

春夏东亚大气环流年代际转折的影响 及其可能机理^{* 1}

朱志伟 何金海 钟珊珊 尚可
ZHU Zhiwei HE Jinhai ZHONG Shanshan SHANG Ke

南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 大气科学学院, 南京, 210044

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education (KLME), School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2012-07-05 收稿, 2013-01-31 改回.

朱志伟, 何金海, 钟珊珊, 尚可. 2013. 春夏东亚大气环流年代际转折的影响及其可能机理. 气象学报, 71(3): 440-451

Zhu Zhiwei, He Jinhai, Zhong Shanshan, Shang Ke. 2013. The climatic effect of decadal shift of the East Asian atmospheric circulation in spring and summer and its possible causes. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(3): 440-451

Abstract Based on the multivariate empirical orthogonal function (MV-EOF) analysis, a decadal turning of the East Asian circulation in the past 30 years was revealed. In this context, the decadal change of the South China precipitation and its possible mechanism were investigated, conclusions are as follows: (1) The first mode of spring and the second mode of summer for the East Asian circulation are both of a decadal shift in mid-1990s. (2) The two decadal shift leading modes are closely related with an obvious out of phase seasonal decadal rainfall change in spring and summer over South China; the rainfall reduced in spring and increased in summer. (3) The atmospheric heat source (Q_1) over the Tibet Plateau region in spring and the Lake Baikal region in summer are both decadal changed in mid-1990s. (4) The decadal weakening of the Tibet Plateau heating which depressed the southwesterly on its southeast side mainly caused the reducing rainfall in spring over South China. While the decadal changing of the dipole distribution of the atmospheric heat source in summer over Lake Baikal excited an anomalous anticyclone, which hindered the summer rain belt moving northward, resulting in increased rainfall in summer over South China.

Key words Decadal shift in mid-1990s, East Asian circulation leading modes, South China rainfall

摘要 通过多变量联合经验正交函数分解(MV-EOF)方法揭示了近30年(1979—2010年)春季和夏季东亚大气环流所发生的年代际转折及其与中国南方降水年代际季节反相变化的内在联系,探讨了局地性大气热源年代际变化影响东亚大气环流年代际转折的可能机理。结果表明:(1)东亚大气环流春季第1模态和夏季第2模态在20世纪90年代中期都发生了明显的年代际转折;(2)与春季大气环流第1模态和夏季大气环流第2模态年代际转折相对应的是中国南方降水明显的年代际季节反相变化,即春季降水年代际减少,夏季降水年代际增多;(3)春季青藏高原和夏季贝加尔湖地区大气热源年代际变化对东亚大气环流年代际转折有一定贡献,是造成中国南方降水年代际季节反相变化的直接原因;(4)春季青藏高原大气热源的年代际减弱,使高原东南侧的西南风减弱,导致中国南方上空水汽输送不足,春季降水减少。夏季贝加尔湖大气热源偶极型分布由“南负北正”转变为“南正北负”,由此在贝加尔湖上空激发高压异常,使夏季雨带北进受阻而停滞于南方,造成中国南方夏季降水增多。

关键词 年代际转折, 东亚环流主模态, 中国南方降水

中图法分类号 P434 P448

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41075068,40905044)、国家重点基础研究发展规划项目(2010CB950400)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)及江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0487)。

作者简介:朱志伟,主要从事气候诊断与海陆气相互作用研究。E-mail:zhuzhiwei_nuist@126.com

通讯作者:何金海,主要从事大气低频振荡及季风与海陆气相互作用研究。E-mail:hejhnew@nuist.edu.cn

1 引言

作为连接长期气候趋势和年际变化的桥梁,年代际变化是月、季、年际气候变化及其预测的背景,其重要性不言而喻。而研究东亚大气环流年代际转折及其背景下中国区域性降水的变化,对中国旱涝预测以及防灾减灾部署又有很强的理论价值和现实意义。

众所周知,东亚大气环流在 20 世纪 70 年代末发生了一次显著年代际变化,70 年代末之后与之前相比:东亚季风明显减弱,中国长江流域降水显著增多,华北降水明显减少(Wang, 2001; Wang, et al, 2002; Ding, et al, 2008; Zhao, et al, 2010)。作为下垫面外强迫因子,全球海温以及高原热力作用变化对大气环流年代际突变起到重要作用。部分学者(Chang, et al, 2000; Zhang, et al, 1997; Yang, et al, 2004)认为,北太平洋主模态(PDO)及其年代际调控下 ENSO 变化以及中部和东部太平洋的迅速增温是 20 世纪 70 年代大气环流年代际变化的主要原因;另有部分学者(Dong, et al, 2006; Li, et al, 2001)称印度洋和大西洋海温变化对此年代际转折同样有贡献;而青藏高原冬季雪盖增多、春季感热加热作用减弱则被认为是亚洲季风年代际减弱的另一重要原因(Wu G X, et al, 2012; Duan, et al, 2008; Ding, et al, 2009)。

20 世纪 90 年代以来,在全球变暖背景下,无论在中高纬度还是热带地区,从下垫面强迫因子到大气内部活动又表现出一次明显的年代际变化。例如:北极海冰急剧减少(Wu B Y, et al, 2009);北极涛动(AO)和北大西洋涛动(NAO)存在显著减弱趋势(Cohen, et al, 2005);热带海洋海温持续正异常,信风明显减弱(Latif, et al, 1997);中东太平洋厄尔尼诺暖事件频频爆发等(Kao, et al, 2009; Ashok, et al, 2007; Yeh, et al, 2009; Weng, et al, 2007)。而在亚洲地区,科学家们也愈发注意到在 20 世纪 90 年代中期大气环流所经历的新一次年代际变化:Kwon 等(2007)指出,东亚夏季风与西北太平洋夏季风强度的关系在 20 世纪 90 年代中期发生显著年代际转变,两者负相关显著;Wang 等(2009)发现在 1993 年之后,南海地区冬春季降水增多,秋季降水减少;Lu 等(2011)指出夏季东北亚上空西风急流在 20 世纪 90 年代中期后明显减弱;Zhu 等(2011)指出,20 世纪 90 年代后期夏季降水分布发生年代际转折,贝加尔湖夏季年代际增温导致东亚大陆经向

梯度减弱,进而西风急流减弱,副热带高压年代际位置东移,使东亚地区夏季南方降水增多,并指出北太平洋主模态的负位相是造成贝加尔湖增温的可能原因;Wu Z W 等(2012a)认为,20 世纪 90 年代中期后青藏高原夏季西部雪盖的减少调控了 ENSO 对东亚夏季风的年代际影响关系,使 ENSO 与东亚夏季风的相关性更好;之后的进一步分析指出,高原雪盖变化也是 90 年代中期后夏季华北极端高温热浪年代际增多的可能原因之一(Wu Z W, et al, 2012b)。

已有的研究较多关注夏季东亚大气环流,对于春季环流的分析相对较少,而春季和夏季环流年代际变化的对比研究更是鲜有报道。实际上,中国江南地区在春季就已经出现持续稳定的降水(何金海等, 2008; 万日金等, 2008; Zhu, et al, 2012),春季和夏季大气环流的年代际转折共同决定了季风降水季节进程的年代际变化,影响着中国旱涝时空分布特征变化。近 10 年来,中国南方地区冬春连旱、超级干旱频发;而夏季城市内涝又愈演愈烈,洪涝灾害连连。旱涝灾害给人民生命和财产安全带来严重威胁和损害。出于填补科学理论空白和满足实际迫切需求的考虑,研究春季和夏季大气环流的年代际变化及其变化的差异有着极为重要的理论价值和现实意义。为此,本文提出了以下几个亟待研究的科学问题:(1)20 世纪 90 年代中期以来,春季和夏季东亚大气环流是否确实发生了明显的年代际转折?(2)这种环流的年代际转折对区域性降水有怎样的影响?(3)作为大气环流的主要驱动力之一,东亚区域性大气热源如何影响春季和夏季大气环流年代际转折?带着以上问题,本文分别从春季和夏季东亚大气环流主模态出发,分析其年代际转折及其背景下中国区域性降水的季节性年代际差异,诊断局地大气热源对大气环流年代际转折的影响,讨论春夏大气环流年代际转折的可能原因。

2 资料与方法

所用资料包括美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)逐日再分析数据集及美国国家环境预报中心和美国能源部(NCEP/DOE)逐月再分析资料集,美国气候分析中心全球降水观测资料(CMAP)中的逐候降水资料,全球降水气候计划(GPCP)的日降水率资料,水平分辨率皆为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;中国气象局整编的中国 160 站逐月降水量资料,时间皆取 1979—2010 年。此外,文

中将(18°—30°N,107°—123°E)地区定义为中国南方地区。

本文所用方法包括多变量联合经验正交函数分解(MV-EOF),该方法能发现复杂系统中多气象要素相互耦合的主要模态,有利于研究各气象要素间的物理联系(Wang,1992)。此外,还运用了合成分析以及回归分析等方法。

根据 Yanai 等(1992)的计算方法,大气视热源 Q_1 的计算式为

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] \quad (1)$$

其中, $p_0 = 1000 \text{ hPa}$, p 为垂直方向气压, $\kappa = R/c_p$, R 和 c_p 分别为气体常数和干空气定压比热, θ 为位温。对上式垂直积分可得

$$\langle Q_1 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{100} Q_1 dp = Q_{LP} + Q_S + \langle Q_R \rangle \quad (2)$$

其中, Q_{LP} 、 Q_S 和 $\langle Q_R \rangle$ 分别为地面降水凝结潜热、地面向上感热输送和辐射冷却(加热)。积分区间为地面气压 p_s 至顶层气压(100 hPa)。

3 东亚环流主模态年代际变化

鉴于东亚大气环流中“南海热带季风环流”和“东亚副热带季风环流”这两个子系统相互影响、高度耦合的关系,将包含副热带和热带地区的(10°—50°N,100°—140°E)作为东亚大气环流研究关键区域。同时考虑到低层风场和降水场的高度配合,故分别将关键区域春季(3—5月)及夏季(6—8月)的降水和 850 hPa 风场(包括纬向风和经向风分量)3个气象要素进行多变量联合经验正交函数分解得到东亚春季和夏季大气环流主模态。

图 1 给出了春季多变量联合经验正交函数分解

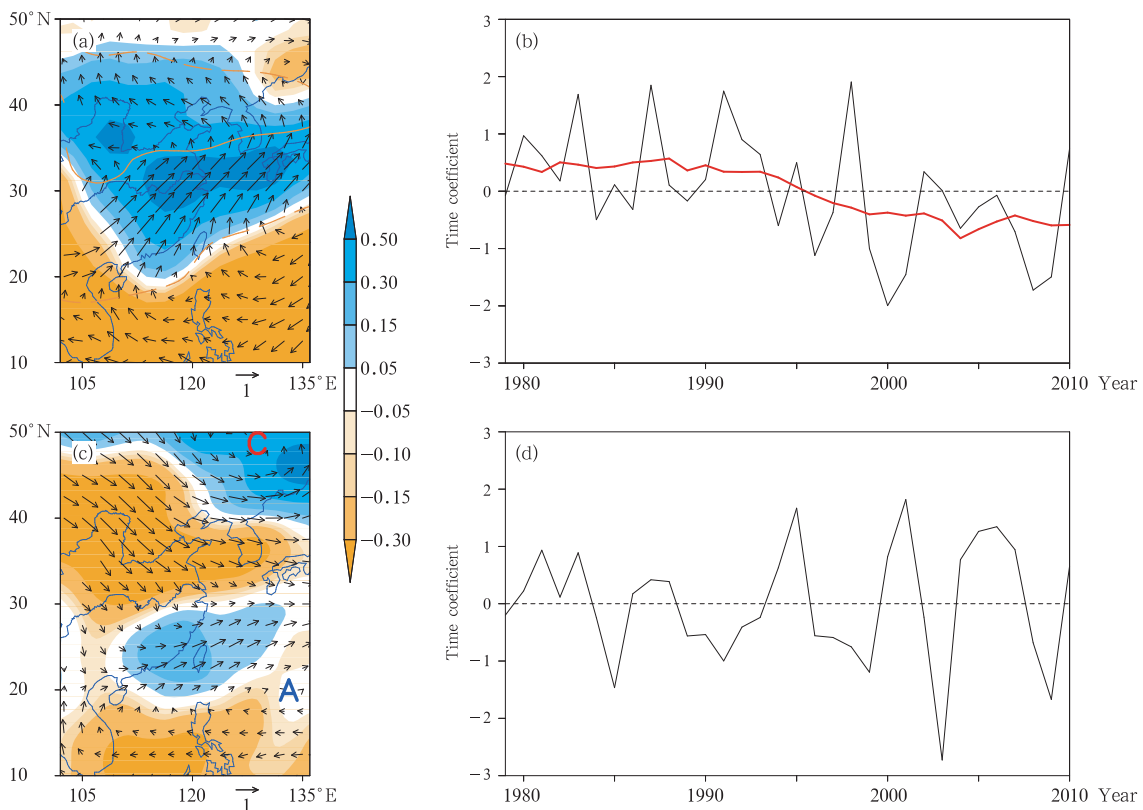


图 1 春季大气环流多变量联合经验正交函数分解模态(a,c)及相应时间系数(b,d)
(图中阴影代表降水载荷(单位:mm/d),矢量为风场载荷(单位:m/s),实线为槽线,虚线为脊线,
A 为反气旋性环流中心,C 为气旋性环流中心;红线为 11 年平滑曲线)

Fig. 1 Spatial pattern (a,c) and the corresponding time coefficient (b,d)
of the first two leading MV-EOF of the spring circulation

(the rainfall is shaded (unit: mm/d), the vector is wind field (unit: m/s), the solid line for the trough line, dashed line for ridge line,
A and C represent for the centers of the anticyclone and the cyclone, respectively; the red line is a 11 year running smooth curve)

第 1 和第 2 模态的空间结构及其时间系数。第 1 模态解释了风场及降水场 3 个气象要素 19.5% 的总方差,第 2 模态解释了这 3 个气象要素 13.2% 的总方差,两者都通过了 North 准则显著性检验,是相互独立且显著的模式。从图 1 可以看到春季第 1 模态主要特征为:35°N 附近存在西南—东北向的横槽,同时在 20°N 附近存在西南—东北向的高压脊,45°N 附近存在西北—东南向的高压脊,槽与南侧脊之间为异常西南风所控制,槽与北侧脊之间为异常东南风所控制;降水场上,在右侧脊线以南的中国南海、中南半岛、菲律宾及其以东地区为降水负异常区,而在右侧脊线以北的中国东部大陆、朝鲜半岛及日本地区为降水正异常区。在春季第 2 模态上,中国大陆东南部受西北太平洋异常反气旋影响为异常西南风所控制,中国大陆其他区域受东西伯利亚异常气旋影响为异常西北风所控制;相应地,降水场上受异常西南风控制的地区为降水正异常区,受异常

西北风控制的地区为降水负异常区。

图 2 为夏季多变量联合经验正交函数分解第 1 和第 2 模态的空间结构及其时间系数,其第 1 模态解释了风场及降水要素场 19.9% 的总方差,第 2 模态解释了这 3 个气象要素 10.1% 的总方差,两者都通过了 North 准则的显著性检验,是相互独立且显著的模式。从图 2 可以看出,在夏季第 1 模态上,在 (22°N,132°E) 附近有一强大的异常反气旋,在反气旋北侧主要为异常西风控制,在反气旋南侧主要为东风控制;降水场上表现为南北向的偶极型分布,西风控制区域为降水正异常,东风控制区域为降水负异常。这个模式被广泛认为与 ENSO 的关系较为密切。而夏季第 2 模态表现为三极型分布:贝加尔湖以南、长江以北地区受强大的异常气旋控制,中国大陆 30°N 以南为一个反气旋性环流,菲律宾北部为异常气旋性环流;降水场上,气旋控制区域为降水正异常区,反气旋控制区域为降水负异常区。

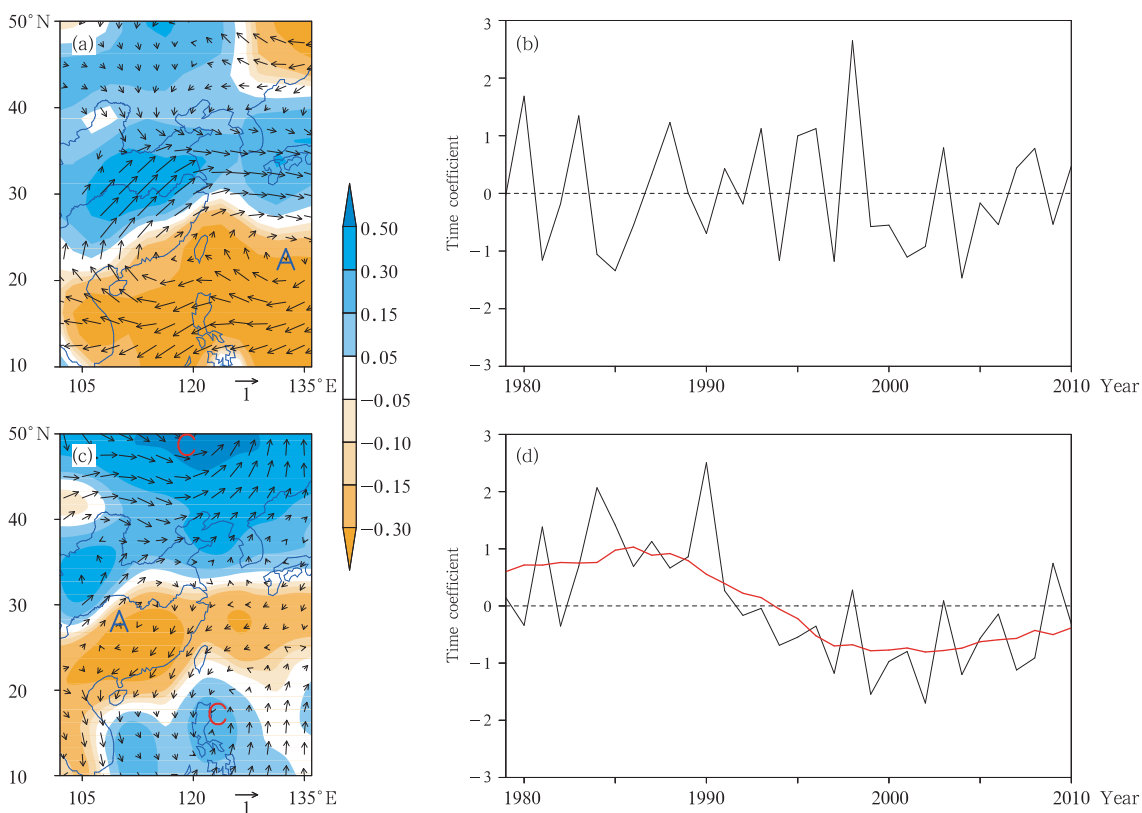


图 2 同图 1, 但为夏季

Fig. 2 As in Fig. 1 but for summer

从多变量经验正交函数分解得到模式相应的时间系数上来看,无论在春季还是夏季,东亚大气环流

主模式都存在明显的年代际变化。这种年代际变化表现在春季第 1 模式和夏季第 2 模式的时间系数

上:春季第1模态时间系数在20世纪90年代中期后“由正转负”,在前14年(1979—1992年)中有10年时间系数为正,且4年负的时间系数绝对值相对较小(<0.6),而后14年(1997—2010年)中有11年时间系数为负,3年正的时间系数中除1998年特大洪涝年份值较大以外,其他正的时间系数绝对值也相对较小;而在夏季,可以明显看到第2模态在1993年左右存在“由正转负”现象,在前14年(1979—1992年)中有11年时间系数为正,3年负时间系数的绝对值很小(<0.5),而在后14年(1997—2010年)中有11年时间系数为负,3年正时间系数的绝对值也较小。因此,东亚春季和夏季大气环流在20世纪90年代中期确实都发生了年代际转折:对于春季第1模态,在90年代中期后,35°N附近的

横槽转变为高压脊,20°和45°N附近的高压脊转变为低压槽,原本槽线以南、南侧脊线以北的西南风转变为槽线以北、脊线以南的东北风,原本槽线以北,北侧脊线以南的东南风转变为槽线以南、脊线以北的西北风。两脊之间由一致的降水正异常区转变为两槽之间的降水负异常区;而对于夏季第2模态,同样在90年代中期后,贝加尔湖附近由气旋式环流转变为反气旋式环流异常,中国南方由反气旋式环流转变为气旋式环流异常。对应降水场上,南方地区由降水负异常转变为降水正异常,长江以北至贝加尔湖地区由降水正异常转变为降水负异常。这里由于春季环流第2模态和夏季环流第1模态均表现为年际变化特征,本文暂不作具体讨论。

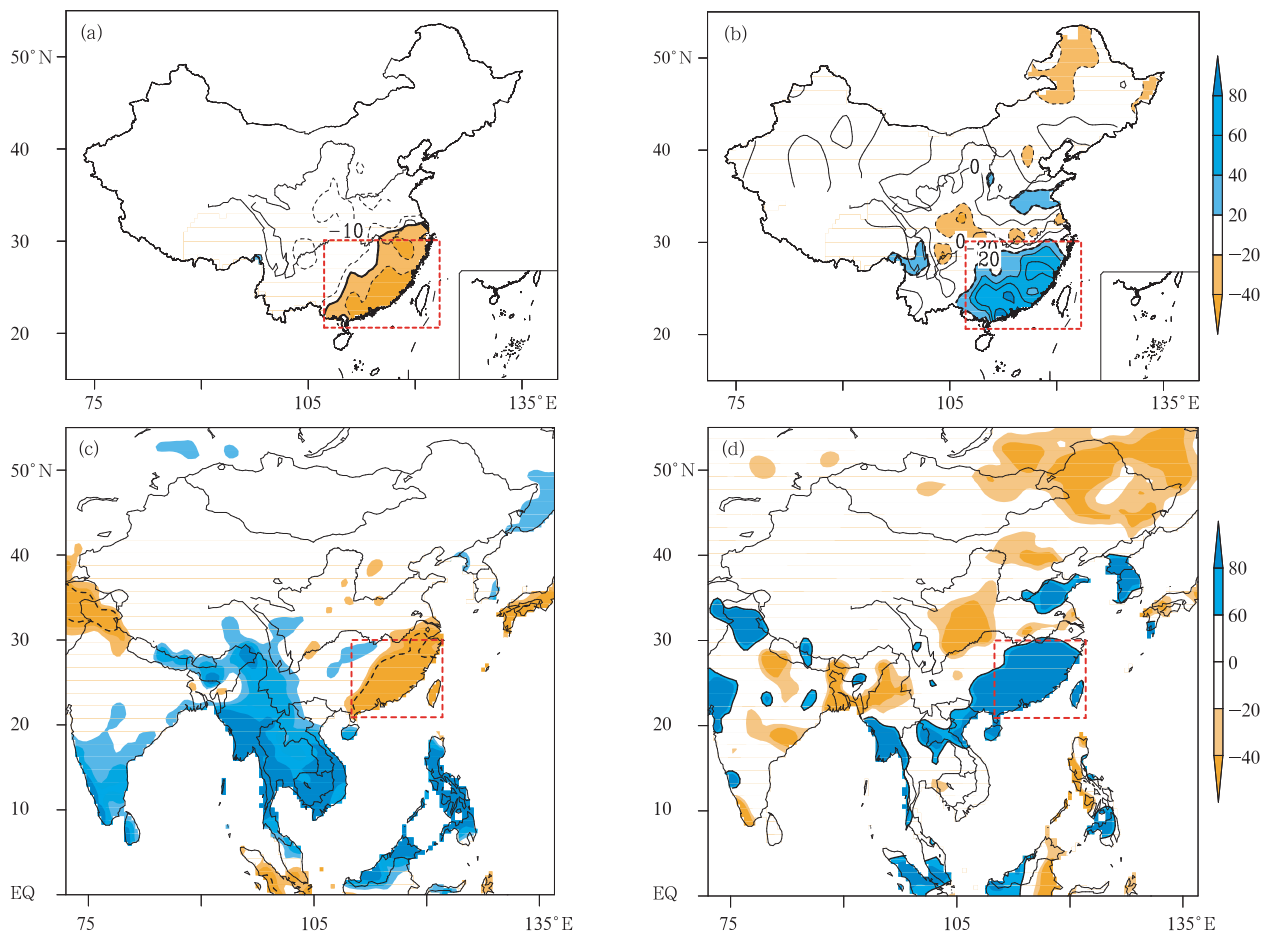


图3 春季(a、c)和夏季(b、d)在年代际转折前后的降水差值(1997—2010年平均减去1979—1992年平均)分布(a、b. 中国160站降水,单位:mm/月;c、d. 全球降水气候计划降水率,扩大100倍,单位:mm/d;红色方框指中国南方地区)

Fig. 3 Composite difference (1997—2010 minus 1979—1992) of precipitation in spring (a, c) and summer (b, d) (a, b. 160 stations data (unit: mm/month) in China, c, d. the GPCP data (unit: mm/d \times 100); the boxes indicate the South China area)

4 中国南方降水年代际季节反相变化

运用中国 160 个测站的降水资料和全球降水气候计划(GPCP)的降水资料分别计算出春季和夏季降水在 20 世纪 90 年代中期年代际转折前后的差值空间分布(图 3),由图 3 可见,无论是从中国 160 个站的降水资料,还是从全球降水气候计划的降水率资料上看,春季和夏季中国南方降水均表现出明显的年代际季节反向变化特征:即春季降水年代际减少,夏季降水年代际增多。在 160 个站降水年代际差值图上,中国南方春季月平均降水减少最大值超过 40 mm,夏季月平均降水增多最大值超过 80 mm,同样在全球降水气候计划降水率年代际差值分布上也有一致结论。

从中国南方春季和夏季历年降水标准化序列(图 4)中也能得到降水年代际季节反相变化的结论,春季降水存在明显的年代际减少,夏季降水存在明显的年代际增多。春季和夏季降水年代际转折时间都发生在 20 世纪 90 年代中期,这与春季大气环流第 1 模态和夏季大气环流第 2 模态的年代际变化转折点一致。此外,在美国气候分析中心全球降水

观测资料(CMAP)降水纬度-时间剖面年代际转折前后合成差值分布(图 5)中,春季和夏季逐候降水的年代际变化也有清晰表现:12—30 候(3—5 月),中国南方春季降水一致减少;而 30—48 候(6—8 月),中国南方夏季降水一致增多。

综上所述,从多套再分析资料和中国 160 个站降水观测资料分析可得如下结论:中国南方降水在 20 世纪 90 年代中期发生年代际季节反相变化,即中国南方春季降水年代际减少,夏季降水年代际增多。中国南方降水年代际季节反相变化与春季和夏季东亚大气环流年代际转折时间一致,中国南方春季降水年代际减少与春季大气环流第 1 模态年代际转折密切相关,夏季降水年代际增加与夏季大气环流第 2 模态年代际转折相对应。

5 机理分析

由上文可知,在春夏东亚大气环流主模态年代际转折背景下,中国南方降水存在年代际季节反相变化,那么春季和夏季降水年代际季节反相变化的原因需要进一步研究。

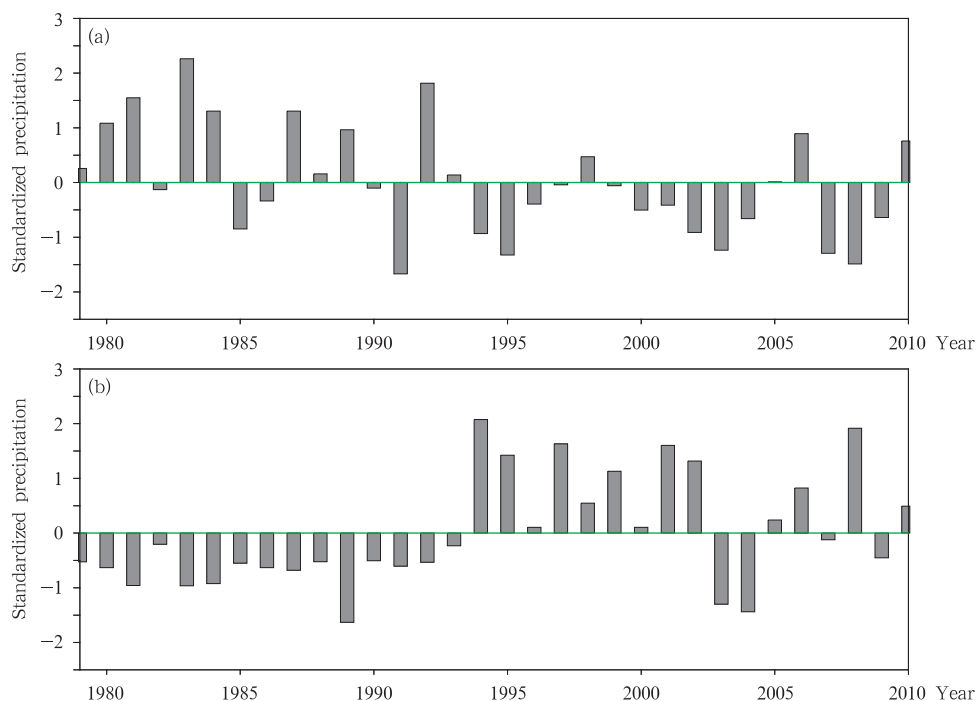


图 4 春季(a)和夏季(b)中国南方区域平均降水标准化序列
Fig. 4 Time series of the standardized South China regional mean precipitation in spring (a) and summer (b)

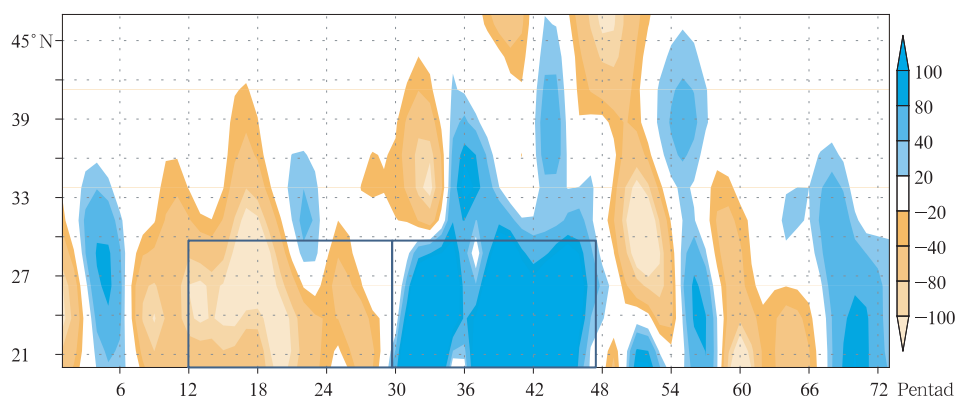


图 5 美国气候分析中心全球降水观测资料降水在 107°E — 123°E 平均的纬度-时间剖面合成差值

(1997—2010 年平均减 1979—1992 年平均; 两方框分别指示中国南方地区春季和夏季时段; 数值扩大 100 倍, 单位: mm/d)

Fig. 5 Composite difference of the latitude-time cross profile of CMAP for the zonal mean between the 107°E and 123°E

(1997—2010 minus 1979—1992, the horizontal axis: pentad, unit: $\text{mm}/\text{d} \times 100$; two boxes indicate the spring and summer period over the South China region respectively)

在全球变暖背景下, 亚洲地区下垫面热力强迫发生了明显年代际变化。冬春季青藏高原地区积雪增多, 高原的热力作用在春季主要表现为感热加热 (Zhou, et al, 2009), 而高原感热作用在春季减弱最为明显 (Duan, et al, 2008); 与此同时, 贝加尔湖地区是亚洲地表升温最显著区域 (Hansen, et al, 2006; 徐康等, 2011), 特别在夏季, 贝加尔湖的地表气温突变上升最为明显 (图略)。为讨论大气环流在 20 世纪 90 年代中期发生年代际变化的原因, 将 1979—1992 年与 1997—2010 年作为年代际转折前后两个时段做合成差值分析 (图 6), 从 500 hPa 高

度差值场上可以明显看到, 春季青藏高原上空表现为一个显著的差值高压异常; 而夏季贝加尔湖上空表现为一个差值高压异常。鉴于春季青藏高原和夏季贝加尔湖地区是全球变暖背景下最为显著和敏感的区域, 同时在年代际转折前后的合成差值场上两地区上空也分别出现了差值高压异常。因此, 分别选取春季青藏高原和夏季贝加尔湖作为研究区域 (图 6 中的矩形区域), 分析其大气热源变化。分别计算出春季高原和夏季贝加尔湖地区的大气视热源, 并运用经验正交函数分解方法提取其主要的大气热源主模态。春季青藏高原大气热源的 1 模态

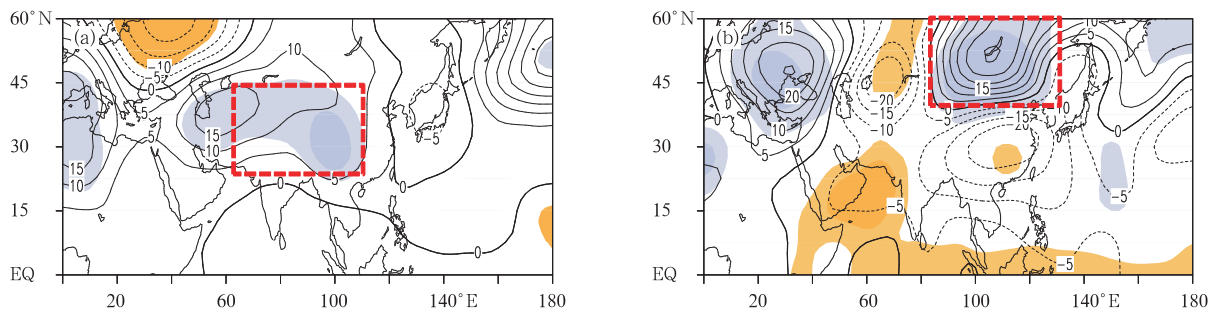


图 6 春季(a)和夏季(b)500 hPa 高度场合成差值

(1997—2010 年平均减 1979—1992 年平均; 单位: gpm ; 阴影区域通过 95% 置信度)

Fig. 6 Composite difference of 500 hPa height fields in spring (a) and summer (b) over the zonal mean between the 107°E and 123°E

(1997—2010 minus 1979—1992, unit: gpm ; the area significant at the 95% confidence level is shaded)

占总方差贡献的 22%，主要表现为全区一致型特征分布(图 7a);夏季贝加尔湖大气热源的

第 1 模态占总方差的 24%，主要表现为南北偶极型的特征分布(图 7b)。

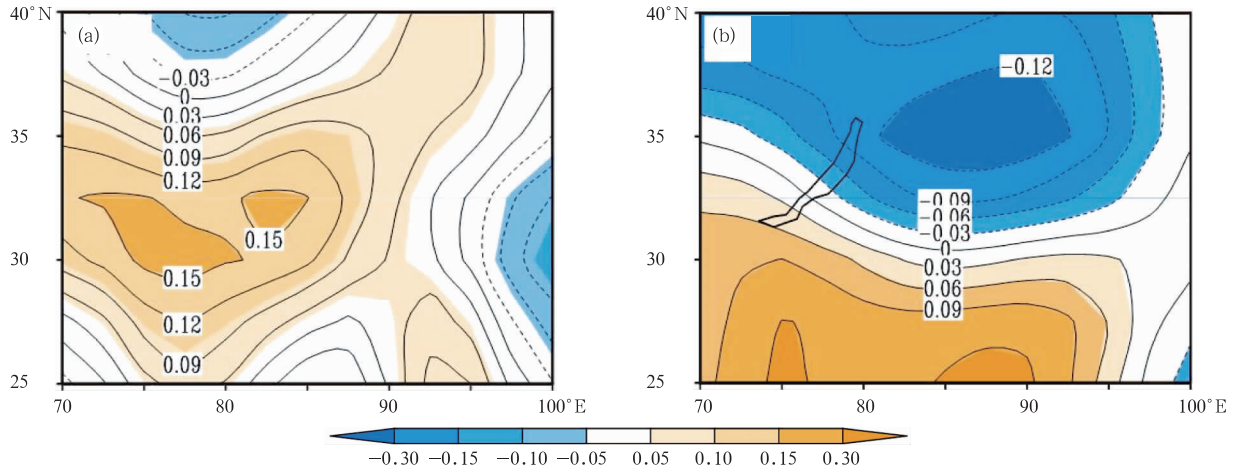


图 7 春季青藏高原(a)和夏季贝加尔湖地区(b)的大气热源第 1 主模态 (单位: W/m^2)
 Fig. 7 First mode of the atmospheric heat source for the Tibet Plateau region in spring (a) and for the Lake Baikal region in summer (b) (unit: W/m^2)

那么这两个地区的大气热源是否存在明显的年代际转折? 年代际转折的时间是否与东亚大气环流主模态的转折时间一致? 如果它们也都在 20 世

纪 90 年代中期发生转折, 又是如何影响东亚大气环流年代际转折的? 基于以上问题, 对两个地区大气热源第 1 模态各自的时间系数(图 8)进行具体讨论。

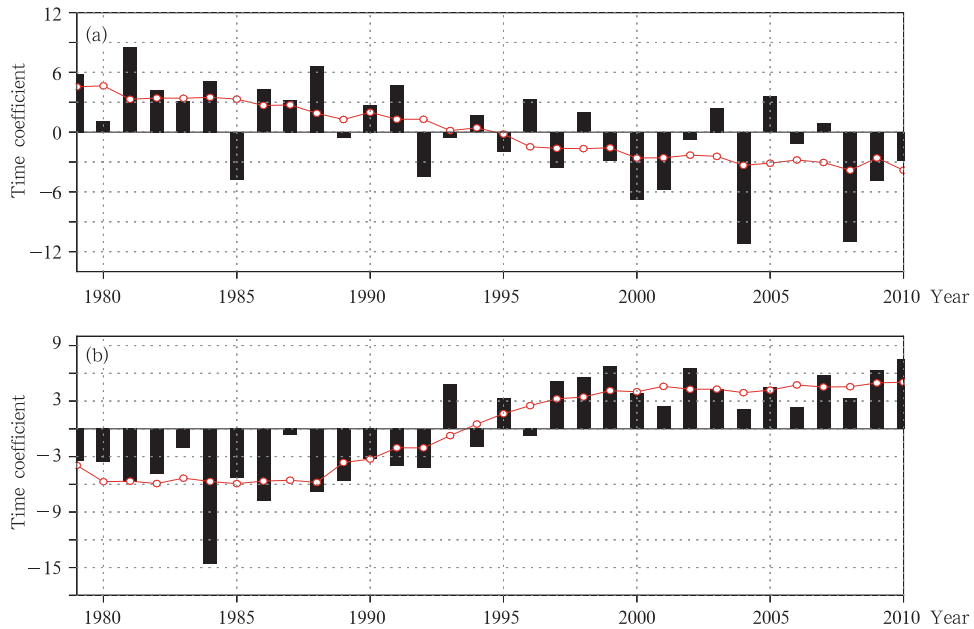


图 8 春季青藏高原(a)和夏季贝加尔湖(b)大气热源第 1 模态的时间系数分布
 (实圆线为时间系数的 11 年滑动平均)

Fig. 8 Time coefficient series of the first mode of the atmospheric heat source for the Tibet Plateau region in spring (a) and for the Lake Baikal region in summer (b) (the solid circle line is for 11-year running mean)

从图 8 可以看出,与预想一样,春季青藏高原和夏季贝加尔湖地区的大气热源确实存在明显年代际转折。通过计算可得,春季青藏高原大气热源第 1 模态和春季环流第 1 模态时间系数的相关系数为 0.48,夏季贝加尔湖地区大气热源第 1 模态与夏季

环流第 2 模态时间系数的相关系数为 0.67,都通过了 99%置信度。青藏高原大气热力状况在 20 世纪 90 年代中期前后,由全区一致的热源正异常,转变成全区一致的热源负异常,可以推测青藏高原的热力作用在 90 年代中期发生了一次明显的年代际减

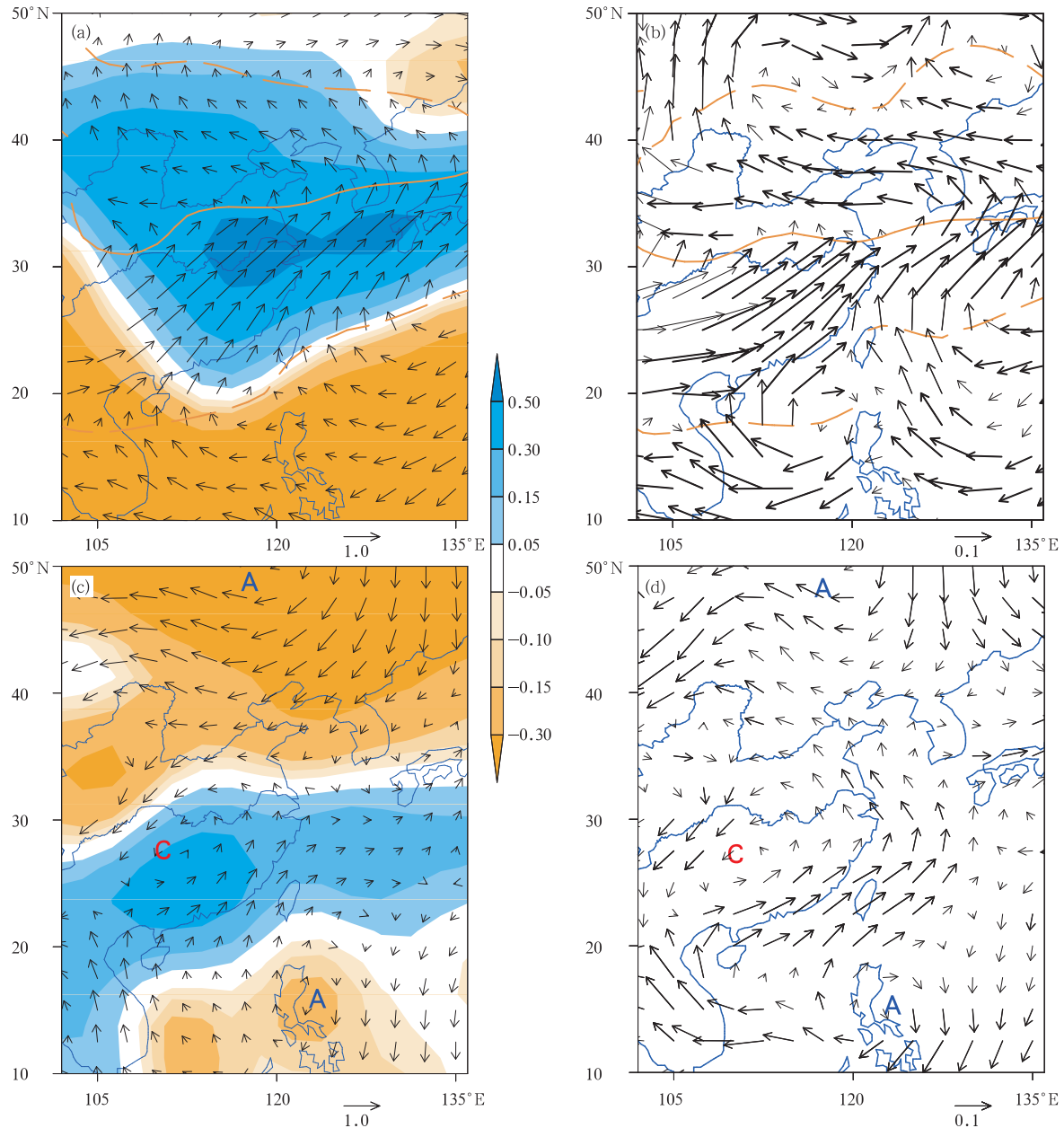


图 9 (a) 春季大气环流第 1 主模态, (b) 春季 850 hPa 风场回归到 11 年平滑的青藏高原热源第 1 模态时间系数, (c) 夏季大气环流第 2 主模态(乘上一个负号), (d) 夏季 850 hPa 风场回归到 9 年平滑的贝加尔湖热源第 1 模态时间系数(加粗矢量通过 95% 置信度)

Fig. 9 (a) The first mode of the atmospheric circulation in spring, (b) the regressed spring wind at 850 hPa onto the first principal component of the Tibet Plateau heat source, (c) the second mode of the atmospheric circulation in summer (times a minus), and (d) the regressed summer wind at 850 hPa onto the first principle component of the Lake Baikal region heat source (the wind vector significant at the 95% confidence level is bolded)

弱,由此导致青藏高原上空年代际差值高压异常。而在夏季,贝加尔湖地区大气热源在 90 年代中期由“南负北正”转变为“南正北负”。根据热成风原理,北冷南暖的经向温度差会在贝加尔湖上空激发年代际异常西风,其南侧地区产生年代际的异常反气旋。正如图 6 所示,春季青藏高原热力作用的减弱,造成了年代际差值高压异常,而夏季贝加尔湖地区热力作用的改变,导致其上空同样产生一个年代际高压异常。春季青藏高原上空高压异常,其东南侧的西南风气流减弱,使原本应输送到江南地区的水汽量减少,导致中国南方春季降水(江南春雨)的年代际减少;而夏季贝加尔湖地区上空的高压异常阻碍了东亚季风由南至北的季节推进,中国南方上空表现为气旋性辐合,致使季风雨带停滞在中国南方,而无法推进到北方,南方夏季降水增多。

为了进一步验证以上有关年代际转折成因的推测,将 850 hPa 原始流场回归到经过 11 年平滑(滤去年际变化)的春季青藏高原大气热源第 1 模态时间系数和夏季贝加尔湖上空大气热源第 1 模态的时间系数上(图 9),发现回归系数分布与存在年代际转折的东亚大气环流主模态相当一致,特别在中国南方地区环流形势高度吻合:春季回归系数分布场上也存在“一槽二脊”型,槽脊的位置与发生年代际

变化模态中槽脊位置大致一致,槽脊之间为西南风和东南风控制;夏季回归系数分布场上贝加尔湖南侧反气旋中心、长江以南气旋中心以及菲律宾上空反气旋位置也均与发生年代际变化的东亚大气环流模态中气旋与反气旋位置一致。因此,青藏高原春季热力作用的年代际减弱,使高原东南侧西南风减弱,是春季中国南方降水减少的原因;夏季贝加尔湖上空大气热源偶极型年代际反相变化激发年代际反气旋异常,阻碍季风雨带的北推,是夏季中国南方降水增多的直接原因。

综合上述的诊断分析,绘制出中国南方降水年代际季节反相变化的机理框图(图 10)。春夏季东亚大气环流主模态都在 20 世纪 90 年代中期发生了年代际转折:在春季,这种年代际转折主要受青藏高原热力作用减弱影响,使高原上空产生年代际高压异常,高原东南侧西南风减弱,进而导致春季中国南方地区水汽输送不足,降水年代际减少;而在夏季,贝加尔湖热力作用的年代际改变产生异常反气旋,使原本可以输送到北方的水汽受阻而停滞在南方,中国南方地区形成气旋性辐合,导致降水年代际增多。由此,中国南方地区,在 20 世纪 90 年代中期以后,春季降水显著减少,夏季降水显著增多,形成了“春旱夏涝”的形势。

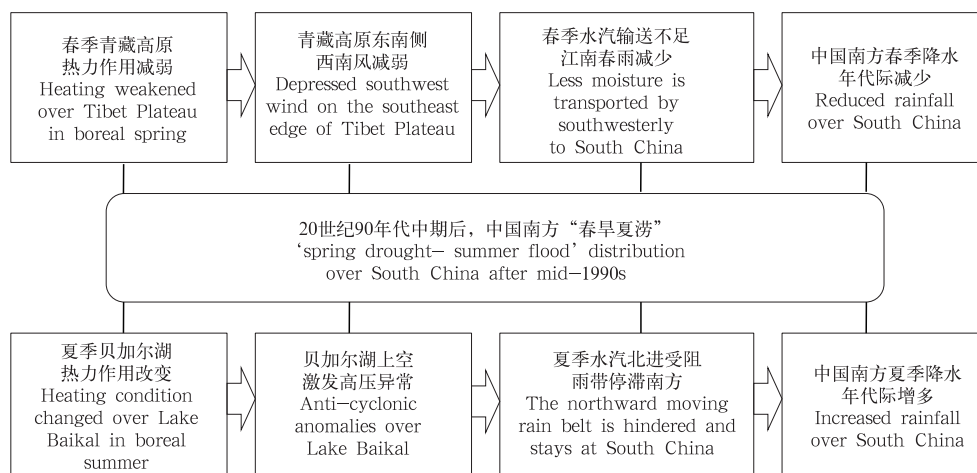


图 10 春夏季东亚大气环流年代际转折影响中国南方降水季节反向变化的机理
 Fig. 10 Possible mechanism for the seasonal out of phase decadal rainfall change over South China

6 结论与讨论

近 30 年来,东亚大气环流无论在春季还是在夏

季,于 20 世纪 90 年代中期都发生了明显的年代际转折,这种环流的年代际变化对中国南方降水时空分布有显著影响,东亚局地的大气视热源变化与此

次年年代际转折密切相关。

(1) 东亚春季和夏季大气环流存在明显的年代际变化,具体表现为经验正交函数分解春季第 1 模态与夏季第 2 模态都在 20 世纪 90 年代中期发生年代际转折。

(2) 中国南方降水在 20 世纪 90 年代中期发生季节反相的年代际变化:春季降水减少,夏季降水增多。中国南方春季降水减少是与春季东亚大气环流第 1 模态年代际转折联系密切,夏季降水增多是与夏季东亚大气环流第 2 模态的年代际转折相联系的。

(3) 春季青藏高原大气热源年代际减弱,在高原上空产生高压异常,使其东南侧西南风减弱,中国南方地区水汽输送不足,导致南方降水减少;夏季贝加尔湖大气热源偶极型分布发生年代际变化,由“南负北正”,转变为“南正北负”,由此激发年代际异常反气旋使夏季雨带北推受阻停滞在南方,导致南方降水增多。

本文从春夏东亚大气环流主模态特征出发,分析其年代际转折及相应中国南方降水的春夏季节性反相变化,利用东亚区域性大气热力作用的改变解释了大气环流年代际转折的原因。需要说明的是,本文所得的结果均是建立在对同期环流诊断分析的基础上。那么春季高原和夏季贝加尔湖热力作用的改变又是如何产生的?又有哪些前期影响因子在起作用?实际上,作为大的下垫面强迫,热带太平洋、印度洋海温以及北极海冰在近 30 年同样有很明显的年代际变化,这为研究东亚地区局地热力状况的改变提供了一些思路和线索,值得进一步深入研究。在后续的工作中,将运用数值模拟试验对诊断分析所得结论加以验证,并综合全球变暖背景下热带海表温度、北极海冰等外强迫因子的变化,进一步探索东亚大气环流年代际变化的机理。

致谢:感谢南京信息工程大学张文君博士和祁莉博士的有益建议。

参考文献

- 何金海, 赵平, 祝从文等. 2008. 关于东亚副热带季风若干问题的讨论. 气象学报, 66(5): 683-696
- 万日金, 吴国雄. 2008. 江南春雨的时空分布. 气象学报, 66(3): 310-319
- 徐康, 何金海, 祝从文. 2011. 近 50 年中国东部夏季降水与贝加尔

- 湖地表气温年代际变化的关系. 气象学报, 69(4): 570-580
- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. J Geophys Res, 112(C11007), doi: 10.1029/2006JC003798
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. J Climate, 13(24): 4326-4340
- Cohen J, Barlow M. 2005. The NAO, the AO, and global warming: How closely related? J Climate, 18(21): 4498-4513
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. Int J Climatol, 28(9): 1139-1161
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II: Possible causes. Int J Climatol, 29(13): 1926-1944, doi:10.1002/joc.1759
- Dong B W, Sutton R T, Scaife A A. 2006. Multidecadal modulation of El Niño-Southern oscillation (ENSO) variance by Atlantic Ocean sea surface temperatures. Geophys Res Lett, 33(8): L08705, doi:10.1029/2006GL025766
- Duan A M, Wu G X. 2008. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan plateau during recent decades. Part I: Observations. J Climate, 21(13): 3149-3164
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. 2006. Global temperature change. Proc Natl Acad Sci, 103(39): 14288-14293
- Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. J Climate, 22(3): 615-632
- Kwon M H, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s. Geophys Res Lett, 34(21): L21706, doi:10.1029/2007GL031977
- Latif M, Kleeman R, Eckert C. 1997. Greenhouse warming, decadal variability, or El Niño An attempt to understand the anomalous 1990s. J Climate, 10(9): 2221-2239
- Lu R Y, Ye H, Jhun J G. 2011. Weakening of interannual variability in the summer East Asian upper-tropospheric westerly jet since the mid-1990s. Adv Atmos Sci, 28(6): 1246-1258, doi: 10.1007/s00376-011-0222-5
- Li T, Zhang Y S, Chang C P, et al. 2001. On the relationship between Indian Ocean sea surface temperature and Asian summer monsoon. Geophys Res Lett, 28(14): 2843-2846
- Wang B. 1992. The vertical structure and development of the ENSO anomaly mode during 1979-1989. J Atmos Sci, 49(4): 698-712
- Wang B, An S. 2002. A mechanism for decadal changes of ENSO behavior: Roles of background wind changes. Climate Dyn, 18(6): 475-486
- Wang B, Huang F, Wu Z W, et al. 2009. Multi-scale climate variability of the South China Sea monsoon: A review. Dyn Atmos Oceans, 47(1-3): 15-37, doi:10.1016/j.dynatmoce.09.004

- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s. *Adv Atmos Sci*, 18(3): 376-386
- Weng H, Ashok K, Behera S K. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific Rim during boreal summer. *Climate Dyn*, 29(2-3): 113-129
- Wu B Y, Zhang R H, Wang B, et al. 2009. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall. *Geophys Res Lett*, 36(9): L09501, doi: 10.1029/2009G.L037299
- Wu G X, Liu Y M, He B, et al. 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon. *Sci Rep* 2, (404), doi: 10.1038/srep00404
- Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, et al. 2012a. Modulation of the Tibetan Plateau snow cover on the ENSO teleconnections: From the East Asian summer monsoon perspective. *J Climate*, 25(7): 2481-2489
- Wu Z W, Jiang Z H, Li J P, et al. 2012b. Possible association of the western Tibetan Plateau snow cover with the decadal to interdecadal variations of northern China heatwave frequency. *Climate Dyn*, 39(9-10): 2393-2402
- Yanai M, Li C, Song Z. 1992. Seasonal heating of the Tibetan plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 70(1): 319-350
- Yang F L, Lau K M. 2004. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: Linkage to sea surface temperatures. *Int J Climatol*, 24(13): 1625-1644
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature*, 461(7263): 511-514
- Zhao P, Song Y, Yu R C. 2010. Long-term changes in rainfall over Eastern China and large-scale atmospheric circulation associated with recent global warming. *J Climate*, 23(6): 1544-1562
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J Climate*, 10(5): 1004-1020
- Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 52(11): 1679-1693
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation. *Climate Dyn*, 36(7-8): 1463-1473
- Zhu Z W, He J H, Qi L. 2012. Seasonal transition of East Asian subtropical monsoon and its possible mechanism. *J Trop Meteor*, 18(3): 305-313