张庆云, 宣守丽, 孙淑清. 2018. 夏季东亚高空副热带西风急流季节内异常的环流特征及前兆信号 [J]. 大气科学, 42 (4): 935–950. Zhang Qingyun, Xuan Shouli, Sun Shuqing. 2018. Anomalous circulation characteristics of intraseasonal variation of East Asian subtropical westerly jet in summer and precursory signals [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 935–950, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.18107.

夏季东亚高空副热带西风急流季节内异常的 环流特征及前兆信号

张庆云1 宣守丽2 孙淑清1

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 1000292 江苏省农业科学院/农业部长江下游平原农业环境重点实验室,南京 210014

摘 要 位于东亚中纬度上空的东亚高空副热带西风急流是东亚季风环流系统中的重要成员,我国夏季降水雨带的季节内变化受东亚高空副热带西风急流位置季节内异常变化影响。根据 1979~2008 年中国降水资料、NCEP/ NCAR 再分析资料以及 NOAA ERSST V3 月平均海表温度资料,利用统计分析和物理量诊断方法对夏季东亚高空 副热带西风急流位置季节内异常的东亚大气环流特征及外强迫信号的物理过程进行了探讨。研究指出: 6 月东亚 高空副热带西风急流位置异常主要受欧亚大陆中高纬东传的 Rossby 波列位相变化影响,春季北大西洋海温异常是 欧亚大陆中高纬度 Rossby 波列位相变化的最显著的外强迫信号;7 月东亚高空副热带西风急流位置异常主要受西 太平洋热带向副热带传播的 Rossby 波列位相变化影响,春季西太平洋热带海温异常是西太平洋热带向副热带传播 的 Rossby 波列位相变化的最显著的外强迫信号;8 月东亚高空副热带西风急流位置异常主要受南亚大陆向东亚大 陆热带、副热带传播的 Rossby 波列位相变化影响,春季印度洋海温异常是南亚大陆向东亚大陆热带、副热带传播

关键词 西风急流 季节内变化 Rossby 波列 海表温度
 文章编号 1006-9895(2018)04-0935-16 中图分类号 P466 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.18107

Anomalous Circulation Characteristics of Intraseasonal Variation of East Asian Subtropical Westerly Jet in Summer and Precursory Signals

ZHANG Qingyun¹, XUAN Shouli², and SUN Shuqing¹

1 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agricultural Environment in Lower Valley of the Yangtze River of Chinese Agriculture Ministry, Nanjing 210014

Abstract The EASWJ (East Asian Subtropical Westerly Jet) is one of the most important circulation systems in East Asia, which links the high and low latitude circulations over East Asia. The intraseasonal variation of position and intensity of EASWJ during June, July, August and the East Asian circulation characteristics as well as the physical processes are discussed by using statistical analysis and physical process diagnosis methods based on the NCEP/NCAR reanalysis data and NOAA ERSST V3 monthly mean sea surface temperature (SST) data from 1979 to 2008. The physical

收稿日期 2018-01-05; 网络预出版日期 2018-03-12

作者简介 张庆云,女,1950年出生,研究员,主要从事亚洲季风、海气相互作用、短期气候预测研究。E-mail:zqy@mail.iap.ac.cn

项目资助 国家自然科学基金项目41375055,国家重点基础研究发展计划项目2012CB957803、2014CB954301

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375055), National Basic Research Program of China (Grants 2012CB957803, 2014CB954301)

mechanism for intraseasonal shift of the EASWJ is explored. The study points out that in June, the position shift of the EASWJ is affected by the phase variation of eastward propagating Rossby waves in the Eurasian continent. The North Atlantic SST anomalies (colder or warmer than normal) in spring are the most significant forcing signal for the phase variation of Rossby waves in the Eurasian continent. In July, the position shift of the EASWJ is affected by the phase variation of Rossby waves propagating northward from the tropical to subtropical western Pacific. The tropical western Pacific SST anomalies in spring are the most significant forcing signal for the phase variation of Rossby waves over the western Pacific. In August, the position shift of the EASWJ is affected by the phase variation of Rossby waves propagating northward from the tropical East Asia. The Indian Ocean SST anomalies in spring are the most significant forcing signal for the phase variation and subtropical East Asia.

Keywords East Asian westerly jet, Intraseasonal variation, Rossby wave, SST

1 引言

南、北半球中纬度对流层上层分别存在一支强 而窄的高速气流带,称之为西风带,其集中在一条 准水平轴线上并呈现一个或多个风速最大值中心, 纬向尺度为数千公里,经向尺度为数百公里,垂直 尺度为数公里,且存在强的垂直和侧边界风切变

(Berggren et al., 1958)。冬半球西风带分别位于南、 北纬 30°附近,其纬向平均风速超过 40 m s⁻¹;夏半 球西风带向两极移动,中心分别位于南、北纬 40°, 其纬向平均风速约为 20 m s⁻¹。南、北半球中纬度 西风急流是由哈德莱环流的北支携带低层大气在 东风带中获得的地球角动量来维持的,在对流层上 层附近达到最大。

位于东亚中纬度上空的东亚高空副热带西风 急流是东亚季风环流系统中的重要成员(张庆云和 陶诗言,1998)。东亚高空副热带西风急流位置、 强度变化对东亚天气气候变化有直接影响,夏季东 亚高空副热带西风急流季节内北跳时间的早晚、移 动快慢、停滞时间长短等对中国东部夏季雨季开始 时间、雨带位置、降水强度及雨季结束早晚等有重 要影响(陶诗言等,1958; Liang and Wang, 1998; Yang et al., 2002; Gong and Ho, 2002; Lu, 2004; 廖清海等,2004; Lin and Lu, 2005; 况雪源和张 耀存,2006a; Zhang et al., 2006; 陶诗言和卫捷, 2006; 毛睿等,2007; 杨莲梅和张庆云,2007,2008; 杜银等,2009; 孙凤华等,2009; 宣守丽等,2011, 2013; 金荣花等,2012)。

东亚高空副热带西风急流表现为多时间尺度 变化特征,在高频天气时间尺度上,东亚高空副热 带西风急流的异常对热带对流活动、季风环流突变 等天气过程产生影响,强的天气尺度波动活动量对 应着强的急流,弱的天气尺度波动活动量对应着弱 的急流, 热量涡动输送也呈现与天气尺度波动活动 能量类似的特征(Lau et al., 1983; 李崇银等, 2004; 吴伟杰等, 2006)。在季节、年际时间尺度上夏季 东亚西风急流 Rossby 波扰动动能加强(减弱)与 北半球西风急流强弱和沿急流的定常扰动以及东 亚西风急流位置偏南(偏北)有关,同时还与东亚 地区高、中、低纬南北向的扰动波列有关,500 hPa 西太平洋副热带高压对东亚西风带扰动异常的响 应,是由高空东亚西风急流南侧的散度场及其对流 层中下层热带和副热带地区的垂直速度距平异常 变化完成(杨莲梅和张庆云, 2007)。在年代际时 间尺度上, 20世纪80年代以来(1980~2008年), 盛夏(7~8月)200 hPa风场上的东亚高空副热带 西风急流位于东亚 35°N 以南(处于年代际变化的 偏南阶段), 与此对应的是东亚 35°N 以南从地面到 300 hPa 垂直运动场呈现为上升运动,视热源 (Q_1) 和视水汽汇(Q2)呈现正距平,东亚 35°N 以北从 地面到 300 hPa 垂直运动场呈现为下沉运动, Q_1 和 Q2 呈现为负距平,造成了 20 世纪 80 年代以来我国 东部夏季降水呈现出"南涝北旱"型,这说明20 世纪80年代以来200hPa风场上东亚高空副热带西 风急流处于年代际偏南阶段对我国东部夏季降水 的"南涝北旱"型有重要影响(Xuan et al., 2011)。

东亚高空副热带西风急流形成与变化机理方面的研究已取得了一系列研究成果,研究发现西风急流的形成与地形、海陆热力对比及 Hadley 环流在副 热带地区的下沉有关(Bolin, 1950; Palmén, 1951; Smagorinsky, 1953; 陶诗言和陈隆勳, 1957; Reiter, 1963; 张家诚, 1980; Huang and Gambo, 1982; Wallace, 1983; 况雪源等, 2009; 林中达, 2011)。 一些学者也提出了不均匀加热造成平均流的扰动

而产生急流的假设。Krishnamurti(1979)研究指出, 三个热带加热中心和冬季北半球的三个西风急流 中心有明显的联系。Yang and Webster (1990)进一 步指出,夏季热带地区的对流加热可以跨赤道影响 另一个半球冬季西风急流的位置和强度,并且西风 急流的年际变化与 ENSO 有密切联系。董敏等 (1999)研究了东亚高空西风急流与热带对流加热 场的关系,发现西风急流中心的季节变化与热带对 流加热的季节变化有紧密联系, 东亚地区的纬向西 风强度的年际变化与热带加热场的同期及前期状 况也密切相关。况雪源和张耀存(2006b)探讨了 东亚高空西风急流季节变化的热力影响机制,发现 非绝热加热对急流中心的东西移动有引导作用,青 藏高原春夏季对流层中上层强大的加热作用是导 致 6~7 月急流中心位置西移突变的原因。申乐琳 等(2009)的研究也表明,夏季整个青藏高原特别 是高原北部平均温度场与急流中心强度变化联系 紧密,而高原东南部平均温度场主要体现了夏季西 风急流位置纬向一致的南北移动;其次,夏季副热 带西风急流的变化还与青藏高原西南部与菲律宾 以东的西太平洋热源差变化有密切联系。

综上可见,夏季东亚高空副热带西风急流不同 时间尺度的变化对我国夏季降水异常变化有重要 影响,相关研究成果已在业务中有了较好的应用, 然而有关夏季东亚高空副热带西风急流季节内异 常成因及其前兆信号的研究并不多,这也正是短期 气候预测急需解决的问题,因此深入探讨夏季东亚 高空副热带西风急流季节内(月际)异常成因及其 前兆信号的物理过程,可为提高我国夏季季节内降 水的预测能力提供科学依据。本文将重点探讨夏季 东亚高空副热带西风急流季节内(月际)异常的东 亚大气环流特征及其前兆信号的物理意义。第2节 介绍本文资料与方法; 第3节分析东亚高空副热带 西风急流时空变化特征; 第4节探讨夏季东亚高空 副热带西风急流逐月变化的大气环流特征; 第5节 探讨夏季东亚高空副热带西风急流月际异常成因 及前兆信号; 第6节结论与讨论。

2 资料与方法

本文所用的资料有:NCEP/NCAR 再分析月平 均资料,其水平分辨率为 2.5°×2.5°,垂直方向分 为 17 层;NOAA Extended Reconstructed SST V3 的 月平均海表温度资料,分辨率为 2°×2°;中国气象



图 1 200 hPa 东亚高空副热带西风急流轴位置的气候平均逐月变化: (a) 3 月~8 月; (b) 9 月~2 月。圆圈表示各月最大风速中心位置 Fig. 1 Monthly averaged climatological position of the EASWJ (East Asian Subtropical Westerly Jet) axis at 200 hPa: (a) March to August; (b) September to February. The circles denote the positions of monthly maximum wind speed

局国家气候中心 160 站月降水资料。文中三维波作 用通量的计算公式详见文献 Takaya and Nakamura (1997, 2001)。

3 东亚高空副热带西风急流的时空 变化特征

天气气候过程及多年资料分析发现,东亚高空 副热带西风急流位置、强度变化有显著的年代际、 年际、季节、月际及天气尺度的时空变化特征,为 了客观定量化的了解东亚高空副热带西风急流气 候态的月际变化特征,图1给出多年(1951~2008 年)平均东亚高空副热带西风急流逐月位置及最大 风速中心的基本特征。初春到盛夏(图 1a,3~8 月)东亚高空副热带西风急流位置不断北进,8 月 最北位于45°N附近;初秋到隆冬(图 1b,9~2 月) 东亚高空副热带西风急流位置不断南撤,2 月最南 位于27.5°N附近。6月和9月,东亚—太平洋地区 出现两个大风速中心(分别位于东亚大陆和太平洋 上空),其他月只有一个大风速中心,秋、冬、春 季各月最大风速中心位于太平洋 140°E~150°E,夏 季各月最大风速中心位于东亚大陆上空,可见夏季 东亚高空副热带西风急流季节内逐月变化对我国 天气气候异常有直接影响,本文重点探讨夏季东亚 高空副热带西风急流季节内变化特征。

图 2 是 1951~2008 年平均的 6、7、8 月 200 hPa 纬向风的气候态分布。6 月东亚高空急流轴(最大 风速达 30 m s⁻¹以上的中心纬度,下同)位于 37.5°N

(图 2a),7月急流轴位置北移到 40°N (图 2b),8 月急流轴北移至 42.5°N 附近(图 2c)。夏季亚洲大陆上空有两个最大风速中心,一个位于西亚地区

(40°~60°E),另一个位于东亚地区(90°~130°E), 本文重点探讨夏季东亚地区高空副热带西风急流 季节内异常特征及成因。

为了定量化地描述夏季逐月东亚高空副热带 西风急流位置特征,我们根据 200 hPa 急流轴气候 态位置(6月: 37.5°N;7月: 40°N;8月:42.5°N), 把急流轴南侧与北侧各 5 个纬度,90°~130°E 范围 内平均纬向风标准化之差(南减北)定义为月平均 急流位置指数(EASWJPI),正指数代表急流位置 偏南,负指数代表急流位置偏北。具体计算如下:

6 月: EASWJPI=*U*₂₀₀ (32.5°~37.5°N, 90°~ 130°E)−*U*₂₀₀ (37.5°~42.5°N, 90°~130°E)

7 月: EASWJPI=*U*₂₀₀ (35.0°~40.0°N, 90°~ 130°E)-*U*₂₀₀ (40.0°~45.0°N, 90°~130°E)

8 月: EASWJPI=*U*₂₀₀ (37.5°~42.5°N, 90°~ 130°E)−*U*₂₀₀ (42.5°~47.5°N, 90°~130°E)

图 3 是 1951~2008 年 6、7、8 月平均的东亚 高空副热带西风急流位置指数。图 3 显示的年代际 变化表明,无论是 6 月、7 月还是 8 月其年代际转 折都发生在 1980 年前后,6 月急流位置在 1980 年 前相对偏南、1980 年后相对偏北(图 3a),7 月和 8 月急流位置在 1980 年前都相对偏北、1980 年后 相对偏南(见图 3b、c)。Xuan et al. (2011)研究



图 2 1951~2008 年月平均 200 hPa 纬向风(单位: m s⁻¹): (a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月 Fig. 2 Monthly averaged 200h-Pa zonal wind (units: m s⁻¹) during 1951–2008: (a) June; (b) July; (c) August

指出: 20 世纪 80 年代以来我国东部地区夏季降水 呈现为"南涝北旱"型与 1980 年后盛夏 (7~8 月) 200 hPa 风场上东亚高空副热带西风急流位置处于 年代际偏南阶段有关。然而为什么 6 月急流位置指 数年代际变化趋势与 7~8 月急流位置指数年代际 变化趋势有所不同,我们将在后面进行讨论。

基于夏季 6、7、8 月急流位置的年代际转折都 发生在 1980 年前后,因此我们在讨论年际变化时, 重点分析 1979~2008 年西风急流位置的年际变化 特征。从图 3 可见,夏季 6、7、8 逐月急流位置都 存在显著的年际变化,为了使不同月异常情况样本 数均衡,定义 6 月急流位置指数大于 0.8 和小于-1.0 标准差为急流位置偏南、偏北年,6 月急流位置偏 南年有 6 年:1979、1982、1992、1995、1997、2003 年;偏北年有 6 年:1981、1984、1987、1989、1996、 1999 年。定义 7 月和 8 月急流位置指数大于 1.0 和 小于-1.0 标准差为急流位置偏南和偏北年,7 月急 流位置偏南年有 7 年:1979、1980、1982、1983、 1987、1993、2007 年;偏北年有 6 年:1981、1988、 1994、2000、2001、2006年。8月急流位置偏南年 有5年:1980、1987、1993、1998、2003年;偏北 年有6年:1979、1994、1996、1997、1999、2006 年。夏季6、7、8月位置偏南(北)年的环流特征 将是本文探讨的重点。

从图 3 可见,夏季急流位置季节内变化有多种 变化特征,如 1982 年 6、7 月急流位置偏南,8 月 位置偏北;1987 年 6 月急流位置偏北,7、8 月位 置偏南;1998 年 6、7、8 月急流位置都偏南;2006 年 6、7、8 月急流位置都偏北。分析发现,1998 年 夏季长江流域出现"二度梅"与盛夏 7、8 月西风 急流位置偏南有关,1998 年 6、7、8 月急流位置偏 南,造成西太平洋副热带高压位置偏南,1998 年夏 季长江流域降水异常偏多(图略)。2006 年 6、7、 8 月急流位置都偏北,造成西太平洋副热带高压位 置偏北,2006 年夏季长江流域大部地区降水异常偏 少(图略),夏季川东盆地遭遇了严重的高温热浪 和伏旱与 2006 年夏季逐月急流位置偏北有关。这 说明夏季东亚高空副热带西风急流位置季节内异



图 3 1951~2008 年月平均标准化的东亚高空副热带西风急流位置指数:(a)6月;(b)7月;(c)8月。绿点实线为9年滑动平均 Fig. 3 Normalized time series of monthly mean position index of EASWJ (EASWJPI) during 1951–2008: (a) June; (b) July; (c) August. The green solid line with dots indicates 9-year moving average of the EASWJPI

常对我国东部降水异常变化有重要影响。

综上所述,我国夏季东部雨带位置年代际、年际、季节内变化与东亚高空副热带西风急流位置多时间尺度的变化密切相关,下面我们重点分析夏季东亚高空副热带西风急流6、7、8月位置异常的环流特征。

4 夏季逐月东亚高空副热带西风急 流异常的环流特征

图 4 是 1979~2008 年 6 月东亚高空副热带西 风急流位置指数与 500 hPa 位势高度场及 200 hPa 风场相关(图中暖色代表正相关、冷色代表负相关 ,浅色、深色阴影分别是通过 95%和 99%信度水平 的相关区,下同)。从图 4a 显示的通过 95%和 99% 信度水平的正(负)相关系数可见,欧亚大陆到西 太平洋的中高纬地区位势高度相关场呈现出东一 西向分布的相关波列,乌拉尔山与西太平洋地区分 别为负相关区、贝加尔湖附近为正相关区,说明 6 月东亚高空副热带西风急流位置偏南(偏北)年在 乌拉尔山、贝加尔湖、西太平洋高纬地区位势高度 出现"-+-"("+-+")的异常,东亚沿海中纬度 地区 (30°~40°N, 100°~130°E, 下同) 位势高度 出现负(正)异常;图4b显示的通过95%和99%置 信水平的正(负)相关区分别位于东亚 37.5°N 以南 (北),欧亚大陆到西太平洋中高纬地区的相关系数 分布特征与 500 hPa 高度场的相关分布特征一致, 这 说明高、中层环流呈准正压结构;图 4a(b)的相 关场清楚表明,6月东亚高空副热带西风急流位置偏 南(北)与欧亚高纬度乌拉尔山、贝加尔湖、东亚中 纬沿海地区位势高度距平呈现"-+-"("+-+") 异常分布有关。

为了进一步了解6月东亚高空副热带西风急流 位置偏南(北)年欧亚大陆高纬度及东亚中纬西风 带环流异常年物理量变化特征。图 5a(b)给出了 6月急流位置偏南(北)年500 hPa位势高度距平 及其 Rossby 波列、TN 通量及其 TN 通量散度场合 成(图中阴影区代表 Rossby 波作用通量辐散、辐 合,波作用通量辐散代表 Rossby 波能量的发散即 波源、辐合表示能量的吸收即波汇,波作用通量的 辐合区有利于异常环流的维持)。从图 5a 显示的 6 月急流位置偏南年的合成分析可见(图 5a 与图 4a 给出的相关分析完全一致),北大西洋到欧亚大陆 (30°W~130°E)中高纬地区位势高度距平呈现"- +-+-"的距平波列,三个负距平中心分别位于北 大西洋、乌拉尔山、东亚沿海中纬度地区上空,两 个正距平中心位于北欧和贝加尔湖附近,图 5a 箭 头所示的波作用通量表明,波能量沿着 Rossby 波 列从北大西洋上空经北欧、乌拉尔山及贝加尔湖地 区向东亚沿海中纬度地区传播,东亚沿海中纬度地 区为能量辐合区,其位势高度呈现负异常,说明东 亚沿海中纬度受异常气旋性环流控制, 使得东亚急 流位置比气候平均态 (37.5°N) 偏南。从图 5a 还清 楚可见,乌拉尔山、东亚沿海中纬度上空位势高度 的负异常与源自北大西洋上空东传的 Rossby 波列 在北大西洋上空呈现出的负异常一致。6 月急流位 置偏北年的 Rossby 波列位相(图 5b) 与偏南年完 全相反,北大西洋到欧亚大陆(30°W~130°E)中 高纬地区位势高度距平呈现出"+-+-+"的距平 波列,三个正距平中心分别位于北大西洋、乌拉尔 山、东亚沿海中纬度上空,两个负距平中心分别位 于北欧和贝加尔湖附近。从图 5b 箭头所示的波作 用通量可见,波能量沿着 Rossby 波列从北大西洋 上空经北欧、乌拉尔山及贝加尔湖地区向东亚沿海 高纬度上空传播,贝加尔湖地区为能量辐合区,其 位势高度表现为负异常,东亚沿海中纬度地区位势 高度为正异常,说明东亚沿海中纬度受异常反气旋 性环流控制,使得东亚急流位置比气候平均态 (37.5°N) 偏北。从图 5b 还清楚可见,乌拉尔山、 东亚沿海中纬度上空的位势高度正异常与源自北 大西洋上空东传的 Rossby 波列在北大西洋上空呈 现出的正异常一致。图 5a、b 清楚表明, 6 月乌拉 尔山、贝加尔湖及东亚沿海中纬度环流异常受北大 西洋上空位势高度正、负异常影响,北大西洋上空 位势高度正、负异常对欧亚大陆中高纬东传的 Rossby 波列的位相变化有直接影响,北大西洋上空 位势高度正、负异常的成因将在下节探讨。

图 6 是 1979~2008 年 7 月东亚高空副热带西 风急流位置指数与 500 hPa 位势高度场及 200 hPa 风场相关。从图 6a 显示的相关系数通过 95%和 99% 信度水平的分布可见:欧亚大陆中高纬度虽然有信 度的相关区,但最显著的正、负相关分别出现在东 亚沿海—西太平洋的热带、副热带地区,这说明 7 月急流位置南、北异常与西太平洋热带、副热带地 区位势高度异常变化有关。图 6b 是 7 月急流位置 指数与 200 hPa 风场的相关,通过 95%和 99%信度 水平的正(负)相关区出现在东亚—西太平洋 40°N



图 4 1979~2008 年 6 月东亚高空副热带西风急流位置指数与同期(a) 500 hPa 位势高度场的相关系数、(b) 200 hPa 风场的相关。暖(冷)色表示正(负)相关,浅、深阴影区分别表示信度水平为 95%、99%

Fig. 4 Simultaneous correlation maps of the EASWJPI in June with (a) 500-hPa geopotential height and (b) 200-hPa winds during 1979–2008. Warm (cold) color indicates positive (negative) correlation; light and dark shadings indicate 95% and 99% confidence levels, respectively



图 5 6月 500 hPa 位势高度距平(等值线,单位:gpm)、波作用通量(箭头,单位:m² s⁻²)、波作用通量散度(单位:10⁻⁶ m s⁻²,暖色、冷色阴 影代表辐散、辐合)合成场:(a)东亚高空副热带西风急流位置偏南年;(b)东亚高空副热带西风急流位置偏北年

Fig. 5 Composites of 500-hPa geopotential height anomalies (contours, units: gpm), wave activity fluxes (vectors, units: $m^2 s^{-2}$), and divergence of the wave activity fluxes (shadings, units: $10^{-6} m s^{-2}$) in June for years (a) when the EASWJPI is located to the south of its normal position and (b) when the EASWJPI is located to the north of its normal position. Warm (cool) color shading indicates divergence (convergence)

以南(北),表明7月急流位置指数正(负)异常 年的东亚高空副热带西风急流中心位于40°N以南 (北)。图6a、b还清楚表明,无论是500hPa位势 高度场还是200hPa纬向风场上通过95%和99%信 度水平的相关区都出现在西太平洋热带、副热带地 区,说明7月急流位置偏南(北)更多受西太平洋

热带环流特别是西太平洋副热带高压异常变化影响。

为了进一步了解7月东亚高空副热带西风急流 位置偏南(北)年西太平洋热带、副热带环流异常 的物理量变化特征。图7a(b)给出了7月急流位 置偏南(北)年500 hPa位势高度距平及其 Rossby







4 期	张庆云等:夏季东亚高空副热带西风急流季节内异常的环流特征及前兆信号	
No. 4	ZHANG Qingyun et al. Anomalous Circulation Characteristics of Intraseasonal Variation of East Asian Subtropical	943

波列、TN 通量及其 TN 通量散度场合成。从图 7a (b)显示的7月急流位置偏南(北)年环流可见, 虽然北大西洋到欧亚大陆(30°W~130°E)中高纬 地区位势高度距平中心也出现 Rossby 波列(偏南、 偏北年 Rossby 波列的位相分布相反),但从波作用 通量即波能量的传播特征可见,通过显著性检验的 且最强波能量都是由西太平洋热带向副热带地区 传播(图7a、b箭头),急流位置偏南(北)年500 hPa位势高度场上西太平洋热带到副热带Rossby波 列位相分别呈现为正一负(负一正)距平分布特征 (图 7a、b 等值线),即西太平洋副热带高压位置偏 南(北),东亚沿海中纬度地区位势高度呈现负(正) 异常,说明东亚沿海中纬度上空的气旋(反气旋) 性环流加强,有利7月东亚高空副热带西风急流位 置比气候平均态(40°N)偏南(北)。图 7 清楚表 明,7月欧亚大陆中高纬波作用通量的影响较弱, 东亚中纬度上空环流异常主要受源自热带西太平 洋及我国南海地区上空北传的 Rossby 波列位相及 波能量的影响,7月热带西太平洋和我国南海上空 位势高度正、负异常成因将在下节探讨。

图 8 是 1979~2008 年 8 月东亚高空副热带西风 急流位置指数与 500 hPa 位势高度场及 200 hPa 风 场相关。从图 8a 显示的相关系数通过 95%和 99% 信度水平的分布清楚可见:南亚大陆及东亚大陆低 纬到高纬的相关系数自南向北呈正、负、正的分布, 这说明8月东亚急流位置偏南(北)异常主要受东 亚大陆高、中、低纬环流异常变化影响,当东亚大 陆低纬到高纬的位势高度距平呈现"+-+"("-+ -")的分布,有利8月东亚高空副热带西风急流位 置偏南(北)。图 8b 是 8 月急流位置指数与 200 hPa 风场的相关,通过95%和99%信度水平的正(负) 相关区出现在东亚大陆 42.5°N 以南(北),说明东 亚高空副热带西风急流位置位于 42.5°N 以南(北)。 图 8a、b 清楚表明,无论是 500 hPa 位势高度场还 是 200 hPa 纬向风场上通过 95%和 99% 信度水平的 相关区都出现在南亚与东亚大陆上空,说明8月南 亚高压位置南(北)变化对8月急流位置异常起了 重要作用。

为了进一步了解8月东亚高空副热带西风急流 位置偏南(北)年南亚及东亚大陆环流异常的物理 量变化特征。图9a(b)给出了8月急流位置偏南 (北)年500hPa位势高度距平及Rossby波列、TN 通量及其TN通量散度场合成。从图9a(b)显示

的8月急流位置偏南(北)年环流可见,无论是急 流位置偏南或偏北年的欧亚大陆中高纬地区的 Rossby 波列的波作用通量都是沿着高纬地区向东 传播(图 9a、b 箭头),影响东亚中纬度地区的波 作用通量(波能量)都是从东亚热带向副热带地区 传播(图 9a、b 箭头),说明 8 月东亚大陆中纬地 区环流异常主要受来自南亚大陆及东亚大陆热带 向副热带方向传播的 Rossby 波列的波作用通量影 响。从图 9a、b 等值线分布可见, 500 hPa 位势高 度场上南亚大陆及东亚低、中高纬度地区距平分布 呈现为正一负(负一正)特征,也就是说东亚沿海 中纬度地区的负(正)位势高度距平的异常受南亚 向东亚副热带地区北传的 Rossby 波列正一负(负 一正)位相变化影响,当东亚沿海大陆 30°N 以南 位势高度出现正(负)异常,有利8月东亚高空副 热带西风急流中心位置比气候平均态(42.5°N)偏 南(北)。从图9清楚可见,8月东亚大陆中纬度环 流异常主要与源自南亚大陆向东亚大陆中纬北传 的 Rossby 波能量和波位相变化影响, 8 月南亚大陆 向东亚大陆热带、副热带传播的 Rossby 波的位相 异常成因将在下节探讨。

综上所述, 6 月东亚高空副热带西风急流位置 偏南、偏北与源自北大西洋上空的欧亚大陆中高纬 度 Rossby 波列位相变化有关; 7 月东亚高空副热带 西风急流位置偏南、偏北受源自热带西太平洋向北 传的 Rossby 波列位相变化的影响; 8 月东亚高空副 热带西风急流位置偏南、偏北与源自南亚大陆向东 亚大陆副热带北传的 Rossby 波列位相变化的影响, 下面将进一步分析夏季季节内(6、7、8 月)大气 环流内部动力过程 Rossby 波列位相变化与外强迫 因子异常的关系。

5 夏季东亚高空副热带西风急流季 节内异常的外强迫信号

大气环流内部动力过程异常受外强迫因子海 温异常变化的影响。我们进一步探讨 6、7、8 月 Rossby 波列位相异常特征与外强迫因子海温异常 关系,对6、7、8 月东亚高空副热带西风急流指数 与前冬 12 月至同年逐月(包括 6、7、8 月)全球 海温进行时—空相关计算,探讨前期最显著的外强 迫因子异常特征对东亚大气环流的影响。

图 10 给出的是 1979~2008 年 6、7、8 月东亚 高空副热带西风急流与全球海温的时一空相关最





显著的海温关键区(图中方框区为通过95%信度水 平的区域),图10清楚表明,虽然海温关键区位于 不同海域,但时间都出现在春季,这说明6、7、8 月东亚高空副热带西风急流位置的变化与春季海 温关系最显著。根据图 10a 中的方框所示,把 3~4 月平均的北大西洋海温关键区(方框 A、B)的海 温标准差定义为北大西洋海温指数: I_A =SST(18°~ 24°N, 70°~100°W)-SST(42°~46°N, 50°~

4 期	张庆云等:夏季东亚高空副热带西风急流季节内异常的环流特征及前兆信号	
No. 4	ZHANG Qingyun et al. Anomalous Circulation Characteristics of Intraseasonal Variation of East Asian Subtropical	945

62°W), 根据 IA 定义, 计算得到 1979~2008 年逐年 春季 IA 指数, 春季 IA 指数与 6 月急流指数相关达 0.52 (通过 99%的信度水平),这说明春季北大西洋 海温指数(I_A)为正(负)异常,有利6月东亚高 空副热带西风急流位置偏南(北)。根据图 10b 方 框所示, 把 4~6 月平均热带西太平洋海温关键区 (图中的方框)的海温标准差定义为热带西太平洋 海温指数: Iwp=SST(10°~20°N, 120°E~180°), 根 据 Iwp 定义, 计算得到 1979~2008 年逐年春季热带 西太平洋海温指数,春季 Iwp 指数与7月东亚高空 副热带西风急流指数相关达到-0.56(通过 99%的信 度水平),说明春季热带西太平洋海温指数为负 (正)异常,有利7月东亚高空副热带西风急流位 置偏南(北)。根据图 10c 所示,把 5 月热带印度 洋海温关键区(图中的方框)的海温标准差定义为 热带印度洋海温指数: I_{IND}=SST(0°~20°N, 30°~ 90°E),根据 IIND 定义,计算得到 1979~2008 年逐 年春季热带印度洋海温指数,春季 Ind 指数与8月 东亚高空副热带西风急流指数相关系数达 0.47 (通 过 99%的信度水平), 说明春季热带印度洋海温指 数正(负)异常,有利8月东亚高空副热带西风急 流位置偏南(北)。

我们在对 6、7、8 月东亚高空副热带西风急流 指数与前冬 12 月至当年逐月(包括 6、7、8 月) 海温的相关分析中还发现,冬季赤道东太平洋海温 为 El Niño (La Niña)型,有利夏季东亚高空副热 带西风急流位置偏南(北),其结论与黄兴春和江 静(2008)研究指出的厄尔尼诺年夏季在急流区内 偏南部纬向风明显增强、拉尼娜年夏季在急流区内 偏南部纬向风调显增强、拉尼娜年夏季在急流区内 偏南部纬向风减弱的结论一致,本文的合成分析去 除 El Niño (La Niña)年的信号。

为了更清楚了解春季北大西洋关键区海温异 常对6月东亚高空副热带西风急流位置影响的物理 过程,把春季北大西洋海温 *I*_A指数大于0.5(小于 -0.5)标准差定义为*I*_A指数正(负)异常年,春季 *I*_A指数正(负)异常各有7年,分别是:1982、1990、 1992、1997、2003、2004、2007年(1981、1984、 1988、1993、1999、2000、2005年)。图11a(b) 是根据春季 *I*_A指数7正(7负)年得到的6月200 hPa 位势高度距平的 Rossby 波列、TN 通量及 TN 通量 散度场,从图可见,北大西洋到欧亚大陆中高纬的 Rossby 波列呈现为"-+-+-"("+-+-+")的距 平波列分布,其中三个负(正)距平中心分别位于 北大西洋、乌拉尔山、东亚沿海中纬度地区上空,



图 10 1979~2008 年月平均东亚高空副热带西风急流位置指数与春季海表温度相关系数:(a)6月;(b)7月;(c)8月。方框区为通过95%信度水平的海温关键区,浅、深阴影区分别表示信度水平为95%、99%

Fig. 10 Correlation coefficients between EASWJPI and SST in spring during 1951–2008: (a) June; (b) July; (c) August. The boxes indicate key areas of sea surface temperature that correlation coefficient exceed the 95% confidence level. Light and dark shadings indicate 95% and 99% confidence levels, respectively

波作用通量及波能量沿着 Rossby 波列从北大西洋 上空经北欧、乌拉尔山地区向东亚沿海中纬度地区 传播(图 11a、b箭头),图 11a(b)显示的 Rossby 波列位相分布与图 5a(b)给出的 6 月东亚高空副 热带西风急流位置偏南(北)年 Rossby 波列位相 分布一致。此外我们还分析了春季 I_A指数 7 正(7 负)异常年 6 月 200 hPa 纬向风距平场(图略),发 现最大西风分别出现在东亚 37.5°N 以南(北),这 说明春季北大西洋关键区海温指数表现为正(负) 异常有利 6 月东亚高空副热带西风急流位置偏南 (北),其影响过程是通过 6 月欧亚大陆中高纬东传 的 Rossby 波列位相变化完成。

对春季热带西太平洋关键区海温异常影响7月 东亚高空副热带西风急流位置异常的物理过程进 行分析,春季热带西太平洋海温 Iwp 指数大于 0.9 (小于-1.0)标准差定义为 Iwp 指数正(负)异常 年, 春季 Iwp 正(负) 异常年各有7年: 1996、1999、 2000、2001、2002、2007、2008年(1979、1980、 1982、1983、1985、1992、1993年)。图 12a (b) 是春季 Iwp 指数 7 个负(正)年合成得到的 7 月 500 hPa 位势高度距平场及 Rossby 波列、TN 通量及 TN 通量散度场。从图可见,春季 Iwp 指数负(正)异 常年的7月西太平洋热带、副热带地区的位势高度 距平呈相反的分布特征,即春季 Iwp 负(正)异常 年的西太平洋热带、副热带以及高纬度 Rossby 波 列位相呈现为正一负一正(负一正一负)距平波列, 西太平洋中纬度地区位势高度表现为负(正)异常, 通过 99%信度水平的最强波作用通量由西太平洋 热带向副热带传播(图 12a、b 箭头)。图 12a、b 给出的西太平洋 Rossby 波的位相特征及 Rossby 波 能量传播方向都与图 7a、b 显示的西太平洋区域的 位相分布及传播特征一致,这说明春季热带西太平 洋海温出现负(正)异常有利7月东亚高空副热带 西风急流位置偏南(北),其影响过程是通过7月 西太平洋热带向副热带传播的 Rossby 波列位相变 化完成。

对春季印度洋关键区海温异常影响 8 月东亚高 空副热带西风急流位置异常的物理过程进行分析, 把春季印度洋海温标准差指数 *I*_{IND} 大于 1.0 (小于 -0.7) 定义为 *I*_{IND} 正 (负) 异常年,春季 *I*_{IND} 指数 正异常有 7 年: 1980、1987、1991、1998、2003、 2005、2007 年; 负异常有 6 年: 1979、1984、1985、 1989、1999、2008 年。图 13a (b) 是根据春季 *I*_{IND} 指数7正(6负)合成的8月850 hPa风距平场。 从图可见, 正(负) 异常年南亚大陆到东亚大陆热 带、副热带地区风距平场呈相反分布特征,即 IND 正(负)异常年从南亚大陆向东亚大陆热带、副热 带传播的 Rossby 波列位相呈现气旋—反气旋—气 旋(反气旋—气旋—反气旋)距平波列(图13a、b 矢量风),其分别对应着8月西太平洋副热带高压 位置偏南(北)。图13a、b显示的 Rossby 波列位相 及Rossby波传播方向都与图9a、b呈现的分布一致。 为了清楚了解春季 InD 指数正(负)异常年8月东 亚高空副热带西风急流位置的变化特征,图13c(d) 给出了春季7正(6负) IIND 指数年对应的8月200 hPa 纬向风距平合成图,从图清楚可见春季 IIND 指 数正(负)异常年8月200 hPa东亚高空副热带西 风急流位置分别位于 42.5°N 以南(北),这说明春 季热带印度洋关键区海温异常有利8月东亚高空副 热带西风急流位置偏南(北),其影响过程是通过 南亚大陆向东亚大陆热带、副热带传播的 Rossby 波波列位相变化完成。

综上所述, 6 月东亚高空副热带西风急流位置 异常与欧亚大陆中高纬度东传的 Rossby 波列位相 变化有关,其位相变化受春季北大西洋关键区海温 异常变化影响; 7 月东亚高空副热带西风急流位置 异常与西太平洋地区热带向副热带传播的 Rossby 波列位相变化有关,其位相变化受春季西太平洋热 带关键区海温异常变化影响; 8 月东亚高空副热带 西风急流位置异常与南亚大陆向东亚大陆热带、副 热带传播的 Rossby 波列位相变化有关,其位相变 化受春季印度洋关键区海温异常变化影响。

6 结论与讨论

东亚高空副热带西风急流是东亚季风环流系 统中的重要成员,东亚高空副热带西风急流位置有 显著的年代际、年际、季节和季节内变化,我国夏 季降水雨带的季节内变化与东亚高空副热带西风 急流位置季节内异常变化有关。本文利用统计及物 理量诊断方法对1979~2008 共 30 年的夏季季节内 东亚高空副热带西风急流变化特征及其关键环流 的外强迫信号的物理过程进行了探讨,主要结论: 6 月东亚高空副热带西风急流位置异常主要受欧亚 大陆中高纬自西向东传播的 Rossby 波列位相变化 影响,春季北大西洋关键区海温异常是欧亚大陆中 高纬东传的 Rossby 波列位相变化的最显著外强迫



图 11 6月 200 hPa 位势高度距平(等值线,单位:gpm)、波作用通量(箭头,单位:m² s⁻²)、波作用通量散度(单位:10⁻⁶ m s⁻²,暖色、冷色阴 影代表辐散、辐合)合成场:(a) 春季 *I*_A 正指数年;(b) 春季 *I*_A 负指数年

Fig. 11 Composites of 200-hPa geopotential height anomaly (contours, units: gpm), wave activity fluxes (arrows, units: $m^2 s^{-2}$), and divergence of wave activity fluxes (shadings, units: 10^{-6} m s^{-2}) in June for years with (a) positive I_A (the index of North Atlantic SST anomalies in spring) indices and (b) negative I_A indices in spring. Warm (cool) color shading indicates divergence (convergence)



图 12 7月 500 hPa 位势高度距平(等值线,单位:gpm)、波作用通量(箭头,单位:m² s⁻²)、波作用通量散度(单位:10⁻⁶ m s⁻²,暖色、冷色阴 影代表辐散、辐合)合成场:(a) 春季 *I*_{WP} 负指数年;(b) 春季 *I*_{WP} 正指数年

Fig. 12 Composites of 500-hPa geopotential height anomalies (contours, units: gpm), wave activity fluxes (arrows, units: $m^2 s^{-2}$), and divergence of wave activity fluxes (shadings, units: $10^{-6} m s^{-2}$) in July for years with (a) negative I_{WP} (the index of tropical western Pacific SST anomalies in spring) indices and (b) positive I_{WP} indices in spring. Warm (cool) color shadings indicate divergence (convergence)



图 13 8月 (a, b) 850 hPa 风场距平和 (c, d) 200 hPa 风场距平合成 (箭头,单位: m s⁻¹): (a, c) 春季 I_{IND} 正指数年; (b, d) 春季 I_{IND} 负指数 年。图 c, d 的红虚线表示 42.5°N, 红色箭头表示西风加强。暖 (冷) 色表示纬向风正 (负) 异常,浅、深阴影区分别表示信度水平为 95%、99% Fig. 13 Composites of wind anomalies (arrows, units: m s⁻¹) at (a, b) 850 hPa and (c, d) 200 hPa in August for years with (a, c) positive I_{IND} (the index of Indian Ocean SST anomalies in spring) indices and (b, d) negative I_{IND} indices in spring. Red dashed line indicates 42.5°N and the red arrow indicates that the westerly wind is strengthening in Figs. c, d. Warm (cold) color indicates zonal wind positive (negative) anomalies, the light and dark shadings indicate confidence levels at 95% and 99%

信号; 7 月东亚高空副热带西风急流位置异常主要 受西太平洋热带向副热带北传的 Rossby 波列位相 变化影响,春季西太平洋热带关键区海温异常是西 太平洋热带向副热带传播的 Rossby 波列位相变化 的最显著的外强迫信号; 8 月东亚高空副热带西风 急流位置异常主要受南亚大陆向东亚大陆热带、副 热带传播的 Rossby 波列位相变化影响,春季印度 洋关键区海温异常是南亚大陆向东亚大陆热带、副 热带传播的 Rossby 波列位相变化影响,春季印度 道信号。

我们的分析还指出 6、7、8 月东亚高空副热带 西风急流位置在 20 世纪 80 年代前后都出现了年代 际转折,但 6 月年代际转折趋势与 7、8 月相反(图 3),可能是 6 月西风急流位置的异常主要受北大西 洋副热带海温异常变化影响,而 7、8 月急流位置 异常主要受热带西太平洋、印度洋海温异常变化的 影响,也就是说,7、8 月东亚高空副热带西风急流 位置年代际转折趋势一致,可能与外强迫信号都出 现在热带海洋有关,而 6 月东亚高空副热带西风急 流位置年代际变化的外强迫信号可能与其出现在 北大西洋副热带海洋有关。

此外我们还对夏季东亚高空副热带西风急流 逐日位置指数的振荡周期进行了计算,分析发现, 夏季东亚高空副热带西风急流位置季节内最显著 的振荡周期为 7~22 天,急流位置指数 7~22 天的 振荡周期与北极涛动 (AO)指数变化有关(图略), 当 AO 指数处于季节内振荡正(负)位相,东亚高 空副热带西风急流位置偏南(北)。这说明夏季东亚 高空副热带西风急流位置季节内异常不仅与前期外 强迫因子海温异常引发热带、副热带环流异常有关, 同时还受中高纬度环流北极涛动异常变化影响。因 此我们还需要进一步通过数值模拟方法,深入探讨 东亚高空副热带西风急流位置季节内高、中、低纬 环流异常对前期海温异常响应的物理过程。

需要指出的是:本文的相关和物理量诊断的结论都是基于 1979~2008 年 30 年资料,为了了解本文结论是否有一定代表性和应用价值,我们对 2009年以来的夏季东亚高空副热带西风急流位置月际变化的实况与预测结果进行了检验,结果表明本文给出的关键区海温的前兆信号有一定的应用价值,

但相关结论还需要在业务工作中进一步检验。

参考文献(References)

- Berggren R, Gibbs W J, Newton C. 1958. Observational characteristics of the jet stream [R]. WMO Tech. Note No. 19.
- Bolin B. 1950. On the influence of the Earth's orography on the general character of the westerlies [J]. Tellus, 2 (3): 184–195, doi:10.1111/ j.2153-3490.1950.tb00330.x.
- 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 Min, Yu Jianrui, Gao Shouting. 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.
- 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 Yin, Zhang Yaocun, Xie Zhiqing. 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.
- Gong Dao-Yi, Ho Chang-Hoi. 2002 Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. Geophysical Research Letters, 29 (10), 78 (1–4), doi:10.1029/2001GL014523.
- Huang R H, Gambo K. 1982. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources: (II) Forcing by stationary heat sources and forcing by topography and stationary heat sources [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 60 (1): 93–108, doi:10.2151/jmsj1965.60.1_93.
- 黄兴春, 江静. 2008. ENSO 事件对东亚副热带西风急流影响的诊断分析 [J]. 气象科学, 28 (1): 15–20. Huang Xingchun, Jiang Jing. 2008. The diagnostic analysis of the impact of ENSO events on East Asia subtropical westerly jet [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 28 (1): 15–20, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2008.01.003.
- 金荣花, 李维京, 张博, 等. 2012. 东亚副热带西风急流活动与长江中下 游梅雨异常关系的研究 [J]. 大气科学, 36 (4): 722-732. Jin Ronghua, Li Weijing, Zhang Bo, et al. 2012. A study of the relationship between East Asia subtropical westerly jet and abnormal Meiyu in the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 722-732, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.2011.11076.
- Krishnamurti, T. N., 1979. Tropical meteorology [C]// Krishnamurti, T. N. Compendium of Meteorology. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- 况雪源,张耀存. 2006a. 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 Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006a. 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.
- 况雪源, 张耀存. 2006b. 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 Xueyuan, Zhang

Yaocun. 2006b. The seasonal variation of the East Asian subtropical westerly jet and its thermal mechanism [J]. Acta Meteorologica Sinica, 64 (5): 564–575, doi:10.11676/qxxb2006.055.

- 况雪源, 张耀存, 刘健, 等. 2009. 冬季黑潮暖流区加热异常对东亚副热 带西风急流影响的数值研究 [J]. 大气科学, 33 (1): 81-89. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun, Liu Jian, et al. 2009. A numerical study of the effect of anomalous surface heating in the Kuroshio current region in winter on the East Asian subtropical westerly jet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 81-89, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.2009.01.07.
- Lau K M, Chang C P, Chan P H. 1983. Short-term planetary-scale interactions over the tropics and midlatitudes. Part II: Winter-MONEX period [J]. Mon. Wea. Rev., 111 (7): 1372–1388, doi:10.1175/1520-0493(1983)111<1372:STPSIO>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 Chongyin, Wang Joughtai, Lin Shizhe, 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.
- Liang X Z, Wang W C. 1998. Associations between China monsoon rainfall and tropospheric jets [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124 (552): 2597– 2623, doi:10.1002/qj.49712455204.
- 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.
- 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 其对东亚夏季风气候异常的影响 [J]. 地球物理学报, 47 (1): 10–18. Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, 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 Journal of Geophysics (in Chinese), 47 (1): 10–18.
- 林中达. 2011. 盛夏两类东亚高空西风急流北跳的动力过程 [J]. 大气科 学, 35 (4): 631–644. Lin Zhongda. 2011. Dynamical processes of two categories of northward jumps of the East Asian upper-tropospheric jet stream in mid-summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 631–644, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.04.
- Lu R Y. 2004. Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (1): 155–165, doi:10.2151/jmsj.82.155.
- 毛睿, 龚道溢, 房巧敏. 2007. 冬季东亚中纬度西风急流对我国气候的 影响 [J]. 应用气象学报, 18 (2): 137–146. Mao Rui, Gong Daoyi, Fang Qiaomin. 2007. Influences of the East Asian jet stream on winter climate in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 18 (2): 137–146, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.02.002.
- Palmén E. 1951. The role of atmospheric disturbances in the general circulation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 77 (333): 337–354, doi:10.1002/qj.49707733302.
- Reiter E R. 1963. Jet-Stream Meteorology [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1–515.
- 申乐琳,何金海,陈隆勋,等. 2009. 青藏高原热力状况对东亚夏季副热

带西风急流的影响 [J]. 气象与减灾研究, 32 (1): 25-31. Shen Lelin, He Jinhai, Chen Longxun, et al. 2009. Thermal effect of Tibetan Plateau on East Asia subtropical westerly jet in summer [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 32 (1): 25-31, doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2009.01.004.

- Smagorinsky J. 1953. The dynamical influence of large-scale heat sources and sinks on the quasi-stationary mean motions of the atmosphere [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 79 (341): 342–366, doi:10.1002/qj. 49707934103.
- 孙凤华,张耀存,郭兰丽. 2009. 中国东部夏季降水与同期东亚副热带 急流年代际异常的关系 [J] 高原气象, 28 (6): 1308–1315. Sun Fenghua, Zhang Yaocun, Guo Lanli. 2009. Relationship between the East Asia subtropical westerly jet anomaly and summer precipitation over eastern China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (6): 1308–1315.
- 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, 陈隆勳. 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 Shih-Yen, Chen Lung-Shun. 1957. Structure of general circulation over continent of Asia in summer [J]. Acta Meteorologica 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. Tao Shiyan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. 1958. The relationship between May-Yü in Far East and the behaviour of circulation over Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (2): 119–134, doi:10.11676/qxxb1958.014.
- 陶诗言, 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): 513–525. Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (5): 513–525, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001.
- Wallace J M. 1983. The climatological mean stationary waves: Observational evidence [M]// Hoskins B, Pearce R. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere. London: Academic Press, 27– 53.
- 吴伟杰,何金海, Chung H S,等. 2006. 夏季东亚高空急流与天气尺度波动的气候特征之间的联系 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 525–534.
 Wu Weijie, He Jinhai, Chung H S, et al. 2006. The relationship between the East Asian up-tropospheric jet stream in summer and climatic characteristics of synoptic-scale disturbance [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (4): 525–534, doi:10.3878/j.issn. 1006-9585.2006.04.09.
- 宣守丽. 2011. 东亚高空西风急流多时间尺度变化机理及其对我国夏季 降水的影响 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 109pp. Xuan Shouli. 2011. Multi-time scale variation of the East Asia westerly

jet and its influence on summer rainfall in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 109pp.

- 宣守丽, 张庆云, 孙淑清. 2011. 夏季东亚高空急流月际变化与淮河流 域降水异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 231–242. Xuan S L, Zhang Q Y, Sun S Q. 2011. Relationship between the monthly variation of the East Asia westerly jet and the Huaihe River valley rainfall anomaly in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 231–242, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.02.12.
- Xuan S L, Zhang Q Y, Sun S Q. 2011. Anomalous midsummer rainfall in Yangtze River–Huaihe River valleys and its association with the East Asia westerly jet [J]. Adv. Atmos. Sci., 28 (2): 387–397, doi:10.1007/ s00376-010-0111-3.
- 宣守丽, 张庆云, 孙淑清, 等. 2013. 夏季逐月东亚高空急流异常对我国 降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 18 (6): 781-792. Xuan Shouli, Zhang Qingyun, Sun Shuqing, et al. 2013. Influence of the monthly variation of the East Asia westerly jet on summer rainfall in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (6): 781-792, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12193.
- 杨莲梅, 张庆云. 2007. 夏季东亚西风急流 Rossby 波扰动异常与中国降 水 [J]. 大气科学, 31 (4): 586–595. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007. Anomalous perturbation kinetic energy of Rossby wave along East Asian westerly jet and its association with summer rainfall in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 586–595, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.04.04.
- 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 Lianmei, Zhang Qingyun. 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.
- Yang S, Lau K M, Kim K M. 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian–Pacific–American winter climate anomalies [J]. J. Climate, 15 (3): 306–325, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0306:VOTEAJ>2.0.CO; 2.
- Yang S, Webster P J. 1990. The effect of summer tropical heating on the location and intensity of the extratropical westerly jet streams [J]. J. Geophys. Res., 95 (D11): 18705–18721, doi:10.1029/JD095iD11p18705.
- 张家诚. 1980. 经向海陆分布对大气环流的热力作用 [J]. 气象学报, 38 (3): 219–226. Zhang Jiacheng. 1980. The thermal effect of meridional sea–land distribution on the general atmospheric circulation in Eurasia and its contiguous areas [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 38 (3): 219–226, doi:10.11676/qxxb1980.026.
- 张庆云,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 Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Influence of Asian mid–high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (2): 199–211, doi:10.11676/qxxb1998.019.
- 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.