

# 春季 Hadley 环流与长江流域夏季降水关系的数值模拟

周波涛<sup>1,2</sup> 崔 绚<sup>3</sup>

1 国家气候中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 国家气象中心, 北京 100081

**摘要** 观测分析表明, 春季 Hadley 环流异常可以导致东亚大气环流异常变化进而影响长江流域夏季降水的发生。利用中国科学院大气物理研究所 9 层大气环流模式 (IAP9L-AGCM), 对春季 Hadley 环流异常偏强情形下东亚夏季大气环流和长江流域夏季降水的响应进行了数值模拟。模拟结果表明当春季 Hadley 环流异常偏强时, 东亚夏季风减弱, 夏季西太平洋副热带高压和南亚高压加强, 菲律宾以东洋面对流减弱, 长江流域降水增多。初步的数值模拟结果与已有的诊断结果相吻合。

**关键词** 数值模拟 Hadley 环流 大气环流 夏季降水

**文章编号** 1006-9585 (2008) 02-0182-07 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

## Modeling the Relationship between Spring Hadley Circulation and the Summer Precipitation in the Yangtze River Valley

ZHOU Bo-Tao<sup>1, 2</sup> and CUI Xuan<sup>3</sup>

1 *National Climate Center, Beijing* 100081

2 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029

3 *National Meteorological Center, Beijing* 100081

**Abstract** It is indicated by analysis of observed data that spring Hadley circulation anomaly can result in the variability of the East Asian summer atmospheric circulations and further impact the summer precipitation in the Yangtze River valley. A simulation by IAP9L-AGCM is performed on the responses of the East Asian atmospheric circulations and precipitation in the Yangtze River valley to strong spring Hadley circulation. Results show that related to strong spring Hadley circulation, East Asian summer monsoon is weakened and western Pacific subtropical high and South Asian high in summer are strengthened. Convection of east of the Philippines is reduced as well. All of these provide favorable conditions for increasing the precipitation in the Yangtze River valley. the simulation results agree with those from the diagnoses.

**Key words** numerical simulation, Hadley circulation, atmospheric circulations, summer precipitation

## 1 引言

早在 18 世纪, Hadley<sup>[1]</sup>应用角动量守恒原理解释东风信风时提出了大气单圈环流图像。由于低纬是辐射加热区, 大气具有上升运动, 高纬是辐射冷却区, 出现下沉运动。为了补偿在赤道受热上升的空气, 低层的空气流向赤道, 高层的空气流向极地。这样就形成了单圈环流(半球)。这种理论成为多少年来研究大气环流的基础。后来, 许多学者对 Hadley 的单圈环流图像进行了不断补充和完善, 提出南北半球均存在着三圈环流结构, 而非单圈环流结构。

三圈环流包括 Hadley 环流圈、Ferrel 环流圈和极地环流圈。其中, Hadley 环流的作用尤为重要。Hadley 环流作为低纬大气中主要的大尺度环流因子之一, 联系着全球大气环流变化<sup>[2]</sup>。鉴于 Hadley 环流的重要性, 不少研究<sup>[3~9]</sup>对 Hadley 环流的时空结构、气候特征及演变状况进行了探讨。此外, Hadley 环流通过向极地方向输送角动量、水汽与能量影响到中高纬气候异常<sup>[10]</sup>。Hou<sup>[11]</sup>通过数值模拟分析指出, Hadley 环流异常增强可以导致冬季热带以外温度显著增加。Chang<sup>[12]</sup>的研究也表明, 冬季 Hadley 环流异常偏强可以造成中纬度温度升高。最近, Zhou 等<sup>[13]</sup>分析了春季 Hadley 环流年际变化与东亚地区夏季大气环流和长江流域降水的关系及其中的物理机制, 发现春季 Hadley 环流与长江流域夏季降水之间存在显著的正相关关系, 与春季 Hadley 环流异常相联系的大气环流和水汽条件异常为这一关系的存在提供了背景场。不过, 该研究结果是基于观测资料分析基础, 还需要利用数值模式进行验证。春季 Hadley 环流异常偏强时, 长江流域夏季降水以及东亚大气环流异常情况能否在数值模式中重现是本文所关注的问题。

## 2 数值模式和试验设计

本文采用的模式 IAP9L-AGCM 是中国科学院大气物理研究所自行设计发展的 9 层全球大气环流格点模式<sup>[14~16]</sup>。该模式在水平方向采用均匀网格, 水平分辨率为  $5^\circ \times 4^\circ$ , 垂直方向共分为 9

层, 模式层顶为 10 hPa。毕训强<sup>[17]</sup>对 IAP9L-AGCM 模式的模拟性能作了系统性的检验, 证实该模式具有较强的气候模拟能力。其他一些研究工作也表明该模式具有较好的模拟性能。如 Wang 等<sup>[18,19]</sup>利用该模式模拟了年际气候变率以及东亚季风的季节和年季变化, 李崇银等<sup>[20]</sup>证实该模式对大气环流的年代际变化具有很好的模拟能力。该模式还被应用于古气候数值模拟<sup>[21,22]</sup>和跨季度短期气候预测<sup>[23,24]</sup>, 均得到合理的模拟结果。

本研究共设计了 EXP1 (控制试验) 和 EXP2 (敏感试验) 两组试验。EXP1 用来测试模式对现代气候的模拟能力, 同时作为敏感试验的基点。EXP2 代表春季 Hadley 环流异常偏强状况, 其设计基于已有的诊断结果<sup>[13]</sup>, 即在 EXP1 基础上将 1~5 月  $30^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$  间的海温 (SST) 迭加上春季强弱 Hadley 环流年合成 SST 差异 (见文献 [13] 中图 12) 作为 EXP2 试验中的 1~5 月 SST 场, 为加大影响, SST 差值放大 1.5 倍。同时, 为了反映 Hadley 环流对后期印度洋-南海 SST 的超前影响, EXP2 中 6~8 月的 SST 在 EXP1 基础上将 ( $10^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$ ,  $50 \sim 130^\circ\text{E}$ ) 区域里加上  $2^\circ\text{C}$  异常, 其余条件与 EXP1 相一致。如此设计 EXP2 试验的原因在后文作了详细说明。两试验均积分 10 年, 取后 8 年的模式输出结果进行对比分析。

图 1a 为 EXP1 模拟的春季低纬地区平均经圈环流分布。由图可见, IAP9L-AGCM 模式能够模拟出 Hadley 环流圈。大气在赤道附近上升, 在高空由赤道向极地方向运动, 然后在副热带地区下沉, 下沉的空气在低层又向赤道方向运动, 形成闭合的 Hadley 环流圈。相比于 EXP1 模拟的 Hadley 环流强度而言, EXP2 模拟的春季 Hadley 环流要偏强。图 1b 显示,  $10^\circ\text{N}$  附近以北区域为异常的下沉运动, 以南区域为异常的上升运动, 说明 EXP2 模拟的 Hadley 环流的上升支与下沉支均加强, Hadley 环流强度因而偏强。这也表明 EXP2 试验能够用于代表春季 Hadley 环流偏强这一情景。

## 3 结果分析

首先给出诊断分析结果。图 2 为春季 Hadley

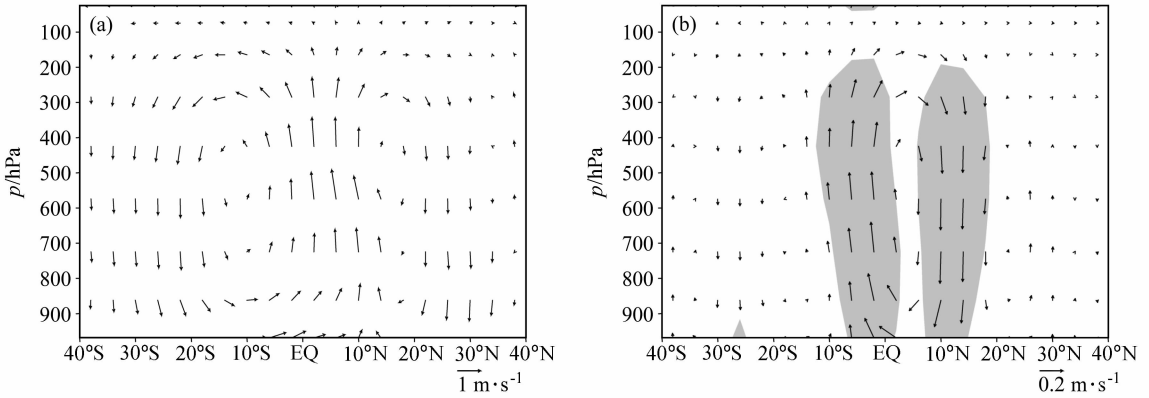


图1 (a) EXP1 模拟的春季经圈环流和 (b) 两试验模拟的经圈环流差值 (EXP2-EXP1)。阴影区表示垂直运动差异通过 0.05 的信度

Fig.1 (a) Spring mean meridional circulation simulated by EXP1 and (b) difference of mean meridional circulation (EXP2-EXP1). Shaded areas indicate vertical velocity difference exceeds 0.05 significance level

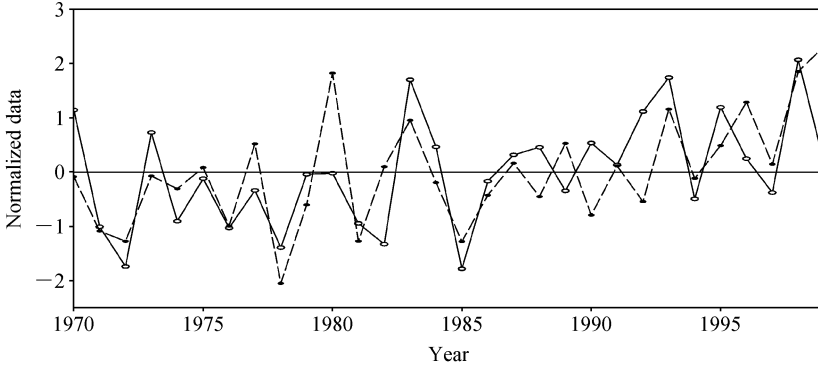


图2 春季 Hadley 环流指数 (简称 HCI, 实线) 与夏季长江流域降水指数 (虚线) 的标准化序列

Fig.2 Time series of normalized spring HCI (solid line) and summer rainfall index in the Yangtze River valley (dashed line)

环流指数 (简称 HCI, 计算方法参见文献 [7]) 与长江流域夏季 (6~8 月) 降水指数 (定义为长江流域附近 17 个站平均降水)。可见, 夏季长江流域降水的年际变化与春季 HCI 的变化形势十分一致, 两者相关系数为 0.59, 通过 0.01 的信度, 表明春季 Hadley 环流偏强 (弱), 长江流域夏季降水偏多 (少)。由于长江流域梅雨期和伏早期的降水状况存在差异, 我们还计算了春季 HCI 分别与夏季梅雨期和非梅雨期降水之间的相关, 发现梅雨期的正相关高于非梅雨期的正相关。亦即, 春季 HCI 与长江流域夏季降水的相关很大程度上反映的是春季 Hadley 环流对长江流域梅雨期降水的影响。不过, 考虑到模式分辨率较粗, 随后的分析仍讨论 6~8 月平均状况。为分析春季 Hadley 环流异常对东亚大气环流的影响, 从研究的时间序列里挑出 6 个强 Hadley 环流年和 6 个弱

Hadley 环流年进行合成分析。图 3 为强、弱 Hadley 环流年对应的夏季 850 hPa 环流场合成差值。由图可见, 30°N 以南为反气旋异常环流, 大陆沿岸对应西南风距平; 30°N 以北为气旋型异常环流, 大陆沿岸对应偏北风距平, 东亚沿岸的这两支异常气流在 30°N 附近汇合。季风槽区 (10~20°N) 呈现东风距平, 梅雨锋区 (25~35°N) 呈现西风距平。在该大气环流条件下, 长江流域夏季降水往往偏多<sup>[25]</sup>。

图 4 给出了强春季 HCI 年对应的夏季 500 hPa 高度场分布和 30 年平均状况。图中显示, 相比于气候平均态而言, 春季 Hadley 环流偏强时, 表征夏季西太平洋副热带高压的 5 880 gpm 等值线覆盖范围加大, 其西界达到 130°E, 比多年平均状况西移了约 10 个经度, 5 860 gpm 等值线也西伸至我国大陆, 意味着春季 Hadley 环流偏强时,

随后夏季西太平洋副热带高压偏强，主体位置偏西偏南，有利于长江流域降水增加<sup>[26]</sup>。同样也给出了对应强春季 HCI 年和 30 年平均的夏季 200 hPa 南亚高压分布（见图 5）。春季 Hadley 环流偏强时，夏季南亚高压偏强，最明显的是出现了 12 550 gpm 高值中心，这也有利于长江流域夏季降水增多<sup>[27]</sup>。

这些诊断结果表明春季 Hadley 环流偏强时，东亚夏季大气环流发生明显异常。研究<sup>[13]</sup>还表明，印度洋—南海海域 SST 是联系春季 Hadley 环流与东亚夏季大气环流和长江流域降水的重要

纽带，在 Hadley 信号从春季传到夏季中起着关键作用。春季 Hadley 环流正异常通过海气耦合作用影响 SST 异常，导致印度洋—南海海域 SST 偏暖。由于 SST 的长记忆特性，SST 这种异常特征从春季持续到夏季，随后影响东亚大气环流（包括西太平洋副热带高压和南亚高压等），进而导致长江流域降水异常。EXP2 试验正是基于此思路设计的。由于海气相互作用是以 Hadley 环流影响海洋为主，所以用春季 Hadley 环流异常下的 SST 作为 EXP2 驱动场来代表 Hadley 环流偏强情景，通过人为改变夏季印度洋—南海 SST 以维持春季 Hadley 环流信号的传播。

那么，数值模式中能否得到类似的结论呢？需要说明的是，EXP2 试验模拟的长江流域夏季降水和相关环流系统，是对春季 Hadley 环流变化造成的 SST 异常的响应，但反映的是 Hadley 环流的影响。图 6 为 EXP2 和 EXP1 两试验模拟的 850 hPa 风场差异。由图可见，30°N 以南东亚地区为异常反气旋环流，在其南侧从热带太平洋区域到南海和中南半岛直至孟加拉湾为东风距平，梅雨锋区为西风距平，这与图 3 结果相一致，表明模式模拟的春季 Hadley 环流异常偏强能导致东亚地区夏季风场异常。

图 7 和 8 分别为 EXP2 与 EXP1 试验模拟的 500 hPa 和 200 hPa 位势高度场分布状况。由图 7 可见，相对于 EXP1 模拟分布而言，EXP2 模拟的

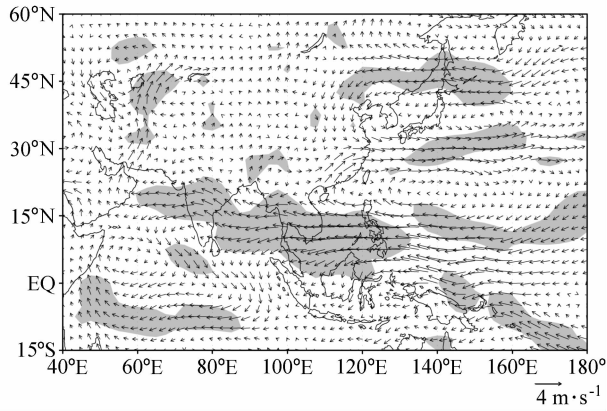


图 3 强、弱 HCI 年夏季 850 hPa 水平风场合成差值。阴影区通过 0.05 的信度

Fig. 3 Composite difference of the summer 850 hPa horizontal wind between strong and weak HCI years. Areas above 0.05 significance level are shaded

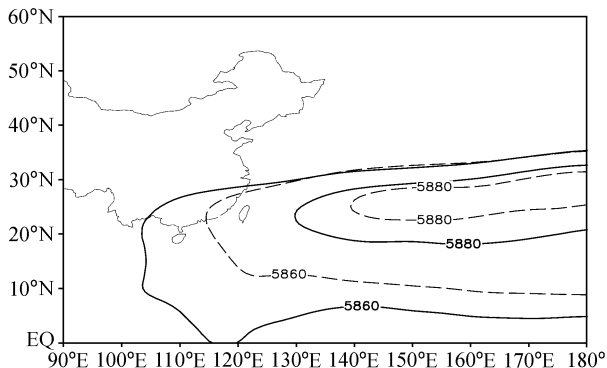


图 4 春季 HCI 强年（实线）和 30 年平均（虚线）对应的夏季 500 hPa 5 860 gpm 和 5 880 gpm 分布

Fig. 4 Composite distribution of the summer 500 hPa geopotential height indicated by the 5 860 gpm and 5 880 gpm contours, corresponding to the strong HCI years (solid line) and 30-year mean (dashed line)

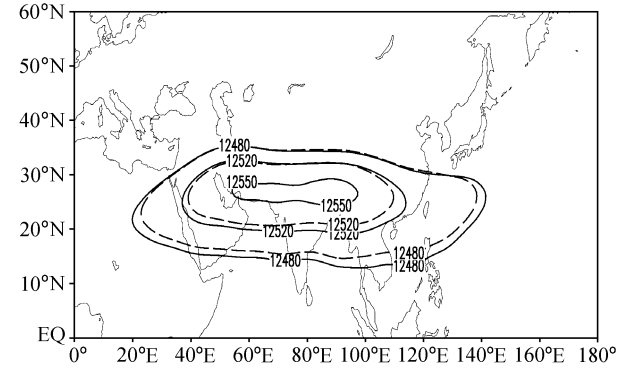


图 5 春季 HCI 强年（实线）及 30 年平均（虚线）对应的夏季 200 hPa 12 480 gpm、12 520 gpm 和 12 550 gpm 分布

Fig. 5 Composite distribution of the summer 200 hPa geopotential height indicated by the 12 480 gpm, 12 520 gpm and 12 550 gpm contours, corresponding to the strong HCI years (solid line) and 30-year mean (dashed line)

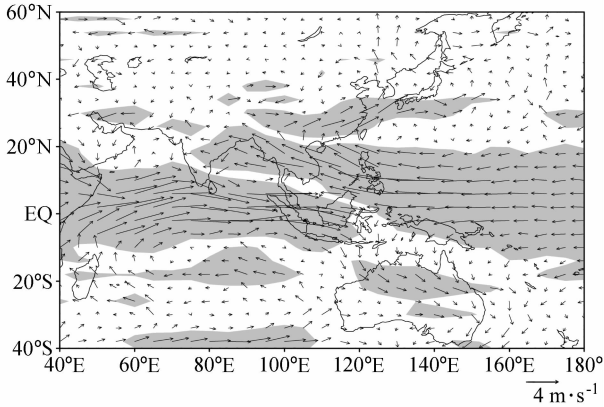


图6 模拟的夏季850 hPa风场差异 (EXP2-EXP1), 阴影区通过0.05的信度

Fig. 6 Simulated difference of the summer 850 hPa horizontal wind (EXP2-EXP1). Areas above 0.05 significance level are shaded

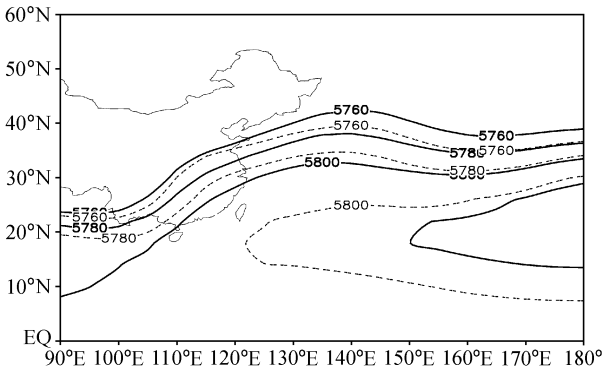


图7 EXP2 (实线) 与 EXP1 (虚线) 模拟的夏季500 hPa位势高度场 (单位: gpm)

Fig. 7 Distribution of the summer 500 hPa geopotential height simulated by EXP2 (solid line) and EXP1 (dashed line)

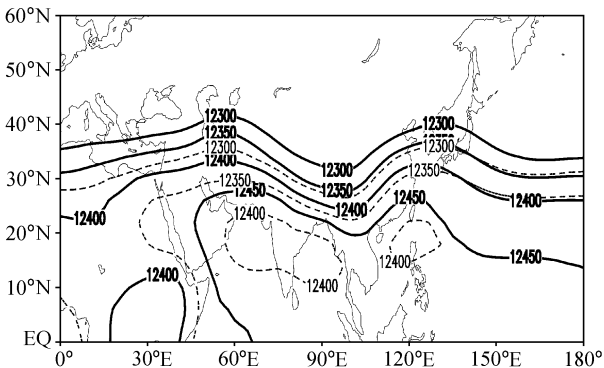


图8 EXP2 (实线) 与 EXP1 (虚线) 模拟的夏季200 hPa位势高度场 (单位: gpm)

Fig. 8 Distribution of the summer 200 hPa geopotential height simulated by EXP2 (solid line) and EXP1 (dashed line)

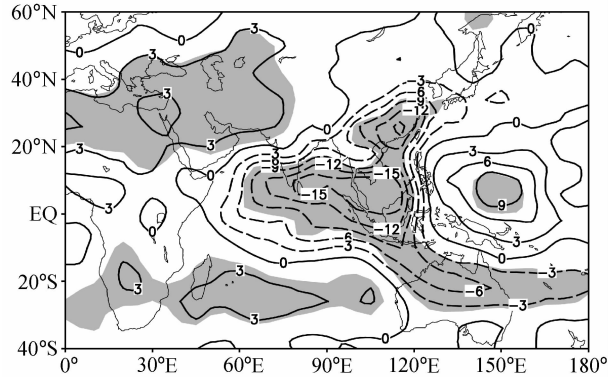


图9 模拟的夏季向外长波辐射 (OLR) 合成差值 (EXP2-EXP1) (单位:  $W \cdot m^{-2}$ )。阴影区通过0.05的信度

Fig. 9 Simulated difference of summer outgoing longwave radiation (OLR) (EXP2-EXP1). Areas above 0.05 significance level are shaded

5 800 gpm 等值线覆盖范围更宽广, 而且 EXP2 模拟出 5 820 gpm 等值线, EXP1 却没有模拟出来, 说明 EXP2 模拟的西太平洋副热带高压比 EXP1 模拟的偏强, 这与观测事实相吻合 (见图 4)。200 hPa 位势高度分布 (见图 8) 表明 EXP2 模拟的南亚高压强度也比 EXP1 模拟的要强。EXP2 模拟结果显示 200 hPa 位势高度场上出现 12 450 gpm 等值线, 而 EXP1 模拟结果中最大值仅为 12 400 gpm。这也与诊断结果类似 (见图 5)。这些均表明相应于诊断结果中春季 Hadley 环流偏强时东亚夏季大气环流的异常特征能在数值模式中得以再现。

图 9 为 EXP2 和 EXP1 模拟的向外长波辐射 (OLR) 合成差值。可以看到, 菲律宾以东洋面 OLR 差值为正, 差值中心为  $9 W \cdot m^{-2}$  (通过 0.05 的信度); 菲律宾以西区域, 包括长江流域、南海、中南半岛和赤道印度洋, OLR 差值为负, 差值中心为  $-15 W \cdot m^{-2}$  (通过 0.05 的信度), 意味着春季 Hadley 环流偏强时, 从赤道印度洋、中南半岛到长江流域, 对流活动加强, 而在菲律宾以东洋面对流活动受到抑制, 这种对流形式可以通过东亚-太平洋行星波列导致长江流域夏季降水异常<sup>[28, 29]</sup>。

上述分析的 IAP9L-AGCM 模式模拟的大气环流和 OLR 差异状况都有利于长江流域夏季降水增多。那么两试验模拟的降水分布是否与此相吻合呢? 图 10 为 EXP2 和 EXP1 两试验模拟的降水

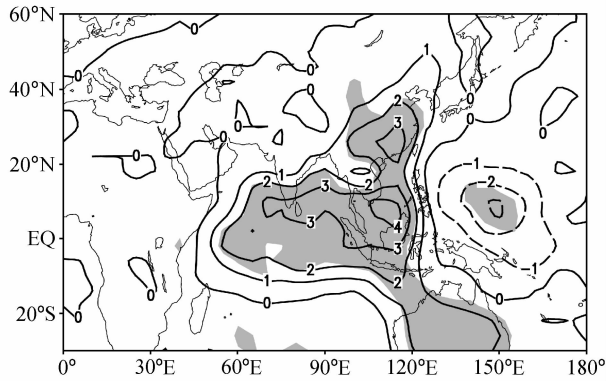


图 10 模拟的夏季降水量合成差值 (EXP2-EXP1) (单位:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。阴影区通过 0.05 的信度

Fig. 10 Simulated difference of summer precipitation (EXP2-EXP1). Areas above 0.05 significance level are shaded

量差值分布。可见, 在菲律宾以东的西太平洋地区出现负降水异常, EXP2 模拟的夏季降水少于 EXP1 的模拟; 在长江流域为大片的正降水异常, EXP2 模拟的夏季降水多于 EXP1 的模拟。说明春季 Hadley 环流偏强情景下长江流域夏季降水增多能在模式中得到体现, 数值模拟结果支持已有的诊断结果。

## 4 结论与讨论

观测分析结果表明, 春季 Hadley 环流偏强可导致东亚夏季大气环流异常, 从而造成长江流域夏季降水增多。本文利用 IAP9L-AGCM 在环流模式中再现了这一特征。数值模拟结果表明, 春季 Hadley 环流偏强情景下, 东亚夏季风减弱, 夏季西太平洋副热带高压和南亚高压增强, 菲律宾以东洋面对流减弱, 因而长江流域降水增多。数值模拟结果与诊断结果相一致。不过需要说明的是, 这种数值模拟只是初步的。由于本文的敏感试验是在已有的诊断结果<sup>[13]</sup>基础上进行设计的, 即利用春季 Hadley 环流异常情况下 SST 的分布作为驱动场, 并以此表示 Hadley 环流异常偏强状况来进行模拟, 春季 Hadley 环流异常能否驱动类似诊断结果的 SST 场还需要利用海洋模式进行验证, 而且由于所用的模式为大气环流模式, SST 场初始异常是人为规定的, 海洋-大气相互作用的耦合没有得到很好地体现, 因此, 还有待于以后利用海洋模式和海气耦合模式进行深入研究,

这也是我们下一步的工作。

## 参考文献 (References)

- [1] Hadley G. Concerning the cause of the general trade winds. *Philosophical Transactions*, 1735, **39**: 58~62
- [2] 吴国雄, Tibaldi S. 平均经圈环流在大气角动量和感热收支中的作用. *大气科学*, 1988, **12**: 8~17  
Wu Gongxiong, Tibaldi S. The role of mean meridional circulation on the angular momentum and sensible heat budget. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1988, **12**: 8~17
- [3] 叶笃正, 朱抱真. 大气环流的若干基本问题. 北京: 科学出版社, 1958. 44~56  
Ye Duzheng, Zhu Baozhen. *Some Fundamental Problems of the General Circulation of the Atmosphere* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1958. 44~56
- [4] Lorenz E N. The nature and theory of the general circulation in the atmosphere. WMO Publication 218. Geneva: WMO Press, 1967. 161
- [5] Oort A H, Rasmusson E M. On the annual variation of the monthly mean meridional circulation. *Mon. Wea. Rev.*, 1970, **98**: 423~442
- [6] Schulman L L. On the summer hemisphere Hadley circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1973, **99**: 197~201
- [7] Oort A H, Yienger J J. Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. *J. Climate*, 1996, **9**: 2751~2767
- [8] Dima I M, Wallace J M. On the seasonality of the Hadley cell. *J. Atmos. Sci.*, 2003, **60**: 1522~1527
- [9] 周波涛, 王会军. Hadley 环流的年际和年代际变化特征及其与热带海温的关系. *地球物理学报*, 2006, **49**: 1271~1278  
Zhou Botao, Wang Huijun. Interannual and interdecadal variations of the Hadley circulation and its connection with tropical sea surface temperature. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2006, **49**: 1271~1278
- [10] Oort A H, Peixoto J P. Global angular momentum and energy balance requirements from observations. *Adv. Geophys.*, 1983, **25**: 355~490
- [11] Hou A Y. Hadley circulation as a modulator of the extratropical climate. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 2437~2457
- [12] Chang E K M. The influence of Hadley circulation intensity changes on extratropical climate in an idealized model. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**: 2006~2024
- [13] Zhou Botao, Wang Huijun. Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley. *J. Geophys Res.*, 2006, **111**: D16109, doi:10.1029/2005JD007006

- [14] Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Zhang Xuehong, et al. A global grid-point general circulation model. Collection of papers presented at the WMO/IUGG NWP Symposium, Tokyo, 4–8 August 1986. Tokyo: J. Meteor. Soc. Japan, 1987, 421~430
- [15] Zhang Xuehong. Dynamical framework of IAP nine-level atmospheric general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**: 67~77
- [16] Liang Xinzong. Description of a nine-level grid point atmospheric general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, **13**: 269~298
- [17] 毕训强. IAP 九层大气环流模式及气候数值模拟. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1993  
Bi Xunqiang. IAP 9-level atmospheric general circulation model and climate simulation. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1993
- [18] Wang Huijun, Xue Feng, Bi Xunqiang. The interannual variability and predictability in a global climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**: 554~562
- [19] Wang Huijun, Bi Xunqiang. The East Asian monsoon simulation with IAP AGCMs-A composite study. *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, **13**: 261~264
- [20] 李崇银, 穆明权, 毕训强. 大气环流的年代际变化 II. GCM 数值模拟研究. *大气科学*, 2000, **24**: 739~748  
Li Chongyin, Mu Mingquan, Bi Xunqiang. Inter-decadal variations of atmospheric circulation. Part II: GCM simulation study. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24**: 739~748
- [21] Wang Huijun. The Mid-Holocene climate simulated by a grid-point AGCM coupled with a Biome model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 205~218
- [22] Jiang Dabang, Wang Huijun, Drange H, et al. Last Glacial Maximum over China: Sensitivities of climate to paleovegetation and Tibetan ice sheet. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 4102, doi:10.1029/2002JD002167
- [23] 郎咸梅, 王会军, 姜大膀. 中国冬季气候可预测性的跨季度集合数值预测研究. *科学通报*, 2003, **15**: 1700~1704  
Lang Xianmei, Wang Huijun, Jiang Dabang. Extraseasonal ensemble numerical predictions of winter climate over China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **15**: 1700~1704
- [24] 郎咸梅, 王会军, 姜大膀. 应用 9 层全球大气格点模式进行的跨季度短期预测系统性试验. *地球物理学报*, 2004, **47**: 19~24  
Lang Xianmei, Wang Huijun, Jiang Dabang. Extraseasonal short-term predictions of summer climate with IAP9L-AGCM. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47**: 19~24
- [25] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. *气象学报*, 2003, **61**: 559~568  
Zhang Qingyun, Tao Shiyun, Chen Lieting. The interannual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61**: 559~568
- [26] 陈烈庭, 吴仁广. 中国东部夏季雨带类型与前期北半球 500 hPa 环流异常的关系. *大气科学*, 1998, **22**: 849~857  
Chen Lieting, Ru Renguang. Relationship between summer rainbelt patterns in the Eastern China and 500 hPa circulation anomalies over the Northern Hemisphere. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22**: 849~857
- [27] 张琼, 吴国雄. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系. *气象学报*, 2001, **59**: 569~577  
Zhang Qiong, Wu Guoxiong. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the south Asia high. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59**: 569~577
- [28] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **65**: 373~390
- [29] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. *大气科学*, 1994, **18**: 141~151  
Huang Ronghui, Sun Fengying. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1994, **18**: 141~151