

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12310. Lu Riyu, Lin Zhongda, Zhang Yaocun. 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.

夏季东亚高空急流的变化及其对东亚季风的影响

陆日宇¹ 林中达¹ 张耀存²

¹ 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

² 南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 东亚高空急流是东亚夏季风系统的一个重要组成部分, 对东亚地区的天气和气候有着重要影响。近十年来, 对东亚高空的变异规律及其相关机理、急流对东亚气候的影响等方面做了大量的观测资料分析和数值模拟研究。本文从夏季东亚高空急流的变化特征及其与东亚气候的关联、东亚高空急流的变异机理以及当前的气候模式对东亚高空急流的模拟能力评估和未来预估等几个方面, 对这些研究结果进行了综述。

关键词 夏季东亚高空急流 东亚气候 数值模拟 未来预估

文章编号 1006-9895(2013)02-0331-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12310

Variability of the East Asian Upper-Tropospheric Jet in Summer and Its Impacts on the East Asian Monsoon

LU Riyu¹, LIN Zhongda¹, and ZHANG Yaocun²

¹ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The East Asian upper-tropospheric jet is an important component of the East Asian summer monsoon and severely affects weather and climate in East Asia. During the past decade, various observational and numerical studies were conducted on variability in this jet and its effects on the East Asian climate. This paper reviews these studies mainly from the aspects of the features of the East Asian upper-tropospheric jet variability, the relationship between the jet and the East Asian climate, the possible mechanisms for jet variability, the evaluation of current climate models' ability in simulating the jet, and projections of future changes in the jet.

Keywords East Asian summer upper-tropospheric jet, East Asian climate, Numerical simulation, Projection

1 引言

在南、北半球中纬度地区均存在西风急流, 表现为强的垂直和侧向风切变, 并且在对流层顶风速达到最大值, 而在水平方向上存在一个或者多个风速的最大值中心。西风急流纬向特征尺度为数千公

里, 经向特征尺度为数百公里, 而垂直特征尺度为数公里。中纬度高空急流对维持全球大气角动量、能量的输送和平衡起到非常重要的作用。

东亚夏季高空西风急流是东亚夏季风系统的一个重要组成部分(陶诗言和卫捷, 2006; Huang et al., 2012)。从地理分布上来看, 夏季东亚高空西风

收稿日期 2012-10-10, 2012-11-03 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金—云南联合基金重点项目 U0933603, 全球变化研究国家重大科学研究计划项目 2010CB950403, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421405, 国家自然科学基金项目 41130963、40905025

作者简介 陆日宇, 男, 1967 年出生, 研究员, 主要从事东亚季风和气候动力学研究。E-mail: lr@mail.iap.ac.cn

急流轴的纬度位于 40°N 左右, 从我国的西北地区一直向东越过我国华北地区、朝鲜半岛以及日本中、北部地区。东亚夏季高空急流是影响东亚和我国天气气候的重要环流系统, 其显著的季节变化特征(北进和南退)是东亚大气环流季节转换的标志, 与东亚季风的爆发以及东亚副热带地区雨带的移动具有密切的关系(Murakami, 1951; Suda and Asakura, 1955; 陶诗言和陈隆勋, 1957)。因此, 东亚夏季高空急流很早就受到广泛的关注, 例如, 早在 20 世纪 50 年代, 叶笃正等(1958)通过分析若干年份的高空观测数据, 指出副热带急流存在明显的季节性突跳特征。在冬到夏的季节转换过程中, 亚洲西风急流在 6 月从青藏高原南侧北跳到高原以北, 高原南侧的南支西风急流消失。类似地, 10 月高空西风急流轴从青藏高原以北南移到高原的南侧。

针对夏季东亚高空急流, 近年来出现了许多研究, 本文的目的是对这些研究进展进行综述。

2 夏季东亚副热带急流的变化特征及其对东亚气候的影响

2.1 季节演变

近年来对东亚高空急流的季节变化特征有了进一步的认识, 认识到东亚高空急流除了冬夏季节转换过程中表现出的两次突变之外, 还存在其他一些明显的季节演变特征。

在叶笃正等(1958)工作的基础上, 李崇银等(2004)对东亚高空急流在初夏的季节演变特征进行了深入研究, 指出在从冬到夏的季节转换过程中, 西风急流事实上存在两次明显的北跳过程。第一次北跳开始于 5 月 8 日左右, 由 $25^{\circ}\text{N}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 北跳到 30°N 以北, 它是中高纬度大气环流系统减弱北退的表现, 为热带环流系统的向北推进提供了条件; 第二次北跳平均发生在 6 月 7 日左右, 由 32°N 左右北跳到 35°N 以北, 是梅雨开始的前期征兆。进一步的研究发现, 东亚高空西风急流的这两次北跳和亚洲大陆南部对流层中上层经向温度梯度的两次逆转有关。

Kuang and Zhang (2005) 详细分析了东亚副热带高空西风急流的季节演变过程, 指出急流轴在冬季稳定少变, 而从春到夏发生季节性的北移, 但这种北移在东亚不同的经度表现出不同的特征。在春季, 北移更明显地出现在欧亚大陆的中西部地区,

而在夏季则更主要地出现在东北亚地区。与上述的北移不同, 急流轴在秋季的南移却没有明显的经度差异。进一步的分析还发现, 东亚高空急流的季节变化与对流层中、上层温度的经向梯度相对应, 而对流层中、上层的温度变化在夏季和青藏高原地区的感热加热密切相关, 冬季则主要与日本南部黑潮暖流区域的感热加热有关。

除了上述的季节性移动, 急流轴在盛夏期间也存在显著的变动。Lin and Lu (2008) 指出东亚高空急流在 7 月 20 日左右存在一次明显的北跳过程。在这次北跳过程中, 急流中心由 40°N 北跳到 45°N 以北地区, 对应日本梅雨的结束。与之前的急流轴北移主要出现在东亚大陆上空不同, 7 月中下旬的这次北跳主要发生在东亚沿海地区。Lin (2010) 进一步分析指出, 东亚高空西风急流盛夏季节的突然北跳具有两类不同的北跳方式: 一类为急流北侧的西风增强所致, 另一类则由急流中心强度的减弱引起。在第一类急流北跳过程中, 高纬地区形成的低压槽和南亚高压向东亚地区的伸展引起西风增强, 从而导致东亚高空急流的北跳; 而第二类北跳则主要受到沿着亚洲副热带西风急流传播的波活动的影响。此外, 董丽娜等(2010)指出急流轴在东亚地区($110^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$)北移至 37.5°N 以北的时间和我国梅雨的结束相对应。

除了存在明显的北跳过程以外, 夏季东亚高空急流的中心也存在显著的西退过程。Zhang et al. (2006) 通过分析多年平均的纬向风场, 发现东亚高空急流风速最大中心在 6 月底到 7 月中旬具有东西方向位置的突变特征, 突出表现为急流中心在 $37\sim 39^{\circ}\text{N}$ 候很短的时间内从 140°E 附近快速移到 90°E 附近的青藏高原上空, 此后, 在盛夏(7、8 月)的季节急流中心主要出现在青藏高原和伊朗高原上空, 形成西风急流在盛夏期间的两个基本型态, 即青藏高原急流型态和伊朗高原型态。青藏高原地区的加热作用和梅雨的潜热释放引起高原北侧温度梯度增强, 导致 6、7 月急流中心位置的西移(Zhang et al., 2006; 况雪源和张耀存, 2006b)。东亚高空急流的中心西移以后, 我国长江流域由急流的入口区转变为急流的出口区, 局地上升气流受到抑制, 长江流域的梅雨期结束(杜银等, 2008)。

高空急流的这种季节演变不仅可以直接影响东亚气候, 而且还可以显著地影响热带大气热力异常对热带外大气环流的强迫作用。Kosaka and

Nakamura (2010a) 利用简单模式进行了理想数值试验, 结果表明, 当西风急流位置偏北、副高向北扩展时, 热带强迫所激发的类似东亚—西北太平洋遥相关型的异常波列也向北伸展, 同时强度加强。Ye and Lu (2011) 给出了上述试验结果的观测依据。他们通过分析观测资料, 发现 7 月中下旬高空急流的北跳对热带大气对流异常影响热带外环流起到十分重要的作用: 相比于北跳前的夏季初期, 高空急流北跳之后, 同样的热带西太平洋大气对流异常能激发出更为强大、更为北扩的副热带西北太平洋气旋/反气旋异常, 进而导致东亚降水异常区域北移。因此, 在讨论热带热力异常对热带外环流的强迫作用时, 应该重视气候态基本气流的季节演变所带来的影响。

2.2 年际变化

基于东亚地区 200 hPa 纬向风的 EOF 分析, Lin and Lu (2005) 指出在夏季, 无论是季节平均还是月平均, 东亚高空西风急流的年际变化均主要表现为急流的经向偏移特征, 次之为强度变化: 经向偏移解释了急流年际变化约一半左右的方差贡献, 而强度变化解释的方差为经向偏移特征的一半。夏季副热带急流的变化主要由经向偏移主导的结论在其他一些研究中也得到了证实(廖清海等, 2004; 杨莲梅和张庆云, 2007, 2008)。

东亚高空急流的经向偏移与东亚气候密切相关。对应于夏季东亚高空急流的南移, 东亚副热带对流活动偏强, 降水增加 (Lau et al., 2000; Lu, 2004)。对我国东部地区而言, 急流中心的南移对应降水异常的三极结构: 江淮流域降水偏多, 而南北两侧的华南和华北地区降水偏少(况雪源和张耀存, 2006; 马音等, 2011)。此外, 急流和降水的关系在夏季的不同时段也表现出不同的特点。Lu (2004) 表明随着气候态急流轴在夏季的北移, 急流的南北偏移所对应的降水异常区域也存在相应的北移, 即 6 月降水异常区域主要出现在日本南部的海上, 而在随后的 7、8 月份北移至江淮、朝鲜半岛和日本。宣守丽等 (2011) 进一步指出盛夏 (7、8 月) 东亚高空急流中心的南移引起淮河流域降水偏多, 而初夏 (6 月) 淮河流域降水的增多则与急流位置偏北有关。沈柏竹等 (2011) 也注意到盛夏我国东北地区降水受到局地高空西风急流南北偏移的影响, 偏北的西风急流对应东北降水偏多。

还有一些研究分析了急流的强度变化对我国

气候产生的可能影响。林中达和陆日宇 (2004) 指出增强的 8 月东亚高空急流是导致我国 2003 年 8 月长江流域降水偏少、并出现持续性高温天气的重要原因。此外, 兰明才和张耀存 (2011) 也注意到我国东北夏季降水偏多的年份, 位于青藏高原北面的高空急流偏强。沈柏竹等 (2011) 表明对应我国东北夏季降水的西风急流中心强度增强主要出现在 5 月和 6 月, 并可能与冷涡活动有关。

2.3 年代际变化

与东亚季风的年代际变化一致, 东亚高空急流也存在类似的年代际变化特征。Yu and Zhou (2007) 分析了东亚季风的三维空间变化特征, 指出 7 月和 8 月东亚急流在 1970 年代末期以后呈现出南移的趋势。除了这种南移的趋势, 东亚急流中心同时也表现出向西移动的趋势 (杜银等, 2009)。南移的趋势和全球变暖引起的副热带西风急流向极地移动的趋势相反 (Fu, 2006; Zhang and Huang, 2011), 主要和东亚地区对流层中上层的异常偏冷有关 (Yu and Zhou, 2007)。这次年代际的转变在降水上主要表现为我国的“南涝北旱”: 我国江淮流域降水增加, 而华北地区持续干旱 (Yu and Zhou, 2007; 孙风华等, 2009; Xuan et al., 2011)。与盛夏相反, 初夏 (6 月) 的东亚急流则呈现出向北偏移的趋势特征 (Yu and Zhou, 2007)。

此外, Kwon et al. (2007) 也发现在 1990 年代中期, 东亚高空西风急流的强度存在年代际减弱。这次东亚急流强度的减弱可能和我国华南地区降水的显著增强有关。增强的华南降水释放的大量潜热激发的向东北方向传播的 Rossby 波列, 在东亚地区形成南北向的气旋和反气旋对, 导致东亚高空急流强度的减弱。此外, 东亚高空急流强度的减弱还导致基本气流向急流异常正压能量转换的减弱, 进而使得东亚高空急流的年际变率强度减弱 (Lu et al., 2011)。

3 东亚高空急流的变异机理

关于急流变异机理研究大致可以归纳为两个方面: (1) 急流变异对应的大尺度环流特征, 特别是一些主要的大气遥相关型对急流变异的影响; (2) 外强迫对急流变异的影响。下面我们将分别从这两个方面对近年来取得的研究成果进行总结和讨论。

3.1 遥相关波列对东亚高空急流变异的影响

(a) 东亚—西北太平洋经向遥相关

Nitta (1987)、黄荣辉和李维京 (1988) 指出热带西北太平洋的对流活动可以激发出北传的 Rossby 波列, 即太平洋—日本波列 (PJ 波列) 或东亚—太平洋波列 (EAP 波列), 导致东亚雨带和热带西北太平洋呈现相反的降水异常。当热带西北太平洋对流活动偏强时, 东亚地区形成近似正压的正位势高度异常, 对应东亚高空急流北移; 反之, 当热带西北太平洋对流活动偏弱时, 高空西风急流向南偏移 (董敏等, 1999)。

东亚高空急流所表现出来的最主要变化特征, 即急流的经向偏移, 除了前述的与东亚夏季雨带的降水异常有关之外, 还与热带西北太平洋的大气对流异常和西太平洋副热带高压的东西偏移有关 (Lu 2004)。这些降水和环流的异常在东西方向上呈同号延伸、而在南北方向上表现为正负相间的分布。这些异常在东西方向上主要位于 $110^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 之间, 在南北方向上则从西太平洋一直向北伸展到东北亚地区, 大气环流异常在整个对流层均有所反映, 因此可以将这些降水和环流异常称之为东亚—西北太平洋经向遥相关。

东亚—西北太平洋经向遥相关的概念大体等同于 PJ 波列或 EAP 波列, 只是更加强调遥相关的三维结构和遥相关各分量之间的相互作用关系。以往的研究认为这些波列或遥相关是由热带大气对流异常所激发的 Rossby 波。这一点可以很好地解释对流层下层的环流异常, 但在对流层的中上层, 却因为热带大气对流处于东风带地区, 因而理论上它所激发的环流异常难以传播到热带外地区。为了解决这一问题, Lu (2004) 利用正压模和斜压模耦合的概念, 通过热带地区基本气流的垂直切变, 给出一个新的机理解释, 并由此解释了经向遥相关在 6 月较弱、而在 7~8 月较强的现象。后来, Lin et al. (2010) 提出 1970 年代末期以后初夏西北太平洋基本气流垂直切变的减弱可能是导致东亚—西北太平洋经向遥相关显著减弱的原因。此外, 还有一些研究认为东亚—西北太平洋经向遥相关可以从基本气流中获得能量, 因而从理论上讲, 遥相关波列即使没有热带大气对流异常也可以出现, 这与该地区独特的气候平均气流有关 (Kosaka and Nakamura, 2006, 2010a)。事实上, 除了东亚—西北太平洋之外, 其他一些地区也具有类似的基本气流结构, 如中北美洲以及南半球夏季的西南印度洋、中南太平洋、西南大西洋, 这些地区也存在类

似的波列, 而且波列均从基本气流中获取能量 (Kosaka and Nakamura, 2010b)。

经向遥相关波列不仅从基本气流中获取能量, 湿过程或降水异常在其维持过程中也起着重要的作用。Lu and Lin (2009) 通过观测和再分析资料的诊断, 特别是通过简单线性斜压模式试验, 提出除了热带西北太平洋对流活动影响以外, 东亚副热带降水异常对经向遥相关的维持有着重要的作用。以往的研究往往将东亚副热带降水异常当作环流异常影响的结果, 从而忽视了东亚降水异常对环流的反馈作用。事实上, 夏季梅雨雨带的降水量和热带地区的降水量相当, 也是一个巨大的热源, 而且具有显著的季内和年际变化特征, 因此, 梅雨雨带完全可以对急流的变异产生明显的影响。Kosaka and Nakamura (2006, 2010a)、Hirota and Takahashi (2012) 也根据简单模式的实验结果, 推测降水异常在经向遥相关的维持中起着重要的作用。

除了上述的基本气流提供能量以及降水异常的环流响应之外, 瞬变扰动的强迫作用也可能对急流南北偏移异常的维持具有重要作用。Xiang and Yang (2012) 指出瞬变强迫的动力作用有助于急流南北偏移异常的维持, 而瞬变强迫的热力作用则不利于急流异常的维持。由于动力作用比热力作用更为明显, 所以瞬变强迫的总体作用是有助于急流异常的维持。Ren and Zhang (2008) 通过研究北太平洋冬季天气尺度瞬变涡旋活动的异常特征及其与冬季大气环流异常之间的联系, 揭示出冬季海洋加热异常强迫和天气尺度瞬变异常强迫共同作用导致北太平洋以急流为代表的大气环流异常形成过程和途径, 从瞬变动力学角度揭示出东亚上空瞬变活动异常对北太平洋气候异常的“种子”作用, 并从季节变化角度揭示了东亚大陆上空瞬变活动春季最强与北太平洋瞬变活动冬季抑制现象的联系 (Ren et al., 2010; Ren et al., 2011)。

(b) 沿高空急流东传的纬向遥相关

东亚高空急流位于欧亚大陆上空西风急流的下游, 因此东亚高空急流的变异还受到上游地区沿着亚洲西风急流传播扰动的影响。理论分析提出西风急流的波导效应可以将上游的波活动传播到下游地区 (Hoskins and Ambrizzi, 1993), 而在夏季亚洲西风急流中可能存在沿着西风急流传播的波列 (Ambrizzi et al., 1995)。Lu et al. (2002) 分析了夏季对流层上层的经向风场, 发现沿北非到东亚的西

风急流存在一个明显的遥相关型。由于夏季亚洲高空西风急流所在的纬度大约为 40°N , 恰巧为古代“丝绸之路”所在的纬度, 因此, Enomoto et al. (2003) 将该遥相关型定义为“丝绸之路”型遥相关。该遥相关在东亚地区对应着东亚高空西风急流的经向偏移 (Lu et al., 2002)。

Ding and Wang (2005) 总结了前期的工作, 提出“丝绸之路”遥相关是夏季沿北半球高空西风急流传播的环球遥相关的一部分, 主要受到印度降水热源强迫和北大西洋扰动的共同作用。印度降水增强导致在其西北侧对流层高层形成正的位势高度异常, 进而激发出沿亚洲西风急流向下游传播的波动, 在东亚地区表现为正的位势高度异常, 对应东亚高空急流北移。Yasui and Watanabe (2010) 数值试验的结果还指出热带非洲和北美的热源异常也能有效激发出沿亚洲和北大西洋西风急流传播的 Rossby 波列。

值得注意的是, 东亚—西北太平洋经向遥相关型和沿高空急流东传的纬向遥相关型既彼此独立, 又相互影响。Wakabayashi and Kawamura (2004) 分析了影响日本夏季气温的遥相关型, 指出东亚—西北太平洋经向遥相关型和沿高空急流东传的纬向遥相关型是影响日本气候异常的主要遥相关型。Ogasawara and Kawamura (2007) 进一步指出这两类遥相关型可共同作用, 显著加强对日本气温的影响程度。此外, Hsu and Lin (2007) 发现在东亚降水异常为正三极子结构, 即江淮流域降水偏多而我国华南和华北降水偏少时, 经向遥相关显著; 而当东亚降水异常为负三极子结构时, 纬向遥相关型加强。Bueh et al. (2008) 分析了梅雨期 EAP 事件的演变特征, 指出在欧亚大陆中高纬及亚洲急流区向下游频散的 Rossby 波和东亚沿岸经向频散的波列具有相互作用、相互锁定的特征。这两类遥相关既相互作用、又彼此独立的变化特征也是导致东亚天气和气候多变, 预测困难的重要原因之一 (Kosaka et al., 2012), 因而值得我们进一步地深入研究。

3.2 热带海温的影响

许多研究指出西北太平洋对流活动可以受到中东太平洋海温 (Zhang et al., 1996; Wang et al., 2000; Lin and Lu, 2009) 和同期印度洋海温 (Xie et al., 2009) 的显著影响。因而, 热带海温异常可能通过影响西北太平洋对流活动, 进而影响经向遥相关和东亚高空急流变异。

廖清海等 (2004) 指出夏季急流的南北偏移和同期赤道中东太平洋海温异常具有一定的关联。之后, 陆日宇 (2005) 在分析华北 7、8 月降水的年际变化时, 也发现对流层高层西风急流的南北移动和同期热带中东太平洋海温异常有联系, 提出热带海温异常可能通过影响急流的南北偏移进而影响华北降水。此外, Lin and Lu (2009) 也注意到前冬厄尔尼诺事件对 6 月亚洲高空西风急流的南北偏移有显著影响。Lin (2010) 进一步研究了夏季各月东亚高空急流南北偏移和热带海温异常之间的关系, 指出 6 月东亚高空急流的南北偏移主要和前冬中东太平洋的海温异常显著相关, 而 7、8 月则主要和同期热带东太平洋的海温异常联系密切。前者主要通过热带正海温异常对热带对流层大气的增暖, 从冬季持续维持到初夏, 导致副热带地区经向温度梯度增加, 因而东亚高空急流南侧的西风增强, 引起急流南移。后者 (7、8 月) 主要通过两个途径: 首先, 通过热带东太平洋热源强迫的 Rossby 波西传, 并与中纬度西风相互作用, 导致东亚高空急流的南北偏移; 其次, 热带东太平洋海温异常影响西北太平洋对流活动, 进而激发经向的波列, 从而影响东亚高空急流。

除了热带太平洋海温以外, 印度洋海温也对东亚高空急流有影响。Qu and Huang (2012) 提出同期热带印度洋海温异常可以影响东亚高空急流的南北偏移。当热带印度洋海温偏高时, 激发出的东传 Kelvin 波引起西北太平洋地区降水减少, 进而激发出东亚—西北太平洋遥相关并在东亚地区对流层高层形成气旋性异常, 使得东亚高空急流南移; 反之, 当热带印度洋海温偏冷时, 东亚高空急流北移。况雪源和张耀存 (2006b) 也指出夏季东亚高空急流的经向偏移和阿拉伯海、印度半岛北部的表面感热加热显著相关。

然而, 东亚—西北太平洋经向遥相关在本质上属于大气内部过程, 因此, 尽管海温对经向遥相关以及东亚高空急流存在一定的影响, 但这种影响是次要的。Lu et al. (2006) 分析了东亚高空西风年际变化主要模态的可预报性问题, 结果表明不论是急流的经向偏移还是急流的强度变化均主要受到大气内部过程的影响, 受海温的影响较小。

与经向遥相关相比, 海温对纬向遥相关的影响目前得到的关注很少。最近, Yasui and Watanabe (2010) 分析了 200 hPa 经向风的可预报性, 发现

经向风在欧亚大陆沿 40°N 具有较高的可预报性, 认为这可能和热带热源强迫引起的北半球遥相关有关。

4 副热带西风急流的数值模拟评估与未来变化预估

4.1 模式模拟评估

这里, 我们大致分成大气环流模式和耦合气候系统模式分别进行讨论。首先, 在大气环流模式方面, Guo et al. (2008) 分析了格点大气环流模式 GAMIL 和谱模式 SAMIL 对东亚高空急流的模拟能力, 指出两个版本的模式均能较好模拟出急流的垂直和水平结构, 但模式低估了冬季和夏季的急流强度, 这主要和表面感热和潜热模拟不合理所导致的对流层经向温度梯度偏差有关。由于急流的位置和降水区域关系密切, 急流模拟的偏差还可能导致模式模拟的降水分布和雨带季节推进与实际观测不一致(张耀存和郭兰丽, 2005)。Huang and Liu (2011) 也指出大气环流模式(GFDL AGCM)模拟的急流强度偏弱, 并且在夏季其中心位置偏北, 但能较好地抓住夏季东亚高空急流的年际变异特征, 急流的经向偏移表现为最主要的模式。

在气候系统模式方面, 张耀存和况雪源(2006)评估了一个气候系统模式(FGCM0)模拟的东亚高空急流的变化情况, 指出模拟的急流垂直结构、水平结构和季节变化与再分析资料基本一致, 但模拟的急流在高原附近偏强, 未能较好地模拟出急流在 5 月的北移以及 8 月位置最北的特征。他们认为这与模拟的高原地面加热存在偏差有直接的联系。

蔡琼琼等(2011)分析了耦合模式 FGOALS_gl 模拟的东亚高空急流, 结果表明 FGOALS_gl 能较好地模拟出东亚高空急流的空间分布以及季节演变, 但模拟的急流强度偏弱, 中心偏南。蔡琼琼等(2011)还指出 FGOALS_gl 能合理再现东亚夏季高空急流位置南北移动的年际变化特征, 只是模拟的急流年际变率偏强, 这主要和该模式模拟的 ENSO 偏差有关。由于模拟的 ENSO 位相锁定在夏季, 导致夸大了 ENSO 对急流的影响并引起东亚高空急流年际变率偏强。此外, 比较耦合模式和对应有大气环流模式对急流的模拟能力, 可以有助于我们大致判断海气耦合过程对急流的影响。陈昊明等(2009)指出耦合气候系统模式(FGOALS_s)和其大气分量模式(SAMIL)对东亚高空急流强度的

模拟均偏弱, 但海气耦合模式模拟得明显更弱, 这是由于海气耦合之后, 引起热带温度偏低, 导致经向温度梯度减弱所致(王在志等, 2007)。

Zhang et al. (2008) 比较了高分辨率版本耦合气候模式(MIROC_hires)和中等分辨率版本模式(MIROC_Medres)对东亚高空急流的模拟能力, 指出模式分辨率的增加可以改进模式对急流的结构、季节演变以及年际变率的模拟能力。Wang et al. (2012) 分析了 22 个海气耦合模式的模拟结果, 指出模式对亚洲高空急流的模拟偏差导致了对中国中东部地区的气温模拟出现冷偏差。

4.2 未来变化预估

张耀存和郭兰丽(2010)利用多个耦合模式在中等强度温室气体排放情景试验(SRES A1B)的输出结果, 通过多模式集合的方法分析了全球变暖背景下东亚急流的变化特征, 发现在多模式集合平均结果中, 随着温室气体含量增加, 冬季急流强度增强, 急流位置向北移动; 夏季急流强度也呈现出增强的趋势, 位置却向南移动, 其中冬、夏季急流强度增强均和北半球增温在低纬较强、在高纬较弱引起的副热带地区温度梯度增加有关。在冬季对流层中上层温度增加引起的经向梯度出现在急流轴以北, 而在夏季位于急流轴以南, 因而西风急流呈现冬季向北偏移、夏季向南偏移的趋势。

除了气候基本态发生改变以外, 夏季东亚高空急流的年际变率在未来增暖情景下也表现出明显的变化。Lu and Fu (2010) 利用部分 CMIP3 模式模拟结果, 预估了在温室气体排放情景试验 A1B 和 A2 下东亚急流年际变率的变化, 指出在两类情景下, 21 世纪东亚高空急流年际变率的强度均将显著增强。这一结果得到了 CMIP5 模式结果的证实, 而且 CMIP5 模式模拟结果表明 21 世纪在全球变暖情景下东亚高空急流的南北偏移与东亚降水之间的联系将有可能进一步增强(戴翼和陆日宇, 2012)。

5 总结

本文对近年来夏季东亚高空急流的变化特征及其与东亚气候的关联、东亚高空急流的变异机理进行了综述。这些研究结果使我们加深了对东亚高空急流的变化、机理、模拟等方面的认识, 其中一些主要结果可以大体概括如下:

(1) 夏季, 东亚高空急流的季节演变具有显著的突变特征, 在夏季的季节演变过程中出现四次北

跳过程和一次西退过程。初夏的 5 月初和 6 月初各存在一个北跳过程, 分别早于南海夏季风爆发和我国江淮梅雨的建立; 而在 7 月初和 7 月中下旬还存在两次北跳过程, 分别对应我国江淮和日本梅雨的结束。此外, 在 6 月底到 7 月中旬东亚高空西风急流中心从西北太平洋西撤到青藏高原以北。

(2) 在年际时间尺度上, 夏季东亚高空急流主要呈现出急流轴经向偏移和急流强度变化这两种特征, 其中急流经向偏移主要受到东亚—西北太平洋经向遥相关和沿着亚洲西风急流传播的纬向遥相关的影响。虽然急流的经向偏移和热带海温有一定的关联, 但急流经向偏移和强度变化主要来源于大气内部过程。

(3) 当前气候模式基本上能描述出东亚高空急流的季节变化特征和空间结构, 但模拟的东亚高空急流强度普遍偏弱, 而且急流的模拟结果在各模式之间存在着较大的差异, 导致这些差异的原因比较复杂。

(4) 近 50 年以来, 夏季东亚高空急流呈现出向南移动的趋势, 并且强度增强。但是, 在 1990 年代中期以后, 急流的强度呈现减弱的趋势。未来预估结果表明夏季东亚高空急流可能呈现出增强、南移的趋势, 同时急流年际变率可能增强, 和东亚降水的关系也有可能进一步增强。

需要指出的是, 虽然目前我们对东亚高空急流有了一些新的认识, 但是在许多方面仍需要进一步的深入研究。

(1) 东亚高空急流的变化具有多种时间尺度, 从天气尺度、季内振荡、季节演变、年际变化, 一直到年代际尺度上, 东亚高空急流的变化特征都很明显。然而, 东亚高空急流的多种时间尺度变化之间的联系目前还很不清楚。

(2) 东亚—西北太平洋经向遥相关型和沿高空急流东传的纬向遥相关型之间的相互关系如何? 这种相互关系会对东亚的天气和气候产生什么样的影响? 由于中纬度还有其他遥相关型, 使得这些问题变得更加复杂。

(3) 目前, 我们对热带大气热源异常如何影响东亚高空急流有了一些认识, 但是, 反过来, 东亚高空急流的变化会不会影响到热带大气的环流和对流? 我们对这一问题所知甚少。

(4) 如何提高对东亚高空急流变化的模拟能力? 由于东亚高空急流的变化具有多种时间尺度

和多种表现形式, 我们应抓住其中关键的变化特征, 集中评估、改进模式对这些变化特征的模拟能力。

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: 3661–3672.
- 布和朝鲁, 施宁, 纪立人, 等. 2008. 梅雨期 EAP 事件的中期演变特征与中高纬 Rossby 波活动 [J]. *科学通报*, 2008, 53: 111–121.
- Bueh Cholaw, Shi Ning, Ji Liren, 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.
- 蔡琼琼, 周天军, 吴波, 等. 2011. 东亚副热带西风急流及其年际变率的海气耦合模式模拟 [J]. *海洋学报*, 33 (4): 38–48.
- Cai Qiongqiong, Zhou Tianjun, Wu Bo, et al. 2011. The East Asian subtropical westerly jet and its interannual variability simulated by a climate system model FGOALS_g1 [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 33 (4): 38–48.
- 陈昊明, 周天军, 宇如聪, 等. 2009. 耦合模式 FGOALS_s 模拟的东亚夏季风 [J]. *大气科学*, 33 (1): 155–167.
- Chen Haoming, Zhou Tianjun, Yu Rucong, et al. 2009. The East Asian summer monsoon simulated by coupled model FGOALS_s [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 33 (1): 155–167.
- 戴翼, 陆日宇. 2013. 东亚夏季降水和高空急流关系的未来变化预估 [J]. *科学通报*, 定稿待刊.
- Dai Yi, Lu Riyu. 2013. Projected change in the relationship between East Asian summer rainfall and upper-tropospheric westerly jet [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, in press.
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer [J]. *J. Climate*, 18: 3483–3505.
- 董丽娜, 郭品文, 张福颖. 2010. 初夏至盛夏东亚副热带西风急流变化与江淮出梅的关系 [J]. *大气科学学报*, 33: 74–81.
- Dong Li'na, Guo Pinwen, Zhang Fuying. 2010. Relationship between variations of East Asian subtropical westerly jet from early summer to mid summer and withdrawal of Mei-yu from Jianghuai region [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33: 74–81.
- 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: 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 23: 62–70.
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2008. 高空西风急流东西向形态变化对梅雨期降水空间分布的影响 [J]. *气象学报*, 2008, 66 (4): 566–576.
- Du Yin, Zhang Yaocun, Xie Zhiqing. 2009. Impacts of the zonal position of the East Asian westerly jet core on precipitation distribution during Meiyu of China [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 23 (4): 506–516.
- 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: 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 33: 581–592.
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129: 157–178.
- Fu Q, Johanson C M, Wallace J M, et al. 2006. Enhanced mid-latitude tropospheric warming in satellite measurements [J]. *Science*, 312: 1179, doi: 10.1126/science.1125566.
- Guo Lanli, Zhang Yaocun, Wang Bin, et al. 2008. Simulations of the East Asian subtropical westerly jet by LASG/IAP AGCMs [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25: 447–457.
- Hirota N, Takahashi M. 2012. A tripolar pattern as an internal mode of the East Asian summer monsoon [J]. *Climate Dynamics*, 39 (9–10): 2219–2238, doi 10.1007/s00382–012-1416-y.
- Hoskins B J, Ambrizzi T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50: 1661–1671.
- Hsu H H, Lin S M. 2007. Asymmetry of the tripole rainfall pattern during the East Asian summer [J]. *J. Climate*, 20: 4443–4458.
- Huang G, Liu Y. 2011. Simulation of the East Asian subtropical westerly jet stream with GFDL AGCM (AM2. 1) [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4: 24–29.
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常及对东亚上空副热带高压的响应及其物理机制 [J]. *大气科学*, 12 (特刊): 107–116.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 12 (Special Issue): 107–116.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Wang Lin, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29: 910–942.
- Kosaka Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan (PJ) teleconnection pattern [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132: 2009–2030.
- Kosaka Y, Nakamura H. 2010a. Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: The Pacific-Japan pattern [J]. *J. Climate*, 23: 5085–5108.
- Kosaka Y, Hisashi N. 2010b. Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part II: A global survey [J]. *J. Climate*, 23: 5109–5125, doi: http://dx. doi. org/10.1175/2010JCLI3414.1.
- Kosaka Y, Chowdary J S, Xie Shangping, et al. 2012. Limitations of seasonal predictability for summer climate over East Asia and the Northwestern Pacific [J]. *J. Climate*, 25: 7574–7589, doi: http://dx. doi. org/10.1175/JCLI-D-12-00009.1.
- Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 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.
- 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: 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: 382–289.
- 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. Seasonal variations of the East Asian subtropical westerly jet and the thermal mechanism [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64(5): 564–575.
- Kwon M, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L21706, doi:10.1029/2007GL031977.
- 兰明才, 张耀存. 2011. 东亚副热带急流与东北夏季降水异常的关系 [J]. *气象科学*, 31: 258–265.
- Lan Mingcai, Zhang Yaocun. 2011. Relationship between the East Asian subtropical westerly jet and summer rainfall anomaly in Northeast China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 31: 258–265.
- 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: 2461–2482.
- 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: 641–658.
- Li Chongyin, Wang Joutai, Lin Shizhei, et al. 2004. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 28: 641–658.
- 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: 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 J. Geophys.* (in Chinese), 47: 10–18.
- 林中达, 陆日宇. 2004. 2003 年夏季我国气候异常的背景和环流分析 [M] // 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 中国天气气候异常成因研究—2003 年. 北京: 气象出版社, 113–138.
- Lin Zhongda, Lu Riyu. 2004. Background circulation analysis on summer climate anomaly of China in 2003 [M] // Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. Mechanisms of Weather and Climate Anomalies of China in 2003 (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 113–138.
- Lin Zhongda, Lu Riyu. 2005. Interannual meridional displacement of the East Asian upper-tropospheric jet stream in summer [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22: 199–211.
- Lin Z D, Lu R Y. 2008. Abrupt northward jump of the East Asian upper-tropospheric jet stream in mid-summer [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86: 857–866.
- Lin Zhongda, Lu Riyu. 2009. The ENSO's effect on eastern China rainfall in the following early summer [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26: 333–342.
- Lin Zhongda. 2010. Relationship between meridional displacement of the monthly East Asian jet stream in the summer and sea surface temperature in the tropical central and eastern Pacific [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 3: 40–44.
- Lin Zhongda, Lu Riyu, Zhou Wen. 2010. Change in early-summer meridional teleconnection over the western North Pacific and East Asia around the late 1970s [J]. *Int. J. Climatol.*, 30: 2195–2204.
- 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*, 54A: 44–55.
- 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: 155–165.
- 陆日宇. 2005. 华北汛期降水量年际变化与赤道东太平洋海温 [J]. *科学通报*, 50: 1131–1135. Lu Riyu. 2005. Interannual variation of North China rainfall in rainy season and SSTs in the equatorial eastern Pacific [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2069–2073.
- Lu R Y, Li Y, Dong B W. 2006. External and internal summer atmospheric variability in the western North Pacific and East Asia [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84: 447–462.
- Lu Riyu, Lin Zhongda. 2009. Role of subtropical precipitation anomalies in maintaining the summertime meridional teleconnection over the western North Pacific and East Asia [J]. *J. Climate*, 22: 2058–2072.
- Lu Riyu, Fu Yuanhai. 2010. Intensification of East Asian summer rainfall interannual variability in the twenty-first century simulated by 12 CMIP3 coupled models [J]. *J. Climate*, 23: 3316–3331.
- Lu R Y, Ye H, Jhun J G. 2011. Weakening of interannual variability in the summer East Asian upper-tropospheric westerly jet since the mid-1990s [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (6): 1246–1258, doi:10.1007/s00376-011-0222-5.
- 马音, 陈文, 王林. 2011. 中国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景及其比较 [J]. *气象学报*, 69: 334–343. Ma Yin, Chen Wen, Wang Lin. 2011. A comparative study of the interannual variation of summer rainfall anomalies between the Huaihe Meiyu season and the Jiangnan Meiyu season and their climate background [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69: 334–343.
- Murakami T. 1951. On the study of the change of the upper westerlies in the last stage of Baiu season (rainy season in Japan) [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 29: 162–175.
- 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: 373–390.
- Ogasawara T, Kawamura R. 2007. Combined effects of teleconnection patterns on anomalous summer weather in Japan [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85: 11–24.
- Qu Xia, Huang Gang. 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.
- Ren Xuejuan, Zhang Yaocun, Xiang Yang. 2008. Connections between wintertime jet stream variability, oceanic surface heating, and transient eddy activity in the North Pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D21119, doi:10.1029/2007JD009464.
- Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Chu Cuijiao. 2010. Seasonal variations of the synoptic-scale transient eddy activity and polar-front jet over East Asia [J]. *J. Climate*, 23 (12): 3222–3233, doi:10.1175/2009JCLI3225. 1.
- Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Zhou Tianjun, et al. 2011. Diagnostic comparison of wintertime East Asian subtropical jet and polar-front jet: Large-scale characteristics and transient eddy activities [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 25 (1): 21–33, doi: 10.1007/s13351-011-0002-2.
- 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*, 41: 402–412. Shen Baizhu, Lin Zhongda, Lu Riyu, 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.
- Suda K, Asakura T. 1955. A study on the unusual “Baiu” season in 1954 by means of Northern Hemisphere upper air mean charts [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 33: 233–244.
- 孙风华, 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际异常的关系 [J]. *高原气象*, 28: 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: 1308–1315.
- 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: 234–247. Tao Shiyan, Chen Longxun. 1957. Atmospheric circulation structure over the Asian continent in summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28: 234–246.
- 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: 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: 513–525.
- 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: 1577–1588.
- Wang Bin, Wu Renguang, Fu Xiouhua. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13: 1517–1536.
- Wang Xin, Zhou Wen, Wang Donghai, et al. 2013. The impacts of the summer Asian jet stream biases on surface air temperature in mid-eastern China in IPCC AR4 models [J]. *Int. J. Climatol.*, 33 (2): 265–276, doi:10.1002/joc. 3419.
- 王在志, 宇如聪, 包庆, 等. 2007. 大气环流模式 (SAMIL) 海气耦合前后性能的比较 [J]. *大气科学*, 31 (2): 202–213. Wang Zaizhi, Yu Rucong, Bao Qing, et al. 2007. A comparison of the atmospheric circulations simulated by the FGOALS-s and SAMIL [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 31 (2): 202–213.
- Xiang Y, Yang X Q. 2012. The effect of transient eddy on interannual meridional displacement of summer East Asian subtropical jet [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (3): 484–492, doi:10.1007/s00376-011-1113-5.
- Xie Shangping, Hu Kaiming, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 730–747.
- 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: 231–242. Xuan Shouli, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 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: 231–242.
- Xuan Shouli, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2011. Anomalous midsummer rainfall in Yangtze River-Huaihe River valleys and its association with the East Asia westerly jet [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28: 387–397.
- 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: 452–459. Yang Lianmei, Zhang Qingyun.

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: 452–459.
- 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: 10–20. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2008. Climate features of summer Asia subtropical westerly jet stream [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13: 10–20.
- Yasui S, Watanabe M. 2010. Forcing processes of the summertime circumglobal teleconnection pattern in a dry AGCM [J]. *J. Climate*, 23: 2093–2114.
- 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: 249–263. Ye Duzheng, Tao Shiyan, Li Maicun. 1958. The abrupt change of atmospheric circulation over the Northern Hemisphere during June and October [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 29: 249–263.
- Ye H, Lu R Y. 2011. Subseasonal variation in ENSO-related East Asian rainfall anomalies during summer and its role in weakening the relationship between the ENSO and summer rainfall in eastern China since the late 1970s [J]. *J. Climate*, 24: 2271–2284, doi:10.1175/2010JCLI3747. 1.
- Yu R C, Zhou T J. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of the interdecadal change in East Asian monsoon [J]. *J. Climate*, 20: 5344–5355.
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74: 49–62.
- 张耀存, 郭兰丽. 2005. 东亚副热带西风急流偏差与中国东部雨带季节变化的模拟 [J]. *科学通报*, 50 (13): 1394–1399. Zhang Yaocun, Guo Lanli. 2005. Relationship between the simulated East Asian westerly jet biases and seasonal evolution of rainbelt over eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50 (14): 1503–1508.
- Zhang Yaocun, Kuang Xueyuan, Guo Weidong, et al. 2006. Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L11708, doi:10.1029/2006GL026377.
- Zhang Yaocun, Takahashi M, Guo Lanli. 2008. Analysis of the East Asian subtropical westerly jet simulated by CCSR/NIES/FRCGC coupled climate system model [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86 (2): 257–278.
- 张耀存, 况雪源. 2006. 一个气候系统模式 FGCM0 对东亚副热带西风急流季节变化的模拟 [J]. *大气科学*, 30: 1177–1188. Zhang Yaocun, Kuang Xueyuan. 2006. Simulation of seasonal variation of the East Asian subtropical westerly jet in a coupled climate system model FGCM0 [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 30: 1177–1188.
- 张耀存, 郭兰丽. 2010. 东亚副热带西风急流变化多模式模拟结果分析 [J]. *气象科学*, 2010, 30 (5): 694–700. Zhang Yaocun, Guo Lanli. 2010. Multimode 1 ensemble simulated changes in the subtropical westerly jet over East Asia under the global warming condition [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 30 (5): 694–700.
- Zhang Yaocun, Huang Danqing. 2011. Has the East Asian westerly jet experienced a poleward displacement in recent decades? [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (6): 1259–1265.