晏正滨,林朝晖,张贺. 2015. 大气环流模式 IAP AGCM4.0 对东亚高空副热带西风急流的模拟及偏差原因分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 393-410. Yan Zhengbin, Lin Zhaohui, Zhang He. 2015. Evaluation and bias analysis for the performance of IAP AGCM4.0 in simulating the East Asian subtropical westerly jet [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 393-410, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14095.

# 大气环流模式 IAP AGCM4.0 对东亚高空副热带 西风急流的模拟及偏差原因分析

晏正滨<sup>1,2</sup> 林朝晖<sup>1,3</sup> 张贺<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京 100029
 2 中国科学院大学,北京 100049
 3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

摘 要 基于中国科学院大气物理所大气环流模式 IAP AGCM4.0 总共 30 年(1979~2008 年)的 AMIP(大气环 流模式比较计划)数值模拟试验结果,评估了模式对东亚高空副热带西风急流的模拟能力,分析了模式模拟偏差 的可能原因,以及不同对流参数化方案对模拟结果的影响。结果表明, IAPAGCM4.0 可以较好地模拟出东亚高空 副热带西风急流冬季和夏季的空间结构及其季节变化特征; 与 JRA-25 再分析资料相比,模式模拟的急流强度总 体偏弱;就急流位置而言,模式模拟的急流位置冬季略偏南,夏季则相对偏北;模式可以较好地模拟出夏季西风 急流的季节内演变特征,包括夏季西风急流位置逐月北跳的特征,只是模式模拟的逐月西风急流位置仍偏北。夏 季 200 hPa 纬向风 EOF 分解结果表明,模式模拟和再分析资料的 EOF 第一模态空间型态较为接近,均反映了西风 急流的年际变化特征,但两者的时间系数相关较小,表明模式对西风急流南北位置年际变化的模拟偏差较大。针 对模式模拟的地表感热通量及对流层中上层经向温度差(MTD)的分析结果表明,模式对阿拉伯半岛东南部、阿 拉伯海西北部及印度北部的地表感热通量的模拟存在偏差,影响到对流层中高层温度场、高度场的模拟,使得 IAP AGCM4.0模拟的 MTD 强度较再分析资料相对偏弱, MTD 变化最大的区域位置相对偏北,且模式模拟的 MTD 年 际变化与再分析资料相比也有较大偏差,从而造成模式对西风急流模拟的偏差。此外,不同积云对流参数化方案 也可影响对流层中上层经向温度差的模拟,进而影响模式对东亚高空副热带西风急流的模拟。 关键词 大气环流模式 东亚高空副热带西风急流 经向温度差 感热通量 积云对流参数化方案 文章编号 1006-9585 (2015) 04-0393-18 中图分类号 P461 文献标识码 A

Evaluation and Bias Analysis for the Performance of IAP AGCM4.0 in Simulating the East Asian Subtropical Westerly Jet

YAN Zhengbin<sup>1, 2</sup>, LIN Zhaohui<sup>1, 3</sup>, and ZHANG He<sup>1</sup>

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14095

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2014-05-12; 网络预出版日期 2014-09-25

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110202,科技部国际科技合作与交流专项 2011DFG23450,国家自然科学基金委基金项目 41175073、 U1133603

作者简介 晏正滨,男,1986年出生,博士研究生,主要从事气候模拟及预测研究。E-mail: yanzhb@mail.iap.ac.cn

通讯作者 林朝晖, E-mail: lzh@mail.iap.ac.cn

Abstract The performance of IAP Atmospheric General Circulation Model Version 4 (IAP AGCM4.0) in reproducing the observed features of the East Asian Subtropical Westerly Jet (EASWJ) is examined by analyzing the differences between model simulations and JRA-25 reanalysis data during 1979-2008, the possible reasons for the bias in model performance are analyzed, and the impact of convective parameterization schemes in the model simulations has been further investigated. The results show that the model can reproduce the climatological characteristics of the EASWJ reasonably well, including the spatial structure and the seasonal meridional displacement. However, the model also shows deficiencies in simulating the intensity and location of the EASWJ, with weaker magnitude in both wintertime and summertime, and the model simulated position of the EASWJ is located southward during wintertime and northward during summertime when compared with observations. Analysis of the results demonstrates that IAP AGCM4.0 can capture the seasonal evolution of the EASWJ well, including the northward jump during summer months. Based on Empirical Orthogonal Function (EOF) decomposition of the zonal wind at 200 hPa, both for the observation and model simulation, it is found that IAP AGCM4.0 can reproduce well the spatial structure of the first leading mode from the observation; however, the model fails to capture the interannual variation of the meridional displacement of the EASWJ. Based on the analysis of surface sensible heat fluxes and mid-upper troposphere Meridional Temperature Difference (MTD), it is found that the model's biases in terms of the simulated surface sensible heat fluxes in the southeastern Arabian Peninsula, northwestern Arabian Sea and northern India cause a weaker intensity and northward shift of MTD. The deficiency of IAP AGCM4.0 in reproducing the interannual variation of MTD leads to the biases in the simulation of the EASWJ. Furthermore, different convective parameterization schemes can influence the simulation of MTD, which will in turn directly affect simulation of the EASWJ.

Keywords Atmospheric general circulation model, East Asian subtropical westerly jet, Meridional temperature difference, Sensible heat flux, Convective parameterization scheme

## 1 引言

东亚高空副热带西风急流作为东亚季风系统 的一个重要成员,存在着不同时间尺度的变化,且 对东亚地区的天气、气候有着显著的影响(陶诗言 和卫捷, 2006; Huang et al., 2012; 陆日宇等, 2013)。 早在上世纪 50 年代, 叶笃正等(1958)发现在季 节转换过程中,东亚高空副热带西风急流具有北跳 和南移的突变特征,陶诗言等(1958)指出东亚梅 雨的开始与东亚高空副热带西风急流的第二次北 跳有关。李崇银等(2004)对东亚高空副热带西风 急流的两次北跳过程进行了研究,发现急流的两次 北跳过程分别发生在南海季风爆发前和梅雨开始 前,是东亚地区季节转换的一个重要标志。急流位 置的南北移动是西风急流的一个显著特点,尤其在 夏季的三个月,急流南北位置各不相同,且这种位 置的变化与东亚季风及其降水有着密切的关系 (Xuan et al., 2011)。此外,东亚西风急流位置还存

在年代际尺度的变化特点,已有研究表明 1979 年前夏季东亚西风急流位置相对偏北,1979 年后东亚西风急流位置相对偏南(Zhang and Huang, 2011)。

东亚高空副热带西风急流与东亚季风系统的 不同分量之间存在着密切的关系。刘杰等(2010)

研究表明,东亚高空副热带西风急流与南亚高压两 者的强度呈反相变化,且伊朗高压对应西部急流 型, 青藏高压对应东部急流型。况雪源等(2008) 的研究表明,冬季西风急流强度体现了西太平洋与 高纬大陆的热力对比,是东亚冬季风强弱变化的一 个重要体现。而春季的西风急流可以通过遥相关作 用影响到东亚夏季风的强弱变化(于秀晶和谢今范, 2007)。东亚高空副热带西风急流还直接影响着东 亚夏季风降水的强度和雨带的变化,研究表明,夏 季急流位置偏南(北)时,华中和华南(华北)降 水偏多(Liang and Wang, 1998; Xuan et al., 2011)。 在梅雨期,东亚西风急流主体位于西太平洋(东亚 大陆)上空时,有利于(不利于)长江下游形成强 降水区域 (Du et al., 2009)。已有研究发现, 夏季东 亚高空副热带西风急流位置和形态在 1975~1980 年间出现转折,伴随着西风急流的年代际转折, 1980年后西风急流中心向西、向南偏移,进而造成 1980年后华北地区降水减少,而长江中下游地区降 水增加,形成南涝北旱的降水分布形态(杜银等, 2009; Xuan et al., 2011)。Yang et al. (2002) 分析东 亚高空副热带西风急流与亚洲一太平洋一北美冬 季气候的关系时,甚至指出相对于 ENSO, 东亚西 风急流对亚太地区气候的影响更为显著。

鉴于西风急流对东亚夏季风及其降水的重要

作用,气候系统模式对西风急流的模拟能力及模拟 偏差分析,也已经成为评估及改进模式性能的重要 指标。已有的数值模式评估结果表明,现有气候模 式基本上都能较好地模拟出西风急流的空间分布 及季节变化特征,但模式模拟的急流强度、位置也 都存在一定的偏差,从而直接影响到模式对东亚降 水的模拟(Liang et al., 2001; 张耀存和郭兰丽, 2005; Lu et al., 2006; 张耀存和况雪源, 2008; Zhang et al., 2008; 蔡琼琼等, 2011; Huang and Liu, 2011)。

近年来,中国科学院大气物理研究所发展了第 四代大气环流模式 IAP AGCM4.0 (Institute of Atmospheric Physics, Atmospheric General Circulation Model Version 4)(张贺等,2009,2011),已有的 模式性能初步评估结果表明,该模式对全球观测气 候态的基本特征有较好的模拟能力,其总体模拟性 能与 CAM3.1 (Community Atmosphere Model Version 3.1)模式相当(张贺,2009)。为了对该模 式性能有更深入地认识,本文将系统评估模式对东 亚高空副热带西风急流的模拟能力,包括急流南北 位置的季节内以及年际变化的特征,探讨模式对西 风急流模拟存在偏差的可能原因,为最终改进和完 善该气候系统模式,并用其开展东亚夏季降水及雨 带变化的模拟与预测提供模式工具。

本文内容安排如下:第2节是模式和资料介 绍;第3节评估模式对东亚高空副热带西风急流的 模拟,包括空间分布和季节演变等;第4节分析模 式对东亚高空副热带西风急流年际变化的模拟能 力;第5节探讨模式对西风急流模拟偏差的可能原 因;最后进行全文的总结与讨论。

## 2 模式和资料介绍

IAP AGCM4.0 采用的是均匀经纬格点的有限差 分数值方法,其水平分辨率约 1.4°×1.4°(即经圈上 128 个格点,纬圈上 256 个格点),垂直方向为 26 层的 σ坐标,模式顶为 2.2 hPa。其动力框架在保持 大气物理研究所原有动力框架特点的基础上(曾庆 存和季仲贞, 1981;曾庆存等, 1985;曾庆存和张学 洪, 1987),又引进了一些新的特色,如引入高纬灵 活性跳点格式,在一定程度上增大了时间步长;引 入时间分解算法,即分开计算平流过程和适应过程, 提高了模式计算效率(张贺等, 2009; Zhang et al., 2013)。模式的物理过程大部分引自美国国家大气研 究中心(NCAR)发展的 CAM3.1 的物理参数化方案, 其中积云对流参数化方案, IAP AGCM4.0 提供了三 种可选方案,分别是 Zhang-McFarlane 方案(Zhang and McFarlane, 1995,后简称 ZM 方案)、Emanuel 方案(Emanuel, 1991,后简称 KE 方案)和修改的 Zhang-McFarlane 方案(Neale et al., 2008; Richter and Rasch, 2008,后简称 MZM 方案)。

本文分析中 IAP AGCM4.0 所选用的积云对流参数化方案是修改的 Zhang-McFarlane 方案(MZM 方案),采用 HadISST1(1°×1°)海温(Hurrell et al., 2008)驱动模式进行 AMIP 积分,选取 1979~2008年 30年的模式模拟结果进行分析。采用的再分析数据为日本气象厅月平均再分析数据(JRA-25),所选要素包括纬向风、温度,水平空间分辨率为 1.25°×1.25°,垂直层次为 23 层(Onogi et al., 2007)。同时也用到了美国国家环境预报中心(NCEP/NCAR)再分析月平均资料,要素包括地表感热、潜热通量场,时间也为 1979~2008年,水平分辨率为 2.5°×2.5°。

## 3 东亚高空副热带西风急流气候态 的模拟

夏季东亚高空副热带西风急流的强度、位置的 变化直接影响着东亚夏季风及其降水的变化,本节 我们首先分析 IAP AGCM4.0 对夏季(6~8月)东 亚高空副热带西风急流基本气候态及其季节变化 的模拟能力。

图 1 分别给出了 JRA-25 再分析资料和 IAP AGCM4.0 模拟的 1979~2008 年共 30 年平均的 200 hPa 纬向风冬季和夏季气候态的空间分布。再分析 资料中,冬季东亚高空副热带西风急流轴平均位于 30°N 左右,急流中心位于 (27°~32°N,130°~ 160°E),风速最大可达到 70 m s<sup>-1</sup>以上;夏季急流 轴平均位于 40°N 附近,急流中心在 (40°N,80°~ 100°E) 附近,最大风速仅为 30 m s<sup>-1</sup>左右。对比观 测结果,IAP AGCM4.0 可较好地模拟出东亚高空副 热带西风急流冬季和夏季的基本型态,只是模式模 拟的冬季东亚高空副热带西风急流中心的范围略 偏小,强度相对偏弱,平均位置较观测结果偏南 2° 左右;模式模拟的夏季东亚高空副热带西风急流中 心范围也偏小,强度也偏弱,位置在 40°N 以北, 相对于观测偏北 3°左右。

图2给出的是80°E~130°E 纬向平均的200 hPa



图 1 1979~2008 年平均 200 hPa 纬向风(单位: m s<sup>-1</sup>): (a) JRA-25 冬季; (b) JRA-25 夏季; (c) IAP AGCM4.0 模拟冬季; (d) IAP AGCM4.0 模拟夏季。 阴影区域表示风速大于 30 m s<sup>-1</sup>

Fig. 1 Climatological mean of zonal wind (units:  $m s^{-1}$ ) at 200 hPa in (a) winter and (b) summer from JRA-25 (Japanese 25-year Reanalysis) data. Panels (c, d) are the same as (a, b), but for IAP AGCM4.0 (the fourth generation AGCM developed at the Institute of Atmospheric Physics (IAP)) simulation. Values larger than 30 m s<sup>-1</sup> are shaded



图 2 1979~2008 年平均 200 hPa 纬向风(单位: m s<sup>-1</sup>) 纬度—时间变化: (a) JRA-25; (b) IAP AGCM4.0 模拟。阴影区域表示风速大于 25 m s<sup>-1</sup> Fig. 2 Latitude-time cross sections of climatological mean of zonal wind (units: m s<sup>-1</sup>) at 200 hPa from (a) JRA-25 data and (b) IAP AGCM4.0 simulation. Values larger than 25 m s<sup>-1</sup> are shaded

纬向风的纬度—时间剖面图。由再分析资料可知, 东亚高空副热带西风急流在冬季最强,1~3月急流 中心位于 30°N 附近,从4月开始,急流逐渐向北 移动,强度也逐渐减弱,7、8月份时到达最北端, 强度也达到最弱,之后急流开始南移,强度增强, 到12月份到达最南端(图2a)。由图2b可以看出, IAP AGCM4.0 能较好地模拟出东亚高空副热带西 风急流的强度、位置随季节的变化情况,但与再分 析资料相比,1~3月份急流中心位置偏南 2°(纬度, 下同) 左右, 这一结果与图 1a、图 1c 相对应。4 月份开始, 急流位置北移, 强度减弱, 模式能很好 地抓住这一特征,但在7、8月份,模式模拟的急 流中心位置相对再分析资料偏北约 3°, 随后急流南 移,强度加强,到12月份到达最南端。整体而言, IAP AGCM4.0 能较好地模拟出东亚高空副热带西 风急流的基本模态及其位置的季节变化特征,但模 式模拟的急流强度相对偏弱,此外模式模拟的冬季 急流位置略偏南,夏季略微偏北。

图 3 给出了模式对夏季逐月 (6~8 月) 东亚西 风急流基本特征的模拟及其与再分析资料的比较。 从再分析数据(图 3a-c)可以看出,6月急流轴平 均位于 37°N 附近, 急流范围从北非一直延伸到西 北太平洋上空,且存在两个急流中心,一个位于西 亚上空,一个位于东亚一西北太平洋上空:7月份 急流北进西移,急流轴位于 40°N 附近,范围也急 剧缩小,风速达到 25 m s<sup>-1</sup>以上的只存在于 30°~ 110°E 范围内,强度也有较大减弱,但仍存在两个 急流中心,分别位于西亚和中亚上空;8月份急流 位置进一步北进,到达最北端(44°N附近),但强 度和范围较7月有所加强。从图 3d-f 模式模拟结果 可以看出, IAP AGCM4.0 总体上能较好地模拟出东 亚高空副热带西风急流在夏季三个月的空间分布 及其变化,但与再分析资料相比也存在一定的偏 差。模式模拟的6月份急流中心位置与观测相近,



图 3 1979~2008 年平均 200 hPa 纬向风(单位: m s<sup>-1</sup>): (a) JRA-25 6 月; (b) JRA-25 7 月; (c) JRA-25 8 月; (d) IAP AGCM4.0 模拟 6 月; (e) IAP AGCM4.0 模拟 7 月; (f) IAP AGCM4.0 模拟 8 月。 阴影区域表示风速大于 25 m s<sup>-1</sup>

Fig. 3 Climatological mean of zonal wind (m s<sup>-1</sup>) at 200 hPa in (a) Jun, (b) Jul, and (c) Aug from JRA-25 (Japanese 25-year Reanalysis) data. Panels (d, e, f) are the same as (a, b, c), but for IAP AGCM4.0 (the fourth generation AGCM developed at the Institute of Atmospheric Physics (IAP)) simulation. Values larger than 25 m s<sup>-1</sup> are shaded

但模式未能模拟出西亚上空的急流中心,且对北太 平洋上空急流强度的模拟比再分析结果偏弱;7月 模式模拟的急流中心位置偏北约有2°左右,范围比 观测偏小,强度也略偏弱;8月模式模拟的急流位 置较观测更为偏北,范围和强度也偏小。

## 4 东亚高空副热带西风急流的年际 变化

#### 4.1 200 hPa 纬向风年际变化的标准差

东亚高空副热带西风急流具有显著的年际变 化特征,这从1979~2008年夏季及6、7、8月逐 月 200 hPa 纬向风标准差的空间分布可以看出(图 4)。从再分析资料(图 4a-d)可以发现,夏季平均 及逐月的纬向风年际变率较大的区域主要集中在 中纬度地区,且中心区域位于气候态急流轴的南北 两侧,尤其以7、8月份变率更为显著。从6~8月 逐月的变化可以发现,随着急流轴的北移,相应的 纬向风标准差大值区域也逐渐北移。对于模拟结果 而言,IAPAGCM4.0 能模拟出纬向风年际变化最大 值位于急流轴气候态南北两侧的特点,但模式模拟 的纬向风年际变率的数值与观测相比存在偏差。从 夏季平均的标准差可以看出(图 4e),模式模拟的 纬向风的年际变率略微偏强。对夏季逐月的分析结



图 4 夏季 200 hPa 纬向风标准差(单位: m s<sup>-1</sup>): JRA-25 (左栏); IAP AGCM4.0 模拟(右栏)。(a、e) 夏季平均(JJA); (b、f) 6月; (c、g) 7 月; (d、h) 8月

Fig. 4 Standard deviation of zonal wind (units: m s<sup>-1</sup>) at 200 hPa in (a) summer (JJA), (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug for JRA-25 data. Panels (e–h) are the same as (a–d), but for IAP AGCM4.0 simulation

果可以看出,6月份,模拟的纬向风年际变率偏强,而7、8月份模式模拟的年际变率相对偏弱。

**4.2** 东亚高空副热带西风急流年际变化的主要模态

为了分析东亚高空副热带西风急流年际变化的主模态,我们对东亚—西太平洋区域(25°~55°N,80°~140°E)夏季平均及逐月(6、7、8月)200 hPa 纬向风进行了 EOF 分解,结果如图 5 所示。 从再分析数据可以看出,夏季平均及 6~8 月逐月 第一模态方差贡献分别占总方差的 37.1%、30.5%、 44.8%、40.9%, EOF 分解的第一模态空间分布特征 主要表现为纬向风异常在急流轴南北两侧呈现反 位相分布,零线大致位于气候态急流轴所在位置, 即表现为急流轴北侧的西风异常和南侧的东风异 常(图 5a-d)。IAP AGCM4.0 模式模拟 200 hPa 纬向 风进行 EOF 分解后,第一模态方差贡献分别占总方 差的 31.8%、32%、39.2%、34.5%,总体上与再分 析结果比较接近。除 7 月外,夏季平均及 6 月、8



图 5 夏季 200 hPa 纬向风 EOF 分解的第一模态: JRA-25 (左栏); IAP AGCM4.0 模拟 (右栏)。(a、e) 夏季平均 (JJA); (b、f) 6月; (c、g) 7 月; (d、h) 8月

Fig. 5 The first EOF mode of zonal wind at 200 hPa in (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug from JRA-25 data. Panels (e-h) are the same as (a-d), but for IAP AGCM4.0 simulation

月的第一模态方差贡献略微小于再分析结果。模态 分布的比较可以看出,模式能较好地再现出再分析 资料中 200 hPa 纬向风 EOF 第一模态的空间分布特 征,即急流轴南北两侧的风速异常特征,只是模式 模拟的风速零线较观测偏北,尤其是夏季平均及 8 月的结果。 图 6 给出了再分析和模式模拟的 1979~2008 年夏季及 6~8 月逐月 200 hPa 纬向风 EOF 分解 的第一模态主分量的时间系数 (PC1),以及相应的 东亚高空急流位置指数 (EAJSI)标准化时间序列。 这里我们采用宣守丽 (2011)定义的 EAJSI,即夏 季平均及 6、7、8 逐月东亚高空急流轴南北各 5 个



图 6 夏季 200 hPa 纬向风 EOF 分解的第一模态主分量的时间系数(PC1)和东亚高空急流位置指数(EAJSI)标准化的时间序列: JRA-25(左栏); IAP AGCM4.0 模拟(右栏)。(a、e)夏季平均(JJA);(b、f)6月;(c、g)7月;(d、h)8月

Fig. 6 Normalized time series of the corresponding principal component of the first EOF mode (PC1) of zonal wind at 200 hPa and the EASWJ (East Asian subtropical westerly jet) position index (EAJSI) for (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug from JRA-25 data. Panels (e–h) are the same as (a–d), but for IAP AGCM4.0 simulation

纬度的 80°~140°E 经度范围平均的 200 hPa 纬向风 之差(低纬减高纬), EAJSI代表了急流南北位置的 变化,正值表示急流位置偏南,负值表示急流位置偏 北。由再分析数据可以看出,夏季平均及6~8月逐 月, PC1 与 EAJSI 的相关分别达到-0.75、-0.93、 -0.93、-0.88, 通过了 99%的信度检验, 表明当 PC1 为正值时,急流位置偏北,PC1 为负值时,代表急 流位置偏南,显然 EOF 分解的第一模态对应着急流 位置的南北移动。图 6e-h 给出了模式模拟的结果, 这里模式的 EAJSI 是基于模式模拟的急流轴位置计 算得到的,夏季平均及6~8月逐月模式模拟的EOF 第一模态的 PC1 与 EAJSI 的相关系数 -0.6、-0.8、 -0.97、-0.97,两者之间也存在很好的关系。此外, 我们还计算了再分析资料和模式模拟的 200 hPa 风 场的 EOF 分解第一模态时间系数之间的相关,结果 表明,对于夏季平均而言,两者的关系仅为0.08, 而 6、7、8 逐月的相关系数则分别为:-0.02、0.04、 0.03,同样没有通过显著性检验,说明模式并不能 模拟出观测的急流南北位置年际变化的特征。

## 5 东亚高空副热带西风急流模拟偏 差原因分析

#### 5.1 对流层中上层经向温度差(MTD)

已有研究表明对流层中上层经向温度差 (MTD)是形成急流的一个直接原因(况雪源和张 耀存,2007; Zhang et al., 2008; 谢坤等,2008)。本文 定义经向温度差为经向两个相邻格点间的温度差, 即从低纬向高纬每隔 1.25°两点之间的温度之差。图 7 给出了观测与模式 200 hPa 上纬向风速及 200~ 500 hPa 垂直平均的经向温度差的空间分布图。由 再分析资料(图 7a-d)可以看出,西风急流带与经 向温度差大值区有很好的对应关系,且急流中心对 应着经向温度差中心值,说明对流层中上层经向温 度差对急流形成有着重要作用。

从图 7e-h 可以看出, IAP AGCM4.0 能较好地 模拟出急流带与对流层中上层经向温度差之间的 对应关系,但总体说来模式模拟的夏季及 6~8 月 逐月的经向温度差都比再分析结果偏弱,如模式模 拟的夏季平均经向温度差中心值比再分析结果偏 小达 0.4 K,这与模式模拟的急流强度偏弱相对应。 另一方面,模式模拟的经向温度差中心值位置也偏 北,尤其是 7、8 月份更为明显,偏北甚至能达到 5° (图 7e-h),这对应着模式模拟的急流位置偏北。

图 8 给出了纬向风与经向温度差随高度的变化 情况,再分析资料结果表明,西风在 200 hPa 高度 附近最强,在 200 hPa 高度以下,经向温度差为正 值,即温度的水平经向梯度由极地指向赤道,西风 随高度增加而增强;在这个 200 hPa 高度以上,经 向温度差为负值,即温度的水平经向梯度由赤道指 向极地,西风随高度增加而减弱。在温度的水平经 向梯度反向的高度上,纬向风达到极大,即 200 hPa 高度附近,且纬向风的变化幅度与温度的经向梯度 强度成正比。

从图 8e-h 可以看出,模式可以很好地模拟出 经向温度差随高度的变化情况,即 200 hPa 以下高 度为正值,200 hPa 以上高度为负值,但是模拟的 经向温度差偏弱,从而使得模式模拟的西风强度偏 弱。同时也可以看出,模式模拟的纬向风中心值位 置偏北,这与模拟的经向温度差变化最大的区域位 置偏北相对应。以 8 月份为例,观测的纬向风中心 值及经向温度差变化最大位置在 41°N 附近,而模 式模拟的却在 45°N 附近。这说明模式模拟的经向 温度差存在偏差是造成西风急流模拟偏差的直接 原因。

为考察 IAP AGCM4.0 对东亚副热带西风急流 南北位置年际变化特征模拟的偏差,是否与模式对 对流层中高层经向温度差年际变率模拟的偏差存 在直接关系,我们定义了经向温度差指数(MTDI), 即夏季平均及6、7、8月逐月的东亚高空急流轴两 侧各 5 个纬度的经度(80°~140°E)范围 200~500 hPa 上平均经向温度差之差(低纬值减高纬值)。图 9 给出了再分析资料和模式模拟的 200 hPa 纬向风 场 EOF 第一模态的 PC1 与 MTDI 标准化的时间序 列。由再 分析资料可以看出, PC1 与 MTDI 在夏 季及 6~8 月逐月的相关系数分别为-0.82、-0.88、 -0.94、-0.96, 都通过了 99%的信度检验, 表明急 流南北位置的变化与 MTDI 的变化有很好的对应关 系。根据模式模拟的急流轴位置,我们也定义了相 应的模式的经向温度差指数,并计算了与模式的 200 hPa 纬向风场 EOF 第一模态的 PC1 的关系,对 于夏季及 6~8 月逐月,相关系数分别为-0.79、 -0.79、-0.87、-0.87,两者之间也有很好的对应关 系,这表明模式对 MTD 模拟的偏差会造成急流南 北位置模拟的不准确。模式不能很好地模拟出急流 南北位置的年际变化,正是与模式未能很好模拟出





Fig. 7 Climatological mean of zonal wind (isolines, units:  $m s^{-1}$ ) at 200 hPa and MTD (meridional temperature difference) (shaded, units: K) averaged from 200 to 500 hPa for (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug from JRA-25 data. Panels (e–h) are the same as (a–d), but for IAP AGCM4.0 simulation

对流层中上层经向温度差的年际变率紧密相关。

#### 5.2 地表加热场

地表感热场的变化会引起对流层中高层温度

场、高度场等的响应,从而导致流场的变化,即对 流层中上层经向温度差对地表感热场异常地响应是 导致高层纬向风变化的原因。图 10 给出了观测和模



图 8 200 hPa 50°~160°E 平均纬向风(等值线, m s<sup>-1</sup>)以及平均经向温度差(阴影,单位: K)的纬度一高度变化: JRA-25 (左栏); IAP AGCM4.0 模拟 (右栏)。(a、e) 夏季平均 (JJA); (b、f) 6月; (c、g) 7月; (d、h) 8月

Fig. 8 Height–latitude cross sections of zonal wind (isolines, units:  $m s^{-1}$ ) and MTD (shaded, units: K) averaged between 50°E and 160°E for (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug from JRA-25 data. Panels (e–h) are the same as (a–d), but for IAP AGCM4.0 simulation

式模拟的夏季及6~8月逐月地表感热通量的空间分 布情况。由观测可以看出,阿拉伯半岛东南及印度 北部地表感热通量为正值,而阿拉伯海西北部为负 值,但是模式模拟的这些区域的感热通量比观测要 小。为进一步分析夏季地表感热通量与经向温度差 指数的关系,我们定义了感热通量指数(shtfl),即区 域(15°~25°N,50°~80°E)的感热通量平均。图11 给出了再分析资料和模式模拟的 1979~2008 年期 间夏季及月平均的地表 shtfl 以及对流层中高层经 向温度差指数 (MTDI) 的标准化时间序列。由再分析结果可以发现,除 6 月外,在夏季平均、7 月及 8 月,该区域 shtfl 与 MTDI 的相关分别可以达到 0.31、0.40、0.45,通过了 95%的信度检验,说明在 7 月、8 月及夏季平均,阿拉伯半岛东南部、阿拉伯海西北部及印度北部的感热通量的变化会影响到东亚副热带地区经向温度差的变化。而模式模拟的夏季平均及各月的 shtfl 与 MTDI 的相关分别为 0.20、0.66、0.27、0.15,这里夏季及 7、8 月

份地表感热通量指数与 MTDI 的相关均未通过 95% 的信度检验,而在 6 月份,模式模拟的相关则要大 于再分析结果。这说明模式对阿拉伯半岛东 南部、 阿拉伯海西北部及印度北部的感热通量与东亚副 热带地区经向温度差变化之间关系的模拟 与再 分析结果之间也有一定的偏差。以上分析表明,由 于 IAP AGCM4.0 对地表感热场的模拟存在一定的 偏差,尤其是对东亚高空副热带西风急流有重要影响的阿拉伯半岛、阿拉伯海及印度北部地区地表感 热通量的模拟,这种偏差会通过对流层中高层温度 场、高度场的响应,使得对流层中高层流场的模拟 产生误差,从而导致高层纬向风模拟的误差,尤其 是急流位置南北的移动模拟的误差。这些结论与况 雪源和张耀存(2007)的分析结果相一致。



图 9 200 hPa 纬向风 EOF 分解的第一模态主分量的时间系数 (PC1) 和经向温度差指数 (MTDI) 的标准化的时间序列: JRA-25 (左栏); IAP AGCM4.0 模拟 (右栏)。(a, e) 夏季平均 (JJA); (b, f) 6月; (c, g) 7月; (d, h) 8月

Fig. 9 Normalized time series of the corresponding principal component of the first EOF mode of zonal wind at 200 hPa and MTDI (meridional temperature difference index) for (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug form JRA-25 data. Panels (e–h) are the same as (a–d), but for IAP AGCM4.0 simulation



图 10 地表感热通量气候态 (W m<sup>-2</sup>): 观测 (左栏); IAP AGCM4.0 模拟 (右栏)。(a, e) 夏季平均 (JJA); (b, f) 6月; (c, g) 7月; (d, h) 8月 Fig. 10 Distribution of surface sensible heat fluxes (W m<sup>-2</sup>) for (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug from observation. Panels (e–h) are the same as (a–d), but for IAP AGCM4.0 simulation

#### 5.3 积云对流参数化方案的影响

在大气环流模式中,对流加热过程会显著影响 到大气的温度结构,从而影响到模式对西风急流的 模拟。本文前面我们分析了基于 MZM 积云对流参 数化方案的结果,在本节我们将探讨不同积云对流 参数化方案对模式模拟东亚高空副热带西风急流 的可能影响。

图 12 给出的是分别采用了 Zhang-McFarlane 方案(ZM 方案)、Emanuel 方案(KE 方案)和修改的 Zhang-McFarlane 方案(MZM 方案)的 IAP



图 11 经向温度差指数 (MTDI) 与地表感热通量指数 (shtfl) 标准化的时间序列: JRA-25 (左栏); IAP AGCM4.0 模拟 (右栏)。(a、e) 夏季平均 (JJA); (b、f) 6月; (c、g) 7月; (d、h) 8月

Fig. 11 Normalized time series of MTDI and shtfl (Sensible Heat Flux index) for (a) JJA, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug for JRA-25 data. Panels (e-h) are the same as (a-d), but for IAP AGCM4.0 simulation

AGCM4.0 所模拟的 7 月份东亚高空副热带西风急 流及对流层中高层经向温度差(MTD)的模拟结果,同时还给出了 JRA-25 再分析资料的结果。从图中可以看出,对于三种不同的积云对流参数化方案,模 拟的 200 hPa 纬向风与观测相比有一定差异。三种方案模拟的急流中心都偏小,这与相应的 MTD 模

拟的偏小相关。而 KE 方案模拟的急流中心位置相 对观测更为偏北,这也正是由于 MTD 模拟偏北直 接造成的。由纬向风及 MTD 的纬度—高度变化图 (图 13),更能体现出不同对流参数化方案对东亚 高空副热带西风急流的影响。积云对流参数化通过 影响对流加热过程,从而影响到 MTD 的空间分布,



图 12 1979~2008 年 7 月平均的 200 hPa 纬向风 (等值线,单位: m s<sup>-1</sup>)以及 200~500 hPa 平均的经向温度差 (阴影,单位: K): (a) JRA-25; (b) ZM; (c) KE; (d) MZM

Fig. 12 Climatological mean of zonal wind (isolines, units:  $m s^{-1}$ ) at 200 hPa and MTD (shaded, units: K) averaged from 200 to 500 hPa in Jul from (a) JRA-25 data, (b–d) simulation with ZM (Zhang-McFarlane) scheme, (c) KE (Emanuel) scheme, and (d) MZM (modified Zhang-McFarlane) scheme



图 13 200 hPa 纬向风 (等值线,单位:  $m s^{-1}$ ) 以及经向温度差 (阴影,单位: K) 的纬度—高度变化: (a) JRA-25; (b) ZM; (c) KE; (d) MZM Fig. 13 Height–latitude cross section of zonal wind (units:  $m s^{-1}$ ) (isolines, units:  $m s^{-1}$ ) and MTD (shaded, units: K) in Jul from (a) JRA-25 data, (b) ZM, (c) KE, and (d) MZM

进而影响西风急流的位置和强度。因此如何改进和 完善积云对流等模式物理过程参数化方案,从而进 一步改进模式对大气温度结构等的模拟,也是今后 研究的重点。

### 6 结论

本文基于中国科学院大气物理所大气环流模 式 IAP AGCM4.0 总共 30 年(1979~2008 年)的 AMIP 数值模拟试验结果,结合日本气象厅的 JRA-25 再分析资料,系统评估了模式对东亚高空副 热带西风急流基本形态、季节及年际变化的模拟能 力,探讨了模式模拟偏差的可能原因,以及不同积 云对流参数化方案对模式模拟东亚高空副热带西 风急流的影响。

总体说来, IAP AGCM4.0 可以较好地模拟出东 亚高空副热带西风急流基本气候态以及季节内演 变特征,包括夏季西风急流位置逐月北跳的特征。 对于观测的西风急流中心位于 200 hPa 高度,东亚 高空副热带西风急流在冬季最强、夏季最弱,以及 从冬到夏急流存在北进减弱、从夏到冬存在南退增 强等季节变化特征,模式均能很好地予以再现。对 于夏季 6、7、8 三个月东亚高空副热带西风急流位 置逐渐北移,8 月份到达最北端,模式也很好地模 拟出来,但是相对于再分析结果而言,模式模拟的 西风急流强度偏弱,模式模拟的西风急流强度偏 弱,位置在冬季偏南、夏季偏北。此外,模式对西 风急流位置年际变化特征的模拟与再分析资料相 比也有较大偏差。

分析 IAP AGCM4.0 对西风急流模拟偏差的可 能原因发现,模式对西风急流的强度、南北位置以 及年际变化特征的模拟偏差,均与模式模拟的对流 层中高层经向温度差(MTD)的偏差紧密相关。由 于模式模拟的 MTD 幅值偏弱,导致模式模拟的西 风急流强度相对于再分析偏弱;对应于模式模拟的 经向温度差中心值位置偏北,模式模拟的西风急流 的位置也相对偏北。

进一步分析发现,阿拉伯半岛东南部、阿拉伯 海西北部及印度北部地表感热通量模拟的偏差,可 以通过影响对流层中高层温度场,影响到 MTD 的 模拟,进而引起流场模拟的误差,从而导致急流中 心南北位置年际变化的模拟偏差。而积云对流参数 化方案也可以通过影响对流加热过程,进而影响到 MTD 的空间分布,最终影响模式对西风急流位置 和强度的模拟。因此改进和完善 IAP AGCM4.0 中 的物理过程参数化方案,如陆面过程、积云对流参 数化方案,将是改进模式对东亚高空副热带西风急 流的模拟的可能途径。

#### 参考文献 (References)

- 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\_gl [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 33 (4): 38–48.
- Du Y, Zhang Y C, Xie Z Q. 2009. Impacts of the zonal position of the East Asian westerly jet core on precipitation distribution during Meiyu of China [J]. Acta Meteorologica 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 (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.
- Emanuel K A. 1991. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models [J]. J. Atmos. Sci., 48 (21): 2313–2329.
- Huang G, Liu Y. 2011. Simulation of the East Asian subtropical westerly jet stream with GFDL AGCM (AM2.1) [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 4(1): 24–29.
- 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]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (5): 910–942.
- Hurrell J W, Hack J J, Shea D, et al. 2008. A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the community atmosphere model [J]. J. Climate, 21 (19): 5145–5153.
- 况雪源, 张耀存. 2007. 东亚副热带西风急流与地表加热场的耦合变化 特征 [J]. 大气科学, 31 (1): 77-88. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2007. The characteristics of the coupling variation between the subtropical westerly jet and the surface heating fields over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 77-88.
- 况雪源,张耀存,刘健. 2008. 对流层上层副热带西风急流与东亚冬季 风的关系 [J]. 高原气象, 27 (4): 701-712. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun, Liu Jian. 2008. Relationship between subtropical upper-tropospheric westerly jet and East Asian winter monsoon [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 701-712.
- 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 congyin, Wang Jough-Tai, Lin Shi-Zhei, 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.

- 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.
- Liang X Z, Wang W C, Samel A N. 2001. Biases in AMIP model simulations of the East China monsoon system [J]. Climate Dyn., 17 (4): 291–304.
- 刘杰, 况雪源, 张耀存. 2010. 对流层上层东半球副热带西风急流与副 热带(南亚)高压的关系 [J]. 气象科学, 30 (1): 34-41. Liu Jie, Kuang Xueyuan, Zhangyaocun. 2010. Relationship between the East Asia subtropical westerly jet in the upper troposphere and the subtropical South Asian high [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 30 (1): 34-41.
- Lu Riyu, Li Ying, Dong Buwen. 2006. External and internal summer atmospheric variability in the western North Pacific and East Asia [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 84: 447–462.
- 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 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.
- Neale R B, Richter J H, Jochum M. 2008. The impact of convection on ENSO: From a delayed oscillator to a series of events [J]. J. Climate, 21 (22): 5904–5924.
- Onogi K, Tslttsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85 (3): 369–432.
- Richter J H, Rasch P J. 2008. Effects of convective momentum transport on the atmospheric circulation in the community atmosphere model, version 3 [J]. J. Climate, 21 (7): 1487–1499.
- 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 Shih-yen, 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.
- 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.
- 谢坤, 任雪娟, 向洋. 2008. 冬季东亚—西太平洋西风急流基本结构及 其异常的诊断分析 [J]. 热带气象学报, 24 (2): 156–162. Xie Kun, Ren Xuejuan, Xiang Yang. 2008. Study of the characteristics and variabilities of the East Asian–western Pacific westerly jet stream in winter seasons [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (2): 156–162.
- 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]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (2): 387–397.
- 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 Pyhsics, Chinese Academy of

Sciences, 109pp.

- 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. Cliamte, 15 (3): 306–325.
- 叶笃正,陶诗言,李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象 [J].
  气象学报, 29 (4): 249–263. Yeh Tu-Cheng, Dao Shih-Yen, Li Mei-Tsiun.
  1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (4): 249–263.
- 于秀晶,谢今范. 2007. 春季东亚高空西风急流变异与东亚夏季副热带 季风活动遥相关特征 [J]. 地理科学, 27 (增刊): 91–96. Yu Xiujing, Xie Jinfan. 2007. Remote correlation feature between variations of troposphere westerly jet stream in spring and East Asian subtropical summer monsoon activities [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 27 (S1): 91–96.
- 曾庆存,季仲贞. 1981. 关于非线性计算稳定性的若干问题 [J]. 力学学 报, (3): 209–217. Zeng Qingcun, Ji Zhongzhen. 1981. Some problems on nonlinear computional instability [J]. Acta Mechanica Sinica (in Chinese), (3): 209–217.
- 曾庆存, 袁重光, 张学洪, 等. 1985. 一个大气环流模式差分格式的检验
  [J]. 气象学报, 43 (4): 441–449. Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Zhang Xuehong, et al. 1985. A test for the difference scheme of a general circulation model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 43 (4): 441–449.
- 曾庆存,张学洪. 1987. 球面上斜压原始方程组保持总有效能量守恒的 差分格式 [J]. 大气科学, 11 (2): 113–127. Zeng Qingcun, Zhang Xuehong. 1987. A vailable energy conserving schemes for spherical baroclinic primitive equations [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 11 (2): 113–127.
- Zhang G J, McFarlane N A. 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model [J]. Atmosphere-Ocean, 33 (3): 407–446.
- 张贺. 2009. 大气环流模式 IAP AGCM4.0 的设计及其数值模拟 [D]. 中 国科学院大气物理研究所博士学位论文, 194pp. Zhang He. 2009. Development of IAP atmospheric general circulation model version 4.0 and its climate simulations [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Pyhsics, Chinese Academy of Sciences, 194pp.
- 张贺, 林朝晖, 曾庆存. 2009. IAP AGCM-4 动力框架的积分方案及模式 检验 [J]. 大气科学, 33 (6): 1267–1285. Zhang He, Lin Zhaohui, Zeng Qingcun. 2009. The computational scheme and the test for dynamical framework of IAP AGCM-4 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1267–1285.
- 张贺,林朝晖,曾庆存. 2011. 大气环流模式中动力框架与物理过程的 相互响应 [J]. 气候与环境研究, 16 (1): 15–30. Zhang He, Lin Zhaohui, Zeng Qingcun. 2011. The mutual response between dynamical core and physical parameterizations in atmospheric general circulation models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1): 15–30.
- Zhang H, Zhang M H, Zeng Q C. 2013. Sensitivity of simulated climate to two atmospheric models: Interpretation of differences between dry models and moist models [J]. Mon. Wea. Rev., 141 (5): 1558–1576.
- Zhang Y C, Huang D Q. 2011. Has the East Asian westerly jet experienced a poleward displacement in recent decades? [J]. Advances in Atmospheric

Sciences, 28 (6): 1259-1265.

- Zhang Y C, Takahashi M, Guo L L. 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,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 and Guo Lanli, Relationship between the simulated East Asian westerly jet biases and seasonal evolution of rainbelt over eastern China, Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (13): 1394–1399.

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 (6): 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1177–1188.

张耀存, 况雪源. 2008. 东亚副热带西风急流位置变化与亚洲夏季风爆 发的关系 [J]. 暴雨灾害, 27 (2): 97–103. Zhang Yaocun Kuang Xueyuan. 2008. The relationship between the location change of the East Asian subtropical westerly jet and Asian summer monsoon onset [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 27 (2): 97–103.