

黄鑫, 布和朝鲁, 谢作威, 等. 2016. 春季影响中国北方地区的蒙古气旋及其背景环流 [J]. 大气科学, 40 (3): 489–503. Huang Xin, Bueh Cholaw, Xie Zuowei, et al. 2016. Mongolian cyclones that influence the northern part of China in spring and their associated low-frequency background circulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 489–503, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1505.14348.

春季影响中国北方地区的蒙古气旋及其背景环流

黄鑫^{1,2} 布和朝鲁³ 谢作威³ 巩远发¹

¹ 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

² 陕西省气象信息中心, 西安 710014

³ 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘 要 基于 1948~2013 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料, 采用 850 hPa 相对涡度场气旋追踪方法, 统计了春季蒙古气旋的活动特征, 包括其源地、盛期位置、消亡地以及路径的分布。在此基础上, 根据蒙古气旋的不同移动路径, 界定了蒙古气旋的两种路径, 即向东路径和东南路径, 并统计了这两类气旋的频数与强度的年际和年代际变化。同时还揭示了这两类蒙古气旋的低频背景环流特征。本文主要结论如下: (1) 蒙古气旋主要生成于贝加尔湖南侧和东侧的山脉背风坡, 并在蒙古东部地区以及我国东北地区达到盛期, 多数气旋消亡于东北亚及其临海区域; (2) 两类气旋的生成个数均有显著的年代际变化。向东路径气旋在 1950 年代的个数偏少, 1970 年代至 1990 年代的个数整体偏多, 之后有所减少, 但进入 21 世纪后气旋有个数呈现增多的趋势。东南路径气旋在 1970 年代以前一直处于偏少阶段, 1970 年代至 1980 年代中期处于偏多阶段, 2005 年以后东南路径气旋个数有减少的趋势; (3) 向东路径蒙古气旋的背景低频环流由斯堪的纳维亚半岛正异常中心、贝加尔湖及西侧的负异常中心以及环日本海地区的正异常中心所组成的正位相斯堪的纳维亚环流型为主要特征。东南路径蒙古气旋则以俄罗斯西部的负异常中心、拉普捷夫海附近延伸到我国西北地区的正高度异常区以及东北低涡环流为主要特征。

关键词 蒙古气旋 蒙古气旋活动频数 蒙古气旋路径 环流背景

文章编号 1006-9895(2016)03-0489-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.14348

Mongolian Cyclones That Influence the Northern Part of China in Spring and Their Associated Low-Frequency Background Circulations

HUANG Xin^{1,2}, BUEH Cholaw³, XIE Zuowei³, and GONG Yuanfa¹

¹ College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Shaanxi Meteorological Information Center, Xi'an 710014

³ International Center For Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on the four times daily NCEP–NCAR reanalysis dataset, the 850 hPa relative vorticity cyclone tracking method was employed to identify the genesis, lysis, and maturing regions, and the different track distributions, in Mongolian cyclones for the years 1948–2013 in spring. According to the different distributions of the Mongolian cyclone tracks, two types of Mongolian cyclones were defined: One with eastward-oriented tracks and the other with southeastward-oriented tracks. The interannual and interdecadal variations of these two categories with respect to the

收稿日期 2014-12-29; **网络预出版日期** 2015-05-25

作者简介 黄鑫, 男, 1989 年出生, 硕士, 主要从事蒙古气旋与沙尘研究。E-mail: nuist208@sina.cn

通讯作者 布和朝鲁, E-mail: bueh@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375064, 国家科技支撑项目 2015BAC03B03

Founded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375064), National Key Technology Support Program (Grant 2015BAC03B03)

frequencies and intensities of Mongolian cyclones were also investigated. Meanwhile, the low-frequency background circulation patterns of the two categories were revealed. The main conclusions are as follows: (1) Mongolian cyclones mainly formed over the leeward side of mountains to the south and east of Lake Baikal and enhanced in northeastern China and eastern Mongolia. Most cyclones died out in Northeast Asia and its adjacent seas. (2) There was obvious decadal variation in the two categories of Mongolian cyclones. The frequency of the 'east path' Mongolian cyclones was below the norm in the 1950s, above the norm in the 1970s and 1980s, below the norm in the 1990s, and has shown an increasing trend since the beginning of the 21st century. The 'southeast path' Mongolian cyclones occurred less than average before the 1970s, more than average from the 1970s and mid-1980s, and then decreased again after 2005. (3) The positive phase of the Scandinavian pattern—formed by a negative anomaly center around the North Atlantic to the Mediterranean, a positive center around Scandinavia, a negative center around Lake Baikal, and the opposite over Japan—was the main background circulation of 'east path' Mongolian cyclones. The background circulation of 'southeast path' Mongolian cyclones was characterized by a negative height anomaly over West Russia, a positive height anomaly over the region from the Laptev Sea to Northwest China, and the Northeast China cold vortex circulation.

Keywords Mongolian cyclone, Cyclone frequency, Cyclone path, Background circulation

1 引言

气旋(反气旋)是对流层低层中心气压低(高)于四周的天气尺度涡旋。在北半球,气旋(反气旋)中的空气作逆(顺)时针旋转,在南半球则相反(朱乾根等, 2007)。气旋的产生和发展受到高空环流的影响,能造成明显或激烈的天气现象。影响我国的气旋可分为南方气旋与北方气旋,其中,蒙古气旋可以作为北方气旋的典型(朱乾根等, 2007),一年四季均可出现,但以春秋季节为最多。研究表明,一般气旋所具有的天气现象都可以在蒙古气旋中出现,其中比较突出的是大风,其带来的降温、风沙、吹雪、霜冻等天气现象都对我国的农业和生态等造成显著的影响(Qian et al., 2002; 姚素香等, 2003; 张高英等, 2004; 赵琳娜等, 2004, 2007; 孙建华等, 2004)。

关于蒙古气旋的移动路径,我国学者进行了大量的研究。吴伯雄和刘长盛(1958)利用1951~1955年东亚地面天气图对东亚气旋活动的统计特征进行了研究。他们揭示了东亚北方气旋的源地集中于 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 之间的事实,并定义了北方气旋的两种路径,其中一类气旋产生于蒙古国以及我国内蒙和东北地区,向东北方向移动,穿过内蒙及黑龙江省北部,大多于库页岛消亡;另一类产生于内蒙以及东北南部,路径偏南约5个纬度,到东经 130°E 左右即与前者取同一路径东行。王荣华(1963)利用中央气象台1951~1960年逐日地面天气图得出,产生于贝加湖南部的气旋自生成以后主要向东南移动进入我国,之后经过东北地区移入海上或远东地区。沈建国和王娴(1991)将生成于($43^{\circ}\sim$

50°N , $90^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)范围内的气旋定义为蒙古气旋,并将其移动路径分为偏东路径、东北路径和东南路径。偏东路径基本与 45°N 纬圈平行,从源地进入日本海和北太平洋。东北路径自源地经过我国大兴安岭以北进入西伯利亚或鄂霍次克海。东南路径最少,经内蒙古进入华北或者辽宁和吉林入海。林明智和杨克明(1992)的研究也指出,蒙古气旋自生成后大部分向东移动,移至东北平原后一部分向东北移动进入远东地区,一部分向东南移动进入渤海、黄海北部。姚素香等(2003)提出,我国东北到俄罗斯远东和我国长江中下游到日本一带,均为明显的气旋活动集中路径。朱乾根等人(2007)归纳出,东亚全年平均的气旋移动路径有三条:一是日本以东或东南洋面上,其次是我国东北地区,第三个是朝鲜、日本北部地带。张颖娴(2012)用聚类分析的方法得出影响我国的气旋路径主要是始于蒙古地区南部以及贝加尔湖东部地区,前者产生以后主要向东南方向移动,经过内蒙华北影响我国,后者则向东北方向移动,到达内蒙东北部和东北地区。符娇兰等(2013)也发现冬季影响我国北方地区的气旋主要有3条路径,即东北路径,东南路径与偏东路径,其中尤以偏东路径气旋个数最多。东北路径气旋自生成以后主要向远东地区移动。偏东路径气旋主要经过我国东北地区从而影响我国,而东南路径气旋则主要经内蒙古中西部进而影响我国华北地区。Chen et al. (2014)也发现冬季蒙古气旋也存在向东移动和东南方向移动的两条路径。其中向东移动的气旋主要消亡于库页岛以西,我国东北地区北部到外兴安岭和锡霍特山围成的区域,东南移动的气旋则由内蒙进入我国,消亡

于我国东北南部。

上述研究表明, 尽管蒙古气旋生成以后具有多条移动路径, 但影响我国的蒙古气旋路径主要为两条, 即向东路径和东南路径。向东路径气旋会对我国东北地区的天气造成明显的影响, 而东南路径气旋则主要对我国华北地区的天气造成明显的影响。

许多研究表明, 影响我国的北方气旋也具有年代际变化。例如, 王艳玲和郭品文(2005)指出, 北方春季气旋频数在 1980~1990 年代减少, 导致了我国北方沙尘暴天气的减少。王新敏(2007)利用一个海平面气压客观跟踪算法, 对蒙古气旋活动的季节变化、年际变化和年代际变化进行了研究。她指出, 春季蒙古气旋在 20 世纪 1980 年代中期蒙古气旋活动最强, 1980 年代末开始到 1990 年代蒙古气旋频数明显减少。她同时也指出春季蒙古气旋与中国北方沙尘暴之间存在的密切关系。

春季是蒙古气旋活动的高峰期, 此前学者的研究也表明, 蒙古气旋在其移动过程中会对我国的天气气候造成明显的影响。然而, 迄今为止还没有工作探讨蒙古气旋的路径与其背景环流的关系。鉴于春季是蒙古气旋活动对我国北方地区的天气(特别是沙尘或沙尘暴天气)的重要影响, 本文利用更长时间的资料以及一个追踪气旋的客观方法, 重新统计蒙古气旋的源地、移动路径以及消亡地。同时, 针对影响我国北方地区的蒙古气旋, 根据其移动路径进行分类, 并研究其年际和年代际变化特征。在此基础上, 进一步研究不同路径蒙古气旋的低频背景环流特征。

2 数据和方法

本文中采用 NCEP/NCAR 全球逐日资料, 时间长度为 1948 年 1 月至 2013 年 12 月, 时间分辨率为一天四次, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向从 1000 hPa 到 10 hPa, 共 17 层。气象要素包括风、位势高度以及温度。

目前, 国内绝大多数研究采用海平面气压的低气压中心来识别和追踪气旋活动(姚素香等, 2003; 王新敏, 2007; 张颖娴, 2012; 符娇兰等, 2013)。例如, 符娇兰等(2013)利用海平面气压识别冬季影响我国北方地区的气旋。这种方法的优点是天气学意义明显, 能够通过地面低气压中心与周围格点范围内的气压梯度力阈值, 确定是否存在气旋中心。然而, 在气旋生成早期, 这一方法在天气图上

难以识别闭合中心, 其主要原因是海平面气压容易受到地形及大尺度背景环流切变涡度的影响(Hodges, 1994)。另一种气旋追踪方法则利用 850 hPa 涡度(天气尺度)来实现(Hodges, 1994)。由于该方法去除了行星尺度流场的影响, 其识别气旋过程受背景环流的影响较小, 因此在气旋的雏形阶段就能够捕捉气旋性涡度。对于利用 850 hPa 涡度追踪气旋这一方法, 符娇兰等(2013)指出该方法在利用风场(通过插值)计算涡度时会产生误差。我们推测, 这可能是没有去除行星尺度环流切变涡度的缘故。因此, 本文采用了 Hodges(1994)基于 850 hPa 相对涡度局地极大值的气旋追踪方法, 具体步骤如下: (1) 为了使我们追踪的 850 hPa 相对涡度最大值(气旋)不受到大尺度行星波的干扰, 滤去了大尺度的背景波动(滤掉波数小于 5 的波动); (2) 判断 850 hPa 相对涡度场中气旋的特征: 局地最大值大于 10^{-5} s^{-1} 的格点初步判定为潜在的气旋中心, 运用曲线插值的方法将格点的值插到球面上, 使用 Goldfarb(1969)介绍的方法找到真实的局地最大值中心所在的位置; (3) 之后, 运用“气旋的移动速度和方向必须是连续的”这两个约束条件(Hodges, 1994, 1995)来考察相邻时间步长的局地极大值是否属于同一个气旋; (4) 最后, 生命期至少为 48 小时且移动路径超过 1000 km 的气旋被认为是真实的气旋。更详细的说明可参考 Hodges(1994, 1995, 1996)。

为了检验气旋涡度追踪方法的效果, 我们基于国家气象局信息中心提供的 1980~1982 年春季的历史天气图, 普查了蒙古气旋的个数, 并与我们追踪到的蒙古气旋个数进行了对比。基于历史天气图的人工辨认主要是通过逐日普查地面气压场来完成。通过人工辨认的生命期大于 2 天以及移动路径超过 1000 km 的蒙古气旋一共 58 个。与此相比, 以本文 850 hPa 涡度追踪方法辨认的蒙古气旋个数总为 56 个, 比人工辨认的多了 7 个(12.5%), 遗漏了 9 个(15%)。这说明该方法可以用于蒙古气旋的识别和追踪。

本文利用 Takaya and Nakamura(1997, 2001)三维波作用通量(简称 TN 通量)来描述准定常 Rossby 波能量频散的特征。在 Wentzel-Kramers-Brillouin(WKB)近似假定下, 该通量与波位相无关, 且其方向与定常 Rossby 波局地群速度方向一致。在对数气压坐标中, 波作用通量(W)的公式

为

$$W = \frac{P}{2|U|} \left[\begin{array}{l} Uv'^2 - \psi'v'_x + V(-u'v' + \psi'u'_x) \\ U(-u'v' + \psi'u'_x) + Vu'^2 + \psi'u'_y \\ \frac{f_0 R_a}{N^2 H_0} \{ Uv'T' - \psi'T'_x + V(-u'T' - \psi'T'_y) \} \end{array} \right], \quad (1)$$

其中, ψ' 表示准地转扰动流函数, $U(U, V)$ 为基本流场; u' 和 v' 分别为纬向和经向的扰动地转风; P 、 R_a 、 H_0 、 N 、 T 分别表示气压除以 1000 hPa、干气体常数、大气标高、Brunt-Väisälä 频率和温度。下标 x 、 y 分别表示纬向和经向导数。计算中, 以春季 (3 月 1 日至 5 月 31 日) 气候平均场作为基本流场。从每一个气旋个例的逐日 8 天以上低通滤波 (Duchon, 1979) 气象场中减去春季气候平均场得到距平场。对于多个气旋个例的合成, 以气旋生成日为基准日, 分别对其前后几天的距平场进行逐日合成, 得到公式 (1) 中得准地转扰动。

3 春季蒙古气旋的统计特征

3.1 春季蒙古气旋的源地、盛期位置以及消亡地

前人研究表明, 贝加尔湖以东以南地区, 包括

我国东北地区是春季气旋的重要源地 (Chen et al., 1991; Qian et al., 2002; 张颖娟, 2012), 这是由于萨彦岭、杭盖山、雅布诺夫山以及大兴安岭等背风坡地区所对应的动力作用有利于涡度的增强所导致 (吴伯雄和刘长盛, 1948; 沈建国和王娟, 1991; Chen et al., 1991)。这类气旋经常移入我国东北以及华北地区, 对所经过地区的天气产生明显影响。

本文中, 我们将生成于蒙古国附近的气旋定义为蒙古气旋, 其具体范围由图 1a 中的方框所示, 大致在区域为 ($42.5^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 120^\circ \text{E}$) 包含了蒙古国、贝加尔湖地区以及我国内蒙古大部地区, 但没有包括塔里木盆地的东段 ($42.5^\circ \sim 45^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 95^\circ \text{E}$)。蒙古气旋生成以后绝大部分向东移动, 其中一部分消亡在库页岛以西以及我国东北区域, 也有一部分消亡在北太平洋地区, 一些气旋移动到了北美地区, 有的甚至进入北极地区。Sorteberg and Kvingedal (2006) 认为冬季自欧亚大陆移入极地的气旋会对极区海冰分布造成显著的影响。

我们将蒙古气旋生命期相对涡度最大值所对应的时刻定义为蒙古气旋的盛期。从蒙古气旋的盛期位置 (图 1b) 分布可以看出, 我国东北区域经常

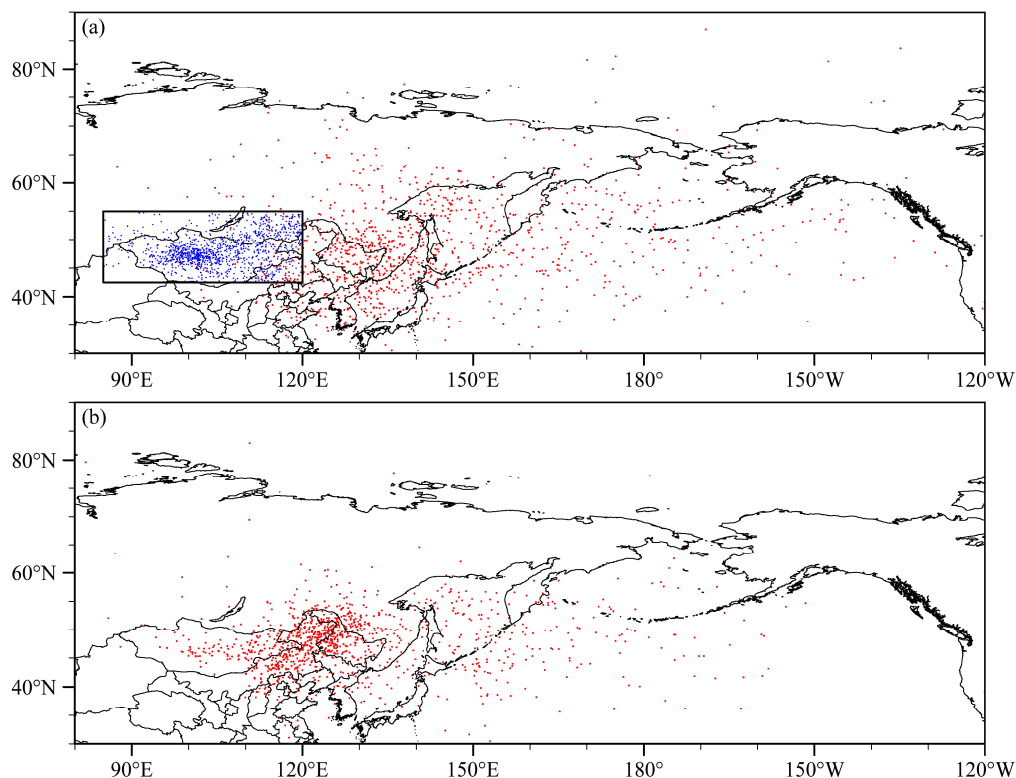


图 1 1948~2013 年春季蒙古气旋 (a) 源地和消亡地的分布以及 (b) 盛期位置分布。(a) 中蓝色和红色点分别代表气旋的生成点和消亡点, (b) 中红色点代表气旋盛期所处位置。图中方框表示 ($42.5^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 120^\circ \text{E}$) 区域

Fig. 1 Distribution of the (a) genesis (blue points) and lysis (red points) regions and (b) maturing (red points) regions of Mongolian cyclones in spring during 1948-2013 [the box represents the region ($42.5^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 120^\circ \text{E}$)]

是蒙古气旋加强的区域,这可能是由于蒙古气旋越过大兴安岭下坡作用下会得到一定程度的加强造成,也可能是由于春季东北冷涡的作用(谢作威和布和朝鲁, 2012)。还有一部分气旋移入大洋并且达到最强,这也是北太平洋风暴轴的反映(Hoskins and Hodges, 2002),这些气旋恰好处于高空西风急流出口区的左侧(沈建国和王娴, 1991),对应正涡度平流中心,造成海上气旋涡度的加强。

3.2 蒙古气旋的两类移动路径

从整个蒙古气旋的路径分布(图 2a)来看,气旋产生以后大多在高空气流的引导下向东移动,也有极个别气旋向西移动,大多气旋在东经 135°E 以西沿着北纬 42.5°N~55°N 范围内东移,部分气旋产生以后向东北方向移动,消亡于西伯利亚,甚至极地地区,还有部分气旋先向东南方向移动,之后受到东亚大槽前部西南气流的影响,向东北方向移

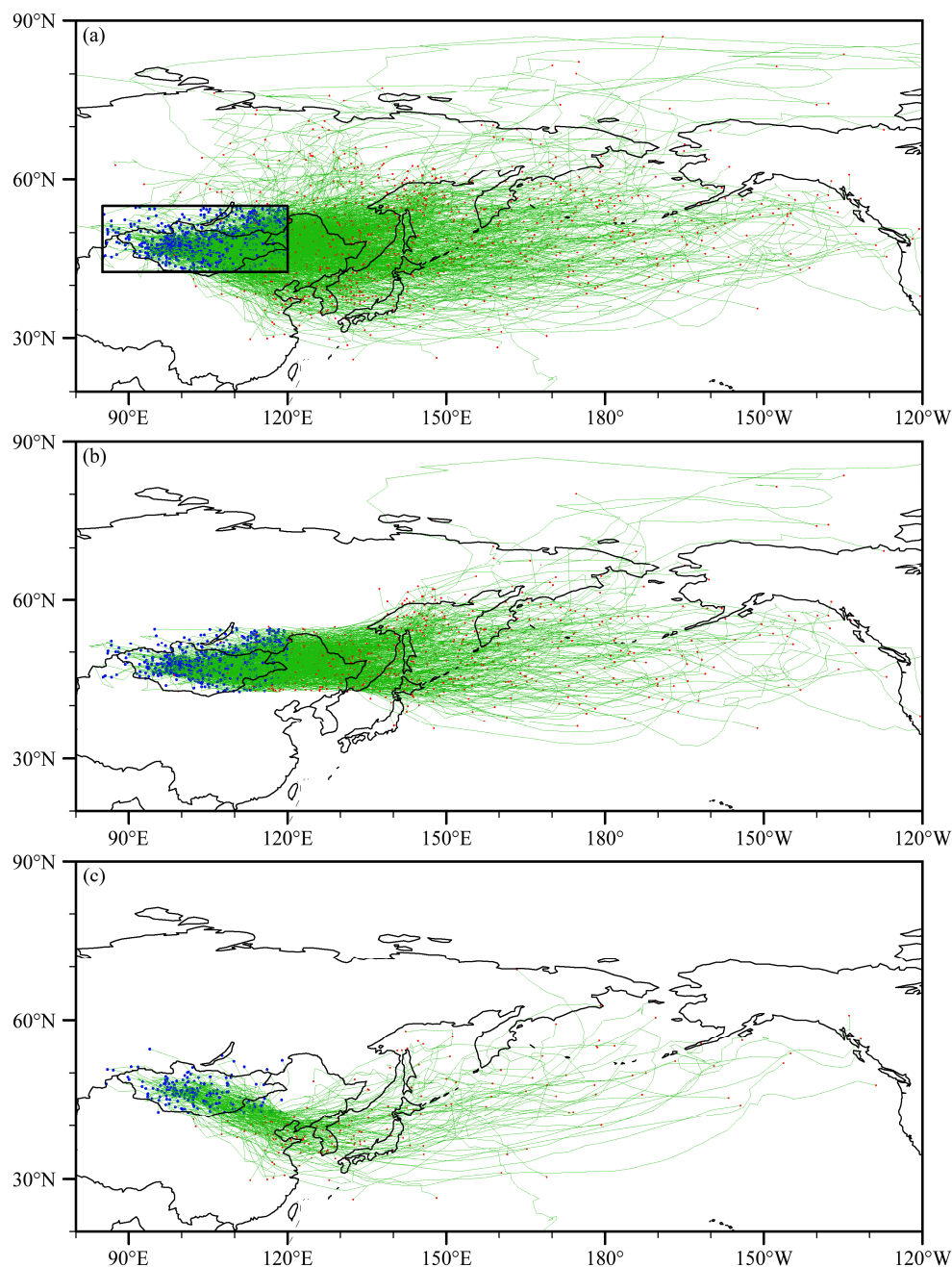


图 2 1948~2013 年春季蒙古气旋的路径: (a) 整个路径; (b) 向东路径; (c) 东南路径。绿色实线代表气旋路径, 蓝色和红色点分别为气旋生成点和消亡点。图中方框表示 (42.5°~55°N, 85°~120°E) 区域

Fig. 2 Distribution of (a) all, (b) 'east path', and (c) 'southeast path' tracks (green lines) of Mongolian cyclones in spring during 1948–2013 [blue points and red points represent genesis and lysis regions, respectively; the box represents the region (42.5°–55°N, 85°–120°E)]

动, 消亡于海上。

基于蒙古气旋生成以后对我国不同地区造成的天气影响以及其移动的不同路径, 本文定义了蒙古气旋的两条路径, 分别为向东路径和东南路径。因气旋在生成以后向东移动过程中, 最终大多数都会受到东亚大槽前部西南气流的影响, 向东北移动, 故定义气旋移动路径过程中, 还考虑了不同经度范围内的特征。具体来说, 向东路径气旋指的是自生成之后在东经 135°E 之西的区域一直在 $42.5^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 的纬度带内移动的气旋(图 2b), 此类气旋对中国东北地区的天气有明显的影 响。东南路径气旋指的是自生成以后能够向南跨过北纬 42.5°N 线且到达东经 120°E 之前一直在 42.5°N 以南移动的气旋(图 2c), 此类气旋对中国华北地区的天气有重要影响。

向东路径气旋(图 2b)主要生成于贝加尔湖南部的蒙古国境内以及贝加尔湖东部, 大多数气旋消亡于北太平洋, 我国黑龙江边界地区也是此类气旋主要消亡地。向东路径气旋大多在我国东北地区达到盛期(图略), 也有部分气旋入海后加强。东南路径气旋(图 2c)大多生成于贝加尔湖南部的蒙古地区, 会对我国华北和东北地区造成明显的影 响, 甚至有时对淮河以南地区也产生影 响。与向东路径气旋相比, 东南路径气旋相对少, 其一部分消亡于我国华北地区, 一部分消亡于日本海区域, 还有一部分东移后受高空槽的影响, 消亡于太平洋区域。我国华北地区, 特别是河北陕西内蒙接壤地区是东南路径气旋生命期最强的汇集地(图略), 也有其部分气旋在蒙古国境内达到最强, 还有一部分气旋在海上达到盛期。

3.3 两类蒙古气旋的年际和年代际变化特征

由图 3a 可见, 1948~2013 年 66 个春季共产生蒙古气旋 1169 个, 平均每年生成 17.7 个。1974 年个数最多, 为 25 个; 1951 年为最少年, 只生成了 9 个气旋。从 9 点滑动平均曲线可看出, 1950 年代到 1970 年代初, 蒙古气旋个数偏少, 1970 年代到 1990 年代初, 蒙古气旋个数偏多, 1990 年代到 2000 年左右, 蒙古气旋个数偏少, 2000 年至今蒙古气旋个数又稍微偏多一些。

从趋势上看, 1960 年代中期到 1970 年代末蒙古气旋处于增多趋势, 1980 年代初到 1990 年代末期蒙古气旋数量处于下降趋势, 2000 年以后又处于增多趋势。这与王新敏(2007)、Qian et al. (2002)

以及张颖娴(2012)得出的我国北方蒙古地区气旋自 1970 年代中期到 1990 年代中后期呈现减少的趋势的结论基本一致。McCabe et al. (2001) 得出, 北半球 11 月~3 月 1959~97 年高纬度(60°N 到 90°N)气旋有增多的趋势, 而低纬度(30°N 到 60°N)地区的气旋有减少的趋势, 并且认为是全球变暖导致了北半球风暴轴的北移从而造成了高纬度气旋的增加。张颖娴(2012)也得出 1951~2000 年 60°N 北半球温带气旋整体趋势生成数目线性增加, 而 60°N 以南线性减少, 进一步印证了北半球风暴轴路径整体向极地偏移的趋势。因此, 蒙古气旋的年代际变化可能受到全球变暖以及与此对应的风暴路径偏移的影响, 有待进一步研究。

向东路径气旋(图 3c)在整个 66 年总共生成 695 个, 平均每年生成 10.5 个, 最多年的个数为 16 个, 最少年只有 4 个。向东路径气旋在 1950 年代初期的个数偏少, 1950 年代末至 1960 年代初个数稍微增多, 之后略有下降, 1970 年代至 1990 年代的个数整体偏多, 这与整个蒙古气旋在这个时期偏多一致。1990 年代之后又处于偏少阶段。2000 年以后向东路径气旋有个数呈现增多的趋势。

东南路径气旋(图 3e)个数较少, 平均每年春季只生成 2.8 个。1970 年代以前一直处于偏少阶段, 1970 年代至 1980 年代中期处于偏多阶段, 1980 年代中期至 1990 年代中期又处于偏少阶段, 之后又处于偏多阶段, 2005 年以后东南路径气旋个数有减少的趋势。2000 年为东南路径气旋个数最多年, 东部路径气旋为 9 个。1964、1965、1968 年没有东南路径气旋的产生。

温带气旋的强度有多种指标和分析方法。本文将某一春季所生成的所有蒙古气旋的气旋中心相对涡度(850 hPa)的时间平均值定义为该春季蒙古气旋的平均强度。整个蒙古气旋的平均强度(图 3b)在 1950 年代中期至 1980 年代偏强, 1980 年代至 1990 年代中期偏弱, 1990 年代中期至 2005 年左右又偏强, 之后偏弱, 最强年份可达 $4.2\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 最弱年份为 $3.2\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。

从向东路径气旋的平均强度变化图(图 3d)来看, 向东路径气旋的平均强度要大于整个蒙古气旋的平均强度, 平均强度能达到 $3.86\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 并且具有明显的年代际变化, 1950 年代中期至 1990 年代中期有明显的 10 年左右的震荡周期, 进入 21 世纪以后东北路径气旋整体处于偏强阶段。

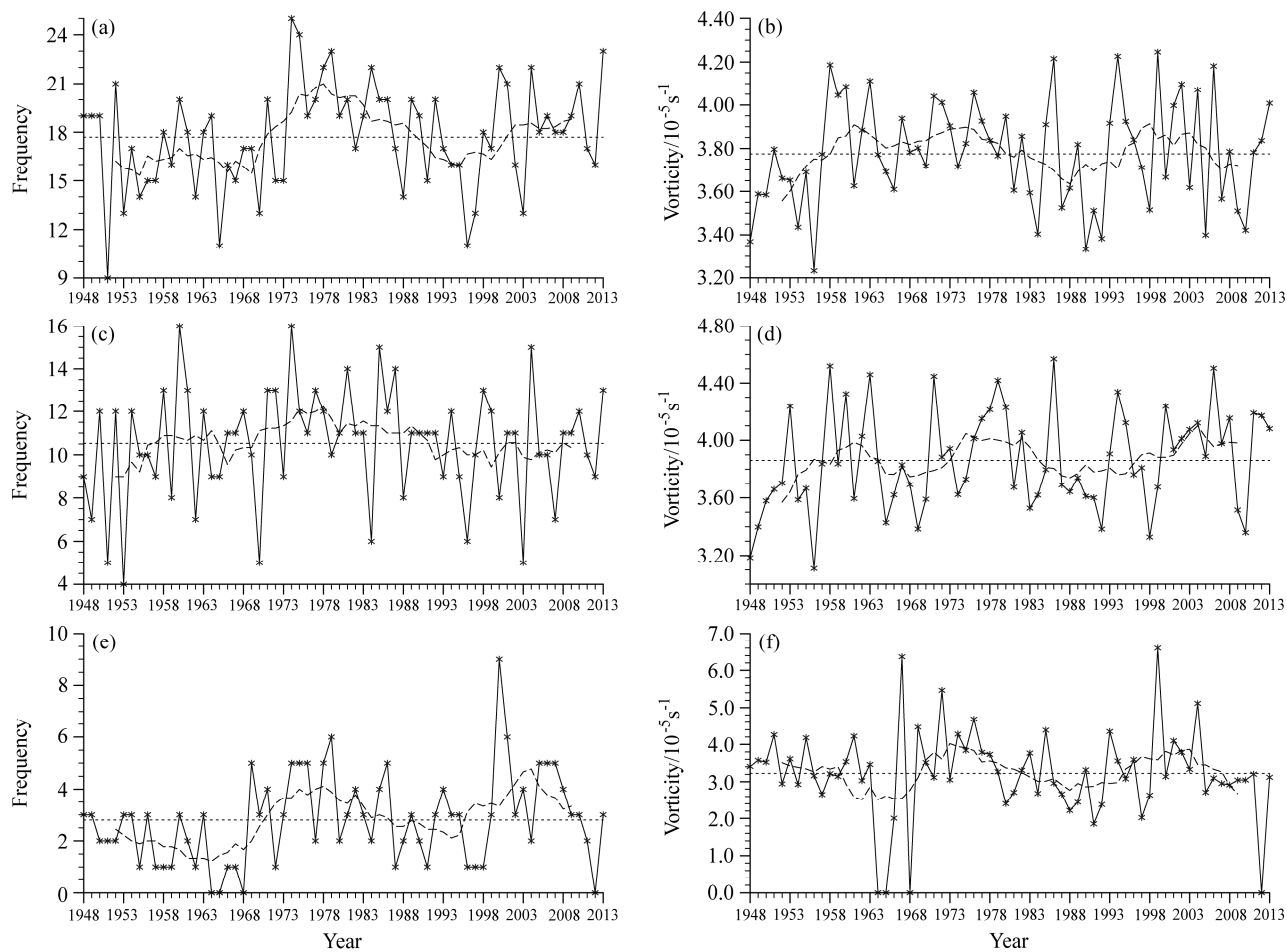


图3 1948~2013 年的逐年春季 (a、b) 蒙古气旋、(c、d) 向东路径气旋以及 (e、f) 东南路径气旋的个数 (左列)、平均强度 (右列; 单位: 10^{-5} s^{-1})。图中虚线表示 9 点滑动平均曲线

Fig. 3 The (a-c) frequency and (b-f) mean vorticity (scale: 10^{-5} s^{-1}) of (a, b) all, (c, d) ‘east path’ Mongolian cyclones, and (d, e) ‘southeast path’ Mongolian cyclones, in spring 1948–2013 (dashed lines represent the nine-point moving average curves)

东南路径的气旋平均强度 (图 3f) 大约为 $3.43 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 由于 1967 年只产生一个东南路径的气旋, 故平均强度很大。东南路径气旋平均强度也具有明显的年代际变化, 1950 年代初至 1960 年代初偏强, 1960 年代至 1970 年代偏弱, 1970 年代至 1980 年代初又偏强, 其强度变化在 1980 年代之前有明显的 10 年左右的震荡周期, 1980 年代至 1990 年代中期整体强度又处于偏弱阶段, 1990 年代中期至 2005 年左右又偏强, 之后又处于偏弱的阶段。

4 两类蒙古气旋的低频环流特征

表 1 给出了与不同维持时间所对应的两类气旋的个数。对这两类气旋而言, 生命期为 2~5 天的个数最多, 而大于 9 天的个数较少。考虑到气旋对天气影响的持续时间, 我们选取了维持 3~8 天的气旋

表 1 不同维持时间的两种路径气旋个数

Table 1 The frequencies of the two categories for different Mongolian cyclones

维持时间	气旋个数	
	向东路径气旋	东南路径气旋
2~3 d	201	62
3~4 d	173	39
4~5 d	123	23
5~6 d	78	21
6~7 d	51	8
7~8 d	28	14
8~9 d	15	5
9~10 d	7	5
10~11 d	7	4
11~12 d	7	0
12~13 d	4	0
13~14 d	1	2
14~15 d	0	1
15~16 d	0	1
总计	695	185

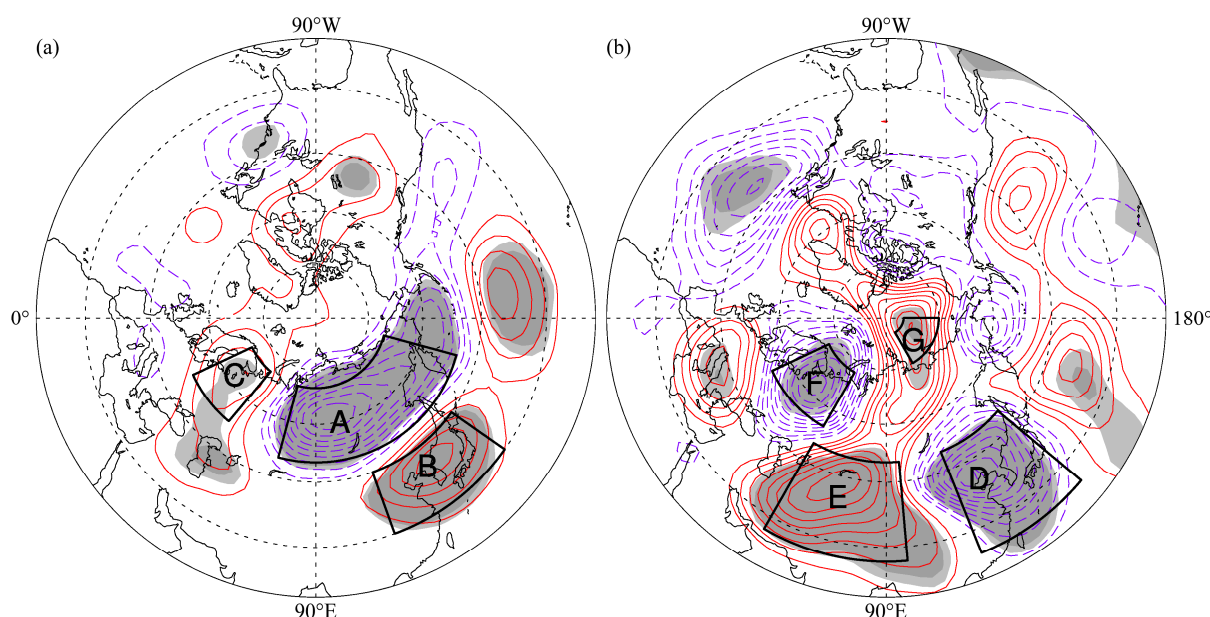


图4 (a) 向东路径气旋和(b) 东南路径气旋的生成前三天和生成后四天的 500 hPa 平均环流异常场。等值线间隔为 5 gpm, 图中方框 A、B、C、D、E、F 和 G 分别表示 (50°~70°N, 75°~165°E)、(30°~45°N, 110°~145°E)、(52.5°~70°N, 25°~50°E)、(25°~50°N, 112°~140°E)、(27°~50°N, 60°~95°E)、(55°~72°N, 25°~60°E) 和 (25°~50°N, 120°~180°E) 的区域。深(浅)阴影表示通过 95% (90%) 信度的区域

Fig. 4 Mean circulations of the composite geopotential height anomalies from 3 days before to 4 days after the (a) 'east path' and (b) 'southeast path' Mongolian cyclone genesis time at 500 hPa [contour interval: 5 gpm; boxes A-G represent regions (50°~70°N, 75°~165°E), (30°~45°N, 110°~145°E), (52.5°~70°N, 25°~50°E), (25°~50°N, 112°~140°E), (27°~50°N, 60°~95°E), (55°~72°N, 25°~60°E), and (25°~50°N, 120°~180°E), respectively; darker (lighter) shading represents statistical significance exceeding the 95% (90%) confidence level]

做合成分析, 分析这两种气旋的不同背景环流特征。

图 4 所示为两类蒙古气旋的生成前三天和生成后四天的 500 hPa 平均环流异常场。由图 4 可见, 向东路径气旋与东南路径的气旋的背景低频环流显著不同。向东路径气旋的合成环流异常场(图 4a)显示, 在斯堪的纳维亚半岛至俄罗斯西部以及里海存在南北向伸展的正高度异常区, 而一个明显的负高度异常带由贝加尔湖北部一直延伸到阿留申群岛附近, 同时我国华北、东北以及日本则为显著的正高度异常区。由于气旋的移动肯定会受到 500 hPa 环流的影响, 东亚地区的这种纬向性环流形势会使蒙古气旋向东移动。

与东南路径气旋对应(图 4b), 我国西北和西南地区受一个宽广的高压脊的控制, 其正高度异常中心位于新疆, 我国东北和华北以及蒙古东部地区受较强的高空槽的控制。东亚地区的这种经向性环流形势会使蒙古气旋向东南方向移动。此外, 俄罗斯西部和拉普捷夫海及以北地区分别有负高度异常中心和正高度异常中心, 它们可能对东亚地区的环流形势产生影响。

下面分别探讨与这两类蒙古气旋对应的背景低

频环流型的演变过程。对某一类气旋而言, 如果考虑其全部个例, 个例间的个体差异将会削弱其背景低频环流的显著特征及其季节内演变特征。因此, 这里主要考察其典型意义的个例, 加以合成分析。为此, 根据图 4a 和 b 中的关键区(A 到 G)环流特征, 分别定义了向东路径气旋的环流指数(I_E)和东南路径的环流指数(I_{SE}), 具体公式如下:

$$I_E = \frac{1}{4}Z_B + \frac{1}{4}Z_C - \frac{1}{2}Z_A, \quad (2)$$

$$I_{SE} = \frac{1}{3}Z_E + \frac{1}{3}Z_D - \frac{1}{6}Z_F + \frac{1}{6}Z_G, \quad (5)$$

其中, Z_A 到 Z_G 分别为图 4a 和 b 中的关键区 A 到 G 的区域平均 500 hPa 高度距平。上述定义表明, 气旋强度越强, 对应的指数也越大。我们依据 I_E 和 I_{SE} 的大小, 各挑选 30 个强气旋个例, 加以合成, 以便讨论这两类气旋的背景低频环流特征。

图 5 给出了向东路径气旋的合成 500 hPa 高度异常场及其逐日演变过程。众所周知, 多个气旋个例的合成过程基本上就是一个滤波过程, 实则滤掉了天气尺度波, 因此合成结果主要是低频环流信息。为了方便起见, 将气旋生成的那天记为第 0 天,

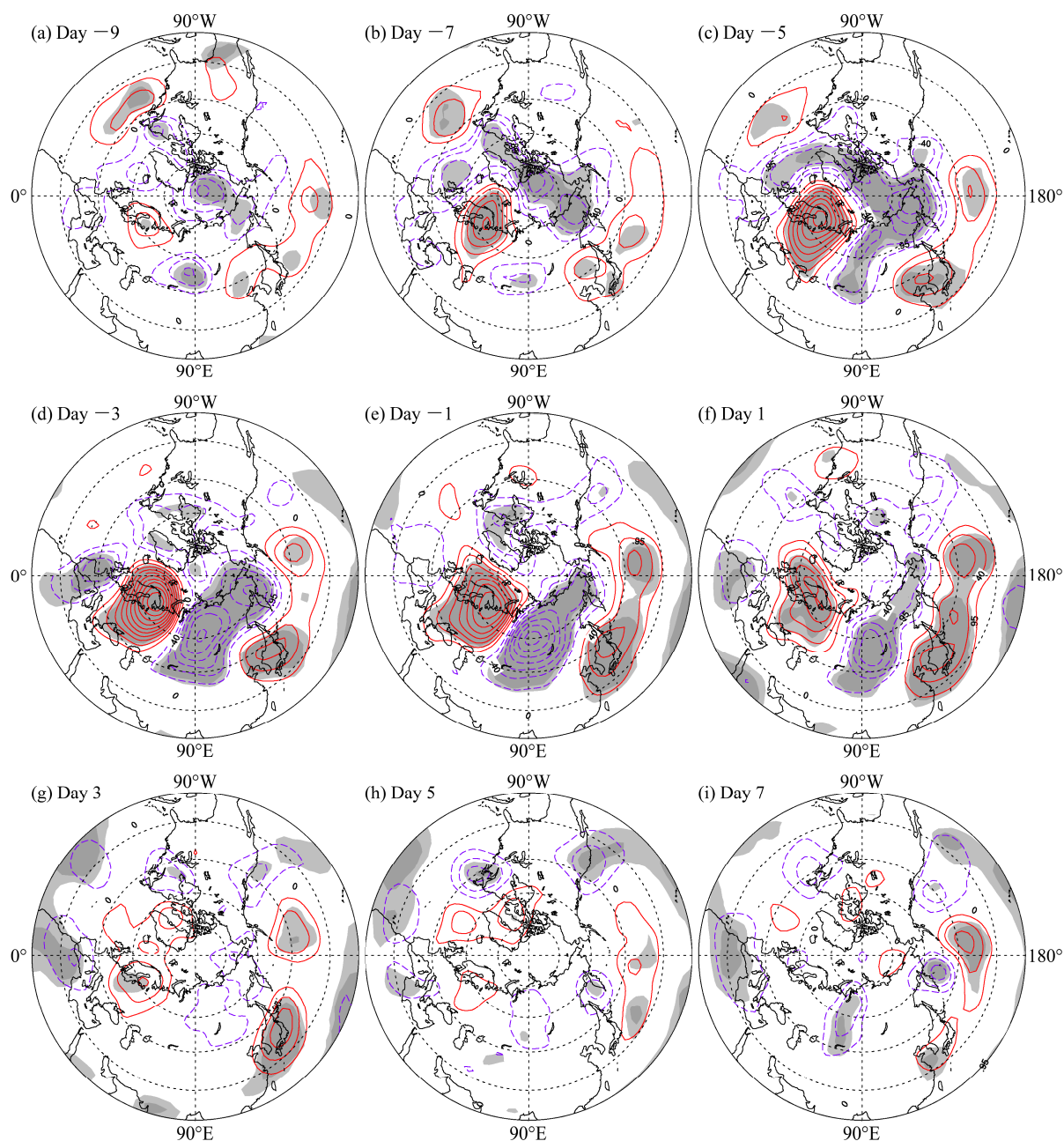


图5 向东路径气旋的合成 500 hPa 高度异常场。等值线间隔为 20 gpm, (a) 到 (i) 表示第-9 天至第 7 天的情况, 深(浅)阴影表示通过 99% (95%) 的信度区域

Fig. 5 Composite geopotential height anomaly circulations at 500 hPa for 'east path' Mongolian cyclones on days (a) -9, (b) -7, (c) -5, (d) -3, (e) -1, (f) 1, (g) 3, (h) 5, and (i) 7 [contour interval: 20 gpm; darker (lighter) shading represents statistical significance exceeding the 99% (95%) confidence level]

其之前(后)的一天记为第-1(1)天, 以此类推。在第-9 至-7 天(图 5a 和 b), 北欧至俄罗斯西部形成明显的正高度异常中心, 并逐渐加强, 与之对应, 贝加尔湖西侧的弱负高度异常中心随之发展, 并且在-7 至-5 天北大西洋地区出现了明显的负异常中心, 到了第-5 天(图 5c), 除了大西洋到地中海地区的负异常中心, 北欧至东亚地区形成了

一个具有 3 个异常中心的 Rossby 波列。自第-3 天至第 1 天(图 5d-f), 这一波列特征进一步加强, 其环流形势与图 5a 的情形基本一致。从第 3 天开始, 这一 Rossby 波列的 3 个异常中心的强度依次减弱和消失(图 5g-i), 此时其对应的蒙古气旋已移出了东亚地区(图略)。

为了说明上述背景环流的波列特征, 图 6 给出

了合成的向东路径气旋的 500 hPa 位势高度异常场及其对应的 Rossby 波能量频散特征。如方法中所述, 与图 5 不同的是, 该图中的异常场是指 8 天以上低通滤波场相对于春季气候平均场的距平。在第

-5 天, 有显著的 Rossby 波能量自北大西洋地区经斯堪的纳维亚半岛向贝加尔湖地区频散, 这有利于这三个地区的异常中心的加强和维持。从第-3 至 -1 天, Rossby 波能量向下游频散加强, 贝加尔湖

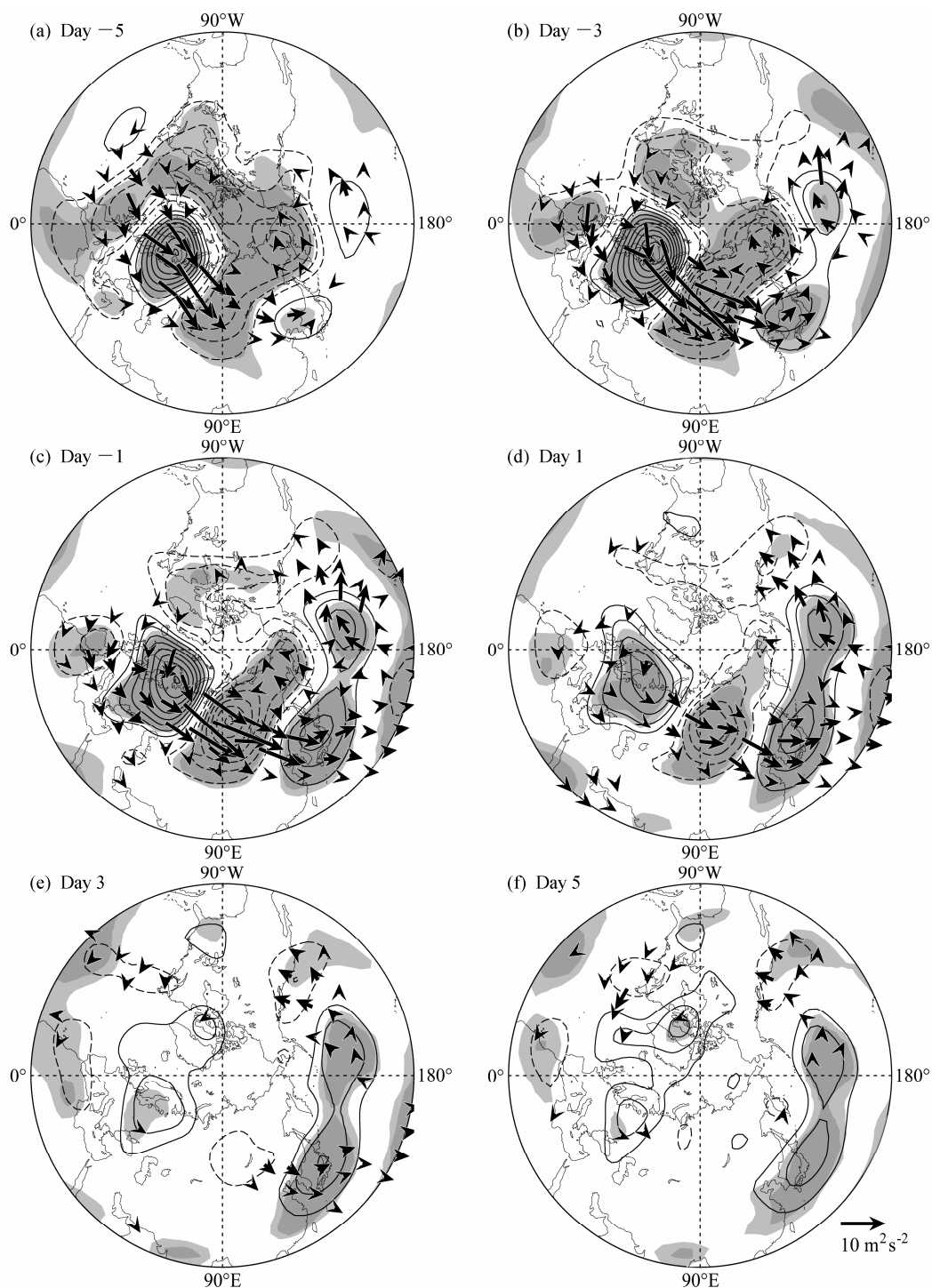


图 6 向东路径气旋的 500 hPa 位势高度异常合成场 (单位: gpm, 等值线) 及其对应的波作用通量 (单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$, 箭头), (a) 到 (f) 分别为第 -5、-3、-1、1、3 和 5 天。等值线间隔为 20 gpm; 深 (浅) 阴影表示通过 99% (95%) 的信度区域

Fig. 6 Composite geopotential height anomaly circulations and wave-activity fluxes (units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$; arrows) at 500 hPa for 'east path' Mongolian cyclones on days (a) -9, (b) -7, (c) -5, (d) -3, (e) -1, (f) 1, (g) 3, (h) 5, and (i) 7 [contour interval: 20 gpm; darker (lighter) shading represents statistical significance exceeding the 99% (95%) confidence level]

西侧的负高度异常进一步加强,下游的日本地区有正高度异常形成和加强。从第1至5天,Rossby波能量频散特征逐渐减弱和消失。

由图5和图6可见,向东路径蒙古气旋的背景低频环流型为正位相的斯堪的纳维亚环流型(Barnston and Livezey, 1987; Bueh and Nakamura, 2007),它主要由斯堪的纳维亚半岛地区的正异常中心、贝加尔湖—巴尔喀什湖西北侧的负异常中心以及环日本海地区正异常中心组成。该环流型形成初期,南欧至北非的负异常中心也比较明显。这一

环流型在东亚地区的两个异常中心共同构成了一个“西北低—东南高”的环流形势,与之对应的高空气流具有准纬向性,它使蒙古气旋在向东或东北方向移动。

图7所示为东南路径气旋的合成500 hPa高度异常场及其逐日演变过程。由500 hPa高度场分布可看出,与这类气旋对应,其背景环流的前兆信号最早出现在极区和次极区。从第-9天至第-5天(图7a-c),极涡在东西伯利亚海、楚科奇海以及波弗特海一侧显著减弱,并伸向斯堪的纳维亚半岛

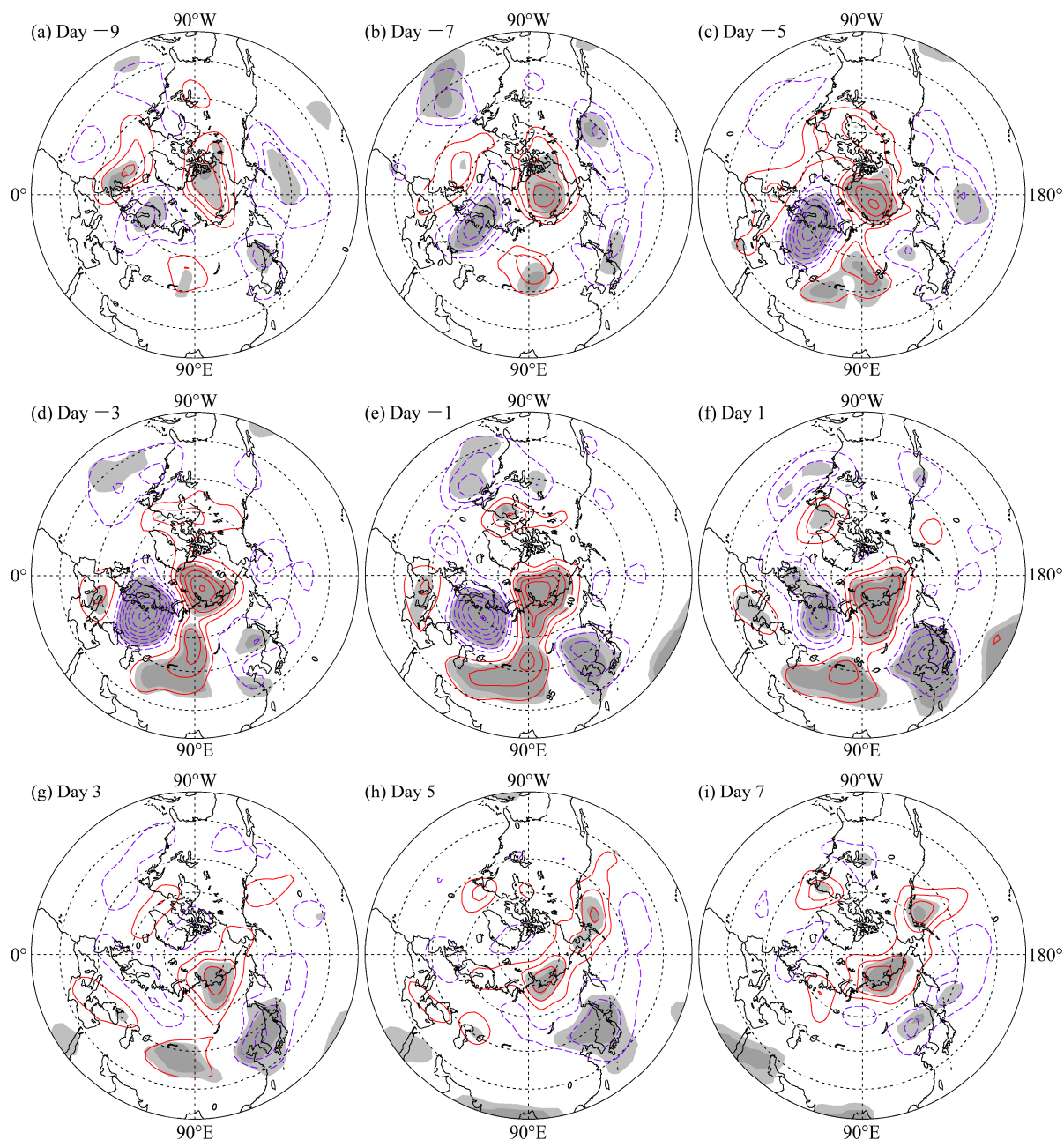


图7 同图5, 但为东南路径气旋

Fig. 7 As in Fig. 5 but for 'southeast path' Mongolian cyclones

至俄罗斯西部一侧。与之对应,在斯堪的纳维亚半岛至俄罗斯西部的地区形成一个负高度异常中心,并逐渐加强。与 Rossby 波能量频散过程一致,上述负高度异常中心的东南侧,即巴尔喀什湖和贝加尔湖之间形成了一个正高度异常中心,它也逐渐加强。到了第-3 天(图 7d),俄罗斯西部的负高度异常中心达到其最强盛的时期。此时,极区的正高度异常中心加强和南伸,并与巴尔喀什湖一带的正高度距平区连成一片。自第-1 天至第 1 天(图 7e 和 f),环流形势基本维持,但在我国东北至日本形成了一个负高度异常中心,并逐渐加强。这与 Rossby 波的能量频散特征一致。东亚上空的这种“西高东低”环流形势对应着对流层中层的偏北引导气流,促使蒙古气旋向东南方向移动。

自东南路径气旋生成后的第 3 天开始(图 7g-i),俄罗斯西部的异常中心明显减弱并消失。在拉普捷夫海一带和我国东北地区的两个异常中心尽管有所减弱,但仍稳定存在。在这一时段,由于东北气旋式低频环流的存在,大多数生命期大于 4 天的气旋跨过 120°E 后向东或东北方向移动(见图 2c)。

从图 8 可以看出,在第-5 天,源自斯堪的纳维亚半岛/俄罗斯西部负高度异常中心的 Rossby 波能量向下游的巴尔喀什湖/贝加尔湖地区频散。从第-3 至-1 天,自斯堪的纳维亚半岛的负高度异常经巴尔喀什湖至中国东北地区的能量频散进一步加强,这有利巴尔喀什湖至贝加尔湖之间的正高度异常和中国东北地区的负高度异常的加强和维持。从第 1 天至第 5 天,上述的 Rossby 波能量的频散特征逐渐减弱和消失,欧亚大陆的三个异常中心也随之减弱。同时中国东北地区的正高度异常向下游的能量频散而进一步减弱。

综上,俄罗斯西部的负距平中心、自拉普捷夫海附近延伸到我国西北地区的正高度异常带以及东北低涡环流共同组成的异常环流是东南路径蒙古气旋的背景低频环流。极涡在东西伯利亚海、楚科奇海以及波弗特海一侧显著减弱并伸向斯堪的纳维亚半岛至俄罗斯西部是该背景低频环流最早的前兆信号。

5 结论和讨论

本文利用 1948~2013 年 NCEP/NCAR 逐日资料基于一个追踪气旋的客观方法(Hodges, 1994,

1995, 1996),统计了春季蒙古气旋的生成地、路径以及消亡地分布特征。根据春季蒙古气旋的路径分布,将其路径分类为向东路径和东南路径,并对这两类蒙古气旋的个数以及强度的年际和年代际变化进行了分析。本文还揭示了这两类路径气旋的背景低频环流特征。主要结论如下:

(1) 蒙古气旋主要产生于贝加尔湖以南蒙古地区以及贝加尔湖以东山脉背风坡地区,并且多数蒙古气旋在东北地区达到最强,还有一部分气旋移入大洋并且达到最强,大多数气旋消亡于我国东北地区及海上。

(2) 根据蒙古气旋的不同移动路径,影响我国北方地区的蒙古气旋主要有两条路径,分别为向东路径和东南路径。对于整个蒙古气旋整体而言,其活动具有明显的年代际变化特征。1950 年代到 1970 年代初,蒙古气旋个数偏少,1970 年代到 1990 年代初,蒙古气旋个数偏多,1990 年代到 2000 年左右,蒙古气旋个数又偏少,2000 年至今蒙古气旋个数又稍微偏多。总体来说,1960 年代中期到 1970 年代末蒙古气旋处于增多趋势,1980 年代初到 1990 年代末期蒙古气旋数量处于下降趋势,2000 年以后又处于增多趋势。两类气旋的生成个数也具有显著的年代际变化。向东路径气旋在 1950 年代的个数偏少,1970 年代至 1990 年代的个数整体偏多,之后有所减少,但进入 21 世纪后气旋有个数呈现增多的趋势。东南路径气旋在 1970 年代以前一直处于偏少阶段,1970 年代至 1980 年代中期处于偏多阶段,2005 年以后东南路径气旋个数有减少的趋势。

(3) 向东路径气旋与东南路径蒙古气旋对应着不同的 500 hPa 环流场,向东路径气旋负异常中心位于贝加尔湖偏西北侧,巴尔喀什湖以南以及日本地区为正异常中心。向东路径蒙古气旋的背景低频环流型为正位相的斯堪的纳维亚环流型(Barnston and Livezey, 1987; Bueh and Nakamura, 2007)。东南路径气旋负距平区位于贝加尔湖东南侧,上游巴尔喀什湖以北以及拉普捷夫海有正距平中心出现,斯堪的纳维亚半岛为高度场负距平中心。俄罗斯西部的负距平中心、自拉普捷夫海附近延伸到我国西北地区的正高度异常带以及东北低涡环流共同组成的异常环流是东南路径蒙古气旋的背景低频环流。极涡在东西伯利亚海、楚科奇海以及波弗特海一侧显著减弱并伸向斯堪的纳维亚半岛至俄罗斯西部

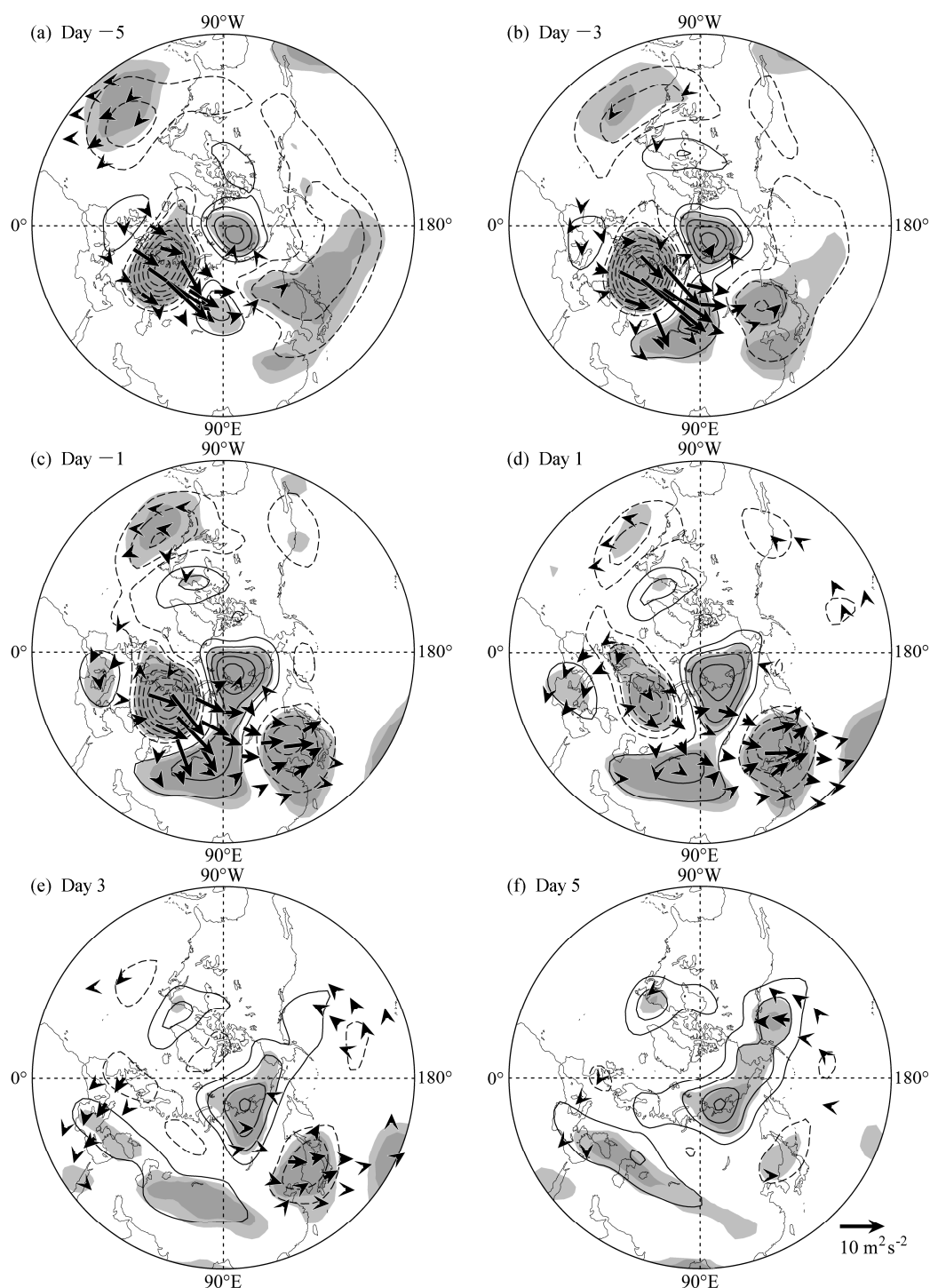


图8 同图6, 但为东南路径气旋

Fig. 8 As in Fig. 6 but for 'southeast path' Mongolian cyclones

是该背景低频环流最早的前兆信号。

本文更注重对蒙古气旋生成地, 消亡地以及路径分布进行具体的分析, 并没有对蒙古气旋盛期时的位置及其强度进行深入的探讨, 例如蒙古气旋大多在东北地区达到盛期的原因以及其与东北冷涡的关系, 还有蒙古气旋在东北地区达到盛期后对当

地造成的天气影响并没有进行具体深入的讨论, 有待之后进行研究。

本文主要针对蒙古气旋的不同路径, 揭示了其对应的背景低频环流特征, 而对气旋的生成、发展以及衰亡的天气动力学过程则没有涉及。自叶笃正和李麦村(1965)讨论大气地转适应过程以来, 引

起国内学者的广泛关注。对气旋而言,其水平尺度小于 Rossby 波变形半径,气压场会向流场适应(陈秋士, 1987)。对于气旋的发展和移动来说,对流层低层大气的斜压性以及斜压能量转换是最重要的驱动机制。此外,斜压波的能量频散过程也对气旋的发展和移动产生非常重要的作用(Chang and Orlanski, 1993)。本文中并没有讨论这些天气动力学问题,因此有必要在将来的工作中通过典型个例及数值模拟等方法进一步探讨这些问题,以提高对气旋发生发展的认识。

从外强迫场来看,杨建玲等(2003)提出前秋北极海冰面积与宁夏春季沙尘暴频数的负相关性,王艳玲(2005)也提出北大西洋的墨西哥湾流区是对春季北方气旋活动频数持续作用的关键海区。邵太华(2011)也提出冬季北大西洋涛动会对中国春季气候造成明显的影响,因此未来对春季蒙古气旋与 NAO、AO 的关系,春季蒙古气旋与海温、海冰的关系亦值得进一步研究。

参考文献 (References)

- Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1083–1126, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
- Bueh C, Nakamura H. 2007. Scandinavian pattern and its climatic impact [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133: 2117–2131, doi:10.1002/qj.173.
- Chang E K M, Orlanski I. 1993. On the dynamics of a storm track [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50: 999–1015, doi:10.1175/1520-0469(1993)050<0999:OTDOAS>2.0.CO;2.
- Chen L, Tan B K, Kvamstø N G, Jet al. 2014. Wintertime cyclone/anticyclone activity over China and its relation to upper tropospheric jets [J]. *Tellus A*, 66: 21889, doi:10.3402/tellusa.v66.21889.
- 陈秋士. 1987. 天气和次天气尺度系统的动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 166pp. Chen Qiushi. 1987. Dynamics of Synoptic and Sub-synoptic Scale Systems (in Chinese)[M]. Beijing: Science Press, 166pp.
- Chen S J, Kuo Y H, Zhang P Z, et al. 1991. Synoptic climatology of cyclogenesis over East Asia, 1958–1987 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119 (6): 1407–1418, doi:10.1175/1520-0493(1991)119<1407:SCOCOE>2.0.CO;2.
- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18: 1016–1022, doi:10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2.
- 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. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12055.
- Goldfarb D. 1969. Extension of davidon's variable metric method to maximization under linear inequality and equality constraints [J]. *SIAM J. Appl. Math.*, 17 (4): 739–764.
- Hodges K I. 1994. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (11): 2573–2586, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<2573:AGMFTA>2.0.CO;2.
- Hodges K I. 1995. Feature tracking on the unit sphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (12): 3458–3465, doi:10.1175/1520-0493(1995)123<3458:FTOTUS>2.0.CO;2.
- Hodges K I. 1996. Spherical nonparametric estimators applied to the UGAMP model integration for AMIP [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (12): 2914–2932, doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2914:SNEATT>2.0.CO;2.
- Hoskins B J, Hodges K I. 2002. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59 (6): 1041–61, doi:10.1175/1520-0469(2002)059<1041:NPTNTH>2.0.CO;2.
- 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 characteristic of north cyclone in China [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 18 (5): 20–26.
- 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, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<2763:TINHSC>2.0.CO;2.
- 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 (10): 1216–1229, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1216:VOTDSI>2.0.CO;2.
- 沈建国, 王娴. 1991. 蒙古气旋的天气气候分析 [J]. *气象*, 17 (2): 23–27. Shen Jianguo, Wang Xian. 1991. Analyses of the weather and climate for Mongolian cyclones [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 17 (2): 23–27.
- 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 2004. 华北强沙尘暴的数值模拟及沙源分析 [J]. *气候与环境研究*, 9 (1): 139–154. Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2004. A numerical simulation on severe dust storm events in North China and their dust sources [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 9 (1): 139–154, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2004.01.014.
- Sorteberg A, Kvingedal B. 2006. Atmospheric forcing on the Barents Sea winter ice extent [J]. *J. Climate*, 19 (19): 4772–4784, doi:10.1175/JCLI3885.1.
- Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24 (23): 2985–2988, doi:10.1029/97GL03094.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6): 608–627, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- 邵太华. 2011. 冬季北大西洋涛动对中国春季气候的影响 [D]. 南京大学硕士学位论文. Shao Taihua. 2011. Influence of the winter North Atlantic oscillation on spring climate in China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University.
- 王荣华. 1963. 东亚温带低气压路径 [J]. *气象学报*, 33 (1): 15–24. Wang Ronghua. 1963. The tracks of the extratropical cyclones in eastern Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica*, (in Chinese), 33(1): 15–24.
- 王艳玲. 2005. 近 50 a 东亚—西太平洋温带气旋活动的气候特征及异常分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Wang Yanling. 2005.

- Climatic characteristics of extratropical cyclone activity and its anomaly over East Asia and West Pacific during recent 50 years [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 王新敏. 2007. 东亚北方温带气旋的变化及其对中国北方沙尘暴的影响研究 [D]. 南京信息工程大学硕士论文. Wang Xinmin. 2007. Variation of extratropical cyclone activity in northern East Asia and impact of Mongolian cyclone on dust storms in spring over northern China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 王艳玲, 郭品文. 2005. 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, 28 (3): 391–397. Wang Yanling, Guo Pinwen. 2005. Climatic characteristics of northern cyclone activity in spring and their relationship to rainfall and temperature in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (3): 391–397, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.03.015.
- 吴伯雄, 刘长盛. 1958. 东亚气旋活动的统计研究 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), (2): 1–22. Wu Be-shyong, Liu Changsung. 1958. The statistical investigation of the activity of extratropical cyclones in East Asia [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), (2): 1–22.
- 谢作威, 布和朝鲁. 2012. 东北冷涡低频活动特征及背景环流 [J]. 气象学报, 70 (4): 704–716. Xie Zuwei, Bueh Cholaw. 2012. Low frequency characteristics of Northeast China cold vortex and its background circulation pattern [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (4): 704–716, doi:10.11676/qxb2012.057.
- 叶笃正, 李麦村. 1965. 大气运动中的适应问题 [M]. 北京: 科学出版社, 7–15. Ye Duzheng, Li Maicun. 1965. Adaptive Problems in Atmospheric Motion (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 7–15.
- 杨建玲, 何金海, 赵光平. 2003. 宁夏春季沙尘暴与北极海冰之间的遥相关关系 [J]. 南京气象学院学报, 26 (3): 296–307. Yang Jianling, He Jinhai, Zhao Guangping. 2003. Telecorrelation of arctic sea-ice with spring sandstorm in Ningxia [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26 (3): 296–307, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2003.03.002.
- 姚素香, 张耀存, 周天军. 2003. 近 50 年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.
- 张颖娴. 2012. 北半球温带气旋的气候学及其变率研究 [D]. 南京信息工程大学博士论文. Zhang Yingxian. 2012. A climatology and variation research of extratropical cyclones in the North Hemisphere [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 张高英, 赵思雄, 孙建华. 2004. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 9 (1): 101–115. Zhang Gaoying, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2004. Analysis of climatological characteristics of severe dust storms in recent years in the northern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (1): 101–115, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2004.01.011.
- 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 2004. 2002 年 3 月 20 日沙尘暴天气的影响系统、起沙和输送的数值模拟 [J]. 干旱区资源与环境, 18 (S1): 72–80. Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2004. Numerical simulation of synoptic background, sources, emissions, and transport of dust storms during 20 Mar, 2002 in China [J]. Journal of Arid Land Resources & Environment (in Chinese), 18 (S1): 72–80.
- 赵琳娜, 屠妮妮, 矫梅燕. 2007. 不同动力热力条件下蒙古气旋引发沙尘天气过程的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 329–338. Zhao Linna, Tu Nini, Jiao Meiyun. 2007. Comparison of two types duststorms weather on different dynamical and thermal background condition [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 329–338, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.03.014.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 108–141. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Tianqixue Yuanli he Fangfa (in Chinese) Principles and methods of synoptic meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 108–141.