

陈红, 薛峰. 2013. 东亚夏季风和中国东部夏季降水年代际变化的模拟 [J]. 大气科学, 37 (5): 1143–1153, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12130.
Chen Hong, Xue Feng. 2013. Numerical simulation of the decadal variations in the East Asian summer monsoon and summer rainfall in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1143–1153.

东亚夏季风和中国东部夏季降水 年代际变化的模拟

陈红 薛峰

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

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所发展的第四代大气环流模式模拟了 1970 年代末东亚夏季风和相关中国东部夏季降水年代际变化。结果表明, 在给定的观测海温强迫下, 模式能模拟出东亚夏季风的年代际减弱及相关的环流场变化, 包括东亚沿海的偏北风异常以及西太平洋副高的形态变化, 模式还较好地再现了中国东部夏季降水的雨型变化, 即长江流域降水偏多, 而华北和华南偏少, 但位置略偏南。基于奇异值分解 (SVD) 的分析表明, 热带海洋变暖是这次东亚夏季风的年代际减弱的主要因素, 这与太平洋年代际振荡 (PDO) 在 1970 年代末期的位相转变有关。此外, 模式还较好地模拟了长江流域的变冷趋势, 进而减弱了海陆温差, 使东亚夏季风减弱。

关键词 年代际变化 东亚夏季风 夏季降水 太平洋年代际振荡

文章编号 1006-9895(2013)05-1143-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12130

Numerical Simulation of Decadal Variations in the East Asian Summer Monsoon and Summer Rainfall in Eastern China

CHEN Hong and XUE Feng

International Center for Climate and Environmental Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The fourth-generation atmospheric general circulation model, developed by the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, was used to simulate decadal variations in the East Asian summer monsoon (EASM) and in summer rainfall in eastern China during the late 1970s. It was shown that the model simulated well the decadal weakening of the EASM, a northerly anomaly along the East Asian coast, and changes in the western Pacific subtropical high. The model also reproduced the anomalous summer rainfall pattern in eastern China (i.e., an increase in the Yangtze River basin and a decrease in North China and South China), except that the modeled pattern was located somewhat south of the observed pattern. Further analysis, using singular value decomposition, indicated that the decadal weakening in the EASM was mainly driven by warming in the tropical ocean, which is related to the Pacific decadal oscillation (PDO) phase transition in the late 1970s. The model also simulated the cooling trend in the Yangtze River basin, which led to a decrease in the thermal contrast between the continent and the ocean, and a weakened EASM.

Keywords Decadal variation, East Asian summer monsoon, Summer rainfall, Pacific decadal oscillation

收稿日期 2012-08-15, 2013-01-10 收修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110201, 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB951901、2009CB421407

作者简介 陈红, 女, 1972 年生, 博士, 副研究员, 从事气候预测研究。E-mail: chh@mail.iap.ac.cn

通讯作者 薛峰, E-mail: fxue@lasg.iap.ac.cn

1 引言

研究表明,东亚夏季风和中国夏季降水具有显著的年代际变化,其中最为显著的是发生在 1970 年代末的年代际衰减,其主要特征表现为夏季西南季风环流的减弱和中国东部雨型的变化(Wang, 2001; 赵振国等, 2008)。在 1970 年代末之后,中国东部夏季盛行的西南季风减弱,西太平洋副热带高压(简称副高)偏向西南,强度增强,由此导致向北的水汽输送减弱,华北地区发生持续性干旱,导致该地区水资源匮乏;长江流域进入多雨期,易于发生洪涝灾害,形成了所谓的“南涝北旱”型降水分布(黄荣辉等, 2006)。同时,在其他区域和季节也能发现类似的年代际变化信号(宇如聪等, 2008),表明东亚夏季风的年代际变化与全球气候系统的变化有关。这次年代际变化不仅直接影响到中国夏季雨型的变化,也影响到中国夏季降水的年际变化及其预测,中国东部夏季降水与 ENSO 的关系明显减弱,而与南半球环流的关系则显著增强(高辉和王永光, 2007; 孙丹等, 2012),这表明在汛期预测中也必须充分考虑年代际背景的变化。

有关这次年代际变化的成因,目前有多种观点,其中关注最多的是海洋变化造成的影响。观测分析表明,东亚夏季风环流和降水的变化与热带海洋变化特别是热带太平洋和印度洋海表温度(SST)的变暖有密切关系(Xue, 2001; Gong and Ho, 2002)。其后,有许多工作利用观测 SST 驱动大气环流模式模拟东亚夏季风的年代际变化,多数模式能模拟出与这次年代际变化相关的季风环流减弱包括副高加强西伸等主要特征,但模拟的降水则有较大误差(曾刚等, 2007; Zhou et al., 2009; Fu et al., 2009)。另外一些研究认为这次年代际变化与全球海气耦合系统的年代际变化特别是北太平洋年代际振荡(PDO)的位相转换有关(朱益民和杨修群, 2003; 杨修群等, 2005; 张庆云等, 2007)。1970 年代末之后, PDO 由冷位相转为暖位相,即中纬度北太平洋变冷,而热带中东太平洋变暖,并由此导致东亚夏季风减弱和中国夏季雨型的转变。另一方面,由于东亚季风的强度与海陆之间的温差有关,除海洋的影响之外,还有一些研究关注陆表过程变化对东亚夏季风年代际变化的影响,如 Xu et al. (2007) 发现 1970 年代末东亚地区春季陆

变冷,导致夏季海陆温差减弱,朱玉祥等(2009)发现青藏高原冬春季积雪在 1977 年之后显著增多,夏季感热减弱,并由此导致海陆温差减弱以及东亚夏季风的减弱。

上述研究多关注某一个因子的影响,目前尚不完全清楚海洋与陆地变化中哪个因子占主导地位。此外,虽然多数大气环流模式能模拟出东亚夏季风环流的变化,但未能模拟出与之相关的中国夏季雨型变化,这是否与模式自身的模拟性能有关或者是其他原因,也需要进一步研究。本文利用中国科学院大气物理研究所近年发展的第四代大气环流模式(简称 IAP4),基于 1958~1999 年的观测 SST 资料,驱动模式进行长期积分试验,并与观测资料对比分析了该模式对东亚夏季风环流和中国东部夏季降水的模拟情况,以进一步揭示东亚夏季风年代际变化的机理,为东亚气候的年代际变化预估提供理论基础。

2 模式和资料

本文所用模式 IAP4 是由中国科学院大气物理研究所近年发展的第四代大气环流模式,模式在继承前三代模式动力框架优点的基础上,引入了许多新的特色,物理过程同美国国家大气研究中心(NCAR)的 CAM3.1 基本相同。模式的水平分辨率为 $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$,垂直方向为 26 层。与前几代模式相比,模式的分辨率有很大提高,物理过程也更加完备。模拟结果表明,模式对全球和东亚气候有较好的模拟能力,其总体模拟性能与 CAM3.1 相当(张贺等, 2009)。利用 Hadley 气候中心提供的观测 SST 和海冰资料(Rayner et al., 2003),驱动该模式进行长期积分试验。为保证模拟结果的可靠性,共进行四组不同初始值的试验,取集合平均后 1958~1999 年共 42 年模拟结果进行分析。

本文利用以下一些资料来分析模式的模拟结果,大气环流资料为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 1958~1999 年月平均再分析资料,资料的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,包括风场和高度场等(Uppala et al., 2005)。本文还利用中国气象局提供的中国区域 160 站月平均降水资料以及 CRU (Climate Research Unit at the University of East Anglia) 提供的月平均陆地气温资料,分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (New et al., 2002)。

3 东亚夏季风和中国东部夏季降水的年代际变化

根据前人的研究结果,以 1978 年为这次年代际变化的分界点,并以 1979~1999 年和 1958~1978 年气候平均值的差值表示年代际变化。图 1 给出观测和 IAP4 模拟的中国夏季(6~8 月平均值)降水年代际变化的差值。观测显示(图 1a),与 1958~1978 年相比,1979~1999 年中国夏季降水型有明显变化,主要表现为长江流域降水明显增加,尤其是长江中下游地区,中心超过 2 mm/d,而华北和华南降水则减少,中国东部夏季降水型由所谓的“北多南少”转变为“南多北少”或“南涝北旱”。模式能基本模拟出上述雨型的年代际变化分布(图 1b),但与观测相比,模拟雨型变化的分布整体偏南,观测降水增值中心在长江流域,模拟则在江南,但总体上仍在模式的分辨率范围之内。此外,模拟的降水量变化也明显低于观测。

由于长江流域降水的年代际变化最为明显,图 2 进一步给出 1958~1999 年长江中下游地区夏季降水异常的时间序列,观测资料为中国气象局提供的站点观测数据,长江中下游地区为国家气候中心规定的 17 个代表站的平均值(陈兴芳和赵振国,2000),其中虚线为 9 年滑动平均,代表年代际分量。观测显示(图 2a),长江流域夏季降水在 1978 年之前偏少,特别是 1960 年代,而在 1978 年之后,

降水明显增多,1990 年代则更为明显。模式能模拟出降水年代际变化的总体趋势,包括 1960 年代的少雨期和 1990 年代的多雨期,模拟与观测在 1958~1999 年间年代际分量的相关高达 0.84,说明模式能较好模拟出长江流域夏季降水的年代际变化。模拟与观测的主要差别表现为年代际转折的时间,观测为 1978 年,而模拟为 1970 年代中期,较观测偏早。

夏季雨型的年代际变化与东亚夏季风环流的变化有关。如图 3a 所示,1978 年之后,850 hPa 东亚沿海出现明显的偏北风异常,西南季风明显减弱,不利于水汽向华北地区输送。另外,长江流域到日本一带为气旋性异常环流,有利于该地区降水增多,进而形成“南多北少”的夏季降水分布。模式能较好模拟出东亚沿海的偏北风异常以及长江流域到日本一带的气旋性环流异常(图 3b),这与模式能模拟出中国东部夏季雨型的转变有直接关系。

西太平洋副热带高压(副高)是东亚夏季风的一个主要环流系统,其形态变化尤其是其脊线的南北变动对中国夏季降水的分布有重要影响(苏同华和薛峰,2010)。图 4 给出年代际变化前后观测和模拟的 500 hPa 副高分布,观测以通常的 5880 gpm 等值线代表,但模拟的副高较观测系统性偏强,因而模式中副高以 5920 gpm 等值线为代表。观测显示,1978 年之后,副高明显偏向西南,强度增强,副高的这种形态变化有利于长江流域降水增加。模

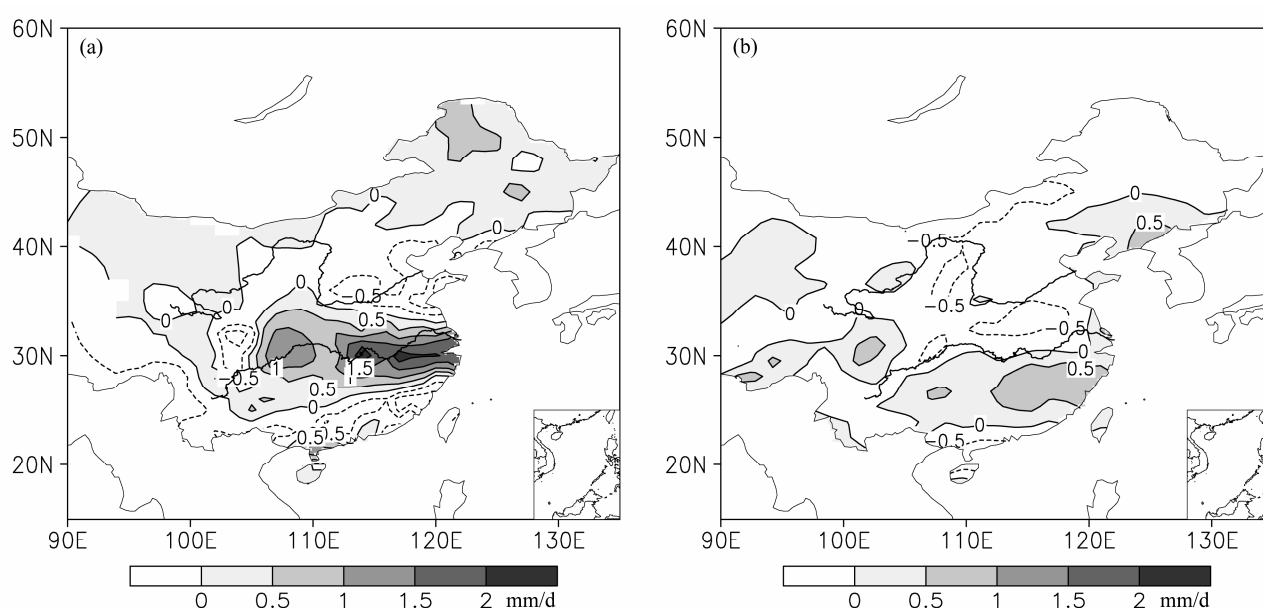


图 1 中国东部夏季降水的年代际变化(单位: mm/d): (a) 观测; (b) 模拟

Fig. 1 The decadal variation of summer rainfall in eastern China (units: mm/d): (a) Observation; (b) simulation

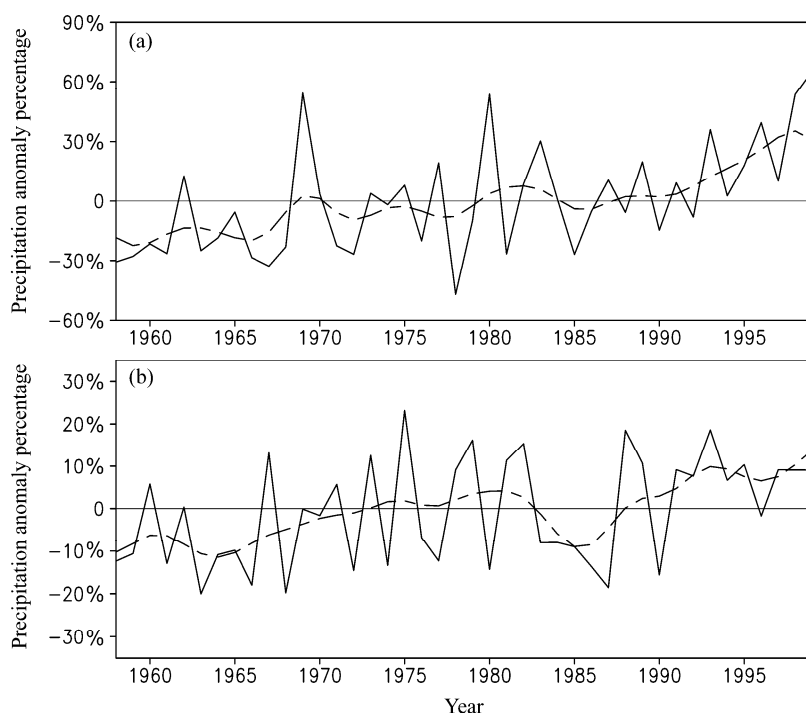


图2 1958~1999年长江流域夏季降水距平百分率:(a)观测;(b)模拟。实线为距平值,虚线为9年滑动平均

Fig. 2 Summer rainfall anomaly in the Yangtze River basin during 1958–1999: (a) Observation; (b) simulation. The solid and dashed lines represent the anomaly and corresponding 9-year running mean, respectively

式能模拟出副高的变化趋势,但与观测相比,模拟副高的偏南趋势更为明显,这与图1中模拟的雨型变化整体偏南是一致的。

4 机理分析

上一节的分析表明,在观测 SST 的驱动下, IAP4 能模拟出东亚夏季风环流和中国东部夏季降水年代际变化的主要特征,说明海温强迫因子对年代际变化有重要作用。本节利用奇异值分解(SVD)分析中国夏季降水和 SST 的时空变化特征,以进一步揭示 SST 变化对中国夏季降水年代际变化的影响。

在进行 SVD 分解之前,首先对 SST 和降水做 9 年滑动平均,得到年代际分量。分解结果表明,第一模态的方差贡献率最高,达到 47%,相应的时间系数相关为 0.96。图 5 为中国夏季降水和同期海温 SVD 的第一模态(SVD1)的异质相关分布及其时间变化,图 5a 显示,长江流域为显著的正相关,最大相关在长江中下游地区,而华北和华南地区呈负相关,这种相关分布与图 1 中中国东部夏季降水的年代际变化十分类似。同期 SST 的相关分布显示,热带海洋为显著的正相关,特别是热带印度洋

和西太平洋以及热带东太平洋,相关系数超过 0.6,而中纬度北太平洋为显著负相关。对应的时间系数显示(图 5c),这种年代际转折发生在 1970 年代末期,降水和 SST 的转折时间完全一致,前期为负,后期为正,到 1990 年代末达到最大。

上述相关分布类似于 PDO 海温异常的分布特征,即北太平洋 SST 异常与东太平洋呈反位相变化。图 6 进一步给出 SVD1 的 SST (即图 5c 中的实线)和 PDO 指数的时间序列,其中 PDO 指数是指北太平洋地区(20°N 以北) SST 正交函数分解的第一模态(EOF1),资料取自网站 (<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> [2012-08-05]),并取 9 年滑动平均以得到年代际分量。可以看到,二者在年代际尺度上的变化趋势非常相似,相关系数高达 0.72,只是在 1990 年代末期才显示出较大差异。PDO 在 1970 年代末从负位相转变为正位相,对应于北太平洋的变冷和东太平洋的变暖, SST 异常由正转负的时间稍滞后于 PDO,这显示了 PDO 位相转变对 SST 异常分布的影响。因此,在年代际时间尺度上,中国东部夏季雨型的变化与热带海洋的变暖及相关的 PDO 位相转换有密切关系。

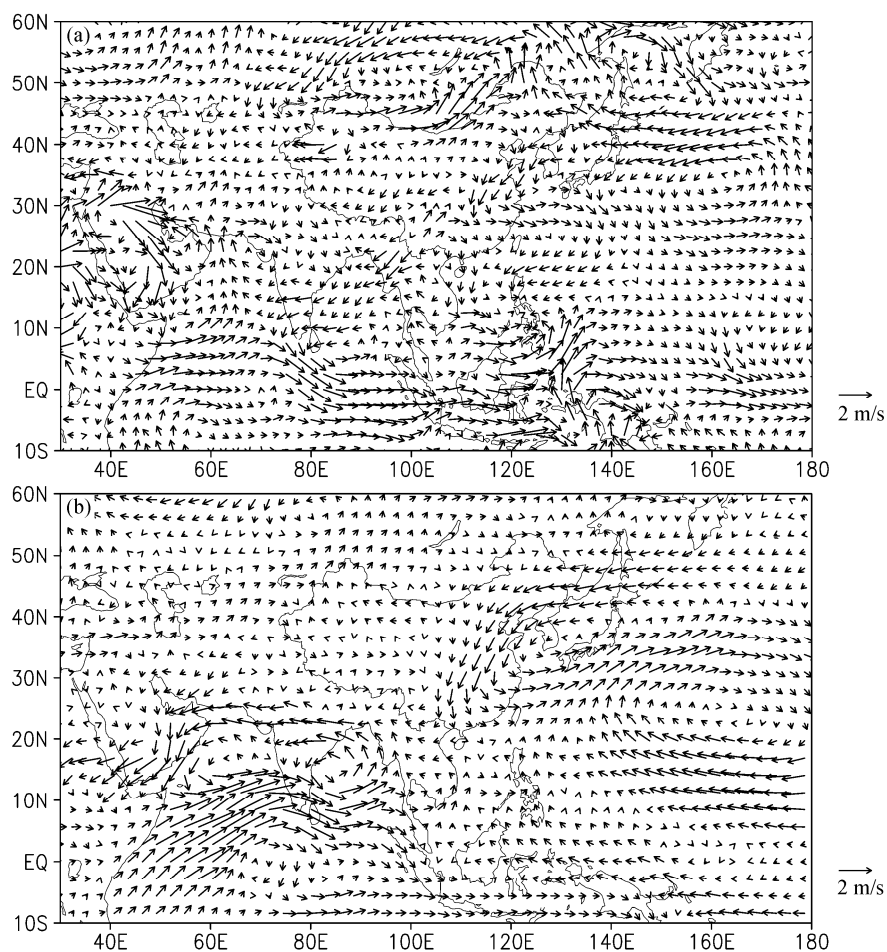


图 3 850 hPa 风场的年代际变化：(a) ECMWF 再分析资料；(b) 模拟

Fig. 3 The decadal variation of 850-hPa wind: (a) ECMWF reanalysis; (b) simulation

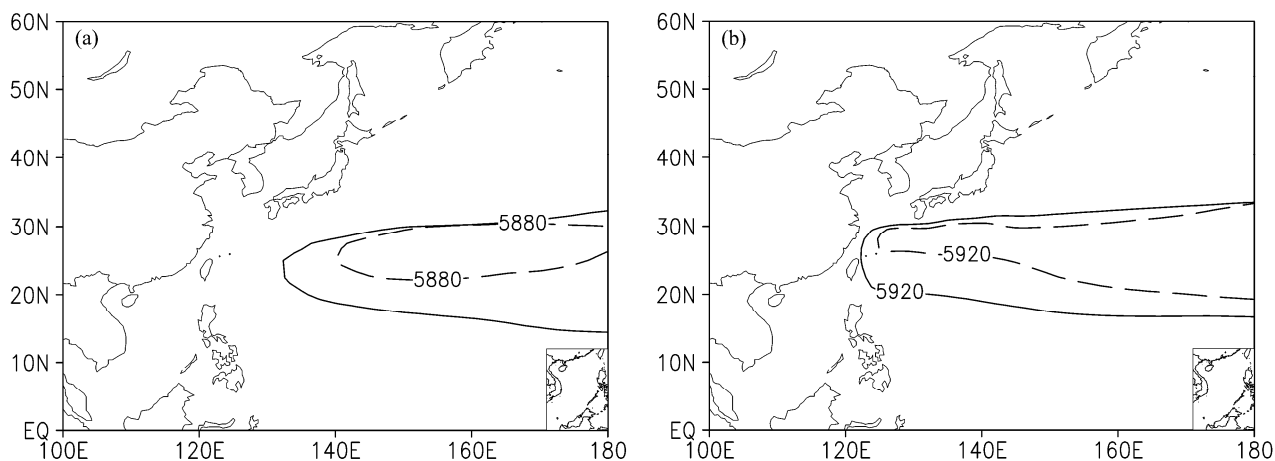


图 4 500 hPa 西太平洋副高 (单位: gpm): (a) ECMWF 再分析资料; (b) 模拟。实线为 1979~1999 年平均, 虚线为 1958~1978 年平均

Fig. 4 The western Pacific subtropical high at 500 hPa: (a) ECMWF reanalysis; (b) simulation. The solid and dashed contours represent the climatological means during 1979–1999 and 1958–1978, respectively (units: gpm)

对模式模拟的结果进行类似的 SVD 分解, 与观测一致, 第一模态的方差贡献率最高, 达到 58%, 相应时间系数的相关为 0.95。图 7 给出模式

模拟的中国夏季降水和同期海温 SVD 第一模态异质相关分布, 因采用观测 SST 驱动, SST 分布与图 5a 基本一致。降水相关分布显示 (图 7a), 长江以

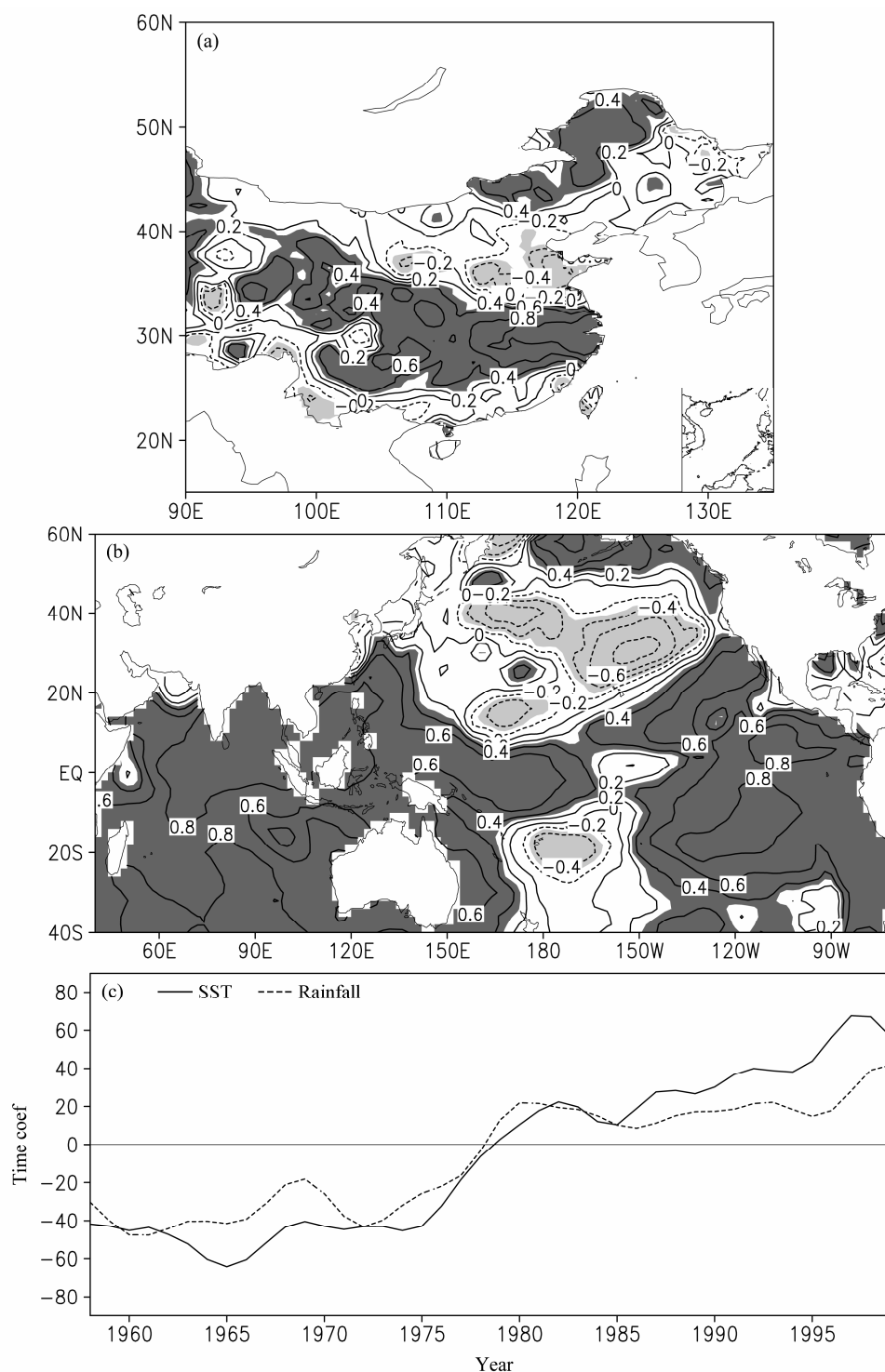


图5 中国东部夏季降水与观测海表温度 SVD 的第一模态异质相关分布和时间系数 (单位: 无量纲): (a) 中国东部降水, (b) 海表温度(SST), (c) 时间系数 (实线为 SST, 虚线为降水)。阴影区为通过 95% 显著性检验的区域

Fig. 5 The heterogeneous correlation of first singular value decomposition (SVD) mode between summer rainfall in eastern China and sea surface temperature (SST) and the corresponding time series (units: dimensionless): (a) Summer rainfall in eastern China, (b) SST, (c) the corresponding time series of SST (solid line) and rainfall (dashed line). Regions above 95% confidence level are shaded

南为正, 而两侧为负, 正负异常中心比观测偏南, 这与模式模拟的降水和副高变化偏南是一致的。对应的时间系数变化显示(图 7c), 年代际转折在 1970

年代末期, 这与观测一致(图 5c)。此外, 与观测的降水相比, 模拟降水的变化幅度明显偏低。

图 8 进一步给出年代际尺度长江流域夏季降水

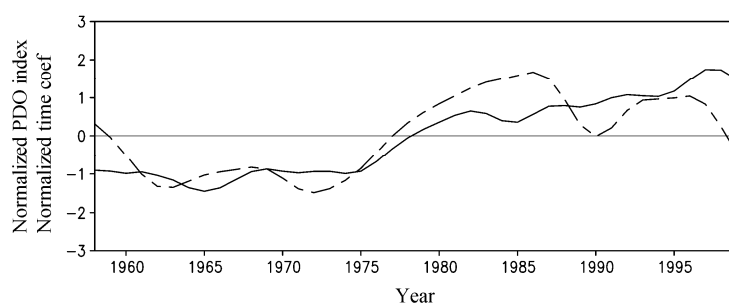


图 6 归一化的 SVD 分解第一模态 SST 时间系数 (实线) 与 PDO 指数 (长虚线) 的时间序列

Fig. 6 The normalized time series of the first SVD mode of SST (solid line) and Pacific decadal oscillation (PDO) index (dashed line)

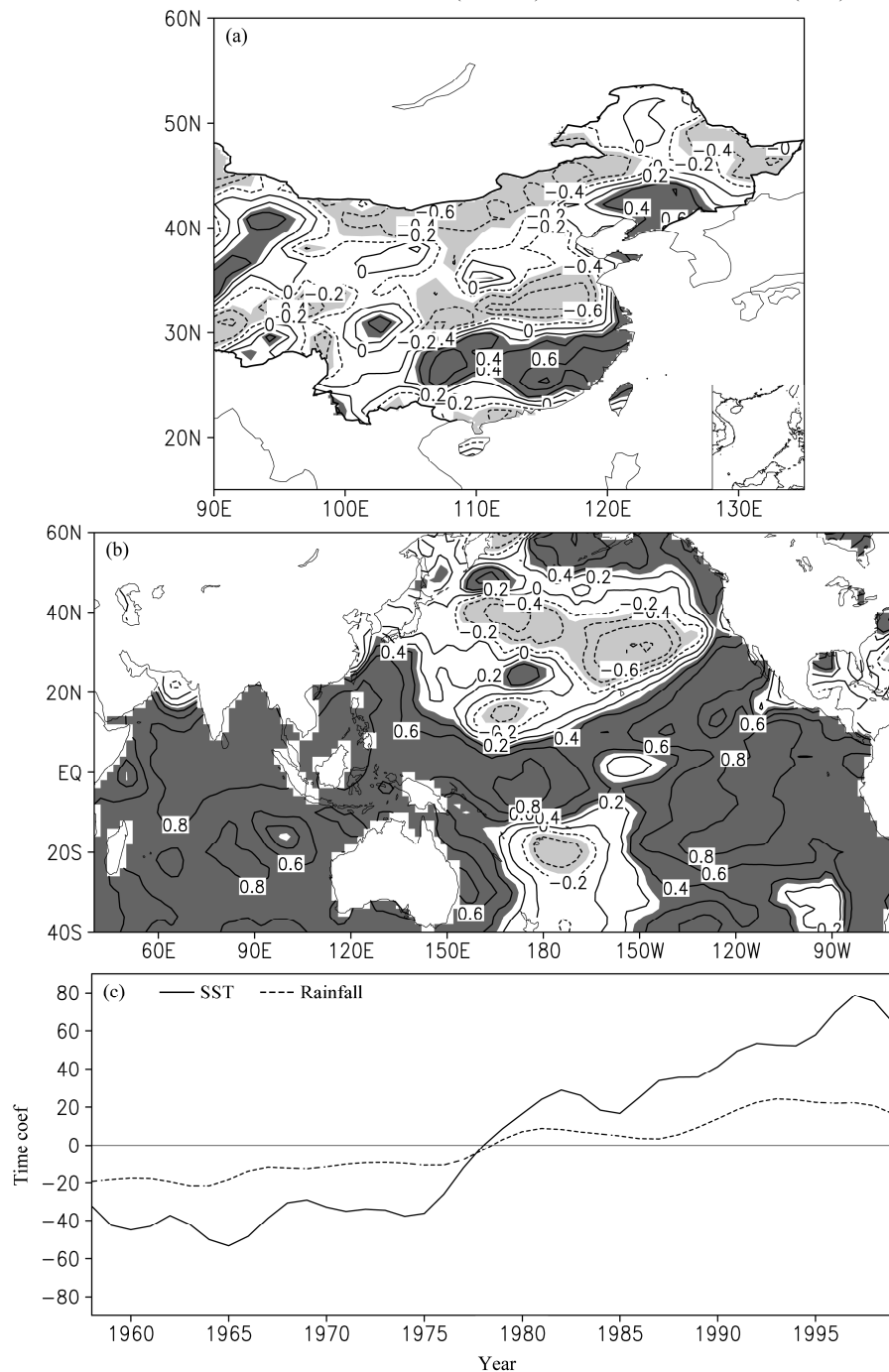


图 7 同图 5, 但为模拟结果

Fig. 7 Same as Fig. 5, except for the simulation result

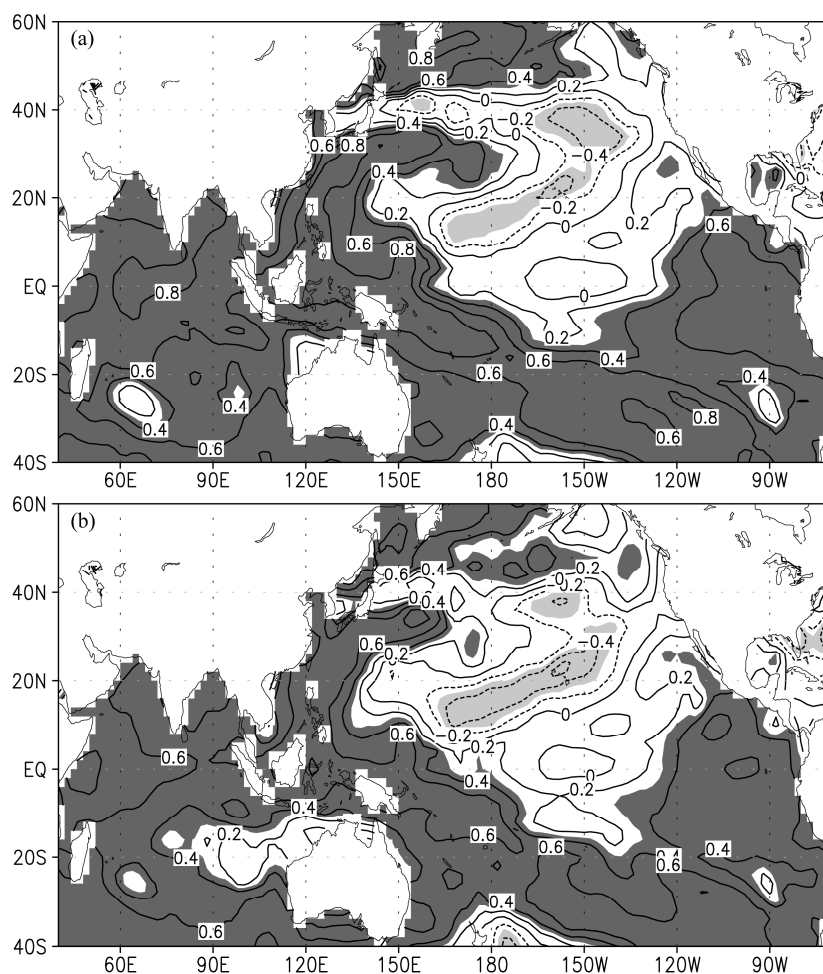


图 8 长江流域夏季降水与同期海表温度的年代际相关分布: (a) 观测, (b) 模拟。阴影区为通过 95% 显著性检验的区域

Fig. 8 Correlation between summer rainfall in the Yangtze River basin and SST at the decadal timescale: (a) Observation, (b) simulation. Regions above 95% confidence level are shaded

(图 2) 与同期 SST 的相关分布。观测显示 (图 8a), 热带海洋为正相关区, 最显著相关区为热带印度洋到西太平洋以及热带东太平洋, 而北太平洋为负相关区。模拟结果与观测基本一致, 但相关系数偏低。上述相关分布与 SVD 的分析基本相同, 也与以前的观测和模拟结果是一致的 (Xue, 2001; 曾刚等, 2007), 这进一步表明由 PDO 位相转变造成的热带海洋变暖是长江流域降水年代际变化的主要原因。

图 9 为观测和模拟的地表气温的年代际变化, 由于 ECMWF 的再分析资料分辨率较低, 这里采用 CRU 提供的地表气温资料。图 9a 显示, 在 1970 年代末期之后, 虽然全球变暖的趋势非常明显, 但个别地区却是变冷的, 其中比较显著的是江淮流域, 个别地区变冷超过 0.5°C 。由于夏季海洋变暖而陆地变冷, 进而导致海陆温差减弱, 东亚夏

季风的强度变弱。在观测 SST 驱动下, 模式能基本模拟出长江流域的变冷趋势 (图 9b), 但江淮地区的变冷中心明显偏南, 这与模拟的副高和雨带偏南是一致的。由于陆地也呈现出显著的年代际变化, 一些研究将这次东亚夏季风的年代际减弱归结为陆面过程的变化 (Xu et al., 2007), 但从上面的模拟结果并结合其他模式的模拟结果分析 (曾刚等, 2007), 海洋变化尤其是热带 SST 的变暖才是东亚夏季风年代际减弱的主要原因, 而陆面变冷则可能是 SST 变化的结果。另外, 图 9a 显示 1970 年代末之后, 亚洲中高纬度明显变暖, 最大值超过 0.6°C 。但模拟结果为变冷 (图 9b), 与观测相反。一方面, 亚洲高纬度的变暖与温室气体含量增加导致的全球变暖有关, 其信号在北半球高纬度最明显, 而模式中温室气体含量保持不变, 未能模拟出亚洲高纬地区的变暖是合理的。

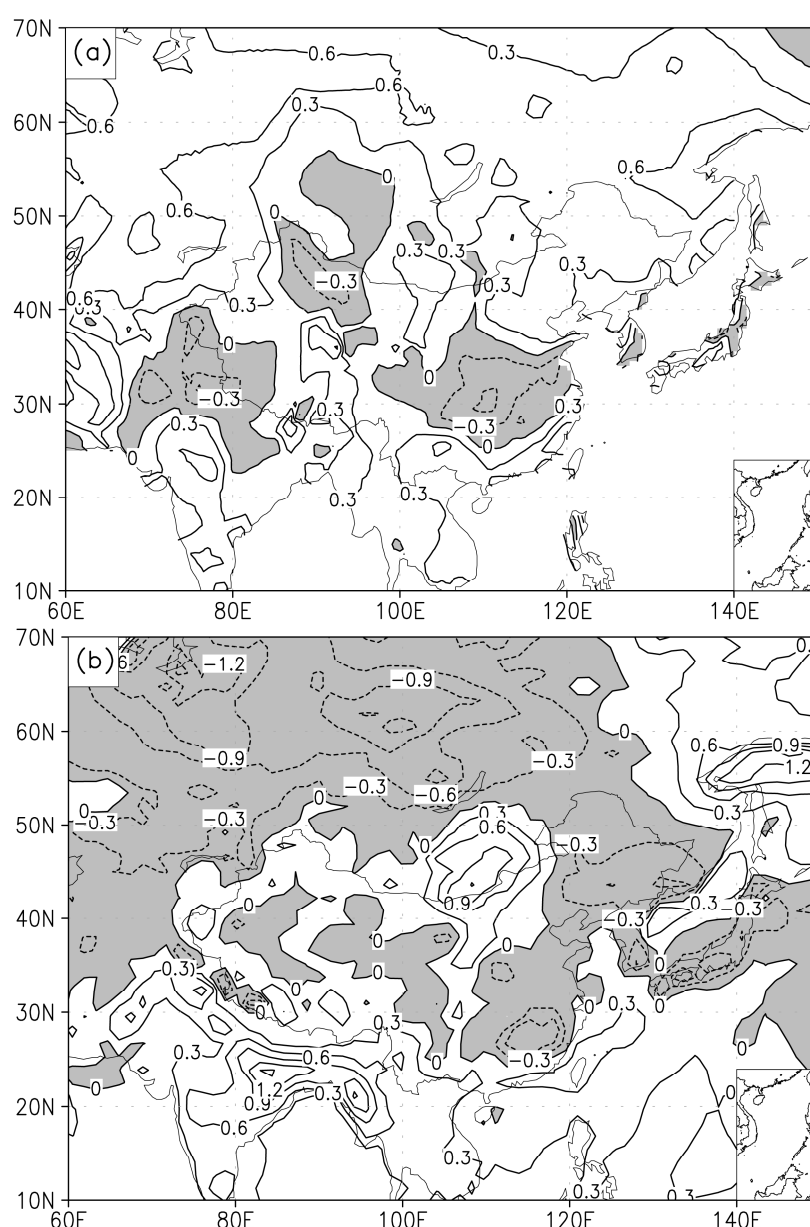


图9 亚洲夏季地表气温的年代际变化(单位: K): (a) CRU 观测; (b) 模拟。阴影区为负值

Fig. 9 The decadal variation of summer surface air temperature over Asia (units: K): (a) Observation from CRU; (b) simulation. Regions with negative values are shaded

另一方面, 模拟结果说明高纬度变暖与热带海洋变暖的成因是不同的, 前者主要与温室气体含量增加造成的全球变暖有关, 而后者则主要与 PDO 的位相转变有关。当然, 全球变暖也在一定程度上增强了热带海洋变暖的程度, 这从图 6 中 SVD1 的 SST 在 1990 年代末期与 PDO 有较大差异可以看到。结合已有研究结果(杨修群等, 2004), 可以认为热带海洋变暖主要是 PDO 位相转变的结果, 并由此导致东亚夏季风在 1970 年代末期的减弱, 这与姜大膀和王会军(2005)分析其他模式

得到的结论一致。

5 结论和讨论

本文利用观测 SST 驱动 IAP4 进行长期积分试验, 并根据多种观测资料对比分析了模式模拟的东亚夏季风和中国东部夏季降水的年代际变化。结果表明, 模式能模拟出 1970 年代末期东亚夏季风环流的减弱, 东亚沿海地区出现明显的偏北风异常, 同时西太平洋副高偏向西南, 强度增强, 长江流域降水增多, 华南和华北降水减少, 但模拟的副

高和降水异常中心略偏南。在热带海洋变暖的情况下,模式还模拟出长江流域的变冷中心,因而减弱了东亚地区的海陆温差,这是模式能再现东亚夏季风年代际减弱的主要原因。

SVD 的分析表明,对应于中国东部夏季雨型的年代际变化,热带印度洋和太平洋为大范围正相关,而北太平洋为负相关,这种相关分布与 PDO 位相转变有关,1970 年代末之后, PDO 由负位相转变为正位相,热带太平洋和印度洋变暖,北太平洋变冷。模式能模拟出中国东部夏季降水与 SST 的相关分布特征,时间系数显示二者的年代际变化均发生在 1970 年代末期,表明 PDO 的位相转变是造成东亚夏季风年代际变化的主要原因。另一方面,在观测 SST 强迫下,模式未能模拟出全球变暖趋势下亚洲高纬度地区的变暖,这显示全球变暖与东亚夏季风的年代际变化并不存在必然联系。

已有研究表明,利用观测 SST 驱动大气环流模式,多数模式能较好模拟出与东亚夏季风衰减的环流场变化,但降水的模拟结果则显示出较大误差,其原因可能与早期大气模式的分辨率较低有关。由于降水变化的空间尺度较小,分辨率较低的模式虽然能模拟出大尺度环流场的变化,但不足以描述降水的变化。海气耦合模式对东亚夏季风年代际变化的模拟效果一般要低于大气环流模式,根据政府间气候变化委员会第 4 次评估报告中多个耦合模式的评估结果(孙颖和丁一汇,2008;顾薇和李崇银,2010),虽然多数模式能模拟出 PDO 等年代际信号的空间模态,但仅有少数模式能模拟出东亚夏季风降水的年代际变化,主要是由于这些模式难以描述与东亚夏季风年代际变化的主要特征,如本文所揭示出的东亚沿海的变冷趋势。因此,目前模式对东亚夏季风年代际变化的模拟效果显示出较大的差异,对模式有很强的依赖性,这对未来年代际变化的预估提出了很大挑战,同时也提醒我们在利用模式进行年代际预估试验时,要首先注意选择模拟性能较好的模式。

本文研究所揭示的东亚夏季风年代际变化与 PDO 位相的关系,对未来东亚夏季风年代际变化的预估有重要意义。考虑到 PDO 是一种周期振荡的现象,其位相一般可持续 20~30 年,而且从 1970 年代末到现在的正位相业已持续 30 年,可以推测 PDO 的位相可能开始转变。从最近监测的数据也可看到, PDO 自 2011 年起开始明显转变为负位相

(<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> [2012-08-05])。据此我们可以推断,东亚夏季风从本世纪 10 年代开始可能再次趋强,中国东部夏季雨型亦可能随之改变,华北地区夏季降水可能增加,这对多年来饱受干旱之苦的华北地区或许是个福音。同时应注意,华北地区夏季发生暴雨的可能性也在增加。

致谢 感谢两位审稿人提出的修改建议,张贺博士提供了 IAP4 的模拟结果,在此一并致谢。

参考文献 (References)

- 陈兴芳, 赵振国. 2000. 中国汛期降水预测研究及应用 [M]. 北京: 气象出版社, 241pp. Chen Xingfang, Zhao Zhenguo. 2000. Study on Precipitation Forecast in China during Flood Period and Its Applications (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 241pp.
- Fu Jianjian, Li Shuanglin, Luo Dehai. 2009. Impact of global SST on decadal shift of East Asian summer climate [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26: 192–201.
- 高辉, 王永光. 2007. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究 [J]. *气象学报*, 65 (1): 131–137. Gao Hui, Wang Yongguang. 2007. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (1): 131–137.
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 78–1–78–4, doi:10.1029/2001GL014523.
- 顾薇, 李崇银. 2010. IPCC AR4 中海气耦合模式对中国东部夏季降水及 PDO、NAO 年代际变化的模拟能力分析 [J]. *大气科学学报*, 33 (4): 401–411. Gu Wei, Li Chongyin. 2010. Evaluation of the IPCC AR4 climate models in simulating the interdecadal variations of the east China summer precipitation, PDO and NAO [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 401–411.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. *大气科学*, 30 (5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 730–743.
- 姜大膀, 王会军. 2005. 20 世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性 [J]. *科学通报*, 50: 2256–2262. Jiang Dabang, Wang Huijun. 2005. Natural interdecadal weakening of East Asian summer monsoon in the late 20th century [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50: 1923–1929.
- New M, Lister D, Hulme M, et al. 2002. A high resolution data set of surface climate over global land areas [J]. *Climate Research*, 21: 1–25.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D14): 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- 苏同华, 薛峰. 2010. 东亚夏季风环流和雨带的季节内变化 [J]. *大气科学*, 34 (3): 611–628. Su Tonghua, Xue Feng. 2010. The intraseasonal

- variation of summer monsoon circulation and rainfall in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 611–628.
- 孙丹, 薛峰, 周天军. 2013. 不同年代际背景下南半球环流变化对中国夏季降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 18: 51–62, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11007. Sun Dan, Xue Feng, Zhou Tianjun. 2013. The influence of the Southern Hemisphere circulation on summer rainfall in China under the different decadal background [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18: 51–62, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11007.
- 孙颖, 丁一汇. 2008. IPCC AR4 气候模式对东亚夏季风年代际变化的模拟性能评估 [J]. 气象学报, 66 (5): 765–780. Sun Ying, Ding Yihui. 2008. Validation of IPCC AR4 climate models in simulating interdecadal change of East Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 765–780.
- Uppala S M, K  lberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131: 2961–3012.
- Wang Huijun. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18: 376–386.
- Xu X D, Shi X H, Xie L A, et al. 2007. Consistency of interdecadal variation in the summer monsoon over eastern China and heterogeneity in springtime surface air temperatures [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85A: 311–323.
- Xue Feng. 2001. Interannual to interdecadal variation of East Asian summer monsoon and its association with the global atmospheric circulation and sea surface temperature [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18: 567–575.
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. 大气科学, 28 (6): 979–992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. 2004. Advances in studies of Pacific decadal oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 979–992.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. 地球物理学报, 48 (4): 789–797. Yang Xiuqun, Xie Qian, Zhu Yimin, et al. 2005. Decadal to interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (4): 789–797.
- 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 893–905. Yu Rucong, Zhou Tianjun, Li Jian, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 893–905.
- 曾刚, 孙照渤, 王维强, 等. 2007. 东亚夏季风年代际变化——基于全球观测海表温度驱动 NCAR Cam3 的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (2): 211–224. Zeng Gang, Sun Zhaobo, Wang Weiqiang, et al. 2007. Interdecadal variation of East Asian summer monsoon simulated by NCAR CAM3 driven by global SSTs [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (2): 211–224.
- 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.
- 张庆云, 吕俊梅, 杨连梅, 等. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. 大气科学, 31 (6): 1290–1300. Zhang Qingyun, L   Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1290–1300.
- 赵振国, 朱艳峰, 柳艳香, 等. 2008. 1880~2006 年中国夏季雨带类型的年代际变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 4: 95–100. Zhao Zhenguo, Zhu Yanfeng, Liu Yanxiang, et al. 2008. Decadal variation of summer rain pattern in China during 1880–2006 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4: 95–100.
- Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. J. Climate, 22: 2199–2215.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 641–654.
- 朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系 [J]. 气象学报, 65 (6): 946–957. Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Xu Huaigang. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in east China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (6): 946–957.