亚洲中高纬环流春夏季节转换过程的关键特征

布和朝鲁1林大伟2齐道日娜3

1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

²中国气象科学研究院云雾物理环境重点实验室,北京100081

3南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预

报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

收稿日期 2021-02-06 网络预出版日期

- **作者简介** 布和朝鲁,男,1968年出生,研究员,博士生导师,主要从事中高纬大气动力学和短期气 候预测研究。E-mail: bueh@lasg.iap.ac.cn
- 通讯作者 布和朝鲁, E-mail: bueh@lasg.iap.ac.cn
- 资助项目 国家自然科学基金重点项目41630424
- Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41630424)

摘要亚洲中高纬环流春夏季节转换是亚洲大陆上发生的不同区域春夏季节转换中的一 个重要组成部分,它为江淮流域梅雨形势的建立提供必要的中高纬环流条件。但是关于 其独特性和关键特征,迄今为止尚没有系统性的总结。本文利用NCEP/NCAR再分析资 料I的逐日数据,分析和总结了这一春夏季节转换过程的关键特征。亚洲中高纬环流春 夏季节转换以500 hPa东北亚脊和"双阻型"环流形势的依次建立为重要标志。东北亚脊 及其相关的海陆温度差异的形成主要归因于东北亚积雪融化和局地强烈增温过程。东北 亚低压 (850 hPa)的建立是亚洲中高纬环流春夏季节转换的另一个重要标志。当季节转 换发生时,青藏高原上空的200 hPa急流轴从~35°N向北跳到~37°N,与此同时亚洲温带 急流彻底消失。伴随着季节转换,亚洲中高纬地区近地面温度经向梯度减弱,高频瞬变 斜压扰动随之减弱;与之形成鲜明对比,低频天气系统,包括亚洲阻塞高压和东北冷涡 系统,则成为该地区主导天气系统。本文也从春夏季节转换早晚的角度,探讨了亚洲中 高纬环流和天气系统的演变特征,由此进一步补充了春夏季节转换的关键信息。 关键词 亚洲中高纬环流 春夏季节转换 东北亚脊 东北亚低压 阻塞高压

文章编号

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2100.20000

Key Circulation Characteristics of Spring-to-summer Seasonal Transition Process

over the Mid- and High Latitude Asia

BUEH Cholaw¹, LIN Dawei², CHYI Dorina³

¹International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100029

²Key Laboratory for Cloud Physics, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

³Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing

210044

Abstract The spring-to-summer seasonal transition over the Mid- and High Latitude Asia (MHASST) is an important part of the several spring-to-summer seasonal transitions in different regions of the Asian continent. It provides the necessary circulation conditions in the mid- and high latitudes for the establishment of the Meiyu rainfall in the Yangtze and Huaihe River basins. However, so far there is no systematic summary on its uniqueness and key characteristics. In this paper, we analyze and summarize the key characteristics of the MHASST process, based on the daily data of NCEP / NCAR reanalysis data I. The MHASST is symbolized by the establishment of the Northeast Asian ridge at 500 hPa and then the "double blocking" circulation pattern. The formation of the Northeast Asian ridge and its related land sea temperature difference is mainly attributed to the snow melting process and thus the local strong warming process in Northeast Asia. The establishment of the northern East Asian low (850 hPa) is another important sign of the MHASST. When the MHASST occurs, the 200 hPa Asian jet axis over the Tibetan Plateau jumps northward from ~ 35° N to ~ 37° N, while the Asian temperate jet disappears completely. With the seasonal change, the meridional gradient of near surface temperature in the mid- and high latitude Asia weakens, thus causing the attenuation of high frequency transient baroclinic disturbances. In contrast, low-frequency weather systems, including the Asian Blocking high and the northeast China cold vortex system, become the dominant weather systems in the same region. From the perspective of the early and late timing of the MHASST, this paper also discusses the evolution features of the circulation and weather system over the mid- and high

latitude Asia, and the results further supplement the key information of the climatic MHASST.

Key words Mid- and high latitude circulation over Asia, spring-to-summer seasonal transition,

Northeast Asian ridge, northern east Asian low, blocking high

1 引言

春夏季节转换问题是大气环流研究中一个经典的研究问题,长期以来一直受到普遍 关注。它是大气环流变化的一个特殊阶段,可以作为大气环流变化研究的一个切入点。 从春天到夏天,亚洲大陆上从南到北会发生若干次的季节性环流调整过程,包括南海季 风爆发、印度季风爆发、西北太平洋季风爆发等。亚洲中高纬春夏季节转换也是其中的 一个重要的季节性调整环节。亚洲中高纬春夏季节转换具有独特的性质和作用。最近的 研究表明,它与我国初夏北方天气气候以及江淮梅雨形势存在密切的联系,甚至可能对 随后整个夏季中国东部降水分布具有指示意义(Chyi et al., 2021;陈沛宇等, 2021)。

叶笃正等(1958)很早就提出了东亚大气环流在六月突变的现象。与之对应,从5月底 至6月初副热带高空西风急流从青藏高原南麓向北移动,并且与高原北侧的西风急流合 并。这一现象在时间上与印度夏季风的爆发几乎同时发生。6月初,整个东亚上空副热 带至中高纬行星尺度流型均发生实质性的转变,由春季形势转入典型的夏季形势。这一 重要发现为中国江淮梅雨的认识和预报奠定了基础(陶诗言等,1958; Tao and Chen, 1987)。

亚洲中高纬环流的春夏季节转换略早于江淮梅雨形势的建立(叶笃正等,1958;)。 可以认为,亚洲中高纬春夏季节转换之后的中纬度天气扰动及对应的弱冷空气活动是江 淮流域梅雨锋形成和稳定维持的一个重要原因(Tao and Chen,1987;陶诗言和卫捷,2006; 刘芸芸和丁一汇,2008)。Chyi et al. (2021)最近的研究表明,亚洲中高纬地区(或北亚 地区)入夏时间的早晚能够直接影响江淮流域入梅形势。平均而言,亚洲中高纬地区入 夏早(晚)年江淮流域入梅时间则早(晚)1-2周。可见,亚洲中高纬环流的春夏季节转 换过程不仅对局地天气气候产生影响,还对东亚副热带环流和江淮梅雨形势具有重要的 影响。

关于北半球中高纬环流春夏季节转换,过去研究主要认为环流由春季三脊/三槽结构向夏季四脊/四槽结构的转变(叶笃正等,1958;朱乾根等,1981)。最近的研究表明,

东北亚脊的稳定建立是亚洲中高纬环流春夏季节转换的重要标志(Chyi et al., 2021)。5 月东亚大槽盛行于东亚/西太平洋地区上空,仍反映冬季流型特点,但到了6月,50°N以 北的东亚大槽被东北亚脊替换,亚洲中高纬环流由此进入典型的夏季流型。

亚洲中高纬环流春夏季节转换过程在季节内尺度上的关键特征,包括温度和环流变 化特征,迄今为止仍没有一个系统性的研究。亚洲中高纬环流春夏季节转换过程与东北 亚低压、亚洲/北太平洋瞬变扰动强度、亚洲阻塞高压活动以及东北冷涡活动等都存在 密切的联系。研究表明,东北亚低压是夏季东亚大气环流系统的一个重要组成部分(Lin and Wang, 2016; Du et al., 2017),其生成和成熟可能是亚洲中高纬环流春夏季节转换在对 流层低层的关键标志。春夏季节转换时期东北亚低压和东北亚脊如何生成和相互作用值 得我们高度关注。东亚天气扰动在隆冬季节被抑制,在春季变得非常活跃(Nakamura, 1992; Nakamura et al., 2002),但进入夏季后又明显减弱。那么,在季节内尺度上,东亚 天气扰动的季节变化特征是什么样的?这个问题与副热带暖湿气流向中纬度扩展的事 实之间存在内在的关联,值得我们进一步揭示。进入初夏,亚洲阻塞高压活动分布发生 明显的变化,东北低涡也开始变得活跃(谢作威和布和朝鲁,2012; Xie et al., 2012)。那 么,亚洲中高纬环流春夏季节转换究竟如何与这些天气系统的变化相联系?这方面的研 究将对东北亚初夏温度和降水的预测具有重要的参考意义。

本文试图刻画亚洲中高纬环流春夏季节转换过程的关键特征,并揭示其与东亚天气 扰动、亚洲阻塞高压活动和东北冷涡活动的内在联系;从春夏季节转换的早晚出发,探 究其对关键天气系统(如阻塞高压系统)的影响。本文结论将有助于深入认识东亚大气 环流在春夏过渡时期的演变规律,且为中国初夏天气气候的预测提供新的思路和方法。

2 数据和方法

本文使用了 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) /NCAR (National Center for Atmospheric Research) 再分析资料 I 的逐日气象要素场数据,其水平分辨率 2.5°×2.5°, 垂直方向上有 17个常规气压层 (Kalnay et al., 1996)。所用气象要素为各

层位势高度、850 hPa、300 hPa 和 200 hPa 水平风、850 hPa 相对湿度以及表面气温(SAT)。 主要分析 5 月 1 日至 6 月 31 日期间的逐候数据,时间跨度为 1948-2019 年。

本文采用 Small et al. (2014) 基于平均位涡(PV) 计算的二维阻塞高压指数,这一 指数能够清晰地刻画出阻塞高压活动的二维分布特征(Xie and Bueh, 2017)。定义步骤如 下:1)计算 500 hPa 至 150 hPa 的平均 PV 距平(即 mAPV 距平);2)在北半球 40°N-75°N 范围找到距平小于-1.0 PVU(1 PVU = 10⁻⁶ m² s⁻¹ K kg⁻¹)的格点; 3)如果存在平均 PV 距平小于-1.0 PVU 的区域,且其空间范围大于 15°×15°,并能够持续 5 天以上,则定 义发生一次阻塞高压事件; 4)记录每一格点的阻塞高压发生频率,将其称为 mAPV 阻 塞高压频率。详见 Small et al. (2014)和 Xie and Bueh (2017)。

以 300 hPa 高频瞬变扰动动能(EKE300)来描述风暴路径强度和天气扰动强度(Pelly and Hoskins, 2003; Xie and Bueh, 2017; Gao et al., 2019)。基于逐日 300 hPa 水平风资料和高 通滤波器(截断周期为 8 天)得到高频瞬变风场,由此计算出 EKE300。具体细节请参 考 Gao et al. (2019)。文中关于东北冷涡的界定,采用了谢作威和布和朝鲁(2012)的方 法,并统计了研究时段(1948-2019年 5-6 月)的东北冷涡活动天数。东北冷涡活动范围 (即东北冷涡关键区)为115°-140°E, 35°-55°N。

文中沿用了 Chyi 等 (2021) 最近界定的亚洲中高纬地区春夏季节转换日期 (见其表 1)。其中,使用了国家气候中心的记候法,一年 72 候,每月 6 候。她们对亚洲中高纬 地区入夏的界定方法如下: (1) 关键区 (70°-160°E, 50°-75°N) 平均 2m 温度的二阶导数 (关于时间) 在不同年代际时段都在 6 月第 2 候 (第 32 候,记为 P32) 出现极小值。 与此对应的关键区增温过程是先剧烈增温,后在 P32 趋于稳定。由此她们确定亚洲中高 纬地区气候平均入夏时间为 P32。(2) 将关键区 P32 2m 温度的多年平均值作为入夏的阈 值。详见 Chyi 等 (2021) 的方法。若早 (晚)于 P32 入夏,则记为入夏早 (晚)年。 入夏早年 (P30 和 P31 入夏) 共 19 年,分别为 1953-1955、1957、1959、1960、1981、1990、 1991、2001、2005、2008-2013、2015、2016 年;入夏晚年 (P33 和 P34 入夏) 共 21 年, 分别为 1961-1964、1968-1970、1972、1974、1976、1978、1983、1987、1989、1992、1993、 1996、1997、1999、2004、2007,其余年为正常年 (P32 入夏)。

积雪资料是由 Rutgers 大学全球积雪实验室开发并改进的周平均北半球积雪覆盖率

(snow cover extent, SCE)产品和美国冰雪中心采用交互式多传感器的积雪产品融合而成(Robinson 等, 2012; Estilow 等, 2015),该数据在分辨率为 88×88 的极地坐标投影上以笛卡尔网格提供,网格的大小由高纬地区的 29643km²到低纬地区的 42394km²不等,数据时段为从 1966 年 10 月 4 日至今,积雪资料在本文所选用的时段为 1967-2017 年。本文将原始的积雪覆盖率数据在空间上线性插值到 2.5°×2.5°标准格点上,然后再将其在时间上线性插值为逐候数据。

3春夏季节转换的关键特征

3.1 环流变化

关于北半球中高纬环流春夏季节转换,过去研究多认为 Z500 场由春季三脊三槽结构向夏季四脊四槽结构的转变(叶笃正等,1958)。研究表明,对流层中高层东北亚脊的建立是北半球中高纬环流 5-6 月发生的最显著变化,即是亚洲中高纬环流春夏季节转换的一个重要标志(朱乾根等,1981; Chyi et al., 2021)。

图 1 为 P28 (5 月第 4 候) 至 P34 (6 月第 4 候)的北半球 500 hPa 位势高度(Z500)场的演变情况。亚洲中高纬地区入夏之前(图 1a 和 1b),北半球两大陆(欧亚大陆和北美大陆)的西部为脊,东部海陆交界处为大槽,极涡呈三极,其中两个伸向东亚大槽和北美大槽,另一个最明显的极则位于阿留申低压区上空。这时期极涡在亚洲大陆一侧的极与东亚大槽相连,呈为一体,这反映了典型的冬季环流形势(叶笃正等,1958;丁一汇,1991)。亚洲中高纬地区的春夏季节转换发生的时间是 P32 (Chyi et al., 2021),这时东北亚区 Z500 变化在北半球中高纬地区中最为显著(图 1c),从贝加尔湖西北侧至俄罗斯远东地区,Z500 的抬升都非常明显,与之对应,极涡在亚洲大陆一侧的一极减弱和北退(见 5450 gpm 线),东北亚脊(50°N 以北)建立。东北亚脊一旦建立起来就能稳定维持(图 1d),直到盛夏(陶诗言等,1958; Tao and Chen,1987;张庆云和陶诗言,1998; Buch et al., 2008)。随着东北亚脊的建立,乌拉尔脊也发展起来,同时这两个脊之间会生成一个槽,其南端处在巴尔喀什湖和贝加尔湖之间(图 1d)。入夏后的上述环流特征,我国气象工作者称之为"双阻型"环流形势。由此可以证实,在东亚北部上空东亚大槽被东北亚脊替换是亚洲中高纬地区春夏季节转换的一个重要标志。

图 1 气候平均 Z500 场 (等值线,间隔: 50 gpm)及其纬偏场 (填色,gpm): (a) P28, (b) P30, (c) P32 和 (d) P34。 粗实线为 5450 gpm 等值线,每图最低点为 (20°N, 90°E) Figure 1. Climatological 500-hPa geopotential height (contours; drawn every 50 gpm) and its zonal difference (color shaded; units: gpm) for (a) P28, (b) P30, (c) P32 and (d) P34. Heavy black line represent 5450 gpm, the lowest point of the map is (20°N, 90°E).

过去研究认为,从整个北半球中高纬环流的变化来看,三脊转为四脊(或三槽转为 四槽)是入夏环流型的典型特点(叶笃正等,1958;朱乾根等,1981)。也有人基于环流 谐波特征,将北半球中高纬环流的入夏变化称为"3波转为4波"。图2给出50°-70°N纬 带内平均的Z500纬偏值的时间-经度分布图,反映了行星尺度槽脊的季节性演变特征。 P32之前,北半球中高纬环流以两脊两槽为主要特征,其中东亚大槽区至北太平洋的低 值区为宽槽,东北大西洋至西西伯利亚的高值区为宽脊。P32以后,北半球中高纬环流 形势发生实质性变化,两脊两槽转为三脊三槽。由图2可以进一步证实,亚洲中高纬环 流春夏季节转换的重要标志,一是在春季东亚大槽北部区域(50°N以北)东北亚脊的建 立,二是欧亚大陆西部的宽脊变窄并东移,变成局部的乌拉尔脊。这与前述"双阻型" 环流形势是一致的。值得注意的是,东北亚脊的形成早于乌拉尔脊,这启示我们,前者 的建立可能有利于后者的形成,值得在以后的工作中进一步揭示。

如果考虑到 50°N 以南的北半球中纬度地区,环流的入夏特征也可以认为"三脊转为 四脊"或 "3 波转为 4 波",因为北大西洋中纬度脊(50°N 以南)在 5 月和 6 月都存在 (图 1)。但就整个北半球中高纬环流而言,将春夏季节转换描述为"三脊转为四脊"或 "3 波转为 4 波"并不恰当。

图 2 50°-70°N 纬带内平均的 Z500 纬偏值(填色,gpm)时间-经度分布图,纵坐标为 P25-P36 Figure 2. The average zonal difference from 50°N to 70°N of climatological 500 hPa geopotential height (color shaded; units: gpm). The x-coordinate is the longitude and the y-coordinate is the pentad.

当亚洲中高纬地区春夏季节转换发生时,对流层低层环流也发生显著的变化。图 3a-3c 给出了这一时期 850 hPa 位势高度(Z850)场和水汽通量场。在水汽通量场上比较 容易分辨出西太平洋副热带高压(简称西太副高)的北缘,因为再往北水汽通量就锐减 了。P30 到 P34,极涡在亚洲一侧的极逐渐减弱和北缩(0℃ 线向北收缩),西太副高也 随之北移,在P34时其北缘到达长江流域和日本南部。当季节转换发生时,亚洲中高纬 地区对流层低层最引人注目的环流变化是东北亚低压的生成。关于东北亚低压, 过去研 究较少,但近5年受到广泛的关注,在其关键特征、对东北亚地区夏季降水的影响以及 生成机理方面已有一些重要的研究成果(例如, Lin and Wang, 2016; Du et al., 2017; Lin and Bueh, 2021)。东北亚低压以对流层低层深槽或闭合低压为主要特征,其形成与亚洲大地 形的动力和热力作用有关。欧亚大陆由西北侧的平原区和东南侧的亚洲大地形组成,其 分界线呈西南-东北走向,自青藏高原、阿尔泰山、萨彦岭等的外沿伸至俄罗斯远东地 区。为方便起见,将这一分界线称之为亚洲地形分界线(在图 3 中标出了 1500 m 以上的 地形,上述地形分界线就很容易看出来)。当西风气流在青藏高原北侧越过萨彦岭时在 其背风坡上形成一个低压槽, 而它在 5 月上中旬还只是一个浅槽(图略), 它到了 5 月 下旬有所加深(图 3a)。而当亚洲中高纬地区发生春夏季节转换时(P32),在 Z850场上 东北亚地区出现闭合低压(图 3b),这表明东北亚低压已生成。东北亚低压与暖舌相配, 属于热低压, 它成为闭合低压也是上游亚洲地形分界线附近的暖脊发展和鄂霍茨克海暖 脊发展的结果(图 3b 和 3c)。He et al. (2020)的数值模拟试验结果证实,东北亚低压西 北侧和东北侧暖脊的发展和相向而行(图 3a-3c)主要是由亚洲大地形感热加热引起的 (见他们的图 6a)。

图 3 气候平均 850 hPa 位势高度场 (等值线,间隔为 15 gpm)、水汽通量场 (矢量,单位: g s⁻¹ cm⁻¹ hPa⁻¹) 以及温度场 (填色,单位: ℃): (a) P30, (b) P32 和 (c) P34; (d) -(f) 同 (a) - (c),但为水汽通量增量场 (矢量,单位:gs⁻¹ cm⁻¹ hPa⁻¹)。红色粗实线为 0℃线,框区为东北亚低压关键区 (45°-60°N, 110°-140°E),灰色表示高于 1500 m 地形 **Figure 3.** Climatological 850 hPa geopotential height (contours; drawn for every 15 gpm), water vapor flux (vectors; units: g s⁻¹ cm⁻¹ hPa⁻¹) and temperature (color shaded; units: K) for (a) P30, (b) P32 and (c) P34. (d) - (f) as in (a) – (c), but for water vapor flux increment (vectors; units: $g s^{-1} cm^{-1} hPa^{-1}$). Red heavy lines represent 0 °C. Gray shading indicates topography higher than 1500 m and the box area denotes the key area of northeastern Asian low (45°-60°N, 110°-140°E).

图 3d-3f 为 850 hPa 水汽通量的增量场及其变化特征。其中,某一候的水汽通量增量 是指当前候的水汽通量减去前一候的通量。在季节转换发生之前(P30),在东北亚关键 区由南向北的水汽通量有所增加(图 3d),但这与西太副高的水汽输送没有直接联系(图 3a 和 3d)。但在季节转换发生时(P32),随着东北亚低压的生成,从西太副高西北侧到 东北亚关键区的水汽通量明显增强(图 3b 和 3c),并且此后水汽通量的这一增强情形一 直持续(图 3c 和 3f),至 8 月份(Lin and Buch, 2021)。实际上,Lin and Wang (2016) 揭示了东北亚低压系统从西太副高北侧向东北亚地区输送水汽的这种"接力作用"。东 北亚低压系统的水汽输送作用非常重要,其产生的凝结潜热也正是东北亚低压在整个夏 季能够维持的一个重要原因(Lin and Buch, 2021)。综上所述,东北亚低压的生成本身就 是亚洲中高纬地区春夏季节转换的一个重要标志。

为了说明对流层中层东北亚脊和乌拉尔脊的形成与局地表面气温(SAT)之间的联 系,我们在图 4 中给出了气候平均 P28-P34 SAT 场及其增量场。其中,SAT 增量是指当 前候的 SAT 值减去前一候的对应值。P32 之前(图 4a 和 4b),在东亚/西北太平洋地区, 纬向海陆温度差异在 50°N 以南已经非常明显,这很容易从 285K(紫色)及以上的等温 线分布看出,海陆交界处,大陆一侧为温度脊,海一侧为温度槽。但纬向海陆温度差异 在 50°N 以北还是比较弱,这由 280K(深蓝色)及以下的等温线分布可以看出。SAT 增 量场显示,这一时期东北亚增暖非常明显,东北亚局地闭合等温线也说明这一点(见图 4a 中的浅蓝色闭合线和图 4b 中的深蓝闭合线)。由图 5a 和 5b 可见,东北亚增暖与积雪 融化和雪线的北退密切相关。Chyi et al. (2021)指出,积雪融化与地表强烈升温之间的 正反馈过程是亚洲中高纬地区(或东北亚地区)春夏季节转换的一个重要驱动机制。具 体来说,温度升高引起无雪区面积的增加,这样地表吸收更多的太阳短波辐射,进而又 加速地表升温,形成一个正反馈过程。东北亚地区在这一时段的增温与局地 Z500 场逐 渐分叉的现象(图 1a 和 1b)一致。入夏(P32;图 4c)时,东北亚强增温区靠近次极区, 同样与积雪融化区域一致(图 5c)。由图 4c 和 4d 的 280K 等温线的纬向分布可见,这时

东北亚地区暖脊和其临海冷槽已形成,标志着暖大陆-冷海洋的显著海陆温度差异的建立。我们注意到,西风漂流区海温的升高相对而言较弱,且在 P32 前后没有明显的差异。 上述事实表明,在 50°N 以北东亚/西北太平洋地区纬向海陆温度差异的形成以及东北亚 脊的建立主要取决于东北亚积雪融化导致的强烈增温过程(Chyi et al., 2021)。

乌拉尔脊的形成与乌拉尔山附近的增温相对应,但与局地的季节性融雪过程没有关联,因为这时局地积雪已融化殆尽(图 4d 和 5d),增温主要是由吸收的晴空短波辐射加热引起的(图略)。可以认为,乌拉尔山脊的形成与东北亚脊形成后的大气环流对亚洲大地形和非绝热加热的响应密切联系。

亚洲中高纬春夏季节转换前后,北极地区增温的差异非常明显。季节转换之前北极地区增温显著,但季节转换之后增温就非常弱了。这与 P32 之后极涡减弱北退的事实一致(图 1c 和 1d)。北美地区没有系统性的增温,相对而言其增温比东北亚弱。

图 4 气候平均 SAT (等值线,间隔: 5 K)及其增量场 (填色,单位:K): (a) P28, (b) P30, (c) P32 和 (d) P34。浅蓝、深蓝以及紫色等值线分别代表 275K、280K 以及 285K 等温线。灰色表示高于 1500m 的地形。每图最低点为 (20°N, 90°E)

Figure 4. Climatological surface air temperature (contours; drawn every 5 K) and its incremental (color shaded; units: K) for (a) P28, (b) P30, (c) P32 and (d) P34. Light blue, dark blue and purple lines represent 275, 280 and 285. The altitude of gray area is higher than 1500 m. The lowest point of the map is (20°N, 90°E).

图 5 气候平均积雪覆盖率(等值线,间隔: 20%)及其减量场(填色,单位:%):(a) P28,(b) P30,(c) P32 和(d) P34

Figure 5. Climatological snow cover extent (contours; drawn every 20%) and its decrement (color shaded; units: %) for (a) P28, (b) P30, (c) P32 and (d) P34.

亚洲中高纬春夏季节转换也体现在亚洲急流的季节性变化当中。叶笃正等(1958) 最早关注了青藏高原南侧的高空急流从春末开始向北移动,并在6月初与高原北侧的北 支急流合并为一条急流的过程(Lin and Lu, 2008;张耀存等, 2008)。研究表明,一方面, 当亚洲副热带急流核向西移动到青藏高原时,江淮流域梅雨开始(Zhang et al., 2006); 另一方面,亚洲中高纬地区的温带急流(或极锋急流)的充分减弱对亚洲夏季风的爆发 和梅雨开始具有启示意义(李崇银等, 2004;张耀存等, 2008)。因此,下面我们探讨亚 洲中高纬春夏季节转换与亚洲急流季节性变化的联系。

如图 6a 所示,自 5 月第一候(P25)到 6 月第 6 候(P36),亚洲高空急流轴线从青 藏高原南侧上空向北移动到青藏高原北侧上空(~40°N),这说明经向温度梯度大值区(或 冷暖气团交汇带)随着季节进程不断向北推进(张耀存等,2008)。由图 6a 可见,急流 在向北推进的过程中,有时比较稳定,有时北跳明显。当亚洲中高纬春夏季节转换发生 时(P31-P32),青藏高原上空急流轴(65°-105°E)出现明显北跳的现象,从~35°N向北 跳到~37°N。由图 6b-6e 可见,这时西西伯利亚和中西伯利亚上空西风气流显著减弱, 200 hPa 纬向风速(U200)的10 ms⁻¹等值线向南收缩至 50°N 及以南地区。这说明随着季 节转换亚洲温带急流已经消失,这与极涡的减弱和北缩现象基本一致(图 1)。紧接着在 P34-P35 时急流又一次北跳到~40°N(图 6a),这时青藏高原上空的急流核向西移动,对 应着江淮流域梅雨开始(李崇银等,2004;Zhang et al.,2006;张耀存等,2008)。另外, 东亚高空急流在 P26-P27 期间从~30°N 北跳到~35°N,对应着南海夏季风的爆发;伊朗 高原上空急流(50°-70°E)在 P27-P28 和 P30-P31 期间两次北跳,前一次从~30°N 跳到 ~33°N,后一次则从~34°N 跳到~36°N。其中,急流在 P30-P31 间的北跳对应着南亚夏 季风的爆发(李崇银等,2004;Lin and Lu,2008)。

图 6(a) P25-P36 期间亚洲副热带急流轴线的位置。(b)-(e) 气候平均 200 hPa 纬向风速 U (等值线间隔为 10 m/s; 斜线区为 U>20 m/s 的区域): (b) P28, (c) P30, (d) P32 和 (e) P34。灰色表示高于 1500m 的地形

Figure 6. (a)The position of climatological axis of jet stream over Asia from P25 to P36. The climatological 200 hPa zonal wind (contours drawn every 10 m/s, slash area larger than 20 m/s) for (b) P28, (c) P30, (d) P32 and (e) P34. The altitude of gray area is higher than 1500 m.

3.2 天气系统变化

当亚洲中高纬地区发生春夏季节转换时,大气环流显出突变或"大调整"现象(陶 诗言等,1958;叶笃正等,1958;李崇银等,2004)。这是因为影响中高纬地区的一些重 要天气系统,包括阻塞高压、瞬变波扰动以及东北冷涡等,也发生了实质性的变化。下 面我们就探讨这些天气系统的季节性变化特征。

图 7 (a) - (d) 气候平均 mAPV 阻塞高压频率 (等值线,间隔: 5%): (a) P28, (b) P32, (c) P34 和 (d) P38; (e) - (h) 同 (a) - (d), 但为 300 hPa 瞬变涡动动能 (EKE300; 等值线,间隔为 10 m²s⁻²)

Figure 7. Climatological mAPV block frequency (contours; drawn every 5%) for (a) P28, (b) P32, (c) P34 and (d) P38. (e, f, g, h) are the same as (a, b, c, d), but for 300 hPa EKE (contours; drawn every 10 m²s⁻²).

图 7a-7d 显示了亚洲中高纬地区春夏季节转换之前和之后的阻塞高压活动特征,图 7e-7h 为对应的瞬变涡动强度(EKE300)的分布及演变特征。就欧亚大陆上空而言,季 节转换之前阻塞高压事件主要发生于欧洲,阻塞高压频率高达 30%,在东亚中高纬地区 则阻塞较少发生,频率只有 5-10%(图 7a)。这时北太平洋风暴路径区天气扰动最强, EKE300 高达 90 m²/s²,相邻的亚洲中高纬地区次之,其大部分地区 EKE300 大于 70 m²/s² (图 7e)。相比而言,欧洲天气扰动最弱(EKE300 小于 60 m²/s²)。由此可见,季节转 换之前东北亚地区主要受高频天气扰动控制,阻塞高压活动并不多见。但是 P32 时,东 北亚地区(50°N 以北)阻塞高压频率明显增加(比 P28 时增加了 50%左右),其中有些 地方阻塞频率已超过 15%(图 7b)。与之对应,在欧亚大陆上瞬变扰动强度都开始减弱, 包括北太平洋风暴路径区,但减弱最明显的地方是贝加尔湖东侧及东南侧(图 7f)。亚 洲中高纬地区春夏季节转换完成之后,东北亚地区阻塞高压活动的增加和天气扰动减弱 的季节性趋势仍会持续(图 7c, 7d, 7g, 和 7h)。P34 时亚洲阻塞高压活动呈"双阻型", 阻塞高压频率的一个高发区在东北亚,另一个在乌拉尔山区(图 7c),7 月上旬之后这 一个"双阻"形势才会淡去(图 7d),但东北亚地区仍维持较高频的阻塞形势。由于亚 洲大陆上空"双阻型"盛行的时间正好与江淮梅雨期对应,它一直被认为是江淮梅雨的 典型环流特征(陶诗言等,1958; Tao and Chen, 1987; 张庆云和陶诗言, 1998)。

图 8 给出了东北亚关键区 (70°-160°E, 50°-75°N) 平均阻塞高压频率、东北冷涡关键 区 (115°-140°E, 35°-55°N) 平均 EKE300 以及东北冷涡天数的逐候演变曲线。在春夏季 节变换时期,东北亚阻塞高压频率 (红色曲线)有两次明显的增强,P31 时 (入夏前一候)第一次增强,由 7%增加到 10%左右。Chyi et al. (2021)研究表明,P31 是东北亚地 区积雪融化引起的近地面增温最强的时候,这时经向温度梯度也最弱,因此对应的阻塞 高压活动也会明显增强;东北亚阻塞高压频率在 P34 时第二次增强,由 11%增加到 14%,恰好与江淮流域入梅对应。这次阻塞高压活动的增强可能与江淮流域入梅时的大气环流 调整有关 (陶诗言等,1958; Tao and Chen,1987),同时可能与乌拉尔山脊的稳定建立有 关。

图 8 东北亚关键区[70°-160°E, 50°-75N°]平均 mAPV 阻塞频率(红线,单位:%)、东北 冷涡关键区[115°-140°E, 35°-55°N]平均 EKE300(黑线,单位为 m²s⁻²)和东北冷涡天数 (蓝线,单位:天)的季节性演变曲线。横坐标为时间(P25-P39)

Figure 8. The average mAPV block frequency (70°-160°E, 50°-75N°; red line; units: %), average 300-hPa EKE (115°-140°E, 35°-55°N; black line; units: m^2s^{-2}) and average nuhPaer of northeastern cold vortex days (blue line; units: d). The x-coordinate is the pentad from P25 to P39.

现在我们在东北冷涡关键区(115°-140°E,35°-55°N)考察瞬变涡动强度和东北冷涡活动的季节性变化特征。东北冷涡关键区也是P32时瞬变涡动强度减弱最明显的地方(图7f)。自5月中旬(P27)开始,东北冷涡关键区的EKE300逐渐减弱(图8中的黑色曲线),而且亚洲中高纬地区春夏季节转换之后(P33)减弱程度更加明显,这时EKE300减弱到P27时的一半左右。由图5c和5d可见,U200大于20ms⁻¹的强西风带在P32之后明显减弱和收缩,这与东北区域天气涡动的大幅减弱事实相一致。有意思的是,亚洲中高纬季节转换时期东北冷涡活动(图8中的蓝色曲线)则显著增强,与对应的天气扰

动强度呈相反的演变特征。从 P30 开始东北冷涡天数迅速增加,其百分比(相对于全天数)为 35%左右,并将这一百分比保持到梅雨期结束为止(P38 左右),其中 P32 时冷涡 天数百分比甚至达到 48%。东北冷涡活动属季节内时间尺度天气过程(我国气象业务工 作者也称中期天气过程),频率上低于斜压天气扰动,通常以我国东北地区持续 3 天及 以上的冷性闭合低压或低压槽来识别和界定(孙力等,1994;孙力等,2000;廉毅等, 2010;谢作威和布和朝鲁,2012;布和朝鲁和谢作威,2013)。由此看来,在亚洲中高纬 季节转换时期,东北冷涡活动和东北地区瞬变天气扰动是同一区域却不同频带的现象, 两者存在此消彼长的反向关系。综上所述,亚洲中高纬地区春夏季节转换以东北亚阻塞 高压活动和东北冷涡活动的增强以及东北地区瞬变天气扰动的显著减弱为主要特征。

需要指出,东北冷涡活动和东北地区天气扰动之间的此消彼长关系是针对春夏季节 转换时期而言的。实际上,如图 8 所示,7 月和 8 月东北冷涡活动也逐渐减弱(孙力等, 1994;谢作威和布和朝鲁,2012),这不仅与东亚急流和西太副高的北进有关(孙力等, 1994;孙力等,2000),而且与东北地区天气扰动涡动强迫的减弱也有关(谢作威和布和 朝鲁,2012;布和朝鲁和谢作威,2013)。

4春夏季节转换的早晚对东亚环流和天气系统的影响

上一节主要从气候态的视角探讨了亚洲中高纬地区春夏季节转换所体现的环流和天 气系统的演变特征。这一节从年际变化的角度简单讨论春夏季节转换异常现象,以此补 充和丰富亚洲中高纬地区春夏季节转换过程的关键特征。

图 9 为亚洲中高纬地区入夏偏早年和偏晚年的 Z500 场及其距平场的季节转换特征。 在入夏偏早年,P30 时北美脊和东北亚脊同时增强,在东亚中高纬北脊南槽的分叉气流 结构提前发展和形成(图 9a)。入夏后,中西西伯利亚和极区上空变为正距平区,中西 西伯利亚脊建立(图 9b)。P34 时乌拉尔山附近出现正距平,这表明乌拉尔山脊比常年 更强(图 9c),使得亚洲中高纬环流更具双阻型特征。值得关注的是,上述环流演化过 程与一个起源于欧洲沿岸正距平中心的低频波列有关(图 9a-9c),而且随着季节转换这 一波列的波长也不断变短(与 U200 的减弱对应),看起来就像东北亚正距平中心逐渐向 西退到乌拉尔山附近一样。可以认为,入夏偏早年的季节转换特征更加锐化和突显了气 候态的季节转换过程,同时也进一步证实乌拉尔山脊的建立晚于东北亚脊的事实。图 9d-9f 可见,在亚洲中高纬入夏偏晚年,P30-P34 时段极涡区和西伯利亚区域普遍为负距 平,对应的近地面增温迟缓(图略),反映了滞后的季节循环。但其最显眼的负 Z500 距 平区出现在极涡的两极处,即格陵兰一侧和亚洲大陆一侧。其结果,入夏后的亚洲中高 纬环流型以东北亚阻塞型为主要特征,从而基本上改变了气候态的双阻型入夏**形势**。

图 9(a) - (c) 季节转换偏早年的 Z500 场(等值线,间隔为 40 gpm)及其距平场(填 色,单位:gpm): (a) P30, (b) P32 和 (c) P34; (d) - (f) 同 (a) - (c),但为季节转 换偏晚年的情形。粗实线为 5450 gpm 等值线,打点区为显著性水平超过 90%的地方。 每图最低点为(20°N, 90°E)

Figure 9. Composite 500 hPa geopotential height (contours; drawn every 50 gpm), and its anomaly (color shaded; units: gpm) for (a) P30, (b) P32 and (c) P34 in years of early summer onset. (d, e, f) are the same as (a, b, c), but in years of late summer onset. Areas above 90% confidence level are dotted; heavy lines represent 5450 gpm. The lowest point of the map is $(20^{\circ}N, 90^{\circ}E)$.

在亚洲中高纬入夏偏早年,季节转换时期亚洲阻塞高压活动明显多于常年(图 10a-10c),但由于出现阻塞高压的位置和强度存在差异,合成结果达不到显著性。这主要是因为阻塞形势的出现不仅与季节转换的早晚有关,也与环流的类型有关。由图 10a-10c 发现,在亚洲中高纬入夏偏早年的季节转换时期,北美加拿大一带的阻塞高压活动明显减弱。在入夏偏晚年(图 10d-10f),季节转换时期亚洲阻塞活动显著少于常年,但东北大西洋和北欧地区阻塞高压活动多于常年,这说明欧亚大陆上空环流仍保留着春季阻塞高压西多东少的形势。

图 10(a)-(c)季节转换偏早年的 mAPV 阻塞频率(等值线,间隔为 10%)及其距平 (填色,单位:%):(a) P30,(b) P32 和(c) P34;(d)-(f)同(a)-(c),但为季 节转换偏晚年的情形。打点区为显著性水平超过 90%的地方。每图最低点为(35°N,90°E) **Figure 10.** Composite mAPV block frequency (contours; drawn every 10 %), and its anomaly (color shaded; units: %) for (a) P30, (b) P32 and (c) P34 in years of early summer onset. (d, e, f) are the same as (a, b, c), but in years of late summer onset. Areas above 90% confidence level are dotted. The lowest point of the map is (35°N, 90°E)

我们也从入夏早晚的角度检查了季节转换时期高频天气扰动强度(EKE300)的分布 特征(图11)。入夏偏早年,亚洲中高纬地区和相邻的西北太平洋区天气扰动普遍减弱, 但减弱最明显的地方先是风暴路径区入口处西北侧(图11a),然后入夏后向上游扩展到 亚洲其他中纬度地区(图11b和11c)。这一事实与极涡伸向亚洲大陆一极的提前减弱和 北撤过程相一致(图1b-1d和图9a-9c,见5450m线)。与之相比,入夏偏晚年,季节转 换时期北太平洋风暴路径区入口处及其上游地区的天气扰动仍然比较活跃,其强度明显 强于气候平均状态(图11d-11f),这仍与极涡在亚洲大陆一侧的活动较强有关(见图9d-9f 中的5450m线)。上述分析表明,北太平洋风暴路径区入口处及附近的瞬变天气扰动强 度(EKE300)分布能够较好地反映出亚洲中高纬春夏季节转换的特性,因此也可以将 其当作季节转换的表征量。

图 11 (a) - (c) 季节转换偏早年 EKE300 场 (等值线, 间隔: 20 m² s⁻²)及其距平场 (填色, 单位: m² s⁻²): (a) P30, (b) P32 和 (c) P34; (d) - (f) 同 (a) - (c), 但为季节 转换偏晚年的情形。打点区为显著性水平超过 90%的地方。每图最低点为 (35°N, 90°E) Figure 11. Composite 300-hPa EKE (contours; drawn every 20 m² s⁻²), and its anomaly (color shaded; units: m² s⁻²) for (a) P30, (b) P32 and (c) P34 in years of early summer onset. (d, e, f) are the same as (a, b, c), but in years of late summer onset. Areas above 90% confidence level are dotted. The lowest point of the map is (35°N, 90°E).

5 结论和讨论

本文利用 NCEP /NCAR 再分析资料 I 的逐日气象要素数据,基于 Chyi 等(2021) 对亚洲中高纬环流春夏季节转换日期的界定结果,分析和总结了亚洲中高纬环流(特别 是半永久活动中心)和相应天气系统在春夏季节转换时期的关键变化特征。主要结果如 下:(1) 北半球中高纬环流春夏季节变化以 Z500 场两脊两槽转为三脊三槽为主要特征, 其中亚洲中高纬环流春夏季节转换以 500 hPa 东北亚脊和"双阻型"环流的依次建立为 重要标志。东北亚积雪融化导致的强烈增温过程可能是东北亚脊的建立和相应东北亚/ 西北太平洋纬向海陆温度差异形成的主要原因;(2) 850 hPa 东北亚低压的建立是亚洲 中高纬地区春夏季节转换的另一个重要标志。随着季节进程,暖湿气流从西太副高北侧 向东北亚地区输送,东北亚低压系统在这一输送过程中扮演者非常重要的角色;(3) 伴 随着春夏季节转换,亚洲中高纬地区阻塞高压和瞬变波活动以及东北冷涡活动也发生系 统性的快速变化。随着季节转换,亚洲中高纬地区近地面温度经向梯度减弱,因此高频 瞬变斜压扰动减弱,与此同时,低频天气系统(包括亚洲阻塞高压和东北冷涡系统)取 而代之,成为主导天气系统;(4) 本文也从春夏季节转换早晚的角度探讨了亚洲中高纬 环流和天气系统的演变特征。结果表明,季节转换的早晚所体现的环流和天气系统的演 化过程提前(或延后)和强化(或弱化)季节转换的气候平均演化特征,从而进一步证 实了季节转换的关键信息。

实际上,关于亚洲中高纬环流春夏季节转换及其"突变"特征,叶笃正等(1958) 60年前就提出来了。然而,亚洲中高纬环流和天气系统在季节内尺度上的转换特征,迄 今为止仍没有一个系统性的考察。本文揭示了亚洲中高纬环流入夏(P32)前后的一些 半永久活动中心和天气系统在季节内尺度上的关键的替换过程,可以认为是对一些新认 识的归纳和总结,可望为相关研究和业务预报提供参考。

从季节循环的角度看,春夏季节转换中大气环流的急剧变化及高空急流北跳现象总 是与南北温度梯度大值区的阶段性北跳和逐渐减少相联系(叶笃正等,1958;李崇银等, 2004; Zhang et al., 2006; Lin and Lu, 2008)。从春季到夏季,亚洲大陆上空从南到北会 发生若干次的不同纬带季节转换过程,亚洲中高纬春夏季节转换就是其中的一个重要组 成部分。尽管它反映着亚洲中高纬冷气团的减退和变性,但它具有独特的作用和性质。 首先,它属于局地环流的激烈变化,由局地积雪融化和激烈增温导致(图 3 和 4; Chyi et al., 2021);其次,亚洲中高纬春夏季节转换为西太平洋副热带高压的北上和江淮梅雨 的开始提供了有利的环流条件,因此其早晚可能对梅雨期我国东部降水格局产生影响。

如前所述,一旦春夏季节转换完成,东北亚脊和乌拉尔山脊成犄角之势,亚洲中高

纬环流呈"双阻型"。关于"双阻型",目前还没有一个令人信服的动力学解释,它可能 与亚洲夏季风爆发后的非绝热加热和亚洲大地形的动力和热力作用有着密切联系。今后 我们试着通过数值模式试验来回答这一重要的问题。

实际上,春夏季节转换异常比气候态季节转换本身更重要。不同年份的亚洲中高纬 环流春夏季节转换在季节转换之前和之后的环流型差异和环流转换时间的早晚等方面 均存在明显的不同,存在多样性。本文中我们只讨论了亚洲中高纬环流春夏季节转换的 早晚及其对应的环流和天气系统的特征,并没有探究环流型的差异及影响。今后我们通 过客观聚类方法对季节转换之前和之后的环流型加以分类,并在此基础上重新考察季节 转换异常对随后东亚环流和降水的影响。

参考文献 (References)

- 布和朝鲁和谢作威. 2013. 东北冷涡环流及其动力学特征[J]. 气象科技进展, 3(3): 34-39. Bueh C., Xie Z. 2013. Northeastern China Cold Vortex Circulation and Its Dynamical Features [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 3(3): 34-39.
- Bueh C., N. Shi, and L. Ji et al. 2008. Features of the EAP events on the medium-range evolution process and the mid- and high-latitude Rossby wave activities during the Meiyu period [J]. Chinese Science Bulletin, 53(4): 610-623
- 陈沛宇, 彭京备, 布和朝鲁, 等. 2021. 亚洲中高纬地区春夏季节转换早晚与梅雨期中国 东部降水异常的联系[J]. 气候与环境研究, 审稿中 Chen P., Peng J., Bueh C., et al. 2021. The Connection of the Summer Onset in Northern Asia with the Precipitation Anomalies in Eastern China During the Meiyu period [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), under revision
- Chyi, D., C. Bueh, and Z. Xie, 2021. Summer Onset in Northern Asia[J]. Int. J. Climatol., 41:1094 – 1111. https://doi.org/10.1002/joc.6753
- 丁一汇. 1991. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社 Ding Y. 1991. Advanced Synoptic Meteoroloy [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Du, M., Z. Lin, and R. Lu. 2017. CohPained impact of in-phase and out-of-phase variation between the northern east Asian low and western North Pacific subtropical high on east

Asian summer rainfall[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 10(4): 284 – 290, https://doi.org/10.1080/16742834.2017.1312262

- Estilow, T. W., Young, A. H., and Robinson, D.A. 2015. A long-term northern hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring[J]. Earth System Science Data, 7(1): 137 142, <u>https://doi.org/10.5194/essd-7-137-2015</u>
- Gao, N., C. Bueh, Z. Xie, et al. 2019. A novel identification of the Polar/Eurasia pattern and its weather impact in May[J]. J. Meteor. Res., 33(5): 810 – 825, https://doi.org/10.1007/s13351-019-9023-z
- He, B., and Coauthors, 2020. CAS FGOALS-f3-L model datasets for CMIP6 GMMIP Tier-1 and Tier-3 experiments[J]. Adv. Atmos. Sci., 37(1) : 18 – 28, https://doi.org/10.1007/s00376-019-9085-y
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77: 437-471
- 李崇银, 王作台, 林士哲和禚汉如, 2004. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北 跳关系的研究[J]. 大气科学, 28(5): 641-648. Li C., Wang J, Lin S., et al. The Relationship between East Asian Summer Monsoon Activity and Northward Jump of the Upper Westerly Jet Location [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2004, 28(5): 641-658
- 廉毅, 布和朝鲁, 谢作威, 等. 2010. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化[J]. 大气科学, 34: 429-439. Lian Y., Bueh C., Xie Z., et al. The Anomalous Cold Vortex Activity in Northeast China during the Early Summer and the Low-frequency Variability of the Northern Hemispheric Atmosphere Circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2010, 34(2): 429-439
- Lin Z. and C. Bueh, 2021: Formation of the northern East Asian low: role of diabatic heating[J]. Clim. Dyn., <u>https://doi.org/10.1007/s00382-020-05615-6</u>
- Lin, Z. and B. Wang. 2016. Northern east Asian low and its impact on the interannual variation of east Asian summer rainfall[J]. Climate Dynamics, 46(1 2): 83 97,

https://doi.org/10.1007/s00382-015-2570-9

- Lin Z. and R. Lu, 2008: Abrupt northward jump of the East Asian upper-tropospheric jet stream in mid-summer[]]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 86(6), 857-866
- 刘芸芸和丁一汇. 2008. 印度夏季风的爆发与中国长江流域梅雨的遥相关分析[J]. 中国科学(D辑), 38(6): 763-775. Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese), Volume 38, Issue 6: 763-775(2008)
- Nakamura, H. 1992. Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific[J]. J. Atmos. Sci., **49 :** 1629 1642
- Nakamura, H., T. Izumi, and T. Sampe. 2002. Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon[J]. J. Climate, 15: 1855 1874
- Robinson, D. A., Estilow, T. W., and NOAA CDR Program. 2012. NOAA Climate Data
 Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1.
 NOAA National Centers for Environmental Information.
 https://doi.org/10.7289/V5N014G9
- Small, D., E. Atallah, and J. R. Gyakum, 2014. An objectively determined blocking index and its Northern Hemisphere climatology[J]. J. Climate, 27: 2948 – 2970, <u>https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00374.1</u>
- 孙力,郑秀雅,王琪. 1994.东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J].应用气象学报,5(3):297-303. Sun L., Zheng X., Wang Q. 1994. The Climatological Characteristics of Northeast Cold Vortex in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 5(3): 297-303
- 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 2000.夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析[J]. 气象学报, 58(6):704-714. Sun L., Aang G., Lian Y et al. 2000. A study of the persistent activity of northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics [J]. Acta Meteorologica Sinica, 58(6): 704-714

Tao, S. and L. Chen. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in

China. In: Chang, C.P. and Krishnamurti, T.N. (Eds.) Monsoon Meteorology. London: Oxford University Press, pp. 60 – 92

- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. 气象学报, 29(2): 119-134. Tao S., Zhao Y. Chen X. 1958. The relationship between May-yu in far east and the behaviour of circulation over asia. Acta Meteorologica Sinica, 29(2): 119-134
- 陶诗言和卫 捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳[J]. 应用气象学报, 17(5): 513-527. Tao S., Wei J. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 17(5): 513-527
- 谢作威和布和朝鲁. 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 Z., Bueh C. 2012. Low frequency characteristics of northeast China cold vortex and its background circulation pattern [J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(4): 704-716
- Xie Z., Bueh C., Ji L., et al. 2012. The cold vortex circulation over Northeastern China and regional rainstorm events[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letter, 5: 134-139
- Xie, Z. W., and C. Bueh, 2017: Blocking features for two types of cold events in East Asia[J]. J. Meteor. Res., 31(2), 309 320, https://doi.org/10.1007/s13351-017-6076-8
- 叶笃正,陶诗言,李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象[J]. 气象学报, 29 (4):
 249-263. Ye D., Tao S., Li M. 1958. The abrupt change of circulation over northern
 hemisphere during June and October [J]. Acta Meteorologica Sinica, 29(4): 249-263
- 张庆云和陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响[J]. 气象学报, 56(2): 199-211. Zhang Q., Tao S. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation of east Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica, 56(2):199-211
- Zhang, Y., X. Kuang, W. Guo, and T. Zhou, 2006: Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia[J]. Geophys. Res. Lett., 33, L11708, https://doi.org/10.1029/2006GL026377

张耀存, 王东阡, 任雪娟. 2008. 东亚高空温带急流区经向风的季节变化及其与亚洲季风

的关系[J]. 气象学报, 66(5): 707-715. Zhang Y., Wang D., Ren X. 2008. Seasonal variation of the meridional wind in temperate jet stream and its relationship to the Asian monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica, 66(5): 707-715

朱乾根,林锦瑞,寿绍文. 1981. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社. Zhu Q., Lin J., Shou S. 1981. Synoptic Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press



图 1 气候平均 Z500 场 (等值线, 间隔: 50 gpm) 及其纬偏场 (填色, gpm): (a) P28, (b) P30, (c) P32 和 (d) P34。 粗实线为 5450 gpm 等值线, 每图最低点为 (20°N, 90°E) Figure 1. Climatological 500-hPa geopotential height (contours; drawn every 50 gpm) and its zonal difference (color shaded; units: gpm) for (a) P28, (b) P30, (c) P32 and (d) P34. Heavy black line represent 5450 gpm, the lowest point of the map is (20°N, 90°E).



图 2 50°-70°N 纬带内平均的 Z500 纬偏值(填色,gpm)时间-经度分布图,纵坐标为 P25-P36 Figure 2. The average zonal difference from 50 °N to 70°N of climatological 500-hPa geopotential height (color shaded; units: gpm). The x-coordinate is the longitude and the y-coordinate is the pentad.



图 3 气候平均 850 hPa 位势高度场(等值线,间隔为 15 gpm)、水汽通量场(矢量,单位:gs⁻¹ cm⁻¹ hPa⁻¹)以及温度场(填色,单位:℃):(a) P30,(b) P32 和(c) P34;(d) - (f)同(a)-(c),但为水汽通量增量场(矢量,单位:gs⁻¹ cm⁻¹ hPa⁻¹)。红色粗实线为0℃线,框区为东北亚低压关键区(45°-60°N,110°-140°E),灰色表示高于1500 m的地形

Figure 3. Climatological 850-hPa geopotential height (contours; drawn every 15 gpm), water vapor flux (vectors; units: $g s^{-1} cm^{-1} hPa^{-1}$) and temperature (color shaded; units: K) for (a) P30, (b) P32 and (c) P34. (d, e, f) are the same as (a, b, c), but for water vapor flux increment (vectors; units: $g s^{-1} cm^{-1} hPa^{-1}$). Red heavy lines represent 0 °C. The altitude of gray area is higher than 1500 m and the box area denotes the key area for northeastern Asia Low Pressure (45°-60°N, 110°-140°E).



图 4 气候平均 SAT (等值线,间隔: 5 K)及其增量场 (填色,单位:K): (a) P28, (b) P30, (c) P32 和 (d) P34。浅蓝、深蓝以及紫色等值线分别代表 275K、280K 以及 285K 等温线。灰色表示高于 1500m 的地形。每图最低点为 (20°N, 90°E) Figure 4. Climatological surface air temperature (contours; drawn every 5 K) and its incremental (color shaded; units: K) for (a) P28, (b) P30, (c) P32 and (d) P34. Light blue, dark blue and purple lines represent 275, 280 and 285. The altitude of gray area is higher than 1500 m. The lowest

point of the map is $(20^{\circ}N, 90^{\circ}E)$.



图 5 气候平均积雪覆盖率(等值线,间隔: 20%)及其减量场(填色,单位: %): (a) P28, (b) P30, (c) P32 和 (d) P34

Figure 5. Climatological snow cover extent (contours; drawn every 20%) and its decrement (color shaded; units: %) for (a) P28, (b) P30, (c) P32 and (d) P34.



Figure 6. (a)The position of climatological axis of jet stream over Asia from P25 to P36. The climatological 200 hPa zonal wind (contours drawn every 10 m/s, slash area larger than 20 m/s) for (b) P28, (c) P30, (d) P32 and (e) P34. The altitude of gray area is higher than 1500 m.



图 7 (a) - (d) 气候平均 mAPV 阻塞高压频率 (等值线, 间隔: 5%): (a) P28, (b) P32, (c) P34 和 (d) P38; (e) - (h) 同 (a) - (d), 但为 300 hPa 瞬变涡动动能 (EKE300; 等值线, 间隔为 10 m²s⁻²)

Figure 7. Climatological mAPV block frequency (contours; drawn every 5%) for (a) P28, (b) P32, (c) P34 and (d) P38. (e, f, g, h) are the same as (a, b, c, d), but for 300-hPa EKE (contours; drawn every 10 m²s⁻²).



图 8 东北亚关键区[70°-160°E, 50°-75N°]平均 mAPV 阻塞频率(红线,单位:%)、东北 冷涡关键区[115°-140°E, 35°-55°N]平均 EKE300(黑线,单位为 m²s⁻²)和东北冷涡天数 (蓝线,单位:天)的季节性演变曲线。横坐标为时间(第 25-39 候)

Figure 8. The average mAPV block frequency (70°-160°E, 50°-75N°; red line; units: %), average 300-hPa EKE (115°-140°E, 35°-55°N; black line; units: m^2s^{-2}) and average nuhPaer of northeastern cold vortex days (blue line; units: d). The x-coordinate is the pentad from P25 to P39.



图 9 (a) - (c) 季节转换偏早年的 Z500 场 (等值线,间隔为 50 gpm)及其距平场 (填 色,单位:m): (a) P30, (b) P32 和 (c) P34; (d) - (f) 同 (a) - (c),但为季节转换 偏晚年的情形。粗实线为 5450 gpm 等值线,打点区为显著性水平超过 90%的地方。每 图最低点为 (20°N, 90°E)

Figure 9. Composite 500-hPa geopotential height (contours; drawn every 50 gpm), and its anomaly (color shaded; units: m) for (a) P30, (b) P32 and (c) P34 in years of early summer onset. (d, e, f) are the same as (a, b, c), but in years of late summer onset. Areas above 90% confidence level are dotted; heavy lines represent 5450 gpm. The lowest point of the map is (20°N, 90°E).



图 10 (a) - (c) 季节转换偏早年的 mAPV 阻塞频率(等值线,间隔为 10%)及其距平 (填色,单位:%): (a) P30, (b) P32 和 (c) P34; (d) - (f) 同 (a) - (c),但为季 节转换偏晚年的情形。打点区为显著性水平超过 90%的地方。每图最低点为(35°N,90°E) Figure 10. Composite mAPV block frequency (contours; drawn every 10%), and its anomaly (color shaded; units:%) for (a) P30, (b) P32 and (c) P34 in years of early summer onset. (d, e, f) are the same as (a, b, c), but in years of late summer onset. Areas above 90% confidence level are dotted. The lowest point of the map is (35°N, 90°E)



图 11 (a) - (c) 季节转换偏早年的 EKE300 场 (等值线,间隔为 20 m² s⁻²)及其距平场 (填色,单位: m² s⁻²): (a) P30, (b) P32 和 (c) P34; (d) - (f) 同 (a) - (c), 但为 季节转换偏晚年的情形。打点区为显著性水平超过 90%的地方。每图最低点为 (35°N, 90°E)

Figure 11. Composite 300-hPa EKE (contours; drawn every 20 m² s⁻²), and its anomaly (color shaded; units: m² s⁻²) for (a) P30, (b) P32 and (c) P34 in years of early summer onset. (d, e, f) are the same as (a, b, c), but in years of late summer onset. Areas above 90% confidence level are dotted. The lowest point of the map is $(35^{\circ}N, 90^{\circ}E)$.