒙古地区平均气旋活动次数减少。对地中海地区来说,冬季气旋活动最为频繁,而夏季气旋活动频率则大大降低,春季和秋季的气旋活动频率相当。根据本文第2.2部分中定义的风暴轴,我们用500 hPa位势高度天气尺度滤波方差大于某一特定阈值的所有格点的平均值及位置来描述北半球风暴轴的强度和位置(图1)。这种欧拉方法获得的风暴轴的特点是北半球最强的风暴轴分别位于北太

平洋地区和北大西洋/北美地区,这与拉格朗日方法获得的温带气旋的2个主要活动中心是一致的。比较四个季节的风暴轴,冬季风暴轴的强度最强,覆盖的范围也最大,夏季风暴轴的强度最弱,覆盖的范围最小。另外,我们发现无论是两个大洋上气旋的主活动中心还是风暴轴都有着相同的空间结构,即沿着西—东向的纬圈向极地偏移。鉴于以上分析可知,北半球两个主要气旋活动中心分别对应两个最强的风暴轴,并且二者的空间分布具有较强的相似性,因此我们在第3部分中将分别对两个气旋主要活动中心的气旋活动频率和强度变化,以及相应的风暴轴的位置和强度变化进行分析,探讨二者可能存在的关系。

3 温带气旋活动和风暴路径的年代际变化

3.1 北太平洋温带气旋活动和风暴路径的年代际变化

根据判定和追踪温带气旋的客观方法, 对 1958~2001 年北太平洋地区($30^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 年气旋活动频率进行了 EOF 分解, 得到前三个模态的方差贡献分别为 15.6%、11.0% 和 9.3%。第二和第三模态的方差贡献小于第一模态, 因此, 我们这里只给出第一模态的空间分布(特征向量乘以 1 个标准差)及其标准化的时间序列(图 3)。我们可以看到北太平洋地区的气旋活动频率呈现出较高纬度和较低纬度显著相反的分布形式(图 3a), 即较高纬度地区的气旋活动频率高时较低纬度的气旋活动频率低或较高纬度地区的气旋活动频率低时较低纬度的气旋活动频率高。图 3b 表明此模态具有明显年际变化特征的同时, 整体还呈现显著的升高趋势(图 3b 中的虚线)。结合空间分布和时间序列来看, 1950 年代末至 1970 年代初气旋活动频率主要处在负位相, 表明北太平洋较低纬度气旋

活动频率偏低而较高纬度气旋活动频率偏高, 1970 年代中期以后位相开始发生变化, 较高纬度地区气旋活动频率降低而较低纬度气旋活动频率增加, 这在一定程度上反映出北太平洋地区气旋活动路径有整体的南移趋势。

另外, 我们以 60°N 为界分别计算, 获得了北太平洋 60°N 以北和以南地区年温带气旋过程次数的时间序列(图 4)。可以看到, 北太平洋地区的气旋过程次数呈现明显的年代际变化, 较高纬度和较低纬度的温带气旋过程次数呈现相反的线性变化趋势, 较高纬度地区气旋过程数线性减少, 而较低纬度地区气旋过程数线性增加, 这体现了北太平洋地区温带气旋源地有向低纬度移动的变化特征。

从图 3 和图 4, 我们研究分析得到客观判定的北太平洋温带气旋活动路径和气旋源地整体呈现向低纬度移动的趋势, 那么通过欧拉方法获得的风暴轴是否也有这样的变化特征? 为了获得这个答案, 我们分别计算了北太平洋较低纬度地区($30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 四个季节风暴轴的纬度指数和气旋活动的纬度指数, 并描绘出二者随时间标准化的演变曲线(图 5)以及线性趋势和

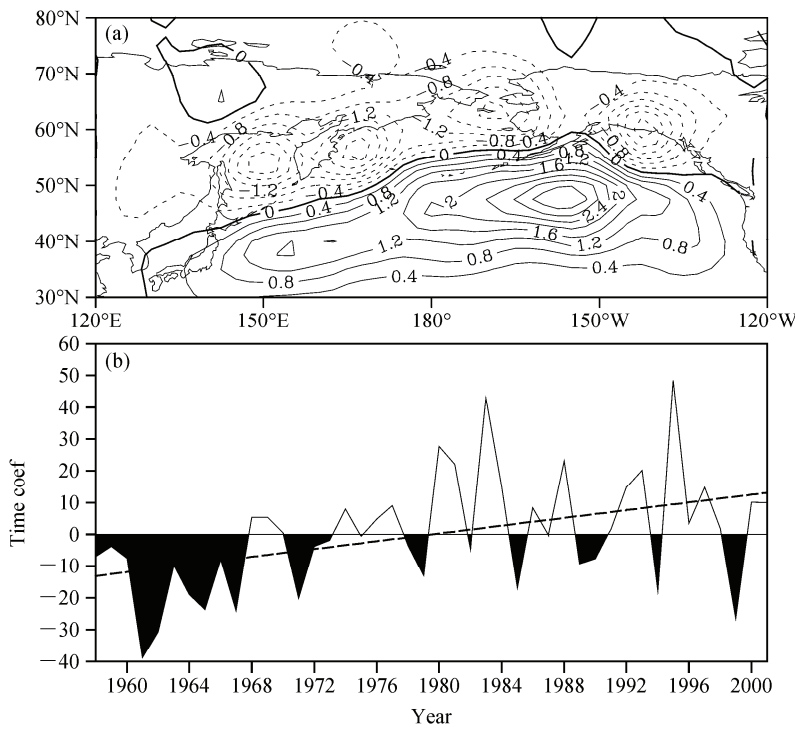


图 3 1958~2001 年北太平洋地区年气旋活动频率的经验正交展开函数(EOF)第一模态的空间分布(a, 特征向量乘以 1 个标准差)和标准化的时间序列(b, 虚线为线性趋势)

Fig.3 (a) The space distribution (characteristic vector is multiplied by one standard deviation) and (b) standardized time series (the dotted line is the linear trend) of the first empirical orthogonal function (EOF) mode of annual cyclone activity frequency in the North Pacific for the years of 1958-2001

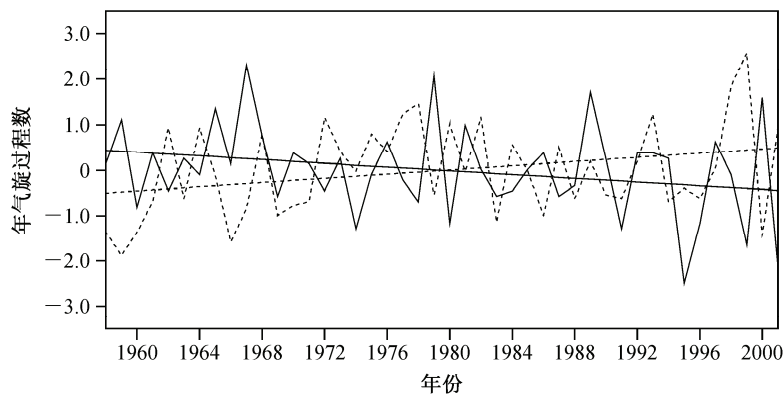


图4 1958~2001年北太平洋地区年气旋过程数的时间序列。实线: 60°N以北, 虚线: 60°N以南, 直线: 线性趋势

Fig.4 The time series of annual cyclone processes in the North Pacific for the years of 1958~2001. Solid line: north of 60°N; dotted line: south of 60°N; straight line: the linear trend

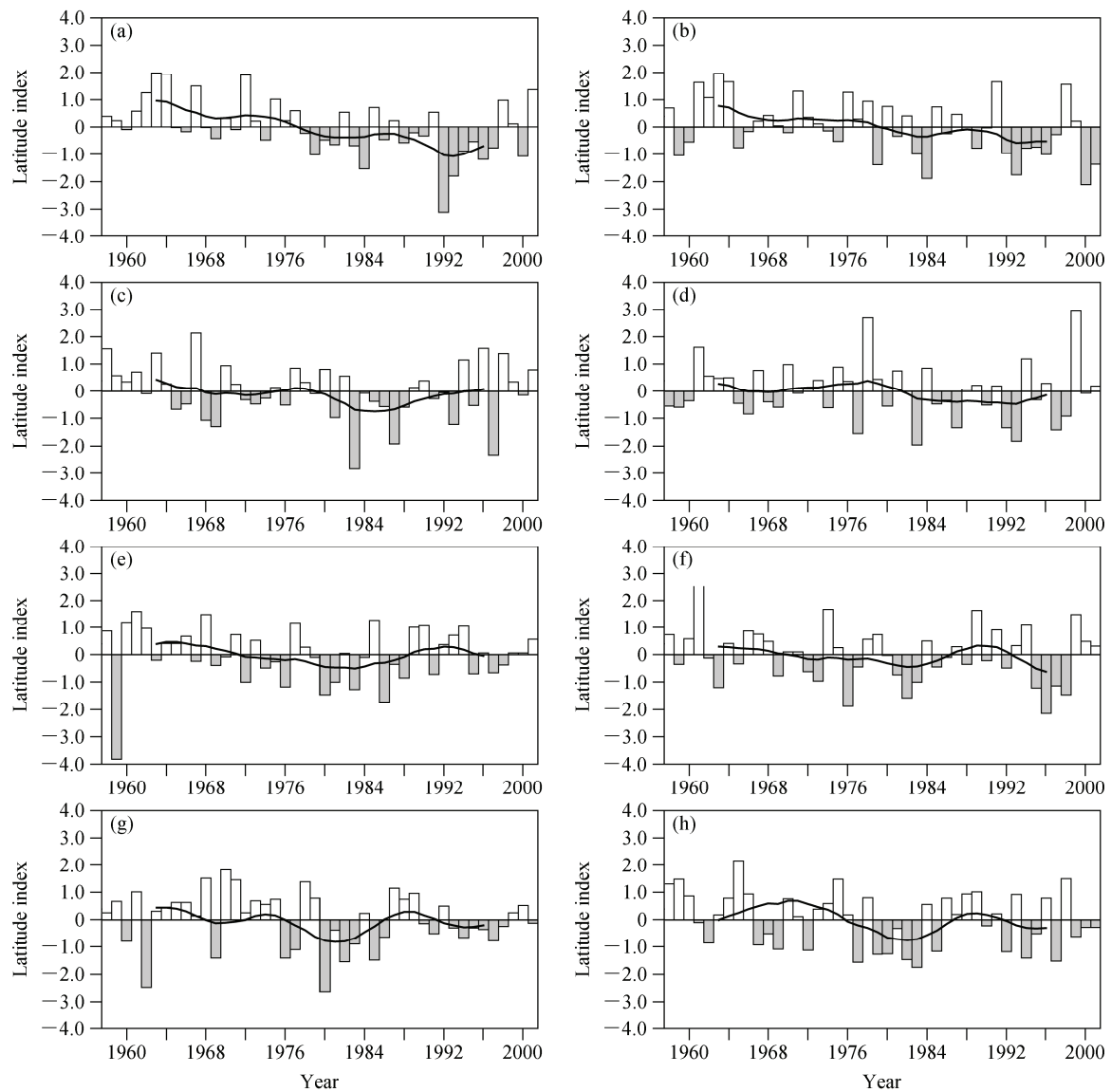


图5 1958~2001年(30°N~60°N, 120°E~120°W)地区的风暴轴(左)和气旋活动(右)纬度指数的时间序列:(a, b)春;(c, d)夏;(e, f)秋;(g, h)冬。曲线为11年滑动平均

Fig.5 Time series of latitude indexes of the storm track (left) and cyclone activity (right) in (a, b) spring, (c, d) summer, (e, f) autumn, and (g, h) winter in the region of (30°N~60°N, 120°E~120°W) for the years of 1958 to 2001. The curve is 11-year moving average

二者的相关性（表 1）。图 5 中的负值（或表 1 中负的趋势系数）表示风暴轴（或气旋活动）的纬向位置较平均位置偏南，正值则表示纬向位置较平均位置偏北。我们可以看到，无论哪个季节风暴轴和气旋活动的纬向位置都是向南移的，并且二者均在春季向南偏移的线性趋势最为显著，分别通过了显著水平 0.01 和 0.05 的 t 检验。风暴轴和气旋活动纬向位置的线性变化有着很高的相关性，其中春、夏和冬季二者的相关系数通过显著性水平为 0.01 的 t 检验，非常相关。同时，我们也可以看到风暴轴和气旋活动纬向位置随时间的 11 年滑动平均曲线（图 5 中的曲线）的变化也十分相似：春季以 1970 年代中期为界，之前的气旋活动和风暴路径偏北，而之后的气旋活动和风暴路径偏南；夏季 1980 年左右之后气旋活动和风暴路径明显偏南；秋季气旋活动和风暴路径整体呈现南移趋势，但有一定幅度的南北振荡；冬季以 1970 年代中期为界，之前的风暴轴和气旋活动位置偏北，之后是一个周期为准 10 年的南北振荡循环。

再来看风暴轴强度和气旋强度的情况，其中风暴轴和气旋的强度指数按第 2 部分中的定义来计算。从表 2 可以看出，该地区风暴轴和气旋的强度都呈现线性增强的趋势，其中夏季和秋季风暴轴强度和气旋强度的增强趋势显著，夏季二者的趋势系数分别通过显著性水平 0.05 和 0.01 的 t 检验。风暴轴强度和气旋强度随时间演变呈现很好的线性相关，其中春季和秋季二者的相关系数通过了 0.05 显著性水平的 t 检验，夏季和冬季则通过了 0.01 显

著性水平的 t 检验。另外，风暴轴和气旋的强度指数的 11 年滑动平均曲线（图 6 中的曲线）显示：春季 1970 年代中后期是一个分界点，分界点之前的风暴轴和气旋较弱，分界点之后则较强，1990 年代中期至 2001 年，风暴轴和气旋的强度呈现出减弱—增强—减弱的波动结构；夏季和春季的情况非常相似，只是夏季 1970 年代中期之后风暴轴和气旋强度突变的现象更为明显；秋季风暴轴和气旋的强度呈现出波动中增强的趋势，二者共同的特征是前 20 年强度波动的振幅较大，后 20 年强度波动的振幅较小；冬季风暴轴和气旋的强度仍是波动中增强，几个强度的波峰波谷更加清晰和明显。

通过本部分的研究分析可以看出，北太平洋地区气旋活动频率呈现南增北减的空间变化结构，气旋源地向低纬度移动的同时气旋强度有增强的变化特点。气旋活动频率的这种变化以春季最为显著，强度变化以夏季和秋季最为显著。欧拉方法获得的北太平洋风暴路径也呈现南移的变化趋势，以春季最为明显，30°N~60°N 纬带的风暴轴强度的增强以夏季较为显著。气旋活动的变化同风暴路径的改变有着很好的相关性，气旋强度的变化也相关于风暴轴的强弱变化。以上的结论充分说明了北太平洋地区温带气旋活动同风暴路径的移动和变化紧紧相连，风暴路径是对北太平洋地区温带气旋生成、移动和变化影响最大的背景场。虽然不少研究者对整个北半球的温带气旋和风暴路径的研究都得到了活动区域北移，风暴轴北移，副热带向极地扩张的结论，但不能笼统地应用于所有北半球地

表 1 图 5 中风暴轴和气旋活动纬度指数时间序列的趋势系数及二者的相关系数
Table 1 Trend coefficients of time series of latitude indexes of the storm track and cyclone activity in Fig.5 and their correlation coefficients

	春		夏		秋		冬	
	风暴轴	气旋活动	风暴轴	气旋活动	风暴轴	气旋活动	风暴轴	气旋活动
趋势系数	-0.0337**	-0.0301*	-0.0128	-0.0060	-0.0039	-0.0134	-0.0107	-0.0181
相关系数	0.62**		0.43**		0.36*		0.48**	

注：*、** 表示通过显著性水平为 0.05、0.01 的 t 检验(下同)。

表 2 图 6 中风暴轴和气旋强度指数时间序列的趋势系数及二者的相关系数
Table 2 Trend coefficients of time series of intensity indexes of the storm track and cyclones in Fig.6 and their correlation coefficients

	春		夏		秋		冬	
	风暴轴	气旋	风暴轴	气旋	风暴轴	气旋	风暴轴	气旋
趋势系数	0.0147	0.0159	0.0287*	0.0321**	0.0212	0.0305**	0.0091	0.0156
相关系数	0.38*		0.41**		0.38*		0.50**	

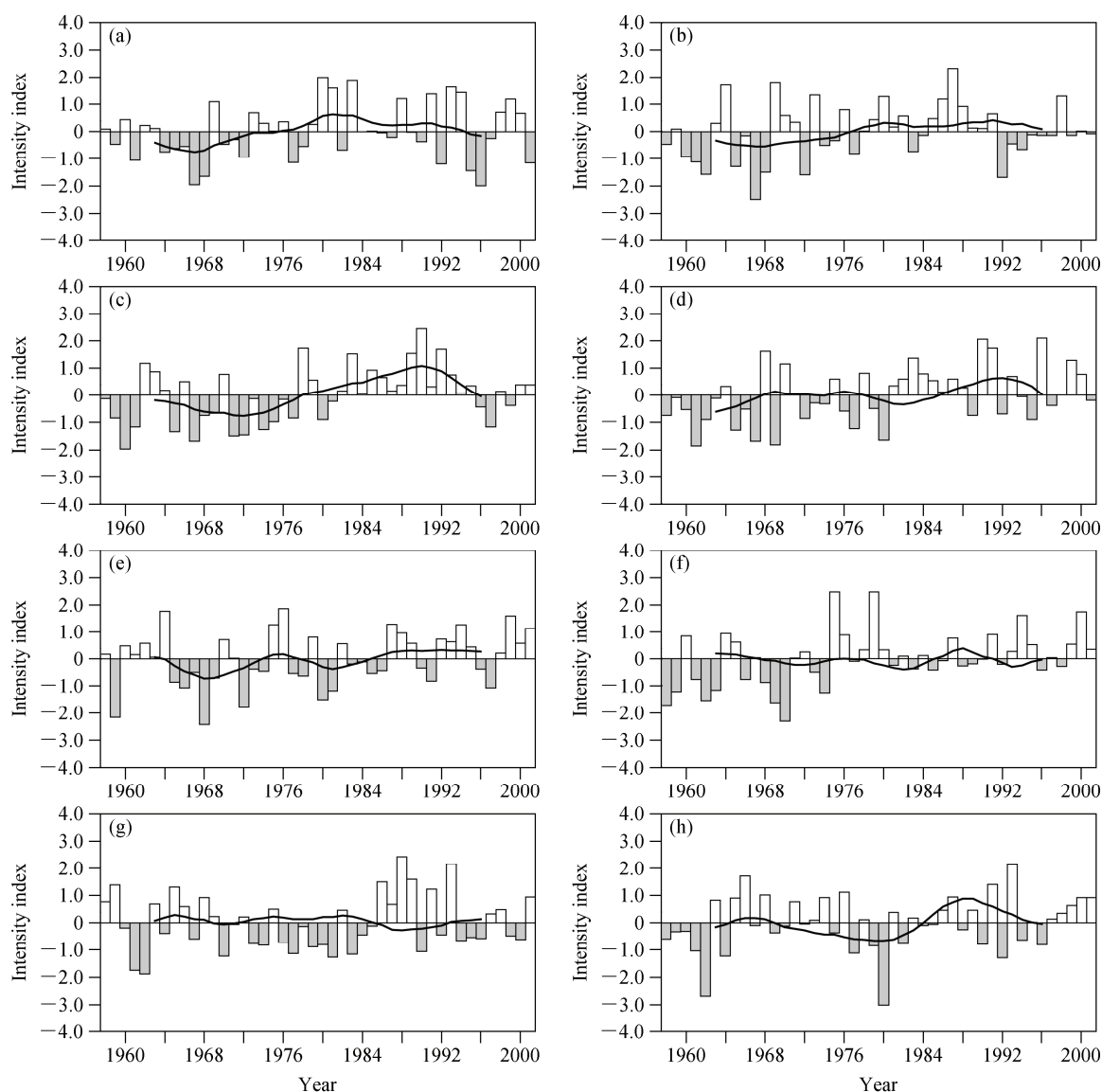


图6 同图5, 但为强度指数

Fig.6 Same as Fig. 5, but for the intensity indexes

区, 个别地区可能会存在不同的甚至相反的情况, 如北太平洋地区。

3.2 北大西洋/北美地区温带气旋活动和风暴路径的年代际变化

第 3.1 部分中我们讨论了北太平洋这一温带气旋主要活动区的气旋活动路径, 气旋源地移动和气旋强度的年代际变化, 这里我们再来分析北半球的另一个温带气旋主要活动区—北大西洋/北美地区的气旋活动和风暴路径的变化以及二者之间的关系。同样对 1958~2001 年北大西洋/北美地区 ($30^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{W}\sim 30^{\circ}\text{E}$) 温带气旋的年活动频率进行了 EOF 分解, 得到前三个模态的方差贡献分

别为 12.6%、10.1%和 8.4%。图 7 为第一模态的空间分布和第一模态标准化的时间序列。可以明显地看出北大西洋/北美地区的情况和北太平洋地区的情况截然相反, 即较高纬度地区 ($60^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{W}\sim 30^{\circ}\text{E}$) 和较低纬度地区 ($30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{W}\sim 30^{\circ}\text{E}$) 气旋活动频率有着相反的变化趋势, 加拿大东北部地区、格陵兰南部地区和冰岛附近海域是正位相的大值区, (50°N , 30°E)附近的大西洋是负位相的大值区。结合第一模态的时间序列可以发现, 此地区气旋活动频率 1958~2001 年呈现增加的线性趋势 (图 7b 中的虚线), 以 1970 年左右为分界点, 分界点之前较低纬度地区气旋活动频率

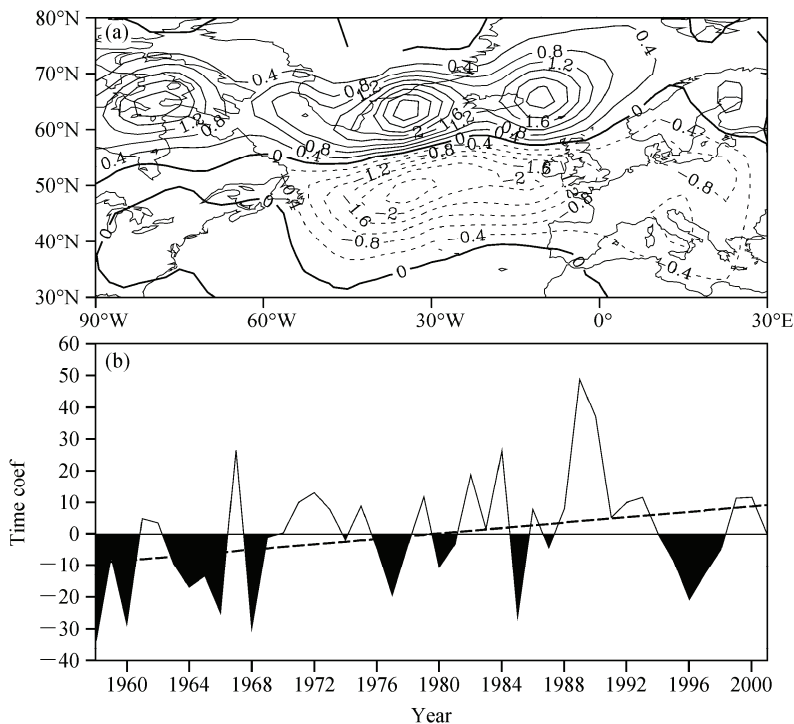


图 7 1958~2001 年北大西洋/北美地区年气旋活动频率 EOF 第一模态的空间分布 (a, 特征向量乘以 1 个标准差) 和标准化的时间序列 (b, 虚线为线性趋势)

Fig.7 (a) The space distribution (characteristic vector is multiplied by one standard deviation) and (b) standardized time series (the dotted line is the linear trend) of the first EOF mode of annual cyclone activity frequency in the North Atlantic/North America for the years of 1958–2001

偏高, 较高纬度地区气旋活动频率偏低; 分界点之后较低纬度地区气旋活动频率降低, 而较高纬度地区气旋活动频率增加。因此, 北大西洋/北美地区温带气旋活动的变化正好与北太平洋地区相反, 气旋活动路径北移。

接下来分析北大西洋地区温带气旋过程数的年代际变化 (图 8)。我们同样以 60°N 为界, 分别计算其以南和以北地区的气旋过程数目。可以看到 60°N 以北地区气旋过程次数显著地线性增加 (通过 0.01 显著性水平的 t 检验), 1980 年代之前气旋过程数的年际波动较小, 而 1980 年代之后气旋过程数的年际波动变大。另外, 1980 年代之前的 60°N 以南地区气旋过程数有较弱的线性增加趋势, 1980 年代之后气旋过程数的振幅年际波动变大, 但没有明显的线性增减趋势。由此看来, 1980 年代之后北大西洋地区温带气旋源地呈现北抬的变化特征。

北大西洋/北美地区温带气旋活动和气旋源地的北移是否对应了风暴路径的北移? 我们按照第 3.1 部分的方法对北大西洋/北美地区的气旋活动和风暴路径进行了以下的分析。从图 9 我们可以看到风暴轴和气旋活动的纬向位置基本上都是呈现北

移的线性变化趋势, 这一点也可以从表 3 中的趋势系数看出, 其中春季风暴路径的北移, 以及春季和冬季气旋活动的北移趋势最为显著, 分别通过了 0.01、0.05 和 0.05 显著性水平的 t 检验。风暴路径和气旋活动纬度指数的线性变化相关性很高, 尤其是在春季, 夏季和秋季, 通过了 0.01 显著性水平的 t 检验。图 9 中风暴轴和气旋活动纬度指数的 11 年滑动平均的扰动也非常相似, 其中春季二者都在 1980 年代末 1990 年代初达到最北端, 夏季和秋季都呈现出波动中北移的变化特征。虽然冬季风暴路径有非常弱的南移的线性变化趋势, 但是能够看出 2000 年之前风暴轴的纬度指数仍有弱的线性增加的趋势, 即风暴路径向高纬度偏移, 并且风暴轴和气旋活动的纬向位置的变化呈现正的线性相关。

以上的分析得到北大西洋/北美地区温带气旋活动和风暴路径都呈现出向极地移动的变化趋势, 以下来看强度的变化。表 4 中的趋势系数清楚地表明北大西洋/北美的较高纬度地区 ($50^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{W}\sim 0^{\circ}$) 风暴轴强度和气旋强度春季、秋季和冬季呈现线性增强的变化趋势, 夏季则呈现弱的线性减弱的变化趋势, 四季强度变化的趋势系数均没有

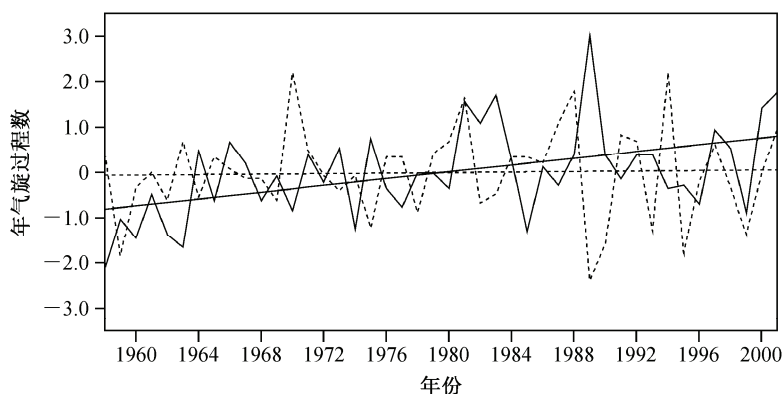


图8 1958~2001年北大西洋地区年气旋过程数的时间序列。实线: 60°N以北, 虚线: 60°N以南, 直线: 线性趋势

Fig.8 The time series of annual cyclone processes in the North Atlantic for the years of 1958~2001. Solid line: north of 60°N; dotted line: south of 60°N; straight line: the linear trend

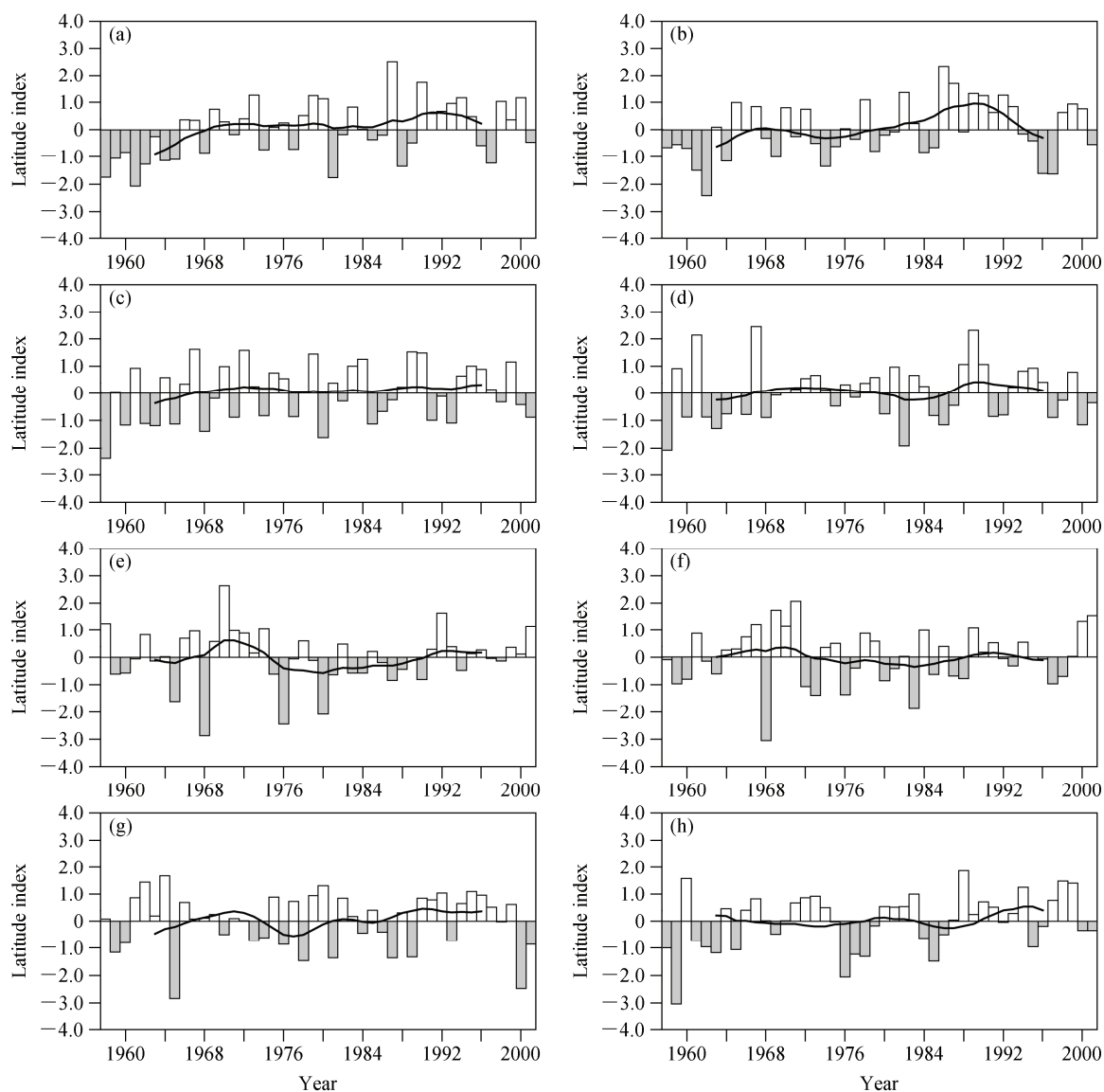


图9 同图5, 但为(40°N~70°N, 90°W~0°)地区

Fig.9 Same as Fig.5, but in the region of (40°N~70°N, 90°W~0°)

表 3 图 9 中风暴轴和气旋活动纬度指数时间序列的趋势系数及二者的相关系数

Table 3 Trend coefficients of time series of latitude indexes of the storm track and cyclone activity in Fig.9 and their correlation coefficients

	春		夏		秋		冬	
	风暴轴	气旋活动	风暴轴	气旋活动	风暴轴	气旋活动	风暴轴	气旋活动
趋势系数	0.0332**	0.0238*	0.0158	0.0054	0.0020	0.0058	-0.0002	0.0241*
相关系数	0.48**		0.71**		0.56**		0.20	

表 4 图 10 中风暴轴和气旋强度指数时间序列的趋势系数及二者的相关系数

Table 4 Trend coefficients of time series of intensity indexes of the storm track and cyclones in Fig.10 and their correlation coefficients

	春		夏		秋		冬	
	风暴轴	气旋	风暴轴	气旋	风暴轴	气旋	风暴轴	气旋
趋势系数	0.0175	0.0096	-0.0149	-0.0076	0.0124	0.0044	0.0126	0.0122
相关系数	0.35*		0.12		0.21		0.34*	

通过显著性水平的检验。风暴轴强度和气旋强度线性变化呈现较好的正相关性，其中春季和冬季强度变化的相关性较高。图 10 中春季风暴轴强度和气旋强度的 11 年滑动平均表明 1970 年代末是一个分界点，分界点之前的风暴轴和气旋的强度偏弱，1970 年代末至 1990 年代中风暴轴和气旋的强度偏强，1990 年代中期以后二者的强度又呈现减弱的趋势。夏季风暴轴强度和气旋的强度波动中线性减弱，秋季二者的强度变化呈现波动中线性增强，夏秋季节风暴轴强度和气旋强度变化的趋势系数都没有通过显著性检验。冬季风暴轴强度和气旋强度呈现出增强的线性趋势，有较强的相关性，44 年中分别有两个明显的强度波峰和强度波谷，风暴轴强度和气旋强度波峰和波谷所在的年份也比较一致。

4 原因分析

北半球温带气旋活动和风暴路径变化的机理和原因是十分复杂的，对此国内外研究者做了不少的探讨工作。胡增臻和黄荣辉（1997）的诊断分析表明 1980 年代冬季热带太平洋的对流活动存在 2~4 年的周期振荡，对流活动的这种变化与北太平洋风暴轴的变化有着密切的关系，即当热带太平洋对流活动强时，北太平洋风暴轴中心偏强、偏东、偏北。Geng and Sugi（2001）研究分析表明北大西洋地区气旋活动的变化同 200 hPa 水平风速场、海表面温度以及海表温度梯度的变化有着密切的关系，其中北大西洋中高纬度气旋频数的增加与 200 hPa 水平

风速，海表温度梯度的增加有着很好的正相关性。李莹等（2010）的研究表明，描述海气系统变化的 PDO (Pacific Decadal Oscillation)、黑潮区海温、PNA (Pacific/North American) 和 WP (West Pacific) 遥相关型与冬季北太平洋风暴轴的变化联系紧密。其中北太平洋冬季风暴轴纬度指数的年代际变化与 PNA 和 PDO 的位相转换基本一致，它们可能是风暴轴纬向位置年代际变化的重要影响因子。Lee et al.（2011）认为 1980 年代之前风暴路径的活动同 PDO 和 NAO (North Atlantic Oscillation) 相关性高，但 1980 年代之后风暴路径的活动同 PDO, NAO, 太平洋海温和大西洋海温相关性减弱。1970 年代中期之后全球风暴轴强度的增强主要是由于平均经向温度梯度增大从而为斜压波不稳定增长提供了有利的背景条件引起的。Nie et al.（2008）指出，在冬季正 AO 指数（Atlantic Oscillation）偏强时，北大西洋风暴轴偏北且偏下游，而北太平洋风暴轴则偏西偏南。天气尺度波的斜压能量转换和天气尺度波一行星波的相互作用是北半球风暴路径变化的主要原因。AO 指数在本文研究时段其正位相有增强的趋势，因此本文的结论与 Nie et al.（2008）的结论是一致的。

对于大气斜压不稳定的研究，Eady（1949）用理想化的纬向斜压大气动能的准地转方程探讨了中纬度地区大气扰动的基本特征，被称为 Eady 不稳定模态。Eady 模态中的理想大气满足质量守恒、f 平面、纬向气流高度切变为常数和刚性边界条件。

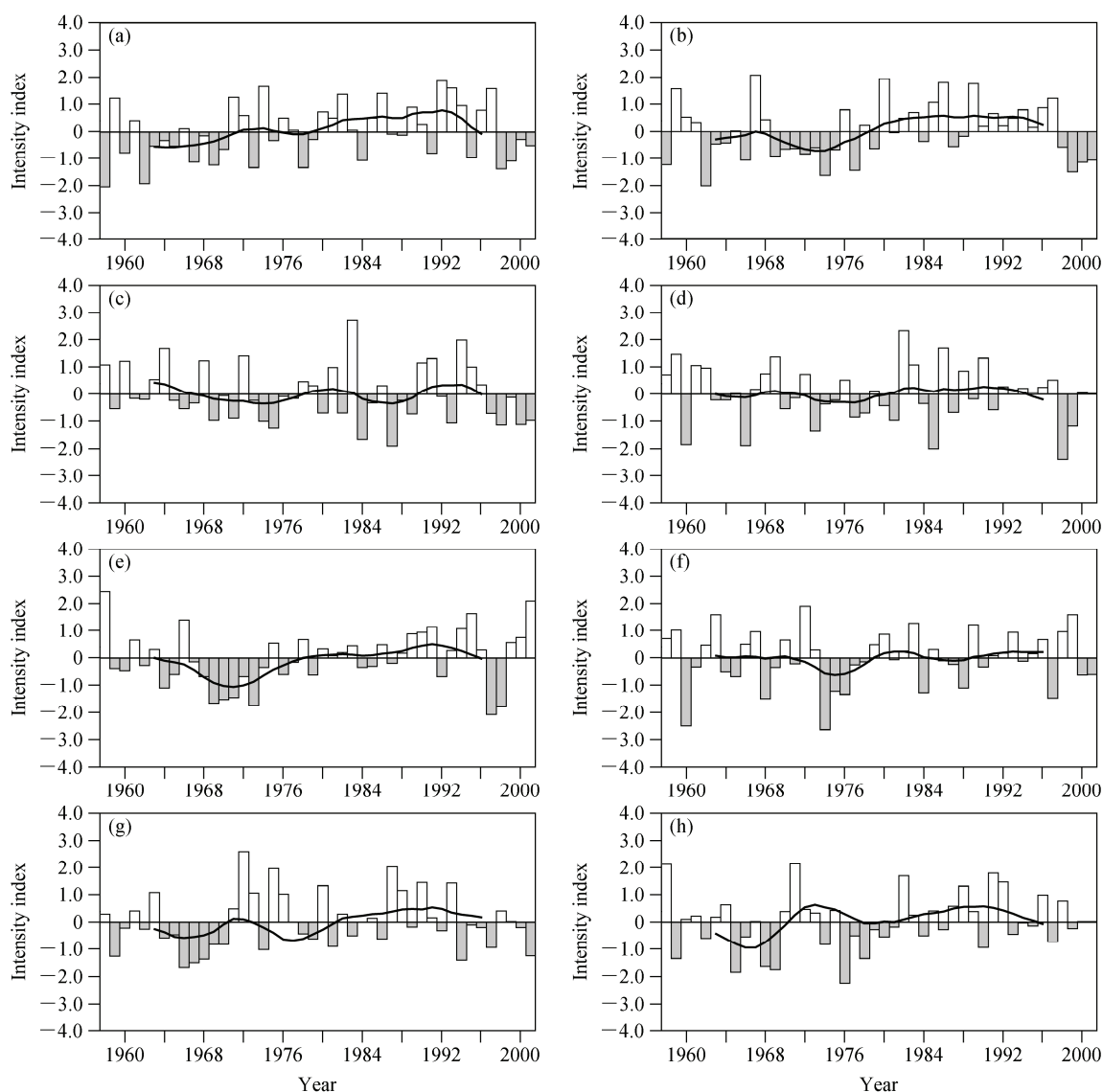


图 10 同图 6, 但为 (50°N~80°N, 90°W~0°) 地区

Fig.10 Same as Fig.6, but in the region of (50°N~80°N, 90°W~0°)

除了 Eady 斜压不稳定模态外, Charney (1947) 和 Green (1960) 分别发展了考虑非零 β 效应的斜压大气模型, 被称为 Charney 模态和 Green 模态。Charney (1947)、Eady (1949) 和 Green (1960) 的这些工作使得我们能够获得扰动波的真实增长率及其垂直结构。对于描述不稳定扰动波的发展快慢, Eady 模态中衍生出的叫做最大 Eady 增长率 (maximum Eady growth rate) 的指标被广泛用于中纬度斜压不稳定发展的研究中 (Lindzen and Farrell, 1980),

$$\sigma_{\text{BI}} = 0.31 f \partial |v| / \partial z N^{-1}, \quad (1)$$

其中, f 是科里奥利参数; N 是 Brunt-Väisälä 频率; v 是水平风速; z 是垂直高度。由于风暴轴能够用斜

压波生命史模式来解释, 因此, σ_{BI} 常被国内外科学家用于风暴轴的研究中 (Hoskins and Valdes, 1990; 胡增臻和黄荣辉, 1998)。本文第 4 部分的研究分析表明北太平洋和北大西洋/北美地区的气旋活动频率和强度的变化同风暴轴的移动和强度变化有着密切的相关性, 因此基于以上的理由本部分将通过分析对流层中上层大气最大 Eady 增长率的变化来探讨北半球温带气旋活动, 气旋源地和气旋强度变化的可能原因。

图 11 为北半球温带气旋年活动频率和 400 hPa 年均最大 Eady 增长率的空间分布情况, 其中点区分别对应着各自的大值区, 这和 Pinto et al. (2005) 研究的冬季北半球的情况是一致的。我们可以看到

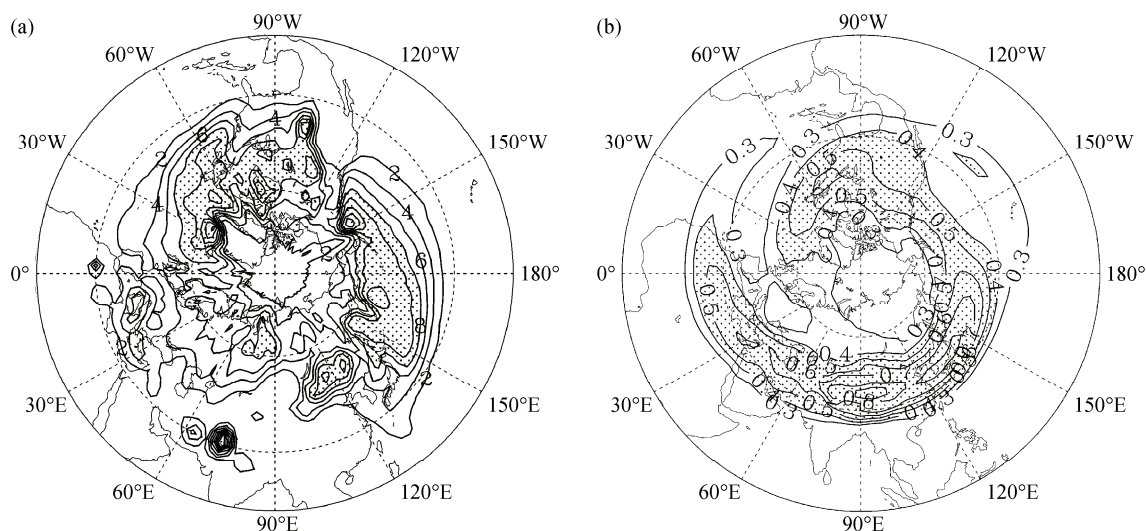


图 11 1958~2001 年北半球年均气旋活动频率 (a, 在 2.5° 经度 $\times 2.5^\circ$ 纬度区域内的年均气旋个数, 点区频率大于 8) 和 400 hPa 的 σ_{BI} (b, 单位: d^{-1} , 点区的值大于 0.4)

Fig. 11 (a) Annual cyclone activity frequency (annual cyclone number in 2.5° longitudes $\times 2.5^\circ$ latitudes area, dots represent values above 8) and (b) σ_{BI} at 400 hPa (units: d^{-1} , dots represent values above 0.4) in the Northern Hemisphere for years of 1958 to 2001

不论是北太平洋还是北大西洋/北美地区, 温带气旋活动的中心都位于斜压不稳定区域的下游地区。根据 Chang (1993) 和 Orlanski and Chang (1993) 的研究可以知道, 非地转位势高度通量的辐合/辐散是斜压波上游和下游动能发展的源/汇, 并在斜压波发展的早期阶段起着重要的作用。随着波的成熟, 它开始通过非地转位势高度通量向下游传播能量, 从而使自身消亡并在下游地区激发出新的斜压波。这种非地转位势高度通量所引起的斜压波下游发展效应是风暴轴斜压区的天气尺度涡动发展的重要能量来源, 从而有利于温带气旋的发生发展。

我们分别对 1958~2001 年北太平洋地区和北大西洋地区 400 hPa 年最大 Eady 增长率 (σ_{BI}) 进行 EOF 分解, 分别给出了这两个地区第一模态的空间分布和第一模态的时间序列 (图 12), 方差贡献分别为 18.8 % 和 15.0 %。对于北太平洋地区来说, EOF 第一模态的空间分布呈现 σ_{BI} 较高纬度和较低纬度相反的分佈特征。结合时间序列来分析就是较高纬度的 σ_{BI} 呈现线性减小的变化趋势, 而较低纬度的 σ_{BI} 则呈现线性增加的变化趋势。这一结果同第 3.1 部分中北太平洋地区温带气旋活动频率南部增加北部减少的空间分布和风暴轴南移的变化特征非常一致, 另外, 北太平洋地区大气斜压性线性增强的变化趋势 (图 12b) 也能够解释北太平洋地区气旋活动频率线性增加的趋势 (图 3b)。第 3.2 部

分中北大西洋地区气旋活动频率的变化同北太平洋地区相反, 这种相反的空间分布特征是否也能用大气斜压性的变化来解释? 图 12c 和 12d 表明北大西洋地区 σ_{BI} 的 EOF 第一模态确实和北太平洋地区不同, 可以说是完全相反, 即北大西洋地区较高纬度的最大 Eady 增长率呈现线性增加的变化趋势, 而较低纬度的最大 Eady 增长率则呈现线性减小的变化趋势。这一结论也同第 3.2 部分中北大西洋地区风暴轴北移, 气旋活动北移的结论是一致的。

5 结论与讨论

本文基于欧洲中心的再分析数据 ERA40, 分别采用拉格朗日和欧拉方法研究分析了北半球不同季节的两个温带气旋主要活动区 (北太平洋地区和北大西洋/北美地区) 的气旋活动频率和气旋强度、风暴轴位置和风暴轴强度的年代际变化, 以及气旋活动变化和风暴轴变化的相关性, 并在此基础上讨论了造成这些变化的可能原因。主要结论如下:

(1) 拉格朗日研究方法基于海平面气压值。这种客观判定和追踪温带气旋的方法能够追踪到 80 % 以上的真实的气旋过程, 客观判定的气旋生成和消亡时间同真实气旋生成和消亡时间的误差最大在一天左右, 生成和消亡的位置误差非常小。因此, 客观的拉格朗日方法用于温带气旋的研究有较高的可信度和可行性。欧拉方法基于 500 hPa 位势

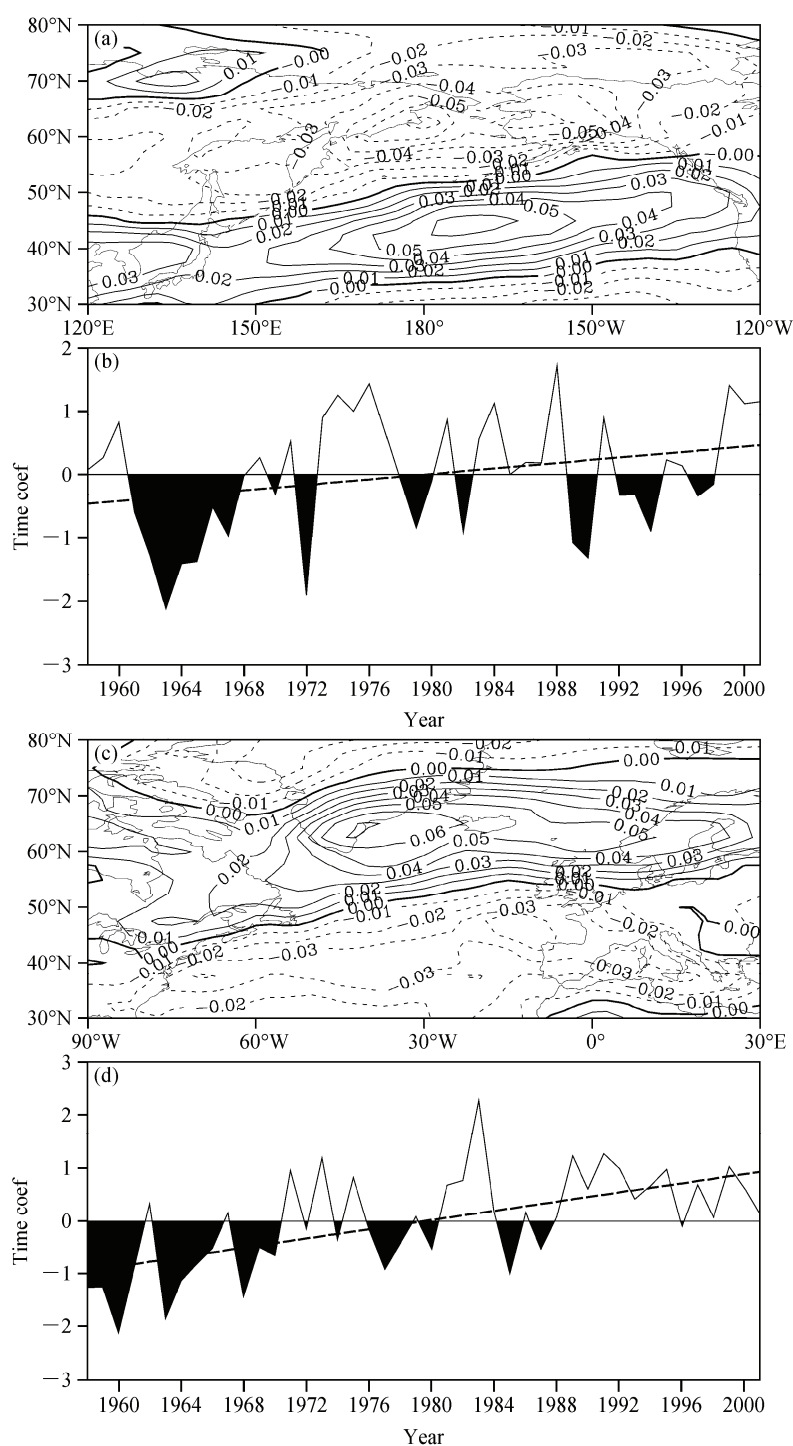


图 12 1958~2001 年北太平洋 (a、b) 和北大西洋地区 (c、d) 400 hPa 年均 σ_{BI} 的 EOF 第一模态空间分布 (a、c) 和标准化的时间序列 (b、d, 虚线为线性趋势)

Fig.12 (a, c) The space distribution and (b, d) standardized time series (dotted line is the linear trend) of the first EOF mode of annual mean σ_{BI} over (a, b) the North Pacific and (c, d) the North Atlantic for the years of 1958–2001

高度场的滤波方差, 不同季节选取不同的阈值, 高于阈值的范围即定义为风暴轴。北半球两个主要的气旋活动中心 (北太平洋地区和北大西洋/北美地区) 很好地对应着两个大洋区上的风暴轴, 并且二

者都有着相同的空间结构, 即沿着西—东向的纬圈向极地偏移。

(2) 北大西洋/北美地区气旋活动频率具有明显的年际变化特征, 整体呈现显著的升高趋势, 但

较高纬度和较低纬度地区呈现显著相反的分布形式。该地区的气旋活动有向高纬度偏移并加强的变化特征, 春季无论是气旋活动的北移趋势还是气旋强度的增强趋势都是四个季节中最为显著的。这种气旋活动路径北移且强度增强的变化特征同风暴路径的北移增强有着很好的相关性, 二者的位置变化以春、夏、秋季的相关系数最高, 强度变化以春季和冬季的相关系数最高。

(3) 北太平洋地区气旋活动和风暴轴的变化同北大西洋/北美地区的情况截然相反。1950 年代末至 1970 年代初北太平洋较低纬度气旋活动频率偏低而较高纬度气旋活动频率偏高, 1970 年代中期以后位相改变, 较高纬度地区气旋活动频率开始降低而较低纬度气旋活动频率开始增加, 体现了北太平洋地区温带气旋活动路径的南移。结合拉格朗日和欧拉方法获得的气旋活动和风暴轴随时间呈现南移, 强度增强的线性变化趋势, 以春季南移的趋势、夏季强度增强的趋势最为显著。另外, 无论位置变化还是强度变化气旋活动和风暴轴都有着很高的线性相关性。虽然, 整个北半球的气旋活动和风暴路径北移的研究结果得到普遍认同, 但不能笼统地应用于所有北半球地区, 不同地区可能会存在不同的甚至相反的结论, 如北太平洋地区。

(4) 温带气旋是斜压不稳定的产物, 大气斜压性的变化是气旋活动路径和强度变化的一个重要原因。分析表明两个温带气旋主要活动区 400 hPa 最大 Eady 增长率的 EOF 第一模态的空间分布和时间序列同各自气旋活动频率的 EOF 第一模态的空间分布和时间序列非常相似, 即北太平洋地区较高纬度大气斜压性减弱而较低纬度大气斜压性增强, 北大西洋/北美地区较高纬度大气斜压性增强而较低纬度大气斜压性减弱。大气斜压性的这种变化可能分别造成了北太平洋地区气旋活动和风暴轴的南移增强和北大西洋/北美地区的北移增强, 因而这也从另一个方面支持了本文对温带气旋活动和风暴路径年代际变化的分析。

参考文献 (References)

- Alpert P, Neeman B U, Shay-El Y. 1990. Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data [J]. *Tellus*, 42A (1): 65–77.
- 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, Wallace J M, Lau N C, et al. 1977. An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (7): 1040–1053.
- Blender R, Fraedrich K, Lunkeit F. 1997. Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic [J]. *Quart J. Roy. Meteor. Soc.*, 123 (539): 727–741.
- Blender R, Schubert M. 2000. Cyclone tracking in different spatial and temporal resolutions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (2): 377–384.
- Chang E K M. 1993. Downstream development of baroclinic waves as inferred from regression analysis [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50 (13): 2038–2053.
- Chang E K M, Fu Y F. 2002. Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity [J]. *J. Climate*, 15 (6): 642–658.
- Charney J G. 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 4 (5): 135–162.
- Eady E T. 1949. Long waves and cyclone waves [J]. *Tellus*, 1 (3): 33–52.
- Geng Q Z, Sugi M. 2001. Variability of the North Atlantic cyclone activity in winter analyzed from NCEP-NCAR reanalysis data [J]. *J. Climate*, 14 (18): 3863–3873.
- Green J S A. 1960. A problem in baroclinic stability [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 86 (368): 237–251.
- Haak U, Ulbrich U. 1996. Verification of an objective cyclone climatology for the North Atlantic [J]. *Meteor. Z.*, 5: 24–30.
- Hodges K I. 1994. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (11): 2573–2586.
- Hodges K I. 1995. Feature tracking on the unit sphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (12): 3458–3465.
- Hodges K I. 1996. Spherical nonparametric estimators applied to the UGAMP model integration for AMIP [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (12): 2914–2932.
- Hoskins B J, Valdes P J. 1990. On the existence of storm-tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (15): 1854–1864.
- Hoskins B J, Hodges K I. 2002. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (6): 1041–1061.
- 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.
- 胡增臻, 黄荣辉. 1998. 冬季菲律宾周围对流活动与北太平洋风暴轴联系的数值模拟 [J]. *大气科学*, 22 (1): 46–56.
- Hu Zengzhen, Huang Ronghui. 1998. Simulation study of the connection between convective activities around the Philippines and the storm track in the North Pacific in winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (1): 46–56.
- Lambert S J. 1988. A cyclone climatology of the Canadian Climate Centre general circulation model [J]. *J. Climate*, 1 (1): 109–115.
- Lee S S, Lee J Y, Wang B, et al. 2011. Interdecadal changes in the storm track activity over the North Pacific and North Atlantic [J]. *Climate Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-011-1188-9.
- Lefevre R J, Nielsen-Gammon J W. 1995. An objective climatology of

- mobile troughs in the Northern Hemisphere[J]. *Tellus*, 47A (5): 638–655.
- 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.
- Lindzen R S, Farrell B. 1980. A simple approximate result for the maximum growth rate of baroclinic instabilities [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37 (7): 1648–1654.
- Lionello P, Dalan F, Elvini E. 2002. Cyclones in the Mediterranean region: The present and the doubled CO₂ climate scenarios [J]. *Clim. Res.*, 22 (2): 147–159.
- Mccabe G J, Clark M P, Serreze M C. 2001. Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity [J]. *J. Climate*, 14 (12): 2763–2768.
- Mendes D, Souza E P, Marengo J A, et al. 2009. Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 100 (3–4): 239–250, doi: 10.1007/s00704-009-0161-6.
- Murray R J, Simmonds I. 1991a. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 39: 155–166.
- Murray R J, Simmonds I. 1991b. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II: Application to January and July general circulation model simulations [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 39: 167–180.
- Nie J, Wang P, Yang W C, et al. 2008. Northern hemisphere storm tracks in strong AO anomaly winters [J]. *Atmospheric Science Letters*, 9 (3): 153–159.
- Orlanski I, Chang E K M. 1993. Ageostrophic geopotential fluxes in downstream and upstream development of baroclinic waves [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50 (2): 212–225.
- Pinto J G, Spanghel T, Ulbrich U, et al. 2005. Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: Individual tracks and climatology [J]. *Meteor. Z.*, 14 (6): 823–838.
- Serreze M C. 1995. Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic [J]. *Atmos.-Ocean*, 33 (1): 1–23.
- Serreze M C, Carse F, Barry R G, et al. 1997. Icelandic low cyclone activity: Climatological features, linkages with the NAO, and relationships with recent changes in the Northern Hemisphere circulation [J]. *J. Climate*, 10 (3): 453–464.
- Simmonds I, Murray R J, Leighton R M. 1999. A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST [J]. *Australian Meteorological Magazine, Special Edition*: 35–49.
- Sinclair M R. 1994. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122(10): 2239–2256.
- Wang Xinmin, Zhai Panmao, Wang Cuicui. 2009. Variations in extratropical cyclone activity in northern East Asia [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (3): 471–479.
- Yin J H. 2005. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L18701, doi: 10.1029/2005GL023684.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 133–143. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. *Principles of Synoptic Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 133–143.
- 朱伟军, 孙照渤. 2001. 涡动非地转位势通量对风暴轴维持的影响 [J]. *大气科学*, 25 (1): 71–78. Zhu Weijun, Sun Zhaobo. 2001. Effects of eddy ageostrophic geopotential fluxes on the maintenance of storm tracks [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (1): 71–78.
- 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.
- 朱伟军, 孙照渤, 闵锦忠, 等. 2000. 冬季赤道中东太平洋区域海面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.
- Zhang Yingxian, Ding Yihui, Li Qiaoping. 2012. A climatology of extratropical cyclones over East Asia during 1958–2001 [J]. Accepted in *Acta Meteorologica Sinica*, 26 (3): 261–277.