

字冉, 孔震, 张启悦, 等. 2020. 亚洲西风急流纬向非均匀性变化成因及其对东亚夏季气候的影响 [J]. 大气科学, 44(5): 1109–1124. ZI Ran, KONG Zhen, ZHANG Qiyue, et al. 2020. The Causes of Variation in the Zonal Asymmetry of the Asian Westerly Jet and Its Impacts on East Asian Climate in Boreal Summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1109–1124. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19232

亚洲西风急流纬向非均匀性变化成因及其对东亚夏季气候的影响

字冉^{1,2} 孔震¹ 张启悦¹ 夏阳^{2,3}

1 西双版纳傣族自治州气象局, 云南景洪 666100

2 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

3 六盘水市气象局, 贵州六盘水 553000

摘 要 利用美国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的 CMAP (Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation) 月平均降水资料、NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Design of Experiments) II 的月平均再分析资料和中国气象局国家信息中心提供的中国 160 站逐月降水和平均气温资料, 通过定义一个亚洲急流纬向非均匀性指数 (I_{Aja}), 分析了 1979~2019 年夏季亚洲西风急流纬向非均匀性的年际变化特征, 揭示了夏季亚洲急流纬向非均匀性变化异常的成因及其对东亚夏季降水和气温的影响。结果表明: 夏季亚洲西风急流纬向非均匀性具有显著的年际变化特征, 并存在 6~8 年和 2 年左右的振荡周期。当急流纬向非均匀性典型偏强(弱)年, 东亚东部地区从低纬到高纬, 降水异常主要呈现出偏多—偏少—偏多(偏少—偏多—偏少)的经向分布; 气温则在中国西部地区和日本北部偏高(低), 贝加尔湖地区偏低(高)。引起夏季亚洲急流纬向非均匀性异常的可能原因如下: 由大气非绝热加热异常而引起的热带和中纬度地区辐合/辐散运动造成的涡度源强迫, 和来自西风带中波扰动能量的注入, 两者共同作用形成并维持了与急流纬向非均匀性强弱变化相联系的异常环流, 从而使亚洲急流东、西段强度差异增强(减弱), 进而有利于急流纬向非均匀性异常偏强(偏弱)。而上述西风带中波扰动能量的东传可能与北大西洋海表面温度异常有关。这对于深刻理解夏季亚洲急流纬向非均匀性异常的形成机理提供了有用的线索。

关键词 亚洲西风急流 纬向非均匀性 东亚气候 夏季

文章编号 1006-9895(2020)05-1109-16

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19232

The Causes of Variation in the Zonal Asymmetry of the Asian Westerly Jet and Its Impacts on East Asian Climate in Boreal Summer

ZI Ran^{1,2}, KONG Zhen¹, ZHANG Qiyue¹, and XIA Yang^{2,3}

1 Meteorological Bureau of Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture, Jinghong, Yunnan 666100

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Meteorological Bureau of Liupanshui, Liupanshui, Guizhou 553000

收稿日期 2019-10-21; 网络预出版日期 2020-06-15

作者简介 字冉, 女, 1989 年出生, 硕士、工程师, 主要研究方向为中短期天气预报和气候动力学。E-mail: 153407821@qq.com

资助项目 国家重点研究发展计划重点专项 2019YFC1510201, 国家自然科学基金项目 41975073

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2019YFC1510201), National Natural Science Foundation of China (Grant 41975073)

Abstract Based on CMAP (Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation) monthly mean rainfall data and NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Design of Experiments) II Reanalysis data from NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) and the monthly precipitation and average temperature data from NMIC (National Meteorological Information Center), the authors defined an index (I_{Aja}) that describes the zonal asymmetric variation of the Asian westerly jet in the upper troposphere, from which the authors investigated the characteristics of the intensity difference between the eastern and western parts of the Asian westerly jet and its impacts on the climate of East Asia from 1979 to 2019. The conclusions are as follows: There are prominent interannual variations in the zonal asymmetry of the Asian summer westerly jet, with significant quasi-periods of 6–8 years and 2 years. When the zonal asymmetry of the Asian summer westerly jet is typically strong (weak), the wave-like anomalous rainfall pattern generates positive (negative)—negative (positive)—positive (negative) signs in the lower to higher latitudes in the East Asia sector along with negative (positive) temperature anomalies in the Lake Baikal area, and simultaneously significant positive (negative) anomalies in regions in West China and North Japan. The divergent and convergent wind components by the anomalous diabatic heating as a potential vorticity source directly induce the circulation anomalies in the mid-latitudes. The anomalous anticyclonic circulation causes the intensity of the west Asian jet to increase and the eastern segment to decrease, which strengthens the zonal asymmetry of the Asian summer westerly jet. The formation of and support provided by the zonal asymmetric anomalies of the Asian jet are affected by their convergence and divergence in the tropics and mid-latitudes, as well as the eastward propagation of wave energy in the westerlies. This eastward propagation of wave energy may be related to the sea surface temperature anomaly of the Northern Atlantic. These results facilitate a better understanding of the formation mechanisms of the zonal asymmetry of the Asian summer westerly jet.

Keywords Asian westerly jet, Zonal asymmetry, East Asian climate, Boreal summer

1 引言

北半球副热带西风急流是位于对流层上层的行星尺度环流系统。夏季西风急流带通常位于 40°N ，由于在东北太平洋上空风速减弱，把副热带西风急流分为了亚洲急流 ($0^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$) 和北美急流 ($120^{\circ}\text{W}\sim 0^{\circ}$)。大量研究表明：亚洲西风急流的异常与亚洲夏季风的爆发 (叶笃正等, 1958; Lau and Li, 1984; 李崇银等, 2004; 廖清海等, 2004)，大气环流的转换 (陶诗言和陈隆勋, 1957; 叶笃正等, 1958; 任雪娟等, 2010; 秦育婧和卢楚翰, 2017; 谢韶青和卢楚翰, 2018) 和东亚梅雨的开始和结束 (刘匡南和郭鸿勋, 1956; 陶诗言等, 1958) 关系密切。此外，亚洲西风急流不仅与许多天气尺度系统有着密切关系，如影响气旋、锋面等的形成和发展，还往往与高空的锋区相对应，且有时与低空急流相配合，使得锋区内的扰动增长和风暴发展，造成剧烈的天气现象 (Reiter, 1963; Cressman, 1984)。

亚洲急流存在东段和西段两个中心，体现了亚洲急流强度的纬向非均匀性。夏季亚洲上空沿 40°N 的纬向风速中心位于 200 hPa 高度层上，两个风速中心分别位于 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 的中国西部地区 (中东急流) 和 140°E 以东的日本及其洋面上 (东

亚急流) (刘飞等, 2006; 杨莲梅和张庆云, 2008)。研究表明，亚洲地区上空的中东急流和东亚西风急流以 100°E 为界，其季节内变化有很大差异，但两者并非孤立地存在，相互之间存在密切联系。通常，在 11 月至次年 4 月开始连接成一个整体，5 月发生断裂，盛夏时期东亚急流强度最弱，位置达最北且中心西移，而中东急流则中心略有东移，较前者中心强度偏强，秋季两者逐渐加强，至 12 月恢复冬季平均水平 (陶诗言和陈隆勋, 1957; 陶诗言等, 1958; 姚慧茹和李栋梁, 2013)。

亚洲急流东、西段季节性变化存在显著差异。况雪源和张耀存 (2006a) 曾指出亚洲急流季节内 (1~8 月) 的快速北进，其东、西段是不同步的，急流轴走向亦不相同，到 9~10 月整体南撤。急流轴 1~4 月呈东北—西南走向，4 月东段首先北移，5 月整体第一次北跳，6 月西段北进，而东段移动小，急流轴呈西北—东南走向，7 月整体第二次北跳，呈准东西向，8 月位置达最北，呈东北—西南向 (李崇银等, 2004; Kuang and Zhang, 2005; 况雪源和张耀存, 2006a; 方晓洁等, 2009; 倪东鸿等, 2010b; 陆日宇等, 2013)。此外，盛夏时期和整个冬半年，亚洲东段急流轴位置要比西段稳定偏北 5°N 左右 (魏林波等, 2012)。近年来，对副热带

急流的季节和年际变化特征, 学者们有了新的认识。除了显著的北跳现象外, 夏季亚洲西风急流也存在明显的向西推进。6~7月亚洲急流发生了东西方向的位置突变, 急流中心必在很短的时间内从西北太平洋移至青藏高原上空, 并维持至盛夏 (Zhang et al., 2006; 况雪源和张耀存, 2006a)。在年际异常变化方面, 夏季副热带西风急流以经向偏移为主要特征, 次之为强度变化的结论已经在一些研究中得到证实 (Lin and Lu, 2005; 杨莲梅和张庆云, 2007, 2008; 杜银等, 2009; 张驰等, 2011)。

亚洲急流东、西段异常对东亚地区夏季降水异常的影响各不相同。首先亚洲急流东、西段位置异常对东亚降水的影响各不相同。当东亚急流位置偏北 (南) 时, 中国东部地区易于形成“南北多中间少 (南北少中间多)”的雨带分布, 降水主要集中在南北两侧 (中部) (陆日宇, 2002, 2003; 雪源和张耀存, 2006b; 杜银等, 2009; 张驰等, 2011; 沈柏竹等, 2011)。而当中亚急流带偏北, 而夏季中东急流偏南, 中心位于南亚克什米尔地区, 夏季新疆地区降水偏多 (魏林波等, 2012)。其次, 亚洲急流东、西段强度异常亦对中国降水产生不同影响。当亚洲急流东、西段反位相变化时, 孟加拉湾水汽输送异常, 进而影响中国南方降水 (倪东鸿, 2010a, 2010b)。东亚急流主要影响 100°E 以东地区的降水, 而中东急流的活动影响新疆夏季降水。新疆夏季降水偏多年, 亚洲急流只有一个急流中心, 位于南疆上空, 西亚地区急流减弱, 东亚地区急流增强, 而降水偏少年, 西亚地区急流增强, 东亚地区急流减弱 (杨莲梅和张庆云, 2008; 方晓洁等, 2009)。

关于亚洲西风急流变化机理的研究大致可归纳为外强迫因子和大气内部过程两方面。热带海表面温度 (简称海温) 作为影响大气环流的重要外强迫因子, 对急流的南北振荡贡献显著: 前期热带中东太平洋海温、同期印度洋海温和西北太平洋海温的共同作用, 是夏季亚洲副热带西风急流经向偏移的原因 (Nitta, 1987; Wang et al., 2000; 廖清海等, 2004; Xie et al., 2009; Lin et al., 2010; Du et al., 2016)。热带海温异常通过影响西北太平洋对流活动, 进而影响大气经向环流 (EAP 型遥相关) 和亚洲急流的位置变化 (董敏等, 1999; Wang et al., 2000; 陆日宇等, 2013; Chen et al., 2016; Chen and Wu, 2017; Chen et al., 2018; Zhao et al., 2019)。夏

季亚洲急流的南移常对应着副热带地区偏强的对流活动 (Lau et al., 2000; Lu et al., 2002)。Qu and Huang (2012) 研究指出热带印度洋海温可通过激发东传的 Kelvin 波引起急流南北移动。

大气内部的调整作用对亚洲副热带西风急流变异影响的重要意义也不容忽视。由 Nitta (1987)、黄荣辉和李维京 (1988) 指出的东亚—太平洋波列 (EAP 波列/PJ 波列), 是影响急流发生显著变化的经向遥相关型。此外, 亚洲急流作为中纬度地区对流层高层的大气波导, 必然与纬向环流型相互作用。Hoskins and Ambrizzi (1993) 和 Ambrizzi et al. (1995) 的分析曾提出西风急流的波导效应能够将上游的波活动向下游地区传播, 夏季亚洲西风急流中可能存在沿着西风急流传播的波列。因此副热带急流的变异还受到上游地区沿急流传播的扰动影响。

以往的工作还发现, 中、高纬地区热力作用 (特别是青藏高原夏季强大的热力作用) 和欧亚高纬度积雪对急流变异亦具有显著作用 (Walland and Simmonds, 1996; Clark and Serreze, 2000)。副热带西风急流的北跳和欧亚大陆对流层中上层经向温度梯度在高原地表热力影响下的两次逆转有关 (李崇银等, 2004; Kuang and Zhang, 2005; 卢楚翰等, 2019)。蔡尔诚 (2001) 提出极地冷气团的季节演变使得赤道与极地之间的温度差随之改变, 从而决定了急流的强度和位置变化。此外, 青藏高原的地表增温和梅雨的潜热释放是夏季急流中心位置西移的主要原因 (董敏等, 2001; 况雪源和张耀存, 2006a), 而亚洲急流东部中心强度可能受冷涡变率的影响 (沈柏竹等, 2011)。

对以往研究成果进行回顾和总结, 发现目前关于亚洲西风急流变化机理的研究, 特别是急流经向移动与热带海温和中低纬度热力作用的关系已经得到了较为完善的认识, 而副热带西风急流位于欧亚大陆上空, 其下支东亚急流与上支西亚急流间存在显著的上下游联系, 上述两支急流彼此独立, 但又相互影响, 它们与大尺度环流系统的相互作用, 仍值得对其进行更加细致地分析探讨。

过去的研究多把副热带西风急流视为一个整体, 以急流核表征其强度并研究其变化特征, 进而分析急流对东亚气候的影响; 或者分别考虑急流东西两段位置或强度变化特征, 分析各自对中国东部夏季降水变化的影响。但针对亚洲急流东、西段中心强

度纬向非均匀性差异的研究仍然较少, 其异常对于东亚夏季气候的影响尚不很清楚, 其中涉及到波扰能量传播在欧亚地区大气环流形势异常分布中的作用仍不明确。因此, 本文以夏季亚洲西风急流东、西段中心强度的差异为出发点, 定义夏季亚洲西风急流纬向非均匀性指数, 对夏季亚洲西风急流纬向非均匀性异常的环流成因及波扰动能量在其中所具有的作用进行分析, 并试图探讨其与热带非绝热加热异常存在的可能关系, 进而了解其对东亚夏季气候的影响。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用的资料包括: 美国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 提供的 CMAP (Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation) 月平均降水资料、NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Design of Experiments) II 的月平均再分析资料和中国气象局国家信息中心提供的中国 160 站逐月观测资料。NCEP/DOE II 再分析资料的变量包括: 月平均的 17 层风场、位势高度场、地面以上 2 m 高度处气温、12 层等压面上的垂直速度以及地面气压等。资料的水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 但地面以上 2 m 高度处气温资料的纬向分辨率为 1.875° , 经向为高斯纬度分布。研究时段为 1979~2019 年, 变量的夏季平均值被定义成其在 6~8 月的平均值。下文中所述物理量的“距平”均为某一年夏季平均值与 41 年夏季平均值的差值。

2.2 方法

文中采用了相关分析、合成分析及 t 检验等方法。本文所使用的波作用通量是 Takaya and Nakamura (1997, 2001) 推导出的三维波作用通量 (简称 T-N 通量), 该通量在 WKB (Wenzel, Kramers, Brillouin) 近似假定下与波位相无关, 且与定常 Rossby 波列的局地群速度方向一致。对应波作用通量 (W) 的计算公式为

$$W = \frac{p}{2000|\bar{U}|} \begin{bmatrix} u(v'^2 - \psi'v'_x) + v(-u'v' + \psi'u'_x) \\ u(-u'v' + \psi'u'_x) + v(u'^2 + \psi'u'_y) \\ \frac{f_0 R_a}{N^2 H_0} [u(v'T' - \psi'T'_x) + v(-u'T' - \psi'T'_y)] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, ψ' 为准地转扰动流函数, u' 和 v' 为扰动准地转风, u'_x 和 v'_x 为扰动准地转风在 x 方向上的一阶导数,

u'_y 为扰动纬向风在 y 方向上的一阶导数, $\bar{U} = (\bar{u}, \bar{v})$ 为基本流场, p 为气压 (单位: hPa), f_0 为科氏参数, N^2 为 Brunt-Vaisala 频率, R_a 为干气体常数, H_0 为标高, T' 为扰动气温。在文中以 1979~2019 年多年夏季平均场作为基本场, 用 1979~2019 年间每年夏季平均场减去上述基本场后, 获得各年扰动场。

利用热流量方程, 计算对流层整层垂直积分的大气加热场:

$$H_h = -V_h \cdot \nabla T, \quad (2)$$

$$H_v = -\left(\frac{\partial T}{\partial p} - \kappa \frac{T}{p}\right)\omega, \quad (3)$$

$$H_d = \frac{\dot{Q}}{c_p}. \quad (4)$$

记

$$\langle \rangle = \frac{1}{p_s - p_t} \int_{p_t}^{p_s} \langle \rangle dp, \quad (5)$$

则

$$\left\langle \frac{\partial T}{\partial t} \right\rangle = \langle H_h \rangle + \langle H_v \rangle + \langle H_d \rangle, \quad (6)$$

式中, $\langle H_h \rangle$ 为整层水平温度平流项, 表示水平平流引起的动力加热率; $\langle H_v \rangle$ 为温度的垂直积分, 表示垂直方向绝热运动引起的动力加热率; $\langle H_d \rangle$ 为整层非绝热加热项。 V_h 为水平风场, T 为气温, \dot{Q} 表示非绝热加热, $\kappa = R_d/c_p$, R_d 为干空气的气体常数, c_p 为定压比热, p_s 、 p_t 分别为地面气压、100 hPa 气压, $\omega = dp/dt$ 。月平均环流的局地变化非常小, 其表示动力加热需由非绝热加热平衡。

3 夏季亚洲西风急流纬向非均匀性的定义及其年(代)际变化特征

3.1 夏季亚洲西风急流纬向非均匀性指数的定义

夏季亚洲西风急流存在两个中心。1979~2019 年夏季 200 hPa 纬向风平均场及均方差显示 (图 1a), 夏季亚洲上空存在东、西 2 个西风极大值中心, 西部极大值中心位于 ($37.5^\circ \sim 42.5^\circ \text{N}$, $80^\circ \sim 105^\circ \text{E}$), 强度达 32 m s^{-1} ; 东部极大值中心位于日本海—日本中部—西北太平洋西侧 ($37.5^\circ \sim 42.5^\circ \text{N}$, $135^\circ \sim 155^\circ \text{E}$), 中心风速小于西部, 强度为 26 m s^{-1} 。可见, 两者中心均主要位于 40°N 附近, 且东段强度弱于西段。

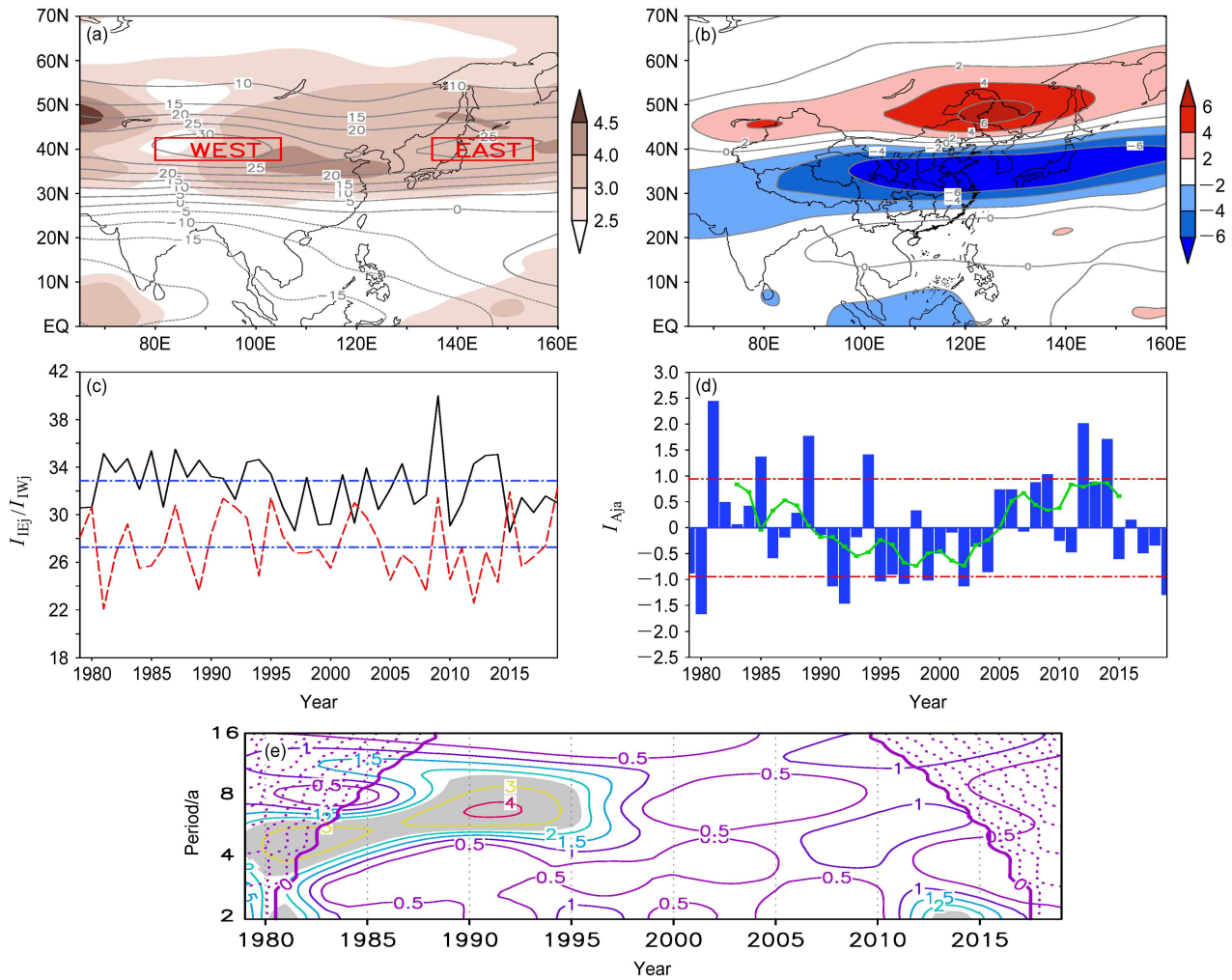


图 1 1979~2019 年夏季 (6~8 月) 200 hPa (a) 纬向风平均场 (等值线, 单位: $m s^{-1}$) 及均方差 (阴影, 单位: $m^2 s^{-2}$), (b) 亚洲区域 ($0^{\circ}\sim 70^{\circ}N$, $65^{\circ}\sim 160^{\circ}E$) 纬向风距平 EOF 第一模态 (阴影、等值线, 单位: $\times 10^2$), (c) 急流东段强度指数 I_{EJ} (虚线) 及西段强度指数 I_{WJ} (实线) 时间序列 (点虚线是各自的平均值), (d) 急流纬向非均匀性指数 I_{Aja} 的时间序列 (柱状, 点虚线表示 0.3 倍标准差, 实线为九点二次平滑值), (e) 急流纬向非均匀性指数 I_{Aja} 序列的 Morlet 小波变换功率谱 (阴影区表示通过 90% 信度水平检验, 打点区域为受边界影响区)

Fig. 1 Climatology of (a) the zonal wind (contours, units: $m s^{-1}$) and the variance (shadings, units: $m^2 s^{-2}$), (b) the first empirical orthogonal function mode of the zonal wind anomalies (shading, contours, units: $\times 10^2$) over Asia ($0^{\circ}\sim 70^{\circ}N$, $65^{\circ}\sim 160^{\circ}E$), (c) the time series of the intensity of the East Asian jet stream (I_{EJ} , dashed line, lower dotted-dashed line indicates mean value) and west Asian jet stream (I_{WJ} , solid line, upper dotted-dashed line indicates mean value), (d) the time series of I_{Aja} (Index of Asian jet stream asymmetry) index (bars, dotted-dashed line indicates $\pm 0.3\sigma$ (standard deviation), solid line denotes the nine-point quadratic smoothing result), (e) the power spectrum of the Morlet wavelet transform for index I_{Aja} (shading areas represent the power spectrum above the 90% confidence level, dotted areas indicate the cone of influence) averaged in JJA (June, July, August) at 200 hPa during 1979–2019

夏季亚洲急流东、西段强度中心存在显著的纬向差异。对 1979~2019 年夏季亚洲地区 200 hPa 纬向风距平场进行 EOF 分析, 得到其第一模态, 且方差解释率达 33.12%, 并用 North et al. (1982) 所提方法进行检验, 表明此 EOF 能较好地分离。该模态不仅表明夏季亚洲急流的南北移动特征, 亦表明亚洲急流存在强度上的纬向差异。在亚洲地区

($15^{\circ}\sim 70^{\circ}N$, $60^{\circ}\sim 150^{\circ}E$), $40^{\circ}N$ 以北存在东、西两个异常纬向风的极大值中心, 东部位于蒙古中部至日本北部地区上空, 西部位于中亚地区, 两者中心强度范围存在明显差异 (如图 1b)。这与以往得到的结论相一致: 夏季亚洲区域 ($40^{\circ}\sim 55^{\circ}N$) 200 hPa 纬向风为正值, 有东、西两个西风极大值中心, 分别在哈萨克斯坦南部和我国东北地区, 体

现了夏季亚洲急流东、西段强度中心在纬向上的差异(方晓洁等, 2009)。

为定量地描述亚洲急流强度的纬向差异, 下文定义了夏季亚洲急流纬向非均匀性指数(Index of Asian jet stream asymmetry)

(1) 首先根据 1979~2019 年每年夏季 200 hPa 纬向风, 统计得到该年亚洲上空西风风速最大值及其所在的中心经纬度, 据此将急流的西段限定在(37.5°~42.5°N, 60°~110°E), 东段限定在(35°~47.5°N, 130°~150°E)的范围内。

(2) 从每年东、西段风速最大值的中心经纬度开始, 以 15°×2.5°的矩形框为标准, 计算该矩形框内所有格点风速的平均值, 将该值定义为该年急流东、西段的强度值, 分别以 I_{Ej} (The intensity of East Asian jet stream) 和 I_{Wj} (The intensity of West Asian jet stream) 记之。 I_{Ej} 和 I_{Wj} 的变化(图 1c)显示, 近 41 年以来, 除了 2002 年、2015 年和 2019 年东段强度略强于西段, 及 1980 年东、西段强度相当之外, 其余年份均为西段强于东段, 这与前面相应时段内夏季 200 hPa 纬向风平均场分析所得结论相一致(图 1a)。此外, 急流东、西段各自强度在时间变化上存在不一致性(图 1c), 计算 I_{Ej} 和 I_{Wj} 各自线性变化趋势, 其系数分别为 -0.1/(10 a) 和 -0.35/(10 a), 这说明近 41 年来急流东段、西段强度均有略微减小的趋势, 但西段强度变幅略大于东段。以上特征均体现了急流纬向非均匀性的特点。

(3) 为更好地描述急流东段和西段之间强度差异的变化, 体现亚洲急流纬向非均匀性的异常, 下文将西段强度值(I_{Wj})减去东段强度值(I_{Ej})后的绝对值进行标准化, 得到的序列定义为亚洲急流纬向非均匀性指数 I_{Aja} (Index of Asian jet stream asymmetry)。当 I_{Aja} 为正值时, 表示夏季亚洲急流东、西段强度差异偏大, 即夏季亚洲急流纬向非均匀性偏强; 当 I_{Aja} 为负值时, 表示急流东、西段强度差异小, 即急流纬向非均匀性偏弱。

为进一步分析环流变化, 根据 I_{Aja} 时间序列(图 1d)挑选出夏季亚洲急流纬向非均匀性异常的 $|I_{Aja}| \geq 0.3\sigma$ 的 7 年(1981、1985、1989、1994、2009、2012、2015 年)典型偏强年及 8 年(1980、1991、1992、1995、1997、1999、2002、2019 年)的典型偏弱年。

为验证所定义的指数能否很好地反应夏季亚洲

急流强度的纬向非均匀性, 可将上述定义所挑选出异常偏强年份和偏弱年份, 分别与 41 年 200 hPa 纬向风分布进行对比。分析发现, 由该指数挑选出的急流纬向非均匀性异常偏强年, 恰好对应亚洲急流东段、西段纬向风中心强度差值较大年份; 该指数异常偏弱年份, 对应亚洲急流东、西段纬向风中心强度差值较小。

3.2 夏季亚洲急流纬向非均匀性的年(代)际变化特征

夏季亚洲急流纬向非均匀性存在显著的年(代)际变化。近 41 年来亚洲上空 200 hPa 纬向风年际变率较大(图 1a 中阴影所示区域)的区域大致位于 30°~60°N, 且急流东、西段年际变率在纬向的变化上存在显著的差异。在西段范围内, 沿 40°N 自西向东均方差在 60°~90°E 范围内逐渐减小, 而在 90°~110°E 区域逐渐增大; 急流东段自西向东 200 hPa 纬向风均方差这种沿纬圈的变化差异相对较小, 这体现了亚洲急流东、西段强度纬向年际变化的显著差异性。

近 41 年来夏季亚洲急流纬向非均匀性围绕其平均状态存在显著的年(代)际振荡(图 1d)。在 1979~2019 年期间, 急流纬向非均匀性指数变化的线性趋势系数仅为 0.013/(10 a), 这意味着近 41 年来, 急流的纬向非均匀性并无显著增强或减弱的趋势。然而我们注意到, 2002 年、2010 年是个转折年, 2002 年之前, 亚洲急流纬向非均匀性逐渐减弱, 急流东、西段强度的差异逐年减小; 在 2002~2010 年, 随着两段急流强度差异的增大, 急流纬向非均匀性又逐渐增强; 2010 年以来, 亚洲急流纬向非均匀性又有逐渐减弱的趋势。

为了更直观地分辨出夏季亚洲急流强度纬向非均匀性的年际变化周期, 图 1e 给出了夏季亚洲急流纬向非均匀性指数序列的 Morlet 小波变换结果(Torrence and Compo, 1998)。在过去的 41 年中, 尤其是 1980 年代中期到 1990 年代中期, 亚洲急流强度纬向非均匀性存在显著的准 6~8 年周期, 2015 年前后可能存在 2 年左右的振荡周期。

4 急流纬向非均匀性变化的成因

为了解夏季亚洲急流纬向非均匀性异常与大气环流异常之间的联系, 利用合成分析的方法, 对急流纬向非均匀性典型偏强和典型偏弱年份的环流特征进行差值合成分析(图 2)。需要说明的是, 合

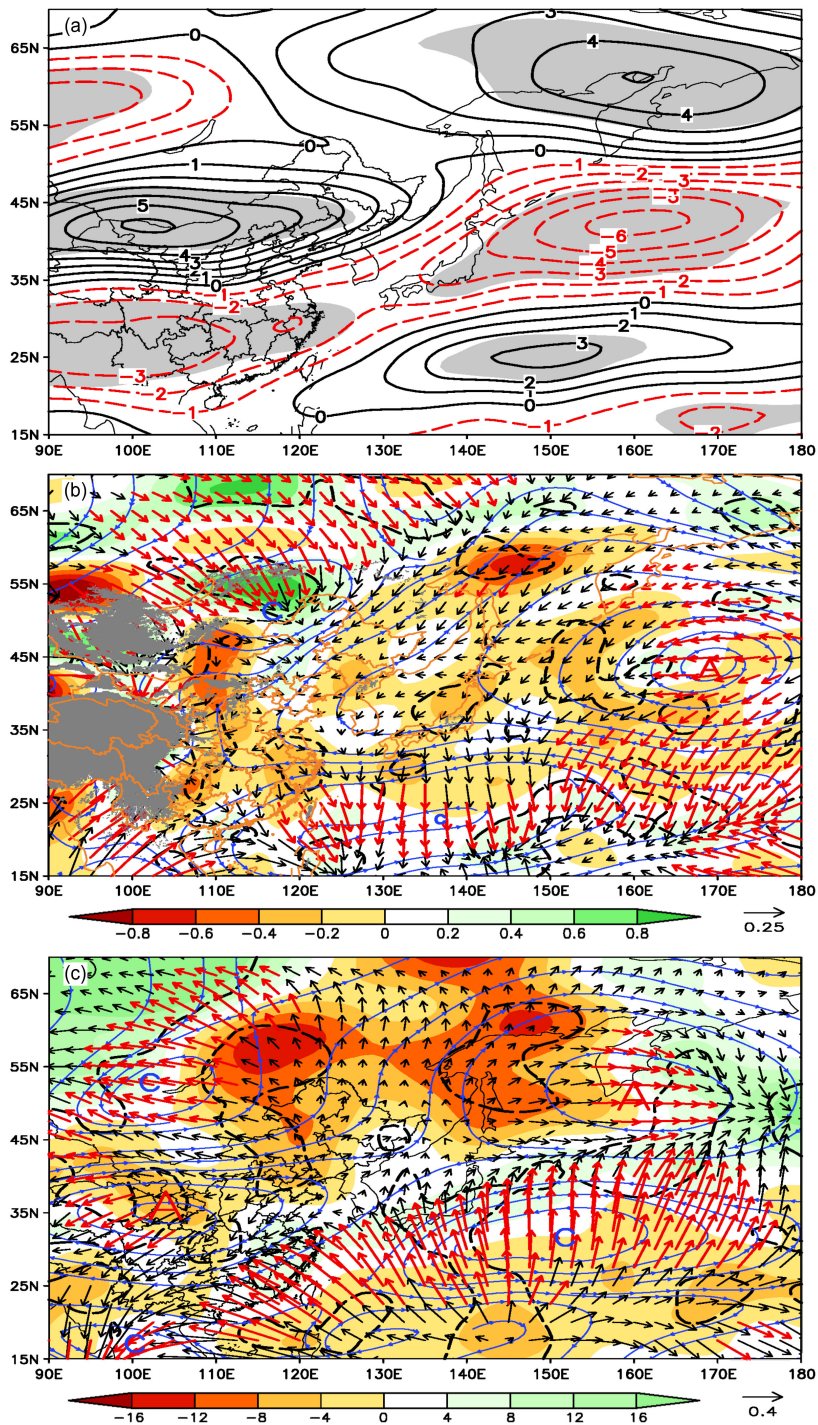


图2 (a) 200 hPa 纬向风距平 (单位: m s^{-1} , 阴影部分通过 90% 信度水平的显著性检验), (b) 850 hPa (灰色阴影表示海拔高于 850 hPa 的区域) 旋转风场 (流线)、辐散风场 (箭头, 单位: m s^{-1} , 红色箭头表示超过 90% 信度水平显著性检验的辐散风)、涡度制造项 (阴影, 单位: 10^{10} m s^{-2} , 黄色系表示负涡度, 绿色系表示正涡度, 黑色虚线所围区域表示涡度制造项通过 90% 信度水平显著性检验的区域) 的合成差值场 (差值场指夏季亚洲急流纬向非均匀性异常典型偏强年减去典型偏弱年, 下同), (c) 同 (b), 但为 200 hPa 的合成差值场

Fig. 2 Composite differences (positive I_{Aja} years minus negative I_{Aja} years, the same below) of (a) the zonal wind anomalies (units: m s^{-1} , shaded areas indicate anomalies above the 90% confidence level) at 200 hPa, rotational wind (streamlines) and divergent wind (arrows, units: m s^{-1} , the red arrows indicate divergent wind exceeding the 90% confidence level), vorticity production term (shadings, units: 10^{10} m s^{-2} , the yellow (green) shadings indicate negative (positive) values, the areas enclosed by the black dashed line represent the vorticity production term above the 90% confidence level) at (b) 850 hPa (gray shadings indicate the altitudes are higher than 850 hPa) and (c) 200 hPa

成前所有变量的线性趋势均已被滤除,且除特殊说明外,下文所有差值场均指典型偏强年减去典型偏弱年。

4.1 大气环流异常与急流非均匀性变化

大气环流异常与亚洲急流纬向非均匀性变化密切相关,且急流纬向非均匀性的年际变化主要表现为 200 hPa 纬向风在急流东段和急流西段区域中心强度的相对变化而产生的差异。急流纬向非均匀性典型偏强年,200 hPa 纬向风距平场(图 2a)显示,在 130°E 以西,35°N 以北为纬向风正距平,中国的内蒙古地区出现较强的西风异常,异常西风中心位于(40°~45°N, 90°~110°E),使得亚洲急流西段中心强度增强。而在 130°E 以东的西太平洋上空 200 hPa 纬向风场在 35°~45°N 范围内为较强的东风距平(图 2a),亚洲急流东段中心强度减弱。当急流纬向非均匀性典型偏弱年,则反之。

亚洲急流纬向非均匀性的变化与热带地区和中纬度(35°~55°N)处的辐合/辐散运动有关。在亚洲急流纬向非均匀性典型偏强年,对流层低层风场(图 2b)由中纬度分别向南北方向辐散,在菲律宾北部以东洋面和贝加尔湖的东南部到中国东北地区存在显著的气流辐合,并产生异常上升运动。在 25°~55°N 地区出现负涡度制造,使得中纬度中国沿海东部到日本南部形成了异常的反气旋性环流。对流层上层(图 2c),一方面在副热带西太平洋上空,由低层辐合上升的气流向北辐散,在中国长江中下游到日本南部处于异常风场辐合区,使得大气质量异常堆积;另一方面,在中纬度地区的辐散中心(35°~45°N)及其西侧和北侧有显著的负涡度制造,两者共同作用产生了覆盖中国大陆的异常反气旋性环流。同理,在较高纬度的西北太平洋上(45°~55°N)亦存在显著的气流辐合,其西北侧存在辐散气流,导致了西北太平洋上空异常反气旋性环流的形成。由此,在对流层上层,东亚地区形成了类似鞍形场异常环流分布(图 2c),130°E 以西,25°~45°N 为异常反气旋性环流,在其北侧 45°~55°N 为异常气旋性环流。45°N 两侧的反气旋—气旋对 35°~50°N 之间的西风加速非常有利,因而有利于急流西段西风的加强。与 130°E 以西相比,在 130°E 以东的流场分布恰好相反,低纬为异常气旋性环流,而高纬为反气旋性环流(图 2c),亚洲急流东段平均位置恰好位于南侧气旋和北侧反气旋之间的过渡区,不利于急流东段西风的加速。

上述异常环流系统的配置,使亚洲急流西段中心增强,而东段强度减弱,有利于亚洲急流纬向非均匀性偏强。反之,当上述异常环流配置相反时,沿着 40°N 左右,130°E 以西,东风距平增大,130°E 以东,西风距平增加,亚洲急流东、西段强度中心的差异相对减小,对应亚洲急流纬向非均匀性减弱。

根据上述分析可知,对流层上层异常环流的形成,除了与东亚地区异常辐合/辐散造成的涡度源强迫和大气质量堆积之外,还与对流层内垂直运动有关。东亚地区东、西异常的气旋/反气旋性环流使得沿着 40°N 急流西段西风加强,急流东段西风减弱,从而使得亚洲急流西段中心强度增加,而东段的强度减弱,导致急流纬向非均匀性增强。当对流层内辐合辐散和对流运动方向相反时,亚洲急流纬向非均匀性将偏弱。

4.2 整层大气加热异常与急流纬向非均匀性变化

上述东亚地区异常辐合/辐散运动的分析表明,亚洲急流纬向非均匀性的年际异常与对流层中的垂直运动有关,而异常的上升运动通常伴随着非绝热加热的异常(Guan and Yamagata, 2003)。因而下文对急流纬向非均匀性典型偏强、偏弱年时整层大气的加热异常进行分析。计算了亚洲上空急流纬向非均匀性异常时,对流层垂直积分的大气加热场(图 3a、b、c)。

低纬度地区异常的加热场可能导致 I_{Aja} 变化。由图 3 可知,亚洲急流强度纬向非均匀性典型偏强年,在亚洲东部地区(120°E 以东),中国台湾、菲律宾北部及其以东海域(15°~25°N)存在显著的非绝热加热(图 3a),导致该区域垂直运动增强,垂直上升运动引起了该区域异常的动力冷却(图 3b);在长江中下游至日本南部有非绝热加热负异常(图 3a),而垂直运动所致的动力加热率表现为动力增温(图 3b),表明该区域有异常下沉运动。这说明当中国台湾、菲律宾北部及其以东海域有异常的非绝热加热,使低层气流在上述区域辐合,并产生上升运动,通过大气 Gill 响应,从而在加热场及西北侧形成了气旋性环流异常(图 2b)。相应地对流层上层,在中国台湾、菲律宾北部及其以东地区对应有异常辐合的气流向北辐散,并在长江流域至日本南部异常辐合下沉,造成大气质量异常堆积(图 2c),并构成了异常经圈环流,上升支位于中国台湾、菲律宾北部及其以东海域,下沉

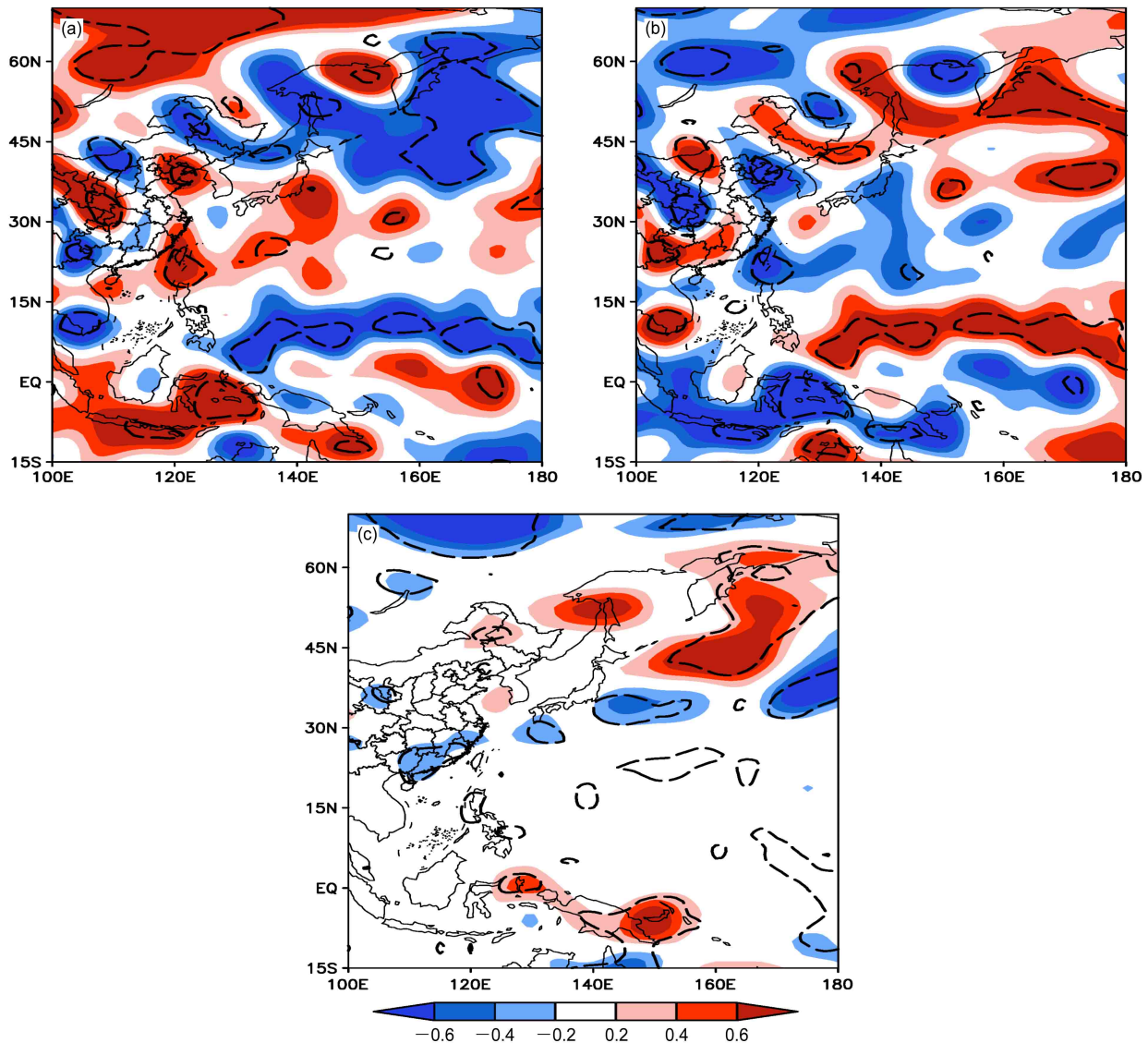


图3 (a) 非绝热加热率异常、(b) 垂直运动异常所致动力加热率和 (c) 整层水平温度平流所致动力加热率异常的合成差值。所有变量均自地表积分至 100 hPa, 红(蓝)色阴影表示正(负)值, 黑色虚线所围区域表示加热率通过 90% 信度水平的显著性检验

Fig. 3 Composite differences in (a) the diabatic heating rate anomalies, (b) the dynamic heating rate due to the vertical motion anomalies, and (c) the dynamic heating rate anomalies due to the horizontal temperature advection. All variables are integrated from the surface to 100 hPa, the red (blue) shadings indicate positive (negative) values, the areas enclosed by the black dashed line represent heating rate above the 90% confidence level

支位于长江中下游至日本南部, 维持了高层覆盖中国大陆上空异常反气旋性环流, 进而加强了异常反气旋性环流北侧 40°N 附近的西风距平, 使得亚洲急流西段中心强度增强, 造成亚洲急流纬向非均匀性增强。

反之, 当中国台湾、菲律宾北部及其以东海域为非绝热异常冷却时, 在对流层低层上述区域产生异常下沉运动, 相应地, 在对流层高层气流在长江中下游至日本南部地区辐散, 形成异常反经圈环流, 有利于中国大陆上空异常气旋性环流的维持, 使得

其北侧 40°N 附近东风距平增大, 减弱了常年位于亚洲急流西段的偏西气流, 有利于亚洲急流西段中心强度的减弱, 进而造成亚洲急流纬向非均匀性减弱。

综上所述, 受到低纬度地区对流层内异常非绝热加热和垂直运动的影响, 在中国台湾、菲律宾北部及其以东海域至长江中下游至日本南部形成异常经圈环流圈, 引起中国大陆上空异常的辐合/辐散运动, 进而影响了对流层上层环流的异常, 使急流纬向非均匀性变化。

4.3 波作用通量异常与急流纬向非均匀性变化

上述异常环流系统的维持亦可从中纬度 Rossby 波扰动能量的传播得到部分解释。急流纬向非均匀性典型偏强年, 在对流层低层 (图 4a), 显著的扰动能量主要由副热带低纬地区向较高纬地区辐散, 中国南部和日本南部有较强的扰动能量辐合, 有利于亚洲东部低纬至高纬异常环流的维持, 这可能与 EAP (East Asia-Pacific) 型遥相关有关。在对流层上层 (图 4b), 从乌拉尔山至东亚存在显著的扰动能量自西向东的传播, 同时波作用通量交替出现辐合和辐散。中国的西北地区、长江流域和日本海上空主要处于能量的辐合区域, 波扰动能量的注入有利于中国大陆和西北太平洋上空异常反气旋性环流系统的维持。这可能与急流的波导作用有关, 也可能与丝路型 (silkroad pattern) 遥相关 (Enomoto et al., 2003) 及 W-J 遥相关型 (West Asia-Japan Pattern) 有关 (Wakabayashi and Kawamura, 2004)。而当亚洲急流纬向非均匀性典型偏弱年, 上述这种自西向东的扰动能量的传播同样存在, 只是波扰位相 (图 2c 所示的异常气旋和反气旋环流) 相反。

4.4 北大西洋海温异常与急流非均匀性变化

以往研究表明, 北大西洋三极型海温异常可激发沿着西风急流的波导, 由北大西洋向东延伸至东亚的波列 (Chen and Wu, 2017), 该波列穿过北大西洋, 穿过中纬度到达高纬度的欧亚大陆, 影响东亚环流和气候异常 (Chen et al., 2016, 2018; Chen and Wu, 2017; Zhao et al., 2019)。热带北大西洋海温异常亦可通过热带通道, 引起热带地区沃克环流异常, 进而对大气环流异常产生影响 (Chen et al., 2016, 2018)。

为了考察上述西风带中波扰动能量东传是否与北大西洋海温异常有关, 本文分析了在亚洲急流纬向非均匀性异常年份, 同期大西洋和热带太平洋海温的异常分布。当急流纬向非均匀性典型偏强年, 在热带大西洋及北美以东的北大西洋海温均出现显著正异常, 中心位于北大西洋; 而在热带西太平洋表现为海温正异常, 热带中东太平洋及中国南海至菲律宾及附近海域表现为显著海温负异常 (图 5), 出现类似 EAP 型的异常海温分布。当急流纬向非均匀性典型偏弱年, 则反之。

由此可推测, 当北大西洋海温异常变暖 (图 5),

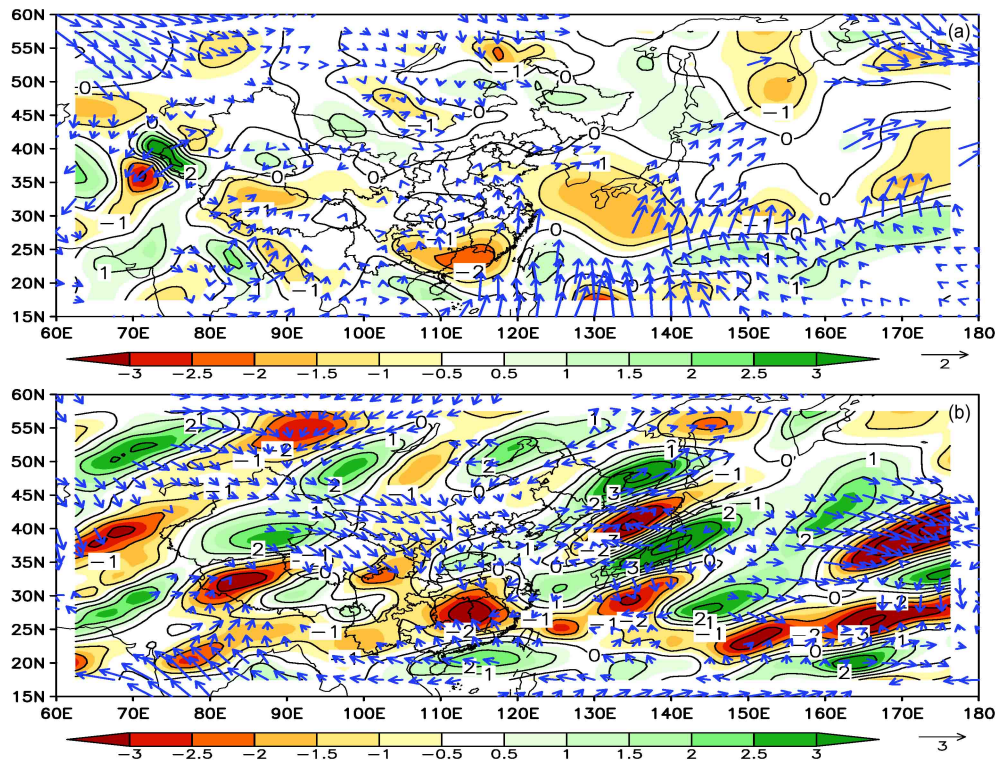


图 4 (a) 850 hPa、(b) 200 hPa 波作用通量 (箭头, 单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) 和波作用通量散度 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$) 的合成差值分布

Fig. 4 Composite differences in the wave-activity fluxes (arrows, units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) and the divergence of the wave-activity fluxes (shadings, units: $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-2}$) at (a) 850 hPa and (b) 200 hPa

可能激发了源自北大西洋的扰动波列流经欧亚大陆到达东亚地区(图 4b), 波动能量的注入, 可能与东亚地区对流层上层(200 hPa)波扰位相(异常环流)产生和维持的有关。

5 夏季亚洲急流纬向非均匀性指数 (I_{Aja}) 变化与东亚夏季气候的联系

研究表明, 亚洲急流对同期和后期中国东部乃至整个东亚地区降水影响很大。东亚急流主要影响 100°E 以东地区的降水(陆日宇, 2002, 2003; 杜银等, 2009; 张驰等, 2011), 而中东急流的活动影响新疆夏季降水(魏林波等, 2012; 姚慧茹和李栋梁, 2013)。那么夏季亚洲急流纬向非均匀性异常与东亚气候关系如何呢?

5.1 东亚夏季降水与 I_{Aja} 的联系

东亚地区夏季降水与 I_{Aja} 存在显著相关。在

100°E 以东的低纬到高纬地区, I_{Aja} 与降水距平的相关呈现出“+ - +”的分布(图 6a)。从长江流域至日本南部, 沿着平均梅雨锋位置, I_{Aja} 与降水间存在显著负相关(图 6a), 中心绝对值超过 0.4, 位于中国贵州、湖南。而在其南北两侧的中国台湾、菲律宾北部及其以东的西太平洋和中国东北部及西西伯利亚地区, 正相关较高。此相关分布型表明, 当夏季亚洲急流纬向非均匀性偏强(弱)时, 沿着平均梅雨锋的位置, 中国长江流域至日本南部, 降水偏少(多), 而其南北两侧降水偏多(少), 东亚东部基本呈现出“+ - + (- + -)”的异常降水分布。这与以往研究的结果相类似, 当急流的主体位于西太平洋上空, 有利于长江下游梅雨期的降水发生, 而当急流主体位于东亚大陆上空时, 长江下游梅雨期降水偏少(况雪源和张耀存, 2006b)。而在 100°E 以西, 显著相关范围和强度较东部偏小, 这表明当亚洲急流纬向非均匀性异常时, 夏季东亚

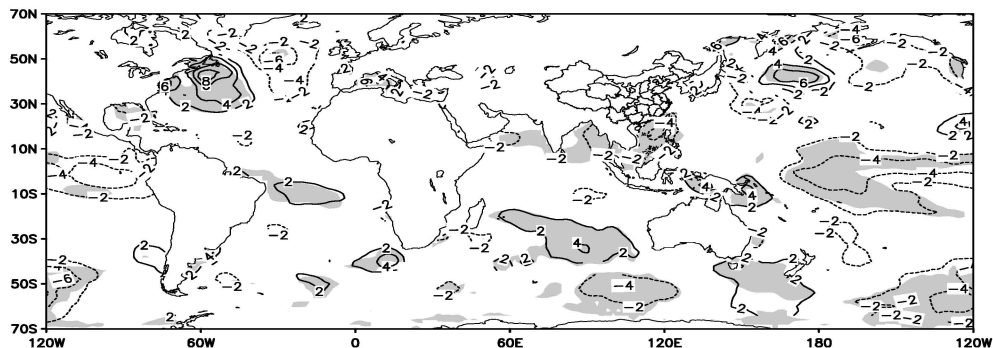


图 5 海表温度距平合成差值分布 (单位: $10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$), 阴影表示通过 90% 信度水平的显著性检验

Fig. 5 Composite differences in the sea surface temperature anomalies (units: $10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$), the shadings areas indicate the values above 90% confidence level

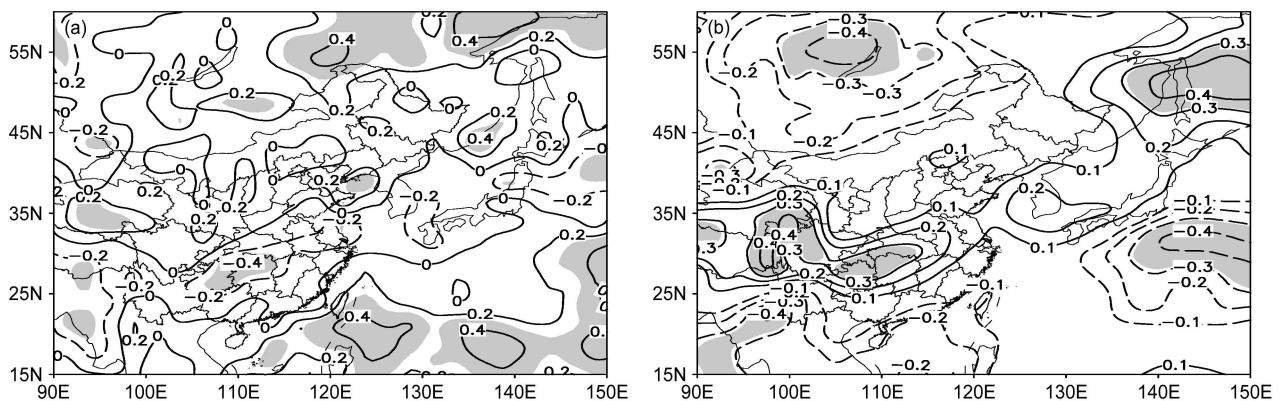


图 6 夏季 (a) 降水距平场、(b) 地面 2 米高度处气温距平场与 I_{Aja} 的相关分布, 阴影表示通过 90% 信度水平的显著性检验

Fig. 6 Correlations between the JJA (a) rainfall anomalies, (b) air temperature anomalies at 2-m height and I_{Aja} , the shadings areas represent correlations above 90% confidence level

地区东、西部降水分布的差异较大。

充足的水汽输送是降水形成的重要条件之一。由于水汽输送集中在 300 hPa 以下的对流层中低层 (Zhou, 2003), 在计算整层水汽通量时, 为消除周边地形对计算整层水汽输送的影响, 本文仅将水汽通量从地表积分至 300 hPa。从整层 (地表至 300 hPa) 水汽通量、水汽通量散度合成差值场 (图 7a) 可见, 当急流纬向非均匀性典型偏强年, 日本南部至长江中下游地区存在自东北向西南方向的水汽通量输送, 而在中国南海至菲律宾北部及中国北方至北大西洋上空均有自西南向东北方向的水汽通量输送, 导致在日本南部至长江中下游地区及其南北两侧形成三条较强的水汽输送带。整层水汽通量散度场 (图 7a 中阴影所示) 显示, 日本南部和长江中下游地区存在异常水汽通量辐散, 辐散中心位于日本南部及以南海域, 而在其南北两侧为显著水汽通量辐合; 当急流纬向非均匀性典型偏弱年, 则反之。此与异常降水的分布 (图 6a) 存在很好的对应, 700 hPa 水汽通量及其散度场亦有相似分布 (图 7b)。

5.2 东亚夏季气温与 I_{Aja} 的联系

东亚夏季气温变化与 I_{Aja} 变化密切相关, 且西部气温与 I_{Aja} 的相关性要好于东部 (图 6b)。120°E 以西, 自低纬至高纬, I_{Aja} 与气温呈现 “- + -” 相关分布型, 在中国青海和四川交界处、贝加

尔湖地区, 相关系数分别达 0.4、-0.5 以上; 而 120°E 以东, 显著正相关区位于较高纬的日本北部及其以东洋面上, 相关系数达 0.4 以上 (图 6b)。这些表明当急流纬向非均匀性偏强时, 中国中西部及日本北部区域气温普遍偏高; 而在贝加尔湖、东南亚至中国华南地区夏季气温偏低。当急流纬向非均匀性偏弱时, 则反之。

5.3 急流指数变化与东亚夏季气候异常的可能解释

亚洲急流纬向非均匀性典型偏强年或偏弱年可能影响东亚夏季降水异常分布 (图 6a)。急流纬向非均匀性典型偏强年, 注意到在 100°E 以东沿着平均梅雨锋位置, 中国长江中下游至日本中南部地区自对流层低层到上层, 均处于异常反气旋性环流控制, 在低层存在气流异常辐散 (图 2b), 且整层水汽通量辐散 (图 7a), 不利于该区域产生降水, 易造成中国长江流域到日本中南部的降水偏少, 气温略偏高。在这一区域的南北两侧, 对流层低层存在异常的气流辐合 (图 2b), 且伴有显著的整层水汽通量辐合 (图 7a), 有利于降水的发生, 可造成这些地区降水异常偏多 (图 6a)。当急流纬向非均匀性典型偏弱年, 则反之。

整层大气加热场可部分地解释亚洲急流纬向非均匀性典型偏强、偏弱年, 夏季亚洲地区气温的异常。亚洲急流纬向非均匀性典型偏强年, 在亚洲东部地区 (120°E 以东), 中国台湾、菲律宾北部及

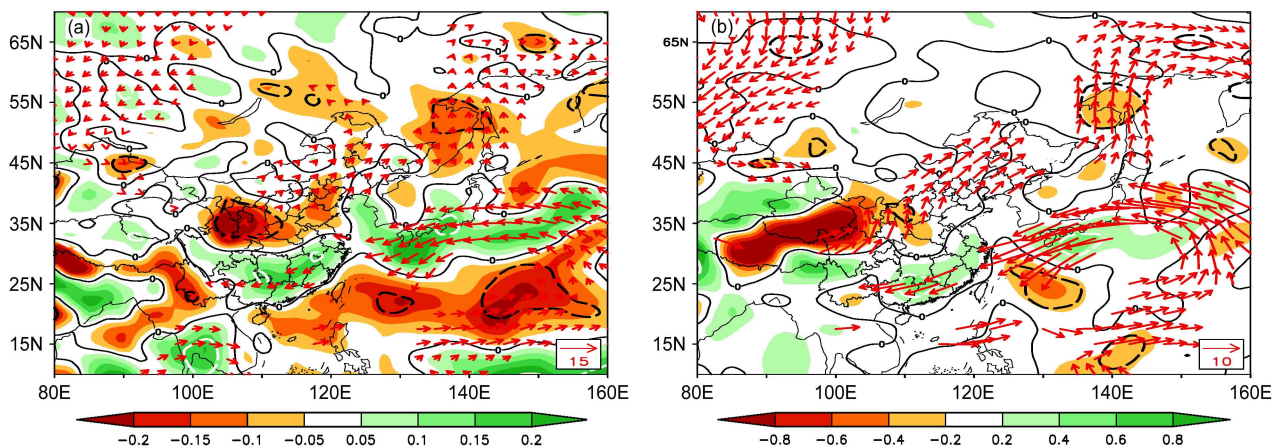


图 7 (a) 整层 (从地表积分至 300 hPa)、(b) 700 hPa 水汽通量 (只绘制出通过 90% 信度水平显著性检验的水汽通量 (红色箭头), 单位: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$)、水汽通量散度 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{g cm}^{-2} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$, 黑色虚线区域为通过 90% 信度水平的显著性检验区域) 的距平合成差值分布

Fig. 7 Composite differences in the vapor fluxes anomalies (the water vapor fluxes above the 90% confidence level are showed by the red arrows, units: $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) and the fluxes divergence anomalies (shadings, units: $10^{-6} \text{g cm}^{-2} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$, the areas enclosed by the black dashed line indicate the values above the 90% confidence level) (a) integrated from the surface to 300 hPa and (b) at 700 hPa

其以东海域(15°~25°N)为显著的非绝热加热(图 3a), 其主要由异常的上升运动引起的绝热降温(图 3b)得以平衡, 维持了这些地区较小的温度负异常(图 6b)。然而在 45°N 以北, 中国东北和日本北部, 整层水平温度平流正异常(图 3c), 同时上述地区显著的下沉运动造成了大气升温(图 3b), 两者作用共同抵消了该区域整层的非绝热冷却(图 3a), 维持了这些地区气温正异常(图 6b)。当急流纬向非均匀性典型偏弱年, 则反之。在亚洲西部地区(120°E 以西), 当急流纬向非均匀性典型偏强年, 在 45°~55°N 的贝加尔湖及西部地区, 由于西风带中冷空气的活动使得整层水平温度平流显示负异常(图 3c), 同时 55°N 以北存在上升运动亦造成冷却降温(图 3b), 两者共同抵消了该区域可能由于潜热释放造成的加热、太阳辐射吸收等引起的整层非绝热加热(图 3a), 维持了亚洲西部较高纬地区的气温负异常(图 6b)。此外, 中国西部整层上升运动引起动力降温(图 3b), 对这些地区维持气温的正异常不利(图 6b), 但是这种异常冷却少部分地由整层的水平温度平流引起的动力加热平衡(图 3c), 而整层大气的非绝热增温(图 3a)亦补偿了异常上升运动引起的冷却降温(图 3b)。当亚洲急流纬向非均匀性典型偏弱年, 上述加热场配置则相反。

综上所述, 亚洲急流纬向非均匀性异常对东亚东、西部夏季降水 and 气温的影响差异较大。

6 小结与讨论

分析了 1979~2019 年夏季亚洲急流纬向非均匀性年际异常的可能成因及其对东亚夏季气候的影响, 得到如下结论:

(1) 1979~2019 年夏季亚洲急流纬向非均匀性存在显著的年际变化, 这与已有的研究结果(Lin and Lu, 2005)一致。文中定义了用以表征夏季亚洲急流东、西段强度之间差异变化的急流纬向非均匀性指数 I_{Aja} 。当 I_{Aja} 为正值时, 表示夏季亚洲急流东、西段强度差异偏大, 即夏季亚洲急流纬向非均匀性偏强; 当 I_{Aja} 为负值时, 表示急流东、西段强度差异小, 即急流纬向非均匀性偏弱。总体而言, 近 41 年来亚洲急流以西段强度强于东段为主, 且纬向非均匀性并无显著增强或减弱趋势, 但 I_{Aja} 在不同年代存在 6~8 年和 2 年左右的振荡周期。

(2) 与夏季亚洲急流纬向非均匀性年际异常相联系, 存在有热带地区(中国台湾、菲律宾北部及其以东海域)异常上升(下沉), 而在中国长江中下游至日本南部地区下沉(上升)的异常经圈(反经圈)环流, 可导致对流层上层大气环流异常, 进而对急流纬向非均匀性产生影响。当中国台湾、菲律宾北部及其以东海域存在异常非绝热加热, 低层气流辐合, 致该区域产生异常的上升运动, 对应高层气流向北辐散, 并在中国长江中下游至日本南部风场异常辐合并下沉, 导致了对流层高层大气质量异常堆积和中纬度辐散中心及其西侧、北侧有显著的负涡度制造, 两者共同作用产生了高层(200 hPa)覆盖中国大陆上空的异常反气旋性环流, 加强了其北侧 40°N 附近急流西段的西风距平, 有利于急流西段强度增强。此外, 在较高纬度的西北太平洋(45°~55°N)上存在辐合气流, 亦有利于该区域异常反气旋性环流的维持, 导致其南侧 40°N 附近急流东段西风的减弱, 急流东段强度减弱。急流西段强度增强, 而东段强度减弱, 有利于亚洲西风急流纬向非均匀性增强。反之, 亚洲急流纬向非均匀性偏弱。

(3) 与亚洲西风急流纬向非均匀性强弱变化联系的异常反气旋(气旋)性环流的形成和维持, 除了与上述热带和中纬度地区辐合/辐散运动造成的涡度源强迫之外, 还与来自西风带中波扰动能量通量有关。这种扰动能量的东传可能与北大西洋海温异常有关。当北大西洋海温变暖, 可能激发了源自北大西洋的波列, 将西风带中波扰动能量向中国南部和西北太平洋地区频散并辐合, 有利于对流层高层异常扰动的维持, 进而对亚洲急流纬向非均匀性异常产生影响。

(4) 夏季东亚地区降水与同期亚洲急流纬向非均匀性强弱变化关系密切。当亚洲急流纬向非均匀性典型偏强(弱)年, 中国长江流域到日本南部, 降水显著偏少(多), 而在中国台湾、菲律宾北部以及中国东北至西西伯利亚附近降水则偏多(少)。当急流纬向非均匀性典型偏强(弱)年时, 在中国长江中下游至日本南部地区大气中水汽通量有所减弱(增强), 且处于显著水汽通量辐散(辐合)区; 而在其南北两侧水汽通量显著加强(减弱), 且为水汽通量辐合(辐散)区。

与夏季亚洲急流纬向非均匀性相联系, 在较低纬度地区(中国台湾、菲律宾北部及其以东海域)

至中国长江中下游—日本南部地区存在异常经圈环流。当亚洲急流纬向非均匀性偏强时, 长江中下游至日本南部区域为异常下沉运动, 出现低层异常辐散, 高层异常辐合, 不利于长江中下游至日本南部地区降水的产生。而在其南北两侧低层异常辐合, 有显著的上升运动, 这有利于降水产生。当急流纬向非均匀性偏弱时, 反之。

(5) 夏季亚洲急流纬向非均匀性异常对东亚地区东、西部同期气温影响差异较大, 整层大气加热场异常可用于部分解释亚洲急流纬向非均匀性典型偏强、弱年, 夏季东亚地区气温的异常。在亚洲急流纬向非均匀性典型偏强年, 在亚洲东部地区温度异常主要由垂直运动引起的动力变温异常所致; 而在 120°E 以西的贝加尔湖地区显著的温度负异常是由西风带中冷空气活动和上升运动造成冷却降温两者共同所致; 整层大气非绝热增温作用使得中国西北部区域气温偏高, 而这种增温是否与青藏高原夏季热力作用有关, 有待进一步研究。当急流纬向非均匀性偏弱时, 反之。

需要说明的是, 影响亚洲急流纬向非均匀性异常的因子, 除了同期北大西洋海温, 还可受到其余因子影响。这里仅基于亚洲急流纬向非均匀性指数挑选出的异常年份, 考察了同期北大西洋海温异常分布, 揭示夏季亚洲西风急流纬向非均匀性异常变化的可能成因。但在其他月份或季节, 夏季亚洲西风急流纬向非均匀性异常是否与其他区域海温异常有关, 是否与青藏高原夏季强大的热力作用有关, 则仍需进一步研究。

致谢 在论文形成过程中与管兆勇教授进行了有益讨论, 谨致谢忱!

参考文献 (References)

- Ambrizzi T, Hoskins B J, Hsu H H. 1995. Rossby wave propagation and teleconnection patterns in the Austral winter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52(21): 3661–3672. doi:10.1175/1520-0469(1995)052<3661:RWPATP>2.0.CO;2
- 蔡尔诚. 2001. 中国夏季主雨带的形成过程 [J]. *河南气象* (1): 6–8. Cai E C. 2001. The formation of main rain-band in summer in China [J]. *Meteorology Journal of Henan (in Chinese)* (1): 6–8. doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2001.01.004
- Chen S F, Wu R G. 2017. Interdecadal changes in the relationship between interannual variations of spring North Atlantic SST and Eurasian surface air temperature [J]. *J. Climate*, 30(10): 3771–3787. doi:10.1175/JCLI-D-16-0477.1
- Chen S F, Wu R G, Liu Y. 2016. Dominant modes of interannual variability in Eurasian surface air temperature during boreal spring [J]. *J. Climate*, 29(3): 1109–1125. doi:10.1175/JCLI-D-15-0524.1
- Chen S F, Wu R G, Chen W, et al. 2018. Enhanced linkage between Eurasian winter and spring dominant modes of atmospheric interannual variability since the early 1990s [J]. *J. Climate*, 31(9): 3575–3595. doi:10.1175/JCLI-D-17-0525.1
- Clark M P, Serreze M C. 2000. Effects of variations in East Asian snow cover on modulating atmospheric circulation over the North Pacific Ocean [J]. *J. Climate*, 13(20): 3700–3710. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3700:EOVIEA>2.0.CO;2
- Cressman G P. 1984. Energy transformations in the East Asia–West Pacific jet stream [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112(3): 563–571. doi:10.1175/1520-0493(1984)112<0563:ETITEA>2.0.CO;2
- 董敏, 余建锐, 高守亭. 1999. 东亚西风急流变化与热带对流加热关系的研究 [J]. *大气科学*, 23(1): 62–70. Dong M, Yu J R, Gao S T. 1999. A study on the variations of the westerly jet over East Asia and its relation with the tropical convective heating [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23(1): 62–70. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.01.08
- 董敏, 朱文妹, 徐祥德. 2001. 青藏高原地表热通量变化及其对初夏东亚大气环流的影响 [J]. *应用气象学报*, 12(4): 458–468. Dong M, Zhu W M, Xu X D. 2001. The variation of surface heat flux over Tibet Plateau and its influences on the East Asia circulation in early summer [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 12(4): 458–468. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.04.008
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2009. 东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响 [J]. *大气科学*, 33(3): 581–592. Du Y, Zhang Y C, Xie Z Q. 2009. Location variation of the East Asia subtropical westerly jet and its effect on the summer precipitation anomaly over eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(3): 581–592. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.15
- Du Y, Li T, Xie Z Q, et al. 2016. Interannual variability of the Asian subtropical westerly jet in boreal summer and associated with circulation and SST anomalies [J]. *Climate Dyn.*, 46(7): 2673–2688. doi:10.1007/s00382-015-2723-x
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 129(587): 157–178. doi:10.1256/qj.01.211
- 方晓洁, 曾晓枚, 陈雪芹. 2009. 东亚夏季 200 hPa 西风急流时空分布特征与我国夏季降水关系的初步分析 [J]. *气象与环境科学*, 32(2): 12–15. Fang X J, Zeng X M, Chen X Q. 2009. Spatial and temporal distribution characteristics of westerly jet in 200 hPa in East Asia and the analysis of relationship between it and summer precipitation in China [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 32(2): 12–15. doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2009.02.003
- Guan Z Y, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(10): 1544. doi:10.1029/2002GL016831
- Hoskins B J, Ambrizzi T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50(12): 1661–1671. doi:10.1175/1520-0469(1993)050<1661:RWPOAR>2.0.CO;2
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. *大气科学*, 12(S1): 107–116. Huang R H, Li W J. 1988. Influence of heat source

- anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 12(S1): 107–116. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.08
- Kuang X Y, Zhang Y C. 2005. Seasonal variation of the East Asian subtropical westerly jet and its association with the heating field over East Asia [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22(6): 831–840. doi:10.1007/BF02918683
- 况雪源, 张耀存. 2006a. 东亚副热带西风急流季节变化特征及其热力影响机制探讨 [J]. *气象学报*, 64(5): 564–575. Kuang X Y, Zhang Y C. 2006a. The seasonal variation of the East Asian subtropical westerly jet and its thermal mechanism [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 64(5): 564–575. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.05.003
- 况雪源, 张耀存. 2006b. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. *高原气象*, 25(3): 382–389. Kuang X Y, Zhang Y C. 2006b. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25(3): 382–389. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.004
- Lau K M, Li M T. 1984. The monsoon of East Asia and its global associations—A survey [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65(2): 114–125. doi:10.1175/1520-0477(1984)065<0114:TMOEAA>2.0.CO;2
- Lau K M, Kim K M, Yang S. 2000. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 13(14): 2461–2482. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2461:DABFCO>2.0.CO;2
- 李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 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): 641–658. Li C Y, Wang Z T, Lin S Z, et al. 2004. 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)*, 28(5): 641–658. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.05.01
- 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 2004. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季气候异常的影响 [J]. *地球物理学报*, 47(1): 10–18. Liao Q H, Gao S T, Wang H J, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the North Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 47(1): 10–18. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2004.01.003
- Lin Z D, Lu R Y. 2005. Interannual meridional displacement of the East Asian upper-tropospheric jet stream in summer [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22(2): 199–211. doi:10.1007/BF02918509
- Lin Z D, Lu R Y, Zhou W. 2010. Change in early-summer meridional teleconnection over the western North Pacific and East Asia around the late 1970s [J]. *Int. J. Climatol.*, 30(14): 2195–2204. doi:10.1002/joc.2038
- 刘匡南, 鄂鸿勋. 1956. 近五年东亚夏季自然天气季节的划分及夏季特征的初步探讨 [J]. *气象学报*, 27(3): 219–242. Liu K N, Wu H S. 1956. A preliminary study on the determination of natural synoptic summer season over Asiatic natural synoptic region and the prevailing weather process in this season [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 27(3): 219–242. doi:10.11676/qxb1956.017
- 刘飞, 何金海, 姜爱军. 2006. 亚洲夏季西风指数与中国夏季降水的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 29(4): 517–525. Liu F, He J H, Jiang A J. 2006. Relationship between Asian summer westerly wind index and summer rainfall in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 29(4): 517–525. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.04.012
- 陆日宇. 2002. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离 [J]. *大气科学*, 26(5): 611–624. Lu R Y. 2002. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26(5): 611–624. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.03
- 陆日宇. 2003. 华北汛期降水量年代际和年际变化之间的线性关系 [J]. *科学通报*, 48(10): 1040–1044. Lu R Y. 2003. Linear relationship between the interdecadal and interannual variabilities of North China rainfall in rainy season [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 48(10): 1040–1044. doi:10.1007/BF03184223
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus A*, 54(1): 44–55. doi:10.3402/tellusa.v54i1.12122
- 陆日宇, 林中达, 张耀存. 2013. 夏季东亚高空急流的变化及其对东亚季风的影响 [J]. *大气科学*, 37(2): 331–340. Lu R Y, Lin Z D, Zhang Y C. 2013. Variability of the East Asian upper-tropospheric jet in summer and its impacts on the East Asian monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(2): 331–340. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12310
- 卢楚翰, 周洁雯, 胡叶, 等. 2019. 春季影响江淮地区的天气尺度气旋活动与同期降水的联系 [J]. *大气科学*, 43(2): 311–324. Lu C H, Zhou J W, Hu Y, et al. 2019. Simultaneous relationship between precipitation and activities of springtime synoptic scale affecting cyclone over the Yangtzi-Huaihe River valleys [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(2): 311–324. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17294
- 倪东鸿, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2010a. 冬季中东急流与中国气候异常的联系 [J]. *气象科学*, 30(3): 301–307. Ni D H, Sun Z B, Li Z X, et al. 2010a. Relation of Middle East jet stream and China climate anomaly in winter [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 30(3): 301–307. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2010.03.003
- 倪东鸿, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2010b. 冬季中东急流时空变化特征及其与中国气候的关系 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 11(3): 354–359. Ni D H, Sun Z B, Li Z X, et al. 2010b. Spatiotemporal characteristics of the Middle East jet stream and its relationship with China climate in winter [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese)*, 11(3): 354–359. doi:10.3969/j.issn.1009-3443.2010.03.022
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65(3): 373–390. doi:10.2151/jmsj1965.65.3_373
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110(7): 699–706. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2
- 秦育婧, 卢楚翰. 2017. 冬季欧亚大陆反气旋活动特征及其与中国气温的关系 [J]. *大气科学学报*, 40(3): 418–424. Qin Y J, Lu C H. 2017. Characteristics of the anticyclone over Eurasia and its relationship with the winter temperature in China [J]. *Trans. Atmos.*

- Sci. (in Chinese), 40(3): 418–424. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150405001
- Qu X, Huang G. 2012. Impacts of tropical Indian Ocean SST on the meridional displacement of East Asian jet in boreal summer [J]. *Int. J. Climatol.*, 32(13): 2073–2080. doi:10.1002/joc.2378
- Reiter E R. 1963. *Jet-Stream Meteorology* [M]. Chicago: University of Chicago Press, 515pp
- 任雪娟, 杨修群, 周天军, 等. 2010. 冬季东亚副热带急流与温带急流的比较分析: 大尺度特征和瞬变扰动活动 [J]. *气象学报*, 68(1): 1–11. Ren X J, Yang X Q, Zhou T J, et al. 2010. Diagnostic comparison of the East Asian subtropical jet and polar-front jet: Large-scale characteristics and transient eddy activities [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 68(1): 1–11. doi:10.11676/qxxb.2010.001
- 沈柏竹, 林中达, 陆日宇, 等. 2011. 影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流特征分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 54(7): 1095–1104. Shen B Z, Lin Z D, Lu R Y, et al. 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early- and late-summer precipitation in Northeast China [J]. *Science China Earth Sciences*, 54(7): 1095–1104. doi:10.1007/s11430-011-4173-6
- 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
- 陶诗言, 陈隆勋. 1957. 夏季亚洲大陆上空大气环流的结构 [J]. *气象学报*, 28(3): 233–247. Dao S Y, Chen L S. 1957. The structure of general circulation over continent of Asia in summer [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 28(3): 233–247. doi:10.11676/qxxb1957.019
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨期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. Dao S Y, Zhao Y J, Chen X M. 1958. The relationship between May-Yü in Far East and the behaviour of circulation over Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 29(2): 119–134. doi:10.11676/qxxb1958.014
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79(1): 61–78. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2
- Wakabayashi S, Kawamura R. 2004. Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82(6): 1577–1588. doi:10.2151/jmsj.82.1577
- Walland D J, Simmonds I. 1996. Modelled atmospheric response to changes in Northern Hemisphere snow cover [J]. *Climate Dyn.*, 13(1): 25–34. doi:10.1007/s003820050150
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13(9): 1517–1536. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2
- 魏林波, 周甘霖, 王式功, 等. 2012. 亚洲副热带高空西风急流活动的气候特征及其与我国部分地区夏季降水的关系 [J]. *高原气象*, 31(1): 87–93. Wei L B, Zhou G L, Wang S G, et al. 2012. Climatic features of Asian upper westerly jet activities and their relationship with summer precipitation in partly areas of China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31(1): 87–93.
- 谢韶青, 卢楚翰. 2018. 近 16a 来冬季欧亚大陆中纬度地区低温事件频发及其成因 [J]. *大气科学学报*, 41(3): 423–432. Xie S Q, Lu C H. 2018. Intensification of winter cold events over the past 16 years in the mid-latitudes of Eurasia and their causes [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(3): 423–432. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160415003
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22(3): 730–747. doi:10.1175/2008JCLI2544.1
- 杨莲梅, 张庆云. 2007. 夏季东亚西风急流扰动异常与副热带高压关系研究 [J]. *应用气象学报*, 18(4): 452–459. Yang L M, Zhang Q Y. 2007. Relationships between perturbation kinetic energy anomaly along East Asian westerly jet and subtropical high in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 18(4): 452–459. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.04.005
- 杨莲梅, 张庆云. 2008. 夏季亚洲副热带西风急流气候特征 [J]. *气候与环境研究*, 13(1): 10–20. Yang L M, Zhang Q Y. 2008. Climate features of summer Asia subtropical westerly jet stream [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(1): 10–20. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.02
- 姚慧茹, 李栋梁. 2013. 东亚副热带急流的空间结构及其与中国冬季气温的关系 [J]. *大气科学*, 37(4): 881–890. Yao H R, Li D L. 2013. Spatial structure of East Asia subtropical jet stream and its relation with winter air temperature in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(4): 881–890. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12072
- 葉篤正, 陶诗言, 李麥村. 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 T C, Tao S Y, Li M T. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 29(4): 249–263.
- Zhang Y C, Kuang X Y, Guo W D, et al. 2006. Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(11): L11708. doi:10.1029/2006GL026377
- 张驰, 范广洲, 周定文, 等. 2011. 东亚副热带西风急流的时间演变特征及其与中国东部夏季降水的关系 [J]. *成都信息工程学院学报*, 26(6): 590–600. Zhang C, Fan G Z, Zhou D W, et al. 2011. Temporal evolution characteristics of East Asia subtropical westerly jet and its relationship with the summer precipitation over eastern China [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 26(6): 590–600. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2011.06.002
- Zhao W, Chen S F, Chen W, et al. 2019. Interannual variations of the rainy season withdrawal of the monsoon transitional zone in China [J]. *Climate Dyn.*, 53(3–4): 2031–2046. doi:10.1007/s00382-019-04762-9
- Zhou T J. 2003. Comparison of the global air-sea freshwater exchange evaluated from independent datasets [J]. *Progress in Natural Science*, 13(8): 626–631.