

符娇兰, 董林, 康志明. 2013. 影响我国北方冬半年气旋的气候特征及年际变率 [J]. 大气科学, 37 (3): 679–690, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12055.
Fu Jiaolan, Dong Lin, Kang Zhiming. 2013. Climatology and interannual variability of extratropical cyclones in the winter half-year in northern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 679–690.

影响我国北方冬半年气旋的气候特征及年际变率

符娇兰 董林 康志明

国家气象中心, 北京 100081

摘 要 本文首先对气旋进行了客观定义, 实现了气旋的自动识别与跟踪算法, 利用 NCEP/NCAR 再分析资料建立了近 60 年 (1951~2010) 我国北方冬半年气旋活动数据集。对气旋的气候特征与年际变率进行了探讨。结果表明: 蒙古国中西部、雅布洛诺夫山脉东麓等为主要气旋源地; 蒙古国东南部、内蒙古东南部、松嫩平原是气旋活跃区; 内蒙古东南部、东北地区中北部为气旋消亡区与快速填塞区; 初春、仲秋季节气旋较活跃, 冬季气旋最少; 随季节推移, 气旋活动区域向南、向东推进; 气旋移动以偏东路径居多, 其次是东南、东北路径; 700 hPa 风场对气旋移动趋势具有较好的指示意义; 24 h 标准加深率大于 0.5 Bergeron 的快速发展气旋, 位于内蒙古东部、东北地区中北部、日本海中部等地; 爆发性气旋则主要位于日本海附近, 我国大陆极少; 极端最强气旋主要集中在 1980 年代以前的仲秋与初春; 1980 年代以来, 气旋频次相对较少, 强气旋有逐渐增加的趋势; 气旋频次减少与东亚中高纬度大气低层斜压性减弱有关。

关键词 北方气旋 自动识别与跟踪 气候特征 年际变率

文章编号 1006-9895(2013)03-0679-12

中图分类号 P46

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12055

Climatology and Interannual Variability of Extratropical Cyclones in the Winter Half-Year in Northern China

FU Jiaolan, DONG Lin, and KANG Zhiming

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Using the objective definition and auto-identification and tracking technique, the database of extratropical cyclones (ECs) in the winter half-year in northern China from 1951 to 2010 is built on the basis of the NCEP/NCAR reanalysis data. Furthermore, the climatology and interannual variability of ECs are studied. The results show that cyclogenesis is mainly focused in the central-west region of Mongolia and the eastern foot of Yablonoi Mountains. ECs are active mostly over southeast of Mongolia, southeast of Inner Mongolia, and the Songnen Plain; however, cyclolysis and rapid decay of ECs occur over the southeast of inner Mongolia and central-north of Northeast China. The frequency of ECs is the highest in early spring and middle autumn and the lowest in winter. With seasonal evolution, the active region of ECs moves eastward and southward. The eastward path is the most common track of ECs, after which comes the southeastward track, and then the northeastward one. Horizontal winds at 700 hPa can be considered as the steering flow of ECs. The rapid growth of ECs, whose standard deepening rate is greater than 0.5 Bergeron for 24 h, is mainly active over the east of Inner Mongolia, central-north of Northeast China, and the central Japan Sea. However, explosive ECs are spread mainly over the Japan Sea and marginally over the continent of China. The extremely strong EC events

收稿日期 2012-03-31, 2012-09-29 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41105030, 公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY(QX)2009416009

作者简介 符娇兰, 女, 1982 年出生, 高工, 主要从事灾害性天气诊断分析及预报技术研究。E-mail: bluelilyfly@163.com

occurred mostly in the early spring and mid autumn before the 1980s. However, frequency of ECs was relatively low, the frequency of extremely strong ECs has increased since the 1980s. The decrease of ECs is related to the weakening of the baroclinicity in the lower troposphere of Northeast Asia.

Keywords Extratropical cyclones in northern China, Auto-identification and tracking, Climatology, Interannual variability

1 引言

温带气旋是影响冬半年天气的主要地面天气系统之一, 气旋活动通常伴随着冷空气东移南下, 并带来强降水、大风、沙尘暴等天气(蒙丽娜等, 2009; 杨晓君等, 2010; 王丽娟等, 2011), 国内外已有很多关于气旋的统计工作。早在 20 世纪以前, 我国气象学者主要基于天气图资料对气旋的气候特征进行分析。分析认为北方气旋频次春季最多, 秋季次之, 冬季最少, 西伯利亚南部至我国东北地区山脉之间的平原和盆地为主要气旋源地, 气旋以东北、偏东和东南路径移动(张尚印, 1984; 林明智和杨克明, 1992)。1990 年代开始了对爆发性气旋的研究, 结果表明亚洲爆发性气旋主要位于西太平洋附近, 以冬季出现频次最多, 其次是春季(齐桂英, 1993; 张培忠等, 1993; 丁治英等, 1998)。仪清菊和丁一汇(1993)进一步分析指出西太平洋爆发性气旋的初始扰动有一半来自黄淮、江淮地区与渤海、黄海以及东海海区。

随着再分析资料的问世, 对气旋的气候特征, 尤其是年际、年代际变化研究取得了新的进展。Zhang et al. (2012) 研究显示西西伯利亚、蒙古国、东亚沿海为东亚主要气旋生区, 而爆发性气旋很少出现在东亚内陆。McCabe et al. (2001) 认为北半球中纬度地区地面气旋频次有减少趋势, 而高纬度地区气旋频次有所增加, 气旋强度在中高纬度地区均有增强的趋势。Wang et al. (2009) 也指出东亚地区中纬度与高纬度气旋频次变化存在相反趋势。Qian et al. (2002) 表明 1980 年代中期气旋活动频次发生了年代际变化, 蒙古国增暖、中国北方降温使得斜压带减弱是其可能原因。姚素香等(2003)也指出蒙古国、贝加尔湖东部地区春季气旋活动频数存在明显的年代际变化, 1970 年代末至 2000 年是气旋频数较少的时期。王艳玲和王黎娟(2011)则认为东亚中高纬度 500 hPa 经向环流在 1980 年代初期发生由强变弱的变化, 从而导致北方气旋经历了由多变少的显著突变。

然而上述研究对气旋活动的基本天气学特征

的气候分布关注较多, 对于其快速发展与填塞等异常特征的气候分布分析较少。冬半年气旋从蒙古国等地生成后东移影响我国北方地区, 其生命期、强度、移动路径等基本天气学特征直接决定了它在下游地区造成的天气及其影响程度, 而其天气学异常特征又与极端天气事件密不可分(姜学恭和沈建国, 2006; Mass and Dotson, 2010)。因此, 在分析气旋基本天气学特征的气候分布的基础上, 进一步分析其天气学异常特征的气候分布可为天气预报, 尤其是极端天气事件预报提供重要参考依据。此外, 已有研究表明北方沙尘暴频次减少可能与气旋活动减少有直接关系(Qian et al., 2002)。因此有必要进一步对影响我国北方的气旋、尤其是强气旋的年际变率进行分析, 从而可以为研究灾害性天气事件的气候变率与变化提供气候背景。本文将对影响我国北方气旋活动的基本天气学特征及其异常的气候分布、气旋与强气旋年际变率及其可能成因等进行分析。

2 资料及气旋识别与跟踪方法

2.1 资料

本文使用资料为 1951~2010 年 NCEP/NCAR 逐 6 小时再分析海平面气压、700 hPa 风场、850 hPa 温度场以及 500 hPa 高度场, 空间分辨率为 2.5×2.5 经纬度网格(Kalnay et al., 1996), 其中冬半年指 10 月至次年 3 月。

2.2 气旋识别算法

现有技术主要是利用海平面气压、1000 hPa 位势高度、850 hPa 涡度以及位涡等物理量场, 在一定假定条件下来实现气旋的识别(Wang et al., 2009; Raible et al., 2008; Sinclair, 1994; Hoskins and Hodges, 2002)。Hoskins and Hodges (2002) 认为利用涡度可识别出较小尺度的气旋, 因此可应用于气旋的早期发展阶段, 但由于涡度是由风场插值得到的, 插值计算引起的噪音会造成识别误差。因此本文选用海平面气压场对气旋进行客观识别。

图 1a 给出了气旋识别的区域范围, 其中黑细方框所包含的区域 ($35^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{E} \sim 135^{\circ}\text{E}$)

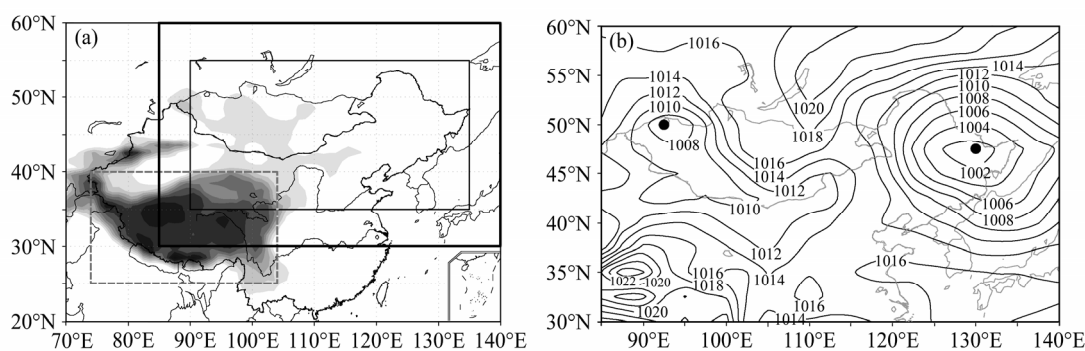


图 1 (a) 气旋识别的区域范围; (b) 1951 年 10 月 1 日 08 时 (北京时间) 海平面气压场分布 (黑色等值线, hPa) 及识别的气旋中心位置 (黑色实心圆)。图 a 中黑粗方框为气旋识别范围, 黑细方框为气旋中心活动区域, 虚线方框区表示高原地区的非识别区, 阴影区表示地形高度大于 1500 m
Fig. 1 (a) Regions related to extratropical cyclone (EC) activity; (b) sea level pressure (black lines, unit: hPa) and the identified cyclone center (black solid circle) at 0800 BT (Beijing Time) 1 October 1951. The black thick rectangle represents the identified region, the black thin one is the active region of the EC center, and the dashed one is the plateau region which is not be identified. The shaded area indicates the altitude is larger than 1500 m

为影响我国北方地区气旋中心的活动区域。根据气旋的天气学定义 (寿绍文, 2002), 本文对气旋的客观定义如下: a) 气旋中心海平面气压要低于其周围 8 个格点的海平面气压值; b) 气旋中心气压值不高于 1028 hPa; c) 以气旋中心为圆心的 5×5 个网格范围内平均气压梯度大于等于 $0.55 \text{ hPa}/100 \text{ km}$, 相当于气旋附近风速大于 5 m/s 。这些阈值均为经验性的数值, 主要是为了消除尺度小、距离较近、强度较弱的低压槽 (如倒槽) 等系统。该方法可能对于气旋发展初期非闭合的低压有漏识别的现象。由于高原海平面气压值误差较大, 该区域不参与识别, 因此也可能会导致高原边缘附近气旋识别的误差。此外, 资料分辨率较低, 对于小尺度的气旋也可能存在漏识别。从图 1b 可以看出, 识别到的天气尺度气旋与资料反映的低压分布是一致的。

2.3 气旋跟踪

在客观识别气旋的基础上, 本文利用了近邻查找法 (Blender et al., 1997) 对已识别的气旋进行路径跟踪。具体方法如下: a) 首先对资料中 t 时刻已识别到的气旋进行编号; b) 在 $t+1$ 时刻气旋矩阵内, 如果有气旋恰好与 t 时刻编号为 1 的气旋位置重合, 或者二者距离小于等于 700 km (6 小时移动距离, 即气旋移动速度小于 120 km/h), 且该气旋位于 1 号气旋的下游 (即气旋不能向西移动), 则将该气旋编号为 1。剩下未编号的气旋依次按照该方法进行跟踪。如果 $t+1$ 时刻未找到相应的气旋与 t 时刻的气旋配合, 则认为气旋被填塞, 该气旋编号终止; 或者 $t+1$ 中有气旋未能在 t 时刻的气旋中配对, 则认为新生的气旋, 并进行相应的编号。

经过气旋识别与跟踪, 建立了一套 1951~2010

年冬半年北方气旋资料集。该资料集包含逐年气旋总个数, 每个气旋的编号、活动时间、生命周期、移动路径、气旋中心气压值等信息。本文分析均基于该数据集。

2.4 气旋路径分类方法

本文对气旋移动路径进行了简单分类。通过计算气旋初生时 (生命期的第一个时刻) 与气旋消亡时 (最后一个时刻) 的相对方位, 大致将影响我国冬半年的气旋移动路径分为 6 类: 稳定型 (稳定不动)、偏北 ($0^\circ \sim 22.5^\circ$, 从正北 (0°) 顺时针旋转)、东北 ($22.5^\circ \sim 67.5^\circ$)、偏东 ($67.5^\circ \sim 112.5^\circ$)、东南 ($112.5^\circ \sim 157.5^\circ$) 以及偏南 ($157.5^\circ \sim 180^\circ$) 路径。根据上述路径分类, 对近 60 年以来气旋移动路径进行统计分析, 并对同一源地不同移动路径的多个气旋个例进行合成分析, 探讨不同路径的引导气流特征。

2.5 相关定义

本文将加深率大于所有气旋标准加深率第 90% 百分位的气旋定义为快速发展气旋, 其加深率临界值为 0.5 Bergeron (1980 年, Sanders and Gyakum 在研究爆发性气旋时将 Bergeron 定为气旋加深率的单位)。同理, 将 24 h 气旋升压定义为填塞率。其中填塞率大于所有气旋填塞率的第 90% 百分位的气旋定义为快速填塞气旋, 其填塞率临界值为 $8.5 \text{ hPa}/24 \text{ h}$ 。为了进一步探讨气旋频次年际变化与大气斜压性的关系, 本文利用 850 hPa 温度水平梯度来表征大气斜压性, 并将其定义为大气斜压指数。

3 气旋活动的统计分布

一般而言, 气旋生命期较短, 其产生的影响也

相对较小。因此本文仅对生命周期超过 24 小时的气旋进行统计分析, 1951~2010 年冬半年满足上述条件的气旋共有 2249 个气旋。从图 2a 可以看出, 影响我国北方冬半年的气旋中心最低气压值呈高斯分布。平均最低气压值为 1005 hPa, 最大、最小气压值分别为 1027.9 hPa、974.3 hPa。其中气旋中心最低气压值位于 1005~1015 hPa 之间频次最多

(约 70%), 中心气压值低于 1000 hPa 气旋约 20% 左右, 即中心气压低于 1000 hPa 的气旋属于极端较强的气旋。从近 60 年来前 10 个极端最强气旋的统计可以看出(表 1), 极端强气旋气压值均低于 980 hPa, 而且主要发生在仲秋(10 月)与初春(3 月), 这与该季节冷暖空气均活跃, 大气斜压不稳定较强有关。同时较强气旋主要位于我国东北地区北部至

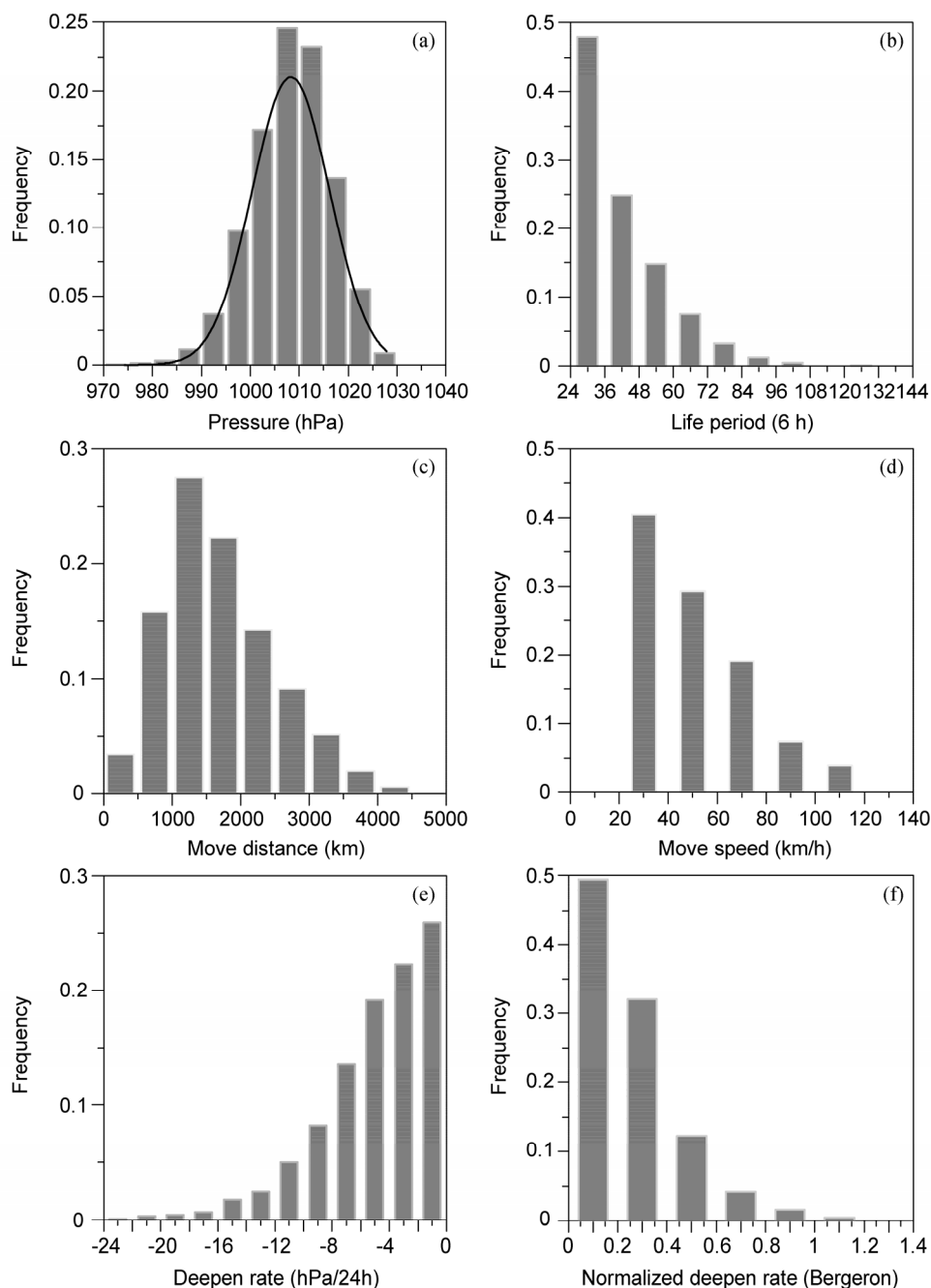


图 2 1951~2010 年冬半年影响我国北方地区气旋天气学特征的统计特征: (a) 气旋中心最低海平面气压值(黑色曲线为高斯拟合); (b) 气旋生命周期; (c) 气旋生命期内移动距离; (d) 气旋 6 h 平均移动速度; (e) 气旋 24 h 加深率; (f) 气旋 24 h 标准化加深率

Fig. 2 The statistical distribution of synoptic characteristics of ECs in northern China in winter half-year from 1951 to 2010: (a) Minimum central sea level pressure (the black line indicates the Gauss fitting); (b) life period; (c) move distance; (d) average move speed; (e) deepen rate in 24 h; (f) standard deepen rate in 24 h

远东地区西南部。气旋东移至上述地区后海陆热力差异加大致使锋区加强，气旋后部冷空气与沿海地区海洋暖湿空气共同影响使得气旋加强发展。此外，1980 年代以前是极端强气旋的多发期，这可能与极端气旋的年际变率有关，后续有进一步的分析。

表 1 1951~2010 年冬半年最强前 10 个气旋统计
Table 1 The statistics of the top ten strongest extratropical cyclones in wind half-year from 1951 to 2010

排序	中心气压 (hPa)	生命周期 (6 h)	发生时间		发生位置	
			年份	月份	经度(°E)	纬度(°N)
1	974.3	7	2003	3	127.5	52.5
2	974.5	10	1970	3	122.5	52.5
3	975.2	7	1980	10	132.5	45.0
4	975.3	9	1962	3	125.0	52.5
5	977.3	5	1980	11	132.5	52.5
6	978.1	15	1955	3	112.5	50.0
7	978.6	7	1968	3	130.5	50.0
8	979.4	13	1966	10	132.5	50.0
9	979.4	12	1957	3	125.0	50.0
10	980.5	9	1988	3	125.0	50.0

大部分气旋生命周期为 1~2 天，其中约有 30% 气旋生命周期能达到 2 天以上，部分气旋生命周期甚至超过了 5 天（图 2b）。生命周期达到 5 天以上气旋主要活跃于秋季（表略）。该季节大气斜压性较强，有利于气旋生命期的维持。从气旋整个生命周期的移动距离可以看出（图 2c），约 80% 的气旋移动距离大于 1000 km，最长甚至可以达到 4000 km 以上。如果不考虑气旋移动中的南北摆荡，此类气旋在蒙古国西部生成后，最远可移动至远东地区，移动过程中自西向东影响我国北方大部分地区。气旋移动速度在 20~40 km/h 之间的气旋个例最多，其中移动速度小于 20 km 约 15% 左右，最快的速度可达 100 km/h 以上（图 2d），约占 3% 左右。

在 24 h 内，50% 左右的气旋变压小于 4 hPa，降压达到 10 hPa 以上仅占总数的 10% 左右，最大降压大于 22 hPa，可见降压达到 10 hPa 以上为气旋极端发展事件（图 2e）。本文根据 Bergeron 公式（Sanders and Gyakum, 1980），进一步计算了气旋的加深率。分析表明：50% 以上的气旋 24 小时加深率仅为 0.2 Bergeron，加深率达到 0.5 Bergeron 以上的气旋仅为 10% 左右。根据定义，加深率达到 1 Bergeron 的气旋为爆发性气旋。分析显示：12 h 加深率达到 1 Bergeron 以上的气旋仅有 112 个，而 24 h 达到爆发性气旋标准仅有 30 个（图 2f）。可见，影响我国冬半年气旋的加深率较欧洲等地明显偏小。内陆地

区冬半年锋区较沿海偏弱，地形下垫面摩擦大等因素的影响都将制约气旋的快速发展。

极端爆发性气旋主要在日本海中部活跃（表 2）。下垫面的变化、以及日本暖流造成的海陆温差是爆发性气旋发生的主要原因（Sanders and Gyakum, 1980; Chen and Lu, 1997）。此外，12、1、3 月份为爆发性气旋的多发期。隆冬季节强盛的冷空气南下，配合海上暖湿空气为气旋快速加深提供了有利条件。图 3 给出前 10 个爆发性气旋气压随时间的变化，气旋发展初期气压变化并不显著，在爆发阶段，气压在 24 小时内变化均达到了 20 hPa 以上，之后开始缓慢减弱。

表 2 1951~2010 年冬半年最强爆发性前 10 个气旋统计
Table 2 The statistics of the top ten strongest explosive ECs in wind half-year from 1951 to 2010

排序	加深率 (Bergeron)	最低中心 气压 (hPa)	发生时间		发生位置	
			年份	月份	经度(°E)	纬度(°N)
1	1.63	990.6	1969	12	135	42.5
2	1.61	980.2	1996	1	135	42.5
3	1.32	989.0	2009	12	135	42.5
4	1.31	997.1	1964	1	132.5	40.0
5	1.25	987.0	2000	3	135	42.5
6	1.24	991.0	2001	1	135	42.5
7	1.22	985.6	1976	3	135	50.0
8	1.21	993.1	1976	10	135	37.5
9	1.21	986.8	1977	3	135	42.5
10	1.20	992.0	1970	12	135	40

4 气旋活动的时空分布特征

4.1 气旋频次的时空分布

从气旋活动频次的空间分布可以看出（图 4a），本文所分析的区域范围内均有气旋活动。但气旋主要活跃在蒙古国大部、华北北部、渤海湾西部与北部、东北大部、远东西南部、朝鲜半岛北部以及日本海等地。其中蒙古国东南部、内蒙古东南部、松嫩平原是气旋最活跃的区域。这与冬半年气候斜压锋区位于上述地区有关（图略）。中俄边界与黑龙江西北部、黑龙江东北部以及渤海湾气旋相对较多与气旋东北、偏东、东南路径相对应。气旋源地主要位于蒙古国大部、雅布洛诺夫山脉东麓、内蒙古中东部、东疆东部、甘肃河西及松嫩平原等地，其中蒙古国中西部产生的气旋最多（图 4b）。在气候锋区内，阿尔泰山—杭爱山—萨彦岭地形有利于背风坡气旋的产生（Chung, 1976）。除东疆东部、甘肃河西以外，气旋源地与早期查阅天气图的分析结

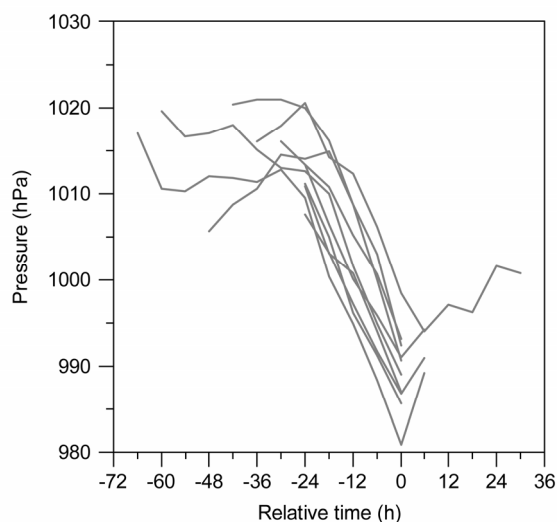


图3 前10个爆发性气旋的中心气压值变化(hPa)。横坐标表示相对于爆发点的时间,时刻0表示爆发点

Fig. 3 The central pressure variation of the top ten strongest explosive ECs. The abscissa represents the relative time to explosive point which is denoted by 0

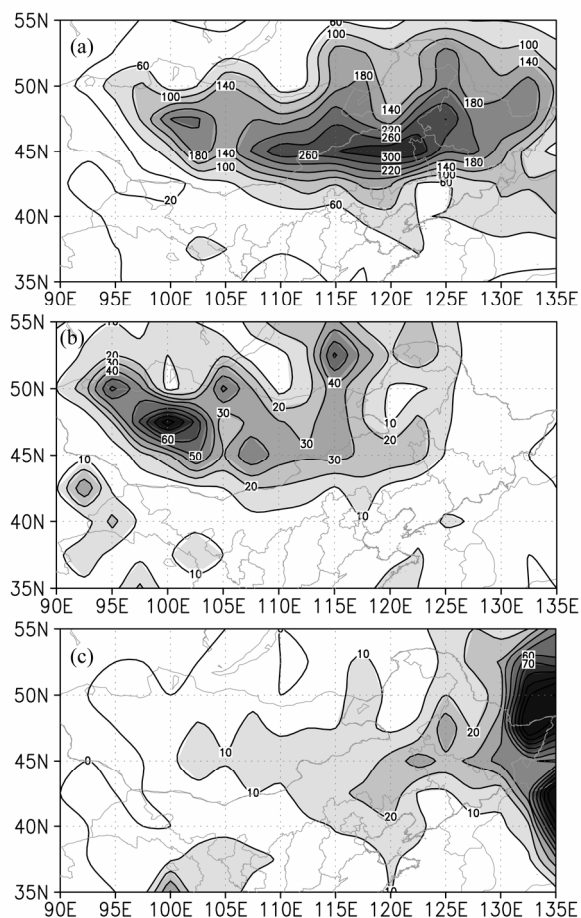


图4 1951~2010年冬半年气旋频次空间分布(个): (a) 气旋总个数; (b) 气旋源地; (c) 气旋消亡/移出

Fig. 4 The distribution of frequency of ECs in winter half-year from 1951 to 2010: (a) Total frequency; (b) cyclogenesis; (c) cyclolysis

果一致(林明智和杨克明, 1992)。而东疆东部、甘肃河西源地很有可能与蒙古国西部弱气旋式扰动加强后进入该地区有关。从图4c可以看出,一部分气旋在东移南下过程中开始消亡,主要位于蒙古国东南部、华北东北部、以及东北大部,其中内蒙古东南部、东北地区中北部为主要消亡区。大部分气旋东移出海,经黑龙江东北部东移进入日本海北部或经黑龙江东南部移入日本海中部。

图5给出了近60年冬半年逐月气旋活动频次的分布,可以看出10月份气旋频次最多,其次是3月份,而1、12月最少。也就是说春秋季节气旋较活跃,冬季气旋频次最少,这与已有研究结论基本一致(张尚印, 1984; 林明智和杨克明, 1992)。气旋频次区域分布也具有一定的季节变化特征(图6)。其中春、秋季节气旋活动的空间分布较为相似,与冬半年气旋总频次分布特征基本一致。随着季节推移,大气斜压区逐渐南压,气旋活动区域有向南、向东演变的趋势。隆冬季节冷空气较强,蒙古地区受庞大高压控制,致使气旋主要在内蒙古东部偏南地区以及东北地区中北部活动。

4.2 气旋强度及其移动速度的空间分布

快速发展气旋主要位于蒙古国东部、内蒙古东部、东北地区中北部、渤海湾、朝鲜半岛东北部、远东西南部以及日本海中部,其中日本海中部为多发区(图7a),这与表2的结论较为一致。气旋填塞主要位于蒙古国东部、内蒙古东部、华北东北部、东北大部以及远东地区西南部。其中快速填塞气旋主要位于内蒙古东南部、东北中北部等地(图7b、c)。Martin and Otkin (2004)分析表明气旋强降水潜热释放造成高层位涡负异常是气旋快速填塞的

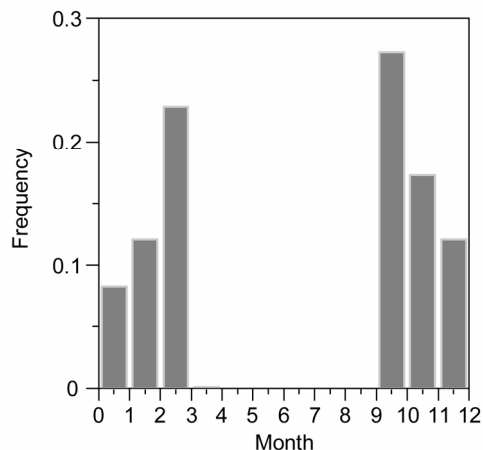


图5 1951~2010年冬半年气旋活动频次的月份统计分布

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the monthly frequency in winter half-year

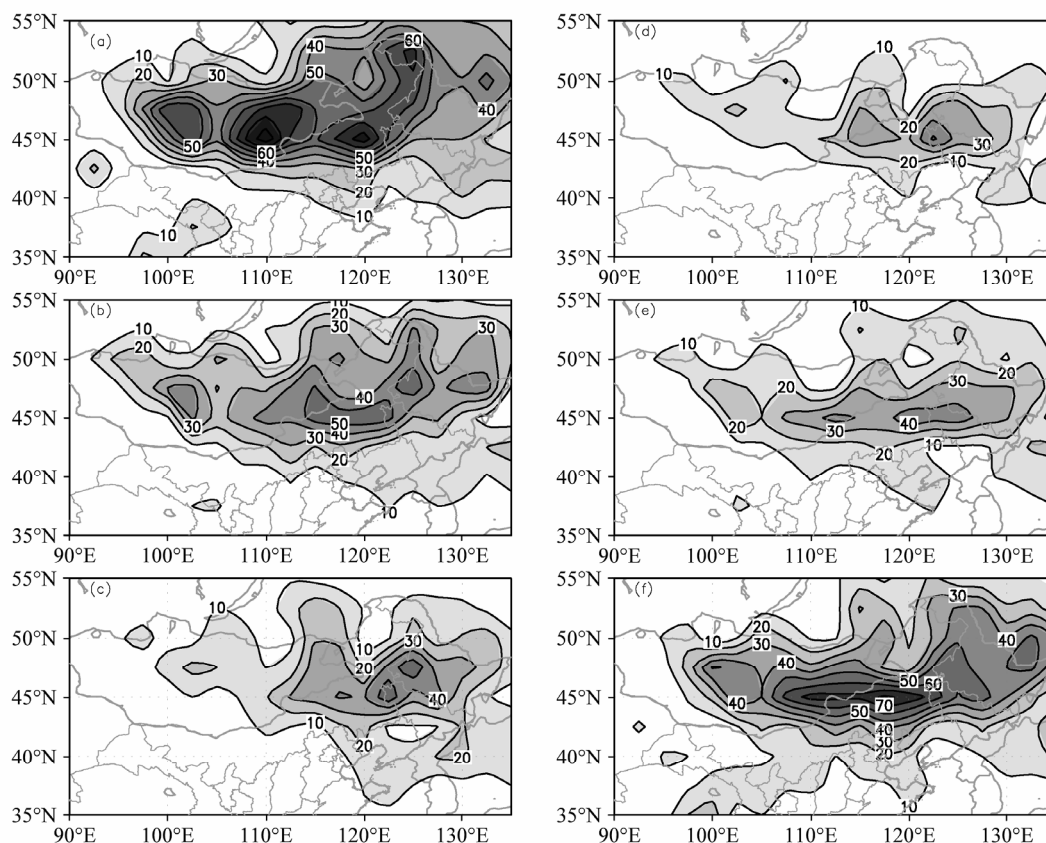


图6 1951~2010年冬半年逐月气旋频次的分布(个)。图(a)至图(f)依次为10月、11月、12月、1月、2月、3月

Fig. 6 The distribution of monthly frequency of ECs in winter half-year from 1951 to 2010: (a) Oct, (b) Nov, (c) Dec, (d) Jan, (e) Feb, (f) Mar

主要原因。对于上述地区气旋快速填塞的物理机理有待深入探讨。

从图8可以看出,气旋移动速度快、慢也具有明显的区域特征。本文将移动速度大于第90%百分位、小于10%百分位的移动速度分别定义为移动最快、最慢气旋。移动最慢气旋主要位于蒙古国东南部、内蒙古东南部以及日本海中部一线(图8a)。而移动最快气旋则主要位于蒙古国中北部、内蒙古东部、黑龙江西部以及远东西南部一带,相对移动较慢气旋位置偏北、偏东。从定性来看,气旋所处位置越偏北,其移动越快。但其移动快慢还与引导气流及其本身强度有关,对于这种区域差异的根本原因还有待进一步分析。

4.3 气旋路径分类

通过跟踪分析得到了2249个气旋的路径(图略)。根据气旋的分类统计得出,6类路径中以偏东路径的气旋居多,约占总数的65%以上,其次是东南(占25%)、东北(10%左右)路径。而稳定型以及偏南、偏北路径的气旋个例则相对较少(图9)。

接下来进一步分析3类主要路径的空间分布特征。

从图10左列可以看出,东北路径主要有四条通道:从蒙古国中东部生成后向中俄边境移动;从内蒙古中部生成后向远东西南地区移动;从黄淮地区移动过来的江淮气旋经渤海向日本海移动;西北涡在河西地区生成后向内蒙古及华北一带移动。偏东路径也有四条主要通道:从蒙古国中北部生成后向东移动至我国东北以及远东西南部地区;在雅洛诺夫山脉东麓生成后向远东西南部移动;内蒙古东南部生成后向日本海中北移动;在河西、东疆东部生成后向西北地区东北部移动;东南路径主要有三条通道:由雅洛诺夫山脉东麓生成后沿东北向日本海中部移动;蒙古国中西部生成后经内蒙古中部向华北、渤海湾等地移动;河西西部生成后沿河西走廊向西北地区东南部移动。从Qian et al. (2004)分析的春季850 hPa多年平均气旋路径可以看出,气旋主要由蒙古国向东、东南及东北方向移入我国,与本文的分析结果基本一致。所不同的是,本文进一步给出了三个主要气旋路径更详细的移动通道,及

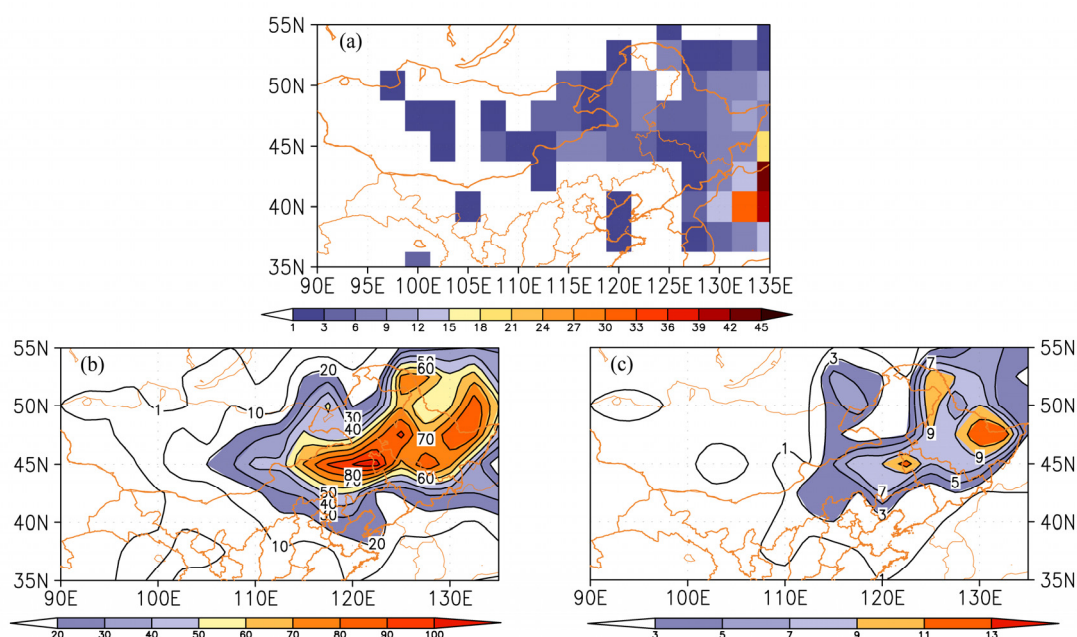


图 7 1951~2010 年冬半年快速发展及消亡的气旋频次空间分布 (个): (a) 快速发展气旋; (b) 气旋填塞; (c) 气旋快速填塞

Fig. 7 The distribution of frequency for rapid growth and decay ECs in winter half-year from 1951 to 2010: (a) Rapid growth cyclone; (b) decay cyclone; (b) rapid decay cyclone

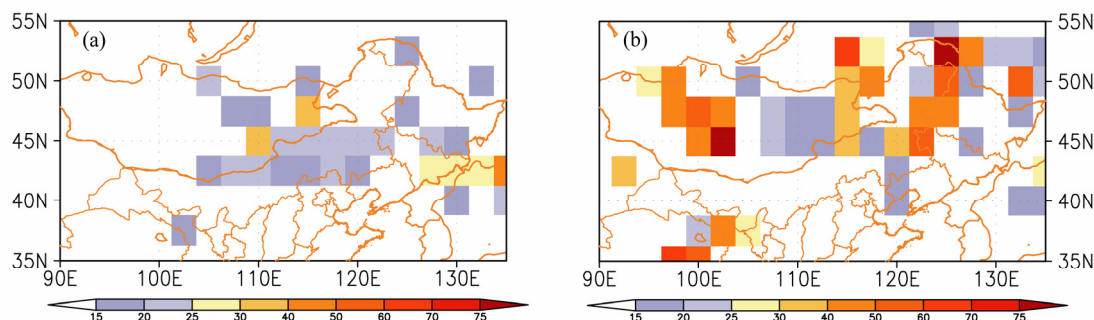


图 8 1951~2010 年冬半年气旋移动最缓慢 (a) 和移动最快速 (b) 的气旋频次分布 (个)

Fig. 8 The distribution of frequency of ECs in winter half-year from 1951 to 2010: (a) Cyclones with the fastest moving speed; (b) cyclones of the slowest moving speed

不同路径对应的气旋源地与消亡地。

为进一步分析不同路径的引导气流特征, 本文在蒙古国选取了气旋频次较多的一个点(47.5°N, 102.5°E), 对源地相同、路径不同的气旋个例的 700 hPa 风场进行合成分析。选取符合条件的东北路径有 6 个个例、偏东路径有 36 个个例, 而东南路径有 5 个个例。从图 10 右列上图可以看出, 东北路径气旋对应对流层中层为一个宽广的低槽区, 内蒙古及东北地区主要受较强的东南气流控制, 从而引导气旋以东北路径移动。而对应偏东路径, 700 hPa 风场则主要以平直西风气流为主, 经向风分量很小。对于东南路径气旋, 合成以后的 700 hPa 风场显示在东亚东部地区主要盛行西北风, 尤其是我国

东北地区、渤海湾等地偏北分量较大, 从而有利于气旋向东南方向移动。上述分析表明: 700 hPa 风场对气旋的移动趋势具有较好的指示意义。

5 气旋活动年际变化特征

进一步分析气旋的气候变率特征。从图 11a 可以看出, 20 世纪 60 年代末至 70 年代中期气旋频次较多。1970 年代末气旋频次达到最少, 1980 年代以来, 气旋频次处于一个相对较少的年代, 大部分年份气旋频次在平均值以下。这与过去的研究结论较为一致 (Wang et al., 2009; 姚素香等, 2003)。

同时, 已有研究指出北半球中高纬度强气旋均有增加的趋势 (McCabe et al., 2001; Lambert and

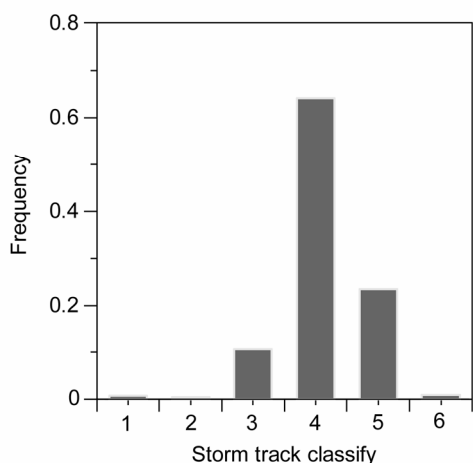


图9 1951~2000年冬半年气旋6类路径频次的统计分布。图中x坐标标注1至6分别表示稳定、偏北、东北、偏东、东南及偏南气旋移动路径

Fig. 9 The statistical distribution of frequency for six different cyclone tracks of ECs in winter half-year from 1951 to 2010. The numbers 1 to 6 of the x axis label represent the static, northward, northeastward, eastward, southeastward, southward cyclone tracks, respectively

Fyfe, 2006)。为进一步研究影响我国强气旋的年际变化特征, 本文将强气旋定义如下: 当气旋最低中心气压值低于 1951~2010 年所有中心气压值的第 30% 百分位, 气压临界阈值取为 1001.6 hPa。强气旋总体变化趋势与气旋总频次类似, 1960 年代至 1970 年代中期为强气旋的活跃期, 而 1970 年代中期至末期强气旋频次明显减少, 1981 年最少。1980 年代之后, 强气旋有逐渐增加的趋势, 这可能意味着由强气旋带来的极端风雨、降温等天气有增加的趋势。

进一步对影响我国气旋频次的减少成因进行探讨。研究表明东亚气旋频次与斜压锋区强度有关 (Wang et al, 2009; Qian et al, 2002)。通过分析气旋频次与大气斜压指数的相关可以看出 (图 12), 气旋频次与蒙古国以及新疆南部锋区具有显著的正相关关系。表明该区域锋区强度的变化直接影响着气旋的活动特征。进一步对比分析相关最高格点 (47.5°N, 107.5°E) 的斜压指数序列与气旋总频次序列可以看出 (图 11a), 斜压指数与气旋频次具有较好的年际以及年代际对应关系, 近年来大气斜压性在蒙古国等地处于相对较弱的阶段, 从而不利于气旋的发展。气旋与大气斜压性的年代际变化特征与我国气候的年代际变化特征相一致。已有研究表明, 我国气候的年代际变化与欧亚副热带地区对流层温度存在年代际尺度的变冷趋势有关, 且这种年

代际变化特征在不同季节均有体现 (宇如聪等, 2008; Zhou et al., 2009)。此外, 从气旋发展动力学特征可知, 降水潜热释放是强气旋发展的主要原因之一。Lambert and Fyfe (2006) 通过大气环流模式模拟指出全球变暖后水汽供应增多, 从而促使气旋内降水增强, 降水产生的潜热最终导致强气旋频次增加。1980 年代以来强气旋频次增加很有可能与全球变暖背景下气旋内降水增加产生潜热增强有关。

6 结论与讨论

在实现气旋客观识别、跟踪的基础上, 本文对气旋的气候特征进行了分析, 并进一步探讨了气旋年际变率及其可能成因。得到如下结论:

(1) 气旋中心最低气压值在 1005~1015 hPa 之间居多, 低于 1000 hPa 属于极端较强气旋。极端强气旋主要发生在 1980 年代的仲秋 (10 月) 与初春 (3 月)。50% 以上气旋 24 小时加深率仅为 0.2 Begeron, 加深率达到 0.5 Begeron 以上属于快速发气旋。极端爆发性气旋主要位于日本海中部, 气压在 24 小时内变化均超过 20 hPa 以上。

(2) 气旋源地主要位于蒙古国大部、雅布洛诺夫山脉东麓、内蒙古中东部、东疆东部、甘肃河西及松嫩平原等地, 其中蒙古国中西部产生的气旋最多。除东疆东部、甘肃河西以外, 上述气旋源地与早期查阅天气图的分析基本一致。气旋东移过程中在蒙古国东南部、华北东北部、以及东北大部逐渐消亡, 其中内蒙古东南部、东北地区中北部为主要消亡区。蒙古国东南部、内蒙古东南部、松嫩平原是气旋最活跃区。快速发展气旋主要位于蒙古国东部、内蒙古东部、东北地区中北部、渤海湾、朝鲜半岛东部、远东西南部以及日本海中部。快速填塞区域主要位于内蒙古东南部、东北中北部等地。

(3) 已有研究表明, 北方气旋春季最多, 夏秋季次之, 冬季最少。而对于冬半年逐月而言, 10 月份气旋频次最多, 其次是 3 月份, 而 1、12 月最少。随着季节推移, 气旋活动区域向南、向东移动, 这与大气斜压区的季节演变一致。

(4) 6 类路径中以偏东路径的气旋居多, 约占总数的 65% 以上, 其次是东南 (占 25%)、东北 (10% 左右) 路径。而稳定型, 以及偏南、偏北路径的气旋个例则相对较少。700 hPa 风场对气旋移动趋势具有较好的指示意义。

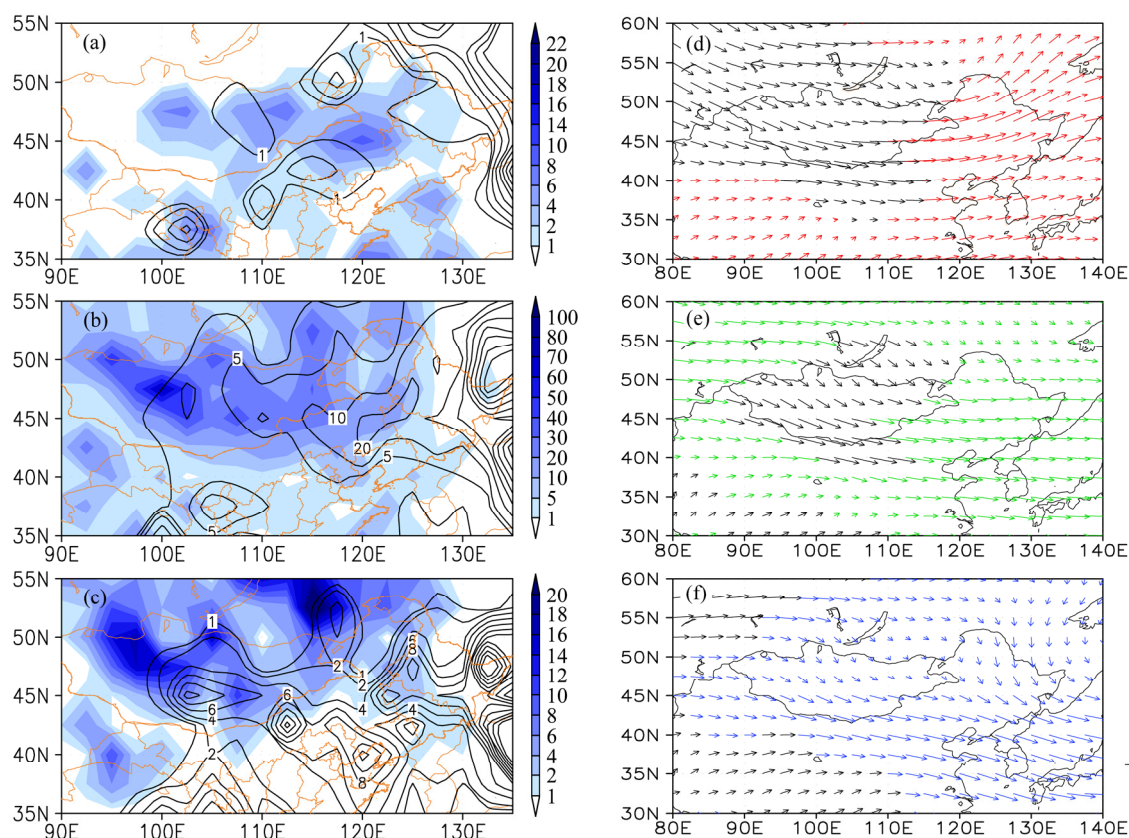


图 10 (a, b, c) 1951~2010 年冬半年气旋 3 类路径频次及 (d, e, f) 对应路径多个个例合成的 700 hPa 风场的空间分布。(a, d)、(b, e)、(c, f) 分别为东北、偏东及东南路径。(a, b, c) 阴影区表示 3 类路径的源地, 等值线则表示其相应的最终位置; (d, e, f) 红色箭头表示偏东南风, 绿色表示偏西风、蓝色箭头表示偏北风

Fig. 10 The distributions of (a, b, c) frequency for the three different tracks of ECs in winter half-year from 1951 to 2010 and (d, e, f) the corresponding composite 700-hPa wind fields. (a, d), (b, e), (c, f) represent northeastward, eastward, and southeastward tracks, respectively. (a, b, c) The shaded area and contour indicate the original and ending positions of the cyclone, respectively; (d, e, f) the red, green, and blue arrows represent the southeasterly, westerly, and northeasterly, respectively

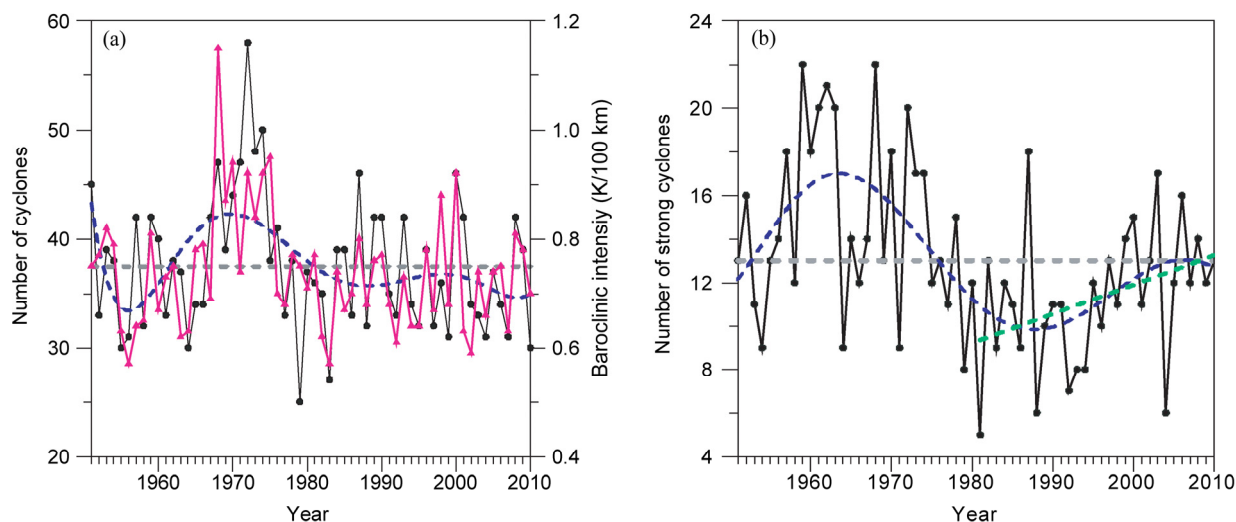


图 11 1951~2010 年冬半年气旋频次 (个) 时间序列: (a) 气旋总频次 (黑线) 及格点 (47.5°N, 107.5°E) 斜压强度指数 (粉红色线, K/100 km); (b) 强气旋频次 (黑线)。灰色虚线为多年平均值, 蓝色虚线为 7 次多项式拟合。图 b 绿色虚线表示 1981~2010 年线性拟合

Fig. 11 Time series of number of ECs in winter half-year from 1951~2010: (a) Total number (black line) and baroclinic strength index (pink line) at point (47.5°N, 107.5°E); (b) number of strong ECs (black line). The grey dashed line is the mean frequency from 1951 to 2010, the blue dashed line is the seventh-order polynomial curve fitting. The green dashed line indicates the linear fitting from 1981 to 2010 in Fig. b

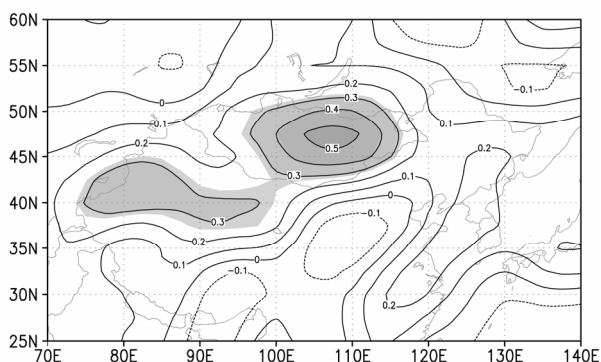


图 12 1951~2010 年冬半年气旋频次与同期 850 hPa 平均斜压强度指数相关分布。阴影区表示相关系数超过 0.05 的显著性水平检验

Fig. 12 Correlation between the frequency of extratropical cyclone and mean baroclinic strength index in winter-half year from 1951 to 2000. The shaded area indicates the correlation coefficient is exceeding the 0.05 significant level

(5) 1980 年代以来, 气旋总频次处于一个相对较少的年代, 强气旋有逐渐增加的趋势。气旋频次与蒙古国以及新疆南部锋区具有显著的正相关关系。近年来大气斜压性在蒙古国等地处于相对较弱的阶段, 从而抑制了气旋的频发。

综上所述, 本文所分析得到的统计结果与已有的研究基本一致, 同时通过对影响我国极端强气旋的年代际与季节分布、强气旋频次的年际年代际变化趋势, 气旋的天气学异常特征以及气旋移动路径及引导气流的分析, 揭示出了一些新的事实。然而, 强气旋频次变化趋势的可能物理成因等问题还有待进一步深入讨论与分析。同时, 本文所有分析主要基于 NCEP/NCAR 再分析资料。由于不同再分析资料所揭示的天气尺度系统的气候特征, 尤其是年际与年代际变化特征可能存在一定差异, 因此, 未来有必要利用其它再分析资料, 如 EAR-40、JRA-25 等资料进行对比分析, 进一步检验本文的分析结果。

参考文献 (References)

- Blender R, Fraderich K, Lunkeit F. 1997. Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123: 727–741.
- Chen G T J, Lu C F. 1997. On the climatological aspects of explosive cyclones over the western North Pacific and East Asia coastal areas [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 8 (4): 427–442.
- Chung Y S. 1976. On lee cyclogenesis and airflow in the Canadian Rocky Mountains and the East Asian Mountains [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 104: 879–891.
- 丁治英, 王劲松, 何金海. 1998. 爆发性气旋的统计研究 [J]. *南京气象*

- 学院学报, 21 (3): 424–431. Ding Zhiying, Wang Jinsong, He Jinhai. 1998. Statistical study of explosive cyclones [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 21 (3): 424–431.
- Hoskins B J, Hodges K I. 2002. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59: 1041–1061.
- 姜学恭, 沈建国. 2006. 内蒙古两类持续型沙尘暴的天气特征 [J]. *气候与环境研究*, 11 (6): 702–712. Jiang Xuegong, Shen Jianguo. 2006. The characteristic of weather factors in two types of sustained dust storm in Inner Mongolia [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (6): 702–712.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- Lambert S J, Fyfe J C. 2006. Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: Results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise [J]. *Climate Dyn.*, 26: 713–728.
- 林明智, 杨克明. 1992. 我国北方气旋的天气气候分析 [J]. *气象*, 18 (5): 20–26. Lin Mingzhi, Yang Keming. 1992. The synoptic and climatological characteristics of north cyclone in China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 18 (5): 20–26.
- Martin J E, Otkin J A. 2004. The rapid growth and decay of an extratropical cyclone over the central Pacific Ocean [J]. *Wea. Forecasting*, 19: 358–376.
- Mass C, Dotson B. 2010. Major extratropical cyclones of the northwest united states: Historical review, climatology, and synoptic environment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 2499–2527.
- Mccabe G J, Clark M P, Serreze M C. 2001. Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity [J]. *J. Climate*, 14: 2763–2768.
- 蒙丽娜, 隋迎玖, 刘大庆, 等. 2009. 一次爆发性气旋引发的罕见暴风雪过程分析 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 45 (4): 693–700. Meng Li'na, Sui Yingjiu, Liu Daqing, et al. 2009. Analysis on an unusual snowstorm event caused by explosive cyclone [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 45 (4): 693–700.
- 齐桂英. 1993. 北太平洋爆发性气旋的气候特征 [J]. *应用气象学报*, 4(4): 426–433. Qi Guiying. 1993. Climatic characteristics of explosive cyclone over the North Pacific Ocean [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 4 (4): 426–433.
- Qian W H, Quan L S, Shi S Y. 2002. Variations of the dust storm in China and its climatic control [J]. *J. Climate*, 15: 1216–1229.
- Qian W H, Tang X, Quan L S. 2004. Regional characteristics of dust storms in China [J]. *Atmos. Environ.*, 38: 4895–4907.
- Raible C C, Marta-Della P M, Schwierz C, et al. 2008. Northern Hemisphere extratropical cyclones: A comparison of detection and tracking methods and different reanalyses [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136: 880–897.
- Sanders F, Gyakum J R. 1980. Synoptic-dynamic climatology of the Bomb [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108: 1589–1606.
- Sinclair M R. 1994. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 2239–2256.
- 寿绍文. 2002. 天气学分析 [M]. 北京: 气象出版社, 北京, 97–120. Shou Shaowen. 2002. Synoptic Analysis (in Chinese) [M]. Beijing: China

- Meteorological Press, 97–120.
- 王丽娟, 赵琳娜, 寿绍文, 等. 2011. 2009年4月北方一次强沙尘暴过程的特征分析和数值模拟 [J]. 气象, 2011, 37 (3): 309–317. Wang Lijuan, Zhao Linna, Shou Shaowen, et al. 2011. Observation and numerical simulation analysis of the severe sand storm over northern China in April of 2009 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (3): 309–317.
- Wang X M, Zhai P M, Wang C C. 2009. Variations in extratropical cyclone activity in northern East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26: 471–479.
- 王艳玲, 王黎娟. 2011. 东亚地区北方气旋和南方气旋活动频数的时空特征 [J]. 气象与环境学报, 27 (6): 43–48. Wang Yanling, Wang Lijuan. 2011. Spatial-temporal characteristics of activity frequencies of northern cyclone and southern cyclone in East Asia [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 27 (6): 43–48.
- 杨晓君, 何金海, 吕江津, 等. 2010. 对一次温带气旋引发渤海风暴潮过程的数值模拟 [J]. 气象与环境学报, 26 (4): 62–66. Yang Xiaojun, He Jinhai, Lü Jiangjin, et al. 2010. Numerical simulation on storm surge caused by extratropical cyclone in Bohai Sea, China [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 26 (4): 62–66.
- 姚素香, 张耀存, 周天军. 2003. 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, 26 (3): 317–323. Yao Suxiang, Zhang Yaocun, Zhou Tianjun. 2003. Climatic Characteristics of extratropical cyclone frequency and its variations over East Asia during recent 50 years in spring [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26 (3): 317–323.
- 仪清菊, 丁一汇. 1993. 东亚和西太平洋爆发性温带气旋发生的气候学研究 [J]. 大气科学, 17 (3): 302–309. Yi Qingju, Ding Yihui. 1993. Climatology of the explosive cyclogenesis over East Asia and the West Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 17 (3): 302–309.
- 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 893–905. Yu Rucong, Zhou Tianjun, Li Jian, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 893–905.
- 张培忠, 陈受钧, 白岐凤. 1993. 东亚及西太平洋锋面气旋的统计研究 [J]. 气象学报, 51 (1): 44–56. Zhang Peizhong, Chen Shoujun, Bai Qifeng. 1993. A statistic study of frontal cyclones over East Asia and northwestern Pacific sector [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 51 (1): 44–56.
- 张尚印. 1984. 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, 3 (3): 83–89. Zhang Shangyin. 1984. The statistical characteristics and the synoptical analysis of north cyclone [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 3 (3): 83–89.
- Zhang Y X, Ding Y H, Li Q P. 2012. A climatology of extratropical cyclones over East Asia during the years of 1958–2001 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 26 (3): 261–277.
- Zhou T J, Gong D Y, Li J, et al. 2009. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon—Recent progress and state of affairs [J]. Meteorologische Zeitschrift, 18 (4): 455–467.