

张庆云, 郭恒. 2014. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究 [J]. 大气科学, 38 (4): 656–669, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13240.
Zhang Qingyun, Guo Heng. 2014. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 656–669.

夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究

张庆云^{1,2} 郭恒^{1,3}

1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境研究中心, 北京 100029

2 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

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 长江、淮河同处东亚中纬度, 天气过程的大尺度环流背景相似, 大量相关研究基本是把江淮流域天气气候事件作为一个整体研究, 然而对长江、淮河流域夏季降水的时空变化进行分析发现, 长江、淮河流域夏季异常降水事件有各自不同的年际、年代际变化特征, 但环流差异及成因并不十分清楚。本文根据中国台站降水资料及 NCEP/NCAR 再分析资料, 利用物理量诊断和现代统计学等方法, 重点分析长江、淮河流域梅雨期降水异常事件发生时南北半球大气环流内部动力过程的差异及成因。研究指出: 长江(淮河)流域梅雨期降水异常偏多年 500 hPa 位势高度场亚洲中高纬度环流呈现为南北向(东西向)的波列与东亚中高纬鄂霍茨克海阻塞频次增多(减少)以及 200 hPa 高度场上东亚副热带高空西风急流强度加强(减弱)、稳定(移动)有关; 长江(淮河)流域梅雨期降水异常偏多年主要水汽来源与南半球澳大利亚高压、马斯克林高压位置偏东(西)造成西太平洋 150°E~180°(阿拉伯海 50°E~60°E)地区越赤道气流加强有关。长江(淮河)流域梅雨期异常降水事件大气环流内部动力过程最显著的差异表现为: 东亚副热带高空西风急流加强(减弱)以及南半球澳大利亚高压、马斯克林高压位置偏东(西)。

关键词 长江(淮河)流域降水 东亚高空西风急流 南半球环流 越赤道气流

文章编号 1006-9895(2014)04-0656-14

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13240

Circulation Differences in Anomalous Rainfall over the Yangtze River and Huaihe River Valleys in Summer

ZHANG Qingyun^{1,2} and GUO Heng^{1,3}

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

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

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Both the Yangtze River and the Huaihe River lie in mid-latitudes in East Asia, and so the large-scale circulation and climatic background of weather events in the Yangtze River valley and the Huaihe River valley are similar. However, there are different interannual variations between anomalous rainfall events in the Yangtze River valley and in the Huaihe River valley in summer. This study focuses on differences in circulation in middle to high latitudes in Asia and middle to low latitudes in the southern hemisphere, and the associated mechanisms. Both physical and statistical methods were used in this study. We looked at the differences in Asian circulation for anomalous rainfall events in the Yangtze

收稿日期 2013-08-08, 2014-02-27 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41375055, 全球变化研究国家重大科学研究计划项目 2012CB957803, 国家重点基础研究发展计划项目 2013CB430201

作者简介 张庆云, 女, 1950 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要从事亚洲季风和短期气候预测理论与预测方法研究。E-mail: zqy@mail.iap.ac.cn

River basin and the Huaihe River valley in summer. East Asian subtropical westerly winds at 200 hPa strengthened (weakened) and a longitudinal (zonal) pattern with anomalous geopotential height at 500 hPa occurred in middle to high latitudes over East Asia. Meanwhile, the locations of both the Australian anticyclone and the Mascarene anticyclone shifted further east (west), respectively, than normal, the cross-equatorial flow strengthened in the areas 150°E to 180° and weakened in the areas 50°E to 60°E (weakened in the areas 150°E to 180° and strengthened in the areas 50°E to 60°E), and anomalous rainfall in summer occurred in the Yangtze River valley (the Huaihe River valley). Thus, the intensity of East Asian subtropical westerly winds as well as the locations of both the Australian anticyclone and the Mascarene anticyclone played an important role in the occurrence of anomalous rainfall events in the Yangtze River valley and the Huaihe River valley in summer.

Keywords Anomalous rainfall, Yangtze River, Huaihe River, East Asian subtropical westerly winds, Southern Hemisphere circulation, Cross-equatorial flow

1 引言

长江、淮河同处东亚中纬度, 天气过程的大尺度环流背景受东亚高低纬度环流系统的影响, 夏季江淮流域异常降水事件频发, 江淮流域异常降水事件的成因机理一直受到我国气象工作者的高度关注, 并取得了一系列有应用价值的研究成果(陶诗言和徐淑英, 1962; 陶诗言等, 1962; Liang and Wang, 1998; 陶诗言和张庆云, 1998a, 1998b; 陶诗言等, 2001; 张庆云等, 2003b; 范可, 2006; 杨莲梅和张庆云, 2007; 杜银等, 2009; 黄荣辉等, 2011; 徐志清和范可, 2012; 刘屹岷等, 2013)。

近年来大量相关研究发现, 东亚—太平洋热带环流系统的异常对夏季江淮流域异常降水事件有重要影响(张庆云和陶诗言, 1998b, 1999; 陶诗言等, 2001; Fu et al., 2006; 黄荣辉等, 2011; 王会军和范可, 2013), Huang and Li (1987) 和 Nitta (1987) 的研究指出, 当热带西太平洋暖池对流活动强烈时, 会激发静止 Rossby 波, 出现东亚/太平洋 (EAP) [或日本/太平洋 (PJ)] 遥相关型, 西太平洋副高加强并向北伸展到日本和我国长江中下游, 造成高温酷暑天气。黄荣辉和李维京 (1988) 以及 Huang (1992) 的研究发现, 当热带西太平洋暖池增温时, 从菲律宾周围经南海到中印半岛上空的对流活动将增强, 西太平洋副高位置偏北, 从东南亚经东亚到北美西海岸上空大气环流呈现异常的东亚太平洋遥相关型。张庆云和陶诗言 (2003) 以及张庆云等 (2003a) 研究了西太平洋副热带高压与东亚夏季风环流关系及其对长江流域降水的影响指出, 夏季西太平洋副热带高压偏西、偏南年, 东亚夏季风环流偏弱, 梅雨锋偏强, 梅雨锋区上升运动加强, 长江流域汛期降水偏多; 反之, 夏季西太平洋副热带高压偏东、偏北年, 东亚夏季风环流

偏强, 梅雨锋偏弱, 长江流域汛期降水偏少。许多研究还发现, 江淮流域梅雨期降水强度、开始的早晚、持续时间的长短与东亚热带辐合带 ITCZ 强度、位置变化密切相关, 徐海明等 (2001) 的研究指出, 副热带高压的增强北跳西伸与热带 ITCZ 和孟加拉国湾北部对流的异常活跃有关, 数值模拟工作印证了热带 ITCZ 和孟加拉湾北部对流的异常活跃可能对副热带高压的增强北跳西伸产生影响。汪靖等 (2006) 研究指出, 2005 年江淮流域入梅偏晚的主要原因, 与入梅前东亚大槽发展强盛, ITCZ 偏弱以及东亚副热带高空西风急流强劲少动导致西太平洋副热带高压北抬偏晚有关。张琼和吴国雄 (2001) 对南亚高压与长江流域降水关系进行研究发现, 南亚高压强度指数与长江流域降水两者间的年代际变化趋势非常一致, 20 世纪 70 年代末南亚高压由弱变强, 长江流域降水由相对少雨干旱转为相对多雨, 多雨的洪涝年高低层副热带高压偏南偏强, 少雨的干旱年相反。

夏季江淮流域异常降水事件的发生发展除了受东亚—太平洋热带环流系统异常变化的影响外, 还与亚洲中纬度西风带上 Rossby 波活动异常有关。Zhang and Guo (2005)、Lin and Lu (2005)、况雪源和张耀存 (2006)、Kuang et al. (2007) 利用诊断、数值模拟等方法揭示了夏季及季节内东亚中纬度西风带高空急流位置的南北变化与南亚高压、西太平洋副热带高压和西太平洋对流的关系及其对中国东部降水的影响。陶诗言和卫捷 (2006) 研究指出, 夏季亚洲副热带高空急流上准静止的 Rossby 波在东亚沿海岸激发出长波脊时, 有利青藏高原和西太平洋副高都朝长波脊方向伸展, 造成长江中下游高温酷暑干旱; 亚洲副热带高空急流上的准静止 Rossby 波在东亚沿海岸激发出长波槽时, 有利青藏高原西退、西太平洋副高东退、南撤, 有利长江中

下游地区降水;杨莲梅和张庆云(2007)研究指出,夏季东亚西风急流 Rossby 波扰动动能加强(减弱),有利东亚西风急流位置偏南(北)、强度偏强(弱),东亚高、中、低层大气环流对高层东亚西风急流 Rossby 波扰动动能强弱响应由对流层上层散度场及垂直速度场变化完成。董敏等(1999)研究指出,东亚中纬度西风带高空急流变化受热带对流加热影响。

张庆云和陶诗言(1998a)、张庆云等(2001)研究指出:夏季我国东部异常降水事件还受亚洲高纬环流系统制约与影响,鄂霍茨克高压异常对东亚中纬度梅雨锋区位势高度场以及低纬度西太平洋副高的异常有重要影响,当鄂霍茨克海出现阻塞高压形势,500 hPa 位势高度场上东亚高、中、低纬的相关系数场出现“+—+”的波列,这表明东亚中纬度梅雨锋区位势高度场偏低、西太平洋副热带高压位置偏南,有利长江流域降水偏多。

夏季江淮流域异常降水事件除了与北半球高、中、低纬度环流系统异常变化密切相关外,南半球大气环流系统中的澳大利亚高压(简称澳高)、马斯克林高压的变化对我国东部夏季降水也有重要作用(施能和朱乾根,1995)。薛峰等(2003)和薛峰(2005)的研究指出,马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化对东亚夏季风降水年际变化有重要影响;杨修群和黄士松(1989)研究表明:马斯克林高压的频散能量使澳大利亚高压增强,马斯克林高压的增强加强了索马里急流和北印度洋上赤道西风,而澳高的增强加强了 105°E 附近越赤道气流和那里的偏西气流,两股赤道西风汇合东伸,西太平洋 ITCZ 活跃。

综上所述,夏季江淮流域异常降水事件的年际变化不但与北半球高、中、低纬度环流系统异常有关,同时还受南半球马斯克林高压和澳大利亚高压等环流系统内部动力过程异常变化的影响。长江、淮河同处东亚中纬度,天气过程的大尺度环流背景相似,因此大多数的相关研究基本上是把江淮流域天气气候事件作为一个整体进行分析,然而对近几十年的降水观测资料进行分析后发现,20 世纪 90 年代夏季异常降水事件多出现在长江流域(如 1993、1996、1998 和 1999 年),21 世纪的前 10 年,夏季异常降水事件多出现在淮河流域(如 2000、2003、2005 和 2007 年),这说明长江、淮河流域夏季的降水事件虽然受相同的大尺度环流背景制约

与控制,但长江、淮河流域夏季降水事件却有各自不同的年际、年代际变化特征,然而其环流内部动力过程的差异并不十分清楚,因此进一步探讨夏季长江、淮河流域异常降水事件发生时大气环流内部动力过程的差异及成因,对提高短期气候预测的准确率以及防灾减灾,有重要的理论意义和应用价值。

本研究利用物理量诊断和现代统计学等方法,重点探讨近 30 年长江、淮河流域梅雨期异常降水事件发生时大气环流内部动力过程的差异。文章第 2 节介绍资料、方法和定义;第 3 节分析夏季长江、淮河流域降水时空分布特征;第 4 节探讨长江、淮河流域梅雨期降水偏多年北半球大气环流内部动力过程差异及成因;第 5 节探讨长江、淮河流域梅雨期降水偏多年南半球大气环流内部动力过程差异及可能成因;第 6 节总结与讨论。

2 资料与方法

1979~2009 年 NCAR/NCEP 再分析月平均 500 hPa 位势高度场、850 hPa 和 200 hPa 风场等资料的分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;中国 160 站月降水量观测资料由国家气候中心提供;淮河流域降水代表站:信阳、阜阳、蚌埠、清江、东台、徐州、新浦。长江中下游区域代表站:南京、合肥、上海、杭州、安庆、屯溪、九江、汉口、钟祥、岳阳、宜昌、常德、宁波、衢县、贵溪、南昌、长沙。

为了定量分析北半球中高纬度阻塞型的特征,本文使用 Tibaldi and Molteni (1990) 提出的阻塞识别法(简称 TM90),TM90 阻塞识别方法使用逐日 500 hPa 高度场沿纬圈分别计算:

$$GHGS = \frac{Z(\phi_0) - Z(\phi_s)}{\phi_0 - \phi_s}, \quad (1)$$

$$GHGN = \frac{Z(\phi_n) - Z(\phi_0)}{\phi_n - \phi_0}, \quad (2)$$

其中, $\phi_n = 80^{\circ} + \Delta$, $\phi_0 = 60^{\circ} + \Delta$, $\phi_s = 40^{\circ} + \Delta$, $\Delta = -5^{\circ}, 0^{\circ}, 5^{\circ}$ 。在三个 Δ 中至少有一个 Δ 同时满足 $GHGS > 0$, $GHGN < -10 \text{ m}^{\circ})^{-1}$ [这里($^{\circ}$)指纬度]这两个条件时,我们即认为该经度发生了阻塞。

3 长江、淮河流域夏季降水的时空特征

为清楚了解近 30 年长江、淮河流域夏季降水时空变化特征,图 1 给出 1979~2009 年夏季(6~8 月平均)中国东部(111.25°E~121.25°E 平均)降

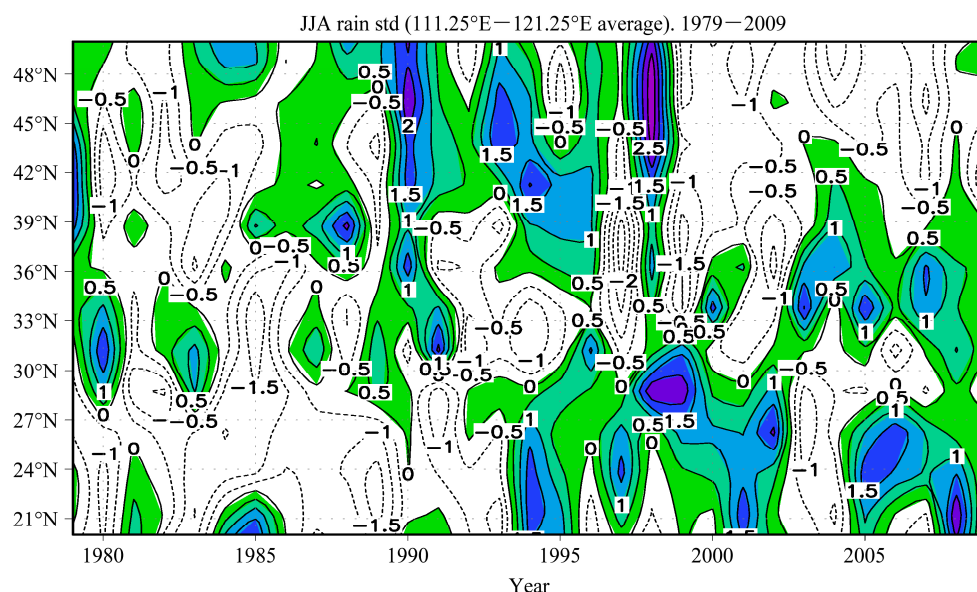


图1 1979~2009年夏季(6~8月平均)中国东部(111.25°E~121.25°E)平均的降水量的标准化分布

Fig. 1 The normalized summer rainfall (Jun to Aug mean) averaged over 111.25°E–121.25°E during 1979–2009

水量的标准化分布。从图1可见,近几十年来中国东部地区特别是位于中纬度的江淮流域夏季降水有显著的年际、年代际变化,20世纪90年代夏季江淮流域雨带主要位于长江流域(27°N~30°N),进入21世纪以来的前10年,夏季长江流域降水明显减少,雨带移到淮河流域(32°N~34°N)。

图2a、b分别是1951~2009年夏季长江、淮河流域降水距平百分率,图中直方图是年际变化、曲线是11年滑动平均(表示年代际变化趋势)。图2a是长江流域夏季平均降水变化,从图可见,长江流域夏季降水除了有显著的年际变化外还有显著的年代际变化特征,20世纪50年代至60年代中期及2000年以来,其降水呈现为持续偏少的负异常阶段,20世纪90年代降水呈现持续偏多的正异常阶段;1954、1969、1980、1983、1993、1996、1998和1999年夏季长江流域区域平均降水都超过多年平均雨量的35%以上。图2b是淮河流域夏季平均降水变化,淮河流域夏季降水也存在显著的年际、年代际变化,1966~1999年淮河流域夏季降水处于年代际偏少阶段,2000年以后处于年代际偏多阶段;1954、1956、1965、1991、2000、2003、2005、2007年夏季平均降水都超过多年区域平均降水量的35%以上。图2清楚说明长江、淮河流域夏季降水有各自不同的年际、年代际变化趋势。

为了清楚了解长江、淮河流域梅雨期降水异常年空间分布特征,图3a、b分别是长江流域区域平

均降水距平百分率大于35%的1980、1983、1993、1996、1998和1999年以及淮河流域区域平均降水距平百分率大于35%的1991、2000、2003、2005和2007年梅雨期(6~7月平均,下同)降水距平合成图。图3清楚表明:长江、淮河流域虽同处东亚中纬度,影响降水的大尺度环流背景相似,但长江、淮河流域梅雨期异常降水事件却有各自不同的年际变化特征,即长江流域降水偏多、淮河流域降水却偏少(见图3a);淮河流域降水偏多、长江流域降水偏少(见图3b)。图1~3清楚表明,长江流域、淮河流域夏季降水有各自不同的年代际、年际、季节内变化特征,本文重点探讨长江、淮河流域梅雨期降水异常年大气环流内部动力过程差异。

4 北半球大气环流内部动力过程的差异

陶诗言和徐淑英(1962)研究指出,持久性旱涝现象在中高纬度的高度场都表现为一定的流型,而且环流型具有相当的稳定性。为了了解长江、淮河流域梅雨期(6~7月,下同)异常降水事件发生时中高纬度环流内部动力过程的差异,图4a、b分别给出长江、淮河流域1979~2008年梅雨期平均降水与500 hPa位势高度场相关。从图4a、b可见,长江、淮河流域梅雨期降水都与西太平洋副热带高压(15°N~30°N, 120°E~150°E)有显著正相关(这与前人工作结论一致),但进一步分析长江

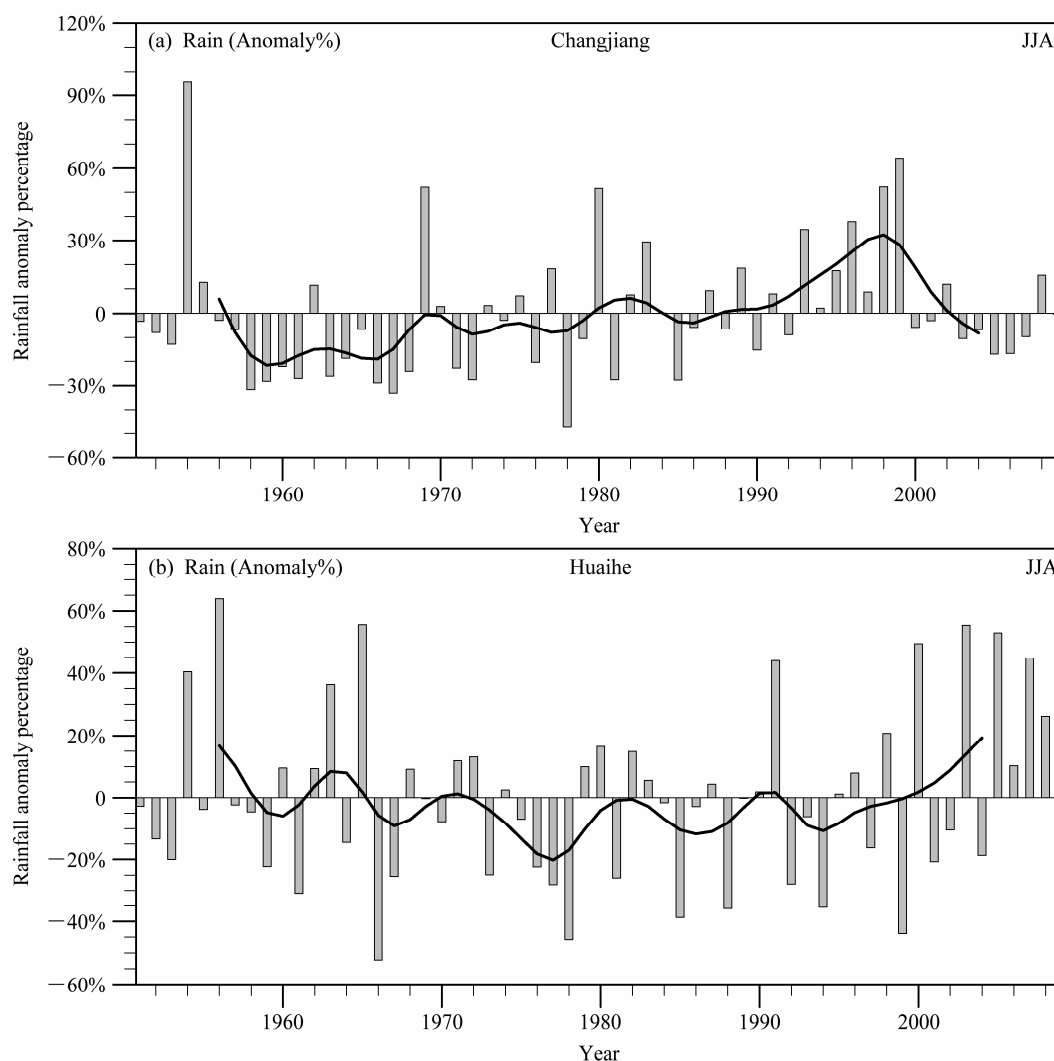


图2 6~8月平均降水距平百分率:(a)长江流域;(b)淮河流域。曲线是11年滑动平均

Fig. 2 The rainfall anomaly percentage averaged for JJA (Jun-Jul-Aug): (a) The Yangtze River valley; (b) the Huaihe River valley. Curve: 11-year running mean

(淮河)流域梅雨期降水偏多年的850 hPa纬向风距平变化,发现长江流域降水偏多年的850 hPa风场上东亚最大西风中心出现在 30°N 以南的($27^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$)纬度范围,而淮河流域降水偏多年最大西风中心出现在 30°N 以北的($30^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$)纬度上(图略),这说明850 hPa纬向风场上的东亚副热带最大西风带不仅能清楚反映西太平洋副热带高压位置的南、北变化,同时也与长江、淮河流域雨带变化一致。从图4a、b还清楚可见,500 hPa位势高度场上亚洲中高纬地区($30^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$)的环流有显著差别,长江流域梅雨期降水偏多年亚洲中高纬位势高度场上表现为南北向的“一、+”相关波列(图4a),淮河流域降水偏多年亚洲中高纬位势高度场上呈现东西向的“一、+、-”相关

波列(图4b),这说明长江(淮河)流域梅雨期降水偏多年大气环流最显著的差别是亚洲中高纬呈现南北向(东西向)的波列。

长江、淮河流域梅雨期降水年际变化的东亚中高纬度环流有显著不同,年代际变化环流有什么特征?图5a、b分别是1993~1999年长江流域梅雨期降水偏多时段及2000~2007年淮河流域梅雨期降水偏多时段500 hPa位势高度距平合成(气候态1979~2009年)。长江流域梅雨期降水年代际偏多时段(1993~1999年)500 hPa位势高度距平场亚洲中高纬环流表现为南北向的“一、+”波列分布(图5a);淮河流域梅雨期降水年代际偏多时段(2000~2007年)500 hPa位势高度距平场亚洲中高纬度环流呈东西向的“一、+、-”波列分布(图

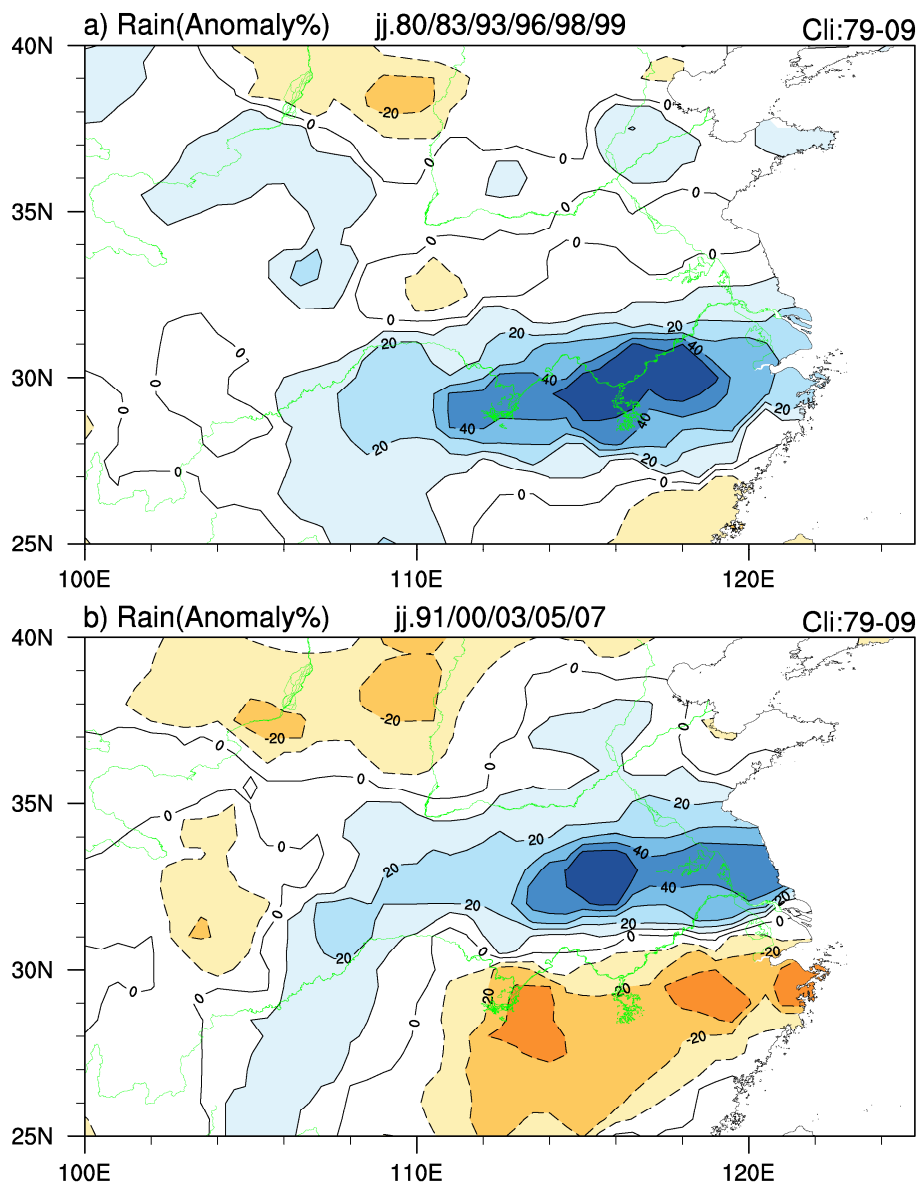


图3 6~7月降水距平百分率合成(单位: %): (a) 长江流域降水偏多年; (b) 淮河流域降水偏多年

Fig. 3 The composite rainfall anomaly percentage (units: %) averaged for JJ (Jun-Jul): (a) Years with more rainfall over the Yangtze River valley; (b) years with more rainfall over the Huaihe River valley

5b)。图5显示的亚洲中高纬大气环流年代际变化的波列特征与图4显示的年际变化波列分布特征一致,这说明亚洲中高纬大气环流型的变化是长江(淮河)流域梅雨期异常降水的最显著的环流内部动力过程。

为什么有些年亚洲中高纬环流呈现为南北向的“一、+”波列、有的年为东西向的“一、+、-”波列?张庆云和陶诗言(1998a)研究指出:500 hPa位势高度场鄂霍茨克海位势高度正异常(阻塞高压)有利东亚高、中、低纬度地区出现南北向的

“+、-、+”相关波列。为了客观定量了解长江(淮河)流域梅雨期降水偏多年北半球500 hPa位势高度场中高纬阻塞情况,我们根据北半球500 hPa位势高度场逐日资料,利用TM90方法分别计算了长江(淮河)流域梅雨期降水偏多年北半球500 hPa位势高度中高纬阻塞活动频次(图6,图中实线为气候平均)。图6清楚显示,北半球500 hPa高度上中高纬度阻塞型与阻塞日数差异最显著的地区位于鄂霍茨克海附近,长江流域梅雨期降水偏多年,鄂霍茨克海阻塞日数平均达16天(图6中长虚线),

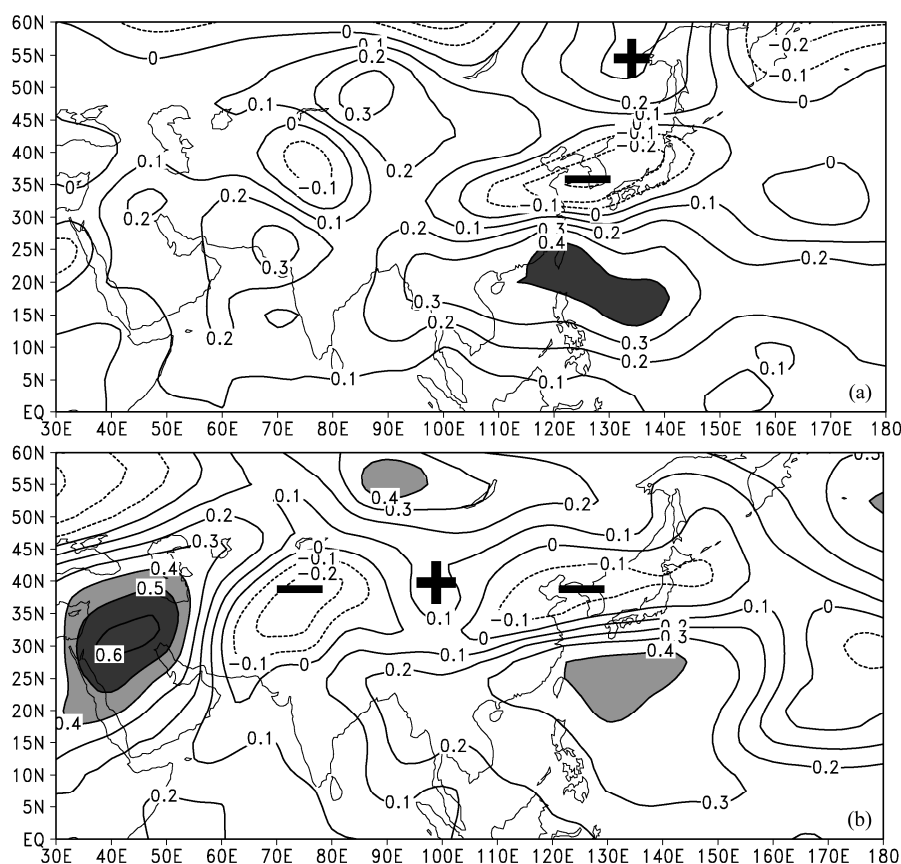


图4 1979~2008年6~7月降水与500 hPa位势高度场相关系数分布:(a)长江流域降水;(b)淮河流域降水

Fig. 4 The correlation coefficient between geopotential height at 500 hPa and rainfall averaged for JJ of 1979–2008: (a) The rainfall over the Yangtze River valley; (b) the rainfall over the Huaihe River valley

淮河流域梅雨期降水偏多年鄂霍茨克海阻塞日数平均为9天(图6中短虚线),其他区域的阻塞日数没有显著差别,这说明长江流域降水偏多年东亚中高纬南北向的“一、+”波列与鄂霍茨克海阻塞高压持续日数偏多有关。宣守丽(2011)的研究还发现,夏季东亚低纬到高纬出现南北向的“+、一、+”波列与春季西太平洋热带海温异常有关,亚洲中高纬出现东西向的“一、+、一”波列与春季大西洋中纬度海温异常有关。

北半球副热带高空西风急流是位于对流层高层具有行星尺度的大气环流系统,它的异常变化对中、低层大气环流异常变化有重要影响;夏季东亚高空急流异常变化对江淮地区降水异常有直接影响,李崇银等(2004)研究指出,江淮地区洪涝与东亚高空急流位置北跳有关,当高空西风急流在6月份有明显北跳,江淮流域一般无洪涝发生;如果急流北跳不明显,则江淮地区梅雨期易出现洪涝。Xuan et al. (2011),宣守丽等(2011, 2013)研究发现,东亚副热带高空西风急流(35°~50°N, 90°~

130°E)位置、强度等变化对夏季各月江淮流域降水异常有重要作用。为此我们进一步探讨长江(淮河)流域梅雨期降水偏多年200 hPa东亚副热带高空西风急流异常特征及其与中层大气环流的关系。

图7是6~7月平均的200 hPa纬向风距平合成。从图7a长江流域降水偏多年东亚副热带高空西风急流变化可见,(35°N~50°N, 90°~130°E)区域(方框内)纬向风距平为显著的正异常;图7b是淮河流域降水偏多年的情况,图中(35°N~50°N, 90°~130°E)区域(方框内)纬向风距平为显著的负异常;从图7a、b还可见,西亚(60°E~80°E)副热带高空西风急流强度无论在长江流域还是淮河流域降水异常偏多年都为正异常,这充分说明东亚副热带高空西风急流加强(减弱)是长江(淮河)流域梅雨期降水异常偏多的重要环流特征。

为了了解东亚副热带高空西风急流加强(减弱)年东亚大气环流内部动力过程,图8给出夏季逐日200 hPa东亚副热带高空西风急流区(90°E~130°E平均)纬向风距平时间—纬度剖面图(阴影

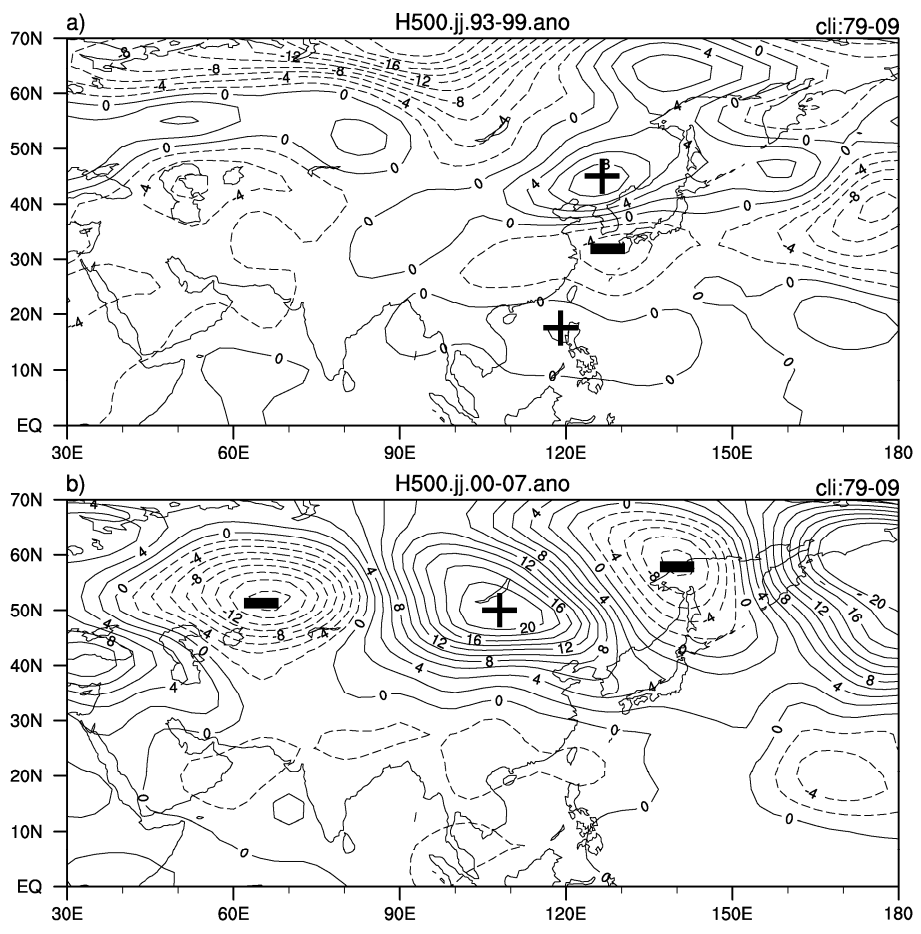


图 5 6~7 月平均 500 hPa 位势高度距平 (单位: gpm) 合成 (气候态为 1979~2009 年): (a) 1993~1999 年; (b) 2000~2007 年

Fig. 5 The composite anomalous geopotential height (units: gpm) at 500 hPa averaged for JJ (climatologic mean: 1979–2009): (a) 1993–1999; (b) 2000–2007

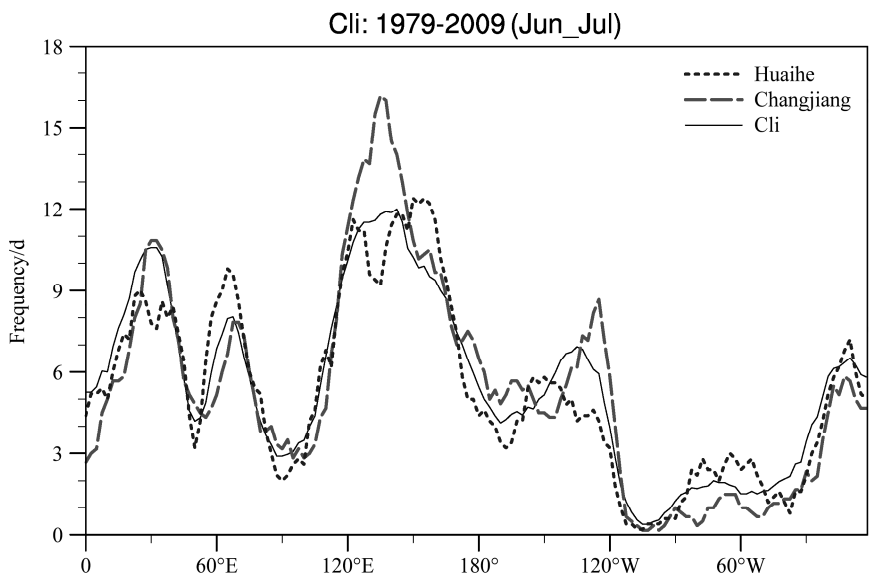


图 6 1979~2008 年 6~7 月北半球 500 hPa 高度场阻塞高压频数 (单位: d)。长虚线: 长江流域降水偏多年; 短虚线: 淮河流域降水偏多年; 实线: 气候平均

Fig. 6 The frequency of blocking occurrence for 500-hPa geopotential height field in middle-high latitudes of the Northern Hemisphere in JJ during 1979–2008 (units: d). Solid line: climatologic mean; long-dashed line: years with more rainfall over the Yangtze River valley; short-dashed line: years with more rainfall over the Huaihe River valley

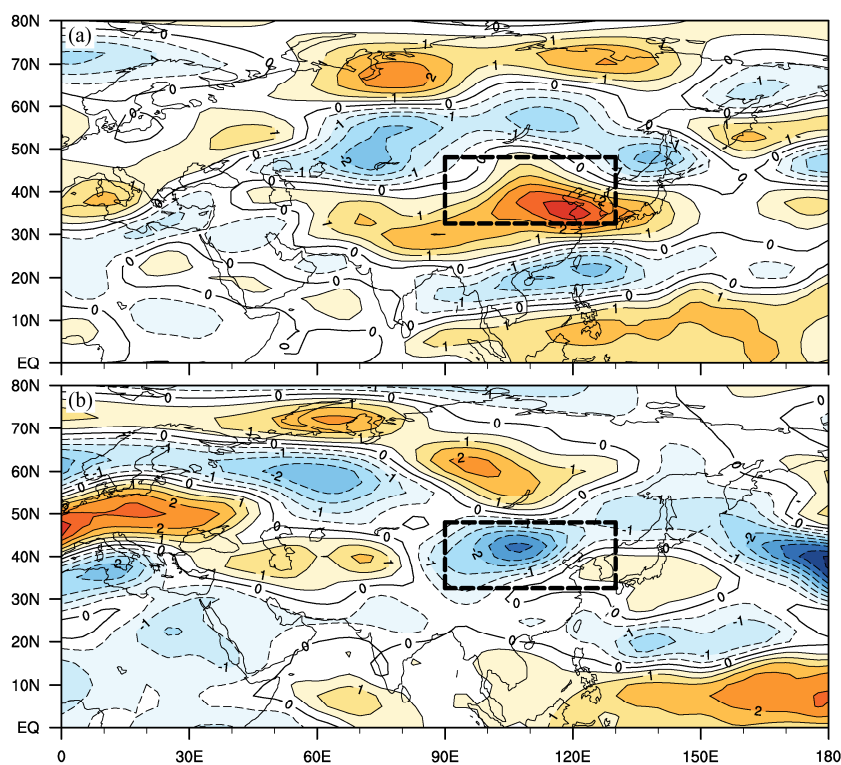


图 7 6~7 月平均的 200 hPa 纬向风距平合成 (单位: m/s): (a) 长江流域降水偏多年; (b) 淮河流域降水偏多年

Fig. 7 The composite anomalous zonal wind (m/s) at 200 hPa averaged for JJ: (a) Years with more rainfall over the Yangtze River valley; (b) years with more rainfall over the Huaihe River valley

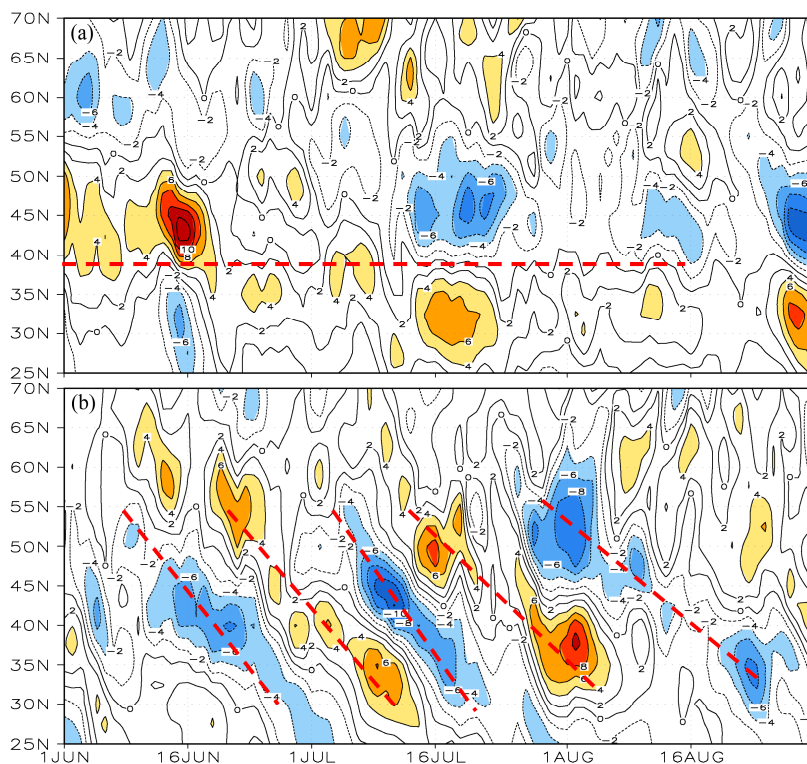


图 8 6~7 月逐日 200 hPa 高度上东亚 (90°E~130°E 平均) 纬向风距平时间—纬度剖面 (单位: m/s): (a) 长江流域降水偏多年; (b) 淮河流域降水偏多年

Fig. 8 Time-latitude cross sections of anomalous zonal wind (m/s) at 200 hPa averaged over 90°E–130°E in JJ: (a) Years with more rainfall over the Yangtze River valley; (b) years with more rainfall over the Huaihe River valley

区代表纬向风距平绝对值大于 4 m/s 的区域)。图 8a 是长江流域降水偏多年东亚副热带高空西风急流逐日变化, 从图可见, 东亚中纬度地区 (40°N 附近) 的纬向风都呈现正距平, 表明东亚大气环流内部动力过程即东亚副热带高空西风急流稳定少动, 这说明东亚副热带高空西风急流强度偏强以及鄂霍茨克海阻塞频次增多与东亚大气环流内部动力过程东亚副热带高空西风急流稳定少动有关; 图 8b 是淮河流域降水偏多年东亚副热带高空西风急流逐日变化, 东亚中纬度地区 (40°N 附近) 的纬向风呈现显著正、负距平交替, 表现为从高纬向低纬方向移动, 这说明东亚副热带高空西风急流强度偏弱以及鄂霍茨克海阻塞频次减少与东亚大气环流内部动力过程东亚副热带高空西风急流不稳定有关。

5 南半球大气环流内部动力过程的差异

上节研究表明: 长江 (淮河) 流域梅雨期降水偏多年北半球大气环流内部动力过程的主要差异

表现为东亚副热带高空西风急流稳定 (移动), 有利霍茨克海阻塞频次增多 (减少), 造成东亚中高纬环流呈现南北向 “一、+” 波列 (东西向 “一、+、-” 波列)。陶诗言等 (1962) 研究指出, 南半球澳大利亚环流的变化能引起东亚夏季纬向和经向环流的交替变化, 进而影响我国东部降水; 范可 (2006) 研究了南半球环流异常对长江中下游夏季旱涝有影响; 刘向等 (2009) 分析了澳洲北部强/弱赤道气流对应的环流配置, 江志红等 (2011) 对 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征进行研究, 上述工作表明南半球环流对北半球环流型以及江淮流域夏季降水异常有重要作用。

为了了解南半球环流异常变化与长江 (淮河) 流域梅雨期异常降水的关系, 图 9a (图 9b) 给出长江 (淮河) 流域降水偏多年 6~7 月平均南北半球 850 hPa 距平风场合成。从图 9a 可见, 长江流域降水偏多年澳大利亚高压和马斯克林高压的异常中心分别位于澳大利亚大陆和马达加斯加大陆东侧, 即澳大利亚反气旋环流异常中心偏东位于

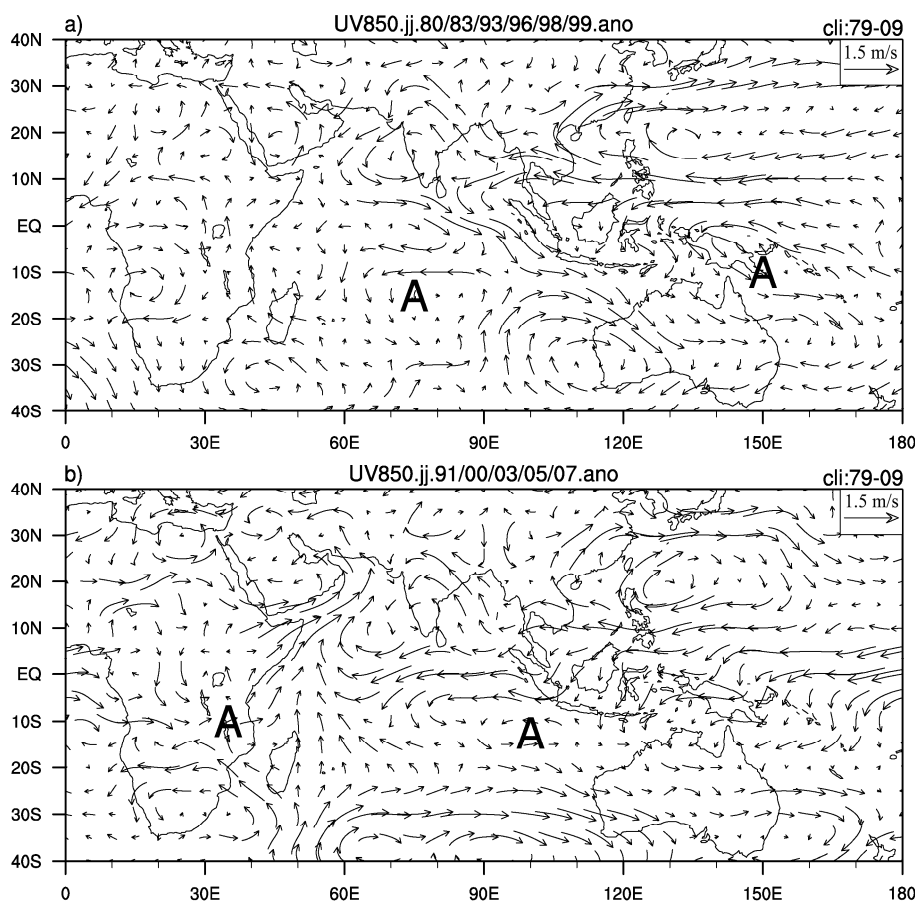


图 9 6~7 月平均 850 hPa 风场矢量距平合成 (气候态为 1979~2009 年) (单位: m/s): (a) 长江流域降水偏多年; (b) 淮河流域降水偏多年

Fig. 9 Composite anomalous wind vector at 850 hPa averaged for JJ (climatologic mean: 1979–2009) (units: m/s): (a) Years with more rainfall over the Yangtze River valley; (b) years with more rainfall over the Huaihe River valley

(15°S, 150°E) 附近, 造成 150°E~180° 越赤道气流加强, 马斯克林反气旋性环流异常中心偏东位于 (15°S, 75°E) 附近, 使得 60°E 附近越赤道气流减弱; 从图 9b 可见, 淮河流域降水偏多年澳大利亚高压和马斯克林高压异常中心分别位于澳大利亚大陆和马达加斯加大陆西侧, 即澳大利亚反气旋性环流异常中心偏西位于 (15°S, 115°E) 附近, 造成 150°E~180° 越赤道气流减弱, 马斯克林反气旋性环流异常中心偏西位于 (10°S, 40°E), 使得阿拉伯海 60°E 附近的越赤道气流加强 (见图 9b)。图 9 清楚说明, 澳大利亚高压及马斯克林高压异常中心偏东 (偏西) 有利西太平洋 150°E~180° (阿拉伯海 60°E 附近) 越赤道气流加强。

西太平洋 150°E~180° 以及阿拉伯海 60°E 附近越赤道气流强弱对长江、淮河流域梅雨期降水有什么影响? 图 10a (图 10b) 给出长江 (淮河) 流域降水偏多年南北半球经向风距平合成, 图中阴影区为大于 0.2 m/s 的南风距平。从图 10a 可见, 长江流

域降水偏多年, 大于 0.2 m/s 的越赤道气流 (阴影区: 南风距平) 出现在 150°E 附近, 南风越过赤道后直达北纬 30°N 长江流域, 然而 50°E~60°E 的阿拉伯海地区越赤道气流呈现为负异常 (北风距平), 这说明长江流域降水异常偏多年主要水汽来源与 150°E 越赤道气流加强有关, 150°E 附近越赤道气流加强以及 60°E 附近的越赤道气流减弱与南半球澳大利亚高压、马斯克林高压异常中心位置偏东有关 (见图 9a)。图 10b 是淮河流域降水偏多年的情况, 大于 0.2 m/s 的越赤道气流 (阴影区: 南风距平) 出现在 50°E~60°E 阿拉伯海附近, 南风越过赤道后向东北方向移动并到达淮河流域, 此时 150°E 附近的越赤道气流呈现为负异常 (北风距平), 这说明淮河流域降水异常偏多年主要水汽来源与 60°E 的越赤道气流加强有关; 60°E 附近越赤道气流加强以及 150°E 附近越赤道气流减弱与南半球澳大利亚高压、马斯克林高压异常中心位置偏西有关 (见图 9b)。

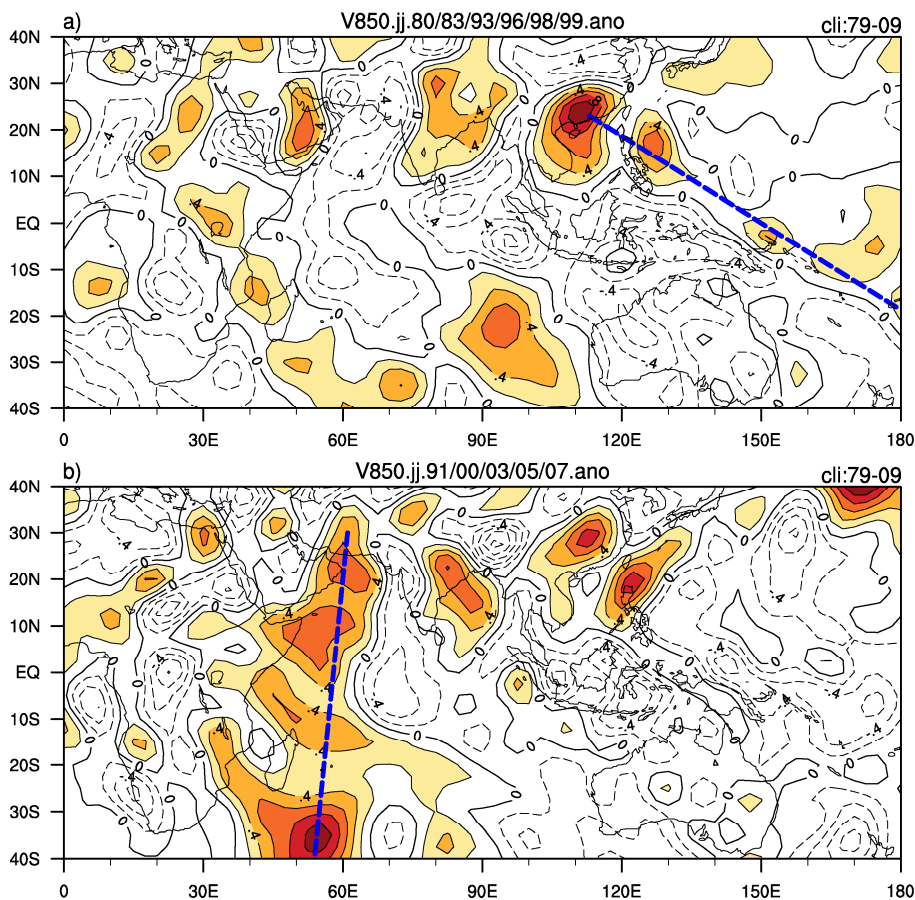


图 10 6~7 月平均的 850 hPa 经向风距平合成 (单位: m/s): (a) 长江流域降水异常偏多年; (b) 淮河流域降水异常偏多年。阴影区为大于 0.2 m/s 的 v 风正距平区

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for meridional wind v (m/s). Shading: $v > 0.2$ m/s

综上所述, 西太平洋 $150^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ (阿拉伯海 $50^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{E}$) 越赤道气流加强是长江 (淮河) 流域降水异常年水汽主要来源; 南半球澳大利亚高压、马斯克林高压中心位置相对偏东 (西), 有利于 $150^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ ($50^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{E}$) 的越赤道气流加强。澳大利亚高压与马斯克林高压中心位置的异常是南半球最重要的大气环流内部动力过程。

6 总结与讨论

本文利用物理量诊断及合成、统计相关等方法, 探讨了长江、淮河流域梅雨期异常降水事件亚洲中高纬环流以及南半球大气环流内部动力过程的差异。研究指出, 长江 (淮河) 流域梅雨期降水异常偏多年 500 hPa 位势高度场亚洲中高纬度环流出现南北向 (东西向) 的波列与东亚中高纬鄂霍茨克海阻塞频次增多 (减少) 以及 200 hPa 高度场上东亚副热带高空西风急流强度加强 (减弱)、稳定 (移动) 有关; 长江 (淮河) 流域梅雨期降水异常偏多年主要水汽来源与南半球澳大利亚高压、马斯克林高压位置偏东 (西) 以及西太平洋 $150^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ (阿拉伯海 $50^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{E}$) 越赤道气流加强有关。

薛峰等 (2003)、薛峰 (2005) 的研究指出马高的年际变化主要取决于南极涛动, 当南半球高纬度绕极低压加深时, 马高加强; 澳高的年际变化则同时与南极涛动和 ENSO (厄尔尼诺和南方涛动) 有关, 当厄尔尼诺发生时, 澳高加强。刘舸等 (2008) 研究指出, 澳高的强弱受澳洲东侧海温 SST 高 (低) 异常影响。宣守丽 (2011) 研究发现, 夏季东亚地区南北向的波列异常与印度洋、西太平洋热带海温异常有关, 东亚西风带波列的异常与北大西洋中纬度海温异常密切相关; 尹志聪和王亚非 (2011) 以及王会军和范可 (2013) 的研究表明, 大气环流季节内、年际、年代际的异常与黑潮、南海、赤道东太平洋海温 (ENSO) 等存在显著的相关, 可见大气环流的异常受不同区域海温因子异常变化影响。长江 (淮河) 流域梅雨期降水异常偏多年东亚副热带高空西风急流强弱及南半球澳大利亚高压、马斯克林高压位置东西变化与南北半球关键区海温因子异常变化的关系及响应过程等将需要进一步通过数值试验等方法进行更深入研究。

参考文献 (References)

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.
- 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.
- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 672–679. Fan Ke. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (3): 672–679.
- Fu Q, Johanson C M, Wallace J M, et al. 2006. Enhanced mid-latitude tropospheric warming in satellite measurements [J]. Science, 312 (5777): 1179.
- Huang Ronghui. 1992. The East Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica, 6 (1): 25–37.
- 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 R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// Proc. International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, China, 40–45.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589–606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589–606.
- 江志红, 梁卓然, 刘征宇, 等. 2011. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 361–372. Jiang Zhihong, Liang Zhuoran, Liu Zhengyu, et al. 2011. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 361–372.
- 况雪源, 张耀存. 2006. 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. 2006. 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.
- Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun, Liu Jian. 2007. Seasonal variations of the East Asian subtropical westerly jet and the thermal mechanism [J]. Acta Meteor. Sinica, 21 (2): 192–203.
- 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 Zuotai, Lin Shizhei, 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]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124 (552): 2597–2623.
- Lin Z D, Lu R Z. 2005. Interannual meridional displacement of the East Asian upper-tropospheric jet stream in summer [J]. Adv. Atmos. Sci., 22 (2): 199–211.
- 刘舸, 张庆云, 孙淑清. 2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 大气科学, 32 (2): 231–241. Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2008. The relationship between circulation and SST anomaly east of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 231–241.
- 刘向文, 孙照渤, 李维京, 等. 2009. 澳洲北部强/弱越赤道气流对应的环流配置 [J]. 大气科学, 33 (6): 1348–1362. Liu Xiangwen, Sun Zhaobo, Li Weijing, et al. 2009. The circulation configuration of strong/weak cross-equatorial flow to the north of Australia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1348–1362.
- 刘屹岷, 洪洁莉, 刘超, 等. 2013. 淮河梅雨洪涝与西太平洋副热带高压季节推进异常 [J]. 大气科学, 37 (2): 439–450. Liu Yimin, Hong Jieli, Liu Chao, et al. 2013. Meiyu flooding of Huaihe River valley and anomaly of seasonal variation of subtropical anticyclone over the western Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 439–450.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 65 (3): 373–390.
- 施能, 朱乾根. 1995. 南半球澳大利亚、马斯克林高压气候特征及其对我国东部夏季降水的影响 [J]. 气象科技, 15 (2): 20–27. Shi Neng, Zhu Qian'gen. 1995. The climatic features of the Australian high and the Mascarene high in Southern Hemisphere and their influence on summer precipitation in eastern China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 15 (2): 20–27.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征 [J]. 气象学报, 32 (1): 1–10. Tao Shiyan, Xu Shuying. 1962. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yantze and Hwai-ho valleys in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (1): 1–10.
- 陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 1962. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征, 气象学报, 32 (2): 91–103. Tao Shiyan, Xu Shuying, Guo Qiyun. 1962. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia in summer (in Chinese), 32 (2): 91–103.
- 陶诗言, 张庆云. 1998a. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 290–299. Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 1998a. The great floods in the Changjiang River valley in 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 290–299.
- 陶诗言, 张庆云. 1998b. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. 大气科学, 22 (4): 399–407. Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 1998b. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 399–407.
- 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.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 2001. 夏季北太平洋副热带高压系统的活动 [J]. 气象学报, 59 (6): 747–758. Tao Shiyan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 2001. An observational study on the behavior of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (6): 747–758.
- Tibaldi S, Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking [J]. Tellus, 42 (3): 343–365.
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. 大气科学, 37 (2): 313–318. Wang Huijun, Fan Ke. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 313–318.
- 汪靖, 刘宣飞, 韩桂荣, 等. 2006. 2005 年江淮流域入梅偏晚的成因分析 [J]. 气象, 32 (12): 76–81. Wang Jing, Liu Xuanfei, Han Guirong, et al. 2006. Causality analysis of late Meiyu over the Changjiang and Huaihe River basins in 2005 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (12): 76–81.
- 徐海明, 何金海, 周兵. 2001. 江淮入梅前后大气环流的演变特征和西太平洋副高北跳西伸的可能机制 [J]. 应用气象学报, 12 (2): 150–158. Xu Haiming, He Jinhai, Zhou Bing. 2001. The features of atmospheric circulation during Meiyu onset and possible mechanisms for westward extension (northward shift) of Pacific subtropical high [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (2): 150–158.
- 徐志清, 范可. 2012. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程 [J]. 大气科学, 36 (5): 879–888. Xu Zhiqing, Fan Ke. 2012. Possible process for influences of winter and spring Indian Ocean SST anomalies interannual variability mode on summer rainfall over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 879–888.
- 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]. 中国科学院大学博士学位论文, 1–119. 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), University of Chinese Academy of Sciences, 1–119.
- 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 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 (2): 231–242.
- 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.
- 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 Shuqin, 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.
- 薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 401–408. Xue Feng. 2005. Influence of the Southern circulation on East Asian summer monsoon [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (3): 401–408.
- 薛峰, 王会军, 何金海. 2003. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季风降水的影响 [J]. *科学通报*, 48 (3): 287–291. Xue F, Wang H J, He J H. 2003. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (5): 429–497.
- 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.
- 杨修群, 黄士松. 1989. 马斯克林高压的强度变化对大气环流影响的数值试验[J]. *气象科学*, 9 (2): 125–138. Yang Xiuqun, Huang Shisong. 1989. The influence of intensity change of Mascarene high on the general circulation of atmosphere—A numerical experiment [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 9 (2): 125–138.
- 尹志聪, 王亚非. 2011. 江淮夏季降水季节内振荡和海气背景场的关系 [J]. *大气科学*, 35 (3): 495–505. Yin Zhicong, Wang Yafei. 2011. The relationship between the intraseasonal oscillation of summer rainfall over the Yangtze–Huaihe River basin and its air–sea background field [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (3): 495–505.
- 张庆云, 陶诗言. 1998a. 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. 1998a. Influence of Asian mid–high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 56 (2): 199–211.
- 张庆云, 陶诗言. 1998b. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水 [J]. *应用气象学报*, 9 (增刊): 16–23. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998b. Tropical and subtropical monsoon over East Asia and its influence on the rainfall over eastern China in summer [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 9 (Supplement): 16–23.
- 张庆云, 陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究 [J]. *气象学报*, 57 (5): 539–548. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 57 (5): 539–548.
- 张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. *大气科学*, 27 (3): 369–380. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. The anomalous subtropical anticyclone in western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (3): 369–380.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2001. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流条件 [J]. *大气科学*, 25 (4): 567–576. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2001. A study of excessively heavy rainfall in the Songhuajiang–Nenjiang River valley in 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (4): 567–576.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003a. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 61 (5): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003a. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 61 (5): 559–568.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003b. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. *大气科学*, 27 (6): 1018–1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003b. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asia during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (6): 1018–1030.
- 张琼, 吴国雄. 2001. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系 [J]. *气象学报*, 59 (5): 569–577. Zhang Qiong, Wu Guoxiong. 2001. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the South Asia high [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 59 (5): 569–577.
- Zhang Y C, Guo L L. 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.