

张颖娴,丁一汇,李巧萍. ERA40 再分析资料揭示的北半球和东亚地区温带气旋生成频率变化[J]. 气象,2012,38(6):646-656.

ERA40 再分析资料揭示的北半球和东亚地区 温带气旋生成频率变化^{* 1}

张颖娴^{1,2,3} 丁一汇³ 李巧萍³

1 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044
2 中国气象科学研究院,北京 100081
3 国家气候中心,北京 100081

提 要: 本文利用欧洲中心再分析数据 ERA40 的 6 小时间隔海平面气压场和一种改进的客观判定和追踪方法研究 1958—2001 年北半球和东亚地区温带气旋生成频率的气候态、年代际变化及可能原因。结果表明:(1)北半球温带气旋的源地主要位于北美东部(落基山下游地区)、西北大西洋地区、格陵兰至欧洲北部地区、蒙古地区和日本至西北太平洋地区。大洋的西岸和陡峭地形的背风坡有利于大气斜压性的增强和正涡度的发展,从而有利于地面气旋的形成。(2)年、冬季和春季 30°~60°N 气旋生成数目呈现减少的变化趋势,60°~90°N 地区的气旋生成数呈增加的变化趋势。这在一定程度上支持了北半球风暴路径北移的观点。60°N 以南和以北的温带气旋数目同北极涛动指数(AO)分别呈现负相关和正相关,这种相关性在年、春季和秋季最为显著。(3)1958—2001 年东亚地区的年气旋数目呈现明显的年代际变化。20 世纪 60 年代至 80 年代中期 40°~60°N、80°~140°E 地区气旋数目呈增加趋势,而 80 年代中期之后温带气旋数目则锐减,主要原因是 80 年代以后该地区大气斜压性减弱,更高纬度地区的大气斜压性增强,从而导致了气旋源地的北移。在较低纬带的 20°~40°N、110°~160°E 地区气旋数目线性增加,这主要是由于位于 40°~55°N 的北太平洋风暴轴有向低纬度偏移的变化趋势造成的。

关键词: 温带气旋, 客观的判定和追踪方法, 气旋生成频率, 风暴轴

Cyclogenesis Frequency Changes of Extratropical Cyclones in the Northern Hemisphere and East Asia Revealed by ERA40 Reanalysis Data

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

1 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
3 National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: A climatology of cyclogenesis frequency of extratropical cyclones in the Northern Hemisphere and East Asia for the years of 1958 to 2001, and the interdecadal variation and possible causes, were analyzed by applying an improved objective detecting and tracking algorithm to the six-hourly sea-level pressure fields in the European Center for Medium-range Weather Forecasts reanalysis data ERA40. The result shows that: (1) major source regions of extratropical cyclones in the Northern Hemisphere are eastern North America (downstream areas of Rocky Mountains), Northwest Atlantic, Greenland-Northern Europe, Mongolia and Japan-Northwest Pacific. Atmospheric baroclinicity and positive vorticity are apt to intensify and develop in ocean west bank and leeward slope of steep orography, which makes for the

^{*} 国家重点基础研究计划(973)课题(2010CB428606 和 2010CB950404)及国家科技支撑计划课题(2009BAC51B01)共同资助
2011 年 11 月 8 日收稿; 2012 年 3 月 19 日收修定稿
第一作者: 张颖娴,主要从事气候变化及温带气旋方面的研究. Email: zhangyingxian0829@163.com

formation of ground cyclones. (2) The cyclogenesis number of annual, spring and winter indicated a decrease trend in the region of 30° — 60° N and an increase trend in the region of 60° — 90° N, which supports the viewpoint of the northward shift of storm tracks in the Northern Hemisphere. The cyclone number also had a negative and positive correlation with Arctic Oscillation index (AO) in the south and north of 60° N respectively, especially for annual, spring and autumn. (3) The annual cyclone number in East Asia from 1958 to 2001 indicated obvious interdecadal variations. The cyclone number increased from 1960s to mid 1980s but reduced after mid 1980s in the region of 40° — 60° N, 80° — 140° E. This is because atmospheric baroclinicity weakened in this region, while strengthened in the higher latitude region, resulting in the northward shift of cyclone source region. There is a linear increased trend of cyclone numbers in the lower latitude region of 20° — 40° N, 110° — 160° E, mainly because the North Pacific storm track, located in 40° — 55° N, had a shift trend to lower latitudes.

Key words: extratropical cyclones, objective detecting and tracking method, cyclogenesis frequency, storm track

引 言

温带气旋是出现在南北半球中高纬度地区具有斜压性的低压涡旋,在全球大气环流中起着重要的作用,热带和极地之间的热量、水汽和动能传输,很大部分都依靠温带气旋的移动和发展来实现。受斜压不稳定的驱动,温带气旋及其锋面系统能够造成明显或激烈的天气现象,如极端温度、极端降水、强风暴和风暴潮^[1-2]等气象灾害,造成生命和财产的巨大损失。温带气旋的爆发性发展还可能会对一些基础性设施产生灾害隐患^[3]。我国地处东亚大陆,受东亚温带气旋影响剧烈,其中北方气旋活动时常伴有冷空气的侵袭,降温、风沙、吹雪和霜冻等天气现象随之而来;南方气旋则会带来大风和暴雨。东亚气旋的活动范围广泛,其移动和发展带来的影响能从我国内陆一直延伸至西北太平洋的辽阔海域。因此研究温带气旋的气候特征、活动规律和变率趋势对理解北半球,尤其东亚地区的天气、气候变化以及极端气候事件具有重要的意义。

早在 100 多年前,菲茨洛依就对温带气旋地面气流结构作了较真实的描述。到了 20 世纪 30 年代,由于高空观测网的建立,以及发现了高空波动及高空波动与温带气旋之间的联系,使得气象学家对温带气旋的发生发展、大尺度结构以及能量收支等有了较深入的认识^[4]。对于温带气旋气候学的研究,早期的学者主要依靠人工主观判断来进行统计分析。随着再分析数据和天气气候模式的发展,一些国外气象学家开始尝试用数值算法客观地判定和

追踪温带气旋,如通过识别并追踪单个气旋系统来分析其强度、发生频率或路径密度等。研究者一般将海平面气压场的局地最小值或对流层低层涡度场的局地最大值定义为温带气旋的中心^[5-7]。将海平面气压场的局地最小值作为判定温带气旋的指标会漏掉一些小尺度的系统^[8],这些小尺度系统往往出现在快速移动的气旋过程中,或气旋的生成和消亡阶段^[9-10]。相比而言,局地最大涡度指标可以判定到小尺度的系统,但局地涡度最大值有时同局地气压最小值并不一致,并且这种方法会判定到一些人工识别中不存在的系统,另外高分辨率的涡度场又包含较多的噪声,也不利于气旋的识别。温带气旋的追踪通常将当前时刻客观判定的温带气旋系统分配给下一时刻客观判定的温带气旋系统,这种分配需要在一定区域内搜索最可能的下一时刻客观判定的温带气旋系统。Alpert 等^[11]、König 等^[12]、Ueno^[7]和 Blender 等^[13]以当前时刻温带气旋位置为中心,择取一定的距离为半径,搜索下一时刻的温带气旋位置。Geng 等^[14]在所确定的半径内,搜索最近距离的温带气旋位置为温带气旋的移动路径,若搜索半径内没有客观判定的系统,则此温带气旋消亡。另外,Murray 等^[15]和 Haak 等^[16]将局地引导气流应用到了追踪温带气旋移动的研究中。

在过去,前人对北冰洋、北大西洋、北太平洋和地中海地区温带气旋的气候及变率特征进行了大量的研究。Serreze 等^[17]采用客观的判定和追踪办法对 1952—1989 年北冰洋地区的温带气旋活动进行了分析,结果表明冬季温带气旋活动频繁,最强的温带气旋系统基本上都出现在冰岛和挪威的海域,对

于温带气旋的变化来说,春季、夏季和冬季的温带气旋数目呈现出增加的趋势。对于北大西洋区域来说,Blender 等^[13]采用一种拉格朗日方法,利用欧洲中心的高分辨率资料,将 1990—1994 年北大西洋/欧洲地区的温带气旋路径分成了三类,即静止、沿纬圈移动和向北偏东方向移动。冬季静止温带气旋的数目呈增加的趋势,原因可能是气候变化引起的,但很大程度上也可能是分析资料修订引起的。另外 Geng 等^[14]采用客观方法和欧洲中心 1958—1998 年的再分析资料分析了冬季北大西洋温带气旋的密度、最大加深速率、移动速度和中心气压梯度的变化。结果表明这几十年冬季北大西洋温带气旋强度呈现增强的趋势,这种变化与对流层低层大尺度的斜压波及 NAO 有关。北大西洋的 SST 也会影响气旋的变化,但具体原因尚须进一步研究分析。北太平洋也是温带气旋非常活跃的地区,其中 Graham 等^[18]分析了过去 50 年北太平洋气旋的气候特征和变化情况。表明强温带气旋的频率和强度显著增加,与之相对应的 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 地面极端风速值也显著增加,阿拉斯加港湾的温带气旋型环流风速由西北风转为了西南风。加强的温带气旋活动明显是由于对流层上层风速的加强和北太平洋中部垂直风速切变的加大造成的。

早期对东亚温带气旋的认识也仅停留在统计工作上^[19-20],研究者使用有限年代的地面天气图资料来分析亚洲和西太平洋地区温带气旋的源地、路径和活动特点。近些年来,随着数值算法的发展,研究者开始将客观判定和追踪方法应用到东亚温带气旋的研究中^[21-23]。姚素香等^[22]利用 NCEP/NCAR 再分析数据和客观识别方法分析得到蒙古地区春季温带气旋活动频数存在明显的年代际变化,即 20 世纪 50 年代温带气旋活动频数较少,60 年代至 70 年代后期温带气旋活动频数较多,70 年代末至 2000 年又进入了一个温带气旋活动频数较少的时期。另外, Wang 等^[24]的研究还表明 1958—2001 年东亚北部地区温带气旋频数呈现南减北增的偶极子结构,这种变化特点与 110°E 两边的斜压锋区的北移有关。

以上的研究表明在全球气候变化的背景下,温带气旋确实呈现出了显著的变化,但不同地区又呈现出不同的变化特征,并且造成温带气旋活动变化的原因分析还存在许多的不确定性。因此本文尝试用改进的客观方法统计北半球和东亚地区温带气旋

生成频率的气候态和变率特征,并探讨温带气旋生成频率和源地位置的变化同极涡和大气斜压性之间的可能联系。

1 数据和方法

本研究基于欧洲中期预报中心(European Center for Medium-range Weather Forecasting, ECM-WF) 1958—2001 年的间隔 6 小时的再分析海平面气压场数据(ERA40, $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 水平分辨率)。温带气旋的客观判定和追踪方法以 Pinto 等^[8]、Murray 等^[15]和 Simmonds 等^[25]的客观方法为基础,并根据温带气旋的移动特点进行了改进。温带气旋的客观判定主要基于海平面气压的局地最小值和气压拉普拉斯 $[\nabla^2 p(x_i, y_i) = p_{xx} + p_{yy}]$ 的局地最大值,即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温带气旋的中心。将气压拉普拉斯值作为温带气旋的强度阈值,这样比取气压值更能保留生成和消亡阶段较强的温带气旋系统。设定高度阈值,即剔除海拔高度 1500 km 以上的温带气旋系统,这样做可以在一定程度上排除陆地上移动甚慢的局地热低压系统。

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温带气旋的移动路径,然后在估计的温带气旋移动位置周围搜索与其相关最大的真实存在的温带气旋作为温带气旋移动的真实路径,这里我们选取的权重系数体现了温带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温带气旋系统则该系统消亡,所有未被追踪的客观存在的温带气旋系统都定义为新生成的温带气旋,具体的公式和方法请参见 Zhang 等^[26]的详细描述。

以上追踪方法追踪出的温带气旋过程包括所有生命期的温带气旋过程,本研究只讨论探究生命期至少 1 天的温带气旋活动,这样考虑在一定程度上排除了局地的季节性热低压^[24]。另外,我们这里剔除了向西移动超过 5 个经度的虚假的气旋过程(经统计在所有追踪气旋过程中占 5% 左右),这样的考虑可以排除可能追踪到的热带气旋过程。本研究将追踪的温带气旋过程分为非移动性温带气旋(温带气旋生命期内移动的距离在 5 个经度以内)和移动

性温带气旋(非移动性气旋之外的气旋过程)^[26]。完成以上剔除和分类工作后,输出每一次温带气旋过程各时刻的各要素值,从而建立 1958—2001 年的北半球温带气旋数据库。

2 客观方法的检验

为了检验本文所采用的温带气旋的客观判定和追踪方法,我们查阅了中国气象局气象信息中心的历史天气图并从中 44 年中随机抽取了 4 年(1965、1971、1986 和 1998 年)来人工追踪温带气旋过程。人工追踪的范围为 25°~65°N、65°~135°E,并且只追踪生命期 1 天以上的有锋面且闭合的气旋过程。比较客观方法和人工方法追踪的温带气旋的统计结果表明客观方法能够追踪到 80% 以上真实的温带气旋过程,总的温带气旋数目比人工方法偏多 10%~20%,两种方法获得的温带气旋个例的起始日期会有小的差别。客观方法同人工方法之间差异的可

能原因请参看 Zhang 等^[26]的详细分析,这里不再展开讨论。

我们将 2.5°×2.5°格点范围内温带气旋生成的次数定义为气旋的生成频率,图 1 呈现的是东亚地区温带气旋生成频率客观结果和人工结果的比较,其中人工方法获得结果引自张培忠等^[27]。从图 1a 可以看到东亚地区有 2 个明显的温带气旋生成区,一个位于贝加尔湖以南的蒙古地区,另一个位于我国东南沿海至日本以东地区。这两个地区生成的温带气旋即传统意义上所说的北方气旋和南方气旋^[19]。同人工方法获得的结果(图 1a)相比,客观方法获得的温带气旋生成频率的空间分布(图 1b)清楚地体现了北方气旋和南方气旋的气旋生成区,这表明了客观方法能够较精确地反映温带气旋生成位置的气候特征。同时也注意到,客观方法判断得到的较高纬度温带气旋的生成频率比人工方法获得的频率值偏高,这可能是由于高纬度地区再分析数据的气压值比实际值偏低造成的。

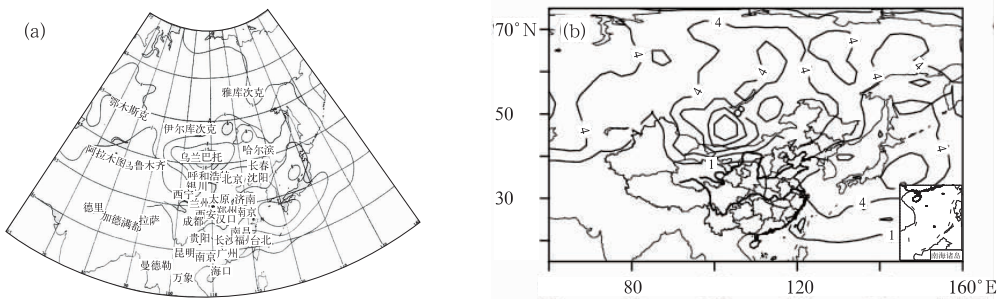


图 1 1958—1989 年东亚地区温带气旋生成频率的人工结果^[27]

(a)和客观结果(b)[单位:次数 10⁻²(2.5°×2.5°)⁻¹月⁻¹]

Fig. 1 Artificial results^[27] (a) and objective results (b) of cyclogenesis frequency of extratropical cyclone in East Asia from 1958 to 1989 [unit: cyclones 10⁻²(2.5°×2.5°)⁻¹mon⁻¹]

再来看温带气旋个例的追踪情况。图 2 分别描述了 2 个气旋追踪个例,其中第一个例子是一个生成于江淮地区的南方气旋过程(图 2a)。该气旋生成后向东北方向移动,穿过朝鲜半岛、日本海和日本,然后转向东南方向移动,最终消亡于西北太平洋上。客观追踪方法成功地捕捉到了此次气旋过程(图 2b),尤其是准确判定到了气旋移动由东北方向转为东南方向的突变。第二个例子是一个蒙古气旋(图 2c),该气旋生成于贝加尔湖以南地区,向东移动,经过内蒙古和东北地区,最后在鄂霍茨克海上消

亡。客观方法较好地追踪到了此次气旋过程(图 2d),并且客观方法判定到的气旋在移动过程中其中心气压值逐渐升高,气旋强度减弱,这和人工追踪的情况比较一致。同时我们发现追踪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在一天左右,生成和消亡的位置误差也不大。以上的分析可以得出本研究中采用的温带气旋的客观判定和追踪方法能够成功地再现温带气旋生成频率的气候态空间分布,并且能够追踪到个例温带气旋的移动过程。

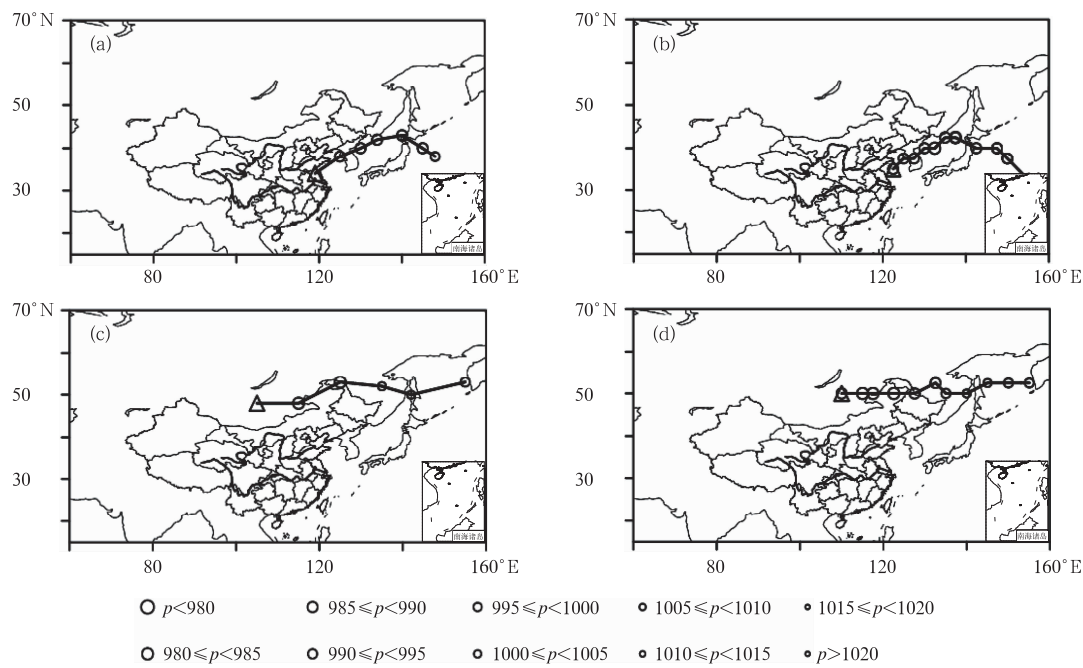


图 2 1986 年 7 月 16 日 0000 UTC (a,b)和 1998 年 5 月 4 日 0000 UTC (c,d)
温带气旋追踪的人工结果(a 和 c)和客观结果(b 和 d)
(气压单位:hPa, 三角形为气旋路径的起点)

Fig. 2 Artificial results (a, c) and objective results (b, d) of extratropical cyclone tracks
at 0000 UTC 16 July 1986 (a,b), and 0000 UTC 4 May 1998 (c,d)
(unit of pressure: hPa, triangle is the starting point of each track)

3 北半球温带气旋生成频率的变化

图 1 描述了东亚地区 2 个主要的温带气旋生成区,那么对于北半球来说,又是怎样的情况呢?图 3a给出了北半球主要的温带气旋生成区,分别位于北美东部(落基山下游地区)、西北大西洋地区、格陵兰至欧洲北部地区、蒙古地区和日本至西北太平洋地区。朱乾根等^[19]的研究表明,东亚地区温带气旋源地与东亚南北两支锋区是一致的,锋区中的大气处于斜压性不稳定状态,非常容易产生锋生锋消,从而造成地面气旋的发生。Eady^[28]用理想化的纬向斜压大气动能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 模态中衍生出的可以从一定程度上反映中纬度大气斜压性变化的指标被称作最大 Eady 增长率(maximum Eady growth rate, σ_{BI})^[29]

$$\sigma_{BI} = 0.31f\partial|v|/\partial zN^{-1}, \tag{1}$$

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。 σ_{BI} 越大则天气尺度波动越易发展,大气斜压性越强,反之亦然。这里我

们绘出了北半球对流层低层(775 hPa)最大 Eady 增长率的空间分布情况(图 3b),可以看到 σ_{BI} 大值区主要分布在亚洲大陆 40°~60°N 纬带地区、西北太平洋地区、北美东部至西北大西洋地区、北欧至北冰洋地区,另外地中海地区也对应有 σ_{BI} 的相对大值中心。Maheras 等^[30]和 Trigo 等^[31]的研究表明地中海地区是北半球温带气旋的次活动中心,和北半球的其他低压系统相比,地中海气旋强度较弱,空间尺度较小,生命期也较短(小于大西洋天气尺度系统)。比较图 3a 和 3b,我们发现温带气旋的主要源地都对应着 σ_{BI} 的大值区,大气更易斜压不稳定发展是那里地面气旋生成的主要原因。

Yin^[32]用 15 个耦合的气候模式集合的结果计算得到至 21 世纪末风暴路径呈现出向极地,向高层偏移加强的趋势,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。由于北半球的温度梯度的变化部分抵消了风暴轴向极地偏移的趋势,因此北半球风暴路径北移的变化趋势不如南半球显著^[32]。我们以 60°N 为界,分别绘出了 60°N 以南和以北地区温带气旋生成数目的年代际变化(图 4)。可以清楚地看到,两个纬带上的气

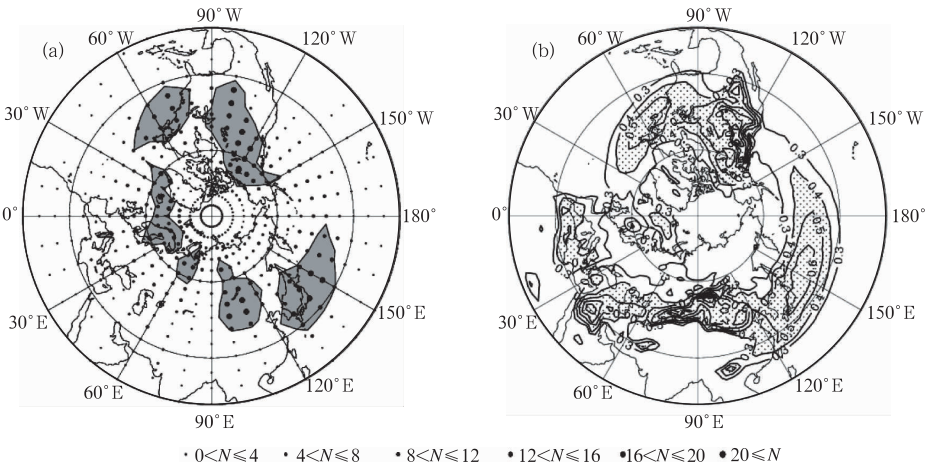


图 3 1958—2001 年北半球温带气旋的生成频率[a, 单位:次数 $(10^{\circ}\times 10^{\circ})^{-1}\text{年}^{-1}$] 和 775 hPa 的 σ_{BI} [b, 单位: d^{-1} ,点区的值大于 0.4 d^{-1}]

Fig. 3 Cyclogenesis frequency of extratropical cyclone [a, unit: extratropical cyclones $(10^{\circ}\times 10^{\circ})^{-1}\text{a}^{-1}$] and σ_{BI} at 775 hPa [b, unit: d^{-1} , dots represent values above 0.4 d^{-1}] in the Northern Hemisphere from 1958 to 2001

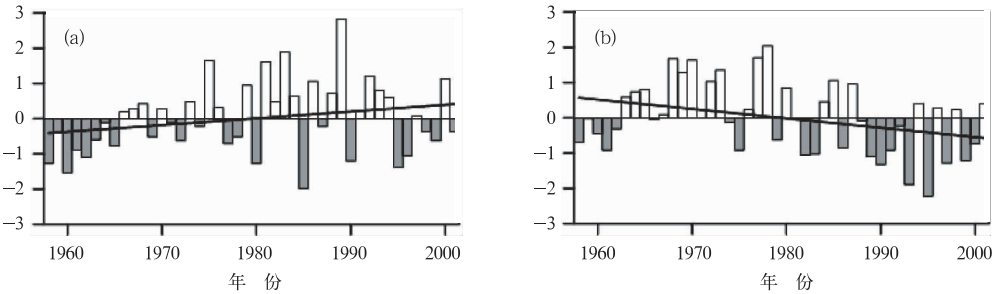


图 4 1958—2001 年北半球温带气旋生成数目的标准化时间序列
(a) $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 纬带, (b) $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 纬带
(直线为线性趋势)

Fig. 4 The standardized time series of extratropical cyclone formation numbers in Northern Hemisphere from 1958 to 2001
(a) $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ latitude band, (b) $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ latitude band
(The straight lines indicate the linear trend)

旋形成数目都有着明显的年代际变化; $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 纬带上的气旋数目在 20 世纪 70 年代末达到峰值,之后气旋数目锐减; $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 纬带上的气旋数目则在 80 年代末达到峰值,90 年代中期之后气旋数目又处于偏少的阶段。整体来看两个纬带上的温带气旋数目有着截然相反的线性变化趋势,即 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 纬带上的温带气旋生成数目呈现线性减少,并通过了显著水平 0.05 的 t 检验,而 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 纬带上的温带气旋生成数目则是线性增加的。温带气旋生成频数这一南减北增的变化特点在一定程度上体现了北半球风暴路径整体向极地偏移的变化趋势。

分析四季(春:3—5 月,夏:6—8 月,秋:9—11 月,冬:12 月至次年 2 月)的情况(图 5),除了夏季 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 纬度带上气旋数目有微弱线性减少的变

化趋势,其他三个季节,较高纬度带上气旋数目均呈现线性增加的变化趋势(图 5 中的虚线)。而对于较低纬度带的温带气旋来说,除了秋季呈现线性增加的变化趋势,其他季节气旋数目都有线性减少的变化趋势(图 5 中的实线)。因此春季和冬季,北半球温带气旋生成频数北增南减的变化特征比较显著,表明冬春季节北半球风暴路径具有较强的向极地偏移的变化趋势,这同 McCabe 等^[33]研究的北半球 11 月至次年 3 月的情况比较一致。同时我们发现北半球夏季时,虽然较高纬度气旋生成数目有弱的减弱趋势,但较低纬度的气旋数目减弱的特征更加显著。秋季时北半球较高纬度和较低纬度气旋数目以几乎相当的线性增率增加。

经研究分析发现,北半球 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 纬带上温

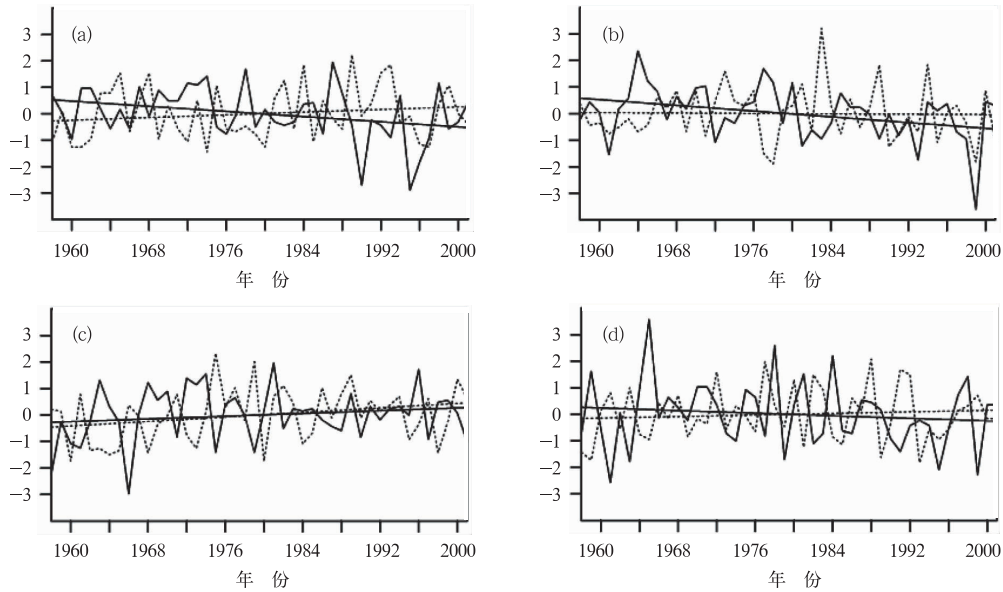


图 5 1958—2001 年北半球四季温带气旋生成数目的标准化时间序列
(a) 春, (b) 夏, (c) 秋, (d) 冬

(实线为 $30^{\circ}\sim60^{\circ}\text{N}$, 虚线为 $60^{\circ}\sim90^{\circ}\text{N}$, 直线为线性趋势)

Fig. 5 The standardized time series of seasonal extratropical cyclone formation numbers in the Northern Hemisphere from 1958 to 2001

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

(solid lines indicate $30^{\circ}\sim60^{\circ}\text{N}$ latitude band, dotted lines indicate $60^{\circ}\sim90^{\circ}\text{N}$ latitude band, straight lines indicate the linear trend)

带气旋生成数目的年代际变化(图 4a)和北半球 AO 指数的年代际变化(图 6a)非常一致,二者的相关系数达到 0.58,并通过了 0.01 显著水平的 t 检验。另外 AO 指数同 $30^{\circ}\sim60^{\circ}\text{N}$ 纬带上温带气旋数目的时间序列成负相关,相关系数为 -0.37 ,通过了显著性水平为 0.05 的 t 检验。AO 指数的正位相体现了极涡的加强和收缩,北半球温带气旋活动向极地偏移, AO 指数负位相时,极涡强度减弱,气旋活动南移。统计研究表明, AO 指数和温带气旋变化的这种联系在春季和秋季最为显著(图略)。

在第 1 节中我们将所追踪到的温带气旋分为了

移动性和非移动性的气旋,经统计发现移动性的气旋占气旋总数的 70% 以上。移动性的气旋数目和 AO 指数的时间序列的变化趋势非常一致,相关系数达 0.47,并通过了显著性水平为 0.01 的 t 检验(图 6)。Pinto 等^[8]的研究表明温带气旋和风暴路径的移动都呈现向极地偏移的特征,因此当 AO 指数为正,即北极涛动正位相时,有利于气旋的发展和移动,而 AO 指数为负,即极涡较弱时,则不利于气旋的发展和移动。统计四季的情况来看,秋季 AO 指数同移动性温带气旋变化的这种相关性最大(图略)。

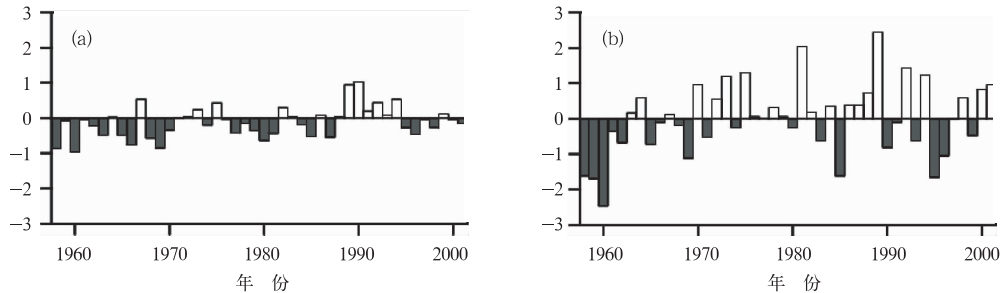


图 6 1958—2001 年 AO 指数(a)和北半球移动性温带气旋生成数目(b)的标准化时间序列
Fig. 6 The standardized time series of AO index (a) and formation numbers of mobile extratropical cyclones (b) in the Northern Hemisphere from 1958 to 2001

4 东亚地区温带气旋生成频率的变化

本部分将重点分析东亚地区的情况。从图 3 了解到温带气旋的源地对应着对流层低层(775 hPa)最大 Eady 增长率的大值区,即大气最易斜压不稳定发展的地区,因此我们尝试从斜压性指数的变化来解释气旋生成数目的变化。图 7a 为东亚地区 1980—2001 年相对于 1958—1979 年温带气旋生成数目的变化,实线表明气旋数目增加,虚线表明气旋数目减少。可以看到气旋数目减少的地区非常分散,而气旋数目增多的地区比较集中。气旋数目增多最显著的地区为蒙古地区,另外巴尔喀什湖,鄂霍茨克海以北的西伯利亚地区,我国东北部分地区,以及 40°N 以南的太平洋地区后 20 年的气旋数目也略多于前 20 年。从图 7b 中的描述可以看到蒙古南部地区的斜压指数显著增强,即大气更易斜压不稳定发展,从而可能导致了图 7a 中该地区气旋数目的增

加。巴尔喀什湖、鄂霍茨克海以北的西伯利亚地区和 40°N 以南的太平洋地区 Eady 斜压性指数也呈现增强的趋势,较好地对应着这些地区温带气旋数目的增加。同时也发现并不是所有气旋增加的地区都对应着 Eady 斜压性指数的增强,如蒙古北部和西部地区。这也说明了大气斜压性的变化只是造成气旋生成数目多寡的一个原因,不能用它来解释所有地区气旋的变化,更多更全面的机理研究还需要在以后的工作中加强。

根据图 1 中描述的东亚地区温带气旋生成频率的空间分布,我们了解到蒙古地区和我国东南沿海至日本以东地区为 2 个气旋的主要源地,因此提取分别生成于 40°~60°N、80°~140°E 和 20°~40°N、110°~160°E 的气旋过程,研究其年代际变化。图 8 中两个地区的温带气旋生成数目都呈现明显的年代际变化,其中 40°~60°N、80°~140°E 地区 20 世纪 60 年代至 80 年代中期温带气旋数目呈现波动中增加的变化趋势,而 80 年代中期之后温带气旋数目则

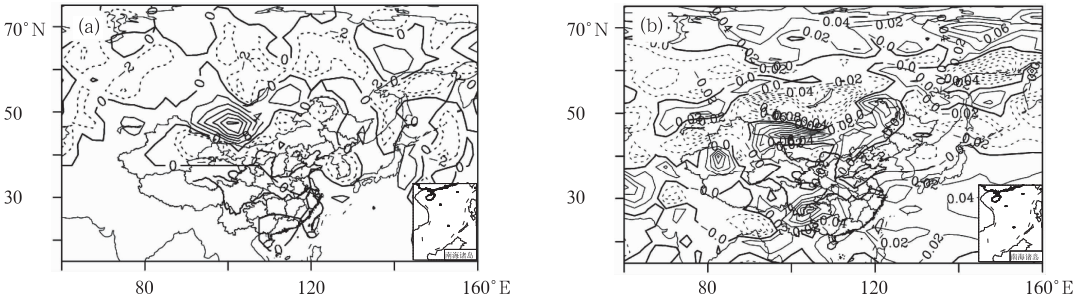


图 7 东亚地区 1980—2001 年相对于 1958—1979 年温带气旋生成数目

[a, 单位: 次数(2.5°×2.5°)⁻¹]和 775 hPa 的 σ_{EI} (b, 单位: d⁻¹) 的变化

Fig. 7 The differences of cyclone formation numbers [a, unit: extratropical cyclones (2.5°×2.5°)⁻¹] and σ_{EI} at 775 hPa (b, unit: d⁻¹) in East Asia between 1958—1979 and 1980—2001

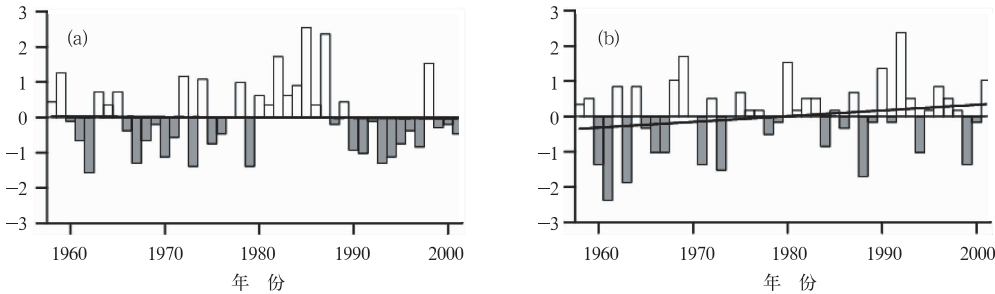


图 8 1958—2001 年东亚地区温带气旋生成数目的标准化时间序列

(a) 40°~60°N、80°~140°E, (b) 20°~40°N、110°~160°E

(直线为线性趋势)

Fig. 8 The standardized time series of extratropical cyclone formation numbers in East Asia from 1958 to 2001

(a) 40°—60°N, 80°—140°E; (b) 20°—40°N, 110°—160°E

(The straight lines indicate the linear trend)

锐减,1990 年之后该地区温带气旋数目处于偏少的阶段。 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 地区温带气旋生成数目整体呈现线性增加的变化趋势,1980 年之前气旋生成数目偏多的年份和气旋偏少年份相当,但偏少年份气旋数目的负距平要大于偏多年份气旋数目的正距平,所以 1980 年之前气旋生成数目平均来说偏少。1980 年之后不但气旋生成数目偏多年份多于气旋偏少年份,而且偏多年份气旋数目的正距平大于偏少年份气旋数目的负距平,因此 1980 年之后气旋数目平均来说偏多。

再来看东亚地区温带气旋生成平均纬向位置的南北移动情况(图 9),其中正值表明温带气旋平均生成位置偏北,负值则表明平均生成位置偏南。经统计 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 地区气旋生成的平均纬度为 50.4°N , $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 地区气旋生成的平均纬度为 31.6°N 。图 9a 表明 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 地区温带气旋的平均生成位置呈现出北移的线性变化趋势,特别是 20 世纪 80 年代之后

气旋源地北移的现象更为显著,气旋平均生成位置最南同最北之间的纬度差距为 2 个纬度左右。相反 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 地区温带气旋的平均生成位置呈现南移的线性变化趋势(图 9b),1980 年之前气旋平均生成位置偏北的年份较多,而 1980 年之后气旋平均生成位置偏南的年份较多,气旋平均生成位置最南和最北之间的纬度差距在 2~3 个纬度。从图 8a 中了解到 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 地区 80 年代中期之后温带气旋数目锐减,其原因很可能是气旋生成位置发生了北移,部分气旋生成位置北移至 60°N 以北,正如图 9a 中所描述的一样。图 1b 中我们可以看到西北太平洋上气旋的源地平均位于 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 纬带, $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 地区平均气旋生成纬向位置的南移现象(图 9b)极有可能使得平均位于 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 纬带上的气旋源地向低纬度偏移,从而导致了 40°N 以南地区气旋生成数目的增加。

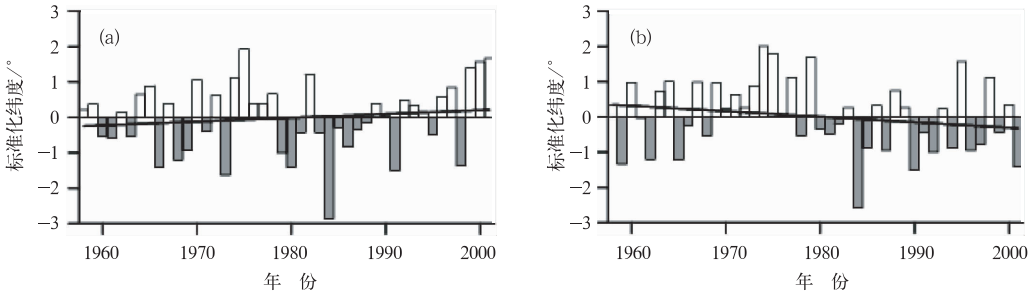


图 9 1958—2001 年东亚地区温带气旋生成的平均纬向位置的标准化时间序列
(a) $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$, (b) $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$
(直线为线性趋势)

Fig. 9 The standardized time series of zonal mean position of extratropical cyclone formation in East Asia from 1958 to 2001
(a) $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$, (b) $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$
(The straight lines indicate the linear trend)

为了解释 20 世纪 80 年代之后 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 地区温带气旋生成数目及气旋源地纬向位置的变化我们给出了该地区 775 hPa 斜压区平均纬向位置变化的时间序列(图 10a),其中斜压区的纬向位置用 σ_{BI} 值所在的纬度表示,正值表示其位置较 44 年的平均位置偏北,负值则表示偏南。可以看到对流层低层斜压区所处的位置并不是一成不变的,而是有明显的南北移动,特别是 80 年代以后其位置显著向高纬度地区偏移。这就说明了该地区大气斜

压性减弱,而较高纬度地区大气斜压性增强,不利于该地区气旋的形成,从而气旋源地北移。国内外学者的研究表明温带气旋的活动和风暴路径有着密切的关系,尤其在风暴轴最强的北太平洋和北大西洋地区,因此这里从北太平洋地区风暴路径的变化来解释 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 地区温带气旋生成频率的变化。将北太平洋地区($30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$)500 hPa 位势高度场天气尺度(2.5~6 天)滤波方差大于 20 dagpm^2 的所有格点的纬度平均定

义为北太平洋风暴路径的纬度指数,图 10b 描述的就是北太平洋地区风暴路径纬度指数随时间的变化序列。可以看到,北太平洋地区平均位于 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 的风暴路径(图略)整体呈现向低纬度偏移的

线性变化趋势,从而造成了 40°N 以南地区风暴轴强度增强,这在一定程度上解释了西北太平洋气旋源地南移,以及 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 地区温带气旋生成数目增加的现象。

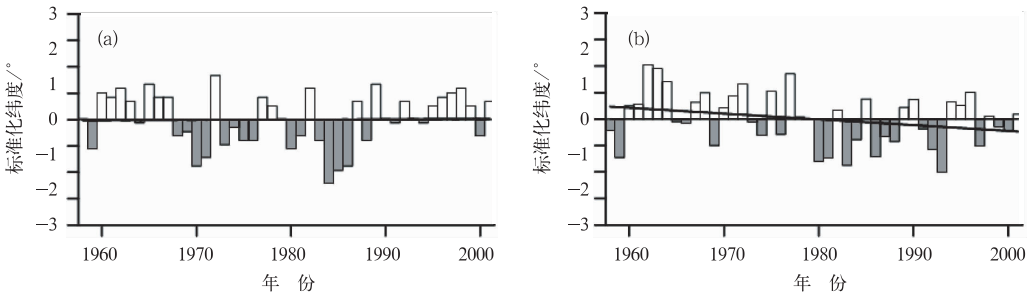


图 10 1958—2001 年 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 地区 775 hPa 斜压区(a)和北太平洋风暴路径(b)纬向位置的标准化时间序列
(直线为线性趋势)

Fig. 10 The standardized time series of zonal position of baroclinic zone at 775 hPa of $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ (a) and storm track in North Pacific (b) from 1958 to 2001
(The straight lines indicate the linear trend)

5 结论和讨论

本研究基于欧洲中心的再分析数据(ERA40 的海平面气压场、高度场、温度场和风速场),并采用客观的判定和追踪温带气旋的方法研究分析了 1958—2001 年北半球和东亚地区温带气旋生成频率的气候特征及其年代际变化,并在此基础上讨论了造成气旋生成频率变化的可能原因。主要结论如下。

(1) 温带气旋客观的判定和追踪方法基于海平面气压的局地最小值,这种客观方法能够追踪到 80% 以上真实的气旋过程。从文章中的温带气旋追踪个例可以看出,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在 1 天左右,生成和消亡的位置误差非常小。

(2) 北半球主要的温带气旋源地在北美东部(落基山下游地区)、西北大西洋地区,格陵兰至欧洲北部地区,蒙古地区和日本至西北太平洋地区。温带气旋的主要源地都对应着的 σ_{BI} (最大 Eady 增长率)的大值区,大气更易斜压不稳定发展是那里地面气旋生成的主要原因。另外气旋的源地更多地位于陡峭地形的下游地区(如:落基山下游地区和蒙古高原下游地区)和大洋的西岸,因为那里正涡度最易发生并增强,有利于地面气旋的生成。

(3) 以 60°N 为界,界限以南和以北温带气旋生成数目有着截然相反的线性变化趋势, $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 地区温带气旋生成数目线性减少,而 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 地区温带气旋生成数目则是线性增加的。温带气旋生成数目的这种北增南减的变化特点在一定程度上体现了北半球风暴路径向极地偏移的变化趋势。经统计,年、冬季、春季北半球温带气旋和风暴路径的这种变化特征最为显著。另外 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 、 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 地区温带气旋生成数目和 AO 指数分别成正相关和负相关,表明极涡加强和收缩时,北半球温带气旋活动向极地偏移,而极涡减弱和南移时,气旋活动向低纬度偏移。年、春季、秋季时,北半球高低纬度气旋数目同极涡强度呈反相关的特征最为显著。

(4) 东亚地区温带气旋数目增多的地区比较集中,增多最显著的在蒙古地区,另外巴尔喀什湖、鄂霍茨克海以北的西伯利亚地区、我国东北部分地区,以及 40°N 以南的太平洋地区后 20 年的气旋数目也略多于前 20 年。大部分气旋数目增加的地区对应着对流层低层大气斜压性指数的增强。 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 地区 20 世纪 60 年代至 80 年代中期温带气旋数目呈波动中增加,而 80 年代中期之后温带气旋数目显著减少。主要原因是 80 年代之后该地区大气斜压性减弱,强斜压区向高纬度移动,从而导致气旋源地的北移。较低纬度的 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 地区温带气旋生成数目整体呈线性增加,这

主要是由于平均位于 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 的北太平洋风暴路径有向低纬度偏移的变化趋势,从而导致了西北太平洋气旋源地的南移。

参考文献

- [1] 尹尽勇, 曹越男, 赵伟, 等. 一次黄渤海入海气旋强烈发展的诊断分析[J]. 气象, 2011, 37(12): 1526-1533.
- [2] 黄彬, 钱传海, 聂高臻, 等. 干侵入在黄河气旋爆发性发展中的作用[J]. 气象, 2011, 37(12): 1534-1543.
- [3] 蔡秀华, 陈辉, 曹鸿兴, 等. 影响靖宇地区温带气旋的统计分析[J]. 气象, 2009, 35(12): 83-87.
- [4] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 150-187.
- [5] Lambert S J. A cyclone climatology of the Canadian Climate Centre General Circulation Model[J]. J Climate, 1988, 1(1): 109-115.
- [6] Treut H L, Kalnay E. Comparison of observed and simulated cyclone frequency distribution as determined by an objective method[J]. Atmosfera, 1990, 3(1): 57-71.
- [7] Ueno K. Interannual variability of surface cyclone tracks, atmospheric circulation patterns, and precipitation patterns in winter[J]. J Meteorol Soc Jap, 1993, 71: 655-671.
- [8] Pinto J G, Spanghel T, Ulbrich U, et al. Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: individual tracks and climatology[J]. Meteor Z, 2005, 14(6): 823-838.
- [9] Murray R J, Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme[J]. Aust Met Mag, 1991a, 39(3): 156-166.
- [10] Hoskins B J, Hodges K I. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks[J]. J Atmos Sci, 2002, 59(6): 1041-1061.
- [11] Alpert P, Neeman B U, Shay-El Y. Climatological analysis of the mediterranean cyclones using ECMWF data[J]. Tellus A, 1990, 42(1): 65-77.
- [12] König W, Sausen R, Sielmann F. Objective identification of cyclones in GCM simulations[J]. J Climate, 1993, 6(12): 2217-2231.
- [13] Blender R, Fraedrich K, Lunkeit F. Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic[J]. Q J R Meteorol Soc, 1997, 123(539): 727-741.
- [14] Geng Q, Sugi M. Variability of the North Atlantic cyclone activity in winter analyzed from NCEP-NCAR reanalysis data[J]. J Climate, 2001, 14(18): 3863-3873.
- [15] Murray R J, Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II: Application to January and July general circulation model simulations[J]. Aust Met Mag, 1991b, 39(3): 167-180.
- [16] Haak U, Ulbrich U. Verification of an objective cyclone climatology for the North Atlantic[J]. Meteorol Z, NF, 1996, 5: 24-30.
- [17] Serreze M C, Box J E, Barry R G, et al. Characteristics of Arctic synoptic activity, 1952—1989[J]. Meteorol Atmos Phys, 1993, 51(3-4): 147-164.
- [18] Graham N E, Diaz H F. Evidence for Intensification of North Pacific Winter Cyclones since 1948[J]. Bull Amer Meteorol Soc, 2001, 82(9): 1869-1893.
- [19] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 133-143.
- [20] 张尚印. 北方气旋的若干统计特征及其发展的天气学分析[J]. 高原气象, 1984, 13(3): 83-89.
- [21] 王艳玲, 郭品文. 春季北方气旋活动的气候特征及与气温和降水的关系[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 391-397.
- [22] 姚素香, 张耀存, 周天军. 近 50a 春季东亚温带气旋活动频数的气候特征及其变化[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 317-323.
- [23] 王新敏, 邹旭恺, 翟盘茂. 北半球温带气旋的变化[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 154-157.
- [24] Wang Xinmin, Zhai Panmao, Wang Cuicui. Variations in extratropical cyclone activity in Northern East Asia[J]. Adv Atmos Sci, 2009, 26(3): 471-479.
- [25] Simmonds I, Murray R J, Leighton R M. A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST[J]. Aust Met Mag, 1999, Special Edition: 35-49.
- [26] Zhang Yingxian, Ding Yihui, Li Qiaoping. A climatology of extratropical cyclones over East Asia during 1958—2001[J]. Acta Meteor Sinica, 2011, Accepted.
- [27] 张培忠, 陈受钧. 亚洲及西太平洋地区温带气旋气候图集(1958—1989)[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 38.
- [28] Eady E T. Long waves and cyclone waves[J]. Tellus, 1949, 1(3): 33-52.
- [29] Lindzen R S, Farrell B. A simple approximate result for the maximum growth rate of baroclinic instabilities[J]. J Atmos Sci, 1980, 37(7): 1648-1654.
- [30] Maheras P, Flocas H A, Patrikas I, et al. A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution[J]. Int J Climatol, 2001, 21(1): 109-130.
- [31] Trigo I F, Davies T D, Bigg G R. Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region[J]. J Climate, 1999, 12(6): 1685-1696.
- [32] Yin J H. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate[J]. Geophys Res Lett, 2005, 32, L18701, doi:10.1029/2005GL023684.
- [33] McCabe G J, Clark M P, Serreze, M C. Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity[J]. J Climate, 2001, 14(12): 2763-2768.